

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

IX Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2013

Международная научная конференция

СибОптика-2013

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2013

УДК 535

Ответственные за выпуск:

Генеральный директор холдинга «Швабе»
С.В. Максим

Генеральный директор ОАО «НПЗ», Новосибирск
С.Н. Жиров

Доктор технических наук, профессор,
директор Конструкторско-технологического института
научного приборостроения СО РАН, Новосибирск
Ю.В. Чугуй

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
заместитель директора ИАиЭ СО РАН, Новосибирск
С.А. Бабин

Кандидат технических наук,
генеральный директор ОАО «ЦКБ Точприбор», Новосибирск
Е.А. Терёшин

Кандидат технических наук, профессор,
директор Института оптики и оптических технологий СГГА, Новосибирск
О.К. Ушаков

Кандидат технических наук, заместитель директора
Института оптики и оптических технологий СГГА, г. Новосибирск
П.В. Петров

C26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр., 15–26 апреля 2013 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 319 с.

ISBN 978-5-87693-618-9 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-615-8

ISBN 978-5-87693-610-3

В сборнике опубликованы материалы IX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013», представленные на Международной научной конференции «СибОптика-2013».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-618-9 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-615-8

ISBN 978-5-87693-610-3

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2013

Сборник включен в систему РИНЦ.

О ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ ДЛЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Диана Георгиевна Макарова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

В статье рассмотрены варианты технологий изготовления оптических деталей, выполненных из различных оптических материалов, работающих в субмиллиметровом диапазоне спектра.

Ключевые слова: технология изготовления оптических деталей, субмиллиметровый диапазон длин волн.

ABOUT THE CHOICE OF TECHNOLOGY OF FORMING SURFACES OF LENSES FOR SUBMILLIMETER WAVELENGTH RANGE

Diana G. Makarova

The Siberian state academy of geodesy, the post-graduate student of faculty of Nanosystems and optotechnics, 630108, Russia, Novosibirsk, Plachotnogo 10, ph. (383) 343-91-11; e-mail: diana_ssga@mail.ru

The article considers the technology of the production of optical components made of optical materials, working in the submillimeter range of the spectrum.

Key words: technology of manufacture of the optical components, a submillimetric range of lengths of waves.

Недавнее падение Чебаркульского (Челябинского) метеорита, а главное внезапность его появления, показало всю опасность космической угрозы для населения Земли. В последние годы исследования и строительство телескопов для субмиллиметрового диапазона спектра позволило «видеть» через пылегазовые области, не прозрачные для телескопов визуального диапазона спектра.

Создание гигантских телескопов наземного базирования (E-ELT или TMT), или же новых концепций космических телескопов, как, например, Джеймс Вебб (наследник телескопа Хаббл), невозможно без новых технологических подходов и нового обрабатывающего оборудования. Например, компания OptoTech взяла на себя задачу разработать новое поколение станков для обработки астрооптики. Был создан уникальный обрабатывающий центр, объединяющий в себе 4 ключевых особенности: прецизионная шлифовка алмазным инструментом, интегрированная прецизионная измерительная система для шлифованных поверхностей, высокопроизводительная полировка шаровым инструментом, а также сглаживающая полировка и доводка субапертурным инструментом, интегрированный интерферометр для контроля полированных поверхностей. Оптика получается с высокими качественными показателями, детали получаются

уникальными, стоимость подобных оптических элементов высока и недоступна для широкого использования. В России аналогичную оптику производит фирма Tydexoptics [1].

Создание глобальной системы оповещения о космической опасности довольно сложная проблема. Решить её с помощью только мощных телескопов астрономических обсерваторий вряд ли возможно. Для этой цели требуется привлечение армии астрономов-любителей, организации системы их наблюдений и оснащение их современным специализированным оборудованием. Свои возможности в открытии и изучении малых космических объектов астрономы-любители хорошо доказали.

Важной проблемой является разработка компактных приемников излучения для субмиллиметрового диапазона спектра. Работы в этом направлении ведутся НИИФП, НГУ СОРАН РФ [2]. Прогнозируется создание в ближайшем будущем компактных и доступных приемников излучения для терагерцового диапазона спектра, включающего в себя субмиллиметровую область. Например, в НИИФП разработан неохлаждаемый матричный приемник излучения по кремниевой технологии, работающий в диапазоне длин волн 3-14 мкм и 200-3000 мкм (одновременно).

Задачей настоящего исследования является выбор оптимальных технологических процессов для серийного изготовления оптических элементов из кремния, кварца и полиэтилена. Сделать доступными подобные линзы является актуальным для развития любительской астрономии. Это позволит астрономам, обладающим телескопом для работы в визуальном диапазоне спектра, усовершенствовать его при помощи линзы или системы линз, для работы в субмиллиметровом диапазоне спектра.

В работе [3] был проведен расчет типовой схемы астрообъектива Ричи-Кретьена с полевыми компенсаторами одной оптической силы, выполненными из разных оптических материалов прозрачных в субмиллиметровом диапазоне спектра. У выбранных материалов для полевых компенсаторов численные значения показателя преломления значительно разнесены. В табл. 1 приведены конструктивные параметры оптических элементов полевых компенсаторов из разных материалов.

Таблица 1

Конструктивные параметры оптических элементов

Материал линзы	Радиусы	$n_{\lambda=200\text{мкм}}$	Оптическая сила
Кремний	$r_1 = -121,80$	3,4165	-0,000112
	$r_2 = -125,46$		
Кварц плавный	$r_1 = -115,00$	2,1170	-0,000112
	$r_2 = -118,11$		
Полиэтилен	$r_1 = -81,77$	1,5137	-0,000112
	$r_2 = -84,02$		

С помощью пакета прикладных программ Synopsys был произведен расчет допусков на изготовление линз полевого корректора, выполненных из материалов с разными физико-химическими свойствами – кремния, кварца, полиэтилена, с учетом конструктивных параметров, приведенных в табл. 1. При расчете допусков на оптические поверхности для всех вариантов применялся единый критерий качества - дифракционный размер абберационного кружка для длины волны $\lambda=200\text{мкм}$. Допуски на оптические поверхности и толщину линзы по оси приведены в табл. 2.

Таблица 2

Допуски на радиусы поверхностей и толщину линзы по оси

№ поверхн.	Радиусы	Допуск на радиус		Толщина	Допуск, мм
		мм	кольца		
Кремний					
4	- 121,80	0,129	18,2	7	0,01
5	- 125,46	0,131	18,6		
Кварц плавленный					
4	- 115,00	0,119	18,6	7	0,01
5	- 118,11	0,123	18,9		
Полиэтилен					
4	- 81,77	0,059	18,7	7	0,01
5	- 84,02	0,064	19,2		

Численные значения допусков на сферические преломляющие поверхности довольно велики и значительно выше допусков, назначаемых при операции шлифование. Это позволяет предположить возможность замены операции шлифование на другие менее трудоемкие операции.

Технологии формообразования преломляющих поверхностей оптических деталей в субмиллиметровом диапазоне спектра в зависимости от выбранного материала и серийности производства могут сильно отличаться. Физико-химические свойства материалов, применяемых в субмиллиметровом диапазоне, настолько разнообразны, что позволяют применять операции чистового точения, фрезерование алмазной сферической фрезой и литье под давление в пресс-форму. Таким образом, выбор оптического материала повлечет за собой выбор технологии изготовления, что в итоге скажется на себестоимости оптических деталей.

На основе полученных данных были выбраны технологии формообразования преломляющих поверхностей оптических деталей, оборудование, инструменты, а также определено время на изготовление одной поверхности в нормочасах (табл. 3).

**Сравнительные параметры оборудования
и технологических процессов формообразования**

Технология формообразования по- верхн.	Материал детали		
	Кремний HRFZ-Si	Кварц плавный	Полиэтилен
Метод изготовления	Точение	Фрезерование	Горячее прессование
Оборудование	Токарный ОЦ с ЧПУ NL1005H	Вертикальные фрезерные ОЦ EMCOMILL E600	Термопласт- автомат LOG90
Инструмент	Резец фасонный	Фреза сферическая алмазная	Пресс-форма
Точность обработки, мкм	± 1	± 1	± 1
Примерное время изго- товления одной по- верхн., н/ч	0,2	0,1	0,1
Стоимость материала заготовки, руб/кг	19000	4000	5000

На основе полученных результатов можно сделать некоторые выводы:

- развитие современных технологий в электронике позволяет надеяться на появление в ближайшие годы компактных и недорогих приемников излучения субмиллиметрового диапазона спектра;
- разработка оптической элементной базы для субмиллиметрового диапазона спектра требует оптимизации технологии формообразования преломляющих поверхностей с учетом свойств материалов и серийности производства;
- величины допусков позволяют использовать на первом этапе формообразования поверхностей операции точение, фрезерование и горячее прессование;
- возможность исключения из технологии изготовления деталей таких энергоемких и затратных операций, как шлифование и полирование, потребует дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ТГц линзы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/z_Lenses.pdf.
2. Кузнецов С.А., Федорин В.Н. Матричный приемник терагерцового излучения (патент № 2414688) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2414688#formula>
3. Макарова Д.Г., Ефремов В.С. Коррекционные свойства полевого компенсатора астрообъектива в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Интерэкспо Гео-Сибирь-2012, С. 116-120.

© Д.Г. Макарова, 2013

ЖИДКИЕ ЛИНЗЫ – НОВАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ОПТИЧЕСКИХ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Андрей Вячеславович Голицын

Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Николаева, д. 8, заведующий отделом моделирования оптико-электронных приборов, тел. (383) 333–17–01, e-mail: golitsyn@oesd.ru

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Игорь Олегович Михайлов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: mio@sibmail.ru

Наталья Вадимовна Орекова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, старший преподаватель кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Борис Викторович Федоров

Отделение Секции Прикладных проблем при Сибирском Отделении РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Терешковой, д. 30, кандидат технических наук, начальник отделения, тел. (383) 330-71-46, e-mail: spp@ad-sbras.nsc.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

Обсуждаются возможности использования новых компонентов на основе оптических жидкостей, обеспечивающих возможность управляемого изменения фокусного расстояния оптических систем. Приводятся результаты анализа патентной и научно-технической литературы в части способов формирования жидких линз и управления их оптическими параметрами.

Ключевые слова: жидкая линза, оптико-электронная система, оптическая система, переменное фокусное расстояние, радиус кривизны.

LIQUID LENSES AS THE NEW OPTICAL ELEMENT BASE FOR OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES

Andrey V. Golitsyn

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics», 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 Lavrentiev avenue, tel. (383) 333–17–01, e-mail: golitsyn@oesd.ru

Victor S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Igor O. Mikhailov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: mio@sibmail.ru

Natalia V. Orevkova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, senior teacher, of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Boris V. Fedorov

Branch of the section of applied problems of the SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 30, Tereshkovo, Candidate of Technical Science, tel. (383) 330-71-46, e-mail: spp@ad-sbras.nsc.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Photogrammetry and Remote Sensing devices department, tel. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

The possibility of using new components based on optical liquids is discussed. These components give the opportunity to control the focal length of optical systems. The analytic review of patent and scientific and technical literature on ways of constructing liquid lenses and controlling their optical parameters is given.

Key words: liquid lens, optoelectronic system, optical system, variable focal length, radius of curve.

Жидкие (или жидкостные) линзы (ЖЛ), в отличие от обычных твердотельных, позволяют при определенных условиях в значительных пределах изменять свое фокусное расстояние. Это уникальное свойство существенно расширяет функциональные возможности оптических систем в реальном времени, что немаловажно для адаптивной оптики. Кроме того, появляется возможность использования одной управляемой ЖЛ вместо нескольких твердотельных.

В последние годы ЖЛ заинтересовался ряд крупных компаний, занимающихся информационными технологиями и видеотехникой. В частности, компания Philips анонсировала оптическую систему «Fluid Focus», работающую за счет изменения электрического потенциала, приложенного к гидрофобному покрытию. Размеры опытного образца «Fluid Focus» составили несколько миллиметров, диапазон перестройки фокусного расстояния – от 50 мм до бесконечности, время перестройки – менее 10 мс. Разработкой аналогичных систем занимаются также компании Bell Labs, Varioptic и др.

Преимущества ЖЛ в значительной степени справедливы и в микрометровой области размеров. МикроЖЛ могут найти себе применение в различных оптических устройствах, как более компактные и простые объективы. Например, малый размер микрокамер позволит использовать их в качестве фото-

и видеокамер, в сверхминиатюрных (менее 100 мм) беспилотных летательных аппаратах и др.

В связи с успехами в области нанотехнологий и нанотехники представляется целесообразным миниатюризировать ЖЛ для создания интеллектуальных наносистем, т. е. интегрировать сенсорную, логически-аналитическую, двигательную и исполнительную функции в одном устройстве. В вопросе применения нанотехнологий к ЖЛ можно выделить два направления:

1. Максимально возможное и, вместе с тем, оптимальное уменьшение размеров ЖЛ. Если линза используется в качестве объектива к цифровой матрице, то все элементы камеры (ЖЛ, управляющие элементы, электрические контакты, ПЗС-матрица, фильтры) должны располагаться на одном чипе для повышения надежности, быстродействия, уменьшения цены и размера.

2. Применение наноматериалов для повышения характеристик ЖЛ. Например, для ЖЛ с гидравлическим управлением параметров необходима прозрачная, упругая, эластичная пленка (мембрана), которая в микроЖЛ должна будет иметь определенную толщину и структуру.

В 2012 г. научно-исследовательской лабораторией перспективных оптико-электронных систем и технологий НИС ФГБОУ ВПО «СГГА» проведены патентно-информационные исследования по использованию жидкостей в составе оптических компонентов оптико-электронных систем различного назначения. Основной задачей ставилось получение исходных данных для определения перспектив и направления развития ЖЛ: их применения, назначения, устройства, материалов, приводов и управления формой поверхности, а также уровня техники, использующей такую элементную базу. Общая глубина поиска по источникам патентной и научно-технической информации составила 20 лет, по ведущим странам – 10 лет, что обусловлено быстрым обновлением высокотехнологичной элементной базы. Было выявлено заявок и патентов: США – 1 822, Европатент – 255, Япония – 161, Россия (СССР) – 25, WIPO(PCT) – 483. Проведен анализ источников научно-технической информации в количестве 106 источников.

К настоящему времени предложены и испытаны различные принципы формирования ЖЛ и способы управления их основными оптическими параметрами (радиусами кривизны и фокусным расстоянием): 1) на гидравлической основе [1 – 6], 2) на управляемых жидких кристаллах [7 – 13], 3) на центробежном эффекте, 4) с механическим изменением диаметра [14], 5) с использованием действия внешнего электрического поля, 6) на эффекте электросмачивания [15 – 19].

Перечисленные принципы и способы непосредственно влияют и на конструкцию линзы: ЖЛ, построенные на принципах 1), 3) и 4), требуют применения эластичных мембран, а у ЖЛ, построенных на принципах 2), 5) и 6), сферическая преломляющая поверхность располагается между двух защитных стекол.

В качестве примера на рис. 1, а показана принципиальная конструкция ЖЛ на гидравлической основе.

Камера 1 покрыта прозрачными эластичными мембранами 2 и заполнена оптически прозрачной жидкостью 3. Давление в камере управляется поршнем 4.

Физические свойства жидкости и мембраны позволяют формировать сферическую поверхность ЖЛ от выпуклой (рис. 1, б) до вогнутой (рис. 1, в).

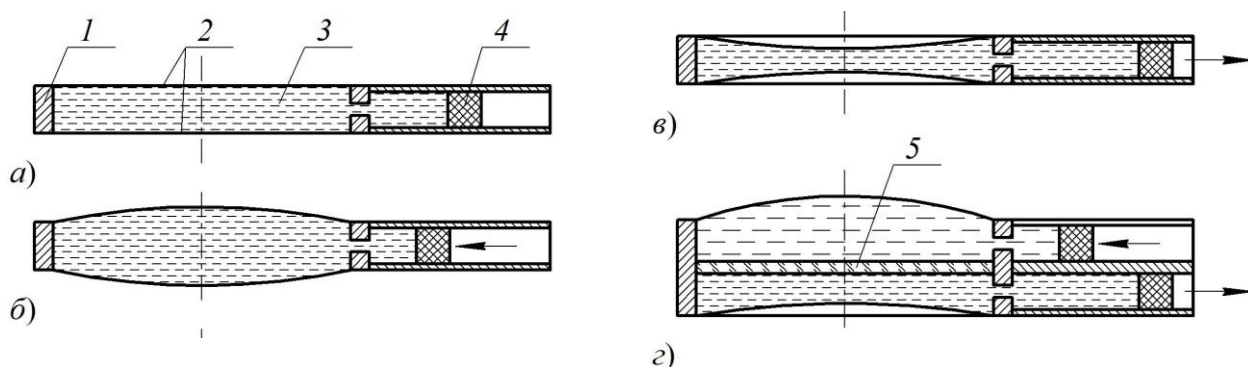


Рис. 1. ЖЛ на гидравлической основе: 1 – корпус (оправа), 2 – мембрана, 3 – оптическая жидкость, 4 – поршень, 5 – разделительное стекло

Недостатком конструкции является равенство радиусов r_1 и r_2 кривизны поверхностей ЖЛ по номиналу и противоположность их по знаку (коэффициент связи поверхностей $r_1/r_2 = -1$). Влиять на значения радиусов противоположных поверхностей здесь возможно выбором либо толщины мембраны, либо упругости ее материала. Но, так или иначе, коэффициент связи поверхностей останется отрицательным, что не позволяет получить линзы менискового типа.

Если камеру разделить на две части при помощи стекла 5, как показано на рис. 1, г, и управлять давлением в каждой из камер независимо друг от друга, то получается ЖЛ, способная совмещать в себе все типы линз. В этом случае показатели преломления жидкостей в камерах могут быть разными, и система становится достаточно универсальной.

Изменение увеличения, даваемого подобной ЖЛ, демонстрирует рис. 2.

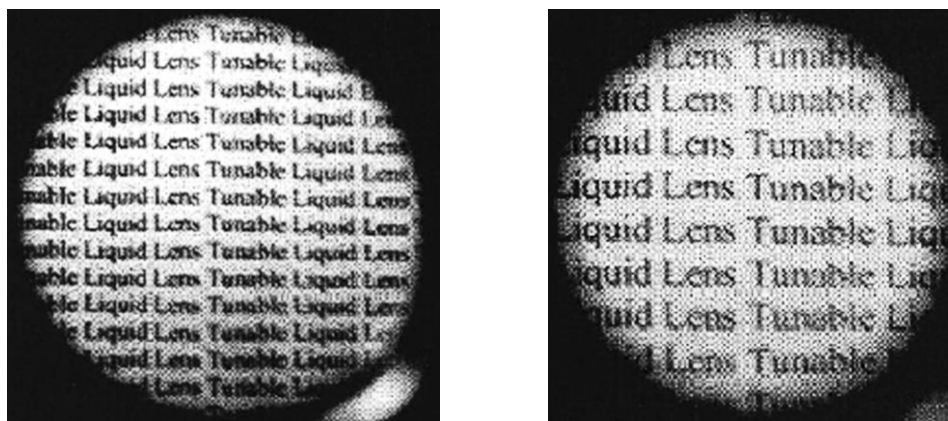


Рис. 2. Изображения с различным увеличением, даваемые ЖЛ из этанола при изменении ее фокусного расстояния

Существенным ограничением в применении ЖЛ относительно большого диаметра является ориентация в пространстве ее оптической оси. Только если ось ЖЛ перпендикулярна поверхности Земли, ее сферическая преломляющая

поверхность будет симметрична относительно оси. Во всех остальных случаях гравитация Земли будет искажать форму поверхности ЖЛ и ухудшать качество даваемого ей изображения; наибольшие искажения будут наблюдаться при ориентации оптической оси параллельно поверхности Земли.

Результаты проведенных исследований следует рассматривать как начальную часть работы по обоснованию и выбору наиболее эффективных методических и технических решений по применению ЖЛ в изделиях различного (в том числе, двойного) назначения, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, а также разработке предложений по рациональному развитию новой элементной базы в интересах различных заказчиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang, D.-Y. Fluidic Adaptive Lens with High Focal Length Tunability / D.-Y. Zhang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2003. – vol. 82. – pp. 3171-3172.
2. Moran, P. M. Fluidic Lenses with Variable Focal Length / P. M. Moran [et al.] // Applied Physics Letters. – 2006. – vol. 88. – pp. 041120-1-041120-3.
3. Chronis, N. Tunable Liquid-filled Microlens Array Integrated with Microfluidic Network / N. Chronis [et al.] // Optics Express. – 2003. – vol. 11. – pp. 2370-2379.
4. Agarwal, M. Polymer-based Variable Focal Length Microlens System / M. Agarwal [et al.] // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2004. – vol. 14. – pp. 1665-1673.
5. Ren, H. Variable-focus liquid lens / H. Ren, S.-T. Wu // OPTICS EXPRESS. – 2007. – vol. 15(10). – p. 5931-5936.
6. Pouydebasque, A. Thin varifocal liquid lenses actuated below 10V for mobile phone / A. Pouydebasque [et al.] // Proc. of SPIE. – 2012. – vol. 8252. – pp. 82520P-1-82520P-11.
7. Sato, S. Liquid-crystal Lens-cells with Variable Focal Length / S. Sato // Japanese Journal of Applied Physics. – 1979. – vol. 17. – pp. 1679-1684.
8. Commander, L. G. Variable Focal Length Microlenses / L. G. Commander, S. E. Day, D.R. Selviah // Optics Communications. – 2000. – vol. 177. – pp. 157-170.
9. Г.В. Вдовин. Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием. I. Теория // Г.В. Вдовин, И.П. Гуральник, С.П. Котова, М.Ю. Локтев, А.Ф. Наумов. Квантовая электроника. 26, №3, 1999 с. 256 – 260.
10. Kowel S.T., Cleverly D.S. Proc. of NASA Con. (Virginia, USA, 1981, p. 329).
11. Chan W.W., Kowel S.T. Appl. Optics, 36, 8958 (1997).
12. Nose T., Masuda S., Sato S. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 199, 27 (1991).
13. Nose T., Masuda S., Sato S. JpnJ. Appl. Phys, 31, 1643 (1992).
14. Ren, H. Variable-focus liquid lens by changing aperture / H. Ren, Sh.-T. Wu // Applied Physics Letters. – 2005. – vol. 86.
15. Chiou, P. Y. Light actuation of liquid by optoelectrowetting / P. Y. Chiou [et al.] // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – vol. 104(3). – p. 222-228.
16. Gabay, C. Dynamic Study of a Varioptic Variable Focal Lens / C. Gabay [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2002. – vol. 4767m. – pp. 159-165.
17. Kuiper, S. Variable-focus liquid lens for miniature cameras / S. Kuiper, B. H. W. Hendriks // Applied Physics Letters. – 2004. – vol. 85(7). – p. 1128-1130.
18. Hendriks, B. H. W. Electrowetting-Based Variable-Focus Lens for Miniature Systems / B. H. W. Hendriks [et al.] // Optical Review. – 2005. – vol. 12(3). – p. 255-259.
19. Park J. A liquid lenses based on electrowetting: A Thesis ... the degree of Master of Science in Electrical Engineering. Louisiana. 2007. – 65 p.

© А.В. Голицын, В.С. Ефремов, И.О. Михайлов,
Н.В. Оревова, Б.В. Федоров, В.Б. Шлишевский, 2013

ЖИДКОЛИНЗОВЫЙ КОНДЕНСОР

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Игорь Олегович Михайлов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: mio@sibmail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

Обсуждаются возможности использования новых компонентов на основе оптических жидкостей, обеспечивающих возможность управляемого изменения фокусного расстояния оптических систем. Приводятся результаты расчета двухлинзового жидкостного конденсора для трех фокусных расстояний и сравнения его с параметрами двухлинзового конденсора.

Ключевые слова: жидкая линза, оптическая система, переменное фокусное расстояние, радиус кривизны.

LIQUID LENSES CONDENSOR

Victor S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Igor O. Mikhailov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: mio@sibmail.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakh otного, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Photogrammetry and Remote Sensing devices department, tel. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

The possibility of the use new component are Discussed on base of the optical liquids, providing possibility of the operated change the focal length of the optical systems. Happen to the results of the calculation two lens liquid condensor for three focal lengths and comparisons him with parameter two lens condensor.

Key words: liquid lens, optical system, variable focal length, radius of curve.

Жидкие (или жидкостные) линзы (ЖЛ), в отличие от обычных твердотельных, позволяют при определенных условиях в значительных пределах изменять свое фокусное расстояние. Это замечательное свойство существенно расширяет функциональные возможности оптических систем в реальном времени, что немаловажно для адаптивной оптики.

Для задач подсветки объектов разрабатываются адаптивные жидколинзовые оптические системы с изменяемым углом расходимости излучения [1]. Эту задачу возможно решить с использованием одной управляемой системой ЖЛ вместо нескольких твердотельных систем конденсоров. Положительным фактором будет снижение массогабаритных характеристик всего изделия. В таблице приведены параметры жидколинзового конденсора для подсветки находящегося на разных расстояниях объекта.

Таблица

Параметры жидколинзового конденсора

Параметры	Размер объекта 1,75 м		
Угол расходимости излучения, рад	0,0175	0,0117	0,0058
Фокусное расстояние, мм	100	150	300

На рис. 1 показана типовая конструкция двухлинзового жидкостного конденсора, состоящая из положительной плосковыпуклой линзы и положительного мениска, составленного из положительной плосковыпуклой линзы и отрицательной плосковогнутой линзы. В качестве преломляющей жидкости используется 1-бромнафталан с показателем преломления 1,6582. Материалом мембран ЖЛ служит силикон (смесь фенила и гептила) с показателем преломления 1,501. Изменение радиусов кривизны поверхностей в данной конструкции достигается изменением давления жидкости в камерах.

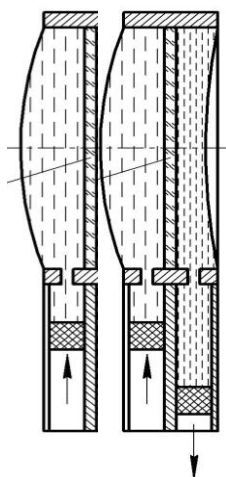
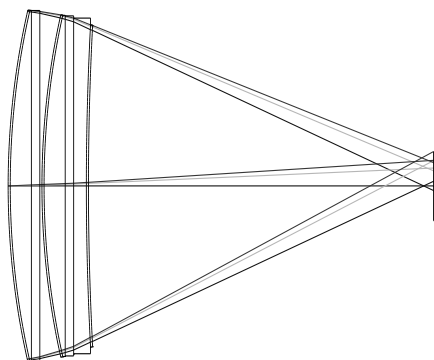


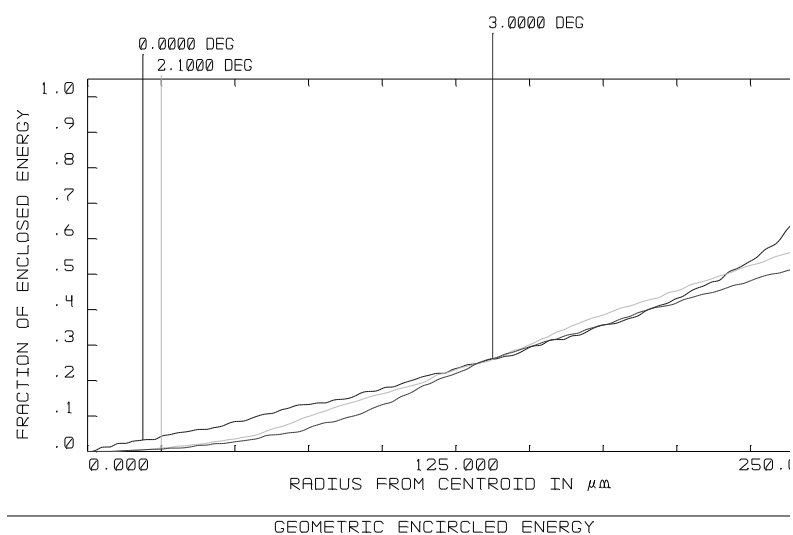
Рис. 1. Типовая конструкция двухлинзового жидкостного конденсора

На рис. 2 приведены оптические схемы и графики концентрации энергии в абберрационном пятне рассеяния жидколинзовых конденсоров с разными фокусными расстояниями и относительными отверстиями.

$f' = 100 \text{ мм}, D/f' = 1 : 1,5$

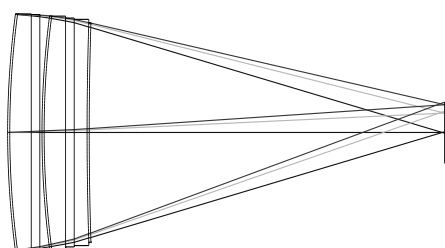


a)

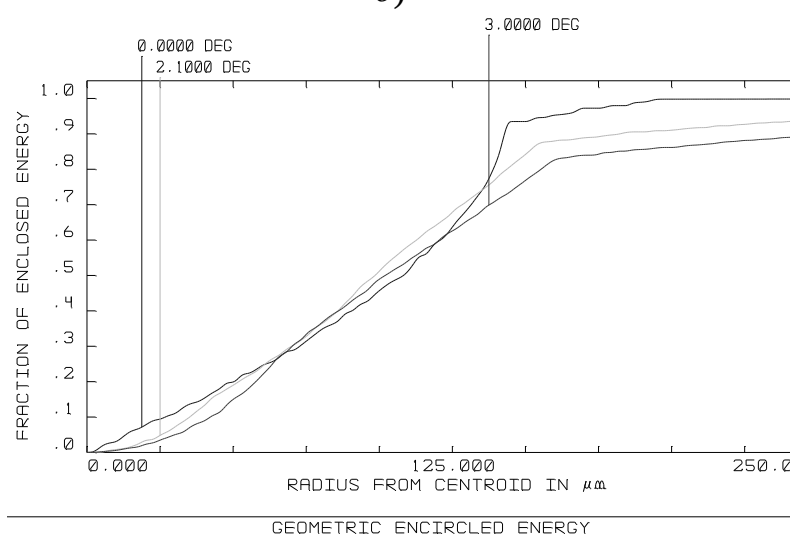


б)

$f' = 150 \text{ мм}, D/f' = 1 : 2,4$

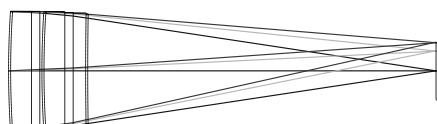


в)

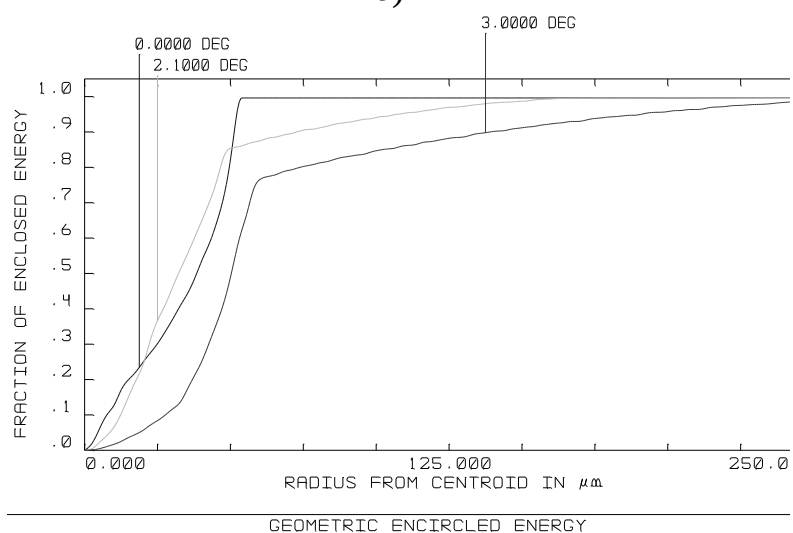


г)

$f' = 300 \text{ мм}, D/f' = 1 : 4,145$



д)



е)

Рис. 2. Двухжидколинзовые конденсоры: а), в), д) – оптические схемы, б), г), е) – графики концентрации энергии в абберационном пятне рассеяния

Для сравнения на рис. 3 приведены оптическая схема и график концентрации энергии в абберационном кружке рассеяния двухлинзового стеклянного (стекло марки СТК3) конденсора; показатель преломления стекла для длины волны 850 нм равен 1,6595, т. е. достаточно близок к показателю преломления 1-бромнафталана. По качеству изображения эти системы сравнимы.

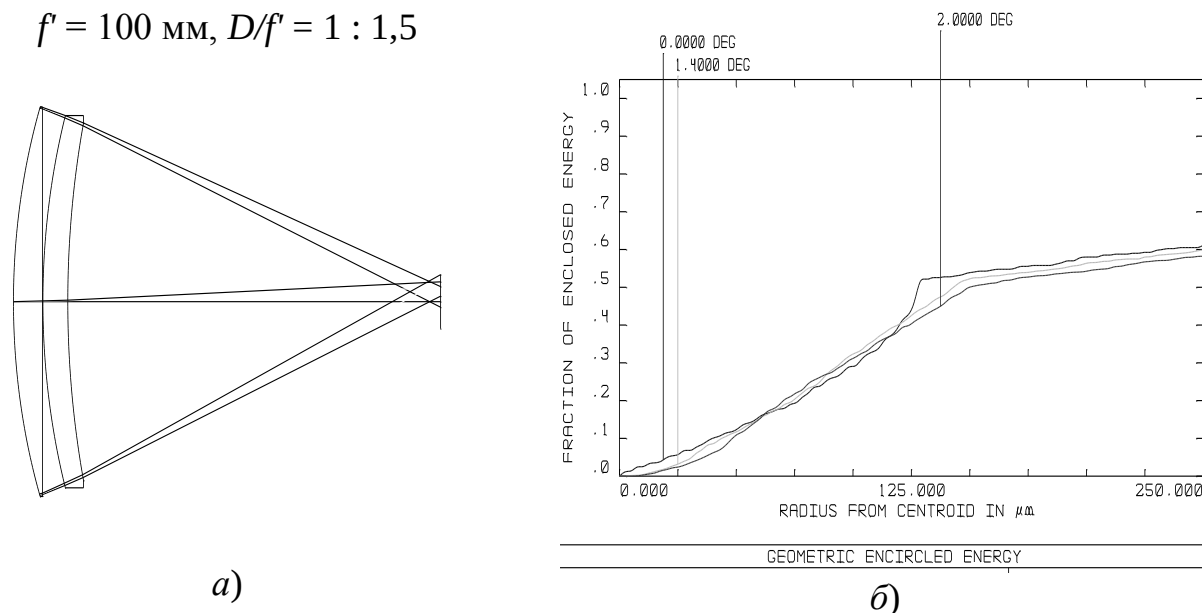


Рис. 3. Двухлинзовый конденсор: а) – оптическая схема, б) – график концентрации энергии в абберационном пятне рассеяния

Результаты проведенных расчетов показали возможность разработки оптических систем на основе ЖЛ для решения задач подсветки объектов при различных углах расходимости излучения. Исследование иных принципов построения ЖЛ конденсоров позволит оптимизировать задачи подсветки объектов и конструкций ЖЛ конденсоров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang, D.-Y. Fluidic Adaptive Lens with High Focal Length Tunability / D.-Y. Zhang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2003. – vol. 82. – pp. 3171–3172.

© В.С. Ефремов, И.О. Михайлов, В.Б. Шлишевский, 2013

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ЖИДКОЛИНЗОВАЯ СИСТЕМА ИЗМЕНЕНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ

Андрей Вячеславович Голицын

Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Николаева, д. 8, заведующий отделом моделирования оптико-электронных приборов, тел. (383) 333–17–01, e-mail: golitsyn@oesd.ru

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Татьяна Владимировна Колмыкова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, бакалавр кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: tatya-kolmykova@yandex.ru

Обсуждаются возможности использования новых компонентов на основе оптических жидкостей, обеспечивающих возможность управляемого изменения фокусного расстояния оптических систем. Приводятся результаты расчета двухкомпонентной жидколинзовой системы изменения увеличения.

Ключевые слова: жидкая линза, линзовая система изменения увеличения, оптическая система, переменное фокусное расстояние.

ZOOM LENS DESIGN WITH TWO LIQUID FILLED COMPONENTS

Andrey V. Golitsyn

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics», 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 Lavrentiev avenue, tel. (383) 333–17–01, e-mail: golitsyn@oesd.ru

Victor S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Tatyana V. Kolmykova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, bachelor, of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: tatya-kolmykova@yandex.ru

Opportunities of use of new components are discussed on the basis of the optical liquids providing an opportunity of controlled change of a focal length of optical systems. Results of calculation two-componental liquid lenses ZOOM systems are resulted.

Key words: liquid lens, ZOOM lens systems, optical system, variable focal length.

Системы изменения увеличения являются важной составной частью вариообъективов и трансфокаторов. Существующие методы разработки оптических систем с переменными характеристиками исходят из предположения, что оптические компоненты, образующие систему, имеют постоянные оптические силы во всем диапазоне изменения увеличения [1].

Известны два типа оптических систем изменения увеличения: с механическим способом компенсации смещения плоскости изображения и с оптическим способом компенсации смещения плоскости изображения. Первые системы имеют два подвижных компонента, а вторые – многокомпонентные (три и более компонентов). Переменное увеличение обеспечивается за счет осевого перемещения оптических компонентов. В механическом способе компенсации смещения плоскости изображения один из компонентов перемещается по линейному закону (с помощью винтового механизма), а второй – по нелинейному закону (с помощью кулачкового механизма). В оптическом способе компенсации смещения плоскости изображения все компоненты перемещаются по линейному закону. В итоге линейное увеличение системы – $\beta = F(a_1, d, a_2')$, а l , Φ_1 и Φ_2 – постоянные величины (l – расстояние между плоскостями предметов и изображений, Φ_1 и Φ_2 – оптические силы первого и второго компонентов системы изменения увеличения).

В последнее время повысился интерес к жидким (или жидкостным) линзам (ЖЛ), которые в отличие от обычных твердотельных линз, позволяют при определенных условиях изменять в значительных пределах свое фокусное расстояние.

Для ЖЛ, имеющих возможность изменять оптические силы Φ_2 и Φ_3 компонентов, ранее определенные законы изменения увеличения (фокусного расстояния) перемещением компонентов не подходят. В этих системах должны выполняться другие условия, например, $\beta = F(\Phi_1, \Phi_2)$ при l , a_1 , d и a_2' – постоянных. Поэтому разработка нового типа оптической системы вариообъектива требует создание новой методики расчета закона изменения β от комбинации оптических сил (Φ_1 и Φ_2) компонентов, входящих в систему изменения увеличения.

Традиционная схема компоновки вариообъектива в тонких компонентах (в виде главных плоскостей), представлена на рис. 1. По данной принципиальной схеме может быть разработан вариообъектив с жидколинзовой системой изменения увеличения.

Для построения компактной оптической схемы системы изменения увеличения введем некоторую нормировку: $a_1, d, a_2', l = \text{const}$.

Зададим численные значения: $a_1 = 100$, $d = 50$, $a_2' = 50$, $l = 0$.

В табл. приведены параметры жидколинзовой системы изменения увеличения для различных комбинаций фокусных расстояний при совмещенных плоскостях предметов (ПП) и изображений (ПИ), т.е. $l = 0$.

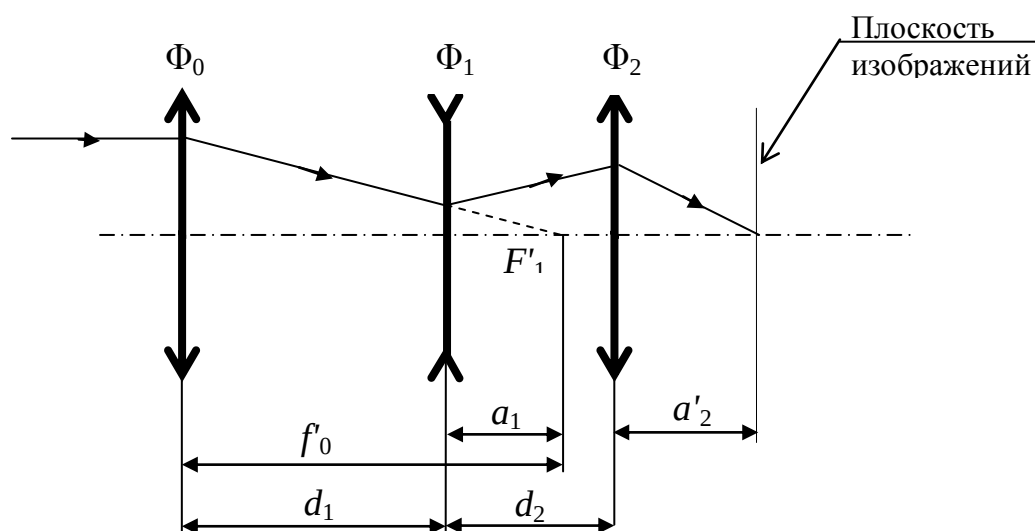


Рис. 1. Компоновка схемы вариообъектива в тонких компонентах

Таблица

Параметры жидколинзовой системы изменения увеличения

Комбинации фокусных расстояний	Фокусные расстояния компонентов, мм		Размер предмета y , мм	Размер изображения y' , мм	Линейное увеличение β
	f'_1	f'_2			
1	-25,0	31,2	10	1,995	0,1999
2	-35,0	33,0	10	2,598	0,2600
3	-50,0	37,3	10	3,305	0,3050
4	-75,0	44,0	10	4,314	0,4314
5	-100,0	49,8	10	4,976	0,4976
6	-150,0	62,6	10	6,010	0,6010
7	-200,0	74,6	10	6,643	0,6643
8	-250,0	87,3	10	7,135	0,7135

На рис. 2 приведены схемы компоновки жидколинзовой системы изменения увеличения (в тонких компонентах при $l = 0$) для трех комбинаций фокусных расстояний 2, 5, 8.

Результаты проведенных исследований показали принципиальную возможность разработки жидколинзовой системы изменения увеличения с перепадом увеличений не менее 3,6 крат. К особенностям жидколинзовой системы изменения увеличения следует отнести, что при обеспечении основного условия $a_1, d, a'_2, l = \text{const}$ фокусные расстояния оптических компонентов уменьшаются по абсолютной величине, а это приведет к увеличению их относительных отверстий и усложнению конструкции компонентов.

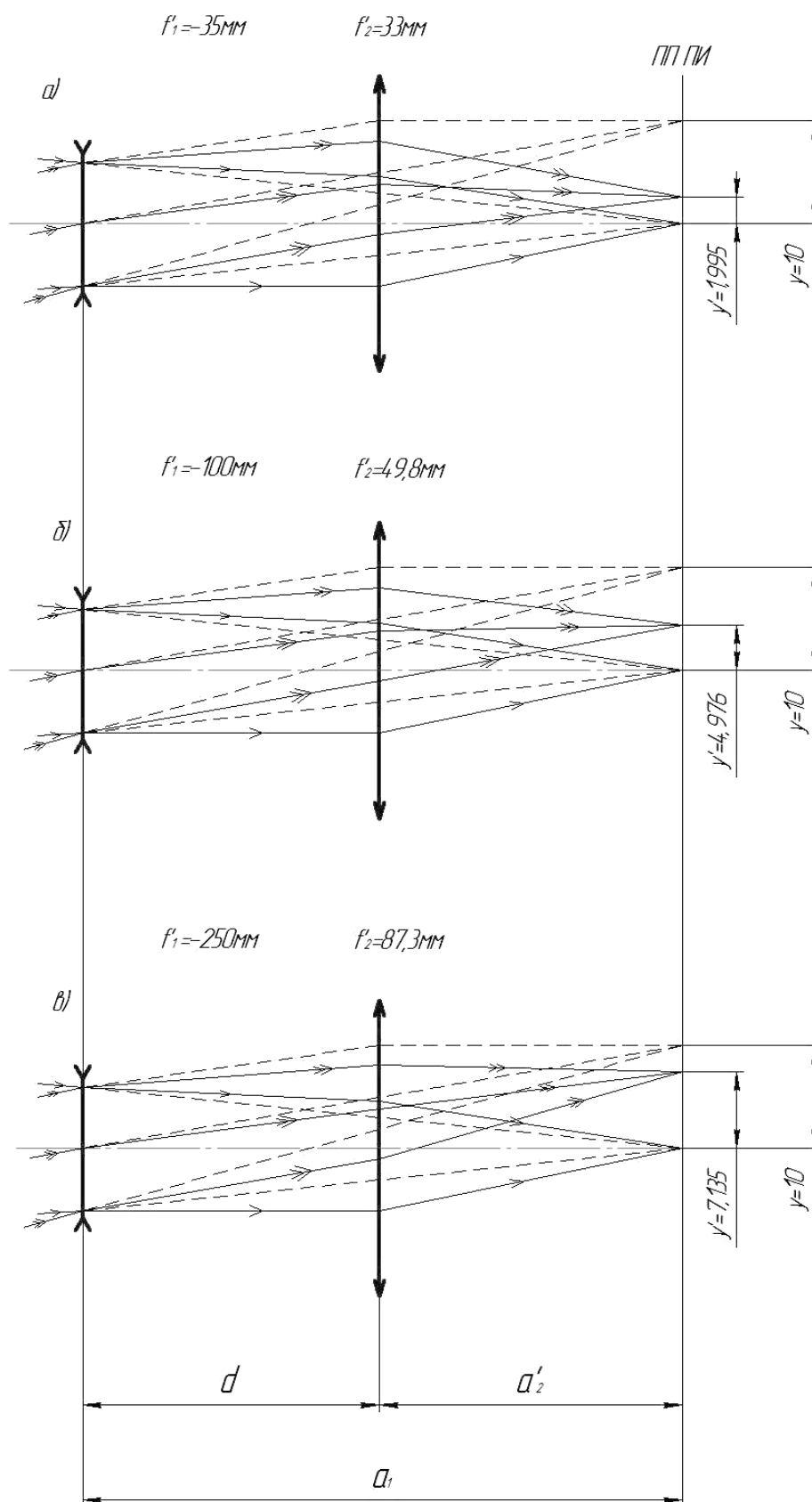


Рис. 2. Схема компоновки жидколинзовой системы изменения увеличения (в тонких компонентах): а) – $\beta = 0.2598$, б) – $\beta = 0.4976$, в) – $\beta = 0.7135$,
 — ход реальных лучей, — — — ход мнимых лучей

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русинов М.М. Вычислительная оптика [Текст]: Справочник. Изд. 2. / М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов, Л.Н. Андреев, Н.А. Агальцова, Г.Г. Ишанин, О.Н. Василевский, С.А.Родионов. – СПб. : Политехника, 2008. – 424 с.

© *А.В. Голицын, В.С. Ефремов, Т.В. Колмыкова, 2013*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ОПТОВОЛОКОННЫХ СХЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Илья Сергеевич Глебус

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, инженер, тел. (383) 306-62-08, e-mail: ilya-neo@ya.ru

Сергей Николаевич Макаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, старший научный сотрудник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-08, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

В статье рассмотрена проблема внутренних отражений оптоволоконных схем с перестраиваемым по оптической частоте когерентным источником излучения. Описана разработанная программа для моделирования данного типа схем; представлены примеры схем и результаты оптимизации их внутренних оптических отражений.

Ключевые слова: оптоволоконная схема, интерферометрический сигнал, матрица рассеяния, интерферометр Майкельсона.

SIMULATION OF INTERFEROMETRIC SIGNALS IN THE FIBRE-OPTICAL SCHEMES USING FREQUENCY-MODULATED RADIATION

Ilya S. Glebus

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Engineer, tel. (383) 306-62-08, e-mail: ilya-neo@ya.ru

Sergey N. Makarov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Senior scientist, tel. (383) 306-62-08, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

In article the internal reflections problem in the fibre-optical schemes using frequency-modulated coherent radiation is considered. The developed software for modeling this type of schemes is described; a few optical circuit examples are investigated and the internal reflections optimization results are presented.

Key words: fibre-optical scheme, interferometric signal, scattering matrix, Michelson interferometer.

1. Введение

В интерферометрических оптоволоконных схемах [1] существует проблема множественных паразитных внутренних отражений от оптических неоднородностей схемы. Такими неоднородностями могут быть, например, оптические соединения (разъёмы, места сварки волокон), неидеальные оптические элементы.

Учитывая высокую чувствительность оптических схем с использованием интерференции, паразитные внутренние отражения могут значительно влиять на работу схемы, и ими нельзя пренебречь. Поскольку явление множественной интерференции от таких множественных неоднородностей схемы является нетривиальным, то для анализа и оптимизации внутренних отражений типичной оптоволоконной схемы требуется специализированное программное обеспечение, которое бы позволяло моделировать это явление.

Данная работа описывает пример такого программного обеспечения, специально разработанного для анализа интерферометрических оптоволоконных схем с линейно перестраиваемым по оптической частоте источником когерентного излучения.

2. Построение топологии оптоволоконной схемы

Прежде всего, необходимо качественно и количественно описать топологию оптической схемы, которая будет подвергаться исследованию.

Компоненты, оказывающие влияние на мощность проходящих через него сигналов (например, путём ослабления этой мощности, её деления, перенаправления по различным каналам и т. п.), задаются при помощи многополюсников (рис. 1), имеющих один или несколько портов в зависимости от типа описываемого компонента.

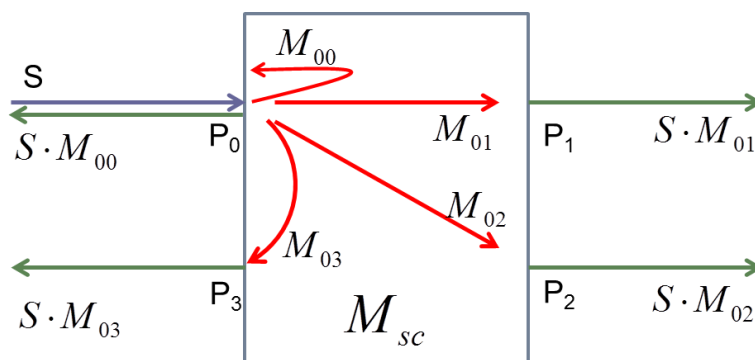


Рис. 1. Многополюсник

Количественно многополюсник характеризуется матрицей рассеяния M_{sc} , т. е. набором коэффициентов передачи мощности от порта к порту. При попадании сигнала S в какой-либо порт многополюсника мощность делится между портами и выходит из них в соответствии со значениями элементов матрицы рассеяния.

Элементы схемы (многополюсники) разделяются на несколько типов:

- **пассивные элементы.** Эти элементы выполняют только функцию передачи сигналов из порта в порт. Коэффициент передачи по мощности определяется матрицей рассеяния соответствующей элементу;
- **элементы-источники.** Эти элементы также имеют свою матрицу рассеяния, но в отличие от пассивных элементов дополнительно являются генера-

торами когерентного сигнала единичной мощности выдаваемой в выходной порт. Типичным примером данного типа является лазер;

- **элементы-приёмники.** В отличие от пассивных элементов при попадании на порт такого многополюсника параметры сигнала регистрируются. Регистрируется мощность и длина оптического пути распространения света от породившего его источника к данному приемнику. Примером таких компонентов являются фотодетекторы.

Элементы схемы (многополюсники) также разделяются по количеству используемых портов:

- один порта: лазеры, фотодетекторы, зеркала, светопоглотители и т. п.;
- два порта: оптические соединения, аттенюаторы, оптические изоляторы и т. п.;
- три порта: оптические циркуляторы, светоделители 2×1 и 1×2 ;
- четыре порта: светоделители 2×2 .

Все элементы (многополюсники) соединяются в топологию оптической схемы при помощи линий связи (одномодовых оптических волокон, или некоторого обобщенного пути распространения излучения) (рис. 2), характеризующихся длиной оптического пути, который будет преодолевать сигнал, распространяющийся по данной линии, и величиной ослабления, обусловленного, например, затуханием в волокне.

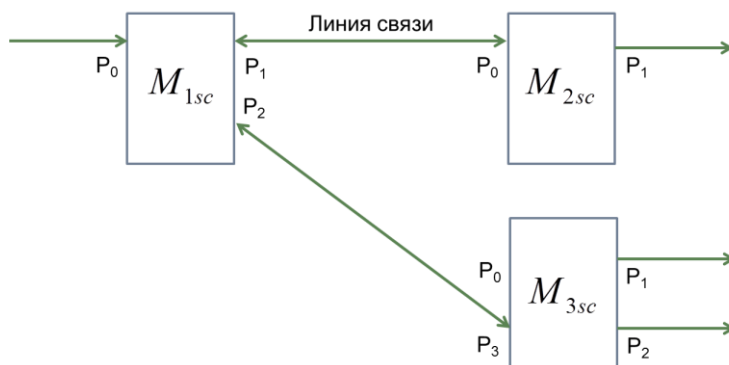


Рис. 2. Линии связи

Таким образом, при помощи набора многополюсников и соединяющих их линий связи строится топология той или иной оптоволоконной схемы.

В нашем случае для анализа оптоволоконной схемы такого описания вполне достаточно. Для простоты рассмотрения здесь не учитываются дисперсия излучения в волокне и поляризационные свойства излучения (например, можем предположить, что оптические компоненты и волокна схемы поляризационно-сохраняющие).

3. Анализ оптоволоконной схемы

После того, как топология схемы построена, необходимо осуществить трассировку её оптических сигналов. Из многополюсника типа «источник» ге-

нерируется сигнал единичной мощности, который в соответствии с матрицами рассеяния компонентов и характеристиками линий связи распространяется по схеме. По достижению каждого из многополюсников создаются дочерние сигналы, которые в свою очередь трассируются по схеме. По достижению сигналами фотоприёмников параметры этих сигналов, т. е. его мощность в момент прихода на фотоприёмник и длина оптического пути, пройденного им от источника до приёмника, регистрируются.

Далее, на каждом из фотоприёмников необходимо произвести расчёт интерференции всех сигналов, которые достигли фотоприёмника и были им зарегистрированы. Для каждого такого оптического сигнала мы знаем его параметры: P_k – мощность, L_k – длину оптического пути от источника излучения. Поэтому когерентный оптический сигнал [2] можно представить в виде комплексной записи, состоящей из амплитудной и фазовой составляющих:

$$S_k(t) = A_k \cdot e^{-i\varphi_k(t)} \quad (1)$$

Квадрат модуля такого комплексного сигнала будет совпадать с мгновенной мощностью оптического излучения.

Амплитуда комплексного сигнала пропорциональна мгновенной напряжённости электрического поля на входе фотоприёмника, поэтому его можно использовать для изучения явления интерференции с использованием принципа суперпозиции, применимого к электрическим полям от всех оптических сигналов, прибывших на вход фотоприёмника.

Амплитуда сигнала находится как $A_k = \sqrt{P_k}$ – из условий нормировки по мощности.

Фаза сигнала $\varphi_k(t)$ является оптической фазой источника исходного излучения $\varphi_0(t)$, которая претерпела задержку $t_k = L_k / c$ распространения света от источника к приёмнику: $\varphi_k(t) = \varphi_0(t - t_k)$.

Фаза самого источника излучения является интегралом его мгновенной оптической частоты во времени и для линейно перестраиваемого по оптической частоте источника излучения может быть записана в явном виде как:

$$\varphi_0(t) = \int_0^t \omega(t') \cdot dt' = \omega_0 \cdot t + \frac{Sl \cdot t^2}{2}, \quad (2)$$

где $\omega_0 = \omega(t=0)$ – частота сигнала в начальный момент его генерации источником; Sl – скорость (наклон прямой) нарастания частоты сигнала.

Тогда оптическая фаза пришедшего оптического сигнала равна:

$$\varphi_k(t) = \varphi_0(t - t_k) = \omega_0 \cdot (t - t_k) + \frac{Sl \cdot (t - t_k)^2}{2}, \quad (3)$$

где $t_k = L_k / c$ – время прохождения сигнала от источника до приёмника.

Затем, используя принцип суперпозиции, все комплексные амплитуды сигналов, зарегистрированных приемником, суммируются, и вычисляется мощность совокупного интерференционного сигнала: $P_{\text{det}}(t) = \left| \sum_k S_k(t) \right|^2$.

4. Моделирование оптоволоконной схемы интерферометра Майкельсона

Топология схемы интерферометра Майкельсона [3] (рис. 3) состоит из следующих элементов: лазер 1 соединяется через оптоволоконный FC-PC коннектор 2 с оптическим изолятором 3, который служит для подавления отражённого излучения обратно в лазер. Изолятор 3 через коннектор 4 соединяется с одним из портов светоделителя 5. Ещё к двум портам светоделителя подключены оптоволоконные зеркала 6 и 7, причём до зеркала 7 линия связи имеет длину оптического пути на величину ΔL большую, чем до зеркала 6. К последнему из портов светоделителя 5 через коннектор 9 подключен фотоприёмник 10.

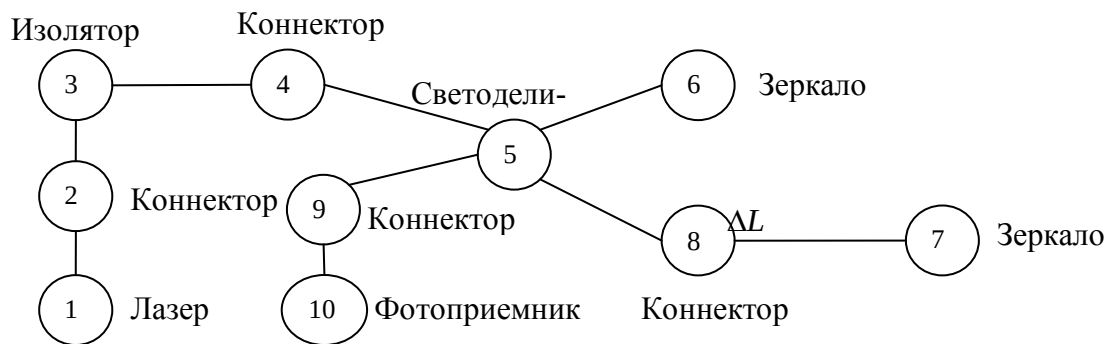


Рис. 3. Топология схемы интерферометра Майкельсона

Значения элементов матриц рассеяния выбраны в соответствии со значениями параметров реальных оптоволоконных компонентов из паспортов на эти компоненты: лазер FITEЛ FOL15DCWD [4], оптический изолятор IO-H-1550FC, оптоволоконный коннектор FC-PC 30126D1, светоделитель 10202A-50-FC, фотодетектор PDB450C. Компоненты соединены при помощи волокна Corning SMF-28e. Длины оптических путей между компонентами схемы равны 1 м (за исключением пути между зеркалом 7 и коннектором 8, где длина оптического пути равна $\Delta L = 13,7 \text{ м}$).

Модель данной схемы была введена в программу. Спектральная плотность мощности интерферометрического сигнала на фотоприёмнике (пропорционального оптической мощности сигнала), полученная в результате моделирования схемы, приведена на рис. 4,а.

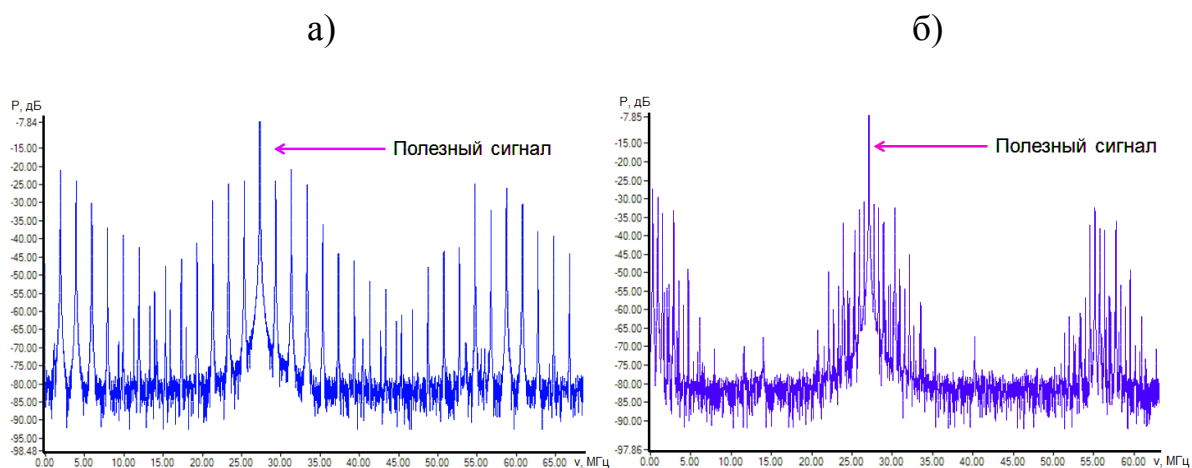


Рис. 4. Спектральная плотность мощности интерферометрического сигнала схемы интерферометра Майкельсона: с разъёмными оптоволоконными FC-PC коннекторами (а); со сварными соединениями (б).

Соотношение сигнал-шум для полезного интерференционного сигнала биений составляет около 13 дБ. Множественные отражения излучения от разъёмных оптоволоконных соединений, взаимно интерферируя между собой, в конечном счете, вызывают «частокол» спектральных пиков, который наблюдается в спектре сигнала. В результате спектр полезного сигнала получается искаженным из-за наличия внутренних отражений схемы. Шаг по частоте между «паразитными» спектральными пиками определяется длиной соединительных волокон (1 м) между компонентами схемы.

Если заменить оптоволоконные коннекторы FC-PC 30126D1 на сварные соединения волокон, то отражения от оптических соединений значительно снизятся, поскольку типичное сварное соединение отражает -60 дБ от проходящего через него излучения, в то время как разъёмное оптическое соединение типа FC-PC отражает -30 дБ проходящего излучения. Если в схеме соединительные волокна сократить до 0,33 м, то взаимные оптические пути между множественными отражениями снизятся, что приведёт к меньшему шагу по частоте между спектральными пиками интерферометрического сигнала.

Рисунок 4,б демонстрирует спектральную плотность мощности интерференционного сигнала схемы с использованием сварных соединений и более короткими соединительными волокнами (0,33 м). Результирующее соотношение сигнал-шум для такой оптической схемы составляет около 22 дБ, что на 9 дБ выше, чем в предыдущей схеме.

5. Заключение

Результатами этой работы является разработанное программное обеспечение, позволяющее исследовать влияния множественных внутренних отражений когерентных оптоволоконных схем на их работу.

Программное обеспечение можно использовать для моделирования и оптимизации практических оптоволоконных схем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стерлинг Д. Волоконная оптика. Техническое руководство. М.: Лори. 1995. – 195 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Издательство «Наука». 1973.
3. Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А.М. Прохоров. 1988.
4. DWDM CW DFB Laser Module Description. [Electronic resource] / Режим доступа: <http://ece466.groups.et.byu.net/notes/laser1.pdf>

© И.С. Глебус, С.Н. Макаров, 2013

ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНОГО СДВИГА ФАЗЫ ИНТЕРФЕРОГРАММ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ ПРОФИЛОМЕТРОМ

Евгений Владимирович Сысоев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Игнат Александрович Выхристюк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383) 306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Родион Владимирович Куликов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Василий Владимирович Широков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, магистрант, тел. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

Рассмотрено влияние случайного фазового сдвига на погрешность измерений микро-рельефа поверхности методом дифференциальных интерферограмм в интерференционном микропрофилеометре. Получена зависимость погрешности измерения от случайного фазового сдвига. Экспериментально показано, что вибрации интерферометра не увеличивают погрешность измерений если их амплитуда менее $\bar{\lambda}/10$. Погрешность увеличивается до 40% с увеличением амплитуды вибрации с $\bar{\lambda}/10$ до $\bar{\lambda}/4$. При дальнейшем росте амплитуды вибрации вплоть до $\bar{\lambda}/2$ погрешность измерения не возрастает.

Ключевые слова: низкокогерентная интерференционная профилометрия, погрешность измерения, фазовый сдвиг.

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Ph. D., senior scientist, tel. (383) 306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Junior scientist, tel. (383) 306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Junior scientist, tel. (383) 306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Vasily V. Shirokov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, Karl Marks Prospekt, Undergraduate. tel. (383) 306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

EFFECT OF INTERFEROGRAMMS RANDOM PHASE SHIFT TO ERROR OF SURFACE MEASUREMENT IN THE WHITE LIGHT INTERFEROMETR

The effect of the random phase shift to the surface measurement error using the method of differential interferograms in the interference microprofilometer is considered. The dependence of the measurement error on the random phase shift is obtained. Results of experiments show that the vibrations influence to interferometer measurement error is absent under the amplitude less than $\bar{\lambda}/10$. Error increases up to 40% if the vibration amplitude is within the limits from $\bar{\lambda}/10$ to $\bar{\lambda}/4$. With a further increase of the amplitude of vibration up to $\bar{\lambda}/2$ the measurement error is without changes.

Key words: low-coherence interferometric profilometry, measurement error, phase shift.

Методы низкокогерентной интерферометрии широко применяются для контроля качества технических поверхностей [1]. Системы измерения, основанные на этих методах, имеют высокую разрешающую способность и быстродействие. Актуальной задачей при их проектировании является поиск путей снижения погрешности измерения [2].

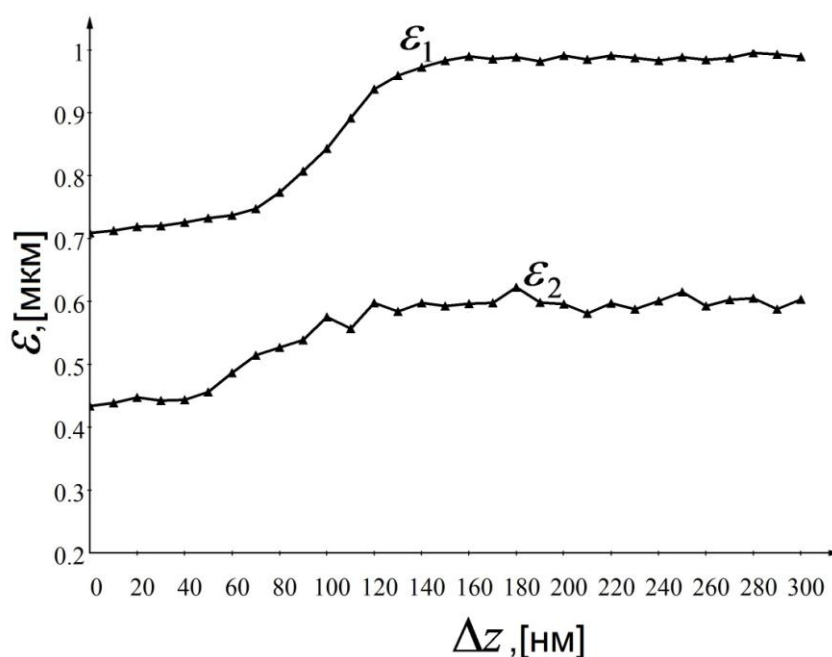
Измерение рельефа технических поверхностей основано на регистрации нескольких интерферограмм сдвинутых по фазе между собой на определенный фиксированный угол [2, 3], при котором контраст интерференционной картины будет максимальным. Изменение этого угла (например, регистрация интерферограмм в условиях наличия вибраций) приводит к ухудшению отношения сигнал/шум.

В докладе представлены результаты исследования зависимости погрешности измерения микрорельефа поверхности методом дифференциальных интерферограмм (ДИ) [3] от случайного фазового сдвига. Максимальный контраст дифференциальной интерферограммы при использовании метода ДИ достигается при разности двух исходных интерферограмм сдвинутых по фазе относительно друг друга на 180° . Случайный фазовый сдвиг приводит к изменению этого угла и к уменьшению контраста дифференциальной интерферограммы.

Для определения влияния фазового сдвига на погрешность измерения рельефа поверхности были проведены исследования методом математического моделирования и в натурных экспериментах. Программная модель позволяла изменять: длину волны, длину когерентности, уровень шума в интерференционном сигнале, порог обнаружения и диапазон случайного фазового сдвига.

Натурные эксперименты проводились на интерференционном профилометре МНП-1 [4] оптическая схема которого представляет собой интерферометр Линника в сходящихся пучках. Случайный фазовый сдвиг в профилометре осуществлялся посредством случайного изменения управляющего напряжения подающегося на пьезокерамику.

В качестве объекта измерения использовалась плоская отражающая поверхность, а источник частично когерентного света – красный светодиод (EP2012-150R1). Погрешность измерения ε_1 рассчитывалась как среднеквадратическое отклонение измеренного рельефа поверхности от базовой плоскости. Она рассчитывалась для каждого диапазона величины случайного фазового сдвига. В численных экспериментах, как и в натурных, моделировалась и измерялась плоская наклонная поверхность и рассчитывалась погрешность ε_2 . В обоих случаях сканирование производилось с шагом интерферометра 0,5 мкм. Уровень нормального шума в интерферограммах составлял 12%. Длина волны и длина когерентности источника составляла $\bar{\lambda} = 629,4$ нм и $l_c = 20$ мкм соответственно. На рисунке представлены графики погрешности измерений ε_1 и ε_2 . Показано (в натурных и численных экспериментах), что вибрации интерферометра не увеличивают погрешность измерений если их амплитуда менее $\bar{\lambda}/10$. Погрешность увеличивается до 40% с увеличением амплитуды вибрации с $\bar{\lambda}/10$ до $\bar{\lambda}/4$. При дальнейшем росте амплитуды вибрации вплоть до $\bar{\lambda}/2$ погрешность измерения не возрастает.



Зависимость погрешности ε от случайного фазового сдвига Δz :
 ε_1 – рассчитанная по результатам измерений рельефа поверхности,
 ε_2 – по результатам моделирования процесса измерения

Из графиков видно, что погрешность измерения увеличивается при увеличении амплитуды вибраций вплоть до 160 нм. Так же видно, что характер изменения экспериментальной и модельной зависимости одинаков, что подтверждает корректность программной модели.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке новых высокоточных измерительных систем для контроля продукции промышленного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. David J. Aziz Interferometric measurement of surface roughness in engine cylinder walls // Optical Engineering. – 1998. – Vol. 37. – Issue 5. – P. 1429-1434.
2. Richter Claus, Wiesner Bernhard, Groß Reinhard and Häusler Gerd. White-light interferometry with higher accuracy and more speed // Fringe 2005: The 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. – P. 605-612.
3. Сысоев Е.В., Голубев И.В. Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515, 2005.
4. Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Поташников А.К., Разум В.А., Степнов Л.М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – №2. – С. 119-128.

© Е.В. Сысоев, И.А. Выхристюк, Р.В. Куликов, В.В. Широков, 2013

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Виктор Павлович Бессмельцев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат технических наук, заведующий лабораторией лазерной графики, 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, тел.: (383) 333-24-91 e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

В статье рассматриваются основные подходы к проектированию лазерных комплексов микрообработки, основанные на методах адаптивного управления как параметрами лазерного луча, так и технологиями лазерной обработки, методиках мониторинга процесса лазерной микрообработки (в том числе в реальном времени), объединённых в единую систему контроля и интеллектуального управления.

Ключевые слова: лазерная микрообработка, адаптивные системы управления, системы поддержки принятия решений.

Victor P. Bessmeltsev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Ph.D., senior scientist, Head of laboratory, 630090, Russia, Novosibirsk, 1, Academic Koptug prosp., Tel.: +7 (383) 333-24-91, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

PROBLEMS OF LASER MICROPROCESSING AUTOMATED COMPLEXES CREATION

The paper examines the main approaches to the design of laser micromachining systems based on the methods of adaptive control just as laser beam parameter, so laser processing technologies as well as methods for laser micromachining monitoring (including in real time), consolidated in the common inspection system and intelligent control.

Key words: laser micromachining, system of adaptive control, decision Support System.

1. Введение

Большое число параметров, от которых зависит качество и точность лазерной термической и термохимической обработки материалов (длина волны лазера, качество пучка, длительности импульса экспозиции, мощность лазерного излучения, скорость движения пучка, глубина фокуса, физические и химические свойства обрабатываемых материалов и окружающей атмосферы, временные характеристики процесса обработки, технология постобработки и т.д.) и нестационарность процессов обработки делают практически невозможным точное моделирование таких процессов. Это фактически означает, что точность и качество лазерной обработки, в особенности трехмерной микро- и нанообработки, недостаточно прогнозируемы. В настоящее время в системы лазерной микрообработки для контроля качества обработки устанавливаются скоростные видеокамеры высокого разрешения. Однако данные только с видеокамер не

полностью характеризуют процесс, а другие необходимые исследования (спектральные, метрологические, материаловедческие) проводятся на отдельных приборах и требуют съёма обрабатываемого материала и многократного повторения тестовых записей [1, 2]. Поэтому процесс настройки технологии микрообработки существенно удлиняется и сильно зависит от квалификации оператора.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и исследование методов адаптивного управления системами лазерной микрообработки, включающих в себя средства контроля результатов микрообработки и специальных программных средств прогнозирования и проектирования, основанных на современных методах управления положением и экспозиционной энергией лазерного луча, методиках мониторинга процесса лазерной микрообработки, объединённых в единую систему контроля и интеллектуального управления.

2. Оптимизация систем и методов управления положением лазерного луча для прецизионной скоростной микро обработки больших изделий

В Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ СО РАН) предложен и реализован аппаратно-программный метод составного сканирования лазерного луча, основанный на использовании сканирующей головки, обеспечивающей быстрое контролируемое перемещение сфокусированного лазерного луча в малом поле записи, при этом перемещение сканирующей головки относительно полной зоны обработки обеспечивается модулем трехкоординатных подвижек с большим полем перемещения и датчиками контроля перемещения с той же точностью, что и датчики сканирующей головки.

Разработанные нами алгоритмы и аппаратные средства обеспечивают пространственное и временное сопряжение координаты лазерного луча относительно полной зоны обработки.

Пример реализации таких систем – системы прецизионной лазерной микрообработки на основе сканерной головки (содержит угловые гальванометрические сканеры X и Y координат с объективом плоского поля или телецентрическим объективом), установленной на трехкоординатном механизме перемещения с оптическими датчиками координат или сопряженных с движущимся обрабатываемым материалом [3, 4]. Основные ошибки, возникающие при лазерной записи или микрообработке при относительном движении сканерной головки или носителя, связаны с необходимостью точной корректировки положения лазерного луча с учетом движения носителя и динамики сканера (динамические ошибки) и геометрических искажений, вызванных дисторсией фокусирующего объектива, и ошибкой преобразования углового положения зеркала сканера в перемещение лазерного луча в плоскости записи (статические ошибки). Для одновременного обеспечения максимально возможных точностных и скоростных характеристик лазерной обработки движущихся носителей разработаны методы управления движением лазерного луча и носителя с учетом выше приведенных ошибок взаимного позиционирования и требований, предъявляемых к скорости перемещения, интенсивности и диаметру сканирующего

лазерного луча, и параметров, определяющих технологические особенности лазерной обработки.

Для формирования потока данных с учетом движения регистрирующей среды создано специализированное программно-аппаратное обеспечение (СПО). СПО содержит две основные части: программное обеспечение управления (драйвер) и программное обеспечение технологии лазерной обработки, обеспечивающее интерфейс пользователя для формирования задания, его визуализации, подготовки данных для вывода, ввода параметров записи. Подготовленные в системе проектирования данные о перемещении лазерного луча в заданную позицию X, Y преобразуются программой в два потока координат: позиции кадра x_{mi} на материале, и вектора перехода луча внутри зоны записи объектива $V_j(x_j, y_j)$ (j – номер вектора в последовательности) такие, что $X_{i,j} = s_i + x_{j,}$, $Y_{i,j} = y_j$.

Вектора $V_j(x_j, y_j)$ для обеспечения равномерности скорости движения луча разбиваются на микровектора $\Delta v_k(x_k, y_k)$ длиной l . Далее осуществляется формирование временной диаграммы, обеспечивающей подачу данных (x_k, y_k) на драйверы сканеров в заданное время с задержками, формируемыми в начале и в конце векторов V_j , и синхронизацию данных с модуляцией лазерного излучения. В результате формируются зависящие от времени координаты микровекторов в поле записи объектива $x_k(t), y_k(t)$.

В процессе микрообработки при перемещении лазерного луча от начальной позиции кадра происходит коррекция текущей координаты на величину смещения материала в данный момент времени:

$$x_{\Sigma}(t) = x_k(t) + \Delta s(t), y_{\Sigma}(t) = y_k(t) - \Delta y(t),$$

где $\Delta s(t) = s(t) - s_i$, а $\Delta y(t)$ – поперечное смещение материала.

На последнем этапе обработки данных производится коррекция геометрических искажений сканирующей системы с применением преобразования $F^{-1}(x(t), y(t))$; вычисление значений управляющих воздействий $U_x(t) = F^{-1}_x(x_{\Sigma}(t), y_{\Sigma}(t))$, $U_y(t) = F^{-1}_y(x_{\Sigma}(t), y_{\Sigma}(t))$, соответствующих результирующему положению лазерного луча в зоне записи объектива, и преобразование их в аналоговый вид.

Структура управления данными, созданная на основе рассмотренного выше подхода, представлена на рис. 1.

Применение систем составного сканирования позволяет обеспечить близкую к максимально возможной для данных сканеров скорость обработки (м/с) при погрешности в единицы микрон, что существенно увеличивает диапазон регулируемых скоростей микрообработки и, таким образом, позволяет без потери точности получить оптимальные параметры обработки. Например, прецизионная обработка многих полимерных материалов возможна только при высоких скоростях движения лазерного луча (порядка единиц метров в секунду).

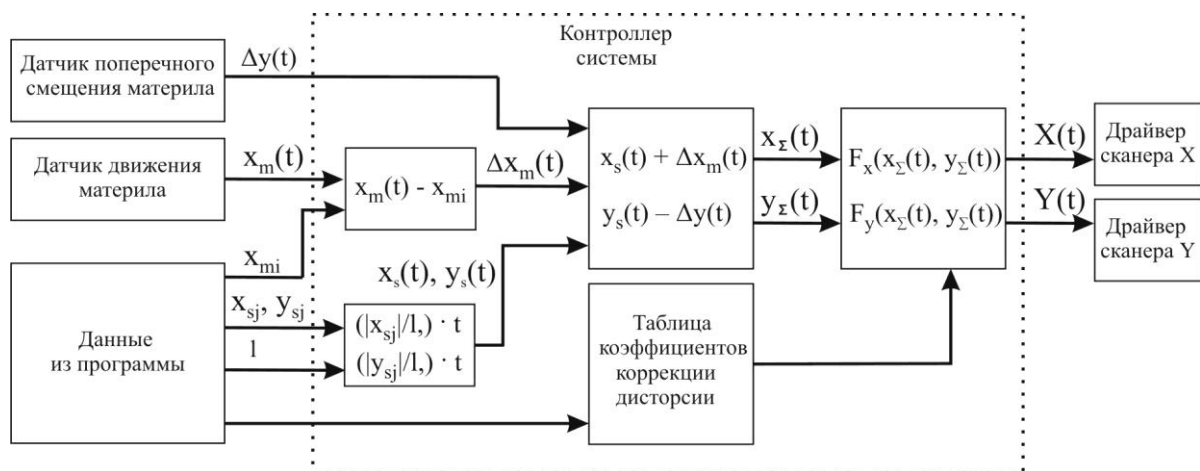


Рис. 1. Структура управления данными

3. Методы автоматического измерения геометрических параметров изделий после лазерной микрообработки

На наш взгляд, наиболее подходящими методами автоматического контроля структур являются оптические методы, поскольку необходимое быстродействие измерительной системы и методов обработки данных должно быть около 1 минуты для структуры $1 \times 1 \times 0,1 \text{ мм}^3$.

Нами были проведены исследования применимости и определение эффективности ряда оптических методов для быстрого измерения параметров модельных объектов, полученных трехмерной послойной лазерной микрообработкой заготовок из металлов лазерным пятном 10 микронного диаметра с координатным разрешением системы 5 мкм в различных режимах обработки. Исследовались методы: вариации фокуса, конфокальной хроматической микроскопии, конфокальной микроскопии и структурного освещения на основе фазового сдвига. При измерении методом вариации фокуса применялся микроскоп Carl Zeiss Axio Observer (объективы 10-20X, камера 5 Мпксл, шаг по Z при измерении 2 мкм). Методика измерений с помощью конфокальной микроскопии исследовалась на микроскопе Carl Zeiss LSM 700. При хроматической конфокальной микроскопии применялся сенсор CL4-MG35 (Stil Франция). Методы структурного освещения исследовались на измерительной системе собственной разработки [5]. Тестирование показало, что микроскоп широкого поля позволяет получать высококонтрастные изображения с высоким быстродействием, однако при большой шероховатости поверхности обработки ($R_a > 5 \text{ мкм}$) возможно неточное восстановление высоты, так как кривая аксиального отклика в точке может не иметь выраженного максимума. Конфокальный микроскоп обеспечивает высокую детализацию восстанавливаемой 3D геометрии, среднее быстродействие метода: 5 с на изображение оптического среза. Структурное освещение позволяет получать изображения оптического среза с характеристиками, сравнимыми с конфокальной микроскопией. Недостатком двух последних методов является сложность задания оптимальной экспозиции сенсора, поскольку в объекте исследования имеются зоны, отличающиеся большим дина-

мическим диапазоном коэффициента отражения (более 16 разрядов). Для конфокального хроматического сенсора быстродействие ниже максимального (~ 3 мин. на $1 \times 1 \times 0,1 \text{ мм}^3$), так как необходимо проводить сканирование на низкой частоте (~ 500 Гц) из-за вариации оптических свойств поверхности. При этом, при получении данных от трёхмерных структур с большим перепадом высот ($> 0,1 \text{ мм}$) такие системы лучше по быстродействию, по сравнению с системами на основе метода вариации фокуса и конфокальной микроскопии, так как вертикальное сканирование не требуется.

4. Системы поддержки принятия решений (СППР) и соответствующих программно-аппаратных средств для адаптивного формирования режимов микрообработки различных материалов и сложных 3D структур

Большинство лазерных технологий микрообработки – резка, сверление, сварка, фрезерование – опираются на методы локального взаимодействия мощного излучения с обрабатываемым материалом. Возникающие при этом термические, термохимические, гидродинамические процессы нестационарны и плохо поддаются математическому моделированию. Кроме того, в процессе лазерной обработки в материалах могут происходить фазовые превращения, изменяются их структура и кристаллическая решетка, возникают внутренние напряжения и т.д. В области лазерного воздействия формируются участки, содержащие продукты взаимодействия материала и окружающей среды, с характеристиками, отличающимися от характеристик основного объема вещества. Также на процесс физико-химического взаимодействия излучения с веществом влияют параметры сканирующей системы (точность, быстродействие). Например, недостаточная скорость перемещения лазерного луча может приводить к нежелательному обгоранию поверхности, либо ее деформации вследствие локального перегрева. Сложность настройки лазерной системы под конкретную технологическую задачу обусловлена также многообразием обрабатываемых материалов, различными требованиями к характеру обработки и ее результатам, а также регулируемым параметрами лазерных систем.

Известные программно-аппаратные решения, позволяющие автоматизировать процесс настройки оборудования, можно условно разделить на три типа.

1. Экспертные системы, или системы поддержки принятия решения (СППР), упрощающие настройку режима обработки до начала эксперимента.

2. Системы управления, позволяющие корректировать режим лазерной обработки, основываясь на оценке оператором результатов предыдущих экспериментов по определенной совокупности параметров.

3. Системы контроля, анализирующие взаимодействие лазерного луча с материалом в режиме реального времени и автоматически корректирующие режим лазерной обработки.

Однако ни одно из перечисленных решений в настоящее время не позволяет точно определить параметры лазерной обработки исходя из компьютерных моделей и учета свойств материала.

Объединив возможности систем первого и второго типа [6, 7], можно обеспечить автоматическую работу созданной системы. В полученной системе поступление информации о качестве лазерной обработки и ее анализ происходят автоматически, с использованием высокоразрешающей системы технического зрения, профилометра и спектрофотометра. Программные средства обеспечивают оперативное пополнение базы данных СППР и оптимизацию режима лазерной обработки на основе накопленной информации. На настоящем этапе основное внимание уделяется использованию системы технического зрения при оценке качества обработки и формировании базы СППР. Основываясь на аппаратной платформе для прецизионной скоростной микрообработки, нами разработаны программные средства, позволяющие контролировать линейные и угловые размеры микроструктур, полученных при лазерной микрообработке. Программные средства обеспечивают совмещение изображений САД-модели задания и зоны лазерной микрообработки, автоматический анализ размеров структур и детектирование геометрических ошибок формообразования сразу после завершения лазерной микрообработки.

5. Заключение

Современные системы лазерной микрообработки, использующие данные САД-САМ проектирования для прецизионного управления лазерным пучком и оптимальные параметры лазерного излучения могут, в принципе, обеспечить послойное формирование 3D структур на различных материалах с высоким быстродействием и заданной точностью.

Однако в настоящее время отсутствуют технологии, позволяющие по САД модели и физико-химическим характеристикам материала получить точные данные об оптимальной технологии обработки (включая выбор типа лазера, скоростные и энергетические характеристики лучевой обработки т.д.) и позволяющие получить изделие с заданной точностью и характеристиками поверхности после обработки. Развитие рассмотренных в данной статье методов управления, контроля и создание специализированных экспертных систем позволят вплотную подойти к решению данной задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Orazi L. et al. An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromachining // *International Journal of Advanced Manufacturing Techniques*. – 2009. – Т. 46. – Р. 163–171.
2. Soveja A. et al. Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2008. – Т. 46. – Р. 671–678.
3. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Аппаратно-программные средства динамической коррекции для управления лазерными системами микрообработки на основе комплементарных сканеров. // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2009. – № 3. – С. 48–52.
4. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // *Автометрия*. – 2010. – № 1. – С. 98–107.

5. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Применение структурного освещения для восстановления топографии объектов с различными оптическими свойствами поверхности Труды конференции // Лазеры. Измерения. Информация. С. Петербург. – 2012. – С. 70.

6. Bessmeltsev V.P., Bulushev E.D., Goloshevsky N.V. Method for Localizing and Measuring Structures Formed under Laser Microprocessing // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Т. 21. – № 3. – Р. 373–376.

7. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д., Голошевский Н.В. Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – С. 17–22.

© В.П. Бессмельцев, 2013

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ПРОФИЛОМЕТРЕ

Евгений Владимирович Сысоев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Игнат Александрович Выхристюк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, младший научный сотрудник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Александр Владимирович Запreeв

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», магистрант, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20 тел. (383)306-62-12, e-mail: zapreevav@gmail.com

Родион Владимирович Куликов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, младший научный сотрудник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Представлен алгоритм определения фазового сдвига между интерферограммами при измерении нанорельефа поверхности методом частичного сканирования коррелограмм по распределению спектра амплитуд интенсивности интерференционного сигнала. Показано, что расчет шага сканирования по предложенной методике позволяет снизить влияние синхронных фазовых искажений более чем на порядок. Расчеты показали, что шум в интерферограммах удалось снизить с 7,5 % до 0,1 %, а нелинейность с 7 % до 0,2 %.

Ключевые слова: низкокогерентная интерференционная профилометрия, погрешность измерения, фазовый сдвиг.

DETERMINATION OF PHASE SHIFT IN WHITE-LIGHT INTERFEROMETER

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Ph. D., senior scientist, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383) 306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Junior scientist, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383) 306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Aleksandr V. Zapreev

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20, Karl Marks Prospekt, Undergraduate, tel. (383) 306-62-12, e-mail: zapreevav@gmail.com

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Junior scientist, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383) 306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Algorithm of phase shift determination by interferograms for nanorelief surface measurement using the method of partial scanning of correlograms is presented. The algorithm is based on analysis of distribution of interference signal intensity. It is shown that the calculation of scanning step using the proposed method reduces the impact of synchronous phase distortion. Amplitude noise and nonlinearity in correlograms were reduced from 7,5 % to 0,1 % and from 7 % to 0,2 %, correspondingly.

Key words: low-coherence interference profilometer, measurement error, phase shift.

Низкокогерентная фазосдвигающая интерферометрия обеспечивает высокую точность измерений и широко используется при решении задач профилометрии в метрологии, машиностроении и научных исследованиях [1, 2].

Одной из важных задач в развитии интерференционных систем является снижение погрешности измерений в нанометровом и субнанометровом диапазоне.

Измерение рельефа основано на вычислении разности фаз функций корреляции световых волн, рассеянных различными участками поверхности [3]. Для этого производится сканирование фазы интерферирующих волн, например, посредством перемещения зеркала в опорном плече интерферометра, установленного на пьезоакермический актюатор. На актюатор подается напряжение $U_k = U_0 + \Delta U \cdot k$, где $k \in [0..K-1]$ – номер шага перемещения, K – количество шагов. Интенсивность света в интерферограмме для каждой точки p измеряемой поверхности можно представить в виде:

$$I_{k,p} = A \left(1 + B \left(\frac{Z_k - Z_p}{l_c} \right) \cos \left(4\pi \frac{(Z_k - Z_p)}{\bar{\lambda}} \right) \right), \quad (1)$$

где $B(Z_k - Z_p)$ – функция огибающей сигнала, Z_k – значение координаты (вдоль которой производится сканирование) на k -ом шаге, Z_p – высота рельефа поверхности в точке p , l_c – длина когерентности света.

Вибрации интерферометра [5], изменение давления воздуха приводят к дополнительному фазовому сдвигу на каждом шаге сканирования, к росту амплитудного шума в коррелограммах и, соответственно, к увеличению погрешности измерений [6].

Целью данной работы является разработка алгоритма определения фазовых сдвигов между интерферограммами при коррелированном воздействии внешних факторов и для расчета шага сканирования с целью снижения погрешности измерений. Для этого предложено рассчитывать величину фазового сдвига на основе распределения интенсивности в регистрируемых интерферограммах.

Коррелированный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между соседними интерферограммами для каждой точки поверхности p вычисляется из разности двух сигналов интерферограмм ΔI_p , заданных выражением (1). При условии, что на измеряемом участке поверхности функция $B(Z_k - Z_p)$ изменяется незначительно, получаем:

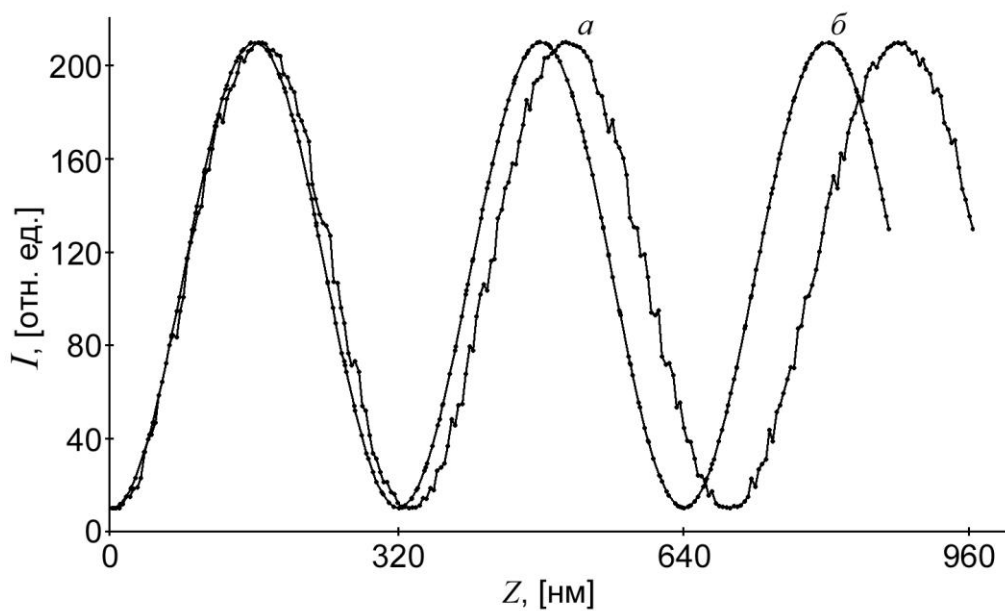
$$\begin{cases} I_{1,p} = A(1 + B \cos(\varphi_p)); \\ I_{2,p} = A(1 + B \cos(\varphi_p - \Delta\varphi)). \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) даёт выражение для фазового сдвига $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = 2 \arcsin\left(\frac{\Delta I_{\max}}{2 \cdot A \cdot B}\right). \quad (3)$$

Для решения задачи рассчитывались максимальные значения разности интенсивностей $\Delta I_{\max}$ и амплитуды сигналов интерференции.

Для проверки предложенного алгоритма была создана программная модель процесса регистрации интерферограмм, полученных от наклонной плоскости. Модель позволяет задавать такие параметры, как: $\bar{\lambda}$, l_c , величину нелинейности шага сканирования, амплитуду случайных синхронных искажений фазы интерференции.



Результат работы алгоритма:

a – исходная коррелограмма, b – обработанная коррелограмма

На рисунке представлена исходная коррелограмма (a), построенная по набору интерферограмм. При генерации интерферограмм были добавлены синхронные фазовые искажения, имеющие случайный характер (нормальное распределение) с амплитудой 7,5% и нелинейностью шага сканирования 7%. Результаты применения алгоритма приведены на рисунке – коррелограмма (b).

Расчеты показали, что шум в интерферограммах удалось снизить с 7,5% до 0,1%, а нелинейность с 7% до 0,2%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. David J. Aziz. Interferometric measurement of surface roughness in engine cylinder walls // Optical Engineering. – 1998. – Vol. 37. – Issue 5. – P. 1429–1434.
2. Leslie Deck, Peter de Groot. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry // Applied Optics. – 1994. – Vol. 33. – Issue 31. – P. 7334–7338.
3. Сысоев Е.В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микро-рельефа поверхностей // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – №1. – С. 107.
4. Fleischer M., Windecker R. Tiziani H.J. Theoretical Limits of Scanning White-Light Interferometry Signal Evaluation Algorithms // Applied Optics. – 2001. – V. 40. – Issue 17. – P. 2815–2820.
5. Leslie Deck. Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48. – №20. – P. 3948–3960.
6. Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Поташников А.К., Разум В.А., Степнов Л.М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – №2. – С. 119.

© Е.В. Сысоев, И.А. Выхристюк, А.В. Запreeв, Р.В. Куликов, 2013

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО АЭРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА НА БАЗЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Алексей Валерьевич Кирьянов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» СО РАН, кандидат технических наук, научный сотрудник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-20, e-mail: alexey@tdisie.nsc.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», доцент, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, тел. (383) 346-11-19, e-mail: oao_nips@bk.ru

Владимир Викторович Чуканов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, ведущий электроник, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, тел. (383) 306-62-20, e-mail: vlchuk@ngs.ru

Валерий Павлович Кирьянов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии» Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, тел.: (383) 330-51-34, e-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Сергей Васильевич Перебейнос

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии» Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук, научный сотрудник, 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, тел.: (383) 333-23-87, e-mail: perebeynos@iae.nsk.su

В статье рассмотрен принцип построения информационно-управляющей системы для аэростатического подшипника с активной стабилизацией пространственного положения ротора на базе фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа. Использование такого преобразователя позволит повысить точность измерений за счет одновременного измерения угла поворота и текущих отклонений ротора аэростатического подшипника в радиальном направлении.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь комбинированного типа, аэростатический подшипник, информационно-управляющая система.

THE INFORMATION-CONTROLLING SYSTEM FOR AN ACTIVE AEROSTATIC BEARING ON A BASE OF COMBINED PHOTOELECTRIC ENCODER

Alexey V. Kiryanov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Ph. D., researcher, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383)306-62-20, e-mail: alexey@tdisie.nsc.ru
Novosibirsk State Technical University, Assistant professor, 630073, Novosibirsk, 20, Karl Marks Prospekt, tel. (383) 346-11-19, e-mail: oao_nips@bk.ru

Vladimir V. Chukanov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Leading electronics, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., tel. (383)306-62-20, e-mail: vlchuk@ngs.ru

Valeriy P. Kiryanov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Doctor of Sciences, leading researcher, 630090, Russia, Novosibirsk, 1, Academician Koptyug prosp., tel. (383) 330-51-34, e-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Sergey V. Perebeynos

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Doctor of Sciences, researcher, 630090, Russia, Novosibirsk, 1, Academician Koptyug prosp., tel.: 333-23-87, e-mail: perebeynos@iae.nsk.su

The principle of the new type of information-controlling system on a base of combined photoelectric encoder for an active aerostatic bearing is discussed. The use of such encoder will allow increasing the accuracy of angular measurement due to precision measurement of rotation angle and the shifting of encoder axis in the radial direction.

Key words: combined photoelectric encoder, aerostatic bearing, information-controlling system.

1. Введение. Прецизионные аэростатические подшипники являются базовым элементом механотронных модулей круговых перемещений для высокоточного измерительного и технологического оборудования, используемого в нанотехнологиях. К нему относятся: прецизионная фотолитография, прецизионная обработка материалов, прецизионные лазерные генераторы изображений для синтеза топологии чувствительных элементов интегральных датчиков физических величин (ИДФВ), особоточные поворотные столы для исследования в биотехнологии аномальной дифракции в макромолекулах.

До настоящего времени при разработке и создании данных устройств использовались и используются аэростатические подшипники пассивного типа (ПАП), реализующие так называемую катушечную схему аэростатических опор. Для такой кинематической схемы ПАП характерна более высокая жёсткость опор в торцевом и радиальном направлениях и существенно меньшая жёсткость для угловых нагрузок. Для повышения точностных характеристик ПАП широко используются различные приёмы статической и динамической балансировки его вращающихся частей: ротора, двигателя, планшайбы и т.д. Максимальная стабильность оси вращения, достигаемая при использовании данных приемов $\approx 0,10 \div 0,15$ мкм. Однако возможности данных методов к настоящему времени практически исчерпаны, т.к. в конечном счете определяются качеством технологического оборудования, на котором изготавливаются основные детали ПАП. По этой причине эти аэростатические подшипники составляют базу технологических комплексов микронного и субмикронного разрешения.

Для целей нанотехнологий в последнее время за рубежом стали разрабатываться так называемые активные аэростатические подшипники (ААП). В их конструкции используется адаптивная информационно-управляющая система стабилизации пространственного положения ротора, которая состоит из информационно-управляющей и исполнительной части. Как правило, отрицатель-

ная обратная связь исполнительной части ААП строится на базе активных жиклёров, перемещаемых пьезоэлектрическими актюаторами, на основе информации о текущих отклонениях оси ротора, получаемой от информационно-управляющей части. В результате резко повышается статическая жёсткость аэростатических опор подшипника и значительно (в 5 – 6 раз) снижается динамическая погрешность движения ротора. Здесь наиболее далеко продвинулись японские исследователи. При малых оборотах ротора они зарегистрировали предельно низкую (порядка 15 – 20 нм) неопределённость положения оси ротора ААП.

В настоящее время, как показал анализ технической литературы, при разработке информационно-управляющей части системы стабилизации ротора ААП иностранные специалисты используют два принципиально разных типа измерительных преобразователей:

- цифровые преобразователи угла (ЦПУ), которые используются для стабилизации скорости вращения или задания угла поворота при работе в режиме поворотного стола. Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла (ФЦПУ) обеспечивают наиболее высокую точность измерений при существенно меньших по сравнению с другими типами ЦПУ массогабаритных показателях и поэтому получили наибольшее распространение в конструкциях ААП [1];

- цифровые преобразователи линейных перемещений (ЦПЛП), которые используются для измерения текущих отклонений оси ротора в радиальном направлении. Большинство разработчиков для измерения биения оси с нанометровым разрешением используют *емкостные* преобразователи совместно с эталонной металлической сферой, установленной на вращающийся ротор аэростатического подшипника и тщательно отъюстированной [2].

Однако, обоим типам измерительных преобразователей присущи ограничения, которые затрудняют достижение разработчиками ААП точностных параметров, предъявляемых к изделиям при использовании в нанотехнологиях.

2. Стандартное использование ФЦПУ и ЦПЛП в информационно-управляющей части ААП. 1) Типичная конструкция инкрементального ФЦПУ содержит: измерительный растр с определённым числом штрихов и меткой нуля и так называемую считывающую головку [3]. В её состав входят: осветительный блок, состоящий из светодиода и конденсора, индикаторная решётка и печатная плата с фотодиодами. Измерительный растр вместе с индикаторной решёткой образуют так называемое растровое сопряжение. Выбирая параметры углоизмерительного растра и индикаторной решетки можно получить функцию пропускания заданной формы с требуемым коэффициентом модуляции, которая важна для снижения погрешности измерения угла поворота [4]. Основным вклад в результирующую погрешность ФЦПУ вносят такие составляющие погрешности: δ_{ε} – погрешность от эксцентриситета ε установки растра на вал, δ_n – погрешность от биения подшипников вала, на который установлен

измерительный растр, и δ_p – погрешность, обусловленная качеством изготовления самого измерительного растра.

В настоящее время основным методом снижения погрешности ФЦПУ является использование принципа путевого усреднения [5], основанного на использовании в конструкции преобразователя нескольких дополнительных считывающих головок, однотипных с основной головкой и расположенных по кругу с равным шагом, выходные сигналы которых суммируют с выходным сигналом основной головки. Эффект снижения погрешности существенно зависит от числа дополнительных головок. Пример повышения точности ФЦПУ при использовании 4-х считывающих головок, приведён на рис. 1. Из графика на рис. 1,а видно, что погрешность измерительного растра $\approx \pm 1,5''$ [6]. При этом погрешность ФЦПУ, созданного на основе подобного растра, не превышает $\pm 0,5''$ (см. рис. 1,б) т.е. почти в 3 раза меньше, чем исходная погрешность растра. Погрешность преобразователя свободна, прежде всего, от δ_3 , а также от всех нечётных гармоник и ряда четных (2, 6, 10 и т.д.) гармоник, вносимых δ_n и δ_p .

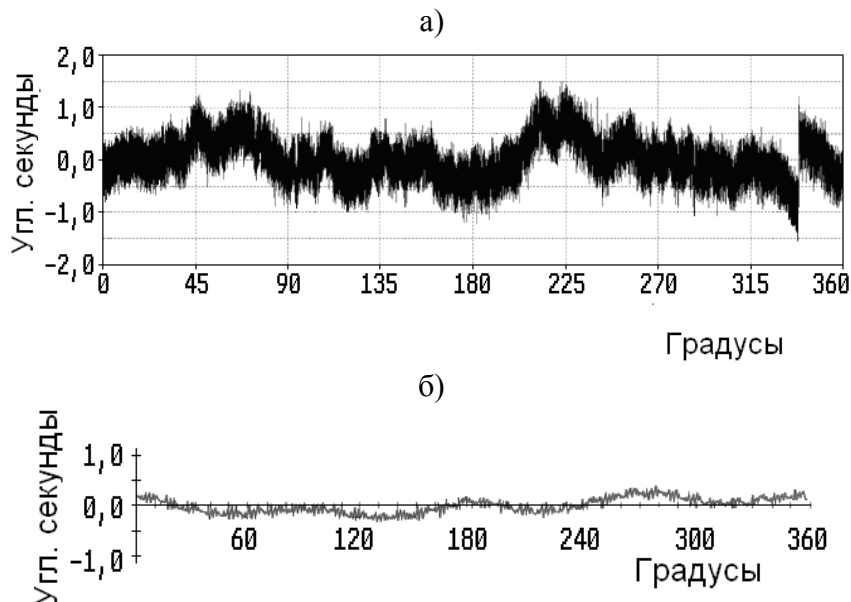


Рис. 1. Погрешность растра и результирующая погрешность преобразователя ROD-800 фирмы Heidenhain, Германия: погрешность растра (а) и результирующая погрешность преобразователя (б)

Однако, данному методу свойственны некоторые ограничения. В результате сложения одноимённых сигналов со всех головок ФЦПУ происходит формирование двух новых квадратурных сигналов, фаза которых не искажена эксцентриситетом установки растра на оси, но амплитуда этих сигналов промодулирована по закону $\cos \frac{2\pi}{w}e$. Глубина модуляции пропорциональна величине отношения эксцентриситета e к периоду w . Например, при $e = \frac{1}{4}w$ имеет место 100% уменьшение амплитуды вновь сформированных квадратур и, как следствие, в некотором угловом секторе полностью нарушается ход преобразования

угла поворота в код. Реально нарушения функционирования ФЦПУ возникают при существенно меньшей величине модуляции. Поэтому стараются не допускать модуляцию амплитуды суммарных квадратур более чем на 10% от максимума. Этому соответствует значение допускаемого эксцентриситета (как от неточной вклейки раstra, так и от биения подшипников) не более 0,1 периода раstra.

2) Достаточно широкое использование емкостных преобразователей для измерения биения ротора ААП с нанометровым разрешением объясняется тем, что существующие виброметры с использованием в качестве измерительного узла оптического датчика относительных колебаний имеют чувствительность не менее 10мВ/мкм в частотном диапазоне 22-600 Гц. Серийно выпускаемые акселерометры обеспечивают минимальный уровень виброускорений до 10^{-3} м/с², что на частоте 20 Гц не позволяет фиксировать колебания с амплитудой менее чем 0,09 мкм [7].

Однако и емкостные преобразователи имеют ряд ограничений. Выходной сигнал емкостного преобразователя в общем виде можно представить как:

$$V(t) = F(\Delta X(t)) = F(\Delta R(t) + e_{\text{ротора}}(t) + \Delta_{\text{формы}}(t) + \Delta T(t)), \quad (1)$$

где $\Delta X(t)$ - измеряемая величина, $\Delta R(t)$ - биение оси вращения, $e_{\text{ротора}}(t)$ - эксцентриситет положения ротора в статоре, вызванное, например, неидеальностью жиклеров, $\Delta_{\text{формы}}(t)$ - отклонение реальной формы ротора от идеальной, $\Delta T(t)$ - температурное изменение базы, на которую установлены емкостные преобразователи. И если $e_{\text{ротора}}(t)$ и $\Delta_{\text{формы}}(t)$ являются постоянными величинами и могут быть учтены калибровкой, то изменение $\Delta T(t)$ может вносить заметные изменения в результат измерения.

3. Использование фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа в информационно-управляющей части ААП. Точность угловых измерений можно повысить, если использовать подходы, изложенные в [8]. Результат достигается за счёт иной организации процесса компенсации составляющих погрешности измерений, при которой систематические составляющие погрешности измерений измеряются заранее, запоминаются и вычитаются из результата измерений, а случайные – также измеряются, но в реальном времени, и вычитаются из текущего результата измерений.

Систематическая составляющая погрешности измерений – δ_p (погрешность изготовления раstra) будет компенсироваться с помощью файла коррекции, получаемого с помощью специальной углоизмерительной установки, например АС-700 [6]. Это первое принципиальное отличие предлагаемого метода от классического. Случайная погрешность измерений, вызванная пространственной нестабильностью положения раstra при его вращении вместе с валом, обусловленная совместным действием эксцентриситета установки раstra на вал и биениями подшипников будет определяться одновременно с измерением угла поворота с помощью дополнительной измерительной головки. Функционально

данная головка регистрирует линейные смещения раstra в тангенциальном направлении (относительно используемой считывающей головки для угловых измерений). В этом заключается второе принципиальное отличие данной реализации метода по сравнению с известными преобразователями. В связи с этим данному типу преобразователя разработчики проекта дали название – *фотоэлектрические преобразователи комбинированного типа (ФПКТ)*. Его устройство показано на рис. 2.

Устройство содержит радиальный растр 1, считывающую головку 2, кольцевую окружность 3; измерительные головки 4 и 5, блоки усилителей сигналов 6 и 7, блок оцифровки и масштабирования 8, блок формирования текущей угловой координаты 9, блок памяти 10, блок обработки сигналов 11 и блок коррекции результата угловых измерений 12.

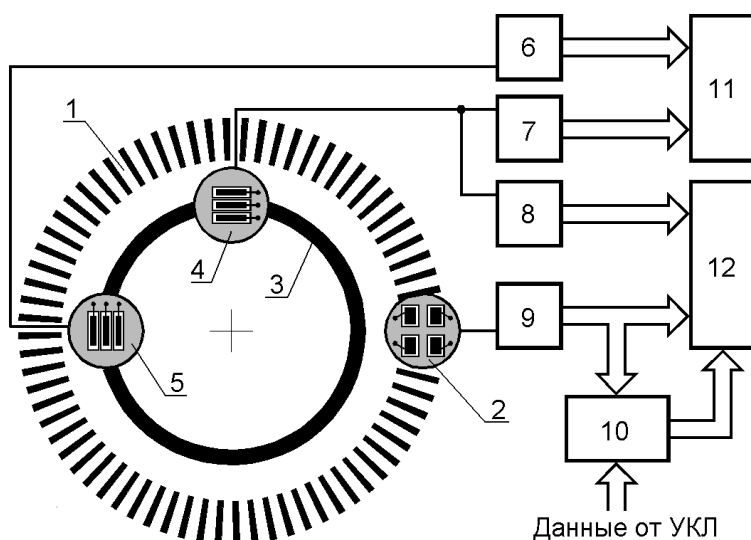


Рис. 2. Устройство фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа

Угловые смещения раstra 1 регистрируются с помощью головки считывания 2 и блока формирования текущей угловой координаты 9 по хорошо известным алгоритмам. Величину линейного смещения раstra 1 в тангенциальном направлении контролируют с помощью кольцевой окружности 3, синтезированной на стеклянной заготовке одновременно с радиальным растром 1. С кольцевой окружностью 3 сопряжены дополнительные измерительные головки 4 и 5, установленные со смещением на угол 90° и 180° относительно позиции считывающей головки 2. Эти головки сформированы на основе позиционно-чувствительного элемента, например, трёхщелевого приёмника [9]. С каждой щелью сопряжён отдельный фотоприёмник. Выходные сигналы фотоприёмников А, В и С складывают между собой с помощью операционного усилителя в соответствии с выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_A + U_C - 2U_B, \quad (2)$$

где U_A , U_B и U_C – выходные сигналы фотоприёмников А, В и С, соответственно. Когда граница окружности 3 находится точно посередине окна В, суммарный сигнал $U_{\text{вых}}$ равен нулю.

Выходной сигнал измерительных головок 4 и 5 в информационно-управляющей части системы ААП будет использован двояко. Во-первых, сигнал измерительной головки 4 оцифровывается в блоке 8 и, путём деления его на среднее значение радиуса измерительного растра, переводится в текущее значение угловой поправки, обусловленной пространственной нестабильностью положения растра относительно оси вращения вала. Далее в блоке коррекции 12 производится коррекция результатов измерений, поступивших с выхода блока 9, путём учёта данных из блока памяти 10, в котором хранятся данные об угловой погрешности измерительного растра, и данных с выхода блока 8, и формируется точное значение угла поворота ротора. Во-вторых, измерительные головки 4 и 5, блоки усилителей сигналов 6 и 7, а также блок обработки информации 11 используются для измерения биения оси вращения ротора аэро-статического подшипника. В этом случае сигналы с этих головок можно рассматривать как $x(t)$ и $y(t)$ – координаты ротора. Поскольку модуль дисбаланса пропорционален амплитуде колебаний, то величина $\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$ пропорциональна модулю дисбаланса. Как уже указывалось в п. 2, в состав считывающей головки 2 входит «метка нуля», которая связывает неподвижную систему координат с системой вращающейся вместе со шпинделем. В момент прохождения «нуля» величина $\arctan \frac{y(t)}{x(t)}$ есть угол дисбаланса.

4. Оценка эффективности использования фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа. Эффективность новой конструкции для информационно-управляющей части ААП можно оценить на примере гипотетического преобразователя, по габаритным параметрам аналогичного преобразователю ERO-725 (Heidenhain, Германия) [3]. Его параметры следующие: диаметр растра – 185 мм, число штрихов – 36 000. При изготовлении растра на лазерном генераторе изображений с круговым сканированием можно ожидать результирующую погрешность на уровне $\leq \pm 0,32''$ [10]. Основное разрешение преобразователя составит $36''$. Если обеспечен коэффициент интерполяции, равный 128, то погрешность квантования не превысит $\pm 0,28''$.

Известно, что трёхщелевой приёмник позволяет достичь чувствительности к смещению края штриха (линии) порядка $\pm (6...8)$ нм [9]. При таких параметрах измерительной головки 2 текущие биения вала и растра могут быть скомпенсированы до уровня, при котором их вклад в угловую погрешность данного преобразователя не превысит $\pm (0,04 ... 0,055)''$.

Погрешность изготовления растра оценивается с помощью установки АС-700. В соответствии с паспортом на эту установку, невозпроизводимость результатов контроля составляет $\pm 0,3''$.

Статистическое сложение трех неопределённостей, соответствующих операциям контроля погрешности растра, контроля биений границы кольцевой окружности и погрешности квантования дадут результат $\pm 0,4''$. То есть результирующая погрешность ФПКТ уменьшается в 5 раз по сравнению с моделью ERO-725 (Heidenhain, Германия).

5. Выводы. Использование фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа (ФПКТ) в информационно-управляющей части системы активной стабилизации пространственного положения ротора аэростатического подшипника позволит:

- повысить точность угловых измерений за счет внесения поправки, вычисляемой на основе данных, полученных из канала биения оси вращения аэростатического подшипника;
- компенсировать биения оси вращения аэростатического подшипника за счёт использования данных, полученных из канала биения оси вращения аэростатического подшипника, используемых в качестве входных сигналов для исполнительной части системы стабилизации пространственного положения ротора;
- формирование на одном оптическом носителе топологии 2-х измерительных преобразователей (углового и линейного), позволит значительно упростить конструкцию ААП.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 13-07-00081-А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aerotech [Electronic resource]. – [s.l.: s.n., 2005]. – Access: <http://www.aerotech.com/product-catalog/stages/rotary-stages/abrs.aspx>, free. – Title from screen.
2. Lion Precision [Electronic resource]. – [s.l.: s.n., 2005]. – Access: <http://www.lionprecision.com/sea/index.html>, free. – Title from screen.
3. Angular encoders: General Catalog / Heidenhain GmbH. – Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. – 82 p.
4. Преснухин Л.Н., Майоров С.А., Меськин И.В., Шаньгин В.Ф. Фотоэлектрические преобразователи информации // Под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
5. Ионак В.Ф. Приборы кинематического контроля // М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
6. Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений // Оптический журнал. – 2007. – №12. – С. 40–49.
7. Азаров В.А., Позняк Г.Г., Рогов В.А. Исследование динамических характеристик шпинделя особоточного токарного станка // Технология машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 13-18.
8. Пат. 2433413 С1. Российская Федерация, МПК G01P 3/36. Способ повышения точности измерения угла поворота /А.В. Кирьянов, В.П. Кирьянов; – 2010124366/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011 г., Бюл. № 31. – 2с.: ил.
9. Sawabe M., Maeda F., Yamaryo Y., Shimomura T., Saruki H., Aoyagi S. Development of the Vacuum Interferometric Comparator for Calibrating the Fine Linear Encoders and Scales / 7-th International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry and Everyday Life. Proc. SPIE. – 2002. – Vol. 4900. – Part 1. – P. 282–289.
10. Кирьянов А.В. Критерий оценки погрешности технологических комплексов для синтеза углоизмерительных структур // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – №3 (53). – С. 19-26.

© А.В. Кирьянов, В.В. Чуканов, В.П. Кирьянов, С.В. Перебейнос, 2013

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЯДРАХ КЛЕТОК, ОКРАШЕННЫХ ПО ФЁЛЬГЕНУ

Ирина Георгиевна Пальчикова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» Сибирского отделения Российской академии наук, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, профессор кафедры «Общая физика» НГУ, зав. лабораторией, тел. 8 (383) 3065874, e-mail: palchikova@gmail.com

Евгений Сергеевич Смирнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» Сибирского отделения Российской академии наук, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел.: 89658232375, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Наталья Тихоновна Ясакова

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный медицинский университет» Минздравсоцразвития России, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 52, доктор биологических наук, профессор кафедры «Медицинская генетика и биология», тел.: 8 (383) 2265510, e-mail: jasakova@inbox.ru

Леонид Владимирович Омелянчук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт молекулярной и клеточной биологии» СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 10, доктор биологических наук, зав. лабораторией, тел.: 8 (383) 3305315, e-mail: ome@mcb.nsc.ru

Валерий Фёдорович Семешин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт молекулярной и клеточной биологии» СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 10, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, тел.: 8 (383) 3305315

В статье рассматриваются оптические свойства препаратов клеток, окрашенных строго по методу Фёльгена. Применение интерференционных спектральных фильтров с шириной полосы пропускания 10 нм в осветителе позволило выявить наличие спектральной зависимости показателя поглощения в пределах ядра. На микроизображениях ядер, полученных в различных узких спектральных диапазонах, выявляются различия в соотношении компактного и диффузного хроматина, что может служить дополнительным маркёром при проведении анализа морфологии ядерных структур клеток крови.

Ключевые слова: компьютерная цитофотометрия, многоволновой метод, хроматин, ДНК.

THE ABSORPTION COEFFICIENT SPECTRUM OF FELGEN-STAINED CELLS NUCLEI

Irina G. Palchikova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya str., 41, Sc.D., professor, Ph. 8 (383) 3065874, e-mail: palchikova@gmail.com

Eugeniy S. Smirnov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya str., 41, Phone: 89658232375, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Natalya T. Yasakova

Novosibirsk Medical University, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny prospect st., 52, Sc.D., professor, Phone: 8 (383)2265510, e-mail: jasakova@inbox.ru

Leonid V. Omelyanchuk

Institute of molecular and cellular biology SB RAS, 630090 Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentev prospect, 10, Sc.D., professor, phone: 8 (383) 3305315, e-mail: ome@mcb.nsc.ru

Valery F. Semeshin

Institute of molecular and cellular biology SB RAS, 630090 Russia, Novosibirsk, Ac. Lavrentev prospect, 10, Sc.D., professor, phone: 8 (383) 3305315

The optical properties of the Felgen-stained cells preparation are studied in the article. The absorption coefficient spectrum is revealed with help of the interference spectral filters with the transmission bandwidth equal to 10 nm placed in light. The different relations between compact and diffuse chromatin was found in respectively different shot spectral ranges for images of the same nuclei. These relations can be used as additional marker in morphology analysis for the nuclear structures of blood cells.

Key words: image cytometry, multiwave method, chromatin, DNA.

Новым инструментарием клеточной биологии и медицины, который в настоящее время активно развивается, является компьютерная обработка цифровых микроизображений, позволяющая выполнять как оптико-структурный анализ для сравнительной характеристики клеточных ядер, так и денситометрический обсчет микроизображений для определения содержания ДНК в ядре. Цитофотометрия [1, 2] используется практически во всех ведущих клиниках Европы. Актуальность этого метода подтверждается, например, наличием в прошлом общеевропейских проектов стандартизации цитофотометрических измерений (European 1999 PRESS project (Prototype Reference Standard Slide)) содержания ДНК в опухолевых клетках. Вместе с тем современные технологии и элементная база позволяют развивать методы компьютерного зрения в приложении к задачам цитометрии. Эти возможности предоставляют лазерные (полупроводниковые и волоконные в том числе) источники света, современные фотоприемные матрицы с расширенным динамическим диапазоном [3], а также специальные калибровочные дифракционные паттерны и тестовые нано-объекты [4]. Всё это создает хорошую основу для количественных измерений микроскопных изображений и дальнейшего развития методов цитофотометрии, одним из которых является многоволновой метод. Предложенный в [5] интегральный денситометрический метод анализа цифровых изображений позволяет более точно учесть паразитные засветки. В одноволновом методе точный выбор длины волны не обязателен, но при двух (или много) волновой цитофотометрии – это один из самых важных факторов, определяющих точность изме-

рений. Поэтому задача изучения спектральной зависимости показателя поглощения в ядрах клеток, окрашенных по Фельгену, представляется актуальной.

В настоящей работе экспериментально изучаются особенности микроизображений ядер клеток стандартных биологических видов в многоволновом методе компьютерной цитофотометрии.

Основу цитофотометрии составляет закон Бугера – Бэра, связывающий прямой пропорциональной зависимостью оптическую плотность D и толщину h поглощающего слоя препарата:

$$D = xch.$$

Здесь c – концентрация вещества (г/см^3), x – удельный показатель поглощения вещества ($\text{см}^2/\text{г}$). Величина x характеризует свойства молекул вещества и существенно зависит от длины волны.

Влияние качества красителя и способа приготовления реактива Шиффа на интенсивность окрашивания и спектры поглощения ДНК-фуксина при проведении реакции Фельгена изучены достаточно подробно [1]. Созданы методики и прописи приготовления препаратов, окрашенных по Фельгену. Важнейшим условием нашей работы была строгая стандартизация. Для цитофотометрии использовали стекла стандартной толщины. Мазки-отпечатки готовили с образцов тканей, предварительно выдержанных в растворе трипсина (Spofa, Польша) при 37°C в течение 10 минут (процедура разобщает клетки, но не влияет на структуру хроматина). Полученный препарат фиксировали в растворе этанол – уксусная кислота в соотношении 3:1 в течении 8 минут, в дальнейшем проводили реакцию Фельгена. Она основана на депуринизации ДНК в растворе кислоты с последующей окраской освободившихся альдегидных групп реактивом Шиффа. Количество альдегидных групп, выявляемых в ядрах по содержанию комплекса ДНК-фуксин, зависит от двух процессов – депуринизации и деполимеризации ДНК, выраженность которых определяется продолжительностью кислотного гидролиза. В процессе кислотного гидролиза изменяется не само содержание ДНК, а количество выявляемого комплекса ДНК-фуксин. На начальных этапах гидролиза количество комплекса ДНК-фуксин увеличивается (скорость депуринизации выше скорости деполимеризации), затем стабилизируется на максимальных значениях (скорости уравниваются) и, наконец, начинает снижаться (депуринизация исчерпала себя, тогда как деполимеризация продолжается). Даже небольшое различие во времени гидролиза (5% раствор соляной кислоты при 37°C) приводит к изменению абсолютных значений характеристик ядра. Нами были выбраны стандартные условия гидролиза – 12 минут в 5% соляной кислоте при температуре 37°C .

Цифровые микроизображения препаратов снимались на установке компьютерной цитофотометрии, описанной в [3], с различными светофильтрами и микрообъективом Plan-Achromat $40\times/0.65$ (ZEISS, Германия). Мы выбрали микрообъектив, у которого отсутствует остаточная хроматическая аберрация в рабочем поле зрения, и проверили это экспериментальным путем с помощью спе-

циальных тестовых объектов [3] и набора интерференционных светофильтров с пиками пропускания для длин волн 500 нм, 600 нм и 650 нм и с узкой полосой пропускания (10 нм). Эксперименты проводили с препаратами крови курицы, тритона, лягушки и крысы. В процессе снятия микроизображений интерференционные светофильтры или стандартные цветные стекла помещались в осветитель. Соответствующие фотографии даны на рис. 1.

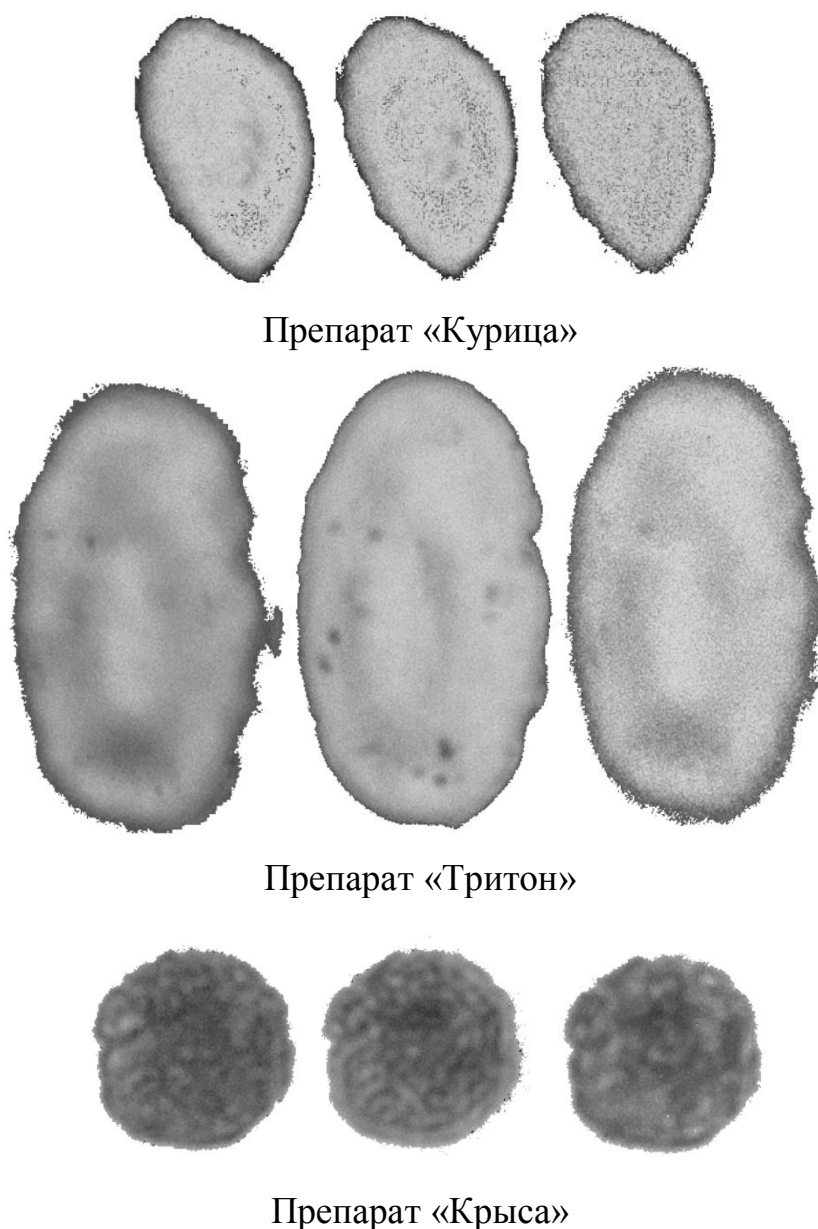
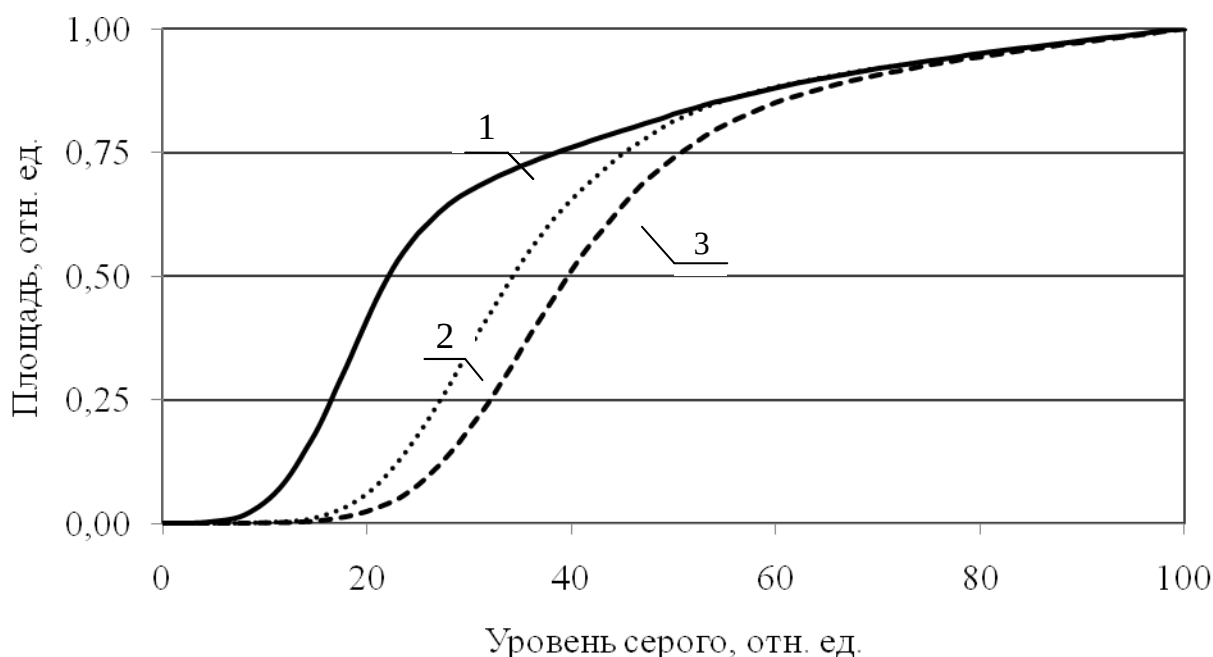


Рис. 1. Микрофотографии ядер в различных препаратах, снятые с интерференционными светофильтрами 500 нм, 600 нм и 650 нм, соответственно

К информативным морфометрическим параметрам хроматина клеточных ядер относятся интегральная оптическая плотность, доля компактного и диффузного хроматина в ядрах клеток и занимаемая ими площадь. На микроизображениях ядер рис.1, полученных в различных узких спектральных диапазо-

нах, отчетливо видны различия в соотношении компактного и диффузного хроматина. Зависимость удельного поглощения вещества от длины волны значительно влияет на результаты вычисления оптической плотности, периметра и площади одного и того же ядра, снятого с различными светофильтрами. Интегральная оптическая плотность изображений, вычисленная по алгоритму [5], существенно варьирует с длиной волны осветителя, что, однако, не влияет на точность определения количества ДНК в ядре одноволновым методом, если проводится надлежащая калибровка устройства [3]. Применение алгоритмов двухволнового метода [1] для обработки этих изображений не дает значимого результата в части уменьшения коэффициента вариации.

На рис. 2 приведены зависимости площадей изображений ядра от уровня серого, принятого за граничную величину, для трех длин волн. Площадь рассчитана для одного ядра, за 100 единиц уровня серого принято значение яркости пикселя в точке перегиба графика распределения яркости вдоль диаметра ядра. Площадь, вычисленная по этому значению уровня серого, принята за 1. То есть хроматические зависимости выявляются не только при сравнении данных от различных ядер, но и от одного ядра. Значительная хроматическая зависимость выявляется так же и при вычислении периметров.



1 – График для длины волны 500 нм; 2 – 600 нм, 3 – 650 нм.

Рис. 2. Зависимость относительной площади ядра от величины уровня серого на границе

Одной из основных проблем в объективизации медицинского заключения по цитологической картине является отображение описания на количественные показатели. Мы считаем, что хроматическая зависимость информативных морфометрических параметров хроматина клеточных ядер предоставляет возмож-

ность введения новых маркёров, а именно хроматических, для проведения анализа морфологии ядерных структур клеток крови.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магакян Ю.А., Каралова Е.М. Цитофотометрия ДНК/АН Арм ССР. Ин-т эксперим. биологии. – Ер.: Изд-во АН Арм ССР, 1989. – 204 с.
2. Пальчикова И. Г., Омелянчук Л. В., Пальчиков Е. И., Смирнов Е.С., Каманина Н.В. Компьютерная цитофотометрия. /Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы : юбилейный сборник избранных трудов КТИ НП СО РАН. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2012. – С. 375 – 398.
3. Пальчикова И. Г., Омелянчук Л. В., Пальчиков Е. И., Смирнов Е.С., Семешин В.Ф. Особенности применения цифровых камер для цитофотометрического определения количества ДНК в ядрах клеток. *Датчики и системы*. 2012, № 3, с.2 – 12.
4. Пальчикова И. Г., Омелянчук Л. В., Смирнов Е.С. О влиянии дифракции на результаты количественной цитофотометрии. *Автометрия*, 2012, №6, с.92 – 101.
5. Омелянчук В.Ф., Пальчикова И.Г., Семешин В.Ф., Алексеева А.Л., Жимулев И.Ф. Интегральный метод измерения количества ДНК в клетке с использованием цифровой микрофотографии // *Цитология*. 2010. Т. 52. № 4. С. 349 – 353.

© И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов, Н.Т. Ясакова,
Л.В. Омелянчук, В.Ф. Семешин, 2013

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТОНКОПЛЁНОЧНОМ КОНВЕРТЕРЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЕ С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИЗУАЛИЗАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пётр Станиславович Загубисало

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект акад. Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. +7 923 246 23 68, e-mail: peter.zagubisalo@gmail.com

Андрей Георгиевич Паулиш

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект акад. Лаврентьева, 2/1, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (+7 383) 316-59-10, e-mail: paulish63@ngs.ru

В докладе представлены результаты моделирования теплофизических процессов в болометрическом конвертере, преобразующем поток миллиметрового излучения в инфракрасное с использованием тонкопленочной металло-диэлектрической метаструктуры. Результаты моделирования использованы для расчета основных характеристик детектора пространственного распределения мощности миллиметрового излучения, в котором использован такой конвертер, с последующей регистрацией возникающего в нем теплового изображения с помощью инфракрасной камеры. Продемонстрирована эффективность конверсии мощности миллиметрового излучения свыше 80 %, что обеспечивает чувствительность визуализатора на уровне современных тепловизионных детекторов. Показано, что преобразование является линейным при реальных рабочих температурах конвертера. Обсуждается эффект расплывания изображения и способы уменьшения его влияния.

Ключевые слова: миллиметровое излучение, терагерцовое излучение, субтерагерцовое излучение, миллиметровое излучение, метаматериал, ультратонкий поглотитель, высокоимпедансная поверхность, матричный приемник, болометрический детектор, теплофизическое моделирование, оптическая система считывания.

SIMULATION OF THE THERMAL PROCESSES IN THE THIN-FILM CONVERTER OF MILLIMETER RADIATION INTO INFRARED RADIATION FOR CAPABILITY CHECK OF MILLIMETER WAVES IMAGER

Peter S. Zagubisalo

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDIAM») 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1, Lavrentiev avenue, junior researcher, department of thermal imaging and television, tel. +7 923 246 23 68, e-mail: peter.zagubisalo@gmail.com

Andrey G. Paulish

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDIAM») 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1, Lavrentiev avenue, Dr., associate professor, senior researcher, department of thermal imaging and television, tel. (+7 383) 316-59-10, e-mail: paulish63@ngs.ru

The results of simulation of the main characteristics of millimeter radiation image detector are provided in this report. The simulation was made by means of numerical modeling of thermophysical processes in a millimeter-to-infrared converter. The detector is based on the converter and the infrared camera. The simulations show that the energy conversion efficiency is over 80 % that provides a high sensitivity of the detector and put it in line with the modern infrared detectors. The converter temperature is linear function of a millimeter radiation power at the operating temperatures of the converter. The blooming effect and ways of its reducing are also discussed.

Key words: terahertz radiation, subterahertz radiation, millimeter radiation, metamaterials, terahertz waves, high-impedance surface, ultra-thin absorber, focal plane array detector, bolometric detectors, thermodynamic modeling, optical readout system.

В последние годы ведутся активные разработки систем для получения изображений в диапазоне миллиметрового (ММ) электромагнитного излучения [1-3]. Данная область считается перспективной для ряда практических приложений, к которым можно отнести: системы безопасности, неразрушающий контроль качества материалов, неинвазивные биомедицинские диагностики. Перспективность использования данного излучения обеспечивается возможностью достижения более высокого, по сравнению с сантиметровым диапазоном, пространственного разрешения получаемого изображения и большей, по сравнению с инфракрасным (ИК) излучением, глубиной проникновения ММ-волн в исследуемые объекты.

В работах [4, 5] нами предложен простой и эффективный способ получения изображений в диапазоне ММ и ТГц волн в реальном времени, свободный от принципиальных ограничений на апертуру диагностируемого пучка излучения. Этот способ основан на конверсии излучения указанного диапазона в инфракрасное излучение. Конвертер «ММ-ИК» представляет собой тонкопленочную метаструктуру, резонансно поглощающую ММ-излучение с заданной длиной волны с коэффициентом поглощения близким к 100%, тепловой нагрев которой далее регистрируется высокочувствительной ИК камерой. Таким образом, пространственное распределение интенсивности падающего на конвертер ММ-излучения отображается в распределении интенсивности его теплового излучения. Ключевой особенностью поглощающей метаструктуры является малость ее толщины по сравнению с рабочей длиной волны ММ-излучения, что позволяет обеспечить низкую теплоемкость и, тем самым, высокую чувствительность и быстрое действие болометрического детектора.

В настоящей работе проведено численное моделирование теплофизических процессов в «ММ-в-ИК» конвертере, в результате которого рассчитаны основные характеристики детектора ММ-излучения на основе конвертера и инфракрасной камеры.

Для расчета зависимостей характеристик конвертера от толщины слоя диэлектрика была рассмотрена радиально-симметричная модель конвертера. Конвертер был взят в виде круглой мембраны и находится в вакууме. Его диаметр равен 50 мм, основой конвертера является слой диэлектрика (в нашем случае плёнка полипропилена [4]). Миллиметровое излучение падает на конвертер со стороны поглотителя и полностью поглощается. С противоположной стороны

на диэлектрик нанесен слой алюминия толщиной 0.5 мкм и эмиссионный слой с коэффициентом серости 0.8. Конвертер освещается импульсом ММ-излучения диаметром 25 мм и длительностью 3 секунды с плотностью мощности в диапазоне от 0.3 Вт/м² до 10⁴ Вт/м².

При расчёте учитывалась теплопроводность слоев конвертера и тепловое излучение со стороны эмиссионного слоя. Тепловое излучение со стороны падающего излучения не рассматривалось, принималось, что коэффициент серости данной поверхности равен нулю. Температура по периферии конвертера принималась фиксированной и равной 293.15 К. Начальная температура так же полагалась равной 293.15 К. Данные условия позволили составить дифференциальное уравнение с граничными условиями, которое решалось методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics на временном отрезке от 0 до 20 секунд.

На рисунке 1 показаны зависимости максимального изменения температуры в центре конвертера и характерного времени отклика от толщины слоя полипропилена. Характерное время отклика (τ) рассчитывалось из аппроксимации моделированных временных зависимостей нагревания и остывания функциями $1 - e^{-1/\tau}$ и $e^{-1/\tau}$, соответственно. Следует отметить, что моделированные временные зависимости достаточно хорошо описываются данными экспоненциальными функциями. Значения τ для процессов нагревания и остывания совпадают.

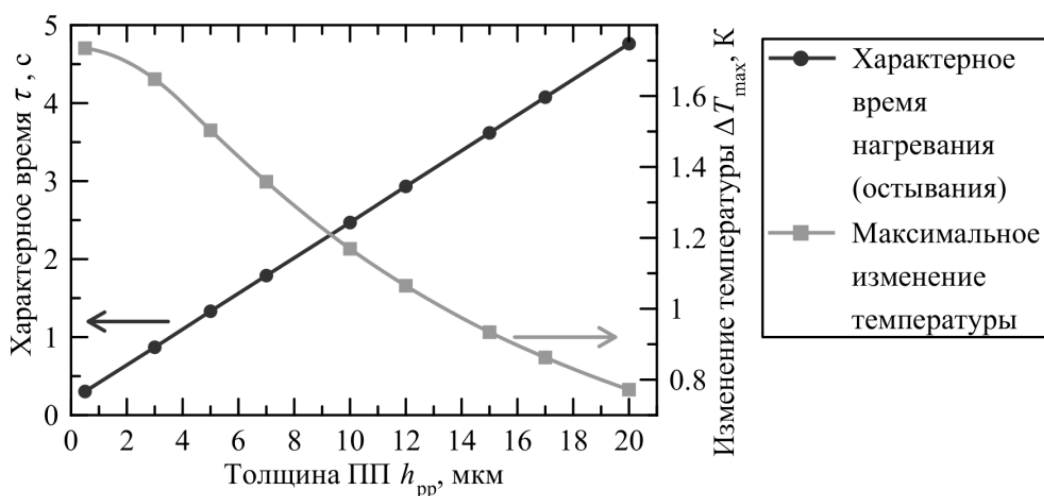


Рис. 1. Зависимости максимального изменения температуры (ΔT_{max} , К) в центре конвертера и характерного времени (τ , с) от толщины диэлектрического слоя (h_{pp} , мкм)

Из рисунка видно, что характерное время отклика является линейной функцией толщины диэлектрика, что соответствует линейной зависимости от теплоёмкости диэлектрика. Из рисунка видно, что для обеспечения режима реального времени толщина диэлектрика должна быть менее 3 мкм (τ менее 1 секунды). Зависимость ΔT_{max} от толщины диэлектрика имеет нелинейный харак-

тер и насыщается при уменьшении толщины диэлектрика менее 3 мкм, что объясняется влиянием фиксированной толщины металлического слоя.

Зная величину $\Delta T_{\max}$ конвертера и температурное разрешение ИК камеры (noise-equivalent temperature difference (NETD)), можно рассчитать зависимость минимальной обнаруживаемой плотности мощности от толщины диэлектрика, т.е. такую величину амплитуды плотности мощности миллиметрового излучения, которая вызывает изменение температуры конвертера равное NETD ИК камеры, в нашем случае на 40 мК. Эта зависимость с хорошей точностью является линейной при толщине диэлектрика более 5 мкм. При меньших толщинах диэлектрика зависимость насыщается из-за влияния фиксированного слоя металла. При толщине диэлектрика 3 мкм минимальная обнаруживаемая амплитуда плотности мощности составила 0.25 Вт/м^2 . Для сравнения с современными болометрическими ИК камерами можно рассчитать мощность на пиксель размером $15 \times 15 \text{ мкм}$, что дает $\text{NEP} = 5.6 \times 10^{-11} \text{ Вт/пиксель}$. Полученная величина чувствительности детектора на основе конвертера и ИК камеры соответствует лучшим образцам современных болометрических детекторов.

Естественным вопросом для конвертера является эффективность конверсии (η), определяемая как отношение энергии теплового излучения (E_{out}) к падающей энергии миллиметрового излучения (E_{in}). Для расчета эффективности конверсии использовались результаты моделирования в COMSOL Multiphysics. Величина η составила не менее 90% для толщин слоя диэлектрика от 3 до 20 мкм. Линейность преобразования составила более трех порядков от минимальной обнаруживаемой мощности.

Одной из важных характеристик матричного детектора изображения является эффект расплывания изображения (блужинг), обусловленный электрической или тепловой связью соседних пикселей, и характерен для матричных детекторов всех типов. В случае описываемого конвертера расплывание изображения обусловлено латеральной теплопроводностью вдоль структуры конвертера. Для уменьшения расплывания теплового поля конвертера были рассмотрены конвертеры со сквозными разрезами, не нарушающими целостности всей структуры. Разрезы имеют вид штриховых линий, расположенных на границах «условных» пикселей, формируя тем самым матричную структуру из реальных пикселей. Были рассмотрены разрезы разного типа, в зависимости от технологии их изготовления. Наиболее эффективными оказались разрезы, при которых алюминиевый слой разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене изготовлены сквозные разрезы в виде штриховых линий в промежутках между пикселями (рис. 2).

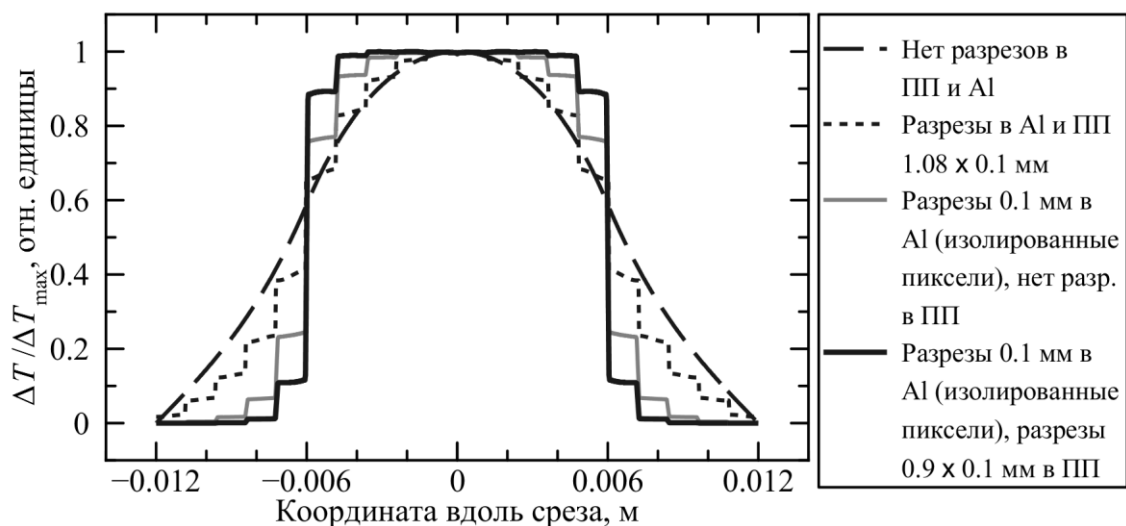


Рис. 2. Срезы пространственных распределений ΔT для различных видов разрезов, проходящие через центр конвертера и параллельные стороне конвертера. Срезы нормированы в максимуме. По оси абсцисс – координата вдоль конвертера в метрах, по оси ординат – нормированное значение температуры ($\Delta T/\Delta T_{\max}$) в относительных единицах

В работе проведено моделирование теплофизических процессов в структуре конвертера ММ-излучения в инфракрасное, возникающих при освещении конвертера ММ-излучением, с целью определения характеристик детектора изображения на основе данного конвертера и инфракрасной камеры. Полученные значения минимальной обнаруживаемой плотности мощности 0.25 Вт/м^2 соответствуют лучшим современным болометрическим детекторам. Эффективность конверсии оказалась достаточно высокой – потери в конвертере при его оптимальной конфигурации не превышают 20%. Эффект расплывания изображения может быть существенно уменьшен изготовлением соответствующих разрезов в структуре конвертера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Roger Appleby, Rupert N. Anderton, "Millimeter-Wave and Submillimeter-Wave Imaging for Security and Surveillance," *Proceedings of The IEEE*, vol. 95, no. 8, pp. 1683-1690, 2007.
2. S. Oka, H. Togo, N. Kukutsu, and T. Nagatsuma, "Latest Trends in Millimeter-Wave Imaging Technology," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 1, pp. 197–204, 2008.
3. D. Liu, U. Pfeiffer, J. Grzyb, B. Gaucher. *Advanced millimeter-wave technologies: antennas, packaging and circuits*. J. Wiley & Sons, 2009.
4. S. A. Kuznetsov, A. G. Paulish, A. V. Gelfand, P. A. Lazorskiy, V. N. Fedorinin. // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol.99. – P.023501.
5. S. A. Kuznetsov, A. G. Paulish, A. V. Gelfand, P. A. Lazorskiy, V. N. Fedorinin, "Matrix structure of metamaterial absorbers for multispectral terahertz imaging," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 122, pp. 93-103, 2012.

© П.С. Загубисало, А.Г. Паулиш, 2013

СПОСОБ ИСПРАВЛЕНИЯ КРИВИЗНЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРИЗМЕННЫХ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРАХ

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

Обсуждается возможность исправления кривизны спектральных изображений в призмённых видеоспектрометрах путем использования вспомогательной компенсационной призмы.

Ключевые слова: видеоспектрометр, искривление изображения, спектральная призма.

THE METHOD OF SPECTRAL FIELD CURVATURE CORRECTION IN IMAGING SPECTROMETERS

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Photogrammetry and Remote Sensing devices department, tel. (383) 361-08-66, e-mail: svb_dom@ngs.ru

The possibility of the spectral field curvature correction in prism image spectrometers by using of the auxiliary compensation prism is discussed.

Key words: imaging spectrometer, field curvature, spectral prism.

Любой дисперсионный видеоспектрометр содержит входной проецирующий объектив (аналог аэрофотообъектива), полихроматор – устройство, осуществляющее спектральное разложение изображения исследуемого объекта на отдельные квазимонохроматические составляющие, и приемно-регистрирующую систему – матричный фотоприемник с блоком первичной обработки и передачи видеоспектральной информации. Полихроматор включает в себя узкую входную щелевую диафрагму (или просто щель), коллиматорный объектив, диспергирующую систему в виде спектральной призмы или дифракционной решетки и камерный (фокусирующий) объектив. Щель находится во входной фокальной плоскости полихроматора, совмещенной с плоскостью изображения входного проецирующего объектива; фотоприемник располагается в выходной фокальной плоскости полихроматора, сопряженной с его же передней фокальной плоскостью. В результате, поверхность исследуемого объекта, щель и фотоприемник всегда оптически сопряжены между собой.

Полихроматор, по сути, является типичным дисперсионным спектральным прибором со всеми присущими подобному классу аппаратуры свойствами и особенностями. В частности, его диспергирующая система вносит в формируемую спектральную картину хорошо известные специфические искажения – все монохроматические изображения прямой входной щели (а, значит, и скани-

руемого объекта) в фокальной плоскости камерного объектива, не размываясь, искривляются по дугам, которые в первом приближении можно считать отрезками параболы (рис. 1, 2) [1]. Такое нарушение подобия изображения обусловлено особенностями хода «косых» лучей от точек входной щели, не лежащих в горизонтальной (меридиональной) плоскости симметрии.

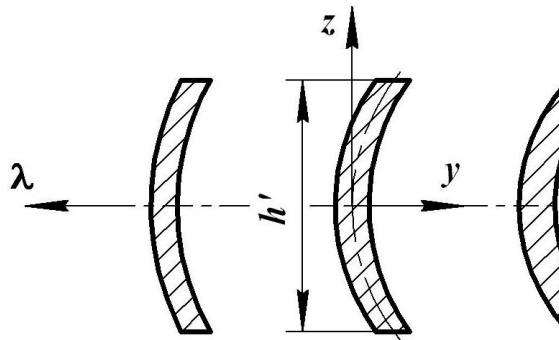


Рис. 1. Схематический вид монохроматических изображений входной щели в призменном приборе



Рис. 2. Характер искажений монохроматических изображений исследуемого объекта

Уравнение семейства парабол в спектре, даваемом призмой, имеет вид

$$y = \frac{\partial \Theta}{\partial n} \frac{n^2 - 1}{2n} \frac{z^2}{f},$$

где y и z – горизонтальная и вертикальная координаты монохроматических изображений в плоскости фотоприемника (т. е. y – вдоль его строк, а z – вдоль столбцов), Θ – угол отклонения диспергированного пучка от своего первоначального направления, n – показатель преломления материала призмы, f – фокусное расстояние камерного объектива полихроматора видеоспектрометра. Выпуклости изображений обращены в сторону увеличения длин волн, а их радиусы кривизны равны

$$r = \frac{z^2}{2y} = \frac{nf}{(n^2 - 1)(\partial \Theta / \partial n)}. \quad (1)$$

Поскольку преломляющие свойства призмы в большей степени проявляются для коротких длин волн, то и изображения в коротковолновой части спектра искривляются сильнее.

Если высота h' монохроматических изображений щели соответствует высоте h столбцов используемого матричного фотоприемника (как и должно быть при оптимальном согласовании оптической и приемно-регистрирующей сис-

тем), то максимальная стрелка прогиба $y_{\max}$ изображений в пределах его поля

$$y_{\max} = \frac{\partial \Theta}{\partial n} \frac{n^2 - 1}{n} \frac{h^2}{8f} = \frac{h^2}{8r}. \quad (2)$$

Для наиболее характерного и чаще других встречающегося на практике положения призмы в минимуме отклонения, когда $\Theta = \min = \Theta_0$, выражение для производной $\partial \Theta / \partial n$ принимает вид

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial n} \right)_0 = \frac{2 \sin(\gamma/2)}{\sqrt{1 - n_0^2 \sin^2(\gamma/2)}}, \quad (3)$$

где γ – преломляющий угол призмы, а показатель преломления n_0 относится к длине волны настройки λ_0 светового пучка, идущего в минимуме отклонения.

Формулы (2), (3) позволяют легко оценить искажения численно. Например, на длине волны настройки $\lambda_0 = 486,13$ нм (линия F видимого диапазона) в приборе с $f = 100$ мм, $h = 3,84$ мм (256 пикселей размером 15 мкм) и призмой из стекла ТФ5 ($n_0 = 1,774755$ [2]) с преломляющим углом $\gamma = 40^\circ$ «увод» изображения из-за его искривления на краях поля зрения составит $y_{\max} = 19$ мкм (радиус кривизны изображения $r = 95,9$ мм). Это – более одного пикселя фотоприемника, или, что то же самое, минимально различимого элемента на поверхности исследуемого объекта. Столь существенное отклонение заметно ухудшает качество спектральных изображений в каналах видеоспектрометра и снижает его геометрическое разрешение.

Для «спрямления» изображений можно воспользоваться дополнительной компенсационной призмой, изготовленной из «легкого» материала с малой собственной дисперсией и установленной преломляющим углом в сторону, противоположную преломляющему углу основной диспергирующей призмы, т. е. по схеме вычитания дисперсий.

Условимся считать, что первой по ходу лучей расположена основная диспергирующая призма, а уже за ней – компенсационная, и присвоим индексы «1» и «2» всем величинам, характеризующим ту и другую призмы. Тогда для результирующего радиуса кривизны r_Σ спектральных изображений системы из двух призм в воздухе в общем случае с учетом знаков r_1 и r_2 можно записать [3]

$$\frac{f}{r_\Sigma} = \frac{f}{r_1} \Gamma_2 - \frac{f}{r_2},$$

откуда

$$r_\Sigma = \frac{r_1 r_2}{r_2 \Gamma_2 - r_1};$$

здесь Γ_2 – меридиональное увеличение, вносимое второй призмой.

Как видно, $r_\Sigma = \infty$ при $r_1 = \Gamma_2 r_2$, т. е. при

$$\frac{n_2 \Gamma_2}{(n_2^2 - 1)(\partial\Theta/\partial n)_2} = \frac{n_1}{(n_1^2 - 1)(\partial\Theta/\partial n)_1}.$$

Когда обе призмы работают в минимуме отклонения, увеличение $\Gamma_2 = 1$,

$$r_\Sigma = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (4)$$

и $r_\Sigma = \infty$ при $r_1 = r_2$, для чего должно выполняться равенство

$$\frac{n_{0,2}}{(n_{0,2}^2 - 1)(\partial\Theta/\partial n)_{0,2}} = \frac{n_{0,1}}{(n_{0,1}^2 - 1)(\partial\Theta/\partial n)_{0,1}},$$

или, принимая во внимание (3),

$$\frac{\sqrt{1 - n_{0,2}^2 \sin^2(\gamma_2/2)}}{\sin(\gamma_2/2)} \frac{n_{0,2}}{n_{0,2}^2 - 1} = \frac{\sqrt{1 - n_{0,1}^2 \sin^2(\gamma_1/2)}}{\sin(\gamma_1/2)} \frac{n_{0,1}}{n_{0,1}^2 - 1}.$$

Если при этом параметры основной диспергирующей призмы заранее определены из предварительного спектрального расчета, то преломляющий угол γ_2 компенсационной призмы находится из последнего соотношения как

$$\gamma_2 = 2 \arcsin \left(A^2 + n_{0,2}^2 \right)^{-1/2}$$

при

$$A = \frac{\sqrt{1 - n_{0,1}^2 \sin^2(\gamma_1/2)}}{\sin(\gamma_1/2)} \frac{n_{0,1}}{n_{0,1}^2 - 1} \frac{n_{0,2}^2 - 1}{n_{0,2}},$$

а общий угол отклонения $\Theta_{0,\Sigma}$ пучка системой оказывается равным

$$\Theta_{0,\Sigma} = 2(i_{0,1} - i_{0,2}) - (\gamma_1 - \gamma_2),$$

где

$$i_{0,1} = \arcsin \left(n_{0,1} \sin \frac{\gamma_1}{2} \right) \quad \text{и} \quad i_{0,2} = \arcsin \left(n_{0,2} \sin \frac{\gamma_2}{2} \right).$$

Проиллюстрируем возможности рассматриваемого способа применительно к предыдущему численному примеру, считая призму из стекла ТФ5 основной диспергирующей ($n_{0,1} = 1,774755$, $\gamma_1 = 40^\circ$ и $r_1 = 95,9$ мм). Как указывалось вы-

ше, компенсационная призма должна быть изготовлена из «легкого» стекла с малой дисперсией. К таким стеклам относятся стекла марок ЛК, из которых действующий ГОСТ [4] предпочтительными для использования устанавливает только две – ЛК6 и ЛК7. Обе они характеризуются одинаковой плотностью, но показатели преломления у стекла ЛК6 несколько меньше и остаются практически постоянными в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Последний фактор играет весьма немаловажную роль при выборе материалов для элементов аэрокосмической аппаратуры. С учетом данных обстоятельств целесообразно остановиться именно на стекле марки ЛК6. Тогда для длины волны настройки $n_{0,2} = 1,475328$ [2], $A = 1,529813$, $\gamma_2 = 56^\circ 08' 10''$ и $\Theta_{0,\Sigma} = 2^\circ 57' 35''$. Из технологических соображений величину γ_2 удобно округлить до целого значения $\gamma_2 = 56^\circ$ (в таком случае $\Theta_{0,\Sigma} = 3^\circ 04' 11''$). Далее с помощью формул (1), (4) и (2) последовательно находим: $r_2 = 96,3$ мм, $r_\Sigma = 21\,993$ мм и $y_{\max} = h^2/8r_\Sigma = 0,08$ мкм. Полученный результат означает, что остаточная стрелка прогиба изображений по всему полю матричного фотоприемника не превышает 1/180 размера одного его пиксела, т. е. пренебрежимо мала.

Таким образом, использование компенсационной призмы с оптимальными параметрами позволяет практически полностью избавиться от искривления спектральных изображений чисто оптическими средствами, не прибегая к усложнению и без того трудоемкой математической обработки видеоданных.

В заключение обратим внимание на то, что в двухпризменной системе общий угол отклонения $\Theta_{0,\Sigma}$ составляет всего $\approx 3^\circ$ и, по-видимому, при определенном соотношении между преломляющими углами призм может быть доведен до 0° ; оптические оси коллиматорного и камерного объективов полихроматора тогда останутся параллельными, что часто удобно (или необходимо) по конструктивным соображениям. Действительно, как показывает расчет, если при сохранении неизменным угла γ_1 увеличить угол γ_2 до значения $\gamma_2 = 59^\circ 39'$, то $\Theta_{0,\Sigma} = 0^\circ 00'$. При этом степень исправления кривизны изображения остается вполне приемлемой: $|y| \leq 2,3$ мкм. Более подробно условия и возможности подобной оптимизации параметров призмных диспергирующих систем видеоспектрометров будут рассмотрены отдельно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
2. ГОСТ 13659–78 «Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры». – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999.
3. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979. – 478 с.
4. ГОСТ 3514–94 «Стекло оптическое бесцветное. Технические условия». – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.

© В.Б. Шлишевский, 2013

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

Василий Михайлович Тымкул

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Любовь Васильевна Тымкул

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Юрий Александрович Фесько

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8-913-752 92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

Алексей Николаевич Поликанин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8-913-397-63-51, e-mail: 600607@ngs.ru

В статье рассматривается обоснование методики и результаты расчета дальности действия тепловизионных систем при обнаружении, классификации, распознавании и идентификации объектов. Методика основана на установлении функциональной связи искомых величин с пороговой температурной чувствительностью и температурно-частотной характеристикой тепловизоров при наблюдении объектов на однородном и неоднородном поле теплового излучения.

Ключевые слова: дальность действия тепловизора, обнаружение, классификация, распознавание, идентификация объектов.

ENERGY CALCULATIONS IR SYSTEMS. PART 1. CALCULATION OF THE RANGE

Vasily M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Lyubov V. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Yuri A. Fesko

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD-student, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8-913-752 92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

Alexey N. Polikanin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, senior lecturer, department of «Nanosystems and optical engineering», тел. 8-913-397-63-51, e-mail: 600607@ngs.ru

In the article the study methodology and results of the calculation range action of the thermal imaging systems for detection, classification, recognition and identification of objects. The technique is based on the establishment of a functional link with the required quantities of the threshold temperature sensitivity and temperature-frequency response of thermal imagers for observing objects in a uniform and non-uniform thermal radiation field.

Key words: range imager, detection, classification, recognition, identification of objects.

В настоящее время наиболее широкое развитие получили такие оптико-электронные приборы и системы как тепловизоры. Они в достаточной мере используются в науке, технике, строительстве, теплоэнергетике, медицине и оборонных системах и комплексах. В монографиях М.М. Мирошникова [1] и Дж. Ллойда [2] обобщены теоретические основы и методы расчета основного функционального параметра тепловизионных систем, представляющего собой «разность температур, эквивалентной шуму» $\Delta T_{\text{пор}}$. Этот параметр является пороговой температурной чувствительностью тепловизора и функционально связан с основными параметрами оптической системы тепловизора, приемника оптического излучения (ПОИ), наблюдаемого объекта, слоя атмосферы между объектом и прибором, электронного тракта обработки информации и видеоконтрольного устройства. Кроме того следует отметить, что Дж. Ллойд параметр $\Delta T_{\text{пор}}$ назвал одним из обобщенных критериев проектирования и синтеза систем тепловидения.

В работе [3], на основании материалов работ [1, 2], нами представлена методика расчета пороговой чувствительности тепловизионных систем $\Delta T_{\text{пор}}^{(h)}$ при работе по неоднородному полю теплового излучения и рассмотрена модель космического тепловизионного эксперимента. Обобщая материалы по методам расчета разности температур, эквивалентной шуму $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{пор}}^{(h)}$, а также температурного разрешения $\Delta T_{\text{раз}}$, нами в работе [4] рассмотрена аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров, работающих как по однородному, так и неоднородному объектно-фоновому полю теплового излучения.

Анализ литературы по методам расчета функциональных параметров и характеристик тепловизоров показал, что основное внимание разработчиков и специалистов-системщиков по теории и практике тепловизионных систем было обращено на улучшение (минимизацию) значений $\Delta T_{\text{пор}}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ как основных функциональных параметров таких систем наблюдения, а также методам

оптимизации и повышения их эффективности [5,6], а вопросам расчета и оценки дальности действия тепловизоров практически уделялось недостаточно внимания. Этим, по-видимому, объясняется тот факт, что в литературе выявлены небольшое число публикаций [7-9, 11] в которых рассматриваются вопросы расчета и оценки дальности действия тепловизионных систем. Интерес к вопросам расчета и анализа дальности действия тепловизоров возрос после издания монографии академика РАН А.Г. Шипунова и д.т.н. Е.Н. Семашкина [12]. При этом, тем не менее, уместно отметить фундаментальный характер, комплексный и системный подход унифицированной методики расчета дальности действия тепловизионных приборов, разработанной в ФНПЦ НПО «ГИПО» и представленной в работе [7] и монографии [11].

Целью настоящей работы является обоснование и изложение методики расчета дальности действия тепловизионных систем при обнаружении, классификации, распознавании и идентификации объектов с позиции взаимосвязи с параметрами $\Delta T_{\text{пор}}$, $\Delta T_{\text{пор}}^{(H)}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ как основных функциональных параметров этих систем. Кроме того, будут сформулированы и выявлены закономерности функциональных зависимостей искомых дальностей обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов от ряда параметров как оптической системы тепловизора (например, мгновенного поля зрения, диафрагменного числа объектива и заднего фокусного расстояния), так и параметров и характеристик фотоприемного устройства, электронной схемы обработки сигналов, видеоконтрольного устройства и поля температур объектно-фоновой обстановки. Следует отметить, что формирование отмеченных функциональных зависимостей особенно актуально для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами расчета и проектирования оптических и электронных схем тепловизоров, их конструирования и исследования.

Вывод рабочих соотношений методики расчета дальности действия тепловизоров основывается на следующих выражениях для $\Delta T_{\text{пор}}$, $\Delta T_{\text{пор}}^{(H)}$ и $\Delta T_{\text{раз}}$ [1-4]:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi k_9 T^2 m \sqrt{ab \Delta f_R}}{\lambda_2 \frac{D^* \alpha \beta C_2 A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) W(\lambda, T) \lambda^{-1} d\lambda}{\lambda_1}}; \quad (1)$$

$$\Delta T_{\text{раз}} = \frac{3 \Delta T_{\text{пор}} \nu \sqrt{\alpha \beta}}{r_{\Sigma}(\nu) \sqrt{\tau \Delta f_R T_e f_k}}; \quad (2)$$

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(H)} = \frac{\pi k_9 m \sqrt{ab \Delta f_R} \cdot \left[1 + K^2 (\bar{\Phi}_{\Phi}) + K_{\Phi}^2 I_{\Phi}^2 \right]^{1/2}}{D^* A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \left[\varepsilon(\lambda) A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) + \varepsilon_{\Phi}(\lambda) A_{\Phi}(\lambda, T_{\Phi}(x, y), \bar{T}_{\Phi}) \right] d\lambda}, \quad (3)$$

где

$$I_{\phi} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \varepsilon_{\phi}(\lambda) B_{\phi}(\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}_{\phi}) d\lambda; \quad (4)$$

$$K_{\phi} = \frac{D^* A_0}{\pi l^2 k_3 \sqrt{ab \Delta f_R}}; \quad (5)$$

$$B(\lambda, T(x, y), \bar{T}) = \iint_{(x_o, y_o)} \Delta W(\lambda, T(x, y), \bar{T}) dx dy; \quad (6)$$

$$B_{\phi}(\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}_{\phi}) = \iint_{(x_{\phi}, y_{\phi})} \Delta W(\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}_{\phi}) dx dy; \quad (7)$$

$$A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) = \alpha_0 \beta_0 \frac{dW(\lambda, \bar{T})}{dT} + \frac{dB(\lambda, T(x, y), \bar{T})}{l^2 dT}; \quad (8)$$

$$A_{\phi}(\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}_{\phi}) = \alpha_{\phi} \beta \frac{dW(\lambda, \bar{T}_{\phi})}{dT} + \frac{dB_{\phi}(\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}_{\phi})}{l^2 dT}; \quad (9)$$

D^* и $S(\lambda)$ – удельная обнаружительная способность и относительная спектральная чувствительность ПОИ; (a, b) и Δf_R – линейные размеры и шумовая полоса частот электрической схемы включения ПОИ; (λ_1, λ_2) – границы спектральной чувствительности ПОИ; k_3 – коэффициент использования ПОИ излучения эталонного источника; m – отношение «сигнал/шум»; A_0 и (α, β) – площадь входного зрачка и линейные углы мгновенного поля зрения объектива тепловизора по строке и по кадру; $W(\lambda, T)$ – спектральная светимость АЧТ с температурой T ; $T(x, y)$ и $T_{\phi}(x, y)$ – функции распределения температуры по поверхности объекта и фона в случае наблюдения прибором неоднородных тепловых полей объектно-фоновой обстановки; $\bar{T}$ и $\bar{T}_{\phi}$ – среднее значение температуры поверхности объекта и фона; $\varepsilon(\lambda)$ и $\varepsilon_{\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения поверхности объекта и фона; $\tau_o(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы тепловизора и слоя атмосферы между объектом и прибором; C_2 – постоянная в формуле Планка; $\Delta W(\lambda, T(x, y), \bar{T})$ и $\Delta W_{\phi}(\lambda, T_{\phi}(x, y), \bar{T}_{\phi})$ – абсолютный контраст спектральной светимости АЧТ [10], имеющих температуры аналогичные температурам поверхности объекта и фона соответственно; T_e и f_k – постоянная времени глаза и частота кадров тепловизора; ν – пространственная частота в пространстве предметов, рад⁻¹; $K(\Phi_{\phi})$ – коэффициент, учитывающий увеличение порогового сигнала ПОИ за счет засветки постоянной составляющей фона; $r_{\Sigma}(\nu)$ – результирующий модуль передаточ-

ной функции (МПФ) всех звеньев тепловизора; α_0, β_0 – линейные углы которые стягивают по строке и кадру объект, находящийся на расстоянии l от прибора; $\alpha_\phi = \alpha - \alpha_0$; $\beta_\phi = \beta - \beta_0$; $(x_0, y_0), (x_\phi, y_\phi)$ – декартовы координаты поверхности объекта и фона в пространстве предметов.

В конечном итоге, выражение для дальности действия тепловизоров при работе по изотермическим объектам получено в виде:

$$l = \frac{hr_\Sigma(v)\Delta T_{\text{раз}}(T_e \cdot f_k)^{1/2} C_2 D^* (d/f')^2 f' \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda) \times}{\times \varepsilon(\lambda)W(\lambda, T)\lambda^{-1}} \right] d\lambda}{6\sqrt{2}k_3 T^2 \sqrt{\Delta f_R} N \cdot m}, \quad (10)$$

где d – диаметр входного зрачка оптической системы тепловизора; h – критический размер объекта; f' – заднее фокусное расстояние объектива тепловизора.

В свою очередь, дальность обнаружения объектов при работе тепловизионных систем по неоднородному полю теплового излучения определяется следующим соотношением:

$$l_0^{(H)} = \frac{\left[\frac{\Delta T_{\text{раз}} f' r_\Sigma(v) (T_e f_k)^{1/2} \times}{\times (d/f')^2 h D^*} \right] \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda) \left[\frac{\varepsilon(\lambda)A(\lambda, T(x, y), \bar{T}) +}{+ \varepsilon_\phi(\lambda)A_\phi(\lambda, T_\phi(x, y), \bar{T}_\phi)} \right] d\lambda}{6\sqrt{2}\alpha\beta\sqrt{\Delta f_R} N \cdot m k_3 \left[1 + K^2(\bar{\Phi}_\phi) + K_\phi^2 I_\phi^2 \right]^{1/2}}. \quad (11)$$

Выводы:

1. На основании теоретических основ расчета пороговой температурной чувствительности и температурно-частотной характеристики тепловизионных систем, разработанных М.М. Мирошниковым и Дж. Ллойдом, приведена методика расчета их дальности обнаружения, выделения, классификации, распознавания и идентификации изотермических объектов.

2. При наблюдении тепловизионными системами объектно-фоновой сцены с неоднородными полями температур разработана методика расчета дальности обнаружения объектов на неоднородном поле теплового излучения фона.

3. Полученные аналитические закономерности влияния параметров оптической системы тепловизора, приемника оптического излучения, электронной схемы обработки информации, видеоконтрольного устройства и поля температур объектно-фоновой обстановки на дальность действия могут быть использованы как в теории, так и в инженерной практике проектирования, расчета и моделирования работы тепловизионных систем и ИК систем наблюдения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

6. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
7. Ллойд Дж. Системы тепловидения. Пер. с англ. М.В. Васильченко; под ред. А.И. Горячева. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
8. Тымкул В.М., Тымкул О.В. Методика расчета температурной чувствительности космических тепловизионных систем при работе по неоднородному полю теплового излучения // Исследование Земли из космоса. – 1997. – № 6. – С. 20-24.
9. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Тымкул О.В. Аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров // Оптический журнал. – 2002. – № 10. – С. 73-76.
10. Иванов В.П., Овсянников В.А., Филиппов В.Л., Метод оптимизации несканирующих тепловизионных приборов // Оптический журнал. – 2012. – № 3. – С. 4-10.
11. Балоев В.А., Мишанин С.С., Овсянников В.А., Филиппов В.Л., Якубсон С.Е., Яцык В.С. Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения // Оптический журнал. – 2012. – № 3. – С. 22-32.
12. Иванов В.П., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Особенности расчета дальности действия несканирующих тепловизионных приборов // Оборонная техника. – 2010. – № 6-7. – С. 54-61.
13. Габдрахманов Т.Р., Овсянников В.А., Яцык В.С. К развитию методик оценки дальности действия несканирующих авиационных приборов оптической локации // Сб. матер. XX Всерос. межвуз. научно-техн. конф. Электромеханические и внутрикамерные процессы в электрических устройствах, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. – Казань: Отечество, 2008. – Ч. 2. – С. 283-284.
14. Скобло В.С. К оценке дальности действия тепловизионных систем // Изв.вузов. Приборостроение. – 2001. – № 1.
15. Справочник по инфракрасной технике / Ред. У.Волф, Г. Цисис. В 4-х тт. Т. 1. Физика ИК-излучения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1995. – 606 с.
16. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань: Отечество, 2006. – 594 с.
17. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, круглосуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. – М.: Машиностроение, 2011. – 216 с.

© В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, А.Н. Поликанин, 2013

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 2. АЛГОРИТМ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ

Василий Михайлович Тымкул

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оплотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Любовь Васильевна Тымкул

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оплотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Евгений Владимирович Лаптев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оплотехника», тел. 8-913-060-28-27, email: genius-1188@yandex.ru

Михаил Петрович Исаев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оплотехника», тел. 8-913-777-59-28, e-mail: mihail54@mail.ru

Евгений Александрович Крапивко

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оплотехника», тел. 8-960-795-40-84, e-mail: trueman988@mail.ru

Юрий Александрович Фесько

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оплотехника», тел. 8-913-752-92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

Приводится алгоритм, выбор исходных данных и моделей передаточных функций звеньев тепловизора и коэффициента пропускания атмосферы, а также результаты расчета дальности обнаружения тепловизора IRIS AWS (Франция).

Ключевые слова: дальность обнаружения тепловизора, модуль передаточной функции, объектно-атмосферная обстановка, критерий Джонсона.

ENERGY CALCULATIONS IR SYSTEMS. PART 2. ALGORITHM AND CALCULATIONS OF RANGE OF THE THERMAL IMAGER

Vasily M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Lyubov V. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Eugene V. Laptev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (913) 060 2827, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

Mikhail P. Isayev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, postgraduate, engineer, department of special devices and technologies, tel. (913)777-59-28, e-mail: mihail54@mail.ru

Evgeniy A. Krapivko

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD-student, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8-960-795-40-84, e-mail: trueman988@mail.ru

Yuri A. Fesko

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD-student, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8-913-752 92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

Described algorithm, the choice of input data and model transfer functions thermal units and the transmittance of the atmosphere, and the results of the calculation of the detection range of the thermal IRIS AWS (France).

Key words: detection range of the thermal module, the transfer function, object-atmospheric conditions, the criterion Johnson.

Введение и постановка задачи. В работе [1] подробно рассмотрена методика расчета дальности действия тепловизионных систем, которая основана на анализе и установлении функциональной связи искомой величины с пороговой температурной чувствительностью $\Delta T_{\text{пор}}$ и температурно-частотной характеристикой $\Delta T_{\text{раз}}(\nu)$ при наблюдении объектов на однородном и неоднородном поле теплового излучения. Так, применительно к условию наблюдения изотермических объектов на излучающем тепловом фоне, получено следующее выражение для дальности действия тепловизоров:

$$l = \frac{hr_{\Sigma}(\nu)\Delta T_{\text{раз}}(T_e \cdot f_k)^{1/2} C_2 D^* (d/f')^2 f' \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda) \times}{\times \varepsilon(\lambda)W(\lambda,T)\lambda^{-1}} \right] d\lambda}{6\sqrt{2}k_3 T^2 \sqrt{\Delta f_R} N \cdot m}, \quad (12)$$

где D^* и $S(\lambda)$ – удельная обнаружительная способность и относительная спектральная чувствительность приемника оптического излучения (ПОИ); Δf_R – шумовая полоса частот электрической схемы включения ПОИ; (λ_1, λ_2) – границы спектральной чувствительности ПОИ; k_s – коэффициент использования ПОИ излучения эталонного источника; m – отношение «сигнал/шум»; $W(\lambda, T)$ – спектральная светимость АЧТ с температурой T ; $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения поверхности объекта; $\tau_o(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы тепловизора и слоя атмосферы между объектом и прибором; C_2 – постоянная в формуле Планка; T_e и f_k – постоянная времени глаза и частота кадров тепловизора; ν – пространственная частота в пространстве предметов, мрад^{-1} ; $r_\Sigma(\nu)$ – результирующий модуль передаточной функции (МПФ) всех звеньев тепловизора; d и f' – диаметр входного зрачка и заднее фокусное расстояние оптической системы тепловизора; N – критерий (число) Джонсона, имеющий смысл количества периодов эквивалентной миры, укладывающихся в критический размер объекта при решении системой задачи наблюдения (обнаружения, распознавания, классификации и идентификации).

Целью настоящей работы является анализ методики расчета дальности действия тепловизоров, выбор исходных данных и моделей передаточных характеристик их звеньев, проведение расчетных исследований и сопоставление с данными натурных исследований.

Выбор исходных данных, моделей составных звеньев тепловизора и параметров атмосферы. Если рассматривать тепловизор как линейную систему с последовательно расположенными звеньями в виде оптической системы, приемника оптического излучения, электронного тракта, видеоконтрольного устройства (ВКУ) и глаза оператора, то, с учетом работы [2], суммарный модуль $r_\Sigma(\nu)$ передаточной характеристики тепловизора представляется в виде:

$$r_\Sigma(\nu) = r_o(\nu)r_{\text{пр}}(\nu)r_{\text{ин}}(\nu)r_{\text{син}}(\nu)r_{\text{в}}(\nu)r_{\text{ус}}(\nu)r_{\text{вк}}(\nu)r_{\text{гл}}(\nu)r_{\text{см}}(\nu), \quad (13)$$

где $r_o(\nu)$ – модуль передаточной функции (МПФ) оптической системы тепловизора; $r_{\text{пр}}(\nu)$ – МПФ приемной площадки ПОИ; $r_{\text{ин}}(\nu)$ – МПФ инерционности элементов ПОИ; $r_{\text{син}}(\nu)$ – МПФ синхронизации элементов изображения тепловизора; $r_{\text{в}}(\nu)$ – МПФ выборки по строке и кадру; $r_{\text{ус}}(\nu)$ – МПФ усилителя сигналов ПОИ; $r_{\text{вк}}(\nu)$ – МПФ видеоконтрольного устройства; $r_{\text{гл}}(\nu)$ – МПФ глаза оператора; $r_{\text{см}}(\nu)$ – МПФ смаза в изображении по строке и кадру.

Подробный системный анализ передаточных характеристик всех звеньев тепловизора нами дан с использованием работ [2,3]. Так, согласно этим работам, входящие в формуле (13) МПФ звеньев аппроксимируются следующими соотношениями:

$$r_o(v) = 0,64e^{-1,33\left(\frac{d_a v}{f'}\right)^2} \left\{ \arccos\left(\frac{\lambda_0 v}{d}\right) - \frac{\lambda_0 v}{d} - \left[1 - \left(\frac{\lambda_0 v}{d}\right)^2\right]^{1/2} \right\}; \quad (14)$$

$$r_{\text{прс}}(v) = \left| \frac{\sin(\pi \delta_c v)}{\pi \delta_c v} \right|; \quad r_{\text{прк}}(v) = \left| \frac{\sin(\pi \delta_k v)}{\pi \delta_k v} \right|; \quad (15)$$

$r_{\text{ин}}(v) = r_{\text{син}}(v) = 1$ – для тепловизоров с матричными ПОИ;

$$r_{\text{yc}}(v) = \left(1 + \frac{2v\delta_c}{\alpha_{\text{yc}}} \right)^{-1/2}. \quad (16)$$

Значения МПФ для звеньев тепловизора по строке:

$$r_{\text{вс}}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_c / \alpha_c \chi_c)}{(\pi v \delta_c / \alpha_c \chi_c)} \right|; \quad (17)$$

$$r_{\text{вкyc}}(v) = e^{-\left(1,33v^2\delta_c^2/z^2\alpha_c^2\chi_c^2\right)}; \quad (18)$$

$$r_{\text{гjc}}(v) = e^{-\left(1,23v^2\delta_c^2/\delta_m^2z^2\alpha_c^2\chi_c^2\right)}; \quad (19)$$

$$r_{\text{смс}}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_c / \alpha_c \chi_c)}{(\pi v \delta_c / \alpha_c \chi_c)} \right|. \quad (20)$$

Значения МПФ по кадру:

$$r_{\text{вк}}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_k / \alpha_k \chi_k)}{(\pi v \delta_k / \alpha_k \chi_k)} \right|; \quad (21)$$

$$r_{\text{вкyк}}(v) = e^{-\left(1,33v^2\delta_k^2/z^2\alpha_k^2\chi_k^2\right)}; \quad (22)$$

$$r_{\text{гjk}}(v) = e^{-\left(1,23v^2\delta_k^2/\delta_m^2z^2\alpha_k^2\chi_k^2\right)}; \quad (23)$$

$$r_{\text{смк}}(v) = \left| \frac{\sin(\pi v \delta_k / \alpha_k \chi_k)}{(\pi v \delta_k / \alpha_k \chi_k)} \right|, \quad (24)$$

где d_a – диаметр абберационного пятна рассеяния объектива тепловизора; λ_0 – эффективная длина волны измерительной системы тепловизора; $\delta_c = (a/f) \cdot 1000$, $\delta_k = (b/f) \cdot 1000$ – соответственно угловой размер элементарного поля зрения по строке и кадру (мрад); $\alpha_c = n_c/R_c$, $\alpha_k = n_k/R_k$ – коэффициенты переналожения (число отсчетов на элемент) по строке и кадру; $\alpha_{\text{yc}} = 1,25$; χ_c, χ_k – коэффициенты запол-

нения элементов ПОИ по строке и кадру: $\chi_c = \alpha_c / \Delta\alpha_c$, $\chi_k = \alpha_k / \Delta\alpha_k$; $\alpha_c = a$; $\alpha_k = b$; $\Delta\alpha_c$, $\Delta\alpha_k$ – шаг элементов ПОИ по строке и кадру; z – электронное увеличение тепловизора: $z = H_3 / (bN_c)$, где H_3 – высота экрана монитора ВКУ; N_c , b – число элементов и размер одного элемента матричного ПОИ по высоте кадра; δ_m – угловой размер элемента изображения на экране монитора, мрад; $\delta_m = (d_m / D') \cdot 1000$; d_m – диаметр светового пятна на экране монитора; D' – расстояние от глаза оператора до экрана монитора.

Следует отметить, что пространственная частота ν в формулах (1)-(13) связана с дальностью l следующим образом:

$$\nu = lN / (2h \cdot 1000), \text{ мрад}^{-1}. \quad (25)$$

Для анализа влияния слоя атмосферы между объектом и прибором на дальность действия тепловизора, а также оценки роли метеорологической дальности видимости S_m , абсолютной ω и относительной $f_{отн}$ влажности воздуха и его температуры t_b , то входящий в формуле (1) коэффициент пропускания атмосферы определяется по методике, предложенной в работе [2]:

$$\tau_a = \exp \left[- (L_p + L_{\Pi}) \right], \quad (26)$$

где

$$L_p = \sigma_p l; \quad L_{\Pi} = \sigma_{\Pi} l; \quad (27)$$

$$\sigma_p = (1,66 - 0,35 \ln S_m) / S_m; \quad (28)$$

$$\sigma_{\Pi} = 0,05 + 0,015 \omega; \quad (29)$$

$$\omega = \frac{2,168 \cdot 10^{-2} f_{отн} l_0}{273 + t_b}; \quad (30)$$

$$l_0 = \exp[-(3,11 \cdot 10^{-4} t_b^2 + 0,0738 t_b + 6,41)]. \quad (31)$$

Выражения (17) и (18) соответствуют значениям σ_p и σ_{Π} для области спектра $\Delta\lambda = 8-12$ мкм.

Исходные данные тепловизоров для расчета. Для проведения расчетных исследований дальности обнаружения использовались исходные данные в виде технических параметров и характеристик тепловизора IRIS-AWS (Франция) на область спектра $\Delta\lambda = 8-12$ мкм. При этом, как указывается в работе [3], в нем используется матричный ПОИ из KPT формата 320x240 элементов с размером элемента 30x30 мкм (аналог микросхемы MARS LV фирмы Sofradir). Выбор этого тепловизора в качестве объекта исследований обоснован тем, что в работах [3,5] приведены результаты натурных экспериментов по определению его

дальности обнаружения, которые будут использованы для сравнения с данными расчетов.

В целом, технические параметры и характеристики тепловизора, а также исходные данные по объектно-атмосферной обстановке следующие:

$h=2,7$ м (танк); $d=160$ мм; $f'=280$ мм; $D^*=1,2 \cdot 10^{11}$ см*Гц^{1/2}/Вт; $\Delta T_{\text{раз}}=0,02$ К; $\lambda_1=8$ мкм; $\lambda_2=12$ мкм; $\lambda_0=10$ мкм; $T=293$ К (лето); $T=263$ К (зима); $a=b=30$ мкм; $f_k=25$ Гц; $\tau_0=0,9$; $T_e=0,2$ с; $N=2$ (обнаружение объекта на фоне с сильной неоднородностью [4]); $f_{\text{отн}} = (50-75)\%$; $t_b=20$ °С; $t_b = -10$ °С; $S_m=(0,25-20)$ км.

Значения многочисленных параметров, входящих в правые части соотношений (3)-(20) получались на основе указанных технических параметров тепловизора и исходных данных объектно-атмосферной обстановки по методике, приведенной в работе [2].

Результаты расчета дальности обнаружения. На основании приведенной методики расчета дальности действия тепловизоров, которая содержит соотношения (1) и (2) с учетом моделей передаточных функций всех звеньев тепловизора в виде зависимостей (3)-(14) и методики расчета коэффициента пропускания атмосферы между объектом и прибором (соотношения (15)-(20)), был разработан соответствующий алгоритм расчета дальности обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов.

С использованием этого алгоритма была составлена компьютерная программа в среде MATLAB для расчета и моделирования указанных дальностей применительно к тепловизионным системам на область спектра $\Delta\lambda=8-12$ мкм и $\Delta\lambda=3-5$ мкм.

Перед сопоставлением расчетных данных с результатами имеющихся экспериментов рассмотрено следующее обстоятельство. В работах [3,5] отмечается, что «в ходе натурных экспериментов установлено, что, при любых сочетаниях температур и относительных влажностей воздуха, дальность обнаружения тепловизора IRIS AWS (8-12 мкм) в 5 раз больше чем метеорологическая дальность видимости при $S_m \geq 1$ км». Эти экспериментальные данные и послужили нам узловым моментом для проверки наших расчетных исследований.

В конечном итоге, в работе выполнено следующее:

1. получены расчетные данные по зависимости дальности обнаружения объекта в виде танка для тепловизора IRIS AWS от метеорологической дальности видимости S_m в диапазоне от 0,25 до 20 км;
2. результаты расчетов получены для условий наблюдения объекта летом ($t_b=20$ °С) и зимой ($t_b=-10$ °С) при относительной влажности $f_{\text{отн}}(50-75)\%$;
3. проведен сопоставительный анализ расчетных данных и результатов экспериментов, имеющихся в работах [3,5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымкул В.М., Тымкул Л.В. Фесько Ю.А. Энергетический расчет тепловизионных систем. Ч.1. Методика расчета дальности действия // Сб. матер. Междунар. Научн. Конференции «СибОптика-2013» (в печати).

2. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань: Отечество, 2006. – 594с.
3. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, всесуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. – М.: Машиностроение, 2011. – 216с.
4. Holst G.C. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. –SPIE press, USA, 2003.
5. Шипунов А.Г. Семашкин Е.Н., Черноусов А.А., Громов А.Н., Романов А.Р., Воробьев В.В., Матюшин А.Ю. Экспериментальные исследования дальности действия и всепогодности телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения // Оптический журнал. – Т. 74, №9, 2007. – С. 61-65.

*© В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Е.В. Лантев,
М.П. Исаев, Е.А. Крапивко, Ю.А. Фесько, 2013*

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА И ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО И МЕСТА ЕГО СОЕДИНЕНИЯ

Валерий Евгеньевич Митрохин

Омский государственный университет путей сообщения, 644046, Россия, г. Омск, пр. К. Маркса, 35, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы передачи информации», тел. (3812) 310694, e-mail: mitrokhin@list.ru

Алексей Викторович Тараскин

Омский государственный университет путей сообщения, 644046, Россия, г. Омск, пр. К. Маркса, 35, аспирант кафедры «Системы передачи информации», тел. (3812) 310694, e-mail: taraskin.a.b@mail.ru

В статье представлена физическая модель и приведены результаты измерения влияния магнитного поля на коэффициент затухания оптического волокна на рабочей длине волны. Проведена оценка влияния температуры на места сварки строительных длин оптических кабелей.

Ключевые слова: магнитооптический эффект, оптическое волокно, затухание, модовое поле.

PHYSICAL MODELING OF MAGNETOOPTICAL EFFECT AND INFLUENCE OF TEMPERATURE ON OPTICAL FIBER AND PLACE OF ITS CONNECTION

Valery E. Mitrokhin

Omsk State Transport University, 644046, Russia, Omsk, 35 Marksa pr. doctor of technical sciences, professor, head of transmission system, tel. (3812)31-06-94, e-mail: mitrokhin@list.ru

Alex V. Taraskin

Omsk State Transport University, 644046, Russia, Omsk, 35 Marksa pr. postgraduate of transmission system, tel. (3812)31-06-94, e-mail: taraskin.a.b@mail.ru

The paper presents the physical model and the results of measurements of the magnetic field on the attenuation of optical fiber at the operating wavelength. The influence of temperature on the welding construction of long optical cables.

Key words: magneto-optical effect, optical fiber, attenuation, modes field.

В настоящее время волоконно-оптическая среда является основной средой передачи информации на магистральной и внутризоновой сетях связи, т.к. волоконно-оптический кабель имеет большое преимущество перед кабелями с медными жилами. К их числу относятся: большие длины регенерационных участков; отсутствие влияния одного волокна на другое, что позволяет уйти от системы с двумя кабелями; большая пропускная способность оптического кабеля; высокая помехозащищенность и многое другое. Все эти преимущества привели к тому, что волоконно-оптический кабель очень быстро вытесняет аналоговые и цифровые, работающие на кабеле с медными жилами, системы передач.

При прокладке волоконно-оптического кабеля по опорам сети железных дорог возникает вопрос влияния значительного по величине электромагнитного поля контактной сети на передачу информации в оптическом волокне. Кроме того, в теплое время года оптические муфты, находящиеся на открытом воздухе, подвержены значительному нагреву под воздействием прямых солнечных лучей, что вносит дополнительное затухание на сварках.

Настоящий стенд предназначен для исследования влияния магнитного поля на оптическое волокно, расположенное в кабеле, применяемом на сети железных дорог. Кроме этого стенд практически доказывает наличие влияния электромагнитного поля и температуры на затухание сигнала и потери в соединениях оптических волокон.

Для стенда применяется оптический 16-ти волоконный кабель (4) ОКМС-А-412 длиной 153 метра. Он уложен витками, с диаметром витка 1,2 метра. Кабель оконечен с одной стороны оптическим кроссом (3) на 8 волокон, а с другой стороны оптической кассетой (6). В оптической кассете произведена сварка восьми волокон.

Для удаления измеряемого кабеля от мертвой зоны прибора используется искусственная линия (2) длиной 850 метров. Поверх витков кабеля намотан соленоид (5) из медной шины с сечением $10,88 \text{ мм}^2$ и количеством витков n равным 426.

Для создания тока в соленоиде используются три последовательно соединенные аккумуляторные батареи (7), емкостью 205 А/ч и напряжением 4 В, каждая.

Для проведения экспериментов с температурным воздействием на сварку волокон используется тигельная печь, в которую помещается оптическая кассета. Измерения влияния производятся при температуре равной 70°C .

В данном стенде используется оптический рефлектометр (1) FOD 7202, работающий на длине волны 1550 нм и в видимом свете, с длиной волны 650 нм.

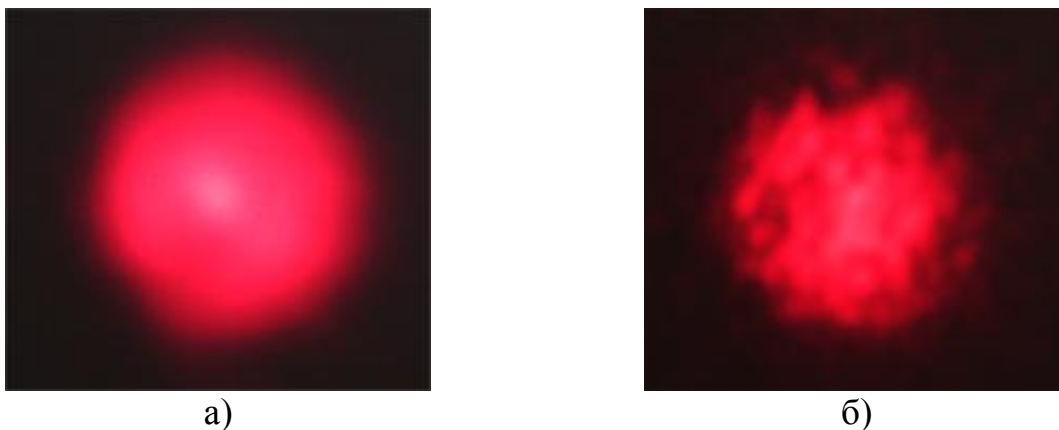
В оптоволокно подается видимый свет с длиной волны 650 нм. Пройдя через оптоволокно, свет попадает на экран. При разомкнутом ключе ток через соленоид не протекает и магнитное поле равно нулю. При этом оптический пучок имеет нормальную форму (рис. 1, а). Затем замыкаем ключ и подключаем источник тока. Световой пучок при этом видоизменяется (рис. 1, б).

Под действием H световое пятно меняет яркость и форму, т.е. сдвигается.

Таблица 1

Результаты исследований

№ О.В.	Затухание при отсутствии внешних влияний		Затухание при воздействии магнитного поля		Затухание при воздействии температуры	
	На сварке, дБ	Километр., дБ/км	На сварке, дБ	Километр., дБ/км	На сварке, дБ	Километр., дБ/км
1	0,00	0,09	0,07	0,14	0,07	0,12
2	0,07	0,03	0,18	0,20	0,12	0,14
3	0,00	0,04	0,09	0,09	0,03	0,06
4	0,08	0,24	0,14	0,27	0,18	0,28
5	0,04	0,19	0,08	0,15	0,13	0,13
6	0,06	0,12	0,13	0,17	0,11	0,15
7	0,08	0,16	0,11	0,19	0,11	0,20
8	0,00	0,06	0,09	0,14	0,04	0,19



а)

б)

Рис. 1. Модовое поле оптического волокна:

а) без магнитного влияния (длина волны 650 нм);

б) под действием магнитного поля $H = 6816$ А/м, длина волны 650 нм
Результаты исследований представлены в виде таблицы и гистограмм.

Данный стенд позволяет моделировать воздействия магнитного поля и температуры на оптическое волокно на длине волны 1550 нм, а так же в видимом свете на длине волны 650 нм.

Кроме этого стенд подтвердил наличие влияния эффекта Фарадея и малоизученное влияние нагрева оптического волокна на затухание сварки оптических волокон.

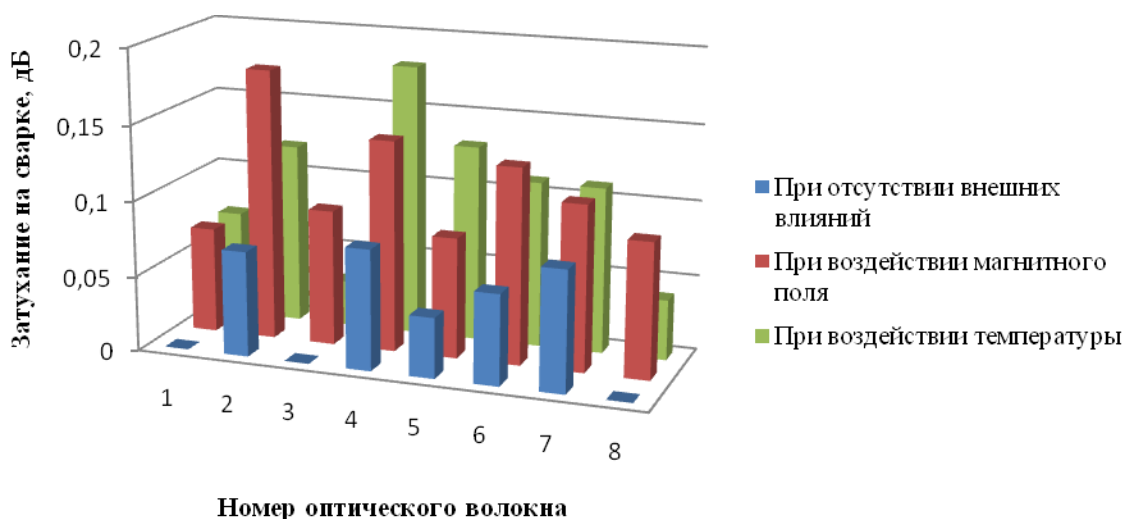


Рис. 2. Затухание на сварках оптических волокон

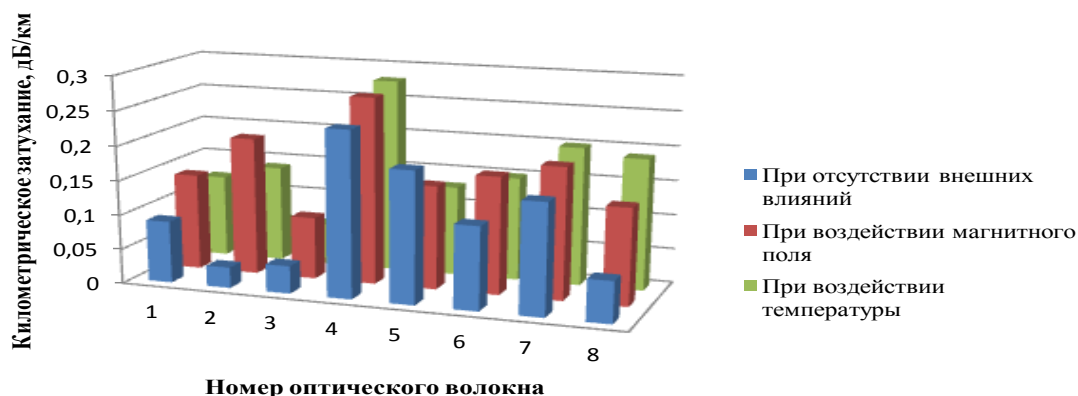


Рис. 3. Километрическое затухание оптических волокон

Выводы:

1. Разработана схема и методика установки по оценке электромагнитных оптических эффектах в оптических волокнах
2. Выполнена оценка влияния температуры на места сварки оптических волокон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрохин В.Е. Оптические системы связи для передачи банковской информации с высокой достоверностью и защитой // Информационные технологии и радиосети-96: Тезисы докладов первой международной научно-практической конференции / Омский гос. техн. ун-т, Омск. –1996.
2. Митрохин В.Е. Эксплуатационные характеристики ВОЛС при функционировании в условиях электрифицированных железных дорог // Информационные технологии на железнодорожном транспорте «Инфотранс-99»: Материалы четвертой международной научно-практической конференции / Петербургский гос. ун-т путей сообщения, Санкт-Петербург. – 1999.
3. Митрохин В.Е. Особенности функционирования ВОЛС в условиях электрифицированных железных дорог // Материалы седьмой международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. –2001.
4. Митрохин В.Е. Структурная надежность кольцевых телекоммуникационных сетей и их элементов // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: Материалы всероссийской научно-технической конференции. Улан-Удэ. –2001.
5. Митрохин В.Е. Коэффициент готовности телекоммуникационной кабельной линии при грозовых разрядах в условиях неоднородной структуры земли // Телекоммуникации. Москва. –2001.
6. Митрохин В.Е., Борисов Е.Н. Параметры оптических волокон в условиях электромагнитных влияний железных дорог // Межвузовский тематический сборник научных трудов/ Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. –2001.

© В.Е. Митрохин, А.В. Тараскин, 2013

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА ОБЪЕКТОВ

Евгений Александрович Крапивко

Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 2/1, инженер-конструктор отдела конструирования оптико-электронных приборов, тел. 89607954084, e-mail: trueman988@mail.ru

Игорь Олегович Михайлов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383) 343-91-11, e-mail: mio@sibmail.ru

В статье отмечена актуальность моделирования трехмерного пространства для систем автоматического управления, рассмотрены основные принципы такого моделирования и оптико-электронное устройство для его реализации.

Ключевые слова: моделирование, трехмерное пространство объектов, массив точек, облако точек.

THE FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF MODELING THE 3D OBJECT SPACE

Eugeny A. Krapivko

Novosibirsk Branch of Institute of Semiconductor Physics SB RAN «KTI PM», 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 pr. Lavrentieva, engineer, tel. 89607954084, e-mail: trueman988@mail.ru

Igor O. Mikhailov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383) 343-91-11, e-mail: mio@sibmail.ru

The relevance of issue of modeling the 3d object space for automatic control systems is noted. The fundamental principles of the modeling and the optoelectronic device for their realization are considered.

Key words: modeling, the 3D object space, an array of points, a point cloud.

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам моделирования трехмерного пространства объектов для информационных систем, систем автоматического управления и контроля. Наиболее эффективным способом получения информации в рассматриваемых системах является лазерное сканирование.

Известны различные принципы и устройства определения координат в пространстве объектов при помощи лазерного сканирования [1]. Однако особенности сбора информации при помощи таких устройств не позволяют оперативно производить ее обработку в системах управления ввиду своей сложности. Невысокая скорость сканирования в таких устройствах не позволяет формировать массив точек (часто называемых облаком точек) для моделирования про-

пространства объектов в масштабе реального времени. Поэтому, актуальной является задача разработки принципов и системы оперативного анализа пространства объектов, обеспечивающая высокую точность построения трехмерной модели в масштабе реального времени при простоте технической реализации.

Предлагаемая система моделирования трехмерного пространства (рисунок 1) содержит двухканальную проекционную оптическую систему с двумя объективами, оптические оси которых параллельны и разнесены на базовое расстояние l . В фокальной плоскости объективов установлено матричное двухкоординатное фотоприемное устройство (ФПУ). Такая система позволяет вычислять координаты массива точек пространства объектов для его моделирования в интеллектуальных системах управления.

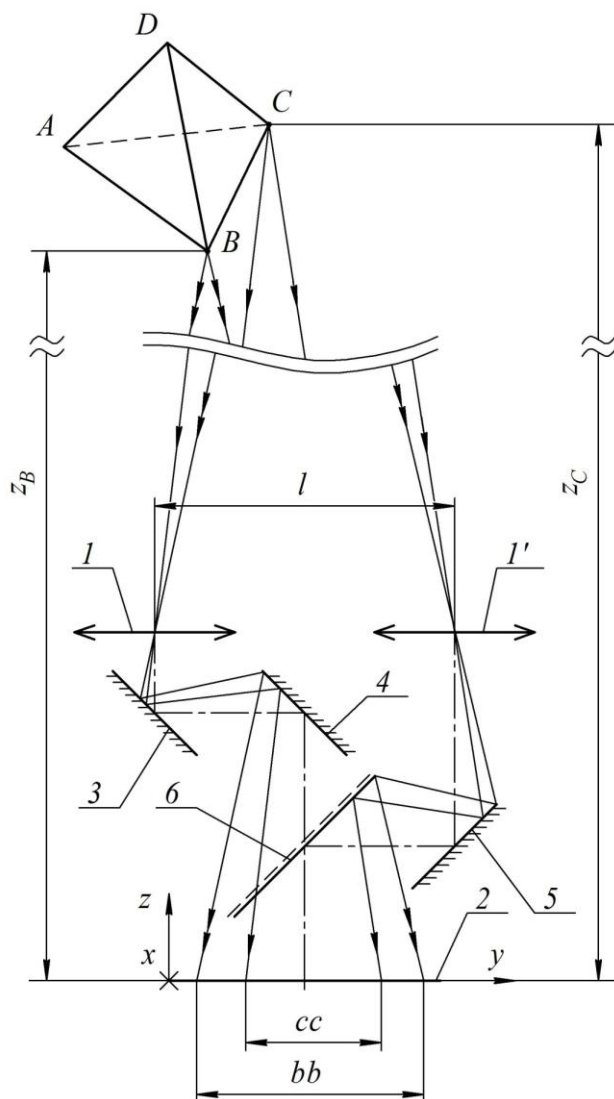


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для моделирования трехмерного пространства объектов

Понятие «интеллектуальная система» возникло в начале семидесятых годов. С течением времени определение и представление о таких системах меня-

лось. В настоящее время разработаны теоретической основы для создания высокоэффективных программных систем по обработке и использованию знаний для решения целого ряда прикладных задач, включая системы, моделирующие творческие возможности человека. Сейчас такие системы принято называть интеллектуальными. Класс интеллектуальных систем можно определить как класс, строящийся с применением новых информационных технологий.

Развитие информационных технологий привело в последние годы к повышению «интеллектуальности» систем автоматики и их элементов. Со временем сформировалось новое научное направление в теории управления – теория интеллектуальных систем управления [2]. Появились различные направления этой научной теории:

- интеллектуальные приборы;
- интеллектуальные измерительные регистраторы;
- интеллектуальные измерительные каналы;
- интеллектуальные интерфейсы;
- интеллектуальные исполнительные устройства;
- интеллектуальные преобразователи (датчики, сенсоры);
- интеллектуальные транспортные системы.

Устройство работает следующим образом. Излучение от объекта $ABCD$ поступает в двухканальную оптическую систему с базовым расстоянием l , два объектива $1, 1'$ которой независимо друг от друга строят изображения этого объекта. Для объединения этих изображений в плоскости ФПУ 2 введена зеркальная (призменная) оптическая система 3 - 6. В результате в плоскости ФПУ формируется изображение объекта $ABCD$ с двоением контура, величина двоения зависит от дальности до соответствующей точки объекта. Так для точки B объекта при дальности z_B двоение будет равно величине bb , а для точки C при дальности z_C двоение равно величине cc . Далее с ФПУ сигнал поступает в блок обработки сигнала, где изображение анализируется, определяются характерные точки объекта $ABCD$ и величины двоения изображения этих точек, по которым на основании рисунка 2 вычисляется расстояние z_C (координата точки по оси z в пространстве объектов) по формуле

$$z_C = h + h' = h' + \frac{l \cdot h'}{cc},$$

где h – расстояние от точки объекта до главной точки объектива;

h' – расстояние от главной точки объектива до плоскости изображения точки объекта.

Далее вычисляются координаты точки C по осям x и y

$$x_C = k \cdot C_x,$$

$$y_C = k \cdot \frac{C'_y + C''_y}{2},$$

где $k = l / c_c$ – коэффициент масштабирования для координат x_C , y_C точки C объекта $ABCD$ в пространстве объектов;

C_x – координата по оси x изображения точки C в приборной системе координат $хоу$;

C'_y – координата по оси y изображения точки C в приборной системе координат $хоу$, построенного объективом 1;

C''_y – координата по оси y изображения точки C в приборной системе координат $хоу$, построенного объективом 1'.

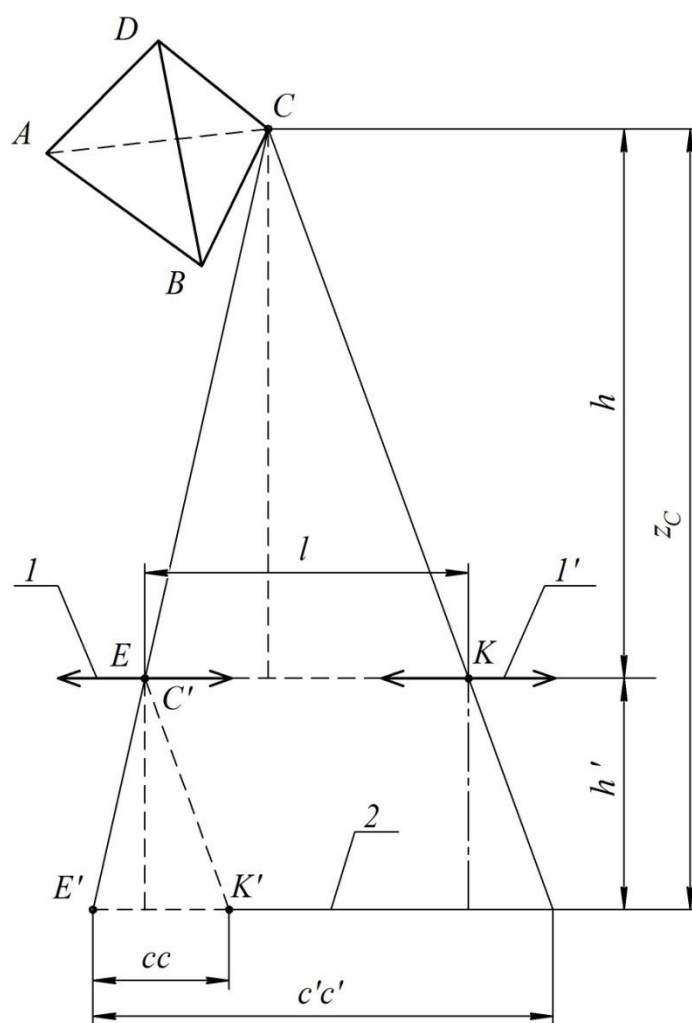


Рис. 2. Принцип определения расстояния до точки пространства объектов

По трем вычисленным координатам характерных точек объекта формируется массив данных, служащий основой для формирования трехмерной модели объекта в пространстве объектов.

Предлагаемые принцип и устройство моделирования объектов в трехмерном пространстве могут быть использованы в интеллектуальных системах управления на транспорте, в военной и гражданской технике, МЧС, в бесконтактных измерительных системах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Середович, В.А. Наземное лазерное сканирование: монография [Текст] / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
2. Захаров В. Н. Интеллектуальные системы управления: Основные понятия и определения [Текст] // Изв. А. Н. Теория и системы управления. – 1997. – № 3. – С. 138 – 145.

© *Е.А. Крапивко, И.О. Михайлов, 2013*

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАЗЕМЛЕНИЙ И УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ

Валерий Евгеньевич Митрохин

Омский государственный университет путей сообщения, 644046, Россия, г. Омск, пр. Маркса, д. 35, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системы передачи информации, тел. (3812)41-17-77, e-mail: mitrokhin@list.ru

Михаил Валерьевич Митрохин

Омский государственный университет путей сообщения, 644046, Россия, г. Омск, Пр. Маркса, д. 35, аспирант кафедры системы передачи информации, тел. (3812)31-06-94, e-mail: inshtein89@mail.ru

В статье рассмотрена разработка и оформление рекомендаций по методике съема и передачи информации с заземляющих устройств телекоммуникационной сети.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, заземляющее устройство, токовый электрод, измерение сопротивления.

REMOTE MONITORING OF THE GROUNDING DEVICE

Valery E. Mitrokhin

Omsk State Transport University, 644046, Russia, Omsk, 35 Marksa pr. doctor of technical sciences, professor, head of transmission system, tel. (3812)31-06-94, e-mail: mitrokhin@list.ru

Mikhail V. Mitrokhin

Omsk State Transport University, 644046, Russia, Omsk, 35 Marksa pr. postgraduate of transmission system, tel. (3812)31-06-94, e-mail: inshtein89@mail.ru

In this article the development and preparation of recommendations on how to pickup and transfer information from grounding devices telecommunication network.

Key words: telecommunications network, grounding device, the current electrode resistance measurement.

Статистика показывает, что число повреждений аппаратуры из-за бросков токов и напряжений удваивается каждые три-четыре года.

Это связано с тем, что плотность элементов на кристаллах микросхем за последние годы значительно увеличилась, это привело, соответственно к уменьшению напряжения пробоя. Поэтому даже при внешнем небольшом электромагнитном воздействии может возникнуть ситуация, которая приведет к повреждению микросхем.

В источниках электропитания сократилось количество трансформаторов и дросселей, индуктивность которых гасит выбросы питающего напряжения, уменьшились их размеры, при этом все больше функций выполняют электронные схемы, более подверженные воздействию перенапряжений. Кроме вывода из строя электронных блоков электропитающих устройств и нарушений его ра-

боты (сбоев в схемах генераторов, регуляторов и т. п.), существует опасность попадания импульсных помех через цепи питания непосредственно в оборудование. [1, 2]

Перенапряжения вызывают старение полупроводниковых структур, ошибки при передаче информации и уничтожение данных в запоминающих устройствах. Прямые удары молнии, а также попадание промышленного напряжения в незащищенные линейные сооружения и оборудование связи могут стать причиной пожара и гибели людей.

Значительный материальный ущерб связан и с косвенным влиянием грозовых разрядов. Он обусловлен нарушением технологических процессов вследствие выхода из строя систем технологического управления.

Авторами были проведены измерения сопротивления контура ЗУ. Контур состоит из вертикальных и горизонтальных электродов (металлическая труба диаметром 15 мм).

При параллельном соединении единичных заземлителей необходимо принимать во внимание эффект взаимного экранирования заземлителей, который сказывается в том, что общее сопротивление заземления уменьшается не пропорционально числу заземлителей, соединенных параллельно, а несколько меньше. Экранирование сказывается тем больше, чем ближе друг к другу будут расположены единичные заземлители.

Для определения сопротивления ЗУ в импульсном режиме по схеме, представленной на рис. 1, использовалось оборудование:

- измерительный комплекс (ноутбук, модуль АЦП (осциллограф));
- генератор импульсного тока (ГИТ);
- безиндукционный шунт (БШ).

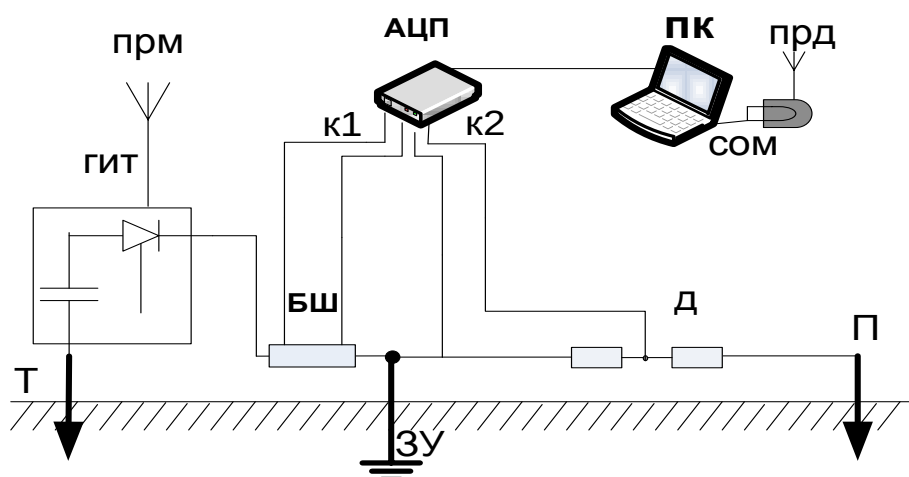


Рис. 1. Схема измерения и мониторинга сопротивления ЗУ в импульсном режиме

Аналитически форму разрядного тока ГИТа можно представить биэкспоненциальным импульсом

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}). \quad (1)$$

В качестве коэффициентов примем $\alpha = 0,046 \text{ мкс}^{-1}$, $\beta = 0,48 \text{ мкс}^{-1}$. Зависимость графически представлена на рисунке 2.

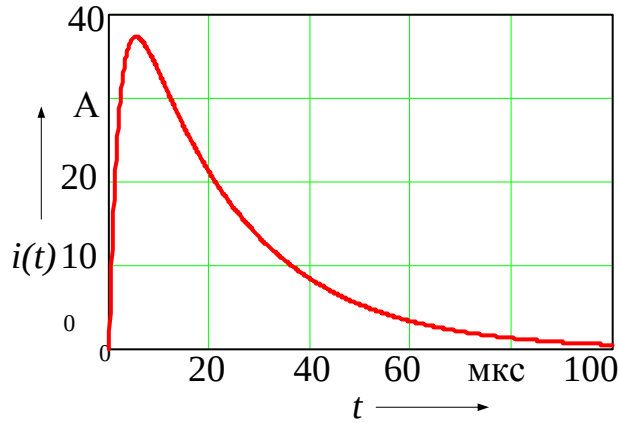


Рис. 2. Биэкспоненциальный импульс

Для того чтобы перейти из временной в частотную область, необходимо воспользоваться прямым преобразованием Фурье. Для облегчения расчетов воспользуемся готовыми аналитическим преобразованием, которое для биэкспоненциальной формы импульса примет вид

$$I(jf) = I_0 \left[\frac{1}{(\alpha + j2\pi f)} - \frac{1}{(\beta + j2\pi f)} \right]. \quad (2)$$

Зависимости спектральной плотности, ее активная и мнимая части, определяемые из выражения (2), представлены на рис. 3.

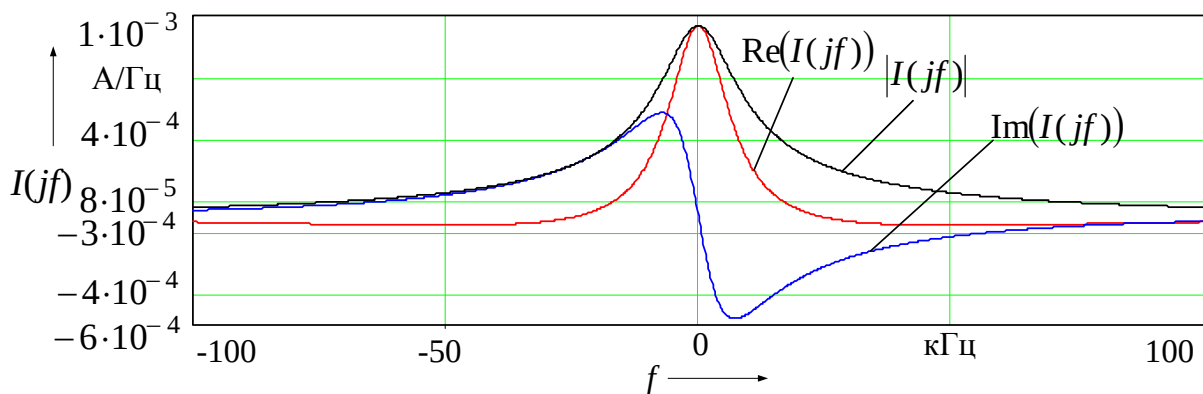


Рис. 3. График спектральной плотности

Аналогичным образом воспользуемся и для оценки напряжения, полученного из осциллограмм, временная характеристика которого представлена на рисунках 4 и 5.

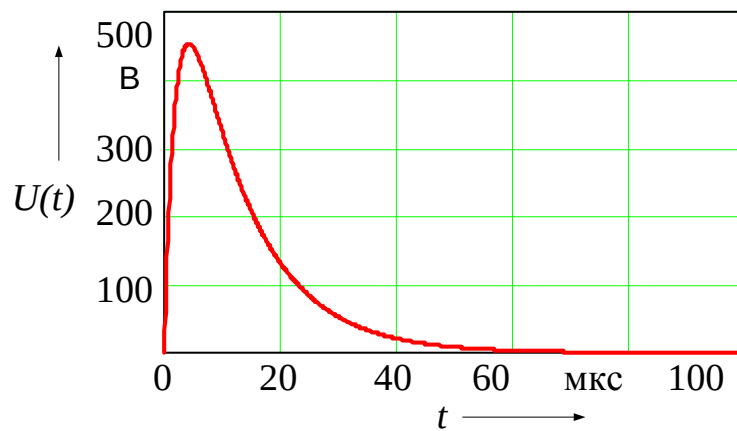


Рис. 4. Напряжение на заземляющем устройстве

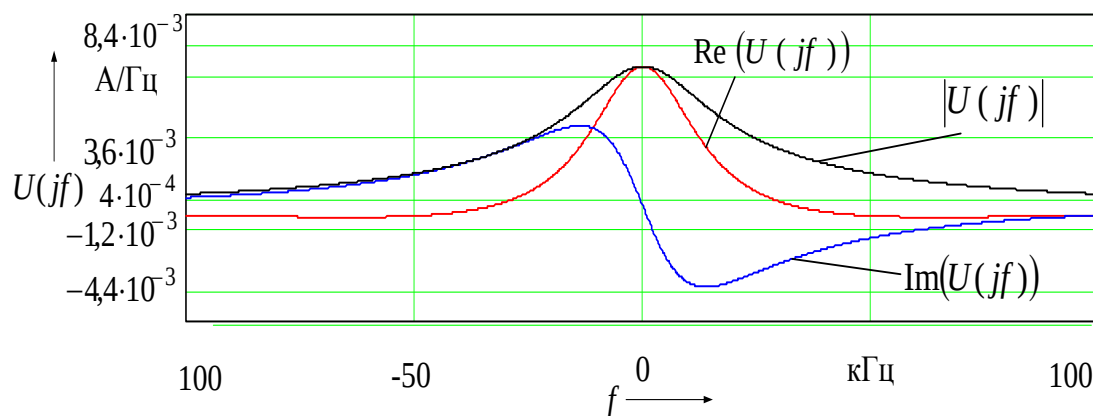


Рис. 5. График спектральной плотности по напряжению

Целью данного раздела оценить комплексное сопротивление ЗУ в спектре частот, которое определим как отношение падения напряжения на заземлении к току в токовой цепи:

$$Z_{zy}(f) = \frac{U(f)}{I(f)}. \quad (3)$$

Результат расчета представлен графически на рис. 6.

Первые опытные данные показывают, что сопротивление ЗУ меняется во времени, а значит и по частоте [3]. Поэтому, необходимы дальнейшие исследования в данной области.

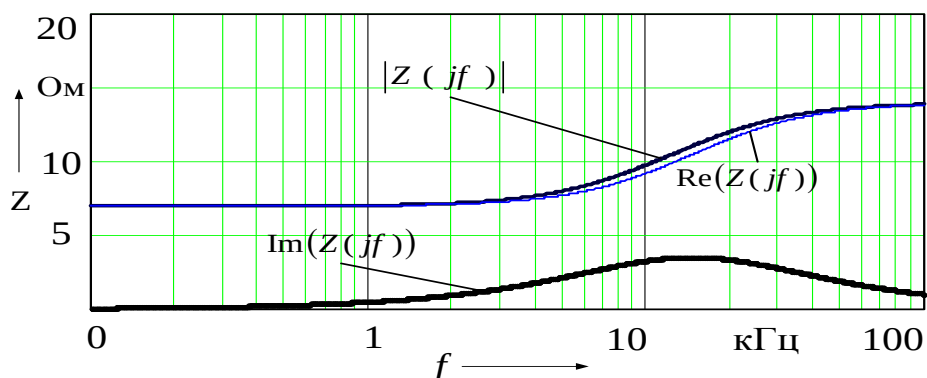


Рис. 6. Комплексное сопротивление ЗУ в спектре частот

Выводы:

1. Для предотвращения аварийных ситуаций и защиты информации в системах телекоммуникаций и автоматики необходимо проводить дистанционный мониторинг заземляющих контуров устройств защиты.
2. Разработанная система позволяет выполнить дистанционный мониторинг заземляющих устройств.
3. Разработана методика расшифровки и обработки результатов дистанционного мониторинга ЗУ в импульсном режиме и в спектре частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрохин В.Е. Линейные телекоммуникационные системы железнодорожного транспорта при импульсных электромагнитных влияниях// Информационные технологии на железнодорожном транспорте “Инфотранс-2000”: Материалы пятой международной научно-практической конференции/ Петербургский гос. ун-т путей сообщения, Санкт-Петербург. - 2000. – С. 186-190.
2. Митрохин В.Е., Жабина А.В., Долиненко В.А. Разработка системы технического обслуживания устройств грозозащиты аппаратуры железнодорожной автоматики и телекоммуникаций / Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте. ТрансЖАТ 2005: Материалы второй международной научно- практической конференции. Сочи. - 2005. – С. 34-40.
3. Митрохин В.Е., Гаранин А.Е., Доросинский Л.Р. Результаты измерения комплексного сопротивления заземления цифровой АТС в спектре частот// Третья российская конференция по заземляющим устройствам, Новосибирск. – 2008. – С. 205-208.

© В.Е. Митрохин, М.В. Митрохин, 2013

СПОСОБ АПОХРОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ В ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОМ ОБЪЕКТИВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Владимир Львович Парко

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер УНЦ «Планетарий», тел. (952)926-10-33, e-mail: Vladimir-Parko@yandex.ru.

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (952)938-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

В статье рассмотрен способ апохроматической коррекции в зеркально-линзовом объективе с использованием одного оптического материала.

Ключевые слова: хроматизм положения, апохромат, зеркально-линзовый объектив.

THE APPROACH OF APOCHROMATIC CORRECTION IN THE CATADIOPTRIC LENS WITH USE OF ONE OPTICAL MATERIAL

Vladimir L. Parko

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer of ESC «Planetarium», tel. (952)926-10-33, e-mail: Vladimir-Parko@yandex.ru.

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Professor at the nanosystems and optical devices department of SSGA, tel. (952)938-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The approach of apochromatic correction in the catadioptric lens with use of one optical material is presented in this article.

Key words: longitudinal chromatic aberration, apochromat, catadioptric lens.

Использование в зеркально-линзовых объективах схем двух- и трехкомпонентных апохроматических объективов, рассмотренных в работах [1-4], не обеспечивает каких-либо технологических преимуществ или лучшего качества изображения перед выпускаемыми в настоящее время серийными телескопами. Вместе с тем, оптическая схема линзового объектива с промежуточным изображением (рис. 1, а) может быть успешно синтезирована с зеркальной системой кассегреновского типа (рис. 1, б).

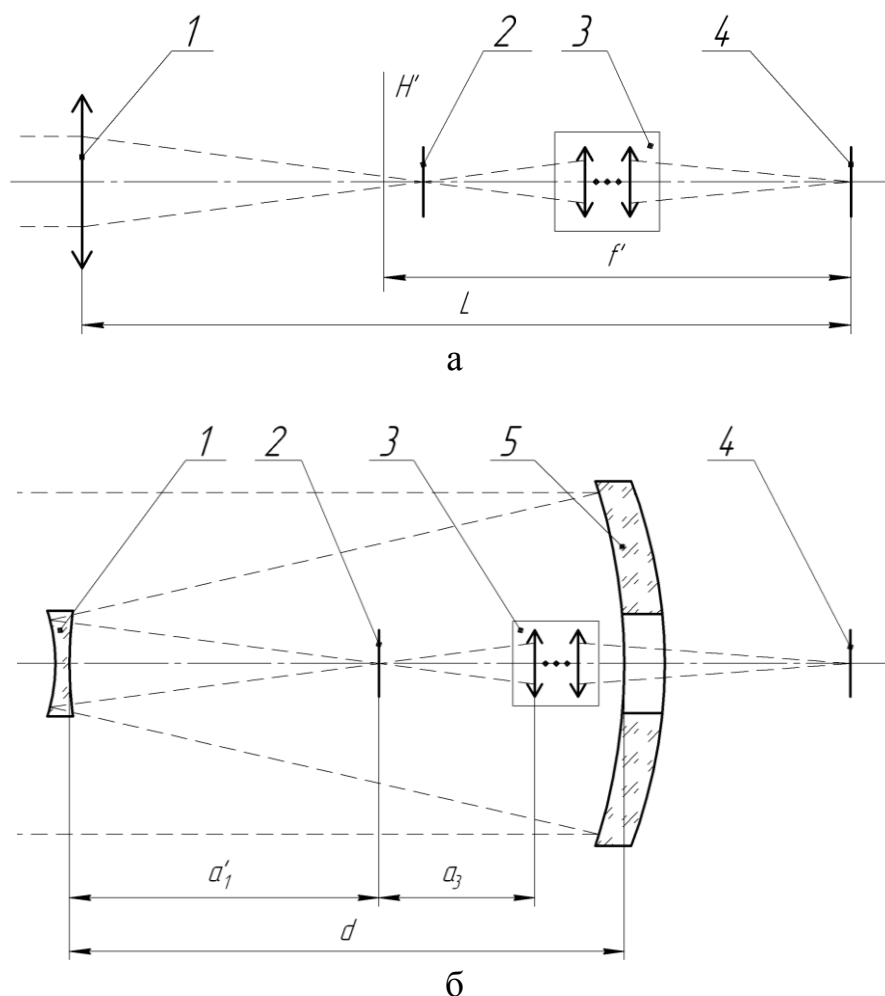


Рис. 1. Оптические схемы объективов телескопов с промежуточным изображением: а – линзовый; б – зеркально-линзовый

На рис. 1 обозначено:

- поз. 1 – одиночная положительная линза (а), вторичное зеркало (б);
- поз. 2 – промежуточная плоскость изображения;
- поз. 3 – система переноса изображения;
- поз. 4 – плоскость изображения объектива;
- поз. 5 – главное зеркало.

Линзовый объектив на рис. 1, а бесперспективен для астрономического телескопостроения с точки зрения серийного производства, так как обладает длинной, значительно превосходящей эквивалентное фокусное расстояние системы. Вместе с тем, устранение отрицательного по знаку хроматизма положения одиночной положительной линзы поз. 1, требует от положительной системы переноса поз. 3 равного по абсолютному значению хроматизм положения и положительного по знаку. Объектив такой схемы, исправленный от хроматических aberrаций, возможен при использовании сложной и нетехнологичной для массового производства системы переноса, состоящей из зеркал и совокупности линз, изготовленных из различных сортов оптического стекла. Конструкция системы переноса будет существенно проще, если она компенсирует своим от-

рицательным хроматизмом положения положительный хроматизм предыдущих оптических компонентов схемы объектива. На рис. 1, б система переноса поз. 3 компенсирует хроматизм положения одной неахроматизированной оптической детали – вторичного зеркала поз. 1, выполненного наподобие линзы Манжена, с положительным по знаку хроматизмом положения.

Условие устранения хроматизма положения зеркально-линзового объектива с промежуточным изображением (рис. 1, б) для бесконечно тонких линз системы в параксиальном приближении и для триады длин волн спектра F' , e и C' , описывается следующей формулой:

$$\frac{2 \cdot a'_1 \cdot \Phi_{1л}}{\nu_1} + (a_3)^2 \cdot \left(\frac{\Phi_{31}}{\nu_{31}} + \frac{\Phi_{32}}{\nu_{32}} + \dots + \frac{\Phi_{3n}}{\nu_{3n}} \right) = 0, \quad (32)$$

где $\Phi_{1л}$ – линзовая составляющая оптической силы линзы поз. 1, без учета двойного прохождения лучей;

$\Phi_{31}, \Phi_{32}, \Phi_{3n}$ – оптические силы, соответственно первой, второй, n -ой линзы системы переноса;

$\nu_1, \nu_{31}, \nu_{32}, \nu_{3n}$ – коэффициенты основной средней дисперсии материала, соответственно линзы поз. 1, первой, второй, n -ой линзы системы переноса;

a_3 – расстояние от промежуточной плоскости изображения до системы переноса;

a'_1 – расстояние от линзы поз. 1 до промежуточного изображения объектива, вычисляемое по формуле:

$$a'_1 = \frac{1 - \Phi_{23} \cdot d}{\Phi_{23} + \Phi_1 - \Phi_{23} \cdot \Phi_1 \cdot d}, \quad (33)$$

где Φ_1 – оптическая сила линзы поз. 1;

Φ_{23} – оптическая сила главного зеркала;

d – расстояние между главным зеркалом и линзой поз. 1.

Первое слагаемое уравнения (32) есть хроматизм положения изображения линзы поз. 1, а второе – хроматизм положения изображения системы переноса. Получение апохроматической коррекции изображения в параксиальной области у зеркально-линзового объектива такой оптической схемы возможно при использовании только одной марки стекла. Для случая использования только одной марки стекла в оптической схеме, формула (32) примет следующий вид:

$$2 \cdot a'_1 \cdot \Phi_{1л} + (a_3)^2 \cdot (\Phi_{31} + \Phi_{32} + \dots + \Phi_{3n}) = 0. \quad (34)$$

Как видно из формулы (34), условие устранения хроматизма положения в зеркально-линзовом объективе такой оптической схемы не содержит коэффициента основной средней дисперсии материала линз. Иными словами, апохроматическая коррекция изображения достижима (в параксиальном приближении) при любом оптическом материале.

Рассмотрим конкретный пример такого апохроматического объектива (рис. 2) рассчитанного для стекла К8 по формуле (34) и обладающего следующими техническими характеристиками:

- расчетная триада длин волн спектра – линии F' , e и C' ;
- диаметр входного зрачка – 250 мм;
- относительное отверстие объектива – $1/8$;
- вынос задней фокальной плоскости – 250 мм;
- продольная длина системы – 530 мм;
- центральное экранирование, от площади входного зрачка – 8,1%.

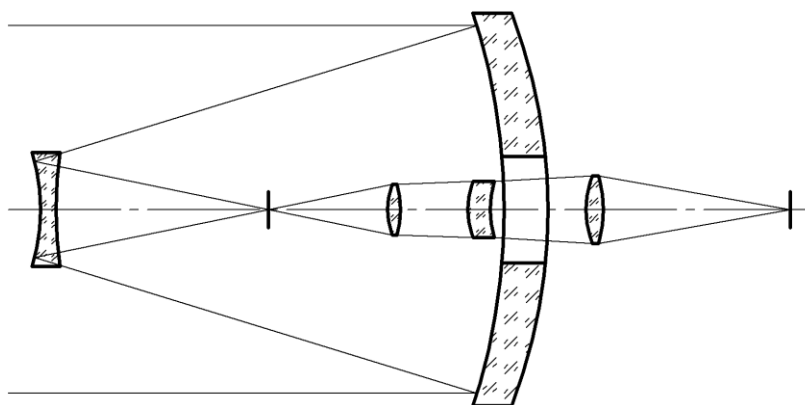


Рис. 2. Оптическая схема зеркально-линзового объектива с промежуточным изображением

Система переноса (рис. 3) выполнена из трех линз для уменьшения габаритов оптической системы и исправления сферической aberrации.

Проверочный расчет такого зеркально-линзового объектива в программе автоматизированного расчета оптических систем ZEMAX подтверждает апохроматическую коррекцию и дифракционное качество изображения для осевого пучка лучей (рис. 3). Остаточный хроматизм положения (рис. 3, *a*) составляет 0,9 мкм, что составляет менее $1/2200000$ от фокусного расстояния объектива, радиус полихроматического пятна рассеяния не превышает 4,1 мкм, а радиус кружка Эйри (на рис. 3, *б* обозначен черным кругом) для этого объектива равен 5,33 мкм.

Таким образом, рассматриваемый способ устранения хроматизма положения применительно к зеркально-линзовой схеме объектива с промежуточным изображением позволяет осуществлять апохроматическую коррекцию изображения для осевого пучка лучей. Вместе с тем, принципиально неустранимый хроматизм увеличения и остаточный сферохроматизм не позволяют использо-

вать зеркально-линзовые объективы из одной марки стекла в серийном телескопостроении. Как показала практика расчетов зеркально-линзовых объективов такой оптической схемы, для коррекции остаточных хроматических аберраций необходимо и достаточно использование в оптической схеме двух массовых марок стекол [5].

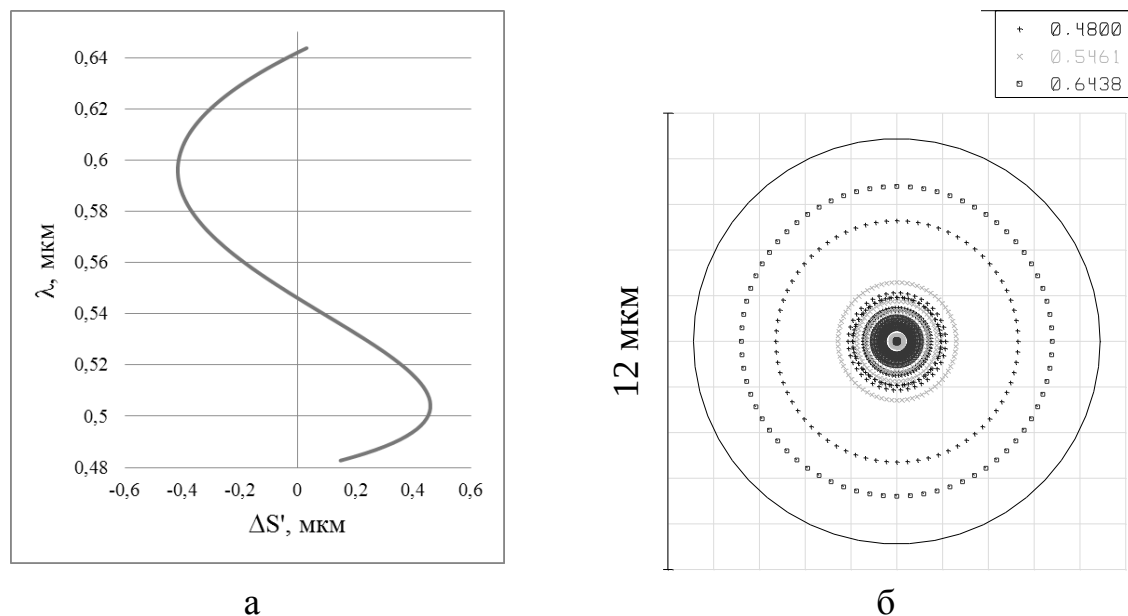


Рис. 3. Качество изображения формируемого зеркально-линзовым объективом с промежуточным изображением:
а – график хроматической кривой; б – пятно рассеяния

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Парко В.Л., Хацевич Т.Н. Алгоритм выбора апохроматических пар стекол в многокомпонентном астрономическом объективе // Вестник СГГА (Сибирской государственной геодезической академии): науч.-техн. журн. – 2010. – № 2(13). – С. 69-73.
2. Парко В.Л., Хацевич Т.Н. Влияние воздушного промежутка между компонентами телескопических объективов на хроматизм положения изображения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. научн. конгр. 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 26-30.
3. Парко В. Л., Хацевич Т. Н. Алгоритм расчета объективов-апохроматов с разнесенными компонентами для телескопических и коллимационных систем // Оптический журнал, 2012. – Т. 79, № 7. – С. 18-23.
4. Патент РФ № 2429508, Апохроматический объектив / Парко В. Л., Хацевич Т. Н.; опубл. 20.09.2011.
5. Заявка на изобретение РФ № 2009129457, Зеркально-линзовый объектив / Парко В. Л., Хацевич Т. Н., Комбаров М. С.; заявл. 10.02.2011.

© В.Л. Парко, Т.Н. Хацевич, 2013

СКАНЕР НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ВНЕОСЕВОЙ ПАРАБОЛЫ В ХАЛЬКОГЕНИДНОМ СЛОЕ

Валерий Игоревич Наливайко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 1, старший научный сотрудник, тел. (383)333-302-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Олег Яковлевич Абель

БИО Технолоджи, 8070, г. Арад, Израиль, ул. Харув, 11/8, директор фирмы «БИО Технолоджи», тел. 8-913-742-88-46, e-mail: olegabel@gmail.com

Предложена оптическая схема сканера на основе плоской отражательной внеосевой параболы, микроперемещение которой по нормали к поверхности обеспечивает сканирование сфокусированного отраженного пучка. Представлены результаты компьютерного моделирования, голографической записи и экспериментального исследования полученных параметров сканера.

Ключевые слова: сканер, халькогенидные материалы, парабола.

SCANNER ON BASIS OF FLAT REFLECTIVE OFF-AXIS PARABOLA IN CHALCOGENIDE LAYER

Valery I. Nalivaiko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1 Koptug str., Novosibirsk, 630090, senior researcher, laboratory of information technology, tel. (383)333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Oleg Ya. Abel

B.I.O. Technology, 8070, Arad, Israel, st. Haruv, 11/8, director of B.I.O. Technology, tel. 8-913-742-88-46, e-mail: olegabel@gmail.com

Optical scheme of scanner on basis of flat reflective off-axis parabola which micromovement on normal to surface provides scanning of the focused reflected beam is offered. Results of computer modeling, holographic recording and experimental study of received parameters of scanner are presented.

Key words: scanner, chalcogenide materials, parabola.

Схемы сканирования лазерным лучом, основанные на принципе отражения луча от нелинейной отражающей поверхности, сдвиг которой обеспечивается линейным актуатором, например, пьезоактуатором, могли бы обеспечить высокие скорости сканирования при относительно низких затратах на их изготовление. Их быстроедействие может превосходить скорости сканирования существующих MEMS дефлекторов более чем на порядок, и достичь скоростей акустооптических систем, выигрывая у последних в стоимости, надежности, диапазоне углов отклонения и температурной стабильности. К недостаткам акустооптических методов сканирования следует отнести также ограничения по

мощности и ширине пропускаемых световых потоков, которые отсутствуют в отражательных сканерах

Принцип работы и изображение промышленно выпускаемого сканирующего вогнутого отражающего сферического зеркала представлен на рис. 1. Падающий на зеркало луч отражается от нелинейной поверхности при ее сдвиге под разными углами. Касательная в точке падения луча определяет угол сканирования [1].

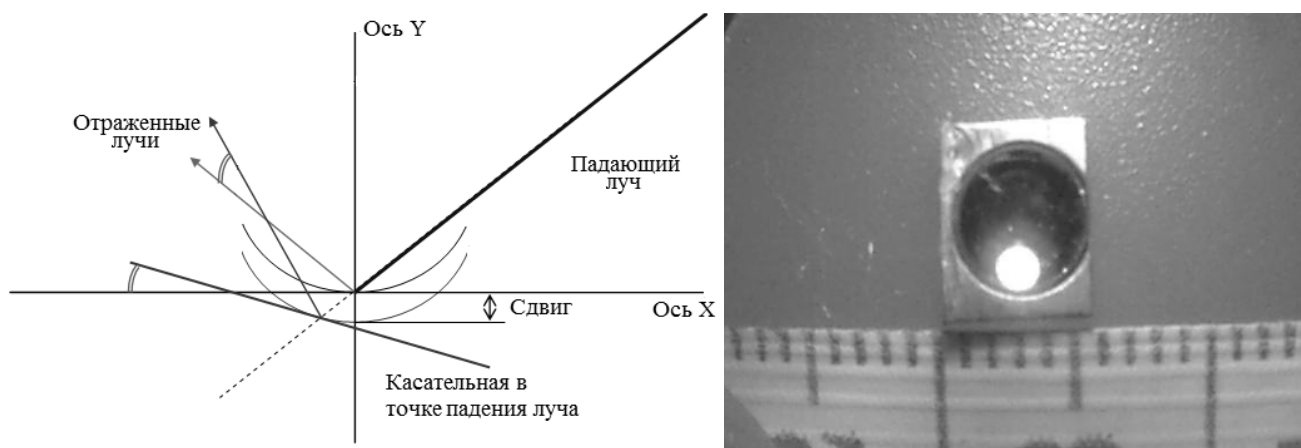


Рис. 1. Принцип работы и изображение сканирующего вогнутого отражающего сферического зеркала с радиусом кривизны, равным 5 мм

Асферические элементы имеют потенциально широкое применение в оптических приборах, которое ограничивается не технологичностью их изготовления. Например, внеосевые параболические зеркала получают вытачиванием на станке с ЧПУ детали с параболическим законом изменения кривизны поверхности, а затем вырезая её внеосевую часть. Очевидно, что высокая себестоимость такого элемента во многих случаях делает более приемлемым применение сферических зеркал, при этом можно или мириться с вносимыми искажениями волнового фронта, либо применять дополнительные элементы для корректировки этих искажений.

Мы предлагаем эффективную альтернативу – изготовление внеосевых фокусирующих отражательных элементов методами голографической записи на халькогенидных плёнках.

Такие пленки получают методом вакуумного напыления стеклообразных халькогенидных материалов, типичным представителем которых является As_2S_3 и As_2Se_3 . Халькогенидные материалы принято считать аморфными, хотя они состоят из кластеров величиной в несколько ангстрем [2]. Интересующие нас свойства этих материалов – это их способность изменять свою структуру и оптические свойства (коэффициент преломления) под воздействием светового потока мощностью в несколько десятков милливольт в течение нескольких минут. Полезное нам изменение структуры материала заключается в неодинаковом времени травления облученных и необлученных участков, то есть возможности использования такой халькогенидной тонкой плёнки в качестве неорганическо-

го фоторезиста, который обладает значительно более стабильными характеристиками по сравнению с органическими фоторезистами.

Оптическая схема записи и изображение полученного отражающего внеосевого голографического фокусирующего зеркала на халькогенидном слое показана на рис 2. Запись голограммы проводилась с помощью излучения лазера на $\lambda = 532$ нм мощностью 100 мВт. Длина волны лазера выбрана исходя из того, что халькогениды обладают фоточувствительностью в этом диапазоне. Особенностью схемы записи является выбор корреktированного микрообъектива, эмитирующего параболический волновой фронт. Для оптимального контраста интерферограммы делитель луча выбран 1:1 для зелёной длины волны. Зеркала сводят разделённые лучи, совмещая их на поверхности халькогенидной тонкой плёнки, при этом расширитель пучка правого плеча схемы расширяет плоский волновой фронт от лазера, а короткофокусный корреktированный $40\times$ объектив формирует параболический волновой фронт.

Эффективность голограммы во время записи контролировалась с помощью излучения лазера на $\lambda = 660$ нм. Время записи составляло порядка 10 минут.

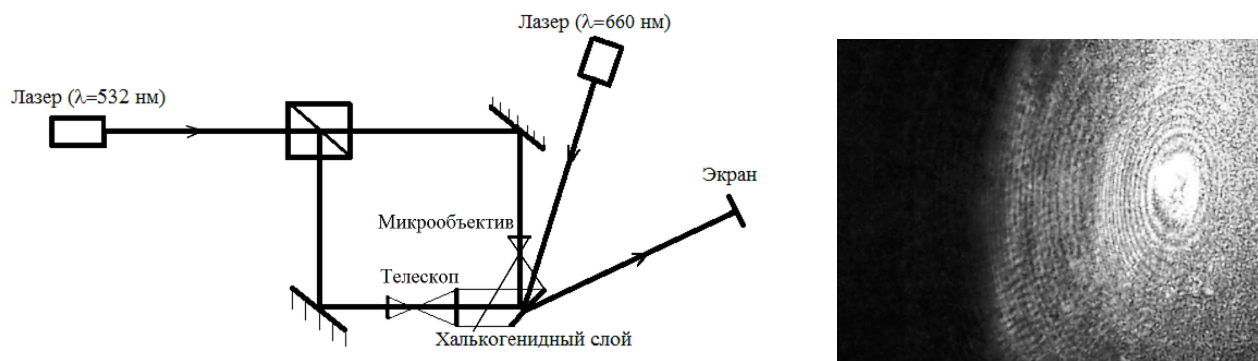


Рис. 2. Оптическая схема записи и изображение отражающего внеосевого голографического фокусирующего зеркала на халькогенидном слое

После процедуры облучения и последующего травления в щелочном растворе голограмма в тонкой халькогенидной пленке была покрыта отражающим слоем Al. Общий вид дифракционного элемента, полученного таким способом, освещенного белым светом, представлен на рис.2 с увеличением $10\times$ (справа).

На данном этапе работы нам было важно сравнить поведение сфокусированного пятна при перемещении по нормали к поверхности в центре голографического и вогнутого зеркала.

За смещением фокусного пятна наблюдали, осуществляя перемещение голографического отражателя и вогнутого зеркала с помощью микровинтовой подвижки. На рис. 3 (слева) представлены изображения фокусных пятен первого порядка дифракции от отражательного голографического элемента, которые являются восстановленными изображениями предметного луча с параболическим волновым фронтом. Изображения восстановлены опорным лучом той же длины волны ($\lambda = 532$ нм) и спроецированы на матовое стекло, после этого го-

лограмма подвергалась сдвигу. Видно, что искажения формы сфокусированного пятна отсутствуют для голографического зеркала.

При сдвиге голографического отражательного элемента на расстояние до 2 мм не было замечено астигматических aberrаций в изображении пятна, в отличие от промышленно выпускаемого позолоченного сферического зеркала с близкими параметрами, астигматизм которого представлен на рис.3 (справа).

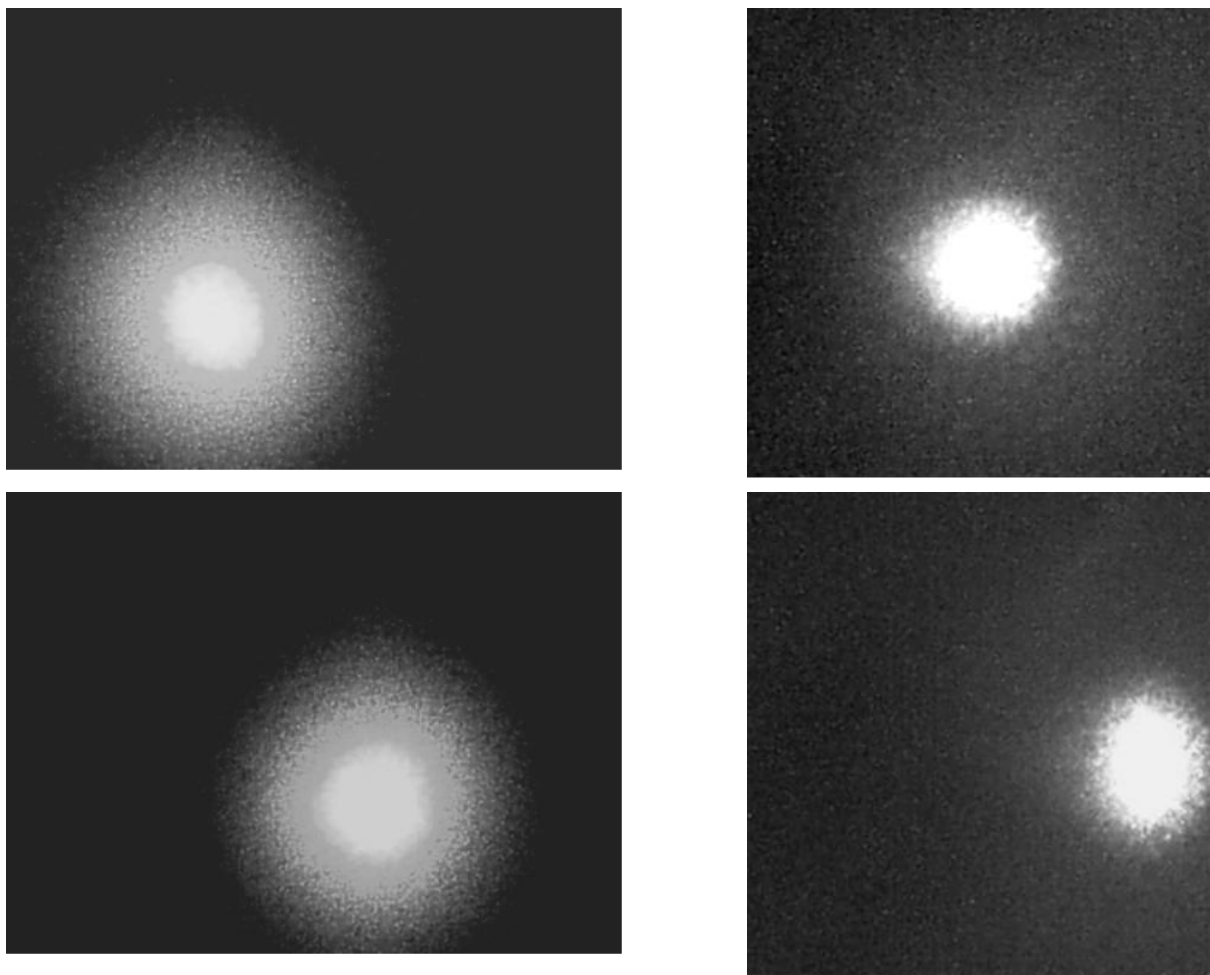


Рис. 3. Изображения сфокусированных лучей, отраженных под углом 90° к падающему параллельному пучку, полученные с помощью внеосевого голографического (слева) и вогнутого (справа) зеркал

В дальнейшем работа будет направлена на усовершенствование схемы записи в части получения эталонных волновых фронтов и повышения оптического качества получаемых элементов.

Выводы

- Получено подтверждение изложенных принципов изготовления сканирующих элементов на халькогенидных пленках методами оптической голографии.

- Голографическим методом получены отражающие фокусирующие зеркала с параметрами: диаметр - 10 мм, фокусное расстояние - 40 мм, угол между падающим плоским и дифрагированным пучками – 90^0 , дифракционная эффективность на $\lambda = 534$ нм - 50%.

- При выборе оптимальных параметров записи и величины перемещения зеркала, как показывают расчеты, можно получить угол отклонения осевого пучка до 10 градусов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наливайко В.И., Покровский А.Н., Пономарева М.А., Абель О.Я., Соснов А.Н. Использование халькогенидных материалов для решения задач современных оптических технологий. Сборник материалов VII Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2012». Том 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Часть 2. СГГА. Новосибирск. 2012. С. 83 – 91.

2. Nalivaiko V.I. Materials for Optical Information Recording on the Base of Subnanostructured Chalcogenide Films// Proc. of the XVI International Synchrotron Radiation Conference, Novosibirsk, July 10 – 14.- 2006.- p. 26.

© В.И. Наливайко, О.Я. Абель, 2013

ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ДВУМЕРНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

Николай Анатольевич Мещеряков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: optotechnic@mail.ru

Анализируются недостатки датчиков перемещений с двумерной дифракционной решеткой. Даны описания технических решений двухкоординатных датчиков перемещений, основанные на многократной дифракции.

Ключевые слова: датчик перемещений, многократная дифракция.

DEVICES OF SHIFT WITH TWO-DIMENSIONAL DIFFRACTION GRATING

Yury Z. Batomunkuev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., associate professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

Nicholas A. Meshcheryakov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., professor, e-mail: optotechnic@mail.ru

The defects of devices of shift with two-dimensional diffraction grating are analyzed. The descriptions of technical principles of two-coordinate device of shift based on multiple diffraction are presented.

Key words: device of shift, multiple diffraction.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к точности датчиков перемещений с измерительными шкалами, что в свою очередь требует совершенствование известных и разработки новых технических решений датчиков. Целью работы является рассмотрение технических решений датчиков перемещений с двумерной дифракционной решеткой.

Известен целый ряд устройств измерения перемещений, в которых в качестве измерительной шкалы используется дифракционная (голографическая) решетка. Так, для измерения перемещений в двух координатах предложено устройство [1], представленное на рис. 1 и содержащее лазер 1, однолучевую систему освещения, двумерную дифракционную решетку 2 с периодической ортогональной системой линий, объединяющую систему совмещения волн в виде отражающих зеркал 3 и светоделительных пластин 4, и фотоприемники 5. Принцип работы устройства [1] заключается в следующем (в сагиттальной плоскости): плоская волна от лазера 1 направляется на двумерную дифракци-

онную решетку 2, а дифрагировавшие в выбранные порядки волны, отражаясь от зеркал 3 совмещаются на светоделительной пластине 4. Каждая из падающих волн на светоделительную пластину 4 делится на две волны (прошедшая и отраженная волны), так что прошедшая от одной волны, накладывается на отраженную от другой волны, образуя интерференционную картину в виде чередующихся темных и светлых полос. При перемещении дифракционной решетки 2, возникающий сдвиг интерференционных полос регистрируется фотоприемниками 5. В меридиональной плоскости схема устройства [1] аналогична.

Недостатками устройства [1] являются: низкая точность измерений, которая определяется, в основном, частотой штрихов двумерной дифракционной решетки, высокая чувствительность к поперечным смещениям двумерной дифракционной решетки, что требует высокоточных направляющих для этих смещений, высокие требования к когерентности источника излучения, большие габариты, что связано с перемещением двумерной дифракционной решетки.

Известно также, устройство для измерения линейных перемещений [2], схема которого представлена на рис. 2. Устройство содержит когерентный источник света 1, линейку 2 с периодической структурой, связанную с движущимся объектом, объединяющую систему, состоящую из отражающих 3 и объединяющих элементов, и фотоприемное устройство 4. Линейка с периодической структурой представляет собой пропускающую дифракционную решетку. Устройство [2] работает следующим образом: плоская волна от когерентного источника 1 направляется на линейку 2, а дифрагировавшие в выбранные порядки две волны, отражаясь от зеркал 3 совмещаются на той же линейке 2. В устройстве [2] повторно или многократно дифрагировавшие волны могут быть снова отражены зеркалами и совмещены на линейке 2. В результате многократной дифракции каждая из падающих двух волн на линейку 2 делятся на прошедшую и дифрагировавшие волны, так что прошедшая от одной волны, накладывается на дифрагировавшую от другой волны, образуя интерференционную картину. При перемещении линейки 2, возникающий сдвиг интерференционных полос регистрируется фотоприемником 4.

К недостаткам этого устройства относится: низкое значение отношения сигнал/шум, связанное с низкой дифракционной эффективностью линейки с периодической структурой, измерение перемещений только вдоль одного направления при использовании одномерной линейки, большие габариты устройства, превосходящие более чем в два раза диапазон измерений линейки, из-за связи линейки с движущимся телом. Кроме этого, использование линейки приводит к необходимости размещения отражающих зеркал по обе стороны от линейки, что в свою очередь увеличивает размеры оптической системы устройства. При использовании связанной с движущимся объектом двумерной линейки вместо одномерной линейки габариты устройства более чем в четыре раза превышают габариты рабочего диапазона двумерной линейки, что связано с длиной направляющих, по которым в двух направлениях должна смещаться двумерная линейка. Также имеет место проблема разюстировки относительно фотоприемного устройства зеркал, расположенных по разные стороны от линейки,

так как при больших габаритах двумерной линейки все отражающие зеркала нельзя достаточно жестко конструктивно связать с фотоприемным устройством.

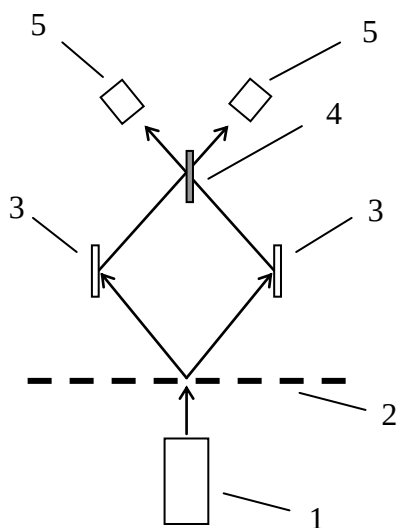


Рис. 1. Устройство для измерения перемещений в двух координатах (сагиттальная плоскость) [1]

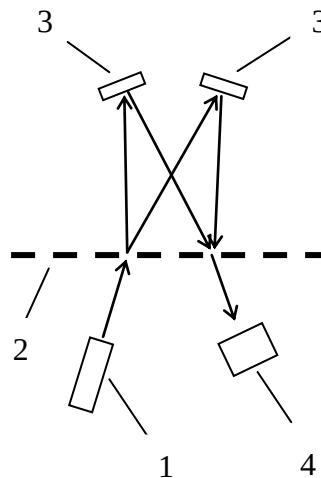


Рис. 2. Устройство для измерения линейных перемещений [2]

Для устранения указанных недостатков нами предложен двухкоординатный датчик перемещений [3], схема которого (в сагиттальной плоскости) представлена на рис. 3. Предлагаемый двухкоординатный датчик перемещений содержит неподвижную двумерную отражающую дифракционную решетку с положительными и отрицательными порядками дифракции в двух перпендикулярных плоскостях и расположенные в одном считывающем блоке, связанном с движущимся объектом, источник когерентного излучения, фотоприемное устройство и четное количество отражающих зеркал.

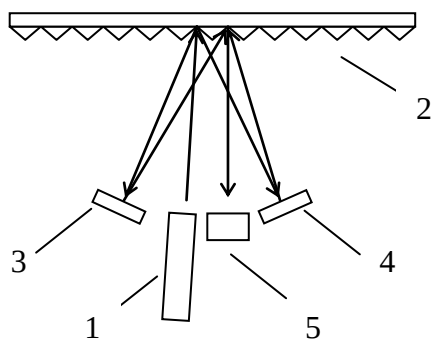


Рис. 3. Схема двухкоординатного (2D) датчика перемещений в сагиттальной плоскости [3]

Отражающие зеркала расположены попарно вдоль перпендикулярных прямых по одну сторону от решетки, как

сательно эллипсоидов с фокусами в точке дифракции и в точке схождения волн на дифракционной решетке. С движущимся объектом связана не решетка, а считывающий блок, содержащий источник когерентного излучения, отражающие зеркала, фотоприемное устройство. На рис. 3 представлена схема датчика с двумя парами зеркал, содержащая источник излучения - полупроводниковый лазер 1, отражающую двумерную

рельефную дифракционную решетку 2 с положительными и отрицательными порядками дифракции в двух перпендикулярных плоскостях, зеркала 3 и 4, расположенные касательно двум эллипсоидам с фокусами в точках дифракции и схождения волн на решетке, фотоприемное устройство 5. Лазер 1, отражающие зеркала 3, 4, фотоприемное устройство 5 выполнены конструктивно в одном считывающем блоке, связанном с движущимся объектом.

Датчик работает следующим образом: плоская волна лазера 1 падает на двумерную решетку 2, а дифрагировавшие в выбранные порядки четыре волны, попарно отражаясь от зеркал 3 и 4, направляются на эту же решетку для повторной дифракции. Зеркала 3 и 4 устанавливаются отражающими поверхностями под углом к решетке и касательно эллипсоиду так, чтобы среди волн, испытавших двукратную дифракцию, выделяются и совмещаются в пространстве две волны выбранных дифракционных порядков, а полученные при этом интерференционные картины регистрируются фотоприемным устройством 5.

При линейном перемещении считывающего блока первоначально дифрагировавшие волны набирают разность фаз $\Delta\varphi$, прямо пропорциональную произведению величины перемещения на выбранные порядки дифракции m_1 и m_2 . При повторной дифракции этих волн и выборе в качестве интерферирующих двух волн, тех же порядков, что и при первой дифракции, разность фаз $\Delta\varphi$ будет удвоена.

Для получения максимального изменения интенсивностей на фотоприемном устройстве 5 дифракционная эффективность решетки в первом порядке дифракции должна быть равна 11,1 – 12,5 процентов. Что существенно превосходит максимальную относительную дифракционную эффективность амплитудной двумерной пропускающей решетки равной 4,1 процента. Таким образом, оптимальной является двумерная рельефная решетка, отражающего типа, так как ее относительная дифракционная эффективность η в первом порядке может достигать 16,4 процента. При двукратной дифракции относительная дифракционная эффективность оптимальной рельефной отражающей решетки составит более 1,23 процента, тогда как для амплитудной пропускающей только 0,17 процента. При одинаковом уровне шумов такое различие дифракционной эффективности отражающей и пропускающей решеток обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум более чем в 7 раз для отражающей решетки по сравнению с пропускающей. При n -кратной дифракции относительная дифракционная эффективность оптимальной рельефной отражающей решетки составит $0,111^n \cdot 10^2$ процента, тогда как для амплитудной пропускающей только $0,041^n \cdot 10^2$ процента. При одинаковом уровне шумов такое увеличение дифракционной эффективности обеспечивает в случае n -кратной дифракции увеличение отношения сигнал/шум примерно в $2,7^n$ раз. Повышение отношения сигнал/шум позволяет использовать как более высокие порядки дифракции отражающей решетки, так и осуществлять более многократную дифракцию по сравнению с амплитудной решеткой, тем самым, снижая погрешности и повышая точность измерений. Так, в схемах с n – кратной дифракцией с использова-

нием дифрагировавших пучков m_1 и m_2 порядков точность измерения может быть улучшена в $n(m_1 - m_2)$ раза.

В схеме предлагаемого датчика с двумерной решеткой зеркала размещаются отражающими поверхностями к решетке и касательно эллипсоидов с фокусами в точках дифракции и схождения отраженных от зеркал волн на решетке, в отличие от этого в [2] отражающие зеркала размещаются касательно эллипсам. Отражаясь от этих зеркал первоначально дифрагировавшие волны проходят одинаковые расстояния, поэтому снижаются требования к длине когерентности лазера. Дифрагировавшие в разные порядки волны испытывают одинаковое количество отражений от зеркал, поэтому не происходит взаимного сдвига или поворота волн при многократном падении на решетку, что приводит с одной стороны к снижению влияния дефектов поверхности решетки, с другой – снижению требований к пространственной когерентности излучения лазера. Так же, при смещении объекта перпендикулярно к решетке на любую величину, угол падения волны лазера на решетку не изменяется, поэтому не изменяются углы дифракции и углы схождения волн на решетку. Расстояния, пройденные волнами, различаются на одинаковые величины, поэтому разность их фаз не изменяется. Таким образом, перпендикулярное по отношению к решетке смещение объекта не влияет на точность измерений.

Линейный размер устройства [2] определяется длиной направляющих по которым перемещается линейка, связанная с движущимся объектом, причем длина направляющих более чем в два раза превышает диапазон измерений линейки. В отличие от этого в предлагаемом датчике двумерная отражающая решетка является неподвижной, а с движущимся объектом связана считывающая система, включающая в себя источник когерентного излучения, фотоприемное устройство и четное количество отражающих зеркал. Длина и ширина предлагаемого датчика лишь незначительно превышают длину и ширину двумерной решетки. Использование отражающей рельефной решетки позволяет изготовить ее из ударопрочных материалов (металлов), что является преимуществом отражающих решеток перед пропускающими, причем высокое качество обработки должна иметь только одна рабочая поверхность, тогда как для стеклянной пропускающей дифракционной решетки подобное качество обработки должны иметь обе поверхности стеклянной пластины. Компактность считывающего блока позволяет жестко связать между собой источник когерентного излучения, фотоприемное устройство и отражающие зеркала, что обеспечивает стабильность их юстировки.

Таким образом, предлагаемый датчик обладает существенными отличиями от устройства [2] и обеспечивает повышение точности измерений за счет уменьшения периода решетки и увеличения отношения сигнал/шум, повышение диапазона измерений за счет увеличения размеров решетки, устранение влияния смещений объекта в перпендикулярном направлении по отношению к решетке и уменьшения требований к длине когерентности источника излучения, при одновременном уменьшении габаритов за счет установки зеркал и источника когерентного излучения и фотоприемного устройства, расположенных

по одну сторону от решетки в одном считывающем блоке, связанном с движущимся объектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АС № 387207. Устройство для измерения перемещений в двух координатах /Добырин В.В., Турухано Б.Я., Турухано Н. – Заявл. 26.10.1971; Оpubл. 21.05.1973. – Бюл. № 12.
2. АС № 1562686. Устройство для измерения линейных перемещений / С.А. Шойдин, Е.А. Сандер, Ю.Ц. Батомункуев, В.С. Куминов, Б.Н. Чуличкин, Ю.И. Ямщиков, В.П. Майоров – Заявл. 21.07.1988; Оpubл. 7.05.90. – Бюл. № 17.
3. Патент РФ на изобретение № 2400703. Двухкоординатный датчик перемещений / Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Заявка № 2009103470. Приоритет от 02.02.2009. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 27.09.2009.

© Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков, 2013

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТУРНОЙ МАСКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОЭ С КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫМ РЕЛЬЕФОМ

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

В статье рассмотрено применение металлизированной контурной маски в технологии изготовления ДОЭ с кусочно-непрерывным рельефом для уменьшения обратных скатов зон и соответствующего повышения дифракционной эффективности.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, кусочно-непрерывный рельеф, дифракционная эффективность, контурная маска.

APPLICATION OF CONTOUR MASK FOR ENHANCING A DIFFRACTION EFFICIENCY OF CONTINUOUS-RELIEF DOES

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyuga avenue 1, senior researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Paper describes an application of metal contour mask in fabrication technology of continuous-relief DOEs for reducing backward slopes and corresponding enhancing the diffraction efficiency.

Key words: diffractive optical elements, continuous relief, diffraction efficiency, contour mask.

Появление высокотехнологичных продуктов массового спроса, требующих огромных тиражей, инициирует разработку технологий изготовления ДОЭ, снижающих затраты производства и улучшающих качество дифракционной структуры. Однако до сих пор промышленное применение находят, как правило, только недолговечные, но дешевые пластмассовые элементы. Внедрение дифракционной оптики в области, требующие долговременного использования в сложных условиях (большие перепады температур, влажность, мощные лазерные пучки), ставит проблему разработки экономически эффективных методов получения непрерывного фазового профиля с высоким пространственным разрешением на поверхности оптических материалов с высокой механической, химической стойкостью и температурной стабильностью – например, плавленного кварца.

Фотолитография в контактном и проекционном вариантах с бинарными амплитудные фотошаблоны используется для изготовления высокоэффективных ДОЭ по многоуровневому методу на основе комплекта совмещаемых фотошаблонов, положившему начало промышленному освоению высокоэффективных ДОЭ. Методами фотолитографии бинарный рисунок фотошаблона переносится в рельефообразующий материал (как правило, фоторезист) и произ-

водится сухое или жидкостное травление подложки через окна в фоторезисте на определенную глубину. Специфика микроструктуры дифракционной оптики позволяет при использовании N фотошаблонов получить 2^N фазовых уровней [1]. Несмотря на высокую точность изготовления отдельных фотошаблонов, фотолитографическая технология на основе комплекта совмещаемых бинарных шаблонов не позволяет изготавливать дифракционные элементы с высокой числовой апертурой. Трудность этого метода заключается в конечной точности совмещения фотошаблона и фазовой микроструктуры и, следовательно, накоплении ошибок совмещения при переходе от шаблона к шаблону.

В последние годы активно используются аналоговые технологии на основе полутоновых фотошаблонов (ПФ) [2] и растровых фотошаблонов [3]. Полутонная технология позволяет применить как многократную контактную печать без зазора (в отличие от растрового метода), так и высокоразрешающую проекционную печать с уменьшением. Методы прямой лазерной [4] записи с аналоговым управлением интенсивностью записывающего пучка на пленках рельефообразующих материалов - резистов - также широко применяются при синтезе высокоэффективных и высококачественных ДОО. Все эти аналоговые методы позволяют избавиться от многочисленных операций совмещения фотошаблона и сформированного на предыдущем шаге микрорельефа. Однако все они используют слабоконтрастные фоторезисты и проявители, чтобы получить примерно линейную зависимость толщины проявленного слоя фоторезиста от экспозиции. По этой причине невозможно получить вертикальные края дифракционных зон (рис. 1).

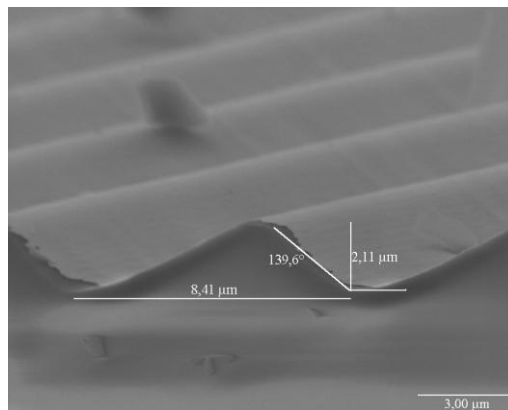


Рис. 1. Изображение рельефа в фоторезисте, сформированного с помощью полутонного фотошаблона

Эта проблема может быть решена путем комбинирования лучших свойств бинарной многошаблонной и аналоговой технологий – вертикальный край при «сухом» травлении через металлическую маску и пологий рельеф, сформированный полутонной технологией [5]. Это комбинирование может быть осуществлено за счет применения одной бинарной контурной маски (КМ) с металлизированными линиями контура дифракционных зон и одной полутонной. Последовательность основных операций выглядит следующим образом (рис. 2):

1. Формирование КМ на заготовке ДОО (I).
2. Нанесение резиста на эту маску (II)
3. Совмещение КМ с фотошаблоном, формирующим полутонное распределение интенсивности, или системой координат лазерного записывающего устройства.
4. Полутонное экспонирование фоторезиста с распределением интенсивности $I(x)$ (III).

5. Формирование рельефа в фоторезисте после жидкостного проявления (IV).
6. Сухое травление подложки через маску в резисте (V).
7. Удаление контурной маски.

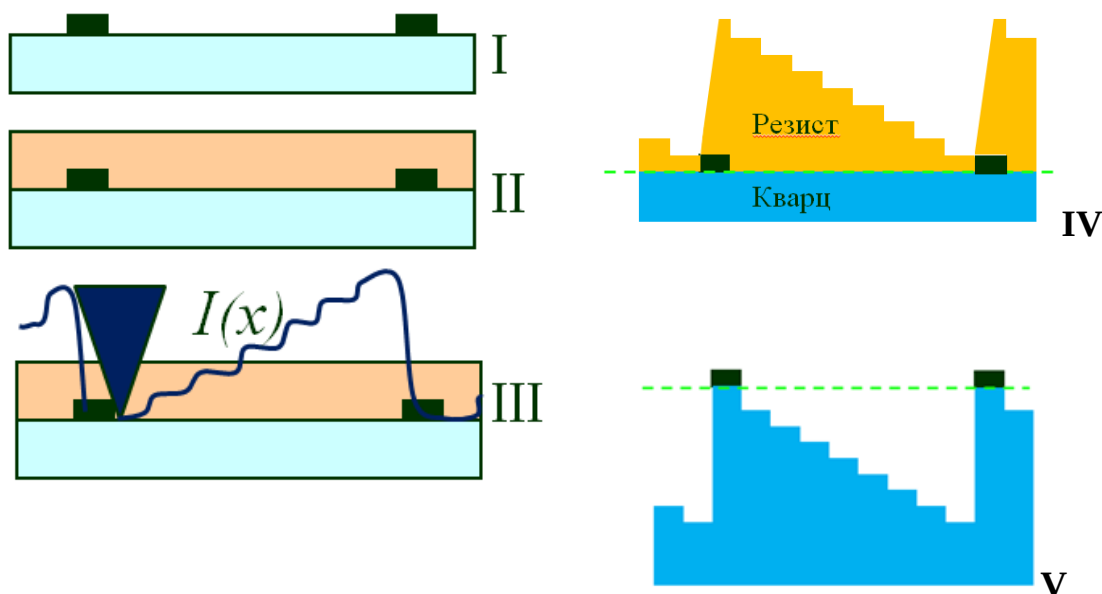


Рис. 2. Стадии процесса с применением КМ

Проведенное в скалярном приближении моделирование предложенного метода показало, что он может быть также оптимизирован, если «сухое» травление производится на определённую глубину и ширина линий контурной маски выбрана определённым образом.

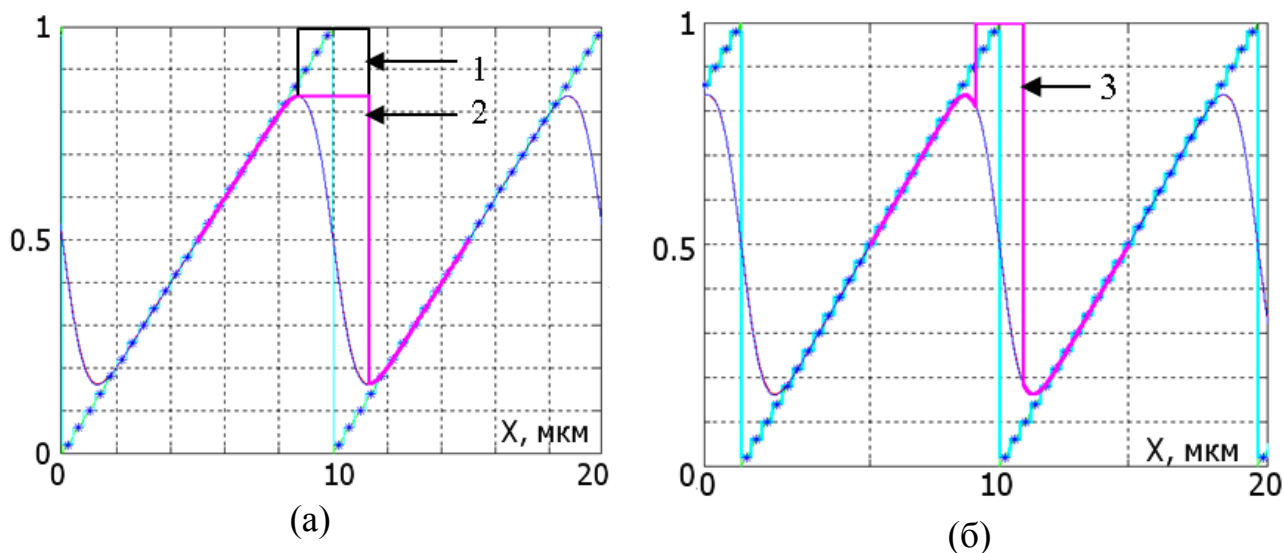


Рис. 3. Варианты формы рельефа дифракционных зон с периодом 10 мкм в зависимости от ширины линий КМ и глубины травления через нее:
 а) 1 – травление до уровня 1, 2 – травление до уровня максимума профиля в резисте, (б) 3 – травление до уровня 1 через маску с оптимизированной шириной линий

На рис. 3 показано как изменяется рельефа дифракционной решетки с периодом 10 мкм в зависимости от ширины линий КМ и глубины травления через нее. Уровень 1 глубины соответствует фазовой задержке 2π для идеального треугольного профиля (показан линией с точками). При ширине обратного ската 2,63 мкм в модели ширина линий маски для получения максимальной эффективности должна составлять 1,83 мкм, то есть 0.7 ширины ската. В таблице 1 демонстрирует прирост дифракционной эффективности по сравнению с дифракционной решеткой, изготовленной без использования КМ.

Таблица 1

Дифракционная эффективность моделируемой решетки

Условия моделирования	Дифракционная эффективность
Без КМ	63.4%
Случай 1	77.5%
Случай 2	94.2%
Случай 3	96.8%

Упрощенная экспериментальная проверка метода с КМ была проведена на модельном рельефе в фоторезисте, микроинтерферограмма которого показана на рис. 4.

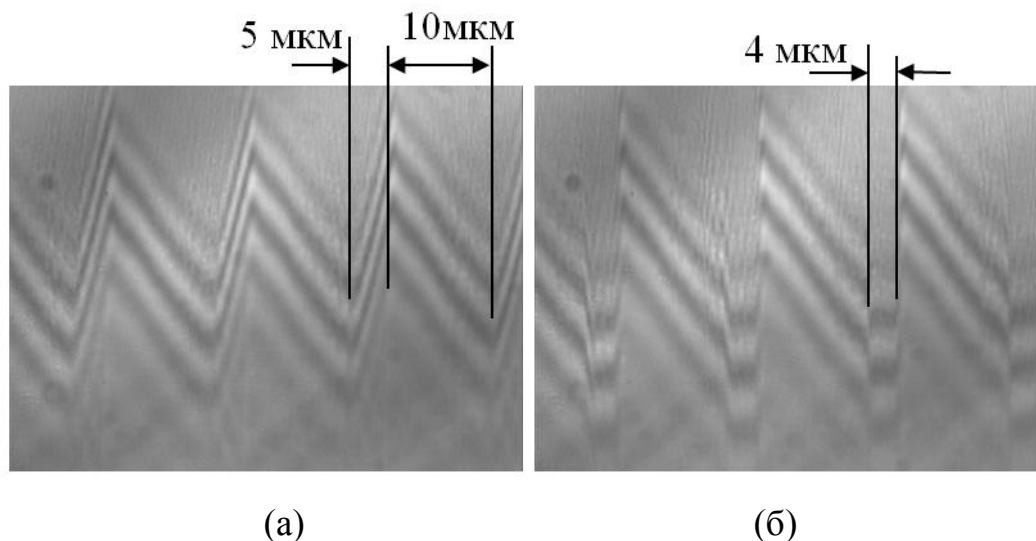


Рис. 4. Микроинтерферограммы двух вариантов экспериментально изготовленного профиля для проверки метода: а) – треугольный рельеф, б) – рельеф с выступом, моделирующим результат использования контурной маски

Рис. 5 показывает дифракционную эффективность в зависимости от ширины пологой части рельефа к периоду дифракционной решетки. Существенный рост дифракционной эффективности очевиден

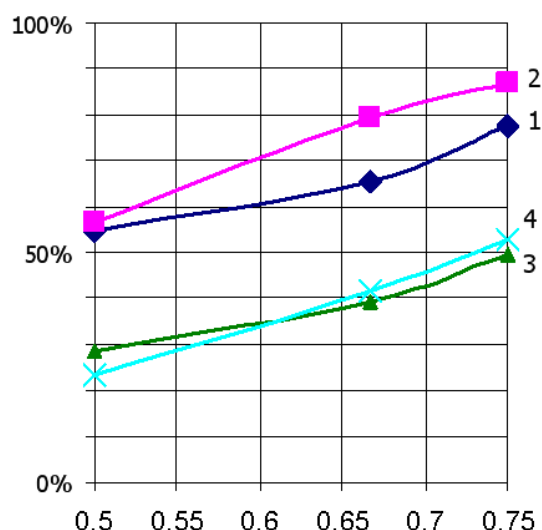


Рис. 5. Дифракционная эффективность в зависимости от отношения ширины пологой части рельефа к периоду дифракционной решетки: графики 1 и 2 – для рельефа с выступом, 3 и 4 – для треугольного рельефа, 1 и 3 – эксперимент, 2 и 4 – расчетные данные

Заключение. Метод контурной маски сочетает преимущества аналоговых и бинарных процессов. Он позволяет существенно увеличить дифракционную эффективность. Однако его применение для ДОЭ с периодом менее 5 мкм требует теоритической проверки результатов оптимизации в рамках точной теории дифракции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спектр Б.И.. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия. - 1985. – N 6. - С. 34.
2. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Полутонные фотошаблоны на основе LDW-стекол // Автометрия. - 1998. – N 6. - С. 27-37.
3. Полещук А.Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий//Автометрия. – 1991. - N 6. - С. 66-76.
4. V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov, R. V. Shimansky, Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements, Proc. SPIE 6732, 67320P (2007).
5. Ogusu Makoto, Iwasaki Yuichi, Method of manufacturing diffractive optical element, Patent USA N20020122255, September, 2002.

© В.П. Корольков, 2013

ЦИКЛИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАПИСИ ОБЪЕМНОГО ГОЛОГРАММНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

Николай Анатольевич Мещеряков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: opttechnic@mail.ru

Разработана компактная циклическая схема записи объемного голограммного оптического элемента. Схема записи основана на интерферометре радиального сдвига Харихарана-Сена.

Ключевые слова: голография, голограммный оптический элемент, схема записи.

CYCLE SCHEME FOR RECORDING OF VOLUME HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENT

Yury Z. Batomunkuev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., associate professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

Nicholas A. Meshcheryakov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

The compact cyclic scheme for recording of volume holographic optical elements is developed. The scheme for recording is based on Hariharan-Sen radial shearing interferometer.

Key words: holography, holographic optical element, scheme for recording.

Известно, что при записи объемного голограммного оптического элемента (ГОЭ) с рабочими длинами волн в инфракрасной области спектра, невысокая фоточувствительность объемных сред и связанное с этим большое время экспозиции предъявляют высокие требования к стабильности регистрируемой интерференционной картины. Требуемая длительная стабильность интерференционной картины (на протяжении десятков минут) с трудом достигается в известных схемах записи ГОЭ, которые представляют собой, как правило, модификации интерферометров типа Тваймана-Грина и Маха-Цендера [1]. Эта проблема особенно остра при записи объемных ГОЭ больших размеров. Для стабилизации интерференционной картины разрабатываются управляемые достаточно сложные и дорогостоящие системы пассивной и активной стабилизации интерференционной картины. В работе [2] приведены результаты записи объемного осевого ГОЭ в схеме типа Маха-Цендера.

Целью работы является разработка компактной оптической схемы со стабильной интерференционной картиной для записи объемных ГОЭ с рабочими длинами волн в инфракрасных атмосферных «окнах прозрачности». На рисунке представлена разработанная схема записи объемного осевого ГОЭ с рабочей длиной волны, существенно превышающей длины волн лазеров видимого диапазона. Схема записи является модификацией интерферометра Харихарана-

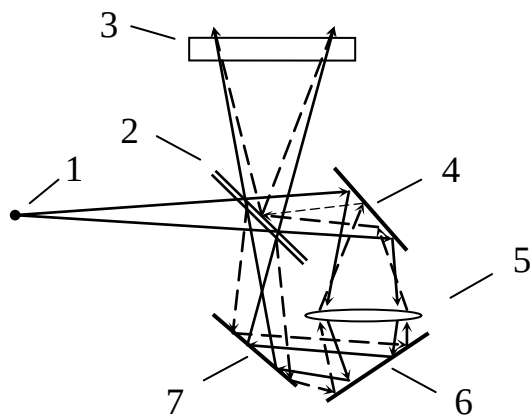


Рис. Схема записи объемного осевого ГОЭ: 1 – когерентный источник сферической волны, 2 – светоделитель, 3 – ГОЭ, 5 – объектив, 4, 6, 7 – отражающие зеркала.

Сена [3] и включает в себя когерентный источник сферической волны 1, светоделитель 2, ГОЭ 3, объектив 5, отражающие плоские зеркала 4, 6, 7. В [4] приведены расчетные параметры такой схемы записи объемного осевого ГОЭ со световым диаметром 400 мм, с фокусным расстоянием 800 мм на рабочей длине волны 10,0 мкм. В настоящей работе рассматривается схема записи ГОЭ с рабочими длинами волн: 1,20 мкм, 1,63 мкм, 2,25 мкм, 3,75 мкм, 4,62 мкм. Незначительное различие оптических путей интерферирующих волн снижает требования к временной когерентности источника излучения. Нечетное количество отражений, испыты-

ваемых опорной и объектной волнами, обеспечивает синфазность их волновых фронтов на поверхности ГОЭ и снижает требования к пространственной когерентности источника излучения. То обстоятельство, что обе интерферирующие волны отражаются от одних и тех же, проходят одни и те же оптические элементы, приводит к малому влиянию, как потоков воздуха, так и нагрева элементов схемы. Следует отметить, что в представленной схеме записи световые диаметры элементов интерферометра существенно меньше светового диаметра изготавливаемого ГОЭ. С практической точки зрения важным является тот факт, что юстировка схемы записи для опорной волны автоматически приводит к юстировке объектной волны. В то время, как в схемах записи типа Тваймана-Грина и типа Маха-Цендера требуются отдельные юстировки для опорной и объектной волн.

Работа выполнена в рамках НИР № ГР 012008.03159, поддержанной Федеральной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2012 годы)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М., 1973. – 719 с.
2. Батомункуев Ю.Ц., Сандер Е.А., Шойдин С.А. Аберрации объемных голограмм // Тез. Всесоюз. семин. "Автоматизация проектирования оптических систем"(26 - 28 октября 1988 г., Москва). – М., 1989.– С. 101–112.
3. Hariharan P., Sen D. Radial shearing interferometer // J. Sci. Instrum. – 1961. – V. 38, N. 11. – P. 428 - 432.
4. Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Расчет схемы записи объемного осевого ГОЭ для инфракрасного диапазона спектра / Изв. вузов. Физика. – 2010.– № 7. – С. 24-29.

© Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков, 2013

ПРИБОР ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ КАРТЫ ГЛУБИНЫ РЕЛЬЕФА БИНАРНЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Александр Сергеевич Конченко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, инженер лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: as_konch@ngs.ru

Вадим Владимирович Черкашин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: vadcher@gmail.com

Николай Геннадьевич Миронников

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2. Студент кафедры квантовой оптики физического факультета. тел. (383)3333-091, e-mail: mironnikov.nikolay@gmail.com

В статье представлен прибор для измерения карты глубин травления бинарных фазовых синтезированных голограмм. Особенностью прибора являются скорость измерения и диапазон геометрических параметров измеряемых структур периодом от 3 мкм и глубиной от 165 до 3200 нм.

Ключевые слова: измерение глубины микрорельефа, бинарные фазовые синтезированные голограммы, волоконный спектрометр, дифракционная эффективность в нулевом порядке.

A DEVICE FOR AUTOMIZED MEASUREMENT OF STRUCTURE DEPTH MAP FOR BINARY SYNTHESIZED HOLOGRAMS

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyuga avenue 1, senior researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Alexander S. Konchenko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyuga avenue 1, engineer of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: as_konch@ngs.ru

Vadim V. Cherkashin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyuga avenue 1, researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: vadcher@gmail.com

Nikolay G. Mironnikov

Novosibirsk state university, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova str., 2, student of physics department, phone: (383)3333-091, e-mail: mironnikov.nikolay@gmail.com

The article offers the device for etch depth mapping of binary phase synthesized holograms. The features of the device are the measurement rate and a wide range of geometrical parameters of measurable structures. The periods are from 3µm and measurement depth is from 165 to 3200nm.

Key words: measurement of profile depth, binary phase computer-synthesized holograms, fiber spectrometer, zero order diffraction efficiency.

Изготовление бинарных фазовых синтезированных голограмм (СГ), применяемых для контроля асферических поверхностей [1], предъявляет высокие требования к равномерности глубины бинарного рельефа по поверхности голограммы. Это вызвано необходимостью получения интерференционной картины с равномерной интенсивностью. В особенности чувствительны к равномерности глубины СГ нового типа - дифракционные нуль-линзы ФИЗО (DFNL) [2], в которых опорный волновой фронт формируется на отражение. Такие структуры существенно более чувствительны к ошибкам глубины, чем структуры, работающие на пропускание. С учетом большого разнообразия периодов и большого размера структуры СГ контроль глубины микрорельефа связан не только с существенными трудозатратами, но и с практической невозможностью оперативного профилометрического контроля глубины решеток с периодом порядка нескольких микрон.

В данной работе предлагается измерять глубину бинарного рельефа методом, основанным на спектральных свойствах глубоких бинарных дифракционных решеток. Рассмотрим падение света из среды с показателем преломления n на отражающую бинарную фазовую дифракционную решетку в скалярном приближении теории дифракции (Рис. 1). Оптическая разность хода Δl лучей, отраженных от поверхности выступов и канавок, можно выразить через глубину решетки H и угол падения α света:

$$\Delta l = \frac{2Hn}{\cos(\alpha)}.$$

Тогда экстремумы интенсивности в спектре отраженного в нулевом порядке света будут наблюдаться при волновых числах падающего света ($k=1/\lambda$), удовлетворяющих условию:

$$k \cdot n(k) = \frac{m \cdot \cos(\alpha)}{4H}, \quad (1)$$

где m – целое число полуволн, укладывающихся в оптической разности хода Δl .

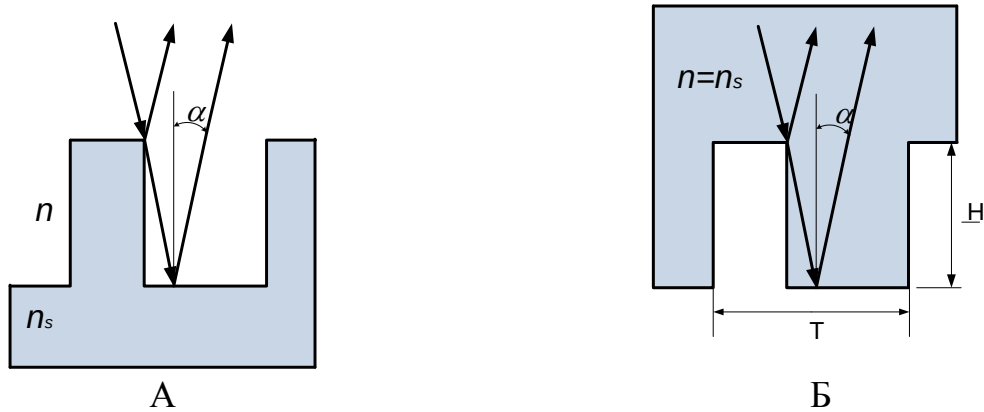


Рис. 1. Падение света на фазовую решетку.
А) со стороны структуры, Б) со стороны подложки

Таким образом, спектр отражения имеет периодический характер по параметру $k \cdot n(k)$. Использование преобразования Фурье для определения периода спектра затруднительно в связи с зашумлением реальных экспериментальных данных и малым количеством периодов в спектральном диапазоне спектрометра. Прямое использование выражения (1) также не подходит из-за сложности определения числа m для каждого экстремума. Поэтому в данной работе используется определение разницы волновых чисел между двумя соседними экстремумами k_i . Глубина рельефа в таком случае определяется по формуле:

$$H = \frac{\cos \alpha}{4(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{(k_i n_i - k_{i+1} n_{i+1})}, \quad (2)$$

где N – количество анализируемых экстремумов, n_i – коэффициент преломления при волновом числе k_i .

Диапазон применимости метода определяется спектральным диапазоном спектрометра, его точностью определения длины волны и необходимой точностью измерения глубины [3]. Минимальная и максимальная глубина рельефа может быть вычислена по формулам (3) и (4) соответственно:

$$H_{\min} = \frac{L}{4n} \text{ceil}\left(\frac{\lambda_{\min}}{L}\right) \cdot \text{ceil}\left(\frac{\lambda_{\min}}{L} + 1\right), \quad (3)$$

$$H_{\max} \approx \frac{\lambda_{\max}^2}{16 \cdot n \cdot L} \left(1 + \sqrt{1 - 6L/\lambda_{\max}}\right), \quad (4)$$

где $\text{ceil}(x)$ – функция округления аргумента x до большего целого числа, $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ – границы спектрального диапазона спектрометра, а $L = 100 \cdot \frac{\Delta\lambda}{\delta}$ – минимальная разность длин волн между соседними экстремумами, которую можно определить с требуемой точностью $\delta\%$ при помощи спектрометра с ошибкой длины волны $\Delta\lambda$. Источники ошибок данного метода подробно описаны в [4].

Для использованного спектрометра ошибка определения длины волны $\Delta\lambda = 0.8\text{ нм}$, а спектральный диапазон 200-1150 нм. При таких параметрах можно достигнуть точности $\delta = 1\%$ для глубин от 240 до 3200 нм, проводя измерения со стороны структуры (Рис. 1А) и от 165 до 2200 нм для измерений со стороны кварцевой подложки (Рис. 1Б).

В данной работе был использован волоконный спектрометр AvaSpec-ULS2048*16-UA-50 и источник света AvaLight-DH-S-DUV (Рис. 2). Спектральный диапазон спектрометра составляет 200-1150 нм.

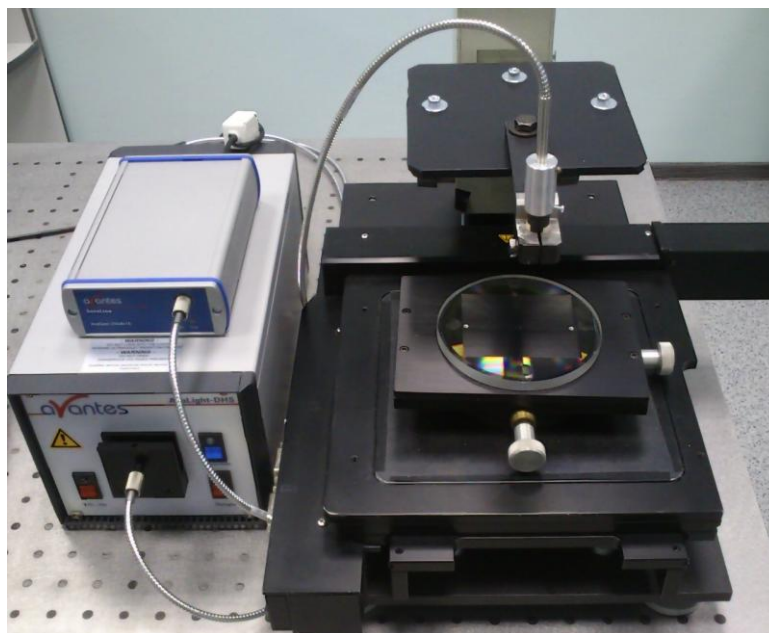


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения глубины травления

При проведении эксперимента необходимо учитывать, что наблюдаемый спектр отражения от структуры I_{str} содержит в себе спектр отражения материала образца I_{substr} , а также темновой сигнал I_{dark} , обусловленный прибором и оптической системой. Чтобы получить спектр I_{final} , по которому можно определить глубину травления, необходимо провести обработку экспериментальных данных:

$$I_{final} = \frac{I_{str} - I_{dark}}{I_{substr} - I_{dark}} .$$

На рис./' 3 представлены экспериментально полученный сигнал отражения от структуры I_{str} (Рис. 3 А) и обработанный спектр I_{final} (Рис. 3Б).

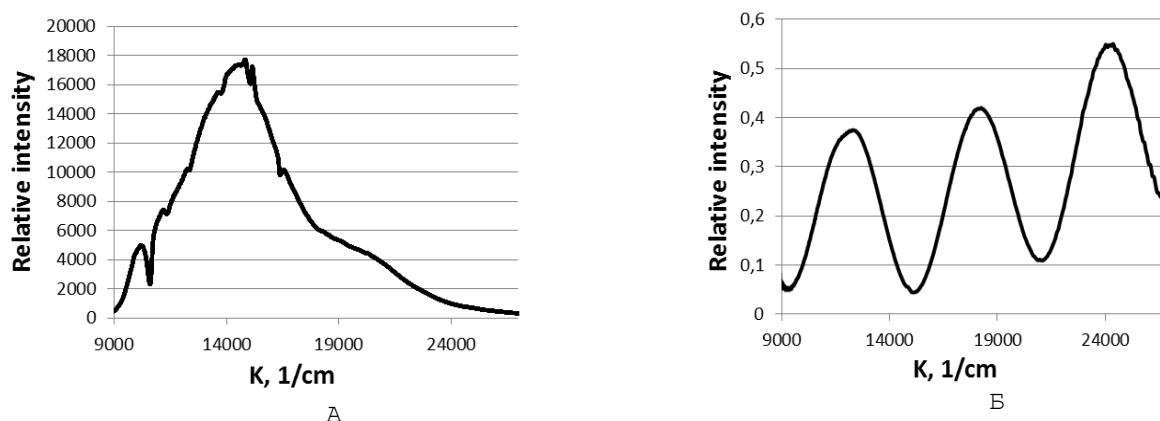


Рис. 3. Примеры спектров А) спектр отражения структуры I_{str} и Б) обработанный спектр I_{final}

Экспериментальная установка включала в себя систему сканирования по площади образца размером до 200x200мм с разрешением 1мкм. При помощи этой установки была измерена карта глубин (Рис. 4) образца диаметром 75мм. Минимальный период структуры составлял 3мкм, шаг сканирования был равен 1мм, а измерения проводились со стороны подложки.

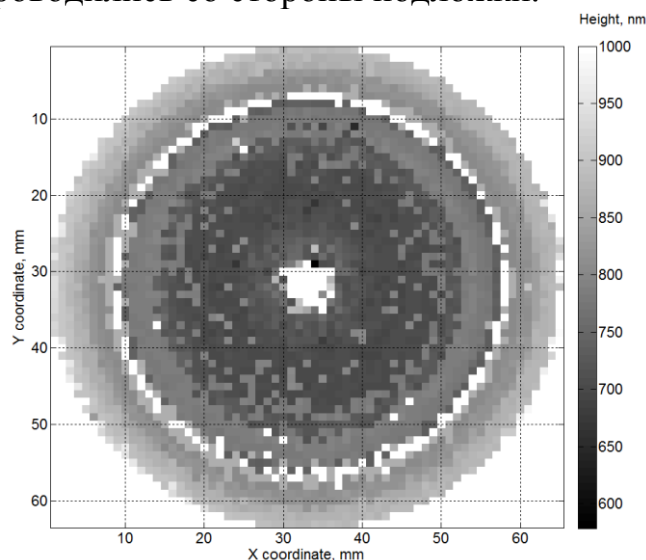


Рис. 4. Карта глубин травления образца бинарной фазовой СТ

Глубина травления образца составил 790нм со стандартным отклонением 66.9нм, а измерение всей карты глубин заняло около 17мин. В центре данные потеряны в связи с малыми углами расхождения дифракционных порядков при отражении от структуры с большим периодом. Белое кольцо соответствует не структурированной области, разделяющей кольцо, сделанное для настройки от основной голограммы.

В работе представлен прибор для измерения карты глубин травления бинарных фазовых синтезированных голограмм методом, основанным на спектральных свойствах фазовых дифракционных решеток. Диапазон применимости прибора составляет от 240 до 3200нм глубины при измерении со стороны

структуры. Измерение карты глубин образца диаметром 75 мм, глубиной 790 нм и с периодами от 3 мкм занимает около 17 мин. Подобное соотношение продуктивности и возможности измерять структуры микронного масштаба не достижимо другими современными профилометрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chang Y.-C., Zhou P., and Burge J.H. Analysis of phase sensitivity for binary computer-generated holograms// Appl. Opt.-2006. - V.45.-P. 4223-4234.
2. Poleshchuk A. G., Nasyrov R. K., and Asfour J.-M. Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces// Opt. Express.2009. 17. P. 5420-5425.
3. V.P. Korolkov, A.S. Konchenko, V.V. Cherkashin, N.G. Mironnikov, A.G. Poleshchuk Etch depth mapping of phase binary computer-generated holograms by means of specular spectroscopic scatterometry// Optical Engineering. 2013. Vol. 52, No. 09.
4. Корольков В.П., Конченко А.С. Спектрофотометрический метод измерения глубины отражательных калибровочных решеток// Автометрия.- 2012. - Т. 48.- № 2. - С. 119-127.

© В.П. Корольков, А.С. Конченко, В.В. Черкашин, Н.Г. МIRONНИКОВ, 2013

КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ДИСКРЕТНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

Александра Алексеевна Дианова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, лаборант

Татьяна Валерьевна Маганакова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, лаборант

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доцент

Никита Алексеевич Харитошин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, лаборант

В работе рассмотрено изготовление дискретных составных и наложенных дифракционных элементов с помощью стандартных компьютерных программ и высокоразрешающего принтера. Каждая составная (наложенная) часть дифракционного элемента выполняет заданное простое преобразование падающей на нее световой волны. Приведены примеры дискретных составных и наложенных дифракционных элементов. Представлены формируемые ими дифракционные картины и графики распределения интенсивности.

Ключевые слова: дифракция, дифракционный оптический элемент, зонная пластина.

COMPUTER SYNTHESIS OF DISCRETE DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

Yury Z. Batomunkuev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, associate professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

Alexandra A. Dianova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, laboratory assistant

Tatiana V. Maganakova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, laboratory assistant

Valery A. Reichert

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, associate professor

Nikita A. Haritoshin

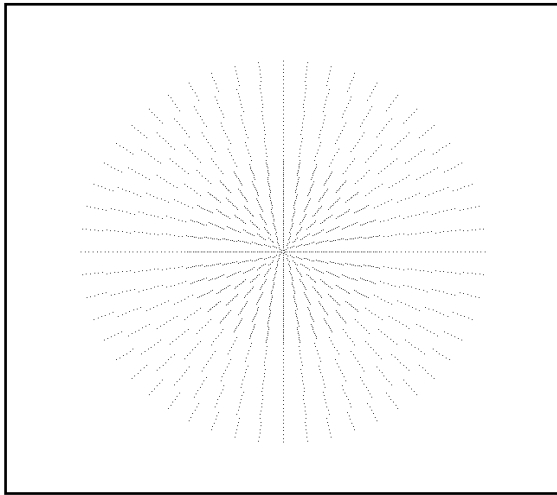
Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, laboratory assistant

The production of the discrete multiplex and of the imposed diffractive elements using standard computer programs and high-resolution printer is considered in this report. The each component of the diffractive element realize a simple transformation of the incident light wave. The multiplex and imposed diffractive optical elements are presented as examples. The diffraction patterns of these elements and graphics intensity distribution are presented.

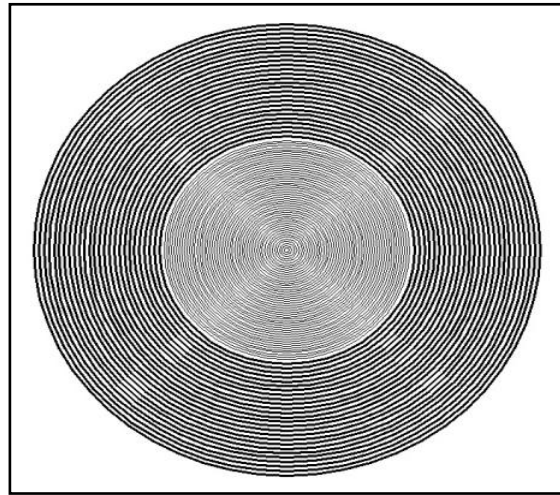
Key words: diffraction, diffractive optical element, zone plate.

В последние годы разрабатываются новые дифракционные оптические элементы, преобразующие заданным образом волновой фронт, амплитуду и фазу световой волны [1-3]. Практическая необходимость в таких дифракционных элементах возникает в связи с невозможностью использования стеклянных линз и призм в терагерцовом, дальнем инфракрасном и в дальнем ультрафиолетовом диапазонах спектра. Причем из-за разрушения излучением дифракционных элементов возникает потребность в недорогих элементах, одноразового использования. В настоящее время возник интерес к дискретным составным и наложенным дифракционным элементам, выполняющим одновременно два и более различных преобразований световой волны. Но для их изготовления требуется дальнейшее совершенствование специализированного оборудования и технологий, а также усложнение расчетов, по сравнению с расчетами известных дифракционных элементов. Поэтому задача упрощения изготовления составных и наложенных дифракционных элементов, в частности с дискретной структурой, является актуальной. Такая практическая возможность появилась в последнее время с созданием относительно недорогих высокоразрешающих принтеров. Целью работы является изготовление дискретных составных и наложенных дифракционных элементов с помощью стандартных компьютерных программ и высокоразрешающего принтера. При этом минимальные размеры дифракционной структуры элементов ограничены разрешением принтера.

Изготовление дискретного дифракционного оптического элемента включает в себя создание его изображения с помощью стандартных программных систем проектирования и печатание этого изображения на прозрачную пленку или пластину. Например, формирование дифракционного аксикона в программе проектирования и черчения Auto CAD состоит из нескольких действий: выбора линии и цвета зоны, указания размеров и их взаимного расположения [4]. По указанной методике было изготовлено большое количество (сотни штук) различных дискретных составных и наложенных дифракционных элементов. В качестве примера на рисунке 1а представлен пленочный составной дифракционный аксикон с дискретными круговыми тонкими кольцами, а на рисунке 1б – этот же составной аксикон с непрерывными тонкими кольцами.

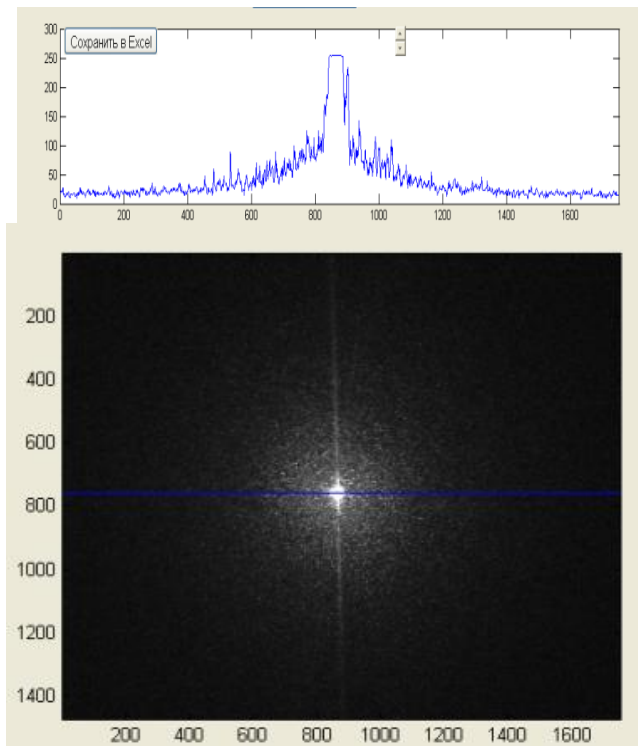


а)

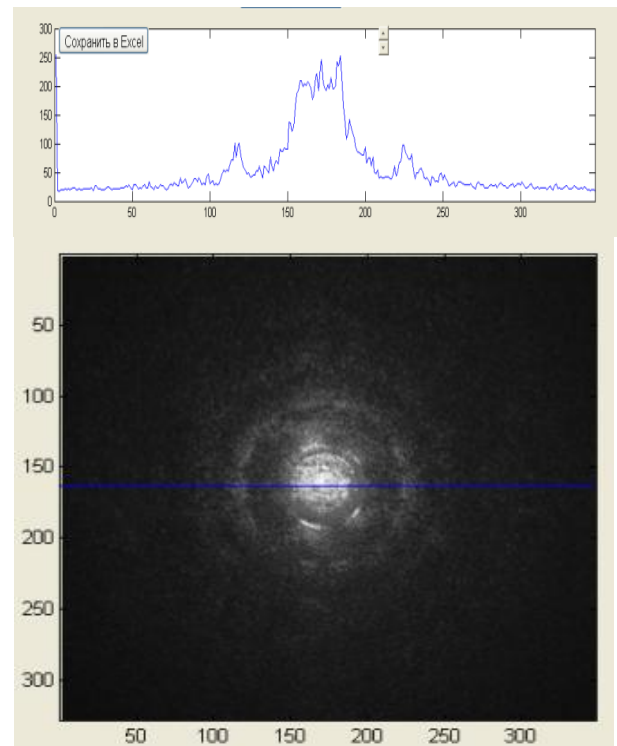


б)

Рис. 1. Изображение составного дифракционного аксикона с дискретными (а) и с непрерывными (б) тонкими кольцами (круговыми штрихами).



а)



б)

Рис. 2. Изображение дифракционной картины составного аксикона с дискретными (а) и с непрерывными (б) тонкими круговыми штрихами и графики распределения интенсивности вдоль линии на этой дифракционной картине

При падении на составной аксикон с дискретными круговыми штрихами плоской монохроматической волны имеет место явление фокусировки. На рисунке 2а представлено изображение фокуса прошедшей составной аксикон мо-

нохроматической волны, указывающее на отсутствие боковых дифракционных порядков. Это подтверждается графиком распределения интенсивности в фокальной плоскости вдоль выбранной горизонтальной линии, проходящей через фокальное пятно.

На рисунке 2б представлено изображение дифракционной картины, создаваемой монохроматической волной, прошедшей составной аксикон с непрерывными тонкими круговыми штрихами и график распределения интенсивности вдоль выбранной горизонтальной линии. На дифракционной картине видны кольца порядков дифракции, соответствующие частям составного аксикона. На графике распределения интенсивности проявляются максимумы, соответствующие соответствующим этим дифракционным порядкам.

Наложением двух или более дифракционных элементов друг на друга можно получить наложенные дифракционные элементы. На рисунке 3 представлены наложенные дифракционные элементы с дискретной и непрерывной структурой. На рисунке 4 представлены изображения дифракционной картины наложенного элемента с дискретными (а) и с непрерывными (б) тонкими прямоугольными штрихами и графики распределения интенсивности вдоль линии на этой дифракционной картине. В [3] предложен другой метод компьютерного синтеза наложенных дифракционных элементов, основанный на решении обратной задачи дифракции. В представленной работе каждая составная или наложенная часть дифракционного элемента выполняет заданное простое преобразование падающей на нее световой волны. Результирующее преобразование является результатом сложения преобразований всех составных и наложенных частей.

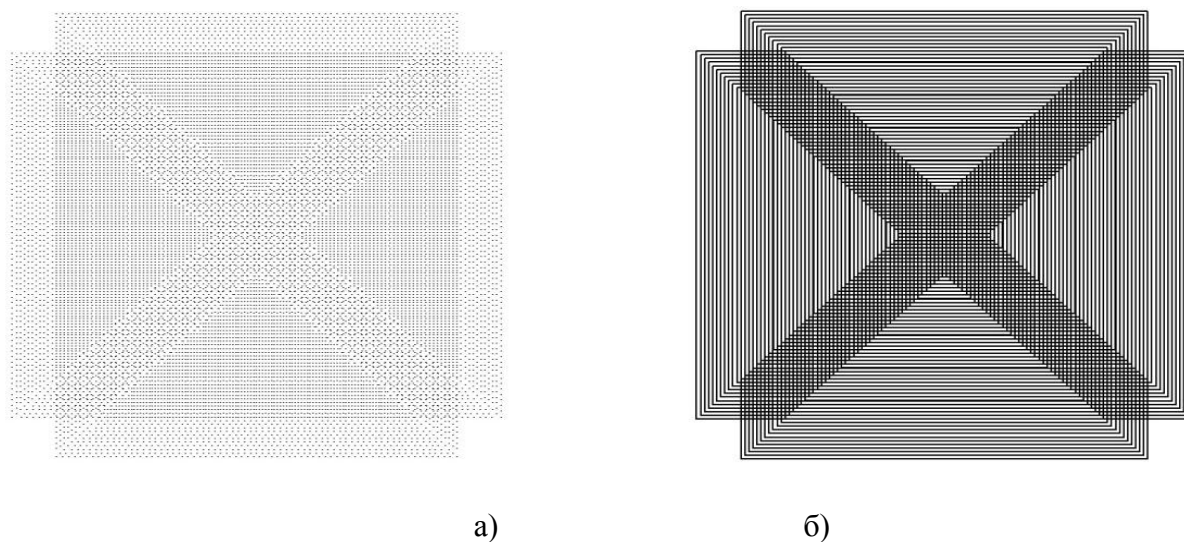


Рис. 3. Изображения наложенного дифракционного элемента с дискретными (а) и с непрерывными (б) тонкими квадратными штрихами

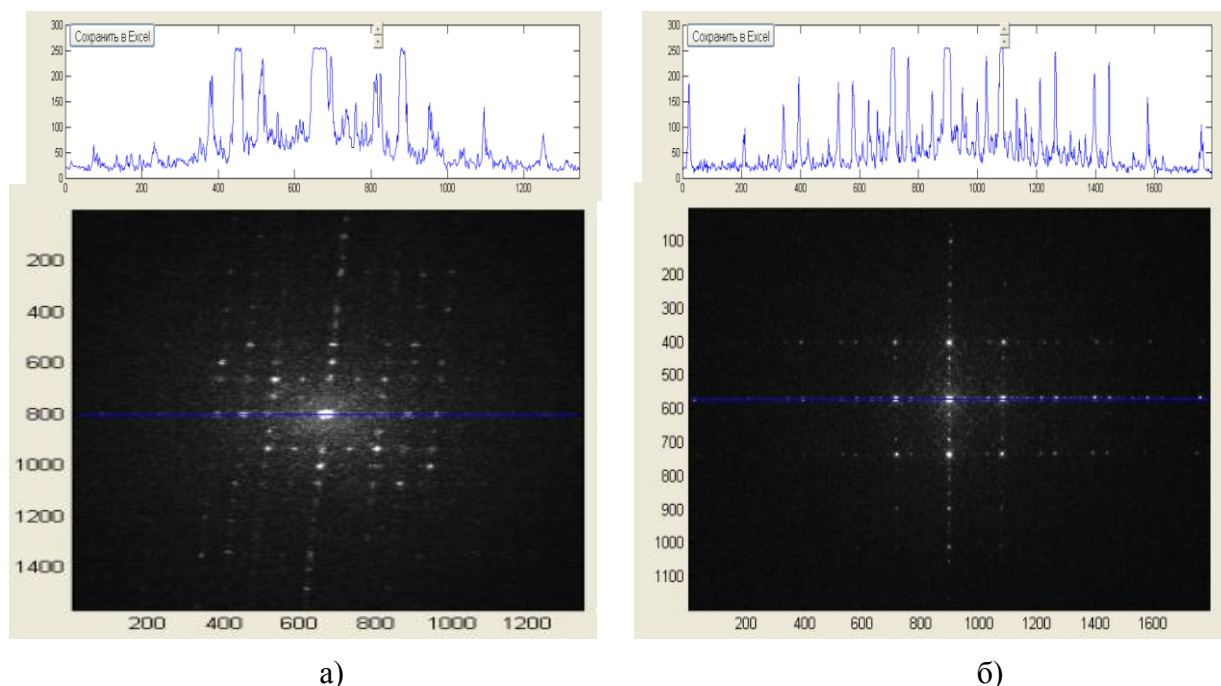


Рис. 4. Изображения дифракционной картины наложенного элемента с дискретными (а) и с непрерывными (б) тонкими прямоугольными штрихами и соответствующие графики распределения интенсивности вдоль линии на этой дифракционной картине

Таким образом, в работе рассмотрено изготовление дискретных составных и наложенных дифракционных элементов с помощью широко распространенных компьютерных программ и высокоразрешающего принтера. Синтез дифракционных элементов заключается в расчете простых составных частей и в комбинировании из них различных составных и наложенных дифракционных элементов. Причем, компьютерные программы позволяют легко изменять толщину линий, форму, размеры, цвет мельчайших деталей дифракционных элементов. Использование прозрачной принтерной краски позволяет создавать рельефно-фазовые составные и наложенные дифракционные оптические элементы для видимой области спектра. Эти же элементы будут рельефно-амплитудными в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра из-за отличий в поглощении излучения темными и светлыми зонами. Использование цветных принтерных красок позволяет создавать рельефно-амплитудно-фазовые дифракционные элементы в видимой области спектра.

Работа выполнена в рамках НИР № ГР 012008.03159, поддержанной Федеральной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2012 годы)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы / Коронкевич В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., и др. // Автометрия. – 1989. – № 3. – С. 95-102.
2. Рентгеновская оптика и микроскопия / Под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа. – М.: Мир. – 1987. – 464 с.

3. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, – 2007. – 736 с.
4. Батомункуев Ю.Ц., Дианова А.А., Маганакова Т.В., Райхерт В.А., Харитошин Н.А. Компьютерный синтез пленочных составных и наложенных дифракционных элементов / Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 139-142.

© Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова, Т.В. Маганакова,
В.А. Райхерт, Н.А. Харитошин, 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТОЛБИКОВЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, т. (383)3610836, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, т. (383)3610836, e-mail: phys003@list.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, т. (383)3610836, e-mail: denlnsk@mail.ru

Рассматриваются модели оптико-физических процессов самообразования микростолбиковых структур на поверхности кремниевых подложек с использованием лазерной активации процессов. Показано, что при интенсивности лазерного излучения порядка 10^{12} Вт/м² и длительности импульса 15 нс в фокальном пятне на поверхности подложки могут быть созданы условия самопроизвольного формирования топологических столбчатых структур микронных размеров.

Ключевые слова: импульсный лазер, микроструктуры, микростолбики, кремневая пластина.

INVESTIGATION OF LASER-INDUCED PROCESSES OF FORMATION MICROPOST STRUCTURES ON THE SURFACE OF A SILICON SUBSTRATE

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10, doctor of technical sciences, department of physics, (383)3610836, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10, Ph.D., department of nanosystems and optical engineering, (383) 3610836, e-mail: phys003@list.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10, engineer, department of physics, (383) 3610836, e-mail: denlnsk@mail.ru

The models of optical and physical processes of self micropost structures on the surface of silicon wafers using laser activation processes. It is shown that the laser intensity of the order of 10^{12} W/m² and a pulse duration of 15 ns in the focal spot on the surface of the substrate can be a way of spontaneous formation of topological columnar structures of micron size.

Key words: pulsed laser, microstructure, micropost, silicon wafer.

Рассматриваются модели оптико-физических процессов самообразования трёхмерных (микростолбиковых) структур на поверхности кремниевых подложек с использованием лазерной активации процессов. Показано, что при интенсивности лазерного излучения порядка 10^{12} Вт/м² и длительности импульса 15 нс в фокальном пятне на поверхности подложки могут быть созданы условия самопроизвольного формирования топологических столбчатых структур микронных размеров.

При разработках технологий микроэлектронных устройств, наряду с фотолитографическими методами создания топологических структур, изучаются процессы самообразования структур, в том числе, основанные на использовании явлений самоорганизации подвергаемого лазерному облучению вещества при большой интенсивности излучения [1, 2] и в лазерных термохимических процессах [3, 4]. Известны также предложения по формированию субмикронных и наноразмерных образований на поверхности с использованием в качестве формирующего фактора сил поверхностного натяжения структур в расплаве в фокальном пятне [5,6].

Полученные в настоящей работе результаты относятся к исследованию процессов самоорганизации формирования на поверхности столбиковых структур в фокальном пятне мощного лазерного излучения при наносекундном плавлении и испарении приповерхностной локальной области подложки.

Импульс лазерного излучения поглощается в подложке (Рис. 1).

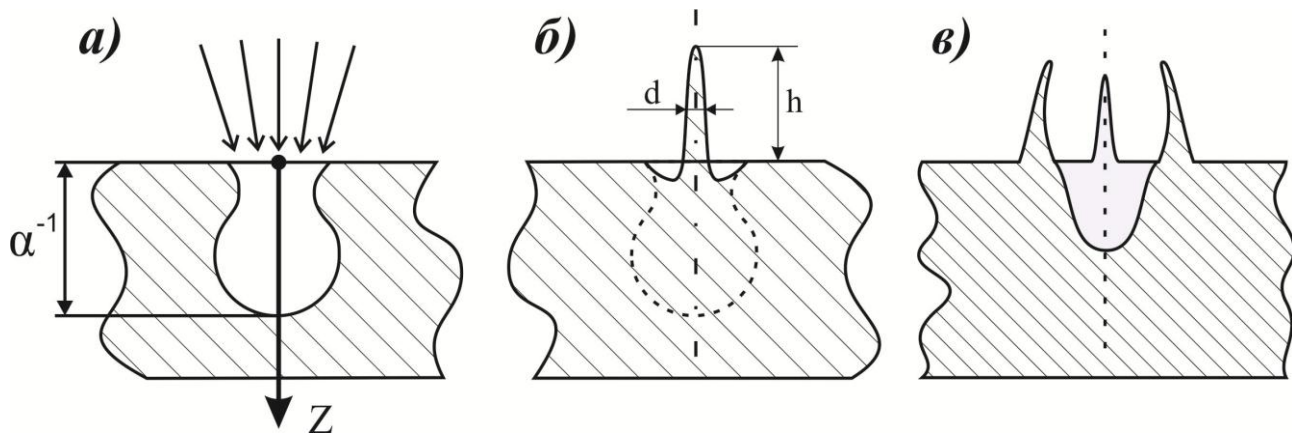


Рис. 1. Фазы процесса лазерного нагрева подложки

При фокусировании излучения на поверхность кремниевой подложки световая волна проникает в её внутренние области; в начальный момент распределение интенсивности в подложке определяется формулой:

$$I(z, t = 0) = I_0 \exp(-\alpha z), \quad (0.35)$$

где α – коэффициент поглощения излучения. Интенсивность излучения должна быть достаточной для нагревания облучаемой области за импульс до температуры плавления вещества подложки.

Ниже рассматриваются модели процессов, приводящих к выдавливанию расплава из узкой лунки и образованию из затвердевшего вещества вертикального столбика высотой h .

В числе причин выноса расплава под действием лазерного импульса из лунки могут быть давление пара испаряющегося вещества подложки и или возникающий вследствие уменьшения при плавлении плотности кремния механический импульс.

Характер теплофизических процессов в зоне облучения подложки зависит от интенсивности и длительности лазерного импульса и размеров облучаемой зоны. В облучаемой зоне возникает кратковременно избыточное давление, которое возбуждает смещения частиц вещества как в зоне облучения, так и упругие смещения в виде упругих волн в окружающей среде. Лазерное возбуждение упругих волн в конденсированных средах и процессов переноса вещества исследовано в ряде работ. Так, в [1] обсуждается возникновение упругих деформаций в металлах и на их поверхности в области фокального пятна, в [7] рассматриваются вопросы лазерного возбуждения упругих волн в дальней зоне, когда действие лазерного излучения не приводит к изменениям агрегатного состояния среды, в работах [1, 8, 9] рассматриваются вопросы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая процессы плавления, испарения и формирования структур под действием излучения. В работах [16, 17] приведены сведения о взаимодействии лазерного интенсивного излучения с полупроводниками, о влиянии степени проводимости полупроводников на лазерно-термические эффекты в полупроводниках.

В нашей работе изучается связь условий лазерного облучения локальной области полупроводниковой подложки и деформаций поверхности облучаемой зоны при её расплавлении.

Можно найти, что при длительности лазерного импульса порядка единиц наносекунд и размере облучаемой зоны порядка микрометров зона расплава много меньше длины звуковой волны, возбуждаемой лазерным импульсом, то есть, в пределах зоны расплава нет волновой пространственной модуляции интенсивностей процессов.

В качестве одной из моделей процессов формирования столбиков на поверхности подложки рассмотрим выдавливание столбиков за счёт разности плотностей расплава и твёрдой фазы (объём расплава больше, чем твёрдой фазы). Начиная с момента возникновения лазерного импульса подложка и приповерхностная зона нагреваются; по мере нагревания коэффициент поглощения излучения увеличивается, и глубина проникновения излучения в подложку уменьшается, что сопровождается увеличением темпа нагревания более близких к поверхности слоев. Плавление подложки начинается с поверхности, фронт плавления движется в глубину подложки и в сторону боковых поверхностей лунки расплава. После прекращения облучения в приповерхностном слое

подложки имеется лунка, заполненная расплавом; так как объём расплава больше объема кремния, из которого он образовался, в расплаве на границе с твёрдой фазой синхронно с плавлением твёрдой фазы возникает импульс давления, приводящий слой расплава в движение по направлению к поверхности подложки. При этом в движении находится весь объём расплава.

Для выплеска расплава из лунки в воздушную среду необходимо, чтобы сила давления, обусловленная фазовым переходом, была больше силы поверхностного натяжения расплава. Высота и диаметр струи расплава определяются величиной импульса, возникающего при фазовом переходе, действием поверхностного натяжения расплава, препятствующим выплеску, и силами трения расплава по стенкам лунки.

Распределение приращения температуры по глубине поглощающей подложки для одномерной модели нагревания можно найти по формуле [17]:

$$\Delta T(z, t) = \frac{\varepsilon I_0}{2\alpha k_T} \left\{ 4\alpha(\chi t)^{1/2} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2(\chi t)^{1/2}}\right) - 2e^{-\alpha z} + e^{\alpha^2 \chi t} \times \right. \\ \left. \times \left[e^{-\alpha z} \operatorname{erfc}\left(\alpha\sqrt{\chi t} - \frac{z}{2\sqrt{\chi t}}\right) + e^{\alpha z} \operatorname{erfc}\left(\alpha\sqrt{\chi t} + \frac{z}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right] \right\}. \quad (0.36)$$

Вычисленные значения температуры при интенсивности лазерного излучения 10^{12} Вт/м^2 и длительности импульса 15 нс приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вычисление приращения температуры по глубине кремниевой подложки при воздействии лазерного импульса (0.36)

	$z = 0$	$z = 10^{-7} \text{ м}$	$z = 10^{-6} \text{ м}$
$\alpha = 10^4 \text{ м}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^4 \text{ К}$	$8,95 \cdot 10^3 \text{ К}$	994К

Расчёт показывает, что при длительности импульса 15 нс до температуры плавления может прогреться слой подложки толщиной.

В качестве первого приближения при вычислении роста давления в лунке расплава, образованной лазерным лучом, при продвижении фронта плавления в глубину лунки примем, что процесс плавления стационарный и фронт плавления движется с постоянной скоростью v_2 . При этом прилегающий к фронту плавления слой расплава движется в обратном фронту направлении со скоростью относительно неподвижной системы координат:

$$v_1 = v_2 (\rho_2 / \rho_1 - 1), \quad (0.37)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкой и твёрдой фаз вещества лунки, соответственно. В силу равенства изменений масс dm твёрдой и жидкой фазы за время dt для изменений можно записать:

$$dm = \rho_2 s v_2 dt = \rho_1 s v_1 dt \quad (0.38)$$

где s – площадь фронта расплава. Вследствие неравенства плотностей твёрдой и жидкой фаз, для превышения объёма некоторой массы, расплавившейся за время t , над объёмом, занимаемым этой же массой в твёрдом состоянии, можно записать.

$$\Delta V_L = \Delta V_1 - \Delta V_2 = \int_0^t \frac{dm}{\rho_1} - \int_0^t \frac{dm}{\rho_2} = s v_2 t \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \quad (0.39)$$

В рассматриваемом случае можно пренебречь объемной сжимаемостью твердой и жидкой фазы в сравнении с деформируемостью свободной поверхности расплава, определяемой силами поверхностного натяжения, и действие сил натяжения приводит к возникновению внутреннего давления в расплаве. В статике величина внутреннего давления в соответствии с законом Лапласа для сферической поверхности равна:

$$p_\sigma = 2\sigma / R \quad (0.40)$$

где σ – поверхностное натяжение расплава, R – радиус кривизны поверхности.

В случае короткого лазерного импульса динамический напор расплава на стенки лунки, характеризуемый механическим импульсом $dm v_1$ расплава на фронте плавления, приводит к давлению на стенки:

$$p_d = \frac{dm}{dt} \frac{v_1}{s} = \rho_1 v_1^2, \quad (0.41)$$

здесь $\frac{dm}{dt}$ – скорость приращения массы расплава.

Столбики могут образовываться только из выплеснутого из подложки материала, поэтому должно выполняться условие:

$$p_\sigma \geq p_d \quad (0.42)$$

Количество расплава в лунке, образовавшегося за время лазерного импульса, определяется величиной перемещения фронта плавления за это же время. Конкурирующим процессом является испарение расплава. При коротких

импульсах для значительного перемещения фронта расплава необходима высокая интенсивность лазерного излучения, при которой расплав может интенсивно испаряться, что уменьшает достижимое количество расплава в лунке.

Оценку влияния плавления материала подложки на скорость движения фронта плавления проведём, воспользовавшись анализом [14] решения задачи о продвижении расплавленной зоны вглубь массивного образца при однородном тепловом потоке F на аналоговой вычислительной машине, выполненного в работе [15].

В работе [14] результаты представлены в виде графиков зависимостей безразмерных величин. Нулевой момент времени соответствует началу плавления поверхности, от начала теплового импульса до момента начала плавления проходит время:

$$t_{nl} = \frac{\pi k_{T2}^2 T_{nl}^2}{4 \chi_2 F^2} \quad (0.43)$$

здесь F – плотность поглощаемого теплового потока излучения, T_{nl} – температура плавления.

Безразмерная величина

$$T' = \frac{T_0}{T_{nl}}, \quad (0.44)$$

здесь T_0 – температура поверхности при облучении.

Безразмерная величина

$$Y = \frac{L}{c_2 T_{nl}} \quad (0.45)$$

где Y – отношение скрытой теплоты плавления к теплосодержанию в точке плавления, L – теплота плавления, c_2 – удельная теплоёмкость твёрдой фазы. Единицей глубины проплавления на графиках является величина

$$G = \frac{3\pi T_{nl}^2 c_2 k_{T2}}{100 L I_0} \quad (0.46)$$

Глубина проплавления, при которой ещё не наступает интенсивное испарение поверхности подложки, определяется формулой:

$$x_{nl} = GX', \quad (0.47)$$

где X' – безразмерная глубина проплавления, определяемая по графикам. Длительность лазерного импульса определяется по формуле:

$$\tau = (1 + t')t_{nl} \quad (0.48)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2. Использованы следующие значения параметров кремния: $k_T = 31$ Вт/(м*К) (1000К); $\chi = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с (1000К); $c_2 = 1013$ Дж/(кг*К) (1500К) [11,12].

Таблица 2

Параметры для вычисления глубины проплавления в режиме без испарения

F , Вт/м ²	t_{nl} , с	Y	$T' =$ T_0 / T_{nl}	t'	X'	τ , нс	G , м	x_{nl} , мкм
10^{10}	$2,8 \cdot 10^{-6}$	1.05	2,1	3,2	2	120	$4,66 \cdot 10^{-7}$	1.0
10^{11}	$2,8 \cdot 10^{-8}$	1.05	2,1	3,2	2	12	$4,66 \cdot 10^{-8}$	0,1
10^{12}	$2,8 \cdot 10^{-10}$	1.05	2.1	3,2	2	1,2	$4,66 \cdot 10^{-9}$	0,01

Вычисленные и приведённые в таблице 2 значения длительности и глубины проплавления позволяют определить среднюю скорость перемещения фронта плавления

$$\bar{v}_2 = x_{nl} / \tau \quad (0.49)$$

и величину давления, вызванного динамическим напором расплава по (0.41). Полученные значения – $\bar{v}_2 = 8.3$ м/с, $p_d = 530$ Па – одинаковы для всех использованных значений интенсивности лазерного пучка, так как условие отсутствия за время лазерного импульса испарения подложки, принятое в использованной [14] модели, предполагает уменьшение длительности лазерного импульса при увеличении его интенсивности

Величина динамического давления близка к статическому давлению, вызванному поверхностным натяжением расплава кремния:

$$p_{cm} = \frac{\sigma}{2R_l} \quad (0.50)$$

где $2R_l$ – поперечник лунки, что означает отсутствие выплеска материала из лунки при лазерном расплавлении подложки. Однако, можно ожидать некоторого выдавливания расплава наружу во время лазерного импульса, величина

которого определяется уравнением (0.39). В соответствии с расчётом, выдавливание $\Delta V_L / s$ составляет 7 нм/импульс при длительности лазерного импульса 15 нс. При расчётах использовались значения плотности ρ кремния [11,12]: твердого при 25⁰С – 2,33*10³ кг/м³, расплавленного – 2,2*10³ кг/м³.

Из таблицы 2 также следует, что глубина расплава (0.1 мкм) имеет меньшую величину, чем длина тепловой волны в твёрдой фазе (0,24 мкм) при одинаковой длительности лазерного импульса (10 – 12 нс).

Толщина скин-слоя поглощения излучения в среде равна:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi\eta} \quad (0.51)$$

где η – коэффициент экстинкции излучения в веществе. Как найдено в [10], для расплавленного кремния при температуре расплава, изменяющейся в пределах 1700К - 2800К, $\lambda=1,06$ мкм коэффициент экстинкции (мнимая часть комплексного коэффициента преломления среды) равен $\eta \approx 8 - 6,5$; при $\lambda=0,53$ мкм $\eta \approx 5,5 - 4,6$. Получим на нижней границе температурного диапазона значения $\delta=0,02$ мкм и $\delta=0,015$ мкм, соответственно. Скин-слой подложки нагревается непосредственно поглощённым излучением, а не за счёт теплопроводности, поэтому его толщину необходимо добавить к значению глубины проплавления; поправка существенна при использовании лазерных импульсов длительностью порядка наносекунды и интенсивностью поглощённого излучения порядка 10¹² Вт/м² (последняя строка таблицы 2).

Рассмотрим модель получения полупроводниковых микростолбиков с использованием испарительного гидромеханического действия излучения.

Подобный процесс применяется в случае лазерного сверления металлов, при котором испаряющийся в отверстии материал выталкивает расплав по краям отверстия [1,2,8,9], при этом используется лазерное нагревание до температуры кипения и интенсивного испарения. В указанных работах исследованы процессы сверления металлов микро- и миллисекундными импульсами излучения, жидкая фаза выбрасывается в виде капель.

Наши эксперименты показали возможность получения полупроводниковых структур при использовании наносекундных лазерных импульсов. Для оценок параметров происходящих при этом физических процессов воспользуемся теплогидродинамической моделью лазерного сверления металлов [2] с выносом расплава из лунки в установившемся режиме одиночным лазерным импульсом. Предполагается, что лунка на поверхности подложки уже существует, она сформирована предшествующими лазерными импульсами. Данный импульс нагревает доньшко и боковые стенки лунки, плавит их на глубину, равную суммарной толщине скин-слоя и x_{nl} (расстояние между фронтами плавления и испарения), вызывает испарение жидкой фазы; давление пара является насыщенным при температуре расплава. Пар своим давлением приводит жидкий слой в движение вдоль подстилающей поверхности и вытесняет жидкость на край лунки. Если динамический напор движущегося слоя больше сил,

вызванных поверхностным натяжением расплава, происходит выплеск расплава из лунки по касательной к боковой поверхности лунки.

Приращение температуры подложки под действием лазерного излучения в центре фокального пятна при гауссовском распределении интенсивности излучения по пятну определяется формулой:

$$\Delta T = \frac{(1-R)I_0\tau^{1/2}}{(\sqrt{2}k_T\rho c)^{1/2}} \quad (0.52)$$

Толщина слоя расплава в установившемся режиме определяется толщиной скин-слоя в полупроводнике и скоростями движения фронта плавления и фронта испарения. При увеличении интенсивности излучения фронт испарения приближается к фронту плавления, но в полупрозрачном полупроводнике расстояние между ними не может быть меньше толщины скин-слоя, так как излучение распространяется в веществе с много большей скоростью, чем тепло распространяется путём теплопроводности. При предельно больших интенсивностях излучения толщина слоя расплава поэтому равна толщине скин-слоя:

$$x_{жс} \approx \delta = \frac{\lambda}{2\pi\eta} \quad (0.53)$$

При интенсивности излучения порядка 10^{12} Вт/м² и меньшей скорость движения фронта расплава при лазерном облучении подложки определяется формулой [8]:

$$v_{пл} = \frac{(1-R)I_0}{\rho L_{пл} / M + \rho c T_{пл}}, \quad (0.54)$$

где $L_{пл}$ – теплота плавления, Дж/моль (для кремния 49,8 кДж/моль), $T_{пл}$ – температура плавления (для кремния 1415⁰С);

скорость движения фронта испарения определяется формулой:

$$v_{исп} = \frac{(1-R)I_0}{\rho L_{исп} / M + \rho c T_{кип}} \quad (0.55)$$

где $L_{исп}$ – теплота испарения Дж/моль (для кремния 356 кДж/моль), $T_{кип}$ – температура кипения (для кремния 3249⁰С) [11,12].

Вычисление показывает, что скорость фронта расплава составляет 95 м/с, толщина расплавленного слоя $x'_{пл} = (v_{пл} - v_{исп})\tau$, образующегося под действием лазерного импульса длительностью 15 нс и интенсивностью 10^{12} Вт/м² равна 0,04 мкм. С учётом толщины скин-слоя общая толщина $x_{пл} = x'_{пл} + \delta = 0,06$ мкм.

Для давления насыщенного пара известна формула [9]:

$$p_{\text{нас}} = p_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{L}{R_g} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (0.56)$$

здесь T и T_0 – температуры насыщенного пара при его давлении $p_{\text{нас}}$ и p_0 . При расчётах принималось: p_0 и T_0 – давление пара при температуре кипения и температура кипения расплава, R_g – универсальная газовая постоянная, $T = \Delta T + 273\text{K}$.

Условие выплеска расплава

$$p_{\text{нас}} \succ \sigma / x_{\text{пл}}. \quad (0.57)$$

Таблица 3

Вычисление параметров лазерного облучения кремния, обеспечивающих выплеск расплава в режиме с учётом испарения

I_0 , Вт/м ²	τ , нс	ΔT	$p_{\text{нас}}$, Па	$x_{\text{пл}}$, мкм	$\sigma / x_{\text{пл}}$, Па
$4 \cdot 10^{11}$	15	3292	$1,65 \cdot 10^5$		
$5 \cdot 10^{11}$	15	4240	$1,85 \cdot 10^6$	0,04	$p_{\text{нас}} \prec \sigma / x_{\text{пл}}$
10^{12}	15	8700	$4,1 \cdot 10^8$	0,06	$1,25 \cdot 10^7$

Приведённые в таблице оценочные результаты свидетельствуют о возможности выплеска кремния на краю лунки расплава, полученной в фокальном пятне под действием лазерного импульса длительностью 15 нс и интенсивностью 10^{12} Вт/м².

Рассмотрим далее возможности формирования вертикальных столбиков при попадании паров кремния, возникших при лазерном испарении кремния в лунке, на структуры выплеска.

Толщина слоя кремния, нарастающего на поверхностях структур, определится потоком падающих на поверхность атомов, коэффициент прилипания атомов к поверхности равен единице.

Во время лазерного импульса пар кремния заполняет объем лунки, имеет давление $p_{\text{нас}}$. Давление в лунке много больше атмосферного, поэтому можно не учитывать противодействие атмосферы. В работе [9] рассмотрена гидродинамика разлёта пара. Показано, что при малых длительностях лазерного импульса нагревание пара лазерным излучением пренебрежимо мало; начиная с расстояния от поверхности две – три длины свободного пробега атомов пар расширяется и будет конденсироваться при движении; если размеры образующихся капель порядка 0.1 мкм, их температура и скорость движения мало отличаются от соответствующих значений пара. Молекулы пара, испускаемые по-

верхностью, имеют изотропное максвелловское распределение по скоростям в телесном угле 2π с температурой, равной температуре поверхности и концентрации, соответствующей давлению насыщенного пара при этой температуре. После прохождения указанного расстояния вследствие перераспределения энергии у частиц состояние пара изменяется, становится изотропным в телесном угле 4π , уменьшаются его температура – до значения $\bar{T} \approx 0,65T$, концентрация частиц – до значения $\bar{n} \approx 0,312n$, полный поток пара – до значения $\bar{j}_m \approx 0,82j_m$; массовая скорость пара увеличивается, вплоть до (для одноатомного газа) значения равного скорости звука в среде пара.

$$\bar{u} = c = \sqrt{\frac{5R\bar{T}}{3M}}, \quad (0.58)$$

В цитируемой работе динамика разлёта пара рассматривается в одномерном случае, когда боковое расширение пара считается несущественным; не учитывается влияние стенок образующейся лунки.

Для определения скорости конденсации пара на структурах, расположенных на краю лунки, необходимо учитывать скорость бокового расширения потока пара. Угловую направленность $tg\psi$ движения атомов в потоке можно оценить как отношение поперечной скорости атомов, равной их среднеквадратичной скорости теплового движения в потоке, к массовой скорости потока:

$$tg\psi = v_{кв} / \bar{u}. \quad (0.59)$$

Вычисление этой величины дает значение $\psi \approx 53^\circ$. Таким образом, боковое расширение потока пара является в рассматриваемом случае существенным, образование столбиковой структуры на краю формируемой лазерным излучением лунки можно с небольшой погрешностью считать погруженными в поток пара.

Количество N молекул пара, сталкивающихся с единицей поверхности за время τ лазерного импульса, определяется уравнением [9], которое для вертикально относительно поверхности подложки стоящих столбиков можно представить в виде:

$$N = \frac{1}{4} \bar{n}_{нас} v_{кв} \tau \sin\psi, \quad (0.60)$$

где среднеквадратичная скорость атомов равна

$$v_{кв} = \sqrt{3k\bar{T} / m_0}, \quad (0.61)$$

$$\text{концентрация молекул пара} \quad \bar{n}_{\text{нас}} = \frac{\bar{p}_{\text{нас}}}{kT}, \quad (0.62)$$

k – постоянная Больцмана, m_0 – масса атома пара, T – температура пара. Учитывая (0.60), (0.61) и (0.62), найдем выражение для массы вещества, осаждающегося из пара на единицу поверхности за время импульса:

$$m_h = \frac{\bar{p}_{\text{нас}} \tau}{4} \sqrt{\frac{3M}{RT}} \sin \psi \quad (0.63)$$

Толщина осаждающегося слоя равна

$$h = \frac{m_h}{\rho} = \frac{\bar{p}_{\text{нас}} \tau}{4\rho} \sqrt{\frac{3M}{RT}} \sin \psi \quad (0.64)$$

Расчёт при интенсивности излучения $I_0 = 1 \cdot 10^{12} \text{ Вт/м}^2$ даёт значение толщины плёнки кремния, осаждающейся на поверхность структуры за один лазерный импульс: $h = 0,22 \text{ мкм}$. Можно сделать вывод о значительной роли конденсации атомов пара на формирование столбиков на поверхности.

Общая картина формирования столбиков, следующая из рассмотренных моделей, таким образом, включает образование на краях лунки выступов за счёт выдавливания расплава со стенок лунки под давлением пара, образованного при лазерном испарении расплава, и увеличение их высоты при конденсации пара. Образование столбиков происходит при многократном повторении лазерного облучения.

Самообразования микростолбиковых структур на поверхности кремниевых подложек с использованием лазерной активации процессов подтверждено экспериментально. При условиях облучения кремниевых пластин, по порядкам величин близких к расчётным, формируются столбиковые структуры высотой 8 – 10 мкм.

К итогам работы можно отнести также выяснение на качественном уровне влияния на формирование трехмерных кремниевых структур некоторых физических условий, в том числе, укорочения длительностей лазерного облучения для инициации процессов самообразования структур до наносекундного уровня, учёт некоторой прозрачности кремния к излучению, возможность формирования структур при сравнительно низких «не испарительных» интенсивностях излучения за счёт эффекта увеличения объема кремния при расплавлении, выдавливание расплава кремния действием излучения большей интенсивности, влияние конденсации пара кремния при формировании вертикальных микростолбиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михэилеску. - М.: Наука, 1988. - 537 с.
2. Арутюнян, Р.В. и др. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов. - М.: Наука, 1989. - 367с.
3. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Лазерная термохимия. Основы и применения. – М.: Центрком. 1995. - 368 с.
4. Чесноков В. В., Резникова Е.Ф., Чесноков Д. В. Лазерные наносекундные технологии: Монография / под общ. ред . Д. В. Чеснокова.- Новосибирск. СГГА. 2003. -300 с.
5. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов / В.П. Вейко. - Л.: Машиностроение, 1986. - 248с.
6. Чесноков Д. В., Чесноков В. В. Лазерное формирование наноразмерных структур [Текст] // Известия вузов. Приборостроение. - 2009. -Том52, №6. - С. 69-74.
7. Лямшев Л.М. Лазерное термооптическое возбуждение звука.- М.: Наука. 1989, -240 с.
8. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. - М.: Мир. 1986. - 504 с.
9. Анисимов С.И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит. 1970, - 272 с.
10. Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И. Температурное изменение оптических свойств жидкой фазы при наносекундном лазерном плавлении кремния и германия. Физика и техника полупроводников , №11, 1996 г.
11. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов. Справочник / П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. -Киев: Наукова Думка, 1975-704с.
12. Краткая химическая энциклопедия. Том II. - М.: Советская энциклопедия. 1963. – 1086 с.
13. Магунов А. Н. Лазерная термометрия твёрдых тел. - М.: Физматлит. 2001. - 224 с.
14. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения - Пер. с англ. Под ред. Анисимова С.И. - М.: Мир. 1974. - 470 с.
15. Cohen M. I. , Bell. Lab. Res. 45, 246 (1967).
16. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Часть 1. Поглощение лазерного излучения в веществе. Конспект лекций под ред. В.П.Вейко. - СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008. - 141 с.
17. Вейко В.П. и др. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. Под ред. чл.-кор. РАН Конова В. И. - М.: Физматлит.-2008. - 312 с.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.В. Кочкарев, 2013

ВЫСОКОДОБОРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оптотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Александра Сергеевна Сырнева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Исследуется аналитическая модель оптического резонатора бегущей волны с зеркалами полного внутреннего отражения. Показана возможность многократного увеличения числа отражений от зеркал без затухания световой волны в сравнении с резонаторами Фабри – Перо; обсуждаются пути преодоления «краевых эффектов» и конструктивные решения по компенсации угловых погрешностей изготовления резонатора.

Ключевые слова: оптический резонатор, явление полное внутреннее отражение.

HIGH Q-FACTOR OPTICAL RESONATOR OF FULL INTERNAL REFLECTION

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plahotnogo, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: gar-lic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plahotnogo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Alexandra S. Syrneva

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plahotnogo, Assistant Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

The analytical model of the optical resonator of a running wave with mirrors of full internal reflection is investigated. Possibility of repeated increase in number of reflections from mirrors without attenuation of a light wave in comparison with Fabri-Perot's resonators is shown; overcoming ways of "edge effects" and design arrangement on compensation of angular manufacturing errors of the resonator are discussed.

Key words: optical resonator, the total internal reflection phenomenon.

В работе рассматриваются вопросы создания интерференционных устройств типа оптических узкополосных фильтров, использующих среды с полным внутренним отражением в качестве не поглощающих зеркал. Основанные на таких зеркалах многолучевые интерферометры, подобные интерферометрам Фабри-Перо, рассмотрены в работах [1-3, 8]. В монографии [4] приведён подробный теоретический анализ полноотражающих фильтров, основанный на классической модели многолучевых интерферометров Фабри-Перо. Предполагалось, что отсутствие потерь в зеркальных прослойках может обеспечить высокую прозрачность фильтров и узкую спектральную полосу пропускания, однако, практических устройств такого качества создать не удалось. В работах [5-7] разработана теория, объясняющая причины малой прозрачности оптических фильтров полного отражения и основывающаяся на выявлении роли краевого резонансного дифракционного процесса, имеющего место при вводе излу-

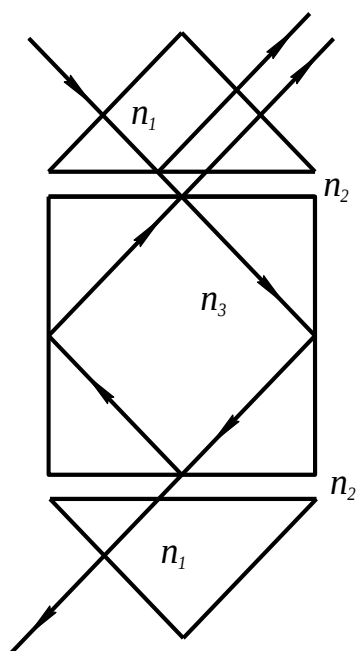


Рис. 1. Схема оптического резонатора полного внутреннего отражения

чения в слоистую структуру ограниченных размеров. При наклонном падении волн на плоско-слоистую структуру увеличение амплитуды колебаний в световой волне, распространяющейся вдоль структуры, и тем самым, увеличение прозрачности структуры, происходит постепенно, на длинах, на много порядков больших длины волны света, что требует применять структуры очень больших, до метровых, размеров [6]. В статье [9] приведены расчёты характеристик полноотражающих светофильтров терагерцового диапазона, выполненные с использованием анализа [4].

В настоящей работе, являющейся продолжением [10], предлагается резонансный элемент структуры выполнить в виде резонатора бегущей волны типа «шепчущей галереи» с замкнутой траекторией волны (рис. 1). Излучение вводится в кубический прозрачный резонатор через призмный элемент связи, расположенный от него с воздушным зазором, позволяющим волне туннелировать в кубик. Волна испытывает на гранях кубика полное внутреннее отражение, при угле преломления $\theta = \pi/4$

траектория волны замкнутая; излучение выводится из резонатора через призму ввода, а также через вторую призму, также расположенную с возможностью туннелирования волны в неё. Волны выходят из резонатора в одном и том же месте его грани; если траектория имеет замкнутый характер, то нет смещения волн, и накопление электромагнитной энергии при резонансе не требует увеличения протяжённости зеркальной структуры. Ниже показано, что устройство может иметь вполне компактные размеры и обеспечивать существенно лучшие характеристики, чем известные по литературным данным.

Если к прозрачному кубику присоединена одна призма ввода излучения, то слой с полным внутренним отражением между призмой и резонатором является одновременно входным и выходным зеркалами с нарушенным полным внутренним отражением, излучение входит в кубик и выходит из него через один и тот же полноотражающий диэлектрический слой. В результате отраженная от фильтра и пропущенная им световые волны в пространстве совпадают и направлены в одну и ту же сторону.

Амплитуда прошедшей полноотражающий слой волны равна:

$$A = \tau A_0, \quad (1)$$

амплитуда отражённой

$$A_R = r A_0, \quad (2)$$

где r - коэффициент отражения полноотражающего слоя, τ - коэффициент пропускания слоя, A_0 - амплитуда падающей на слой волны. Прошедшая волна движется в резонаторе по замкнутой траектории, испытывая на гранях резонатора полное внутреннее отражение, и, вернувшись к поверхности входа в резонатор, снова делится по амплитуде, давая отраженную внутрь резонатора и прошедшую волны. Резонатор подобен многолучевому интерферометру

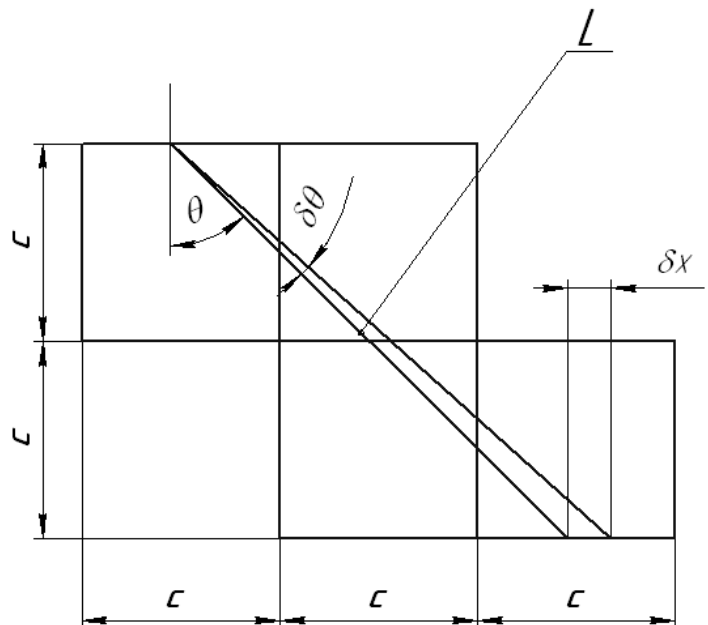


Рис. 2. Развертка хода луча в кубическом резонаторе

Фабри-Перо, у которого входное и выходное зеркала совмещены в одном слое с полным внутренним отражением; что позволяет воспользоваться методикой анализа процессов в двухзеркальном интерферометре, приведённой в [3]. Предполагаем, что элементы интерферометра не поглощают излучение. Развёртка хода луча в резонаторе показана на рисунке 2.

Прошедшая в резонатор волна совершает многократное движение по замкнутой траектории и при каждом отражении от зазора частично туннелирует через него, давая ряд пучков с убывающей амплитудой A'_4 , A''_4 , A'''_4 ..., составляющих прошедший через фильтр луч. Для результирующей амплитуды вышедшей волны можно записать

$$A_{out} = (A'_4 + A''_4 + A'''_4 + \dots) = \tau^2 e^{i\delta} A_0 (1 + r e^{i\delta} + r^2 e^{2i\delta} + \dots) \quad (3)$$

Здесь $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} L n_3$ - набег фазы световой волны за проход по замкнутой траектории (разность фаз двух выходящих друг за другом из фильтра световых волн). В набег фазы дает вклад не учитываемая здесь в связи с малостью фазовая задержка волны при полном внутреннем отражении.

Амплитуда волны, падающей изнутри на полноотражающий слой, в резонаторе также является суммой убывающих амплитуд отраженных от полноотражающего слоя и прошедших по замкнутой траектории волн:

$$A_{in} = (A'_3 + A''_3 + A'''_3 + \dots) = \tau e^{i\delta} A_0 (1 + r e^{i\delta} + r^2 e^{2i\delta} + \dots) \quad (4)$$

Отношение результирующих амплитуд волны в резонаторе и результирующей волны, вышедшей из резонатора, равно:

$$A_{in} / A_{out} = 1 / \tau. \quad (5)$$

Отношение интенсивностей излучения в резонаторе и вышедшего получим в виде:

$$I_{in} / I_{out} = (A_{in} / A_{out})^2 = (1 / \tau)^2 = 1 / D \quad (6)$$

Здесь D - энергетический коэффициент пропускания полноотражающего слоя.

Учитывая (3) и отбрасывая не существенный постоянный фазовый множитель $e^{i\delta}$, найдём коэффициент пропускания по амплитуде фильтра с резонатором:

$$\tau_0 = A_{out} / A_0 = \tau^2 (1 + r e^{i\delta} + r^2 e^{2i\delta} + \dots) \quad (7)$$

Выражение в круглых скобках является бесконечной убывающей геометрической прогрессией со знаменателем $q = r e^{i\delta}$. Пользуясь формулой

$$\sum_{n=0}^{\infty} q^n = \frac{1}{1-q} \quad (8)$$

находим

$$\tau_0 = A_{out} / A_0 = \frac{\tau^2}{1 - r e^{i\delta}} \quad (9)$$

Пропускание фильтра по интенсивности $D_f(\delta) = [A_f / A_0]^2$ определяется формулой [3]:

$$D_f(\delta) = |A_{out} / A_0|^2 = \frac{\tau^4}{|1 - re^{i\delta}|^2} = \frac{\tau^4}{1 + r^2 - 2r \cos \delta} = \frac{\tau^4}{(1-r)^2 + 4r \sin^2 \frac{\delta}{2}} = \frac{D_{la}^2}{(1 - \sqrt{R_{la}})^2 + 4\sqrt{R_{la}} \sin^2 \frac{\delta}{2}}. \quad (10)$$

Здесь $D_f(\delta)$ - пропускание фильтра (пропускание по интенсивности волны 1, падающей на зазор со стороны призмы и вышедшей по направлению волны 4), D_{la} , R_{la} - пропускание и отражение по интенсивности полноотражающего слоя.

Пропускание и отражение тонкого слоя в условиях полного внутреннего отражения рассмотрено в работе [1]. Пропускание и отражение света для различных поляризаций при наклонном падении света различно и при достаточно толстом полноотражающем слое t ($t|\cos \theta_2| \geq \lambda / n_2$) для s -поляризации и при отсутствии поглощения определяется формулами:

$$R^s = 1 - 16 \frac{n_1^2 n_2^2 \cos^2 \theta_1 |\cos \theta_2|^2}{(n_1^2 - n_2^2)^2} e^{-\varepsilon} \quad (11)$$

$$D^s = 16 \frac{n_1^2 n_2^2 \cos^2 \theta_1 |\cos \theta_2|^2}{(n_1^2 - n_2^2)^2} e^{-\varepsilon} \quad (12)$$

Здесь

$$\varepsilon = \frac{4\pi}{\lambda} t n_2 |\cos \theta_2|, \quad (13)$$

$$\cos \theta_2 = i |\cos \theta_2| = -\sqrt{1 - \frac{n_1}{n_2} \sin^2 \theta_1}, \quad (14)$$

θ_1 и θ_2 - угол падения волны на полноотражающий слой и угол преломления в этом слое (последний имеет мнимое значение), n_1 и n_2 - показатели преломления призмы и полноотражающего слоя ($n_1 > n_2$).

Для исследования световых волн, пропускаемых оптическим фильтром с резонатором, используется дополнительный элемент оптической связи, который может быть размещён на другой грани кубика. Однако, призма ввода излучения в приведённой на рис.1 конфигурации устройства при этом не теряет функцию вывода, что уменьшает накапливаемую в резонаторе световую энергию.

Проделанные аналогичные представленным выше вычисления показали подобие формул для пропускания фильтра с выводом излучения и через первую

призму – элемент вывода излучения из резонатора, и через вторую призму. На рис. 3 показан график спектра пропускания кубического резонатора

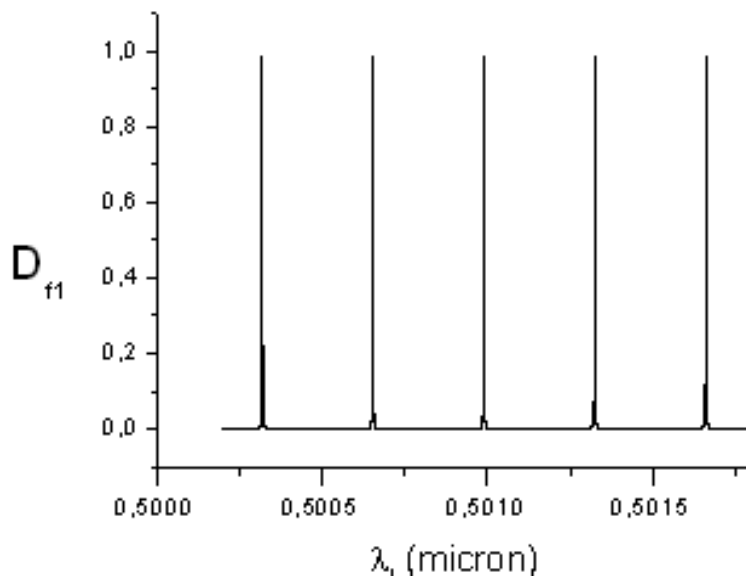


Рис. 3. Спектр пропускания кубического резонатора

Распространение световой волны в резонаторе квадратного сечения подобно распространению звука в «шепчущей галерее», волна последовательно обегает все грани резонатора. Такая траектория волны является неустойчивой, так как случайное изменение угла приводит к тому, что траектория перестаёт быть замкнутой, и место падения луча на грань кубика с каждым циклом траектории смещается к ребру кубика,

при этом нарушаются условия полного внутреннего отражения, волна излучается в окружающее пространство.

Пока место падения световой волны находится в пределах грани кубика, по аналогии с интерферометром Фабри – Перо [3] ширину полосы пропускания резонатора можно представить в виде:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2N_{эф}Ln} \quad (15)$$

Двигаясь по траектории, волна не затухает (вследствие отсутствия поглощения), и коэффициент пропускания фильтра в максимуме пропускания должен быть равен единице. Однако вследствие «краевого эффекта» [5 - 7], который заключается, в нашем случае, в уходе волны из резонатора после конечного числа проходов траектории вследствие неидеальной геометрической формы резонатора и эффектов дифракции световой волны при отражениях и преломлениях на гранях волна затухает, число эффективных отражений волны от зеркальных слоёв ограничено. В применении к резонатору эффективным числом отражений $N_{эф}$ можно считать число замкнутых траекторий, которое совершит световая волна до смещения места её падения на ребро кубика. За один оборот по траектории место падения луча на грань сместится на χL , где $\chi = 10^{-5} - 10^{-4}$ рад - оценочное значение суммарного отклонения плоскостей граней кубика от математически точного положения. Если пренебречь шириной фронта световой волны и принять, что место её входа в кубик расположено на

одном краю грани и по мере обегания волной резонатора смещается к другому краю, можно получить:

$$N_{эф} = \frac{c}{2\chi L} \approx \frac{1}{5,656\chi} = 1,8 \cdot 10^3 - 1,8 \cdot 10^4, \quad (16)$$

что позволяет вычислить эффективный коэффициент отражения граней кубика за один проход волны по траектории, граничащей с призмой:

$$R_{эф} \approx 1 - \frac{\pi}{N_{эф}} = 0,998 - 0,9998 \quad (17)$$

Если расходимость падающей на фильтр световой волны дифракционная, угол расходимости можно оценить по формуле:

$$\alpha_D \approx \lambda / a \quad (18)$$

где a - начальный поперечник падающего светового пучка. Для оценок примем, что «утечка» волны произошла, когда её поперечник в ходе многократного обегания резонатора сравнялся вследствие расходимости с размером грани резонатора:

$$c = \alpha_D N'_{эф} L = \lambda N'_{эф} L / a. \quad (19)$$

Здесь $N'_{эф}$ - эффективное число траекторий волны, которые она прошла к моменту завершения утечки. Учитывая, что при угле преломления падающей волны $\theta = \pi / 4$ отношение $L / c = 2,828$, и преобразуя (19), получим:

$$N'_{эф} = \frac{ca}{\lambda L} = \frac{a}{2,828\lambda}. \quad (20)$$

Принимая $\lambda = 0,5$ мкм, $a = 5$ мм, получим $N'_{эф} \approx 3,5 \cdot 10^3$.

При нахождении свободной спектральной области кубика следует учесть, что отличие в фазе последующей волны от предыдущей определяется только оптической длиной замкнутой траектории волны в кубике и не включает, как это имеет место в многолучевом двухзеркальном интерферометре при наклонном падении волны на интерферометр, отрезков пути вне пластины интерферометра; в этом особенность эффекта «шепчущей галереи» в кубике. Для кубика величина свободой спектральной области равна:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (21)$$

Уравнение максимумов интерференции проходящего кубик монохроматического излучения имеет вид:

$$2L(\theta)n = m\lambda. \quad (22)$$

При использовании падающего на интерферометр расходящегося лазерного излучения малое изменение угла преломления $\delta\theta$ приведёт к возникновению максимума на длине волны $\lambda + \delta'\lambda$:

$$2L(\theta + \delta\theta)n = m\lambda(\lambda + \delta'\lambda) \quad (23)$$

где

$$L(\theta + \delta\theta) = L + \delta L = \frac{2c}{\cos(\theta + \delta\theta)}. \quad (24)$$

Здесь δL - изменение длины траектории волны в резонаторе вследствие изменения $\delta\theta$ угла преломления волны (рисунок 2).

Преобразуем полученное уравнение:

$$L + \delta L = \frac{2c}{\cos\theta \cos\delta\theta - \sin\theta \sin\delta\theta}$$

Здесь при $\theta \approx \pi/4$ $\cos\theta \approx \sin\theta$, поэтому

$$L + \delta L = \frac{2c}{\cos\theta(\cos\delta\theta - \sin\delta\theta)} \approx \frac{2c}{\cos\theta(1 - \delta\theta)} \approx \frac{2c(1 + \delta\theta)}{\cos\theta}.$$

учитывая, что $L = 2c / \cos\theta$, получим:

$$\delta L \approx \frac{2c\delta\theta}{\cos\theta} \quad (25)$$

Учитывая (22), (23) и (24), можно найти:

$$\delta\theta = \delta'\lambda / \lambda \quad (26)$$

Подставим в полученное уравнение вместо $\delta'\lambda$ величину свободной спектральной области кубика (21):

$$\delta\theta_m = \Delta\lambda / \lambda = \frac{\lambda}{2nL} \quad (27)$$

Здесь $\delta\theta_m$ - угловое расстояние между направлениями внутри кубика на соседние максимумы интерференции монохроматического излучения, иначе

говоря, угловая величина порядка интерференции. Угловая величина ϕ_m порядка интерференции в вышедшем на воздух из кубика излучении равна:

$$\phi_m = n\delta\theta_m = \frac{\lambda}{2L} \quad (28)$$

Расстояние между интерференционными полосами в фокальной плоскости линзы на рис. 2 равно:

$$x_m = \phi_m f = \frac{\lambda f}{2L} \quad (29)$$

Данные таблицы 1 показывают очень малое значение линейных величин порядка интерференции x_m и полосы пропускания δx фильтра, сложность их прямого измерения.

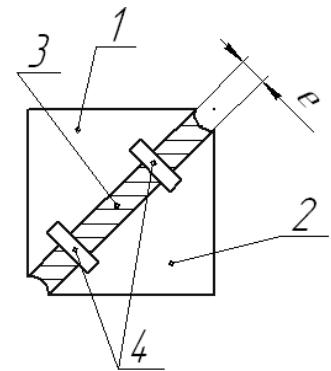


Рис. 4. Схема пьезоэлектрической компенсации суммарных угловых погрешностей положения зеркал в кубическом резонаторе

Таблица 1

Параметры оптического фильтра в виде кубического резонатора

L мм	λ мкм	f , мм	n	$N_{эф}$	$\delta\lambda_{las}$, нм	$\Delta\lambda$, нм	$\delta\lambda$, нм	δx мкм	ϕ_m , рад	x_m , мкм
28,28	0,5	50	1,5	$3,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$		$8,8 \cdot 10^{-6}$	0,45

Рассмотрим требования, накладываемые на точность изготовления кубического резонатора. Использование резонатора в качестве узкополосного фильтра предполагает настройку интерферометра на интерференционную полосу бесконечной ширины, погрешности изготовления приведут к уменьшению интенсивности проходящего света. Допустимое отклонение от параллельности зеркал двухзеркального многолучевого интерферометра определяется формулой [8]:

$$\frac{\Delta h}{\lambda} \leq \frac{1}{2N_{эф}} \quad (30)$$

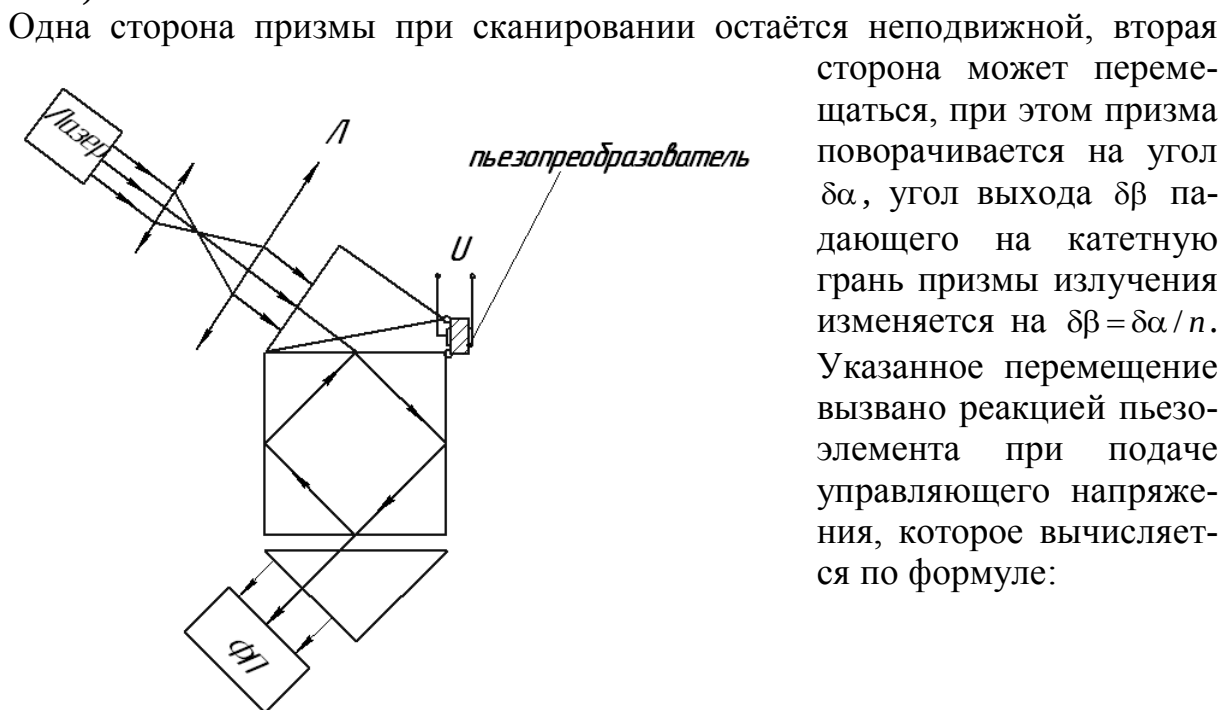
где $1/(2N_{эф})$ имеет смысл изменения порядка интерференции на 0,5 вследствие погрешности изготовления одного зеркала. В случае кубического резонатора формула (30) также применима. Если погрешность сводится к не параллельности зеркал, то в случае кубического резонатора под величиной $\Delta h / \lambda$ необходимо понимать результат суммарного воздействия на световую волну погрешностей всех зеркал резонатора с учётом знаков погрешностей. Подсчёт требуемой точности для кубического резонатора при использовании данных таблицы 1 иллюстрирует сложности его изготовления.

На рис. 4 показана конструкция кубического резонатора с возможностью пьезоэлектрической компенсации суммарной угловой погрешности положения зеркал. На этом рисунке 1 и 2 - прозрачные призмы, образующие кубический резонатор, 3 - слой иммерсионной жидкости толщиной e между диагональными гранями призм, 4 – пьезоэлементы. Пьезоэлементы имеют индивидуальное управление и позволяют изменять угловое расположение граней в произвольных направлениях. Наличие между диагональными гранями иммерсионной жидкости практически исключает влияние зазора на ход световой волны в резонаторе и позволяет юстировать резонатор, добиваясь компенсации угловых погрешностей расположения внешних граней резонатора.

Рассматриваемый метод компенсации ошибок в значениях углов между гранями резонатора не позволяет исправлять влияние локальных неровностей поверхностей граней, поэтому технология для реализации полных возможностей кубического резонатора должна обеспечивать высокую плоскостность граней, до тысячных - сотых долей длины волны.

Ниже рассматривается методика измерения спектральных параметров фильтра в виде кубика путём сканирования фильтром излучения узкополосного непрерывного гелий-неонового лазера.

Сканирование излучения лазера производится путём пьезоэлектрического управления положением призмы ввода излучения, закреплённой на грани кубика (рис. 5).



Одна сторона призмы при сканировании остаётся неподвижной, вторая сторона может перемещаться, при этом призма поворачивается на угол $\delta\alpha$, угол выхода $\delta\beta$ падающего на катетную грань призмы излучения изменяется на $\delta\beta = \delta\alpha / n$. Указанное перемещение вызвано реакцией пьезоэлемента при подаче управляющего напряжения, которое вычисляется по формуле:

Рис. 5. Оптическая схема измерения спектральной полосы пропускания кубического резонатора

Здесь d_{31} - значение пьезомодуля, U - управ-

ляющее напряжение, $\frac{l}{d}$ - отношение длины пьезопреобразователя к его толщине. Уравнение для определения изменения угла преломления волны в призме можно найти в виде:

$$\delta\beta = \frac{h}{nc} = \frac{d_{31}Ul}{ncd} \quad (32)$$

Вычисления показывают, что при $\frac{l}{d}=10$, $d_{31}=10^{-10}$ Кл/Н для изменения угла падения $\delta\beta n$ излучения на величину углового значения интерференционного порядка в кубике необходимо управляющее напряжение $U \approx 100$ В.

Как представляется авторам, рассматриваемый оптический резонатор может быть применен и в качестве резонаторов лазерных излучателей, так как отсутствие потерь в зеркалах резонаторов позволит увеличить выводимую через зеркала мощность генерируемого излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий / Г.В Розенберг. – М.: Физ.-мат.лит. 1958. -570 с.
- 2.Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Гл. ред. физ-мат. лит., Наука, 1970. - 855 с.
- 3.Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: Учебник – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
4. Кард, П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок / П.Г. Кард. – Таллин.: Валгус, 1971. – 233 с.
5. Иогансен Л. В. Резонансная дифракция волн в слоисто-неоднородных средах. ЖЭТФ, т. 40, вып.6, 1961.
6. Иогансен Л. В. Теория резонансных электромагнитных систем с полным внутренним отражением. Т. XXXI. Вып.4, 1962.
7. Иогансен Л. В., Ю.В. Глобенко. Теория резонансных слоисто-неоднородных систем электромагнитных систем с полным внутренним отражением. Известия вузов. Радиофизика. Т. XIX, №2, 1976.
- 8.Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. - М.: Машиностроение. 1989, - 256 с.
9. Сырнева А.С. Краевой эффект в фильтрах терагерцового диапазона, использующих нарушенное полное внутреннее отражение / А.С. Сырнева. // Сб. матер. III Междунар. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010».– Новосибирск, 2010 – Т.4., ч.1. – С.214-220.
10. Чесноков, В.В. Оптические резонаторы полного внутреннего отражения с бегущей волной. /В.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.В. Чесноков. // Сб. матер. III Междунар. конгр.– Новосибирск, 2011 – Т.4., ч.1. – С.130-133

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, 2013

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЛАЗЕРНОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЁНОК НА НИКЕЛЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Евгений Владимирович Лаптев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, профессор кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий кафедрой наносистем и оптотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Денис Вячеславович Кочкарёв

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры Физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

В статье рассмотрен процесс формирования углеродных плёнок методом лазерного пиролитического осаждения. Описана лабораторная установка по получению углеродных монокристаллических плёнок. Приведены технические характеристики её компонентов. Представлены результаты предварительных экспериментов по осаждению углеродных плёнок.

Ключевые слова: углеродные плёнки, пиролиз, лазерное химическое парофазное осаждение.

THE DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF LASER PYROLITIC DEPOSITION OF CARBON FILMS ON NICKEL SUBSTRATES

Evgeniy V. Laptev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer Department of Nanosystems and optical technic , tel. (383) 361-08-36, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., professor Department of Phisic , tel. (383) 361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitriy V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Head of Department of Nanosystems and optical technic , tel. (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer Department of Phisic, tel. (383) 361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

In article the process of formation of carbon films by method of laser pyrolytic deposition is considered. Laser laboratory equipment of carbon monolayer films is manufacturing. Technical characteristics of its components are given. Results of preliminary experiments on deposition of carbon films are presented.

Key words: carbon films, pyrolysis, laser chemical vapor deposition.

Развития науки и техники ведёт к необходимости создания новейших приборов и устройств с уникальными характеристиками. Перспективным считается создание наноразмерных функциональных элементов, обладающих исключительными свойствами. В данной работе представлена методика получения моноатомных углеродных плёнок, обладающих рядом уникальных свойств.

Известен [2, 3, 5, 7, 8] способ получения углеродных плёнок методом химического парофазного осаждения (CVD). В работе [3] представлена методика получения алмазных плёнок методом CVD с использованием электродного СВЧ – разряда.

Основной недостаток известных работ - невозможность получения моноатомных слоёв углерода заданных размеров в определённом месте. Поэтому применение методов лазерного формирования может оказаться весьма перспективным, так как позволяет локализовать процессы осаждения углеродных плёнок во времени и пространстве.

Ранее авторами [2] был выполнен ряд работ по разработке и исследованию одностадийной лазерной технологии формирования топологических рисунков из графена методом лазерного химического парофазного осаждения (LCVD).

Целью данной работы является разработка методики лазерного пиролитического осаждения углеродных плёнок [1].

Для проведения экспериментов была спроектирована лабораторная установка по получению углеродных и графеновых моноатомных плёнок [4,6] на поверхности металлических плёнок методом LCVD, которая показана на рис. 1.

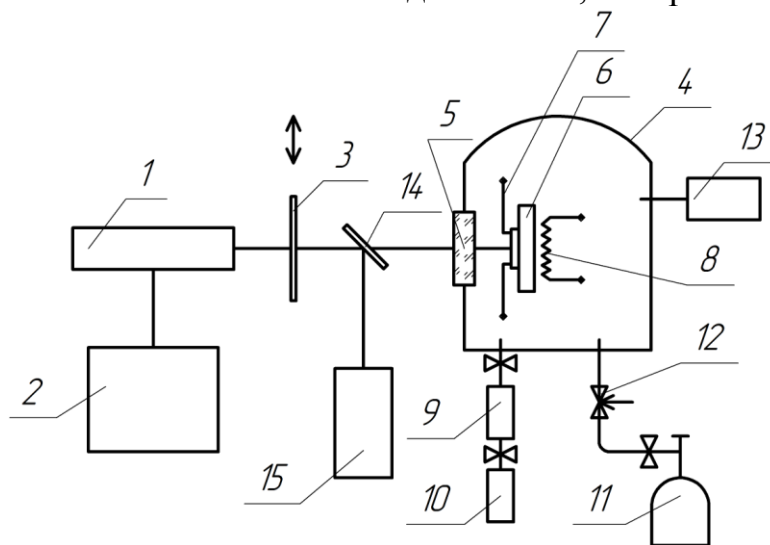


Рис. 1. Упрощенная схема конструкции лабораторной установки получения углеродных плёнок методом лазерного пиролитического осаждения

На рисунке: 1 – лазерный излучатель, 2 – блок питания и охлаждения излучателя, 3 – светофильтр, 4 – вакуумная откачиваемая камера, 5 – прозрачное входное окно, 6 – подложка с металлической плёнкой, 7 – контакты к металлической плёнке на подложке, 8 – нагреватель подложки, 9 – диффузионный паромасляный насос, 10 – форвакуумный насос, 11 – баллон с углеводородным газом, 12 – регулируемый натекатель, 13 – вакуумметр, 14 – прозрачное зеркало, 15 – измеритель лазерной мощности.

Описание исследовательского стенда. В качестве излучателя был выбран импульсный неодимовый твердотельный лазер ЛТИ–501, работающий на длине волны 1064,1 нм. Основные параметры излучателя: средняя мощность излучения 8 Вт, частота импульсов (5–50) кГц, длительность импульсов (0,2–0,4) мкс, диаметр пучка излучения 1,5 мм, мощность излучения в импульсе до (4–8) кВт, режим работы одномодовый.

Вакуумная камера установки откачивалась вакуумной системой, состоящей из диффузионного паромасляного и форвакуумного насосов; предельный вакуум до 10^{-6} мм рт. ст. В установку с помощью регулируемого натекателя 12 вводился газообразный углеводород из баллона 11.

В камере была установлена подложка 6 с нанесённой металлической плёнкой, подложка может нагреваться встроенным в установку нагревателем 8 до температуры порядка (100–500) °С.

Проведение экспериментов. В качестве газообразного углеводорода использовался пропан C_4H_{10} , содержащийся в баллонах. Облучаемыми образцами являются стеклянные пластинки в виде квадрата со стороной 15 мм, покрытые с одной стороны плёнкой никеля вакуумным напылением из электронно-лучевого испарителя; толщина плёнки никеля приблизительно 0,1 мкм. При экспериментах газ напускался через натекатель (см. рисунок 1) в рабочий объём до атмосферного давления, облучался через прозрачное окно вакуумной камеры несфокусированным излучением неодимового лазера при длительности импульсов излучения 600 нс и частоте следования импульсов 3,6 кГц; поперечник области облучения приблизительно 1 мм. Температура поверхности никелевой плёнки в момент импульса увеличивалась, по оценкам, до значения не менее 1500 °С (никель плавится при 1455 °С, температура расплавления эвтектики никель – углерод 1318 °С). Форма лазерного импульса наблюдалась на экране цифрового осциллографа Tektonix, в качестве фотоприёмника использовался фотодиод ФД–256, установленный в потоке излучения позади глухого зеркала резонатора лазерного излучателя. Входное сопротивление осциллографа шунтировалось резистором с сопротивлением 20 Ом.

На поверхности никеля в области облучения при времени облучения 30 с появлялись плёночные отложения; оптические фотографии получающихся структур показаны на рисунке 2. На фотографиях представлены различные участки поверхности с поперечником каждый порядка 200 мкм. Получившиеся структуры имеют осевую симметрию, с центром симметрии совпадает центр фокального пятна лазерного излучения, в котором импульсная температура поверхности наибольшая. С удалением от центра импульсная температура спада-

ла; образующиеся цветные кольцевые зоны на поверхности соответствуют линиям равных температур поверхности подложки. На всех структурах видны мелкие капли диаметром порядка 1 мкм расплава никеля или эвтектики; центральное пятно имеет серый оттенок, соответствует области эрозии никелевой плёнки. Причины появления окраса кольцевых зон требует расшифровки и проведения дополнительных химических экспериментов по определению точного состава плёночного осаждения. По оценкам авторов, кольцевые зоны характеризуют распределение по поверхности углерода, выделившегося при пиролитическом разложении пропана; наибольшая толщина слоя углерода во второй от центрального пятна кольцевой зоне, которая имеет чёрный цвет; цвета остальных зон интерференционные, что свидетельствует об оптических толщинах слоёв осадка порядка долей длины волны света, в котором структуры фотографировались, а также о прозрачности слоёв углерода. Последнее может свидетельствовать об углероде в алмазоподобной фазе.

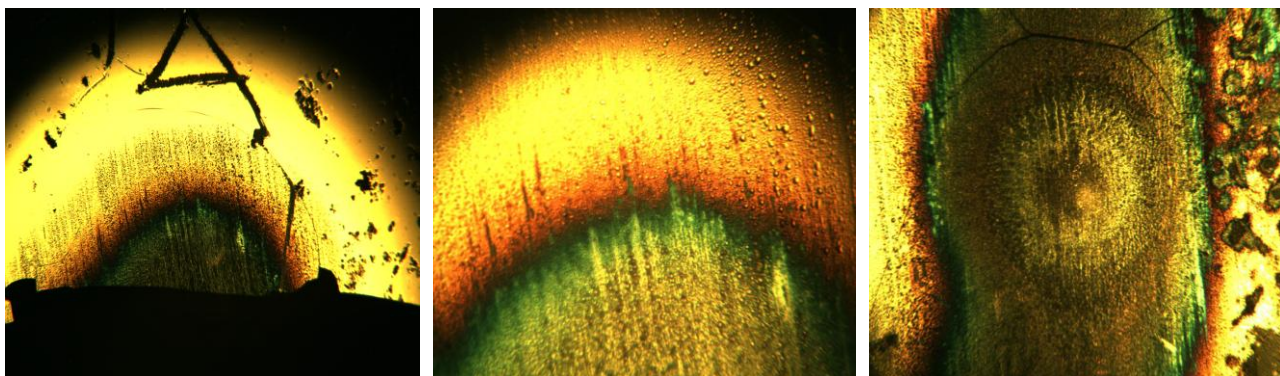


Рис. 2. Микрофотографии участков пленочного осадка

Заключение. Разработан исследовательский стенд для получения монокристаллических плёнок углерода на поверхности подложки лазерно-пиролизическим разложением адсорбированного слоя молекул углеводородов. Показано, что для получения равномерных на большой площади подложки слоёв углерода при наносекундной длительности лазерных импульсов необходимо процесс вести при повышенных значениях парциального давления углеводорода.

Данная работа является частью НИР, которая выполнялась в рамках Государственного контракта № 16.740.11.0660 при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учёными кандидатами наук».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков, В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков; под общ. ред. Д. В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 300 с.
2. Поиск путей лазерного формирования топологического рисунка из графена: Отчёт о НИР (промежут.) / Сиб. гос. геодез. акад.; рук. Шергин С.Л. ; исполн. Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Кочкарев Д.В., Кузнецов М.В., Лаптев Е.В. – Новосибирск, 2011. – 26 с. – ГР 012011.72850. – Инв. №
3. Кирпичников, А.А. «Химическое осаждение алмазных пленок с использованием электродного СВЧ – разряда» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://bio.fizteh.ru/student/mipt_conference/conference_arhiv/conference2005/conf_programm/conf_prog_noneqsys/Kirpichnikov.pdf
4. Ролдугин, В.И. Физикохимия поверхности: Учебник-монография / В.И. Ролдугин. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.
5. Киреев, В.Ю. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы / В.Ю. Киреев, А.А. Столяров – М.: Техносфера, 2006. – 192 с.
6. Novoselov, K. S. et al. «Two-dimensional atomic crystals», PNAS 102, 10451 (2005)
7. May P.W., Diamond thin films: a 21st-century material, – Bristol: University of Bristol, United Kingdom, Chem. Soc. Rev., 2000. – 473-495 с.
8. Ashfold, M. N. R. Thin Film Diamond by Chemical Vapour Deposition Methods / P. W. May, C. A. Rego. – Bristol: University of Bristol, United Kingdom, Chem. Soc. Rev., 1994. – 21-30 с.

© Е.В. Лаптев, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.В. Кочкарев, 2013

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ МИКРОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ

Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лавретьева, 1, доктор физико-математических наук, зав. отделом, тел: +7 (383) 3307121, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

В статье рассмотрены теплофизические проблемы разработки микрожидкостных охладителей лазерных систем и электронного оборудования, микропарогенераторов и МЭМС на основе пузырькового распада метастабильной жидкости. Представлены методы расчета теплообмена при кипении в микроканалах, взрывного кипения микрообъемов жидкости в условиях высокой внешней плотности энергии.

Ключевые слова: микрожидкостная система, микроканал, микроохладитель, МЭМС, кипение, взрывное кипение, метастабильная жидкость.

THERMOPHYSICAL PROBLEMS IN MICROFLUIDIC SYSTEMS DESIGN

Vladimir V. Kuznetsov

Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Akademika Lavrentjeva, 1, Dr. of Science, Head of Department, tel. 8-9137111007, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

The paper describes thermophysical problems in design of microfluidic cooler of laser systems and electronic equipment, microevaporators and MEMS-based on bubble decomposition of metastable liquid. The methods for prediction of flow boiling heat transfer in micro-channels and explosive boiling of liquid microvolumes at high ambient energy density are presented.

Key words: microfluidic system, microchannel, microcooler, MEMS, boiling, explosive boiling, metastable liquid.

1. Введение

Микрожидкостные системы являются важнейшей областью приложения микросистемной технологии. Микрожидкостная система представляет собой миниатюрное устройство, предназначенное для проведения различных химических и физических процессов с малыми объемами жидких реагентов. При этом типичные размеры элементов микрожидкостной системы составляют от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, а типичные потоки жидкости – от нескольких микролитров до десятков миллилитров в минуту.

Исследования процессов тепломассообмена в микрожидкостных системах с фазовыми превращениями бурно развиваются в последнее время. Это связано с ростом технологических приложений, которые требуют передачи больших потоков энергии в ограниченном объеме, например в системах охлаждения лазерных систем и микропроцессоров, МЭМС на основе управляемого распада микрообъемов жидкости, к которым относятся оптические переключатели и затворы, метатели капель в технологии струйной печати. Методы расчета тепло-

массообменных процессов в микрожидкостных системах при фазовых превращениях рассмотрены в данной работе.

2. Теплообмен при кипении движущейся жидкости в микрожидкостных системах

Рассмотрим процессы тепломассообмена при кипении в микрожидкостных охлаждающих системах и микропарогенераторах. При кипении движущейся жидкости в микроканалах отрывной диаметр пузыря может быть меньше поперечного размера канала, что имеет решающее влияние на теплообмен. Другой важной особенностью течения в микроканалах является появление новых режимов течения, к которым относится течение с удлиненными пузырями снарядами и кольцевое течение с волнами на короткой стороне канала.

Механизмы кипения движущейся жидкости в микроканалах рассмотрены в [1]. Получено, что кипение в микроканалах происходит под значительным влиянием капиллярных сил и большой развитости поверхности, что приводит к чрезвычайно тонким пленкам жидкости. Наиболее важными особенностями кипения в микроканалах является интенсификация кипения движущейся жидкости в стесненных условиях и подавление пузырькового кипения в сверхтонких пленках жидкости. Эти явления не имеют места в трубах большого диаметра. Тем не менее, модель для расчета теплоотдачи при кипении движущейся жидкости в трубах, например предложенная в [2], может быть модифицирована для применения в микроканалах. В этой модели коэффициент теплоотдачи при кипении движущейся жидкости рассчитывается как суперпозиция пузырькового кипения и вынужденной конвекции. В [1] было предложен учет интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении для малых чисел Вебера в виде фактора развития кипения:

$$\Psi_{dev} = 1 + 1.2 / \exp(0.8 \cdot We_{all\_liq}^{0.35}). \quad (1)$$

Число Вебера в (1) определяется через минимальный размер канала и расход жидкости на входе. Вместе с тем, данные [3] показывают, что повышение теплоотдачи при малых числах Вебера происходит и в случае доминирования вынужденной конвекции. С учетом этого, применим фактор (1), как множитель, к обоим слагаемым модели расчета коэффициента теплоотдачи. При расчете коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции в ламинарной области необходим учет геометрии канала, тепловых граничных условий и теплового начального участка. Важным является также правильный выбор модели пузырькового кипения в (2). Модель кипения должна учитывать шероховатость, теплофизические свойства поверхности и кипящей жидкости.

Для кольцевого течения в микроканальном теплообменнике толщина пленки жидкости может быть сравнима с диаметром критического зародыша, что вызывает подавление пузырькового кипения. Для учета подавления кипения используем фактор подавления кипения в сверхтонких пленках Ψ_{sup} [1], как

помножающий коэффициент для теплоотдачи при пузырьковом кипении, в следующем виде:

$$h^2 = (\Psi_{dev} F h_{cliq})^2 + (\Psi_{sup} \Psi_{dev} S h_{nb})^2. \quad (2)$$

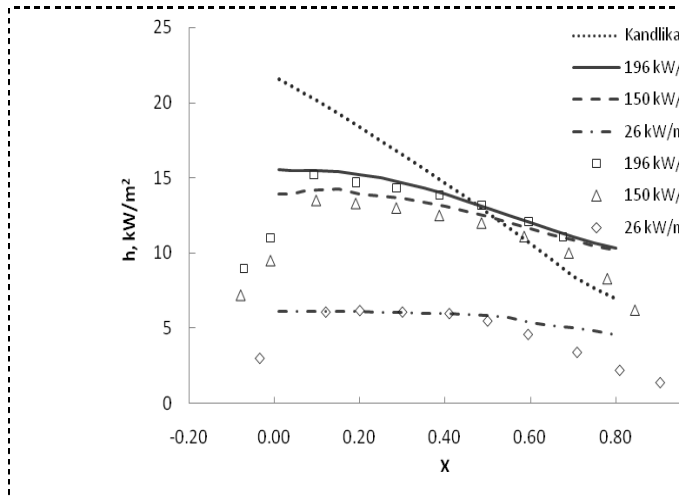


Рис. 1. Влияние паросодержания на коэффициент теплоотдачи. Точки – данные [4], линии – расчет по (2)

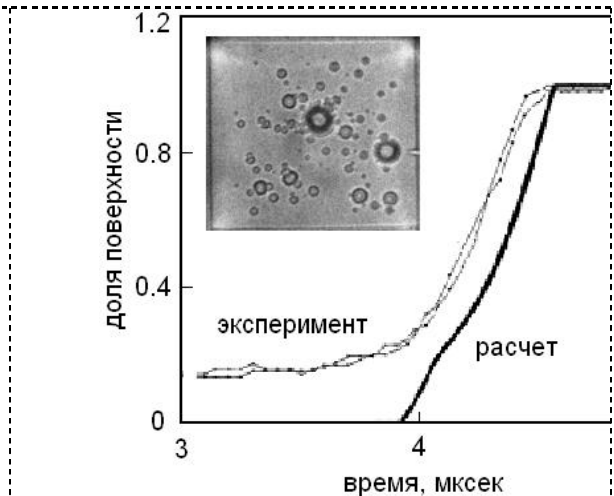


Рис. 2. Изменение во времени доли поверхности, покрытой пузырьками

где $F = [1 + x \text{Pr}_{liq} (\rho_{liq} / \rho_{gas} - 1)]^{0.35}$, $S = (1 + 0.55 F^{0.1} \text{Re}_{liq0}^{0.16})^{-1}$, $\Psi_{sup} = \tanh^2(2.5 \cdot 10^{-3} \theta_{sup}^2)$, $\theta_{sup} = (y_{vis} / d_{tan})^{0.6} / (Bo_x^{0.4} We_{liq}^{-0.08} \text{Pr}^{1/3})$, $y_{vis} = 5 \nu_{liq} / \sqrt{\tau_w / \rho_{liq}}$, Bo_x - число кипения, определенное через приведенную скорость жидкости при паросодержании X , d_{tan} - диаметр активного зародыша при кипении, рассчитанный по уравнению $d_{tan} = \sqrt{8 \sigma T_{sat} (\rho_f - \rho_g) \lambda_f / \rho_g \rho_f h_{fg} q_w}$. Для расчета напряжения трения τ_w используем модель [5] без учета уноса жидкости.

На рисунке 1 показано влияние равновесного паросодержания на коэффициент теплоотдачи при кипении хладона R-134a в микроканальном теплообменнике. Символами показаны экспериментальные данные [4], сплошными линиями показаны расчеты по уравнению (2), пунктирная линия показывает расчет по модели [6]. Экспериментальные данные были получены для микроканального теплообменника с каналами мкм при тепловом потоке 196 кВт/м² ($G = 334 \text{ kg/m}^2\text{s}$), 150 кВт/м² ($G = 250 \text{ kg/m}^2\text{s}$) и 26 кВт/м² ($G = 42 \text{ kg/m}^2\text{s}$). Как видно, в широкой области тепловых потоков и массовых расходов предложенная модель хорошо соответствует экспериментальным данным, исключая паросодержание больше 0,7. В этой области необходим более полный анализ подавления вынужденной конвекции с учетом сухих пятен на стенках канала.

3. Взрывное кипение микрообъемов жидкости в камерах МЭМС

МЭМС на основе управляемого распада жидкости используют сверхбыстрый нагрев и фазовый переход жидкость-пар на резистивных микронагревате-

лях. Критерием перехода к фазовому взрыву жидкости является достижение температуры жидкости термодинамической спинодали, близкой к $0.9 T_c$. Проблемой достижение этой температуры является экспоненциальный рост тепловых флуктуаций и уменьшение времени ожидания вскипания вблизи спинодали, которая была решена при использовании микрожидкостных систем.

Пузырьковый распад воды и спиртов при импульсном нагреве был исследован в [7] для плоского микронагревателя, покрытого субмикронным карбидокремниевым слоем. В другой серии опытов был использован микронагреватель с внешним танталовым наноструктурным слоем. Нагреватель с площадью $100 \times 110 \text{ мкм}^2$ представляет собой четырехслойную или пятислойную пленку, последовательно нанесенную методом PECVD на плоской подложке из стекла. Был установлен волновой механизм фазового взрыва неравновесной системы, обусловленный взаимосвязью гидродинамических, тепловых и акустических явлений при интенсивном фазовом переходе. Характеристики наноструктурной поверхности определяли температуру инициации кипения, что показывает важность учета гетерогенного механизма зародышеобразования.

Рассмотрим самосогласованное зародышеобразование и рост пузырей в поле волны давления, возникающей при распаде жидкости на гладкой и наноструктурной поверхности. Частота появления зародышей паровой фазы по модели гомогенного зародышеобразования [8] определяется как:

$$J = N_1 B \exp(-W_*/kT), \quad W_* = 16\pi\sigma^3 / 3(P_s - P_l)^2 (1 - \rho_{gas} / \rho_{liq}) \quad (3)$$

где N_1 – число молекул в единице объема, B – кинетический коэффициент, учитывающий динамику роста парового пузырька, P_l – давление жидкости. Полное число пузырьков, возникших к моменту времени τ , определяется интегралом, где учтен гетерогенный и гомогенный механизм зародышеобразования:

$$n(\tau) = S_0 \int_0^\tau dt (1 - s_v(t)) \{ J_{het}(T_w(t), P_l) + \int_0^\infty dz J(T_l(t, z), P_l) \} \quad (4)$$

Здесь S_0 – площадь поверхности нагревателя, и $s_v(t)$ – занятая паровыми пузырьками доля поверхности, исключаемая для зародышеобразования. Подобным образом определяется $s_v(\tau)$ и полный объем пара в момент τ .

Зародышеобразование в окрестности плоского нагревателя приводит к увеличению давления из-за инерции окружающей нагреватель жидкости. Среднее давление на нагревателе можно определить, используя расчет акустического излучения при ускоренном движении фиктивного поршня в сжимаемой жидкости с диаметром, соответствующим площади нагревателя. С учетом уравнения для роста пузырька, это дает самосогласованную теорию пузырькового распада жидкости. Рост пузырей в окрестности спинодали рассмотрен с учетом сжимаемости жидкости и неоднородности поля температуры, учтен механизм подвода тепла от окружающей жидкости и через микрослой, в том числе при образовании сухих пятен при высокой внешней плотности энергии.

Температура жидкости определялась решением задачи теплопроводности для многослойного нагревателя с учётом тепла, идущего на парообразование.

В рамках данной модели проведено численное исследование пузырькового распада воды и спиртов на гладкой и нано-структурированной поверхности. На рис. 2 показано сравнение расчёта относительной доли поверхности нагревателя, покрытой паровыми пузырьками, с экспериментальными данными для воды. В расчете учитывалось снижение работы зародышеобразования в уравнении (3) из-за плохого смачивания водой поверхности карбида кремния. Расчеты взрывного кипения для наноструктурной поверхности показали, что температура начала взрывного кипения зависит от размера наночастиц гетерогенного кипения. Это определяет возможность управления пузырьковым распадом жидкости при изменении свойств поверхности нагревателя.

4. Заключение

Представленные результаты показывают высокую эффективность применения микросистем для проведения фазовых превращений в системах охлаждения, микропарогенераторах, МЭМС и т.д., что позволяет реализовать ранее недоступные технологии. Для реализации этих возможностей принципиально важными являются разработанные методы расчета теплообмена при кипении движущейся жидкости и взрывного кипения в микрожидкостных системах, которые показывают не только их преимущества, но и возможные проблемы, связанные, например, с подавлением пузырькового кипения в тонких пленках жидкости.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 11-08-01140а), ОЭММПУ РАН (проект № 2.4.3) и Сибирского отделения РАН (интеграционный проект №74).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. Int. Heat Transfer Conf. IHTC14. - Washington, DC. - 2010. - IHTC14-22570.
2. Liu Z, Winterton R.H.S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes, based on a nucleate pool boiling equation // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1991. - Vol. 34.- P. 2759–2766.
3. Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S. Boiling Heat Transfer for Freon R21 in Rectangular Minichannel // Heat Transfer Eng. - 2007. - Vol. 28 (8-9). - P. 738–745.
4. Bertsch S.S., Groll E.A., Garimella S.V. Effects of heat flux, mass flux, vapor quality, and saturation temperature on flow boiling heat transfer in microchannels // Int. J. Multiphase Flow. - 2009. - Vol. 35. - P. 142–154.
5. Asali J.C., Hanratty T.J., Andreussi P. Interfacial drag and film height for vertical annular flow // AIChE J. - 1985. - Vol. 31. - P. 886–902.
6. Kandlikar S.G., Balasubramanian P. An Extension of the Flow Boiling Correlation to Transition, Laminar, and Deep Laminar Flows in Mini-Channels and Micro-Channels // Heat Transfer Eng. - 2004. - Vol. 25 (3). - P. 86–93.
7. Kozulin I.A., Kuznetsov V.V. Explosive Vaporization of a Water Layer on a Flat Microheater // Journal of Engineering Thermophysics. - 2010. - Vol. 19 (2). - P. 102-109.
8. Skripov V.P. Metastable Liquids. - New York: J. Wiley. – 1974. – 282 p.

© В.В. Кузнецов, 2013

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОЛБИКОВЫХ МИКРОСТРУКТУР

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, т. (383)3610836, e-mail: denlnsk@mail.ru

В статье приводится описание методики и результатов получения поверхностных структур на подложках из монокристаллического кремния под действием излучения твердотельного Nd:YAG лазера с наносекундной длительностью импульса.

Ключевые слова: импульсный лазер, микроструктуры, микростолбики, кремневая пластина.

EXPERIMENTAL STUDY OF LASER-INDUCED PROCESSES OF FORMATION POSTS MICROSTRUCTURES

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10, engineer, department of physics, (383) 3610836, e-mail: denlnsk@mail.ru

The article describes the methods and results of obtaining surface structures on single crystal silicon substrates by the radiation solid-state Nd: YAG laser with nanosecond pulse duration.

Key words: pulsed laser, microstructure, micropost, silicon wafer.

В сообщении приводится описание методики и результатов получения поверхностных структур на подложках из монокристаллического кремния под действием излучения твердотельного Nd:YAG лазера с наносекундной длительностью импульса. На поверхности сформированы вертикальные микро-столбиковые структуры высотой до 10 мкм.

Сообщение составлено по результатам выполненной по гранту «Поиск путей формирования массивов квантовых точек методами лазерной активации диффузионных процессов в адсорбированных слоях» НИР [1].

При разработках технологий микроэлектронных устройств представляет интерес использование процессов самоорганизации подвергаемого лазерному облучению вещества при большой интенсивности излучения [2,3], в том числе, в лазерных термохимических процессах [4,5]. Известно применение в качестве формирующего фактора в таких процессах сил поверхностного натяжения расплавов, образующихся в фокальном пятне [6,7].

Полученные в настоящей работе результаты относятся к исследованию процессов самоорганизации формирования на поверхности полупроводниковых подложек столбиковых микроструктур. Возникновение структур активируется мощным сфокусированным лазерным излучением при наносекундном плавлении и испарении приповерхностной локальной области подложки. В сообщении

приводится описание методик получения структур и результаты предварительного микроскопного их исследования.

В качестве базовой для технологических исследований используется экспериментальная установка LCVD, описание которой приведено в [8].

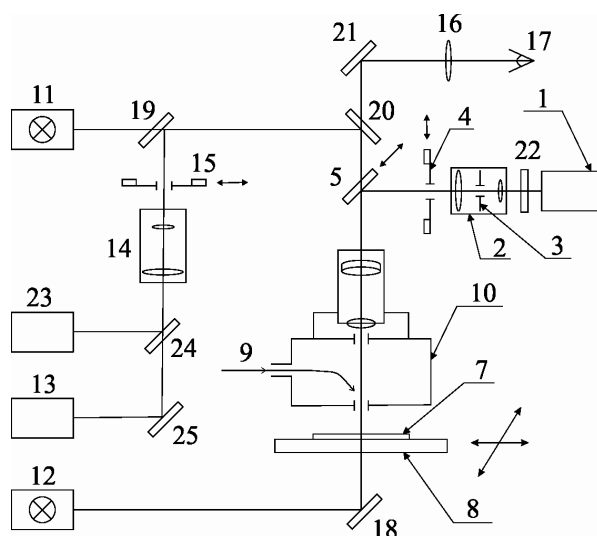


Рис. 1. Упрощённая оптическая схема ввода излучения твердотельного лазера в лабораторную установку

При подготовке экспериментов, описываемых в настоящем сообщении, в качестве излучателя выбран наносекундный твердотельный Nd:YAG лазер с удвоением частоты излучения. Упрощенная оптическая схема лабораторной установки с твердотельным лазером показана на рисунке 1.

Лабораторная установка включает следующие элементы: 1 – твердотельный излучатель; 2 – коллиматор (расширитель) лазерного пучка; 3 – диафрагма пространственного фильтра; 4 – маска, формирующая конфигурацию поперечного сечения пучка излучения; 5 – вставное непрозрачное зеркало; 6 – объектив, формирующий изображение маски 4 на поверхности подложки 7 в ИК-лучах или маски 15 в УФ свете азотного лазера 13 и видимом свете излучателя 23; 8 – координатный столик; 9 – парогазовая смесь; 10 – формирователь парогазовой струи. Установка содержит также источники 11 и 12 подсветки подложки, использующие галогенные лампы накаливания; азотный лазер 13 и коллиматор 14 его излучения; маску 15, изображаемую на подложку объективом 6, когда зеркало 5 выдвинуто и позволяет излучению азотного лазера проходить к подложке; окуляр 16, формирующий изображение подложки для наблюдателя 17, когда зеркало 5 выдвинуто; зеркала 18 – 21, 24, 25.

Излучение твердотельного Nd:YAG лазера с удвоением частоты излучения содержит вследствие малой эффективности кристалла – удвоителя две линии спектра излучения: инфракрасное излучение с длиной волны 1,06 мкм и видимое излучение, что требует установки светофильтра 22.

При экспериментах используется полупроводниковая кремниевая монокристаллическая подложка, поверхность которой обдувается струёй инертного газа (азота или аргона).

Используемое лазерное излучение кремнием поглощается: при комнатной температуре на длине волны 1,06 мкм коэффициент поглощения кремния $\alpha \approx (2 - 4) \text{ см}^{-1}$, на длине волны 0,53 мкм $\alpha \approx 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [9], то есть, глубина поглощения α^{-1} излучения приблизительно составляет (0,25–0,5) см и 2,5 мкм, соответственно.

По мере нагревания подложки поглощённым излучением коэффициенты поглощения полупроводников растут: при расплавлении коэффициент поглощения в кремнии на длине волны $\lambda=1,06$ мкм увеличивается до $\alpha \approx 10^6 \text{ см}^{-1}$, при $\lambda=0,53$ мкм увеличивается до $\alpha \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$. поэтому в начале действия лазерного импульса нагреваются глубинные слои подложки, затем глубина проникновения излучения уменьшается, излучение поглощается поверхностными слоями. В расплавленном кремнии на длине волны 1,06 мкм излучение проникает на глубину 0.02 мкм, и выделившаяся теплота внутри подложки распространяется за счёт теплопроводности подложки.

По оценкам, при использовании наносекундного импульсного излучения с интенсивностью порядка 10^{12} Вт/м^2 за время импульса подложка может в области фокального пятна плавиться и испаряться, что приводит к термогидромеханическим эффектам формирования объёмных структур на поверхности подложки.

При проведении экспериментов в качестве подложки использовались полированные пластины монокристаллического кремния, излучение твердотельного лазера фокусировалось объективом с фокусным расстоянием 25 мм, длительность импульса излучения 16 нс, частота импульсов 10 Гц. Использовались режимы облучения:

- при использовании светового потока без фильтрации (то есть, содержащего инфракрасное излучение с длиной волны 1,06 мкм и удвоенной частоты с длиной волны 0,53 мкм средняя мощность падающего на подложку излучения, мВт 5,9;
- средняя мощность падающего на подложку излучения на длине волны 1,06 мкм, 4,5 мВт;
- максимальная мощность инфракрасной доли излучения в импульсе, 28,125 кВт;
- положение фокуса объектива на поверхности 25 мм;
- средний размер фокального пятна на подложке (25–100) мкм;
- расчётная плотность мощности инфракрасного излучения в центре, $3,6 \cdot 10^8 - 5,6 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$

Для оценок приращения температуры подложки под действием лазерного излучения температура в центре фокального пятна при гауссовском распределении интенсивности излучения по пятну определялась при условии пренебрежения проникновением излучения в расплавленный слой формулой [3]:

$$\Delta T = \frac{(1-R)I_0\tau^{1/2}}{(\sqrt{2}k_T\rho c)^{1/2}} \quad (0.65)$$

где ρ - плотность подложки (для расплава кремния $2,2 \cdot 10^3$ кг/м³);

k_T - теплопроводность, при 1000K 31 Вт/(м*К); c - удельная теплоёмкость, при 1500⁰C 1013 Дж/(кг*К); τ - длительность лазерного импульса; R - коэффициент отражения кремния, I_0 Вт/м² - интенсивность падающего на поверхность излучения.

На оптическом и электронном снимках, приведённых на рисунках 2 и 3, показана поверхность кремниевой подложки после воздействия в течение 30 с излучения твердотельного лазера без использования фильтров для разделения излучений на основной и удвоенной частотах. На снимках видны два кратера диаметром порядка 10 мкм каждый, образовавшихся в областях фокусировки поперечных мод излучения, и выпуклости плёночного осадка, предположительно, образовавшиеся при выплеске расплавленного кремния из кратера.

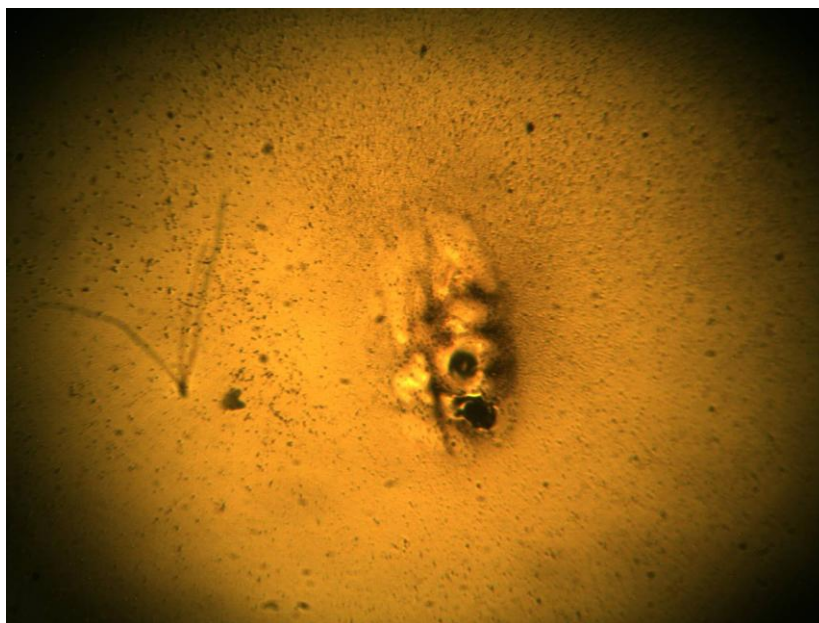


Рис. 2. Оптический микроснимок поверхности подложки после воздействия излучения лазера с удвоением частоты и суммарной (длина волны 0,53 и 1,06 мкм) плотностью мощности $4,7 \cdot 10^8$ Вт/см² в течение 30 с

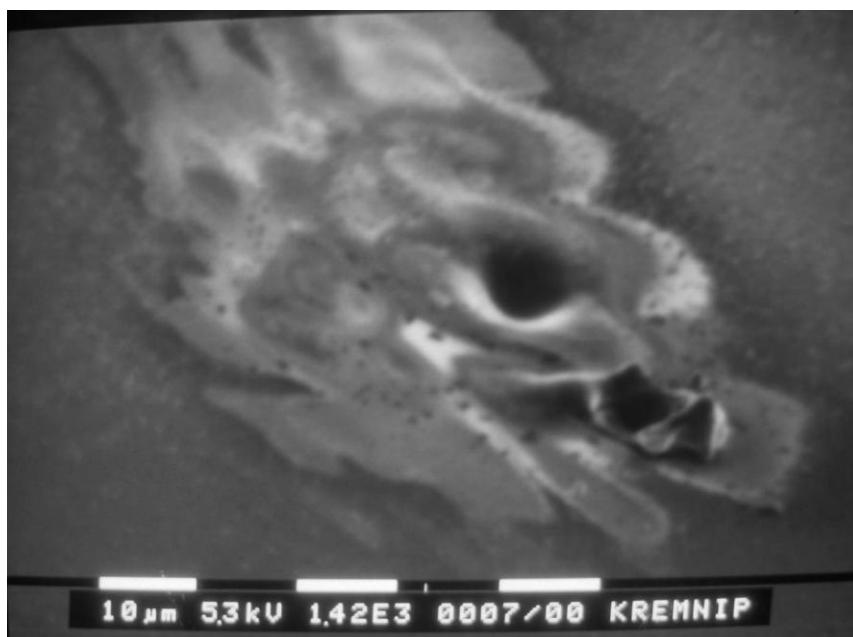


Рис. 3. СЭМ снимок поверхности подложки, показанной на рис. 2

На рис. 4 показаны структуры на поверхности, выращенные в условиях получения структур, как на рисунке 2, но уменьшенным до 5 с временем облучения подложки. Структуры, представленные на рисунках 5 и 6, получены при облучении в том же режиме, но при времени облучения 20 и 25 с.

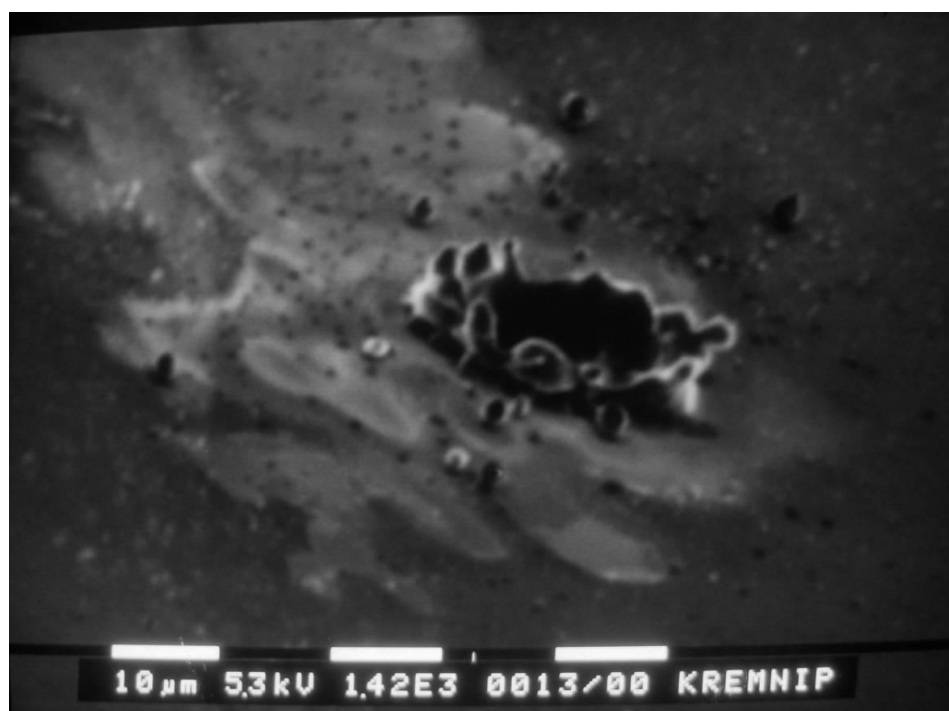


Рис. 4. СЭМ снимок структуры со столбиками. Видны кратер на поверхности островка рения и иглоподобные структуры по его периметру. Структура

получена в условиях, как на рисунке 3; время облучения уменьшено до 5 с (50 импульсов)

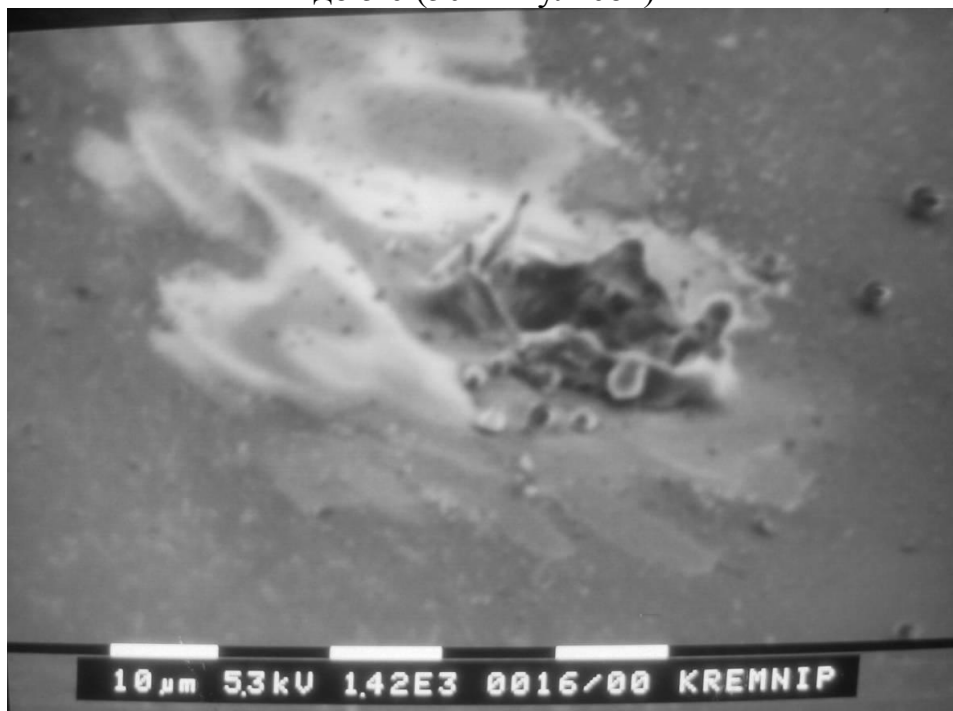


Рис. 5. СЭМ снимок с кратером на поверхности и столбиками. Структура получена в условиях, как рисунке 3; время облучения 20 с (200 импульсов)

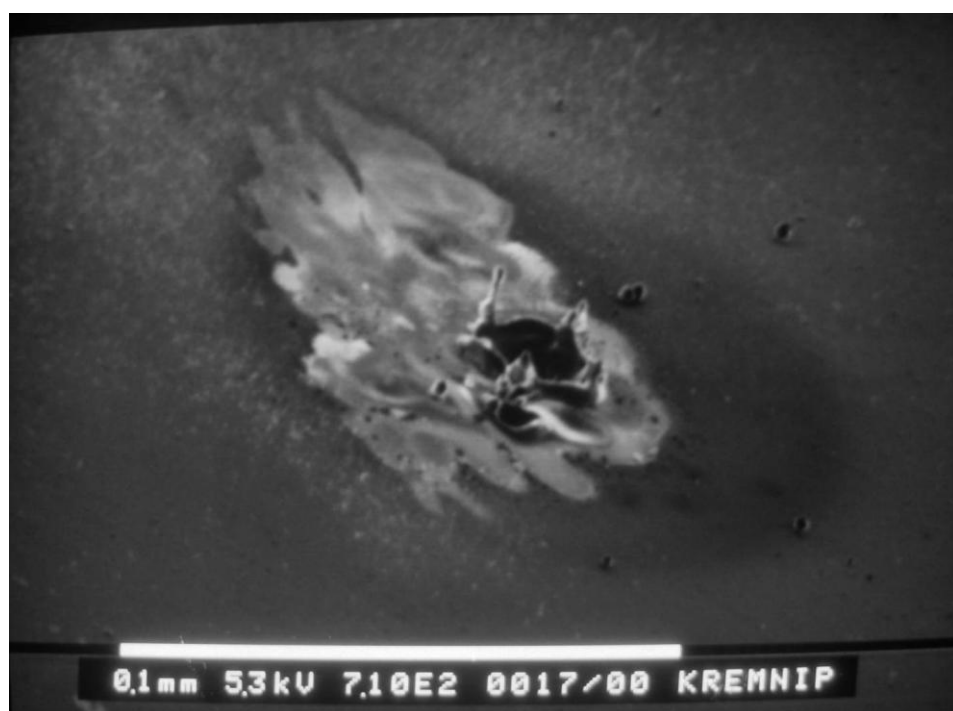


Рис. 6. СЭМ снимок островка рения с кратером на поверхности. Структура получена в условиях, как на рисунке 3; время облучения 25 с (250 импульсов)

Анализ изображений на фотографиях рисунков 2 - 6 показывает, что на структурах присутствуют кратеры с оплавленными краями диаметром порядка 10 мкм, и «столбики» высотой до 10 мкм и диаметром (1–3) мкм. Поверхность столбиков, вероятно, имеет оплавленный характер, и они расположены преимущественно по периметру кратеров; на поверхности подложки вблизи кратеров имеются каплевидные образования с поперечником 2 мкм и менее. Отмечено, что уменьшение интенсивности излучения в разы приводит к отсутствию на подложке кратеров и столбиков. При получении структур использовалось излучение, в котором имелись обе компоненты светового потока лазера с удвоением частоты с длинами волн 0,53 мкм и 1,06 мкм, причём инфракрасное излучение преобладало.

Можно сделать следующие выводы о происхождении структур на снимках.

Оплавленный характер столбиков и краёв кратеров говорит о том, что во время лазерного импульса температура поверхности в местах вблизи кратеров была выше температуры плавления кремния (1688 К); кратер мог образоваться за счёт выброса расплава материала подложки из глубины наружу давлением паров кипящего кремния, что заставляет полагать, что внутри кратеров температура превышала температуру кипения кремния (3522 К); в результате выброса расплавленного кремния из кратера образовались расположенные по периметру кратера столбики и каплевидные частицы на поверхности вдали от кратера. Оценка приращения температуры в центра фокального пятна в конце лазерного импульса при интенсивности излучения $I_0 = 10^{12}$ Вт/м² даёт значение $\Delta T = 8700^\circ\text{C}$; характерные повреждения поверхности подложки подтверждают правильность этой оценки.

Столбики могли образоваться не обязательно из выплеснутого расплава, могла происходить конденсация пара кремния на случайно расположенных на периметре кратера выступах, которые становились зародышами столбиков.

Приблизительно гауссовское распределение интенсивности лазерного излучения в области моды и наличие нескольких поперечных мод по сечению пучка привело к тому, что достаточная для образования кратеров интенсивность была в малой области фокального пятна или в двух – трёх таких областях.

К настоящему моменту анализ причин возникновения микростолбиков не завершён; разрабатывается аналитическая модель происходящих при наносекундном лазерном облучении полупроводниковых подложек процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поиск путей формирования массивов квантовых точек методами лазерной активации диффузионных процессов в адсорбированных слоях: Отчёт о НИР (промежут.) / Сиб. гос. геодез. акад.; рук. Шергин С.Л. ; исполн. Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Кочкарев Д.В., Кузнецов М.В., Лаптев Е.В. – Новосибирск, 2012. – 23 с. – ГР 012011.72851. – Инв. № . – Этап 4
2. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску Й. Взаимодействие лазерного излучения с металлами М.:Наука, 1988.-537с.

3. Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А. Воздействие лазерного излучения на материалы.- М.:Наука, 1989.-367с.
4. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Лазерная термохимия. Основы и применения. – М.: Центрком. 1995. – 368 с.
5. Чесноков В. В., Резникова Е.Ф., Чесноков Д. В. Лазерные наносекундные технологии: Монография / под общ.ред . Д. В. Чеснокова.- Новосибирск. СГГА. 2003. -300 с.
6. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов.-М:Машиностроение , 1986.-248с.
7. Чесноков Д. В., Чесноков В. В. Лазерное формирование наноразмерных структур [Текст] // Известия вузов. Приборостроение. - 2009. -Том52, №6. - С. 69-74.
8. Анисимов С.И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит. 1970, - 272 с.
9. Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И. Температурное изменение оптических свойств жидкой фазы при наносекундном лазерном плавлении кремния и германия. Физика и техника полупроводников , №11, 1996 г.

© Д.В. Кочкарев, 2013

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПАДА ВЕЩЕСТВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ЖИДКОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ

Игорь Анатольевич Козулин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лавретьева, 1, инженер, тел.: +7 (923) 182-0897, e-mail: igornt@yandex.ru

Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лавретьева, 1, д. ф.-м. наук, зав. отделом, тел.: +7 (383) 3307121, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Владимир Иванович Орешкин

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, проспект Академический, 2/3, д. ф.-м. наук, с.н.с, тел.: 8 (3822) 492-988, e-mail: oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru

Николай Александрович Ратахин

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, проспект Академический, 2/3, чл.-корр. РАН, директор, тел.: 8 (3822) 491-544, ratakhin@hcei.tsc.ru

Александр Геннадьевич Русских

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, проспект Академический, 2/3, к.ф.-м.н., с.н.с., тел.: 8 (3822) 490-741, e-mail: rousskikh@ovpe.hcei.tsc.ru

В работе экспериментально установлены закономерности образования и распада метастабильного состояния перегретой жидкости, получены закономерности распада вещества при электрическом взрыве проводников. Исследование распада метастабильной жидкости проведено при характерных временах перевода в метастабильное состояние от 1 до 4 мкс, во взрывающихся проводниках до 200 нс. Изучение распада веществ с кардинально различными характерными временами перевода в метастабильное состояние позволило выработать общий подход к описанию этого процесса.

Ключевые слова: микрожидкостная система, МЭМС, кипение, метастабильная жидкость, взрывное вскипание, электрический взрыв проводников.

EXPERIMENTAL STUDY DYNAMICS DECAY OF MATTER DURING PULSE HEATING IN LIQUID AND ELECTRIC EXPLOSION OF THE WIRE

Igor A. Kozulin

Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, pr. Akademika Lavrentjeva, 1, engineer, tel.: +7 (923) 182-0897, e-mail: igornt@yandex.ru

Vladimir V. Kuznetsov

Thermophysics institute of S. S. Kutateladze of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Avenue, 1, the doctor of physical and mathematical sciences, the head of department, ph.: +7 (383) 3307121, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Vladimir I. Oreshkin

Institute of silnotochny electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 634055, Russia, Tomsk, Akademichesky Avenue, 2/3, doctor of physical and mathematical sciences, senior research associate, ph.: 8 (3822) 492-988, e-mail: oreshkin@ovpe.hcei.tsc.ru

Nikolay A. Ratakhin

Institute of silnotochny electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 634055, Russia, Tomsk, Akademichesky Avenue, 2/3, member correspondent of the Russian Academy of Sciences, director, bodies.:8 (3822) 491-544, ratakhin@hcei.tsc.ru

Alexander G. Russkikh

Institute of silnotochny electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 634055, Russia, Tomsk, Akademichesky Avenue, 2/3, the candidate of the physicist - mathematical sciences, the senior research associate, ph.: 8 (3822) 490-741, e-mail: rouskikh@ovpe.hcei.tsc.ru

In paper the regularities of formation and decomposition of superheated metastable liquid were established experimentally, the decomposition patterns during the electric explosion of wires were obtained. The decomposition of a metastable liquid was studied with characteristic times of transition to a metastable state from 1 to 4 ms, in exploding wires till 200 ns. The study of substance decomposition with radically different characteristic times of transition to a metastable state has allowed develop the approach for description of this phenomenon.

Key words: microfluidic system, MEMS, boiling, metastable liquid. explosive boiling, electric explosion of conductors.

1. Введение

Метастабильное состояние вещества возникает при его быстром нагреве до температур выше температуры фазового перехода в условиях подавления зародышей новой фазы. Управляемый распад метастабильной жидкости широко используется для быстрого изменения фазового состава жидкостей, заполняющих МЭМС систем управления.

Взрывное кипение на плоских микронагревателях исследовано в работах [1, 2]. Хотя отмеченные исследования были направлены на различные аспекты пузырькового распада жидкости, начальная стадия фазового перехода жидкость-пар и характеристики пузырькового распада жидкости при высоких скоростях подвода тепловой мощности остаются слабо изученными. При электрическом взрыве проводников существенным является наличие электрических и магнитных полей, которые определяют режим распада материала проводника при его нагреве и переводе в метастабильное состояние. Электрический взрыв проводника сопровождается возникновением шунтирующего разряда вдоль поверхности проводника еще до того, как в нем полностью произойдет переход вещества в газообразное состояние [3, 4].

Установление закономерностей пузырькового распада при различных временах перевода жидкости в метастабильное состояние и изучение фазовых превращений во взрывающихся плоских проводниках, рассмотренные в данной работе, позволило выработать общий подход к описанию явлений с кардинально различными характерными временами перевода в метастабильное состояние.

2. Экспериментальное исследование динамики распада вещества при импульсном нагреве жидкости и электрическом взрыве

Схема экспериментальной установки для исследования взрывного вскипания жидкости на микронагревателе представлена на рисунке 1. В качестве микронагревателя использован многослойный тонко-плёночный резистор, изготовленный по технологии компании Hewlett Packard. Резистор представляет собой четырехслойную пленку, последовательно напыленную методом PECVD на плоской подложке из стекла. Тепловыделяющий элемент размером $100 \times 110 \text{ мкм}^2$ представляет собой тонкую плёнку сплава TaAl толщиной 500 нм. Нагреватель изолирован от воды тонкими слоями N_3O_4 и SiC. Сэндвичевая структура нагревателя обеспечивает возможность получения экстремально высоких скоростей роста температуры слоя воды при импульсном нагреве. Микрочип погружался в рабочую жидкость, на глубину от 0.3 до 2 мм. Плотность теплового потока в жидкость достигала 400 МВт/м^2 , что дает время нагрева до температуры взрывного вскипания воды меньше 1.4 мкс. Соответствующая скорость роста температуры поверхности микронагревателя составляла около 182 МК/с. Опыты проводились при атмосферном давлении.

Для изучения взрывного кипения была использована оптическая методика регистрации зародышеобразования, вскипания и динамики образующейся паровой полости, основанная на измерении интенсивности лазерного пучка, зеркально отраженного от поверхности нагревателя [5]. Методика основана на измерении интенсивности лазерного пучка, зеркально отражённого от поверхности нагревателя. При возникновении микропузырьков с длиной световой волны лазера (0,6 мкм) интегральный коэффициент зеркального отражения начинает падать и дает динамику покрытой пузырьками доли поверхности нагревателя во времени.

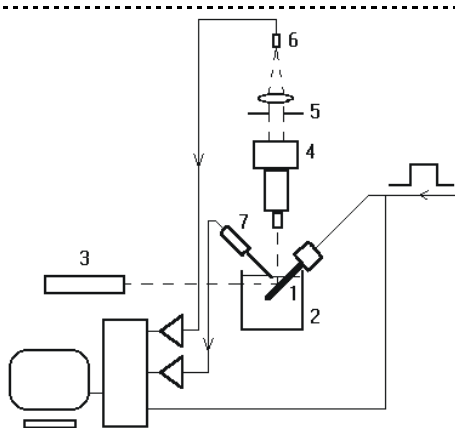


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения метастабильного состояния перегретых слоев жидкости

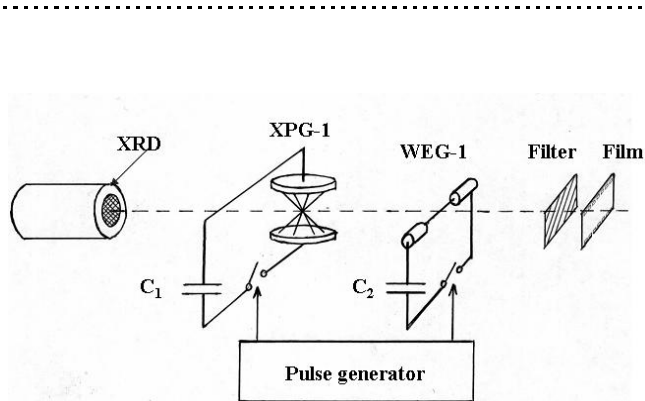


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для изучения закономерности распада вещества при электрическом взрыве проводников

Для изучения закономерности распада вещества при электрическом взрыве проводников была создана экспериментальная установка, показанная на рисунке 2, которая состоит из двух генераторов тока. Один из генераторов тока (WEG-1) обеспечивал взрыв микропроводников. В качестве взрывааемых про-

водников использовались алюминиевая фольга, длиной 20 мм, шириной 1 мм и толщиной 5 мкм и 7.8 мкм. Второй генератор – радиограф XPG-1 с нагрузкой в виде х-пинча использовался в диагностических целях. Х-пинч представляет собой четыре скрещенных вольфрамовых проводника диаметром 13 мкм. Высокотемпературная плазма, служащая источником зондирующего излучения образуется в месте перекрещивания проволок. Для синхронизации генераторов тока XPG-1 и WEG-1 использовался внешний генератор запускающих импульсов ГИ-1. С помощью излучения х-пинча регистрировалось пространственное изображение взрывающегося проводника.

3. Динамика распада вещества при импульсном нагреве жидкости и электрическом взрыве

На рисунке 3 сплошной линией приведено нормализованное напряжение на нагревателе, и динамика заполнения карбида-кремниевой поверхности нагревателя пузырьками водяного пара при приведенной плотности тепловыделения $q_{\text{eff}}=618 \text{ МВт/м}^2$, которая отмечена на рисунке точками. Приведенная плотность тепловыделения определена как полная выделяемая тепловая мощность, деленная на поверхность нагревателя. Относительное время начала кипения $\tau_r=0.899$ равно отношению времени начала зародышеобразования к времени отключения тепловой мощности. Как видно, пузырьковый распад воды имеет взрывной характер и происходит за время меньше 300 нс.

На рис. 4 приведена зависимость температуры начала пузырькового распада от скорости роста температуры карбида-кремниевой поверхности нагревателя для воды. Измеренная температура пузырькового распада воды, при скоростях подвода тепла более $dT/dt=400 \text{ МК/с}$, достигает температуры спиноподального распада, которая отмечена на рис. 4 сплошной линией. Внизу на рис. 4 представлен вид оптического сигнала при достижении температуры спиноподального распада.

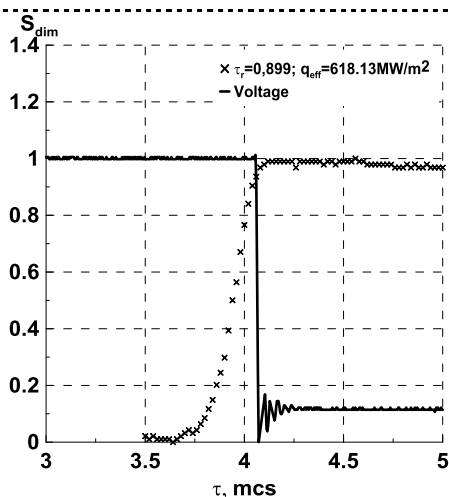


Рис. 3. Зависимость доли поверхности нагревателя, занятой пузырьками воды, от времени при приведенной плотности теплового потока $q_{\text{eff}}=618.13 \text{ МВт/м}^2$

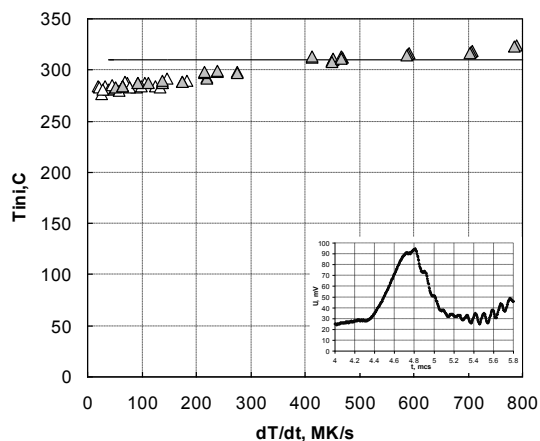


Рис. 4. Зависимость температуры вскипания воды на нагревателе в зависимости от скорости роста температуры поверхности

На рисунке 5 приведены типичные осциллограммы протекающего через проводник тока, напряжения на участке цепи, где находится проводник, и кривая вложенной в проводник энергии при электрическом взрыве тонкой фольги. При расчете энерговклада учитывалась индуктивная составляющая напряжения. Из рисунка 5 видно, что на момент возникновения шунтирующего пробоя, вложенная в проводник энергия примерно в 12 раз превышает энергию плавления.

Проведено несколько серий экспериментов с различными толщинами взрывааемой фольги и с различными напряжениями зарядки U_0 . В одной из серий использовались алюминиевая фольга длиной 20 мм, шириной 1 мм и толщиной 5 мкм. Напряжение зарядки конденсатора составляло 20 кВ. На рисунке 6 приведены типичные фотографии взорванной фольги, на которой видно, что наблюдается интенсивное образование пузырьков по всей поверхности фольги. Максимальный энерговклад в данном режиме составил 8.9 кДж/г, что в 22 раза превышает энергию плавления и составляет 82% от энергии сублимации.

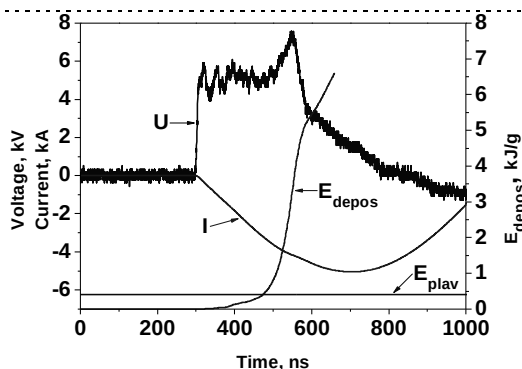


Рис. 5. Осциллограмма тока и напряжения на взрывающемся проводнике при $U_0 = 25$ кВ, и временная зависимость вложенной в проводник энергии.



Рис. 6. Типичные рентгенограммы взорванных фольг ($t = 767$ нс).

4. Заключение

В результате выполненных работ экспериментально получены закономерности пузырькового распада воды при ее быстром нагреве на микронагревателе. Получено, что в результате гомогенного зародышеобразования наблюдается фазовый взрыв метастабильной жидкости на временах меньше 300 нс.

Проведена серия экспериментов, в которых исследовался электрический взрыв алюминиевой фольги с ее переводом в метастабильное состояние за время меньше 200 нс. Экспериментальные данные показали, что в центре фольги, при плотностях вложенной энергии $7 \div 9$ кДж/г, реализуется режим объемного вскипания, вызванный пузырьковым распадом перегретого метастабильного металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского Отделения РАН (интеграционный проект №74) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 2 (проект № 2.11).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Skripov V.P. Metastable Liquids. -John Wiley & Sons, New York. - 1974.
2. Pavlov P.A. and Nikitin E.D. Nucleation Kinetics in an Overheated Liquid // *Te-plofiz. Vys. Temp.* - 1980. - Vol.18. - No. 2. - P. 354-358.1.
3. Sinars D.B. et al. Experiments measuring the initial energy deposition, expansion rates and morphology of exploding wires with about 1 kA/wire // *Phys. Plasmas.* - 2001. – Vol.8. -№1. – P.216-230.
4. DeSilva A.W., Katsouros J.D. Electrical conductivity of dense copper and aluminum plasmas // *Phys. Rev. E.* - 1998. – Vol. 57. - №5. - P.5945-5951.
5. Kuznetsov V.V., Vasserman E.S. Explosive vaporization dynamics on a flat microheater // *Proc. 3-rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation.* – 2004. – Pisa. - Paper ven 04.

© И.А. Козулин, В.В. Кузнецов, В.И. Орешкин, Н.А. Ратахин, А.Г. Русских, 2013

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТАХ

Неъматжон Рахимович Рахимов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. (903)935-21-75, e-mail: nerah@rambler.ru

Вадим Аркадьевич Жмудь

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики, e-mail: oao_nips@bk.ru

Шерзод Ильхомович Мадумаров

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, аспирант НГТУ кафедры автоматики, fergana_10@mail.ru

В данной статье приведен анализ существующих средств мониторинга жидких сред и исследован оптоэлектронный метод для определения серы в нефти и нефтепродуктах. Указаны автоматизированные комплексные в функции предлагаемой новой конструкции оптоэлектронного датчика и актуальность данного метода для решения задач в современной нефтеперерабатывающей отрасли.

Ключевые слова: автоматика, нефть, нефтепродукты, сера, оптоэлектронный, нарушение полного внутреннего отражения (НПВО), многократное нарушенное полное внутреннее отражение (МНПВО), волокно, датчики.

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF OPTIC-ELECTRONIC DEVICES FOR THE CONTROL OF OPTICAL PARAMETERS OF LIQUID MEDIUMS

Nematzhon R. Rakhimov

The Siberian state geodetic academy, 630108, Russia, Novosibirsk, street Plahotnogo, 10, professor, D.Sc. of chair of special devices and technologies, bodies. (903 935-21-75, an e-mail: nerah@rambler.ru

Vadim A. Zhmud

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, street prospectus Karla Marks 20, is head of the department of Automation in NSTU, professor, doctor of technical sciences, e-mail: oao_nips@bk.ru

Sherzod I. Madumarov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, street prospectus Karla Marks 20, post-graduate student NSTU of chair «Automatics», fergana_10@mail.ru

This article contains analysis of existing monitoring tools liquid media and research of optoelectronic method for the determination of sulfur in petroleum and petroleum products. Specified automated integrated functions of the proposed new design optoelectronic sensor and the relevance of this method for the solution of the task of the modern oil, as well as the refining industry.

Key words: automatics, oil, oil products, sulfur, optoelectronics, infringements of full internal reflection (IFIR), repeated broken full internal reflection (RBFIR), a fiber, gages.

Качество и стоимость нефти во многом определяются массовой долей содержания серы в углеводородной основе. Применяемые в настоящее время в нефтеперерабатывающей промышленности аналитические и оптические методы для определения серы не обеспечивают точное и быстрое получение достоверной информации. В связи с этим, одной из актуальных задач XXI века и дальнейшего развития производства нефтепереработки и повышения эффективности оценки качества выпускаемой продукции является разработка и внедрение современных методов и технических средств измерения серосодержащих элементов в нефтепродуктах, основанных на физических методах исследования состава и свойств веществ, при этом используется элементная база физики полупроводников, оптоэлектроники и т. д.

Данная статья является исследованием оптоэлектронного метода определения серы в нефти и нефтепродуктах с использованием волоконно оптических датчиков. Наша цель предложить такой упрощенный и не дорогостоящий оптоэлектронный прибор, работающий на основе нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО), который повысит точность определения процента серосодержащих элементов в нефти и нефтепродукте. Предложенное нами оптоэлектронное устройство (на рис. 1.) работает, не представляя опасности исследуемым нефти или нефтепродуктам. В этом устройстве вся электрическая часть удаляется на определенное расстояние, чтобы избежать пожаро-взрывоопасность. Осуществить этот процесс возможно с помощью волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), когда оптический сигнал передается или принимается на расстоянии с помощью источников излучения и приемников оптических сигналов.

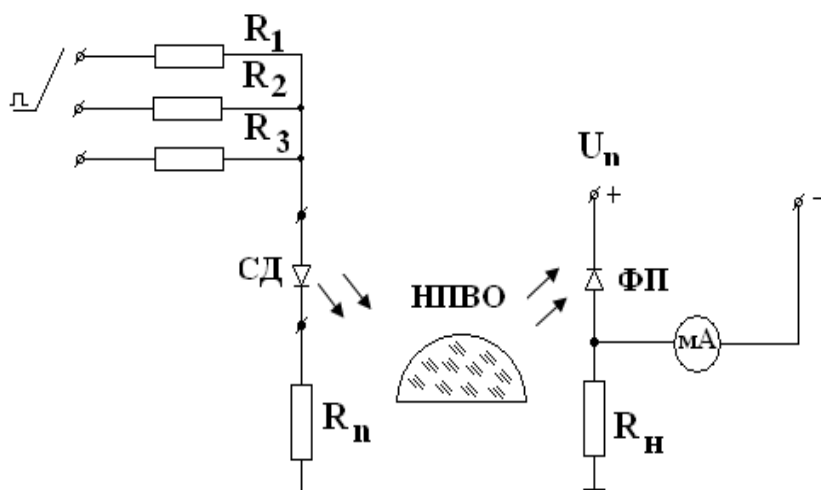


Рис. 1. Структурная и электронная схема датчика на основе полуцилиндра НПВО

Это структурная электронная схема для оптоэлектронного датчика на основе полуцилиндрического элемента НПВО. В последнее время сформировалось направление использования оптического излучения и свойств оптических средств на регистрации различных физических воздействий. Этому способствовали так же успехи в технологии изготовления волоконных оптронов, которые привели к широкому их использованию для передачи индивидуальных сигналов. Развитие волоконно-оптических датчиков идет по пути замены традиционных датчиков, когда потребности не удовлетворяются их параметрами, или по пути получения новых функций. В настоящее время это уже признанное направление по развитию измерительных преобразователей, в рамках которого созданы десятки датчиков давления, скорости, акустических нагрузок и т. д.

ИК-спектр позволяет более надежно, чем химический анализ, определять функциональные группы, особенно, когда требуется совместно провести качественный и количественный анализ, ввиду многокомпонентности состава и межмолекулярной структуры нефтяных систем. Предлагаемое оптоэлектронное устройства повышает точность измерения за счет многократного объемного измерения параметров контролируемой нефти и нефтепродукта с помощью ВОЛС. В оптоэлектронном устройстве применяется цилиндрический элемент НПВО, который предназначен именно для пропускания оптического сигнала или позволяющий поглощать сигнал. Оптоэлектронное устройство эксплуатируется для определения состава нефти и нефтепродуктов и заключается в использовании ярко выраженных линий поглощения в среднем ИК диапазоне от 2000 до 5000 нм: для метана CH_4 – 3300 нм; для летучих углеводородов $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ – 3340 нм; для CO_2 – 4260 нм; и для серы 4600 нм. Еще в этом широком оптическом диапазоне возможно измерять долю одного вещества в другом, и датчики применяются для определения любых жидких или газообразных примесей. Это оптоэлектронное устройство можно использовать в нефтеперерабатывающей промышленности как автономный датчик или для комплексного измерения других содержащихся примесей при обработке нефти.

На рис. 2 представлена блок – схема для определения содержания серы в нефти и нефтепродуктах. Это устройство при автоматическом процессе, в нашем случае при нефтепереработке либо при добыче (бурениях) нефти очень высококачественно и не представляет пожарной опасности контролируемым жидким или газообразным средам. В настоящее время при оценке качества нефти или нефтепродуктов на международном рынке все чаще определяется процентным содержанием серы. В нефтепромышленности не применяются проточные приборы для определения содержания серы в нефти или нефтепродуктах с минимальными затратами времени или с возможностью регулярно автоматически контролировать процесс.

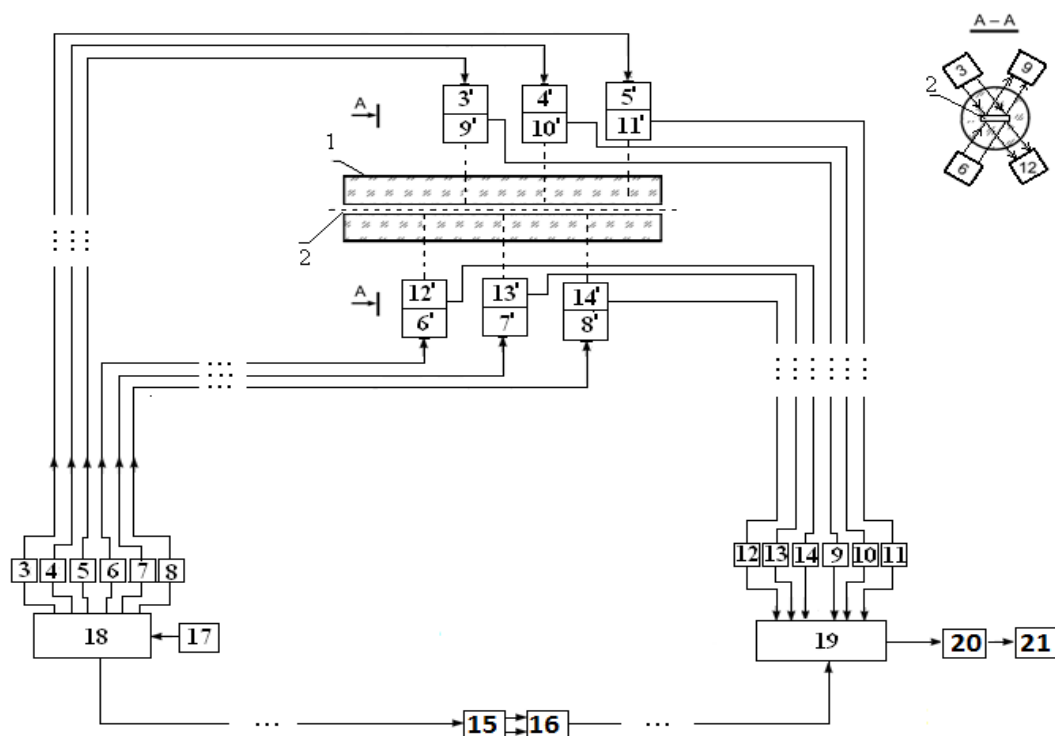


Рис. 2. Блок-схема оптоэлектронной системы для определения содержания серы нефти и нефтепродуктах с помощью ВОЛС и ВОД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.Р. Рахимов. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве / монография. – Фергана: Техника, 2004. – 91 с.
2. Н.Р. Рахимов, Л.Ф. Парфирьев. Оптоэлектронные системы на основе эффекта НПВО для контроля технологических параметров нефти и нефтепродуктов / Изв. вузов. Приборостроение, 2005. № 10. – С. 41–45
3. Н.Р. Рахимов. Оптоэлектронные системы с применением эффекта НПВО для анализа состава нефти и нефтесодержащих сред / кн. «Современные проблемы геодезии и оптики». – Новосибирск, 2004. – С. 163–167.
4. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы в химии. Л.: Химия, 1983 г.
5. «Гео-Сибирь-2011» VII Международная выставка и научный конгресс «Обзор аналитических методов контроля и разработка оптоэлектронных систем для определения серы в нефти и нефтепродуктах»

© Н.Р. Рахимов, В.А. Жмудь, Ш.И. Мадумаров, 2013

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ВИБРОИСПЫТАНИЙ

Валерий Григорьевич Эдвабник

ОАО «НИИ Электронных Приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, заместитель генерального директора по развитию, тел. +73832160552, e-mail: niiep@oaoniep.ru

В статье рассмотрены методы повышения точности и надежности вибрационных испытаний за счет отработки всей механической подсистемы «вибростенд – приспособление для виброиспытаний – испытуемое изделие» в целом. Указаны причины и меры по устранению рассогласования данной системы.

Ключевые слова: вибрационные испытания, вибростенд, упругопластичные пленки.

THE VIBRATION TESTING ACCURACY AND RELIABILITY IMPROVING METHODS

Valerij G. Edvabnik

JSC «Research Institute on Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, Pisareva St., 53, Deputy Director on Development, тел. +73832160552, e-mail: niiep@oaoniep.ru

The vibration testing accuracy and reliability improving methods due to the try-out of the mechanical subsystem «a shaker device- a shaker arrangement – a device under test » as a whole are considered in this paper. The source and error corrective actions of the system are specified.

Key words: vibration testing, shaker device, elastic plastic film.

Главными проблемами обеспечения достоверности и надежности виброиспытаний являются достижение соответствия испытательных режимов заданным и повторяемости испытательных режимов при испытаниях в различные моменты времени. Считается, что заданные в ТЗ или ТУ на изделие вибронагрузки соответствуют реально действующим при эксплуатации изделия в составе объекта, так как обеспечение такого соответствия является отдельной проблемой и выходит за рамки данной работы.

Достижение необходимого результата возможно при отработке всей механической подсистемы "вибростенд – ПВИ (приспособление для виброиспытаний) – ИИ (испытуемое изделие)" в целом. Отметим основные проблемы, возникающие "на стыке" этих трех укрупненных элементов указанной подсистемы, а также укажем типовые пути преодоления отмеченных выше проблем.

Будем полагать, что конструкция вибростенда обеспечивает воспроизведение нужных нам режимов вибрации при использовании в качестве нагрузки (испытуемого объекта) абсолютно твердого тела массой, равной суммарной массе ПВИ и ИИ. В действительности уже здесь есть масса проблем, однако эти проблемы – прерогатива разработчиков испытательного оборудования, и поэтому мы их касаться не будем (хотя с научной и практической точки зрения здесь необъятное количество очень интересных задач – и взаимодействие под-

вижных и неподвижных электромагнитных цепей, и должно обеспечение минимума поперечных колебаний за счет рационального выбора системы упругого подвеса стола вибростенда, и т. д. и т.п.).

Часть общей подсистемы "вибростенд - ПВИ" может внести заметный вклад в рассогласование системы, если не принять соответствующих мер.

Дело в том, что основными источниками динамических искажений режимов вибрации в диапазоне от нескольких сотен Гц до 1000 Гц и даже несколько выше являются разъемные соединения. Причиной этого является: низкая контактная жесткость стыков по сравнению с собственной жесткостью соединяемых конструкций; нелинейность упругих характеристик стыков; случайное несимметричное расположение точек упругих контактов в местах стыка, из-за чего центр жесткости может оказаться смещен относительно линии действия возмущающей силы [1].

Во многих случаях с целью повышения удобства монтажа и продления сроков межрегламентных и ремонтных работ при эксплуатации вибростендов между столом вибростенда и ПВИ устанавливают переходные накладные столы (в принципе накладной стол рассматривается как универсальная часть ПВИ). Значит, в указанной подсистеме "вибростенд - ПВИ" появится еще один источник дополнительных искажений – разъемное соединение стола вибростенда с накладным столом. Немаловажное значение имеют и собственные динамические характеристики накладного стола. Поскольку масса накладного стола вносит дополнительную нагрузку, в этом смысле правомерно считать, что введение дополнительного стола эквивалентно снижению величины толкающего усилия вибростенда. Значит, с одной стороны следует стремиться к достижению не большой массы переходного стола при одновременном обеспечении максимально возможной жесткости. В формулу определения жесткости различных конструкций входит следующее выражение, характеризующее материал конструкции:

$$K_M = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где: K_M – параметр удельной жесткости материала;

E – модуль упругости материала;

ρ - плотность материала.

Чем выше K_M , тем более "удельно жесткий" материал, т.е. при прочих равных условиях (одинаковые геометрические размеры, одинаковые места крепления) тем выше жесткость конструкции из этого материала. Из известных конструкционных материалов наибольшее значение K_M имеет бериллий (например, K_M у бериллия почти 2,5 раза выше, чем у алюминиевых сплавов Д16, Д20).

Учитывая эти соображения, *переходные столы* рекомендуется *изготавливать из бериллия*.

Далее, с целью снижения динамических погрешностей, вносимых стыками (разъемными соединениями), необходимо стремиться к уплотнению контакта

стыкуемых поверхностей. Насколько это важно, покажем на элементарном примере. Шероховатость реальных поверхностей колеблется от 40 мкм ($40 \cdot 10^{-6}$ м) при фрезеровании и координатно-расточных работах до 6 мкм ($6 \cdot 10^{-6}$ м) при шлифовании. Допустимые предельные отклонения от плоскости для реальных конструктивных элементов в зависимости от степени точности поверхности колеблется от $25 \cdot 10^{-6}$ м до $150 \cdot 10^{-6}$ м и выше (и это при достаточно жестких допусках!). В то же время из формулы (2) легко определить амплитуду вибрации в функции от частоты и перегрузки. Так, при $n = 1$ (т.е. ускорение вибрации составляет всего $1 \cdot g$ ($9,81 \text{ м/с}^{-2}$)) амплитуда вибрации на частоте 500 Гц составляет $1 \cdot 10^{-6}$ м., а на частоте 1000 Гц $-0,25 \cdot 10^{-6}$ м.

$$n = \frac{Af^2}{250}, \quad (2)$$

где: n – перегрузка [в единицах «g», $g=9,8 \text{ м/с}^2$];

A – амплитуда вибрации, мм;

f – частота, с^{-1} .

Мы видим, что числовые значения параметров шероховатости и макроотклонений стыкуемых поверхностей от идеальной плоскости на частотах свыше 300 Гц на один - два порядка выше амплитуд вибрации.

Отметим также, что амплитуды колебаний в зоне высокочастотных резонансов (на частотах выше 1000 Гц) существенно меньше величины зазора стыков. При этом стыки между переходными столом и столом вибростенда, а также между переходным столом и ПВИ работают в условиях значительного предварительного сжатия, необходимого для обеспечения условий нераскрытия стыка при максимальных рабочих нагрузках. Так, в [1] приведен следующий пример. При начальном сжатии $\sigma = 1470 \text{ кПа}$ статическая деформация составляет $12 \cdot 10^{-6}$ м. При ускорении величиной $9,81 \text{ м/с}^{-2}$ (перегрузка равна $1g$) и частоте гармонической вибрации, равной 2000 Гц, амплитуда относительных колебаний при добротности $Q = 10$ составит всего $0,63 \cdot 10^{-6}$ м.

Если принять во внимание, что эквивалентные упругие характеристики сильно затянутых стыков при внешних силах, меньших сил затяжки, близки к линейным [1], в первом приближении логично полагать применимым закон Гука для описания характеристик стыка. Тогда для коэффициента жесткости контактного слоя при растяжении – сжатии K_{p-c} верно:

$$K_{p-c} = \frac{E \cdot S}{t}, \quad (3)$$

где: E – модуль упругости слоя;

S – площадь стыка в плане;

t – толщина контактного слоя.

Соответственно для коэффициентов жесткости стыка при сдвиге $K_{сд}$ и при повороте K_{τ} верно в этом случае:

$$K_{сд} = \frac{G \cdot S}{t} = K_{p-c} \frac{G}{E} = \frac{K_{p-c}}{2(1+\mu)}, \quad (4)$$

$$K_{\Pi} = K_{p-c} \frac{R^2}{4}, \quad (5)$$

где: G – модуль сдвига контактного слоя;

μ – коэффициент Пуассона контактного слоя;

R – радиус кругового (в плане) стыка.

Из формул (3) ... (5) видно, что изменение эффективного значения модуля упругости E контактного слоя на стыках "стол вибростенда – переходной стол" и "переходной стол - ПВИ" ведет к изменению жесткости механической подсистемы "стол вибростенда – переходной стол - ПВИ".

Отсюда становится понятным, что использование в стыках тонких упруго-пластичных пленок по сравнению с воздушными зазорами позволяет бороться с искажениями режимов вибрации в средне – и высокочастотном диапазонах (от сотен до двух тысяч герц). В принципе наибольшая эффективность использования упругопластичных пленок достигается при использовании разъемного соединения, в котором на одной из контактирующих поверхностей выполняются чередующиеся выступы и пазы (рифли), заполненные вязкой жидкостью (например, консистентной смазкой). Схематично такой стык показан на рис. 1. Участки пленки между выступами герметизируют вязкую жидкость в позах, сжимаемость которой значительно меньше сжимаемости пленки. Остроугольность выступов позволяет обеспечить большее внедрение выступов в пленку.

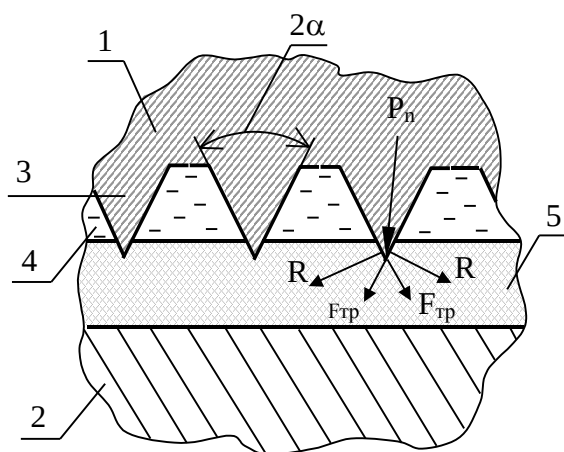


Рис. 1. Разъемное соединение тел с повышенным демпфированием в стыке [1]

1, 2 – соединяемые тела; 3 – рифли (выступы, чередующиеся с впадинами);
4 – консистентная смазка (вязкая жидкость); 5 – упругопластичная пленка

Сила нормального давления со стороны пленки на боковые поверхности каждого выступа значительно больше силы давления на пленку вершины выступа (эффект клина). Поэтому силы внешнего трения между рифлями и пленкой больше сил трения, возникающих в плоском стыке без рифлей.

Так, при отсутствии рифлей максимальная сила трения $F_{тр}^l$ в точке контакта равна произведению коэффициента трения $f_{тр}$ пары металл стыкуемой поверхности – полимерная пленка и силы нормального давления P_n :

$$F_{тр}^l = f_{тр} \cdot P_n. \quad (6)$$

При наличии рифлей суммарная сила трения $2F_{тр}$ между боковыми поверхностями выступов и пленкой выражается следующим образом:

$$2F_{тр} = 2f_{тр} \cdot R = 2f_{тр} \cdot \frac{P_n}{\sin \alpha}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует:

$$\frac{2F_{тр}}{F_{тр}^l} = \frac{2}{\sin \alpha} \quad (8)$$

Поскольку $|\sin \alpha| \leq 1$, за счет взаимодействия заглубленных концов выступов с пленкой демпфирование в стыке резко возрастает.

Так, при $\alpha = 30^\circ$, согласно (8), сила трения в соединении типа рис. 1 в 4 раза, выше, чем при сопряжении плоских поверхностей.

Итак, с целью повышения качества воспроизведения режимов виброиспытаний (снижение динамических погрешностей, возникающих, ввиду влияния стыков стола вибростенда и перехода стола, а также переходного стола и ПВИ), отраслевой стандарт [2] рекомендует между столом вибростенда и накладным столом, а также между накладным столом и ПВИ установить пленку типа МСО 0,040 ... 0,080 мм по ГОСТ 10354-82.

Мы рассмотрели ряд причин, вносящих искажения в воспроизведения режимов вибрации при испытаниях и привели рекомендации по повышению достоверности и надежности виброиспытаний, касающихся подсистемы "стол вибростенда – накладной (переходной) стол - приспособление". Однако рациональный выбор материалов и технологические приемы по "сглаживанию" погрешностей на стыках конструктивных элементов указанной подсистемы – лишь часть необходимых мер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Остроменский П.И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 1992. – 173 с.
2. Аппаратура радиоэлектронная и приборы. Методы виброиспытаний нормальной и повышенной точности. – ОСТ 384 – 1742 – 87.

© В.Г. Эдвабник, 2013

МЕТОДИКА ВЫБОРА УСЛОВНОЙ ТОЧКИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И КАЧЕСТВА ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Валерий Григорьевич Эдвабник

ОАО «НИИ Электронных Приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, заместитель генерального директора по развитию, тел. +73832160552, e-mail: niiep@oaoniep.ru

В статье рассмотрены причины пространственной неустойчивости движения механической подсистемы при виброиспытаниях, приведена методика выбора условной точки управления виброрежимами.

Ключевые слова: вибрационные испытания, вибростенд, датчики вибрационных ускорений.

THE TECHNIQUE OF A CONVENTIONAL CONTROL POINT CHOOSING FOR RELIABILITY AND QUALITY OF THE VIBRATION TESTS INCREASING

Valerij G. Edvabnik

JSC «Research Institute on Electronic Devices», 630005 Novosibirsk, Russia, Pisareva St., 53, Deputy Director on Development, тел. +73832160552, e-mail: niiep@oaoniep.ru

This article reviews the causes of the spatial instability of the motion of a mechanical subsystems during vibration testing, presents methods of selecting the conditional control point of the vibration condition.

Key words: vibration testing, shaker device, vibration accelerations sensors.

В предыдущих статьях был рассмотрен ряд причин, вносящих искажения в воспроизведения режимов вибрации при испытаниях и приведены рекомендации по повышению достоверности и надежности виброиспытаний, касающихся подсистемы "стол вибростенда – накладной (переходной) стол - приспособление".

Рассмотрим далее, каким образом можно попытаться "вытянуть" ПВИ, испытания которого показывают несоответствие заданным требованиям по разбросу значений виброускорений в основном направлении вибрации в различных контрольных точках, а также по допустимым уровням вибрации в поперечных направлениях. Последняя надежда разработчика – выбор условной (не реальной, "физической"!) точки управления виброрежимами; однако, заметим, что это весьма и весьма эффективная мера.

Одной из главных причин несоответствия измеряемых в контрольных точках и задаваемых в ТУ (программе испытаний) режимов вибрации является пространственная неустойчивость движения подсистемы "упругий подвес вибратора – стол вибростенда – переходной стол – ПВИ - испытываемое изделие". Схематично явление пространственной неустойчивости иллюстрируется на рис. 1.

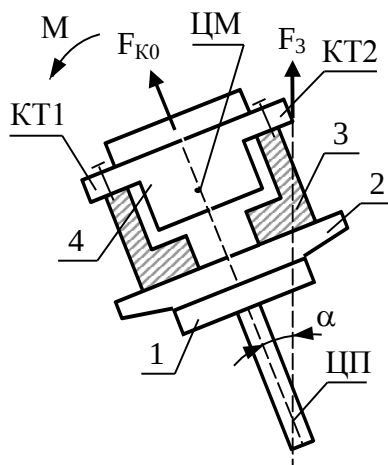


Рис. 1. К пространственной неустойчивости движения механической подсистемы при виброиспытаниях:

ЦП – центр подвеса вибратора; ЦМ – центр масс механической подсистемы; 1 - стол вибростенда; 2 - накладной стол; 3 - приспособление для виброиспытаний; 4 - испытуемое изделие; КТ1, КТ2 – контрольные точки вибрации; α - угол между направлением действия задающей силы F_3 и силы, вызывающей колебания в основном направлении $F_{к0}$ при испытаниях изделия; М – момент силы, вызывающей неустойчивость колебательной подсистемы

Из рис. 1 понятно, что если линия, соединяющая центр масс механической подсистемы и центр подвеса, составляет некоторый угол α (отличный от нуля) с направлением действия задающей силы F_3 , всегда возникает некоторый "опрокидывающий" момент М, что эквивалентно появлению в контрольных точках КТ1 и КТ2 дополнительных инерционных сил. Симметрично линии, проходящей через центр масс механической подсистемы и параллельной действию толкающей силы при испытаниях в основном направлении (F_0), расположены контрольные точки КТ1 и КТ2. Ввиду пространственной неустойчивости механической подсистемы в КТ1 и КТ2, помимо силы F_0 , будет наблюдаться влияние сил $F_{и}$, наличие плеч которых тождественно моменту М. Раскладывая силу $F_{и}$ в КТ1 и КТ2 на силы $F_{и0}$, действующие в основном направлении вибрации и силы $F_{ип}$, действующие в поперечном направлении, мы приходим к пониманию двух важных явлений:

- откуда возникают поперечные ускорения при виброиспытаниях в одном заданном (основном) направлении;
- различия показаний датчиков ускорений, расположенных в симметричных контрольных точках, будут возникать ВСЕГДА при малейшей "несбалансированности" (неустойчивости) механической подсистемы.

Результирующие силы, возникающие при вибрации в основном направлении, для различных симметрично расположенных контрольных точек КТ1 и КТ2, можно рассчитать следующим образом. Поскольку значения виброускорений, измеряемых датчиками в КТ1 и КТ2 в основном направлении, пропорциональны действующим силам, правомерно представить, что:

$$a_{01} = a_{03} - a_n \cdot \sin\alpha, \quad (9,a)$$

$$a_{02} = a_{03} + a_n \cdot \sin\alpha, \quad (9,б)$$

где: a_{01} , a_{02} – измеряемые в КТ1 и КТ2 виброускорения в основном направлении;
 a_{03} – задаваемые в основном направлении виброускорения;

α - угол между осью испытаний и линией проходящей через центр масс механической подсистемы и контрольную точку (КТ1 или КТ2).

Разобрав данный пример, мы легко понимаем рекомендацию отраслевого стандарта [2], предписывающего выбор условной точки управления вибростенда по принципу полусуммы измеренных виброускорений в симметрично противоположащих контрольных точках, а именно, с учетом (9,a) и (9,б):

$$a_{yy} = \frac{a_{01} + a_{02}}{2} = a_{03}, \quad (10)$$

где: a_{yy} - виброускорение в условной точке управления.

Действительно, если управлять режимом вибрации используя в качестве сигнала обратной связи устройства управления вибростендом измерения виброускорения в точке КТ1, то мы перегрузим изделие по сравнению с заданным режимом (отрицательная обратная связь "заставит" достичь в точке управления значения a_{03} , а значит, увеличит толкающее усилие на величину, компенсирующую ускорение величиной $a_n \cdot \cos\alpha$). С другой стороны управление по датчику в точке КТ2 приведет к "недогрузу" испытуемого изделия. И тот, и другой случай (отдельное управление по сигналу в КТ1 или в КТ2) ведет к недостоверности и неэффективности виброиспытаний. Управление режимом вибрации по описанному выше способу условной точки управления существенно повышает достоверность и качество испытаний, а значит, в конечном счете, повышает качество отработки изделий. И не беда, что мы находимся в неведении относительно величины "опрокидывающего" момента M , вызывающего пространственную неустойчивость движения механической подсистемы: сумматор-делитель измеряемых сигналов в КТ1 и КТ2 в изделии дает значение задаваемой виброперегрузки в основном направлении.

Цитируемый нами неоднократно отраслевой стандарт по виброиспытаниям ПУ [2] рекомендует следующую методику выбора условной точки управления. Точки управления, формирующие условную точку управления, должны представлять собой две пары противоположащих точек (мы в примере разбирали плоскую задачу, поэтому ограничивались лишь двумя контрольными точками). Места установки виброизмерительных преобразователей (датчиков виброускорений) рекомендуется выбирать рядом с четырьмя противоположащими точками крепления изделия к ПВИ. Если же число точек крепления к ПВИ отличается от четырех, а также, если эти точки не являются противоположащими, то места установки виброизмерительных преобразователей для управления вибрационной установкой по условной точке управления допускается выбирать вне точек

крепления изделия к приспособлению, если при этом обеспечивается выполнение требований по точности поддержания режимов испытаний в основном направлении.

Структурная схема управления вибростендом при испытаниях на воздействие ГВ и ШСВ по условной точке управления показана на рис. 2.

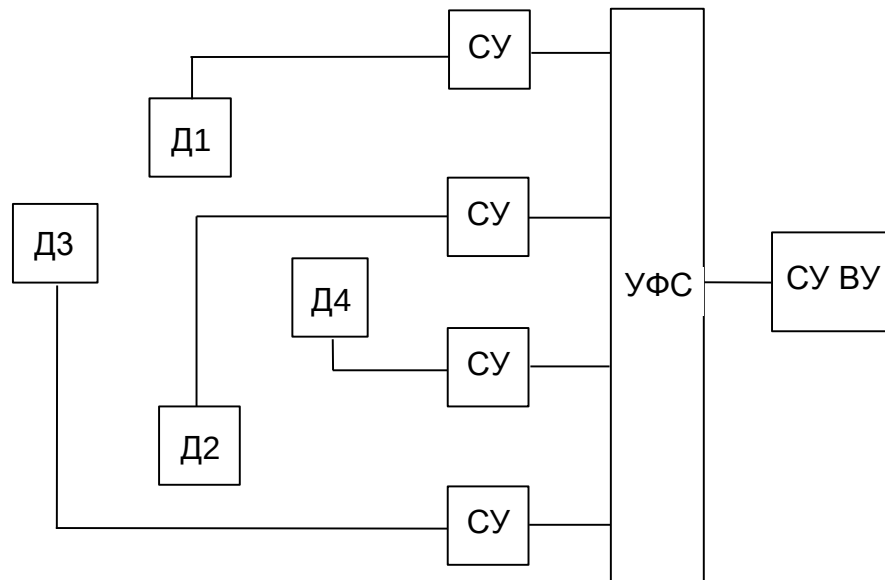


Рис. 2. К выбору условной точки управления:

Д1 ... Д4 – датчики виброускорений, установленные в контрольных точках 1–4 (противолежащие пары 1-2 и 3-4); СУ – согласующий усилитель; УФС – универсальный формирователь сигналов (в нашем случае вычисляющий среднеарифметическое значение); СУ ВУ – система управления вибрационной установкой (вибростендом)

С большими проблемами при отработке ПВИ приходится сталкиваться и в части удовлетворения требованиям по уровню величины виброускорений в поперечных направлениях. Так, значение виброускорений в поперечных направлениях a_n в КТ1 и КТ2 должны быть одинаковы и составлять величину

$$a_n = a_{и} \cdot \cos\alpha$$

Однако в подавляющем большинстве случаев на практике наблюдают существенно различные величины виброускорений a_n в противолежащих контрольных точках КТ1 и КТ2.

Основной причиной такого факта является, по-видимому, наличие наряду с инерционными еще и деформационных составляющих вследствие недостаточной жесткости мест крепления испытуемого изделия.

В местах крепления изделия контур крепления передает изделию два вида воздействия: ИНЕРЦИОННОЕ, характеризующее движение контура крепления

и изделия как целого (абсолютно твердого тела), и ДЕФОРМАЦИОННОЕ, возникающее вследствие неабсолютной жесткости контура крепления. При одинаковых уровнях виброускорений в местах крепления движения этих точек при инерционном и деформационном воздействии существенно различны: при поперечном инерционном вибровоздействии поперечные колебания СИНФАЗНЫ, а при деформационном воздействии – ПРОТИВОФАЗНЫ.

Деформационные составляющие воздействуют непосредственно лишь на места крепления изделия и не передаются внутренним конструкционным элементам. Поэтому измеряя "суммарное" значение поперечного виброускорения в точках крепления можно впасть в серьезное заблуждение относительно воздействующих вибраций и не допустить вполне приемлемое ПВИ к эксплуатации. Понимание наличия деформационных составляющих в общей величине измеренного виброускорения помогает разработчикам бортовой электронной аппаратуры (БЭА) требовать от разработчиков и испытателей объекта, для которого создается данное изделие, более тщательного анализа полетных данных по режимам вибрации, на основании которых формируется ТЗ на БЭА.

Универсальный формирователь сигналов помогает нам и при аттестации приспособлений на соответствие нормам ТЗ (ТУ или программы испытаний) в части значений поперечных виброускорений. "Отсеивание" деформационных составляющих производится при алгебраическом сложении сигналов с виброизмерительных преобразователей (датчиков виброускорений), расположенных в противоположащих точках крепления.

Следует отметить, что современные системы управления вибрационными установками имеют соответствующее программное и аппаратное обеспечение для реализации различных алгоритмов схем измерения виброускорений и формирования схем управления вибростендом.

Совершенствование качества стыков элементов механической подсистемы "стол вибростенда – переходной стол - ПВИ", рациональный выбор конструкции ПВИ, материалов переходного стола и ПВИ, количества и расположения точек механического крепления переходного стола к столу вибростенда и ПВИ к переходному столу, устранение систематических методических ошибок при виброизмерениях – основные способы достижения требуемых результатов при отработке механической подсистемой подсистемы "стол вибростенда – переходной стол - ПВИ" и, в конечном счете, повышение качества, достоверности и надежности виброиспытаний изделия. Обеспечение виброустойчивости и вибропрочности, в свою очередь, является одной из главнейших задач обеспечения требований устойчивости и прочности БЭА к динамическим воздействиям вообще.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Остроменский П.И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 1992. – 173 с.
2. Аппаратура радиоэлектронная и приборы. Методы виброиспытаний нормальной и повышенной точности. – ОСТ 384 – 1742 – 87.

© В.Г. Эдвабник, 2013

ВЛИЯНИЕ ОКИСЛИТЕЛЕЙ НА РАЗЛОЖЕНИЕ ГЕРБИЦИДОВ В ПОЧВЕ

Светлана Арсеньевна Степанова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Приведены результаты исследования влияния различных окислителей (H_2O_2 ; $K_2Cr_2O_4$; КМ и O_4) на скорость разложения гербицидов в почве. Установленные зависимости могут быть использованы для удаления остаточных гербицидов из почвы во избежание возникновения сложных экологических проблем.

Ключевые слова: окислитель, гербициды, экологические проблемы.

THE INFLUENCE OF OXIDIZERS ON THE DECOMPOSITION OF HERBICIDES IN SOIL

Svetlana A. Stepanova

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Results of research of influence of different oxidants (H_2O_2 ; $K_2Cr_2O_4$; КМ and C_4) at the rate of decomposition of herbicides in soil. The established dependencies can be used to remove the residual herbicides from the soil in order to avoid complex environmental problems.

Key words: oxidizer, herbicides, environmental problems.

Пестициды широко применялись в сельском хозяйстве во второй половине сороковых годов прошлого века. В то время многие страны испытывали недостаток в продуктах питания, и использование пестицидов воспринималось как панацея от голода. Со временем выяснилось, что пестициды не только благо, но и зло, так как создают сложные экологические проблемы. Пестициды – очень частые загрязнители почв.

Самую обширную группу пестицидов как по масштабу применения (около 50%), так и по ассортименту выпускаемых препаратов, составляют гербициды, т.е. средства борьбы с растительностью.

По характеру действия гербициды делятся на две группы:

- сплошного действия, т.е. действия на все виды растений (например, для очистки территорий под строительство);
- селективного действия. Данные гербициды используются для борьбы с сорняками.

В почву гербициды вносятся в различных формах: в виде растворов, суспензий, аэрозолей, гранул и капсул. В идеальном случае гербицид, оказав требуемое воздействие на сорняки, должен был бы разрушиться. Образовав безвредные продукты разложения. Однако многие гербициды представляют собой

достаточно устойчивые соединения, сохраняясь длительное время в агроэкосистеме, попадая в растения и другие компоненты окружающей среды.

Как известно [1, 2], гербициды в почвах разлагаются под влиянием следующих факторов:

- различных почвенных микроорганизмов, для которых гербициды нередко являются источником углерода. Но во многих случаях такое разложение начинается не сразу, а через некоторое время, необходимое для приспособления микроорганизмов к разрушению данного соединения;
- состава почвы: её влажности, химического состава, кислотности;
- воздействия солнечного света, т.е. в результате фотореакций, что очень важно, так как гербициды вносятся на поверхность почвы;
- окисления кислородом воздуха.

В настоящее время некоторые фермеры и дачники пользуются гербицидами в целях борьбы с сорняками, не задумываясь об экологических последствиях.

Целью данной работы является исследование ускорения разложения гербицидов в почве. Исходя из количества солнечных дней в Сибири. Трудно рассчитывать на эффективность фотохимических реакций в почве. Упор в данном исследовании был сделан на дополнительное искусственное окисление. Из трёх широко используемых окислителей: дихромата калия, перманганата калия и пероксида водорода был сделан выбор в пользу последнего как наиболее дешёвого и экологически безвредного соединения.

В качестве исследуемого гербицида выбран препарат на основе глифосата, продающийся в магазинах и рекомендуемый специалистами к применению.

Препарат (таблетки) разведён водой в соответствии с указаниями на упаковке и внесён в образец почвы. Обработанная гербицидом почва была разделена на три равные части. Одна часть почвы была обработана трёхпроцентным раствором пероксида водорода (H_2O_2) и помещена в тёмное место. Вторая, не обработанная окислителем, помещена на свету. Третья часть почвы обработана окислителем и помещена на свету.

Через три недели из всех трёх образцов почвы выделили почвенный раствор, в который переходят в основном все вещества, содержащиеся в почве.

С помощью перманганатного титрования в кислой среде [2, 3] были определены неразложившиеся остатки гербицидов.

Расчёт оставшейся в почве органики по результатам титрования показал следующее. Полнее всего гербицид разложился под совместным воздействием света и окислителя (осталось около 23% от внесённого гербицида). В образце почвы, подвергнутом только освещению, осталось 29% гербицида. Слабее всего разложился гербицид под влиянием окислителя – осталось неразложившимся 32% от исходного количества гербицида.

На основании проделанной работы пришли к выводу, что фотохимические реакции активнее разлагают гербициды, чем выбранный окислитель – пероксид водорода. Следует отметить, что пероксид водорода является наиболее слабым по сравнению с двумя другими широко используемыми окислителями: $KMnO_4$ и $K_2Cr_2O_7$. Это видно из их окислительно-восстановительных потенциалов:

- у H_2O_2 он равен + 1,776 В;
- у KMnO_4 равен + 1,51 В;
- у $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ составляет + 1,33 В.

Разумеется, рекомендовать садоводам или фермерам дихромат калия нельзя, так как он дорогой и экологически небезвредный. Перманганат калия вполне может быть рекомендован, так как кроме разлагающего действия на гербициды он вносит в почву микроэлементы – калий и марганец.

Таким образом, следующим этапом этой работы может быть рекомендовано исследование гербицидов (различных типов) под влиянием перманганата калия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Исидоров Экологическая химия: учебное пособие для вузов. – СПб.: Химиздат, 2001.
2. Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, И.Н. Лозановская Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2002.
3. Е.В. Аринушкина. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1970.

© С.А. Степанова, 2013

ОБ ОЦЕНКЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Валерий Григорьевич Эдвабник

ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, заместитель генерального директора по развитию, тел. (383)224-19-59, факс: (383)224-66-65

Юрий Маркович Фартышев

ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, заместитель генерального директора по качеству, тел. (383)224-19-59, факс (383)224-66-65

Алексей Константинович Гаутцель

ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, ведущий инженер, тел. (383)224-19-59, факс (383)224-66-65

Максим Михайлович Кузнецов

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТОП, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru

В статье рассказывается о положительном опыте ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов» по математической оценке стабильности производственных процессов исходя из информации по количеству изготовленных единиц продукции и количеству несоответствий в ней.

Ключевые слова: стабильность производственных процессов, точность технологических процессов, статистический анализ, технологический процесс.

THE ASSESSMENT OF THE STABILITY OF PRODUCTION PROCESSES IN THE CONDITIONS OF THE SINGLE AND SMALL-BATCH PRODUCTION

Valerij G. Edvabnik

JSC «Research Institute on Electronic Devices», 630005, Novosibirsk, Russia, Pisareva St., 53, Deputy Director on Development, тел. +73832160552, e-mail: niiep@oaoniiiep.ru

Yury M. Fartishev

JSC «Scientific research Institute of electronic devices», 630005, Novosibirsk, Russia, Pisareva St., 53, Deputy General Director for quality, тел. (383)224-19-59, fax: (383)224-66-65

Alexey K. Gautsel

JSC «Scientific research Institute of electronic devices», 630005, Novosibirsk, Russia, Pisareva St., 53, leading engineer, тел. (383)224-19-59, fax: (383)224-66-65

Maxim M. Kuznetsov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph. D., associate Professor, Department head at the TOP, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru.

The article tells about the positive experiences of JSC «Scientific - research Institute of electronic devices» on the mathematical evaluation of stability of technological processes on the basis of information on the volume of manufactured products and the number of inconsistencies in it.

Key words: stability of technological processes, the accuracy of the technological processes, and statistical analysis of technological process.

В последнее время важное значение в решении проблем качества приобретает обеспечение точности и стабильности производственных процессов, особенно специальных, результаты которых не контролируются, а обеспечиваются процессом.

Поскольку сложные производственные процессы обладают таким свойством как эмерджентность (свойства сложного процесса не являются простой суммой свойств составляющих его элементов), то, возникающие на различных уровнях управления информационные потоки, содержащие и оценки точности и стабильности производственных процессов, требуют дифференцированного подхода к принятию управленческих решений.

Основной целью статистического анализа точности и стабильности производственного процесса является получение и обработка систематизированной непрерывной информации о качестве продукции, необходимой для дальнейшего совершенствования технологического процесса, а также для определения его оптимальных параметров [2].

Под точностью производственного процесса понимается его свойство обеспечивать близость действительных значений параметров к нормируемым их значениям.

Под стабильностью производственного процесса понимается его свойство обеспечивать постоянство распределения вероятностей его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне.

Под статистическим анализом точности и стабильности производственного процесса понимается совокупность действий по установлению статистическими методами значений показателей точности и стабильности технологического процесса и определению закономерностей их изменения во времени.

Используемая в рекомендациях [3] модель технологического процесса (ТП), включающая: входные параметры X_i ; влияющие регулируемые параметры Z_j ; влияющие нерегулируемые параметры V_m ; выходные параметры Y_k не всегда приемлема в условиях единичного или мелкосерийного производства.

Рассеивание значений параметров вследствие наличия указанных погрешностей с достаточной степенью адекватности может быть аппроксимировано нормальным законом распределения:

$$y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad (1)$$

где x - переменная случайная величина;

μ - математическое ожидание случайной величины x ;

σ - среднее квадратическое отклонение случайной величины x .

Математическое ожидание μ характеризует положение кривой распределения на отсчетной шкале анализируемого параметра, а среднее квадратическое отклонение характеризует степень рассеяния случайной величины x относительно математического ожидания μ .

Описанный закон характеризует распределение генеральной совокупности, образуемой множеством значений параметров анализируемого ТП, источником же информации о фактическом распределении служит взятая из генеральной совокупности выборка объемом n единиц продукции, по которой рассчитывается экспериментальное распределение в качестве оценки теоретического распределения.

Оценками параметров теоретического распределения являются статистические характеристики:

- выборочное среднее арифметическое значение $\bar{x}$ в качестве оценки математического ожидания μ ;

- выборочное среднее квадратическое отклонение S в качестве оценки σ .

Выборочное среднее арифметическое $\bar{x}$ определяется:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где x_i - отдельные $x_1, x_2, \dots, x_n$, измеренные значения анализируемого параметра i ,

n - объем выборки.

Выборочное среднее квадратическое отклонение S определяется:

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

В качестве характеристики рассеивания может также использоваться размах R , рассчитываемый как разность между максимальным и минимальным значениями параметров в выборке.

Для более точной оценки соответствия распределения параметров в выборке распределению параметров в генеральной совокупности предусматривается проверка по критериям согласия.

Оценка точности и стабильности технологических процессов производится с использованием полученных выборочных статистических характеристик $\bar{x}$ и S путем определения показателей - коэффициентов точности K_t , настроенности K_n и стабильности K_s через сопоставление их с установленным в НТД полем допуска δ на параметр по формуле 4:

$$K_T = \frac{6S}{\delta} \leq 1; \quad K_H = \frac{\bar{x} - x_{\delta}}{\delta} \rightarrow 0; \quad K_c = \frac{S_{t1}}{S_{t2}} \rightarrow 1, \quad (4)$$

где δ - поле допуска на параметр;

x_{δ} - середина поля допуска;

St_1 - среднее квадратическое отклонение в фиксированный момент времени t_1 ;

St_2 - среднее квадратическое отклонение в сравниваемый фиксированный момент времени t_2 .

Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным, изложенные в ГОСТ Р 50.779.21 [1] также неприемлемы в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Имея в реальных условиях информацию, не позволяющую применять выше указанные формулы, в ОАО «НИИЭП» разработана инструкция РИ 14.01-11- «Оценка стабильности производственных процессов» в которой предлагается следующее:

- для статистической обработки данных необходимо, чтобы по процессу, для которого определяется стабильность, было изготовлено не менее 25 единиц продукции;

- для расчета стабильности производственных процессов определяется количество как скрытых, так и выявленных несоответствий продукции и ее составных частей за интервал времени S ;

- наличие скрытых несоответствий фиксируется в актах анализа несоответствующей продукции;

- наличие несоответствий с явной причиной фиксируется в карточках решений на отклонение, а также в журналах «предъявлений» ОТК.

Исходными данными для расчета являются:

- N – количество единиц продукции, изготовленных за интервал времени S .

- N_1 – количество единиц продукции из числа N , у которых выявлены несоответствия в интервале времени S .

В качестве критерия доработки производственных процессов на стабильность используется коэффициент устойчивости технологического процесса – K_y .

Значение коэффициента K_y выбирается в соответствии с табл. 1 в зависимости от литеры технологической документации.

Таблица 1

Значения коэффициента устойчивости технологического процесса K_y

Литера технологической документации	Коэффициент устойчивости технологического процесса K_y	
	Партия изделий до 50 шт.	Партия изделий от 50 шт. и выше
Без литеры	Не определяется	0,8
Литера О	0,85	0,9
Литера О1	0,9	0,95
Литера А	0,95	0,99

Значение стабильности производственного процесса, вычисленное по формуле (5), округляется до целого значения, в сторону меньшего от расчетного значения стабильности производственного процесса.

$$T_{cm} = \frac{S * \ln K_y}{R(N, N_1)} \quad (5)$$

где S – исследуемый интервал времени в месяцах;

K_y – коэффициента устойчивости технологического процесса;

$R(N, N_1)$ – коэффициент определяемый по формуле 6 на основе найденных путем статистической обработки исходных данных значений чисел.

$$R(N, N_1) = \ln \left\{ 1 + \frac{N_1 + 1}{N - N_1} - g_{0,9} [2(N_1 + 1), 2(N - N_1)] \right\} \quad (6)$$

где $g_{0,9}$ – квантиль F – распределения с уровнем значимости 0,1.

В табл. 2 приведены частные значения коэффициентов $R(N, N_1)$ для различного количества изделий, выпущенных по технологическому процессу.

Таблица 2

Значения коэффициента $R(N, N_1)$

Кол-во изделий	Коэффициент $R(N, N_1)$ для N_1				
	0	5	10	15	20
25	0,09	0,45	0,79	1,33	2,3
30	0,08	0,34	0,63	1,01	1,52
40	0,06	0,25	0,44	0,67	0,95
50	0,05	0,20	0,35	0,51	0,69
150	0,02	0,06	0,11	0,15	0,2
300	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
500	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06

Расчеты проведенные по формулам 5 и 6 для трех различных производственных процессов, условно обозначим их как А, В и С, с различным количеством выпущенных по ним единиц продукции и различной плановой стабильностью показали следующее:

- по изделию А, при выпуске в 739 штук было выявлено 26 несоответствий продукции, стабильность производственного процесса не изменилась и составила 12 месяцев;

- по изделию Б, при выпуске в 196 единиц было выявлено 22 несоответствия, что потребовало снизить показатель стабильности с 6 месяцев до одного;

- по изделию С, при выпуске в 235 единиц было выявлено всего 4 несоответствия за год, что позволило повысить показатель стабильности до 15 месяцев.

Выводы: использование указанной методики по оценке стабильности производственных процессов позволили ОАО «НИИЭП» математически обосно-

вывать и применять на практике дифференцированный подход по установлению сроков контроля технологической дисциплины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 50.779.21-96. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение.
2. Жулинский С.Ф., Новиков Е.С., Поспелов В.Я. Статистические методы в современном менеджменте качества. – М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2001. – 208 с.
3. Р 50-601-20-91 – Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования).

© В.Г. Эдвабник, Ю.М. Фартышев, А.К. Гаутцель, М.М. Кузнецов, 2013

РАЗРАБОТКА ЛИНЕЙНОГО КОЛЛИМАТОРА ДЛЯ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Дмитрий Александрович Герус

ОАО «НИИ электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, инженер, тел. (383) 224-24-79

Виталий Сергеевич Кулик

ОАО «НИИ электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, инженер, тел. (383) 224-24-79

Валерий Борисович Ромодин

ОАО «НИИ электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (383) 224-24-79

В данной статье рассмотрены вопросы проектирования волноводно-щелевого коллиматора для измерения диаграмм направленности антенн. Для создания плоской волны в ближней зоне реализована оптимальная функция возбуждения апертуры. Полученные результаты измерений хорошо согласуются с расчетными данными и удовлетворяют общепринятым критериям для поля плоской волны в ближней зоне.

Ключевые слова: коллиматор, ближняя зона, плоская волна, оптимальная функция возбуждения.

LINEAR COLLIMATOR DESIGN FOR ANTENNA MEASUREMENTS

Dmitry A. Gerus

OJSC «Scientific Research Institute of Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, engineer, tel. (383) 224-24-79

Vitaly S. Kulik

OJSC «Scientific Research Institute of Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, engineer, tel. (383) 224-24-79

Valery B. Romodin

OJSC «Scientific Research Institute of Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, laboratory chief, tel. (383) 224-24-79

In this article questions of slotted waveguide collimator design for antenna measurements are considered. Optimal feed aperture function is realized for making plane wave in near field. Measurement results are in good agreement with calculated data and satisfy generally accepted criteria for plane wave in near field.

Key words: collimator, near field, plane wave, optimal feed function.

Коллиматорный метод заключается в измерении параметров антенн в поле, близком к полю плоской волны, создаваемом с помощью вспомогательной антенны - коллиматора, расположенной в непосредственной близости от испытуемой антенны. Для измерения диаграмм направленности линейных антенн применяются линейные коллиматоры, создающие аналог плоской волны в плоско-

сти, содержащей ось антенны. Методики измерения антенн совпадает с методиками измерения в дальней зоне [1]. В работе изложены результаты проектирования линейного коллиматора на основе линейной волноводно-щелевой антенны.

Основной частью поля в рабочей области линейного коллиматора является цилиндрическая волна. Наличие сферических краевых волн, исходящих из концевых точек коллиматора, является основным физическим фактором, ограничивающим размер рабочей зоны при фиксированной длине коллиматора.

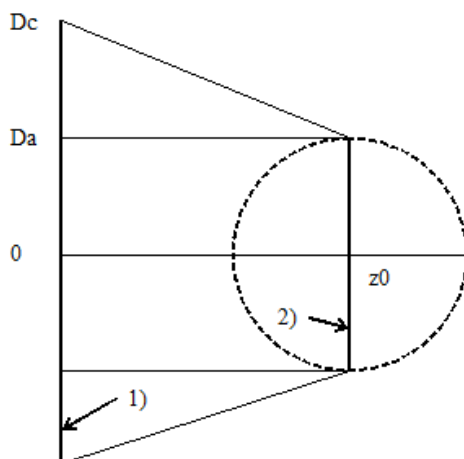


Рис. 1. Общий вид: 1) коллиматор; 2) исследуемая антенна

Для увеличения размера рабочей зоны необходимо сформировать в раскрыве коллиматора оптимальное амплитудное распределение, позволяющее минимизировать вредное влияние краевых волн [2]. Для определения погрешности реализации плоской волны введём параметр m , равный разности хода между лучами, проведёнными из крайней точки рабочей области в точки апертуры Da и Dc [2]

$$m = k \cdot \left[\sqrt{z_0^2 + (Dc - Da)^2} - z_0 \right]. \quad (1)$$

Тогда погрешность реализации плоской волны Δ_{opt} определяется следующим образом

$$\Delta_{opt} = \frac{0.8}{m \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot m}} \quad (2)$$

Оптимальная функция возбуждения имеет вид

$$I(z) = 1 - f_1(z)^3, \quad (3)$$

где

$$f_1(z) = \begin{cases} 0 & \text{if } |z| < Da \\ \frac{|z| - Da}{Dc - Da} & \text{if } |z| \geq Da \wedge |z| \leq Dc \\ 1 & \text{if } |z| > Dc \end{cases}$$

На рис. 3 изображено распределения тока в раскрые коллиматора.

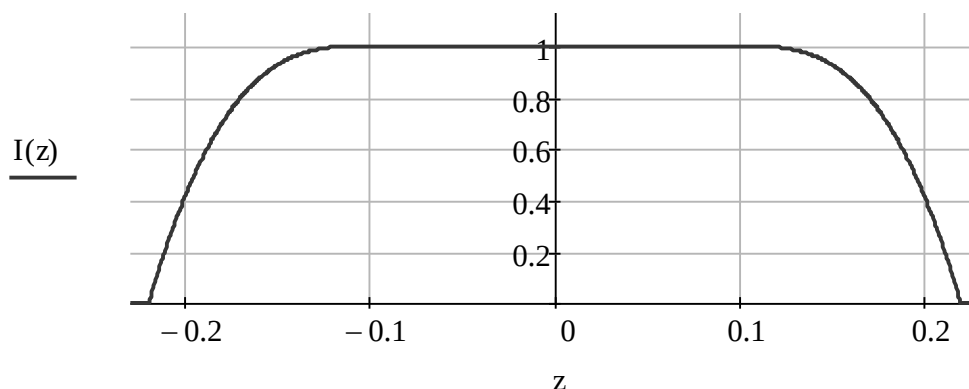


Рис. 3. Распределение тока в раскрые коллиматора

Изготовлено 2 коллиматора для измерения ДН антенн в двух частотных полосах трехсантиметрового диапазона радиоволн. Для измерений использовался анализатор цепей векторный Р4М-18, тренога, подставка для коллиматора, вспомогательная антенна, подвижная каретка.

Для сокращения размера коллиматора и уменьшения влияния краевых волн реализована оптимальная функция возбуждения апертуры.

Ниже представлены графики измерений амплитудного и фазового распределений.

На рис. 4 представлен график измерения амплитудного распределения поля коллиматора № 1. Синим цветом представлено расчетное амплитудное распределение, а зелёным - измеренное. Результаты измерений хорошо согласуются с расчётными данными. Неравномерность амплитудного распределения не превышает 0.6 дБ. При расчётах расстояние между коллиматором и антенной составляет 60см, при измерениях 70 см.

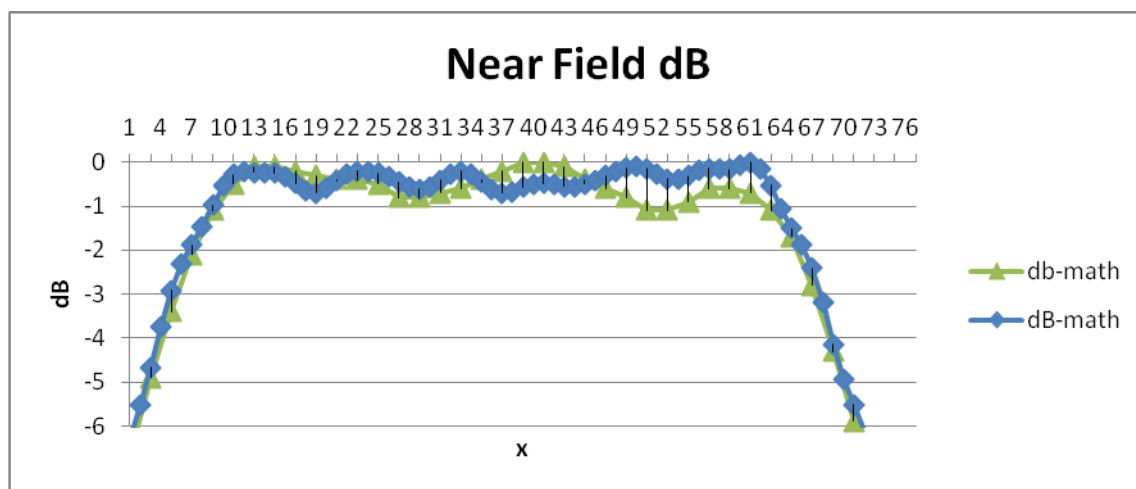


Рис. 4. Коллиматор №1 – Амплитудное распределение

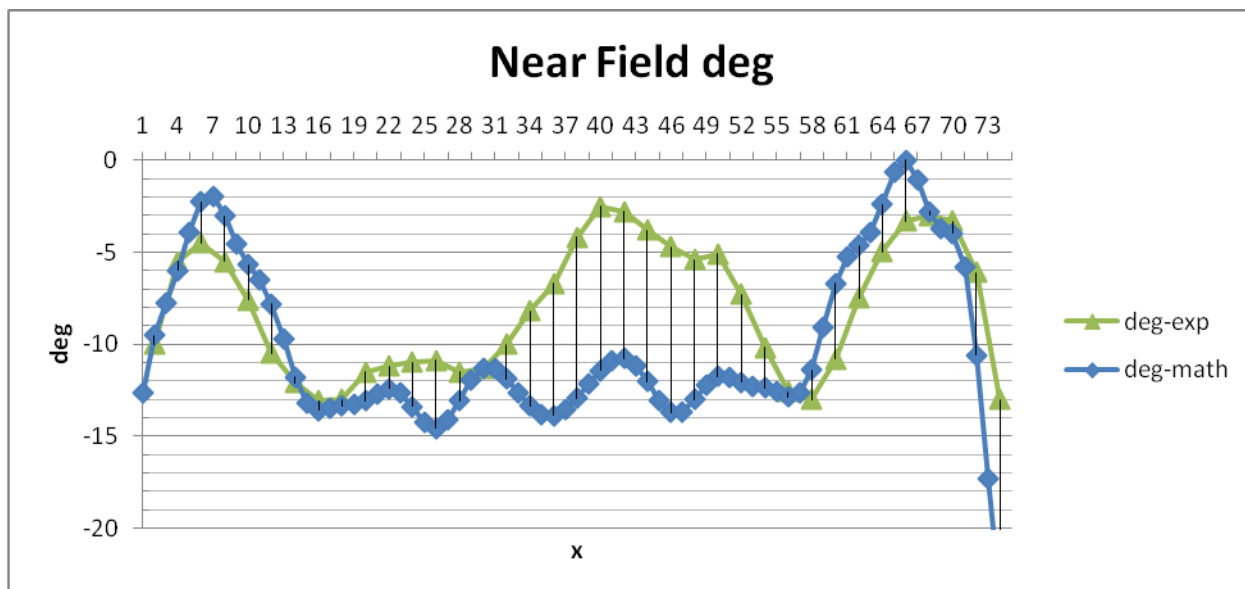


Рис. 5. Коллиматор №1 – Фазовое распределение

На рис. 6 и 7 представлены амплитудное и фазовое распределения коллиматора №2. При расчётах выбиралось расстояние 30см, при измерениях 33 см. Измеренные значения близки к расчётным, рабочая зона составляет приблизительно 25см. Неравномерность амплитудного распределения не превышает 0.3 дБ, неравномерность фазового распределения составляет приблизительно 5 градусов.

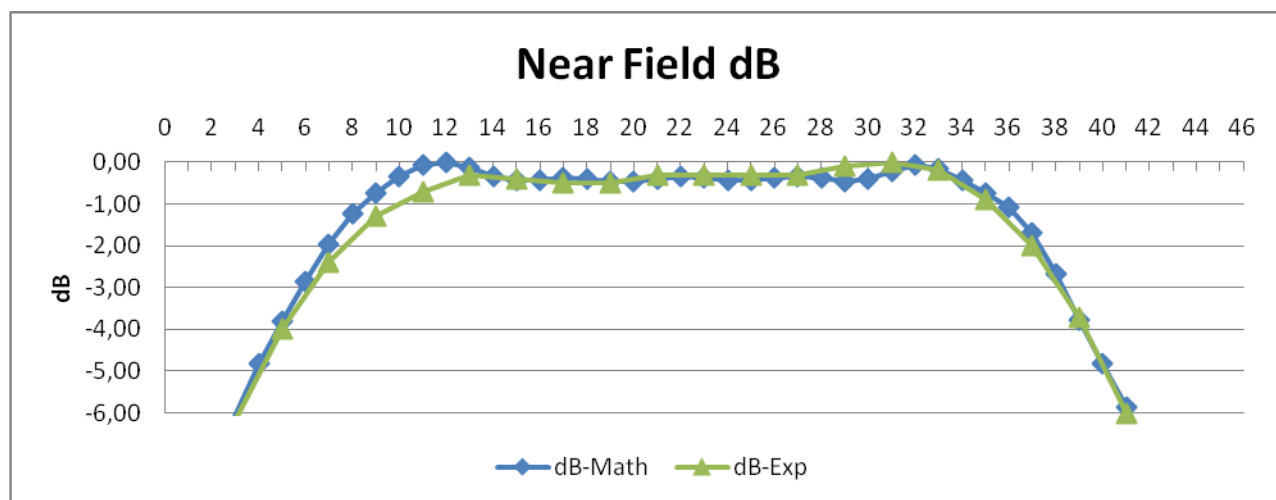


Рис. 6. Коллиматор №2 – Амплитудное распределение

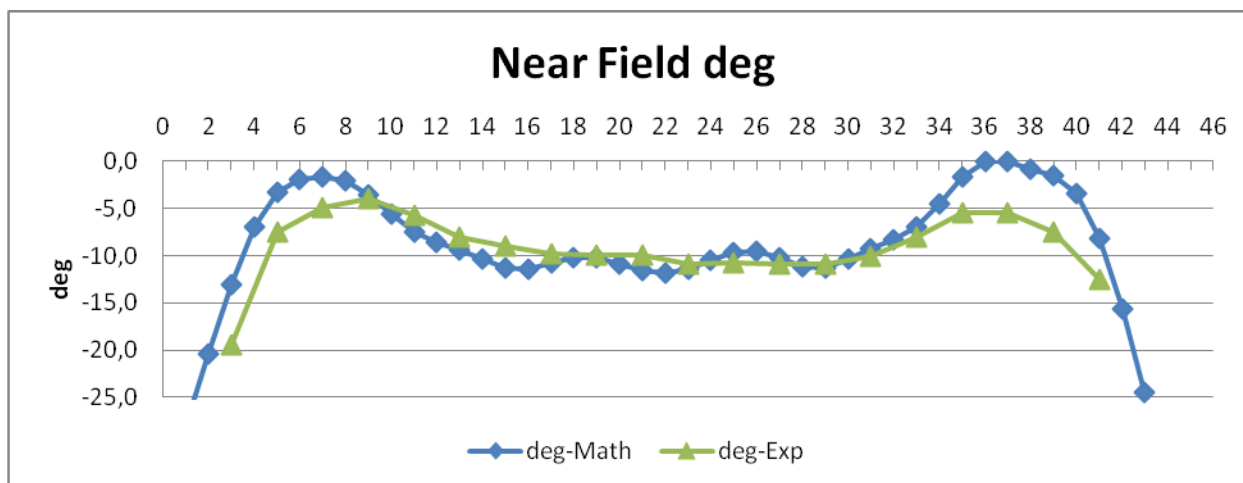


Рис. 7. Коллиматор №2 – Фазовое распределение

Можно указать ряд причин, вызывающих отклонение от постоянных значений амплитуды и фазы поля в рабочей области коллиматора. Основные из них являются дифракционные эффекты, обусловленные ограниченными размерами коллиматора, неточное расположение коллиматора в направлении испытываемой антенны, переотражения от посторонних предметов, неточность изготовления коллиматора, и т. д. На результат измерений оказывают влияние эффекты многократной дифракции между испытываемой антенной и коллиматором.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах [и др.] – Л.: Наука, 1985. – 272 с.
2. Беляев, Б. Г. Синтез апертуры плосковолнового устройства компактного полигона / Б. Г. Беляев // Антенны. – 1988. – № 35. – С. 24-35.

© Д.А. Герус, В.С. Кулик, В.Б. Ромодин, 2013

РАСЧЕТ ДОПУСКОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН

Валерий Иванович Ознобихин

ОАО «НИИЭП», г. Новосибирск, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, старший научный сотрудник, тел. (8-383)2160548, e-mail: ozval@mail.ru

Валерий Борисович Ромодин

ОАО «НИИЭП», г. Новосибирск, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (8-383)2160548, e-mail: romodin@ngs.ru

С помощью коэффициентов чувствительности по допустимой среднеквадратичной ошибке в амплитудно-фазовом распределении рассмотрена методика расчета допусков на геометрические параметры волноводно-щелевой антенны. Приводится пример расчета для пяти и двадцати элементных решеток.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, допуск, коэффициент чувствительности, дисперсия.

THE CALCULATION OF TOLERANCES OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF A WAVEGUIDE - SLOT ANTENNAS

Valery I. Oznobixin

Open Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», str., Novosibirsk, 630091, Russia, str. Novosibirsk, ul. Pisareva, 53, senior researcher, tel. (8-383)2160548, e-mail: ozval@mail.ru

Valery B. Romodin

Open Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», str., Novosibirsk, 630091, Russia, str. Novosibirsk, ul. Pisareva, 53, head of laboratory, tel. (8-383)2160548, e-mail: romodin@ngs.ru

This article contains method of mechanical tolerances calculation for waveguide-fed slot array manufacturing. Method is based on computation of sensitivity coefficients of amplitude-phase distribution. There are two examples of computation for 5- and 20- elements arrays.

Key words: waveguide-fed slot array, tolerance, sensitivity coefficient, dispersion.

При проектировании волноводно-щелевых антенн (ВЩА) важной задачей является расчет допусков на геометрические параметры. Эту задачу можно разбить на две части. В первой, по заданной вероятности превышения требуемого уровня боковых лепестков ДН, определяется допустимая дисперсия ошибок в амплитудно-фазовом распределении (АФР). По найденной дисперсии, затем, рассчитываются допуски на размеры.

В данной работе считается, что дисперсия ошибок в АФР известна [1], и рассматривается методика расчета допусков на геометрические параметры антенны. Для этого используется метод, основанный на определении коэффи-

циентов чувствительности [2]. В случае малых относительных вариаций параметров антенны для изменения напряжений на щелях справедливо выражение

$$\frac{\Delta V_n}{V_n} = \sum_i S_{v_n, p_i} \cdot \frac{\Delta p_i}{p_i}, \quad (1)$$

где S_{v_n, p_i} - коэффициент чувствительности по параметру p_i ,

$$S_{v_n, p_i} = \frac{p_i}{V_n} \cdot \frac{\partial V_n}{\partial p_i} \quad (2)$$

Здесь производные берутся при номинальных значениях p_i .

Перейдем от напряжений V_n к АФР:

$$\begin{aligned} V_n &= I_n \cdot e^{i \cdot \varphi_n}, \Delta V_n = \Delta I_n \cdot e^{i \cdot \varphi_n} + i \cdot I_n \cdot e^{i \cdot \varphi_n} \cdot \Delta \varphi_n = \\ &= I_n \cdot e^{i \cdot \varphi_n} \cdot \left(\frac{\Delta I_n}{I_n} + i \cdot \Delta \varphi_n \right) = V_n \cdot (\Delta_n + i \cdot \Delta \varphi_n), \\ \Delta_n &= \frac{\Delta I_n}{I_n}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta V_n}{V_n} = \Delta_n + i \cdot \Delta \varphi_n. \quad (3)$$

Отсюда следует

$$\begin{aligned} \Delta_n &= \operatorname{Re} \frac{\Delta V_n}{V_n} = \sum_i \operatorname{Re} S_{v_n, p_i} \cdot \frac{\Delta p_i}{p_i} \\ \Delta \varphi_n &= \operatorname{Im} \frac{\Delta V_n}{V_n} = \sum_i \operatorname{Im} S_{v_n, p_i} \cdot \frac{\Delta p_i}{p_i} \end{aligned} \quad (4)$$

При переходе к дисперсиям получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{I_n}^2 &= \sum_i S_{I_n, p_i}^2 \cdot \sigma_i^2, \\ \sigma_{\varphi_n}^2 &= \sum_i S_{\varphi_n, p_i}^2 \cdot \sigma_i^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$S_{I_n, p_i} = \operatorname{Re} S_{v_n, p_i}, S_{\varphi_n, p_i} = \operatorname{Im} S_{v_n, p_i}, \sigma_i^2 = \left(\frac{\Delta p_i}{p_i} \right)^2.$$

Среднеквадратичное отклонение σ_i называется допуском величины p_i [2-3]. Величины σ_I и σ_φ фактически характеризуют чувствительность АФР к изменению параметров p_i .

По (5) можно вычислить σ_I , σ_φ при заданных коэффициентах чувствительности и допусках p_i . Но обычно, требуется наоборот, по заданным σ_I , σ_φ и коэффициентам чувствительности определить наилучшим образом допуски σ_i , т.е. нужно найти такое распределение σ_i , при котором минимальный допуск

достигает максимально возможного значения. При этом необходимо отметить, что стоимость обеспечения заданной величины допусков может быть разной для разных параметров. Данная обратная задача может иметь, вообще говоря, неоднозначное решение.

Таким образом, задача наилучшего распределения σ_i сводится к следующему: Найти значения σ_i , при которых $\min(k_i \cdot \sigma_i)$ достигает максимума, при условии равенств (5). Здесь k_i - весовой коэффициент, учитывающий различные возможности в достижении соответствующей точности геометрического размера p_i . Сформулированная задача имеет единственное решение в виде [2] :

$$\sigma_i^2 = \frac{[\sigma_{I,\varphi}^{(1)}]^2}{k_i^2 \cdot \sum_n \frac{1}{k_n^2} \cdot S_{I,\varphi,p_n}^2}, \quad (6)$$

$$[\sigma_I^{(1)}]^2 = \sigma_I^2 - \sum_i S_{I,p_i}^2,$$

$$[\sigma_\varphi^{(1)}]^2 = \sigma_\varphi^2 - \sum_i S_{\varphi,p_i}^2.$$

В (6) два штриха при сумме означает, что суммирование проводится по параметрам, допуски на которые могут меняться, а штрих – суммирование по оставшимся параметрам. Из (5) следует, что для σ_I и σ_φ будут получаться различные σ_i , поскольку соответствующие коэффициенты чувствительности, вообще говоря, отличаются друг от друга. Следовательно, из всех σ_i , рассчитанных по σ_I и σ_φ , нужно выбирать наименьшие.

Решение (6) приводит к одинаковым значениям допусков для всех параметров (если $k_i=1$). Однако, если коэффициенты чувствительности для некоторых параметров малы, соответствующие допуски могут быть увеличены практически без изменения среднеквадратичной чувствительности. Поэтому при расчете допусков можно пренебречь влиянием тех параметров, для которых коэффициенты чувствительности меньше максимальных на порядок.

Например, в табл. 1 приведены результаты расчетов допусков на размеры пятиэлементной решетки для $\sigma_I = \sigma_\varphi = 0.03$ (что соответствует вероятности не превышения УБЛ=-27 дБ равной 0.7). В таблице указаны допуски σ_i , а также среднеквадратичные значения абсолютных вариаций Δp_i (в долях длины волны). Размеры волновода $A=0.58 \cdot \lambda$, $B=0.3585 \cdot \lambda$; толщина стенки волновода $W=0.033 \cdot \lambda$, ширина щелей $D=0.033 \cdot \lambda$. Для решетки из 20 щелей допуски приведены в табл. 2. (для $\sigma_I = \sigma_\varphi = 0.05$).

Из анализа коэффициентов чувствительности для пяти щелей (табл.1), а также аналогичных коэффициентов 20-ти элементной решетки следует, что от вариации длин щелей наиболее сильно зависят фазовые ошибки. Причем, для решетки из пяти щелей фаза, например, на первой щели значительно зависит также от изменения длин соседних щелей, для большей решетки эта зависимость значительно слабее, например, для решетки из 20-ти щелей:

$$S_{\varphi_1, L_1} = -26.7; \quad S_{\varphi_1, L_2} = 1.4; \quad S_{\varphi_1, L_{20}} = -0.04$$

Таблица 1

p_i	S_{φ_1, p_i}	S_{φ_2, p_i}	S_{φ_3, p_i}	S_{φ_4, p_i}	S_{φ_5, p_i}	S_{I_1, p_i}	S_{I_2, p_i}	S_{I_3, p_i}	S_{I_4, p_i}	S_{I_5, p_i}	$\sigma_i \%$
L_1	-9.2	-1.2	0.6	1.14	1.35	-5.1	-1.36	-0.75	0.12	0.27	0.14
L_2	6.4	-8.6	-1.9	1.1	3.0	2.54	-4.58	-1.54	-0.33	-1.94	0.2
L_3	4.7	3.8	-7.9	-2.82	-0.95	-1.98	1.8	-2.64	-0.5	-2.63	0.24
L_4	-6.6	0.8	1.97	-5.35	-3.55	0.27	-3.54	0.13	2.93	2.1	0.19
L_5	1.3	-0.6	-0.13	0.73	-5.49	0.21	0.75	-0.81	-0.62	3.22	0.15
x_1	1.4	1.3	0.64	0.1	-0.28	-4.33	-1.5	1.27	2.0	1.1	0.22
x_2	-0.5	-1.1	0.36	0.89	1.22	0.47	-2.1	-0.38	0.99	0.77	0.17
x_3	0.03	-0.4	-0.89	0.39	1.26	0.92	-0.35	-0.96	0.07	0.2	0.22
x_4	0.3	0.3	-0.14	-0.54	0.54	-0.43	0.55	-0.31	0.09	0.48	0.22
x_5	-0.9	-0.01	0.26	-0.12	-0.83	0.25	-0.74	0.41	0.36	-1.79	0.22
z_2	-7.9	-3.1	0.77	1.32	1.33	4.91	-6.8	0.3	0.84	0.63	0.14
z_3	14.3	-4.5	-5.15	0.35	1.58	3.64	14.55	-13.2	0.34	-0.38	0.14
z_4	-3.1	9.7	-0.99	-8.92	-2.65	-9.3	0.002	16.0	-9.61	2.62	0.14
z_5	-2.4	-1.6	1.58	0.73	-9.0	1.93	-2.55	-0.76	4.86	-6.7	0.14
D_1	-0.2	-0.04	0.001	0.02	0.03	-0.19	0.001	-0.03	-0.03	-0.01	1.0
D_2	0.2	-0.1	-0.06	-0.02	0.004	0.01	-0.37	0.01	-0.09	-0.07	1.0
D_3	0.05	0.1	-0.11	-0.09	-0.1	-0.09	0.006	-0.54	0.03	-0.05	1.0
D_4	-0.2	-0.01	0.06	-0.09	-0.09	0.03	-0.11	-0.01	-0.42	0.07	1.0
D_5	0.05	0.02	-0.01	0.03	-0.15	0.004	0.03	-0.03	-0.03	-0.11	1.0
A	-1.3	-0.96	-7.76	-12.0	-16.7	1.7	0.54	0.48	1.87	2.8	0.15
B	-0.4	-1.2	-1.28	-0.31	1.26	-0.45	-0.98	-0.09	1.29	0.92	0.25
W	0.1	0.25	0.3	0.4	0.85	-0.01	-0.07	-0.17	-0.24	-0.37	0.3

Фазовые ошибки, связанные с вариацией ширины волновода, накапливаются к последней щели и тем больше, чем длиннее решетка, например,

$$S_{\varphi_1, A} = -16.7; \quad S_{\varphi_5, A} = -103.$$

Поэтому допуск на ширину волновода для большей решетки должен быть жестче, чем для меньшей. От вариаций шага решетки и смещения щелей в равной степени зависят как фазовые, так и амплитудные ошибки.

Для вычисления коэффициентов чувствительности (2) использовалось численное дифференцирование напряжений V_n , рассчитываемых с помощью матричной модели ВЦА [4].

Таблица 2

p_i	$\sigma_i \%$	
	L	0.16
	x	0.6
	z	0.2
	D	1.0
	A	0.046
	B	0.26
	W	0.4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рузе Д. Влияние ошибок раскрыва на диаграмму направленности антенн // Вопросы радиолокационной техники. – 1956. – № 2.
2. Козлов В.И., Юфит Г.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью ЭВМ. – М.: Сов. Радио, 1975.
3. Воробьев Е.А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. – Л.: Судостроение, 1980.
4. Ромодин В.Б. Матрица рассеяния волноводно-щелевой антенны // Системы и средства передачи информации. Сборник научных трудов учебных институтов связи. – Л.: 1985. – С. 49-54.

© В.И. Ознобихин, В.Б. Ромодин, 2013

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРОМОК НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

Валерий Иванович Ознобихин

ОАО «НИИЭП», 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, старший научный сотрудник, тел. (8-383)2160548, e-mail: ozval@mail.ru

Валерий Борисович Ромодин

ОАО «НИИЭП», 630091, Россия, Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (8-383)2160548, e-mail: romodin@ngs.ru

В статье приводятся теоретические и экспериментальные МДН в присутствии ребер на поверхности объекта и без них. Отмечается, что кромки влияют, в основном, на уровень боковых лепестков. Это влияние определяется числом излучателей, их расстоянием до ребер, а также величиной угла клина, который образует ребро.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, диаграмма направленности, металлические кромки.

THE INFLUENCE OF THE METAL EDGES ON THE DIRECTION DIAGRAM OF A WAVEGUIDE-SLOT ANTENNA

Valery I. Oznobixin

Open Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», str., Novosibirsk, 630091, Russia, str. Novosibirsk, ul. Pisareva, 53, senior researcher, tel. (8-383)2160548, e-mail: ozval@mail.ru

Valery B. Romodin

Open Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», str., Novosibirsk, 630091, Russia, str. Novosibirsk, ul. Pisareva, 53, head of laboratory, tel. (8-383)2160548, e-mail: romodin@ngs.ru

The article contains theoretical and experimental meridional directivity patterns of waveguide-fed slot array with and without knife edges on the object. Present of edges affects mainly on sidelobe level and defines by radiator number, distances to edges and edge angles.

Key words: waveguide-fed slot array, directivity pattern, metallic edges.

При размещении волноводно-щелевых антенн (ВЩА) на реальных объектах в зону излучения попадают элементы конструкции, как правило, различного рода металлические кромки, ребра. Наиболее сильно они влияют на экваториальную диаграмму направленности (ЭДН), т.е. на ДН в плоскости, перпендикулярной направлению ребер. Считается, что ребра прямолинейны и достаточно протяженны (на практике это условие часто выполняется).

В работе [1] приводятся ЭДН щелевого излучателя для часто используемых геометрий. Заметим, ЭДН одной щели достаточно хорошо описывает ЭДН всей решетки. При расчете же меридиальной ДН (МДН, диаграмма направлен-

ности в плоскости расположения ребра) нужно учитывать все щели, и влияние ребер сказывается, в основном, на уровень боковых лепестков (БЛ).

Для оценки влияния ребер на МДН рассматривается следующая задача: линейная решетка щелей, спроектированная на заданный уровень БЛ (для случая размещения на бесконечной проводящей плоскости) помещается на поверхность с ребрами и проводится численный анализ. В случае расположения антенны в пазу приводятся экспериментальные результаты.

Для численного анализа используется матричная модель ВЩА [2]. При этом внешние (собственные и взаимные) проводимости щелей рассчитываются по формуле

$$Y_{mn} = Y_{mn}^0 + Y_{mn}^d, \quad (1)$$

где Y_{mn}^0 - проводимости щелей, расположенных на бесконечной проводящей плоскости [2],

Y_{mn}^d - дифракционная часть проводимости, обусловленная ребрами [3].

На рис. 1 и 2 приведены расчетные нормированные МДН для пяти и двадцатиэлементных решеток. Поверхности, для которых проводился анализ, были: паз, с размерами $A = 0.66 \cdot \lambda$, $L = 0.33 \cdot \lambda$, $\alpha = 75^\circ$ (A – размер дна паза, L – длина грани, α – угол наклона грани, λ – длина волны), широкая стенка волновода (размер стенки - $0.58 \cdot \lambda$) и срезанный цилиндр (величина срезки - $4 \cdot \lambda$). Сплошная кривая – ВЩА на плоскости, штриховая – в пазу, штрих пунктирная – широкая стенка волновода, пунктирная – срез цилиндра. Заметим, что в случае паза нужно учитывать 4 ребра (два внутренних и два внешних), для волновода и срезки – два ребра.

На рис. 3. приведены расчетная и измеренные МДН двадцатичетырехэлементной решетки, расположенной на плоскости (кривая 1) и в пазу с размерами $A = 0.715 \cdot \lambda$, $L = 4.38 \cdot \lambda$, $\alpha = 71^\circ$. Видно, что расчет достаточно хорошо совпадает с экспериментом.

Как показал анализ, ребра вносят систематическую ошибку в амплитудно-фазовое распределение тока по щелям. Эта ошибка может на несколько градусов сдвинуть направление главного максимума, но наиболее сильно она влияет на уровень боковых лепестков. Причем это влияние тем больше, чем меньше число излучателей. Так влиянием срезки на цилиндре на МДН двадцати щелевой решетки можно пренебречь (но на ЭДН она может влиять достаточно сильно), если расстояние от щелей до ребра $> \lambda$.

Влияние ребер на МДН антенны также определяется их числом, расстоянием до излучателя и величиной угла клина, который образует ребро. Кроме того, размер решетки существенно определяет это влияние, чем меньше число излучателей, тем оно больше.

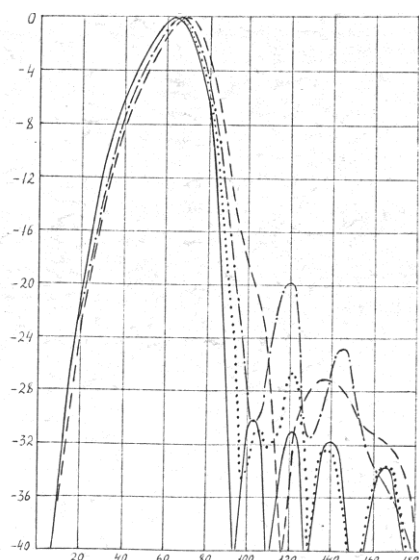


Рис. 1

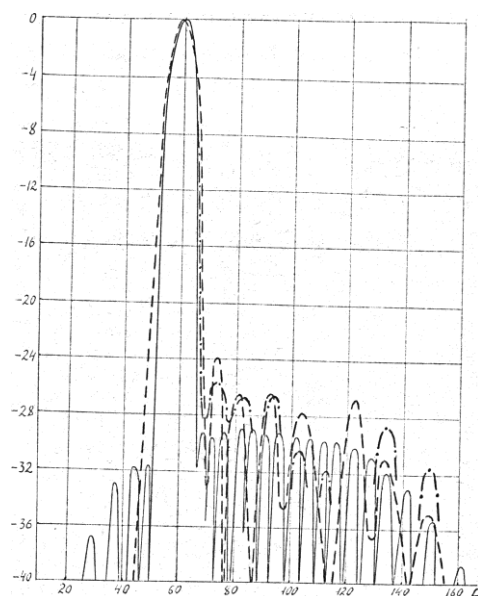


Рис. 2

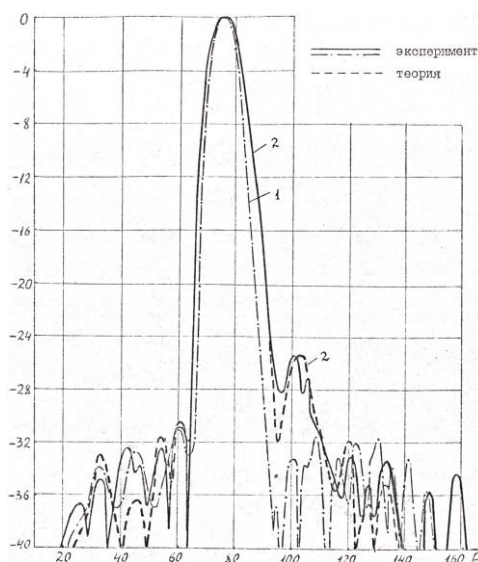


Рис. 3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ознобихин В.И., Стариков Е.И. Расчет ДН щелевого излучателя, расположенного на поверхности с ребрами // Информатика и проблемы телекоммуникации. Российская научно-техническая конференция. Материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2009. – Т. 1. – С. 96–99.
2. Ромодин В.Б. Матрица рассеяния волноводно-щелевой антенны // Системы и средства передачи информации. Сборник научных трудов учебных институтов связи. – Л.: 1985. С. 49-54.
3. Ознобихин В.И., Ромодин В.Б. Расчет внешних проводимостей щелевых излучателей // Радиотехника. – М., № 2–3. – 1993.

© В.И. Ознобихин, В.Б. Ромодин, 2013

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ НИЗКОПРОФИЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Любовь Васильевна Шебалкова

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, ведущий инженер-руководитель группы, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры АИУС, телефон: (383)216-05-48, e-mail: lvsheb@list.ru

В статье рассмотрен процесс моделирования перехода с коаксиального кабеля на низкопрофильный волновод, оценено влияние качества пайки на основные параметры перехода.

Ключевые слова: волновод, переход, моделирование.

LOW-PROFILE WAVEGUIDE EXITATION SYSTEM SIMULATION

Lyubov V. Shebalkova

Open Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», Novosibirsk, 630005, Russia, 53, Pisareva St., leading engineer-team manager. Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia, senior lecturer of AICS Department tel. (383)216-05-48, e-mail: lvsheb@list.ru

The process of the coaxial cable to low-profile waveguide transition simulation was described in this article.

Key words: waveguide, transition, simulation.

Переходы являются ключевой частью многих СВЧ устройств и предназначаются для передачи СВЧ колебаний между различными типами линий: с коаксиальной на волновод, с коаксиальной на микрополосковую линию, с микрополосковой в волновод и т.п. Проектирование перехода с коаксиального кабеля на низкопрофильный волновод является актуальной задачей.

Переходы с коаксиальной линии на волновод являются постоянным объектом исследований вследствие их широкого применения. Главным требованием коаксиально-волноводного перехода (КВП) является оптимальная матрица рассеяния: минимальные значения коэффициентов отражения на входах S_{11} и S_{22} , и близкие к 0 дБ значения коэффициентов передачи S_{12} и S_{21} в заданной полосе частот.

В прямоугольном волноводе распространяются Н и Е типы волн, основной волной является H_{10} , считается, что оптимальная рабочая полоса частот находится в пределах от $1,25f_{кр10}$ до $f_{кр20}$ [1]. В отличие от прямоугольного волновода в коаксиальной линии распространяются ТМ волны, которые не имеют критической частоты. Поэтому полоса КВП определяется полосой волноводной части. Главными целями проектирования являются нахождение оптимального положения возбуждающего зонда относительно задней стенки волновода, его

толщины и высоты, выполнение этих условий обеспечивает высокий уровень согласования. В близи зонда образуются все типы волн, но кроме основной волны остальные типы находятся в закритическом режиме, их амплитуды уменьшаются по экспоненте при удалении от зонда. В рассматриваемом примере импеданс коаксиальной линии составляет 50 Ом, волновое сопротивление волновода примерно 300 Ом, нижняя граница частотного диапазона расположена близко к критической. Традиционный подход к расчету основных размеров КВП не дает точных результатов из-за влияния затухания в волноводе [2] и из-за необходимости применения поворота.

В нашем случае КВП интегрирован с антенной системой, его размеры должны быть выбраны таким образом, что бы обеспечилось хорошее согласование непосредственно с антенной решеткой.

Размеры целесообразно рассчитать методом конечных элементов с использованием электродинамического симулятора.

Современные системы для электродинамического моделирования позволяют производить расчеты требуемых параметров с учетом конструкции объекта, решая внешние и внутренние задачи электродинамики при заданных граничных условиях, определяемых формой и электромагнитными параметрами диэлектриков и проводящих материалов.

Нахождение полей в СВЧ структурах представляет собой сложную математическую задачу, а с учетом особенностей размещения, тем более. Поэтому оптимальным решением для разработчиков в данной области является применение электродинамических симуляторов.

В современных системах электродинамического моделирования реализуются многие численные методы: метод моментов, предназначенный прежде всего для моделирования планарных структур, FDTD (Finite Difference Time Domain) - метод конечных разностей во временной области, позволяющий анализировать более сложные структуры, метод конечных элементов (МКЭ), который эффективен для широкого круга задач от анализа волноводных и полосковых структур до моделирования антенн и сложных СВЧ устройств. С его помощью с высокой точностью рассчитываются S-, Z-, T-матрицы, компоненты электромагнитного поля в структуре, в ближней и дальней зонах излучения, энергетические характеристики антенны, сопротивление входов и многое другое. Этот метод относится к универсальным методам и позволяет моделировать любые задачи, единственным ограничением является целесообразность применения в тех задачах, где лучше использовать геометрическую или физическую оптику. Например, в моделировании зеркальных антенн, модель получается очень большой, разбивается на большое количество элементов и соответственно, увеличивается время счета.

В современных мощных продуктах объединяются несколько методов, например метод моментов, методы геометрической и физической оптики - (FECO) Такое сочетание позволяет уменьшить затраты ресурсов прежде всего оперативной памяти при моделировании объектов с размерами много большими длины волны (больше 10). В результате появляется возможность решения

таких задач, как рассеяние радиоволн на самолете или корабле и распространение радиоволн в условиях городской застройки.

Также в последних версиях ANSYS HFSS (13 и 14) добавлен еще метод конечных интегралов, который использует двумерные базисные функции, описывающие токи на поверхностях, в том числе объектов с конечной проводимостью, что позволяет описывать диэлектрические и металлические объекты с потерями. Можно провести расчет поперечной площади рассеяния, расчет антенны, расположенной на большом объекте; расчет коэффициента связи между удаленными антеннами; расчет электромагнитной совместимости [3].

В зависимости от типа решаемых задач расчеты проводятся в частотной и временной областях, а также можно определять частоты собственных колебаний в резонирующих структурах.

Рассмотрим конкретный пример моделирования КВП и оценим влияние высоты пайки на его основные параметры. Трехмерная модель перехода представлена на рис. 1, основные части - кабель, прямоугольный волновод, возбуждающий зонд, диэлектрическая шайба, воздушная камера, внутри которой размещен угловой поворот, цилиндр, имитирующий припой, используемый для паяного соединения жилы кабеля с зондом. Материалы структуры выбраны из стандартной базы, определены порты и полоса частот. Именно наличие углового поворота является сложным моментом в проектировании данного КВП

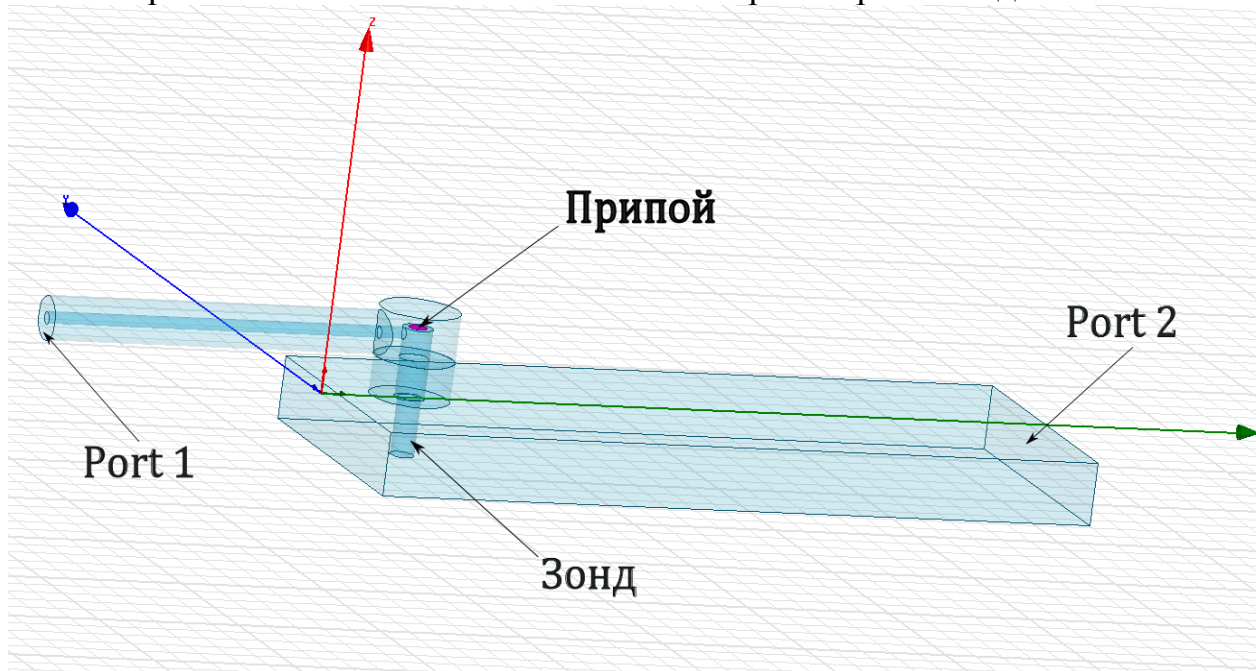


Рис. 1. Модель КВП

На рис. 2 показан график КСВН в полосе частот, его минимум составляет 1.0082 на частоте 9.12 ГГц, рабочая полоса по уровню КСВН равному 2 превышает 2 ГГц, по уровню 1.4 составляет примерно 1 ГГц. На рис. 3 показана зависимость модуля коэффициента передачи от частоты, его значения показывают, что мощность передается из порта 1 в порт 2 практически без потерь.

Оптимальные геометрические размеры: высота зонда 3.68 мм (0.17λ , λ_B - длина волны в волноводе), его диаметр 1.6 мм в волноводной части, 2 мм в воздушной камере и в диэлектрической шайбе, диаметр камеры 5.4 мм, диаметр диэлектрической шайбы 5.4 мм, расстояние до короткозамкнутой стенки 5.5 мм ($0.25\lambda_B$).

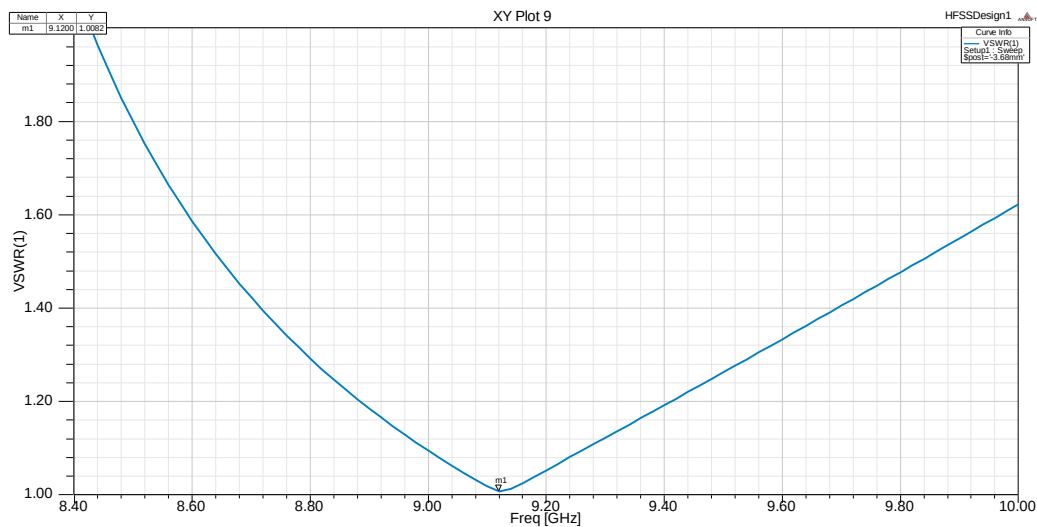


Рис. 2. Значение КСВН в полосе частот

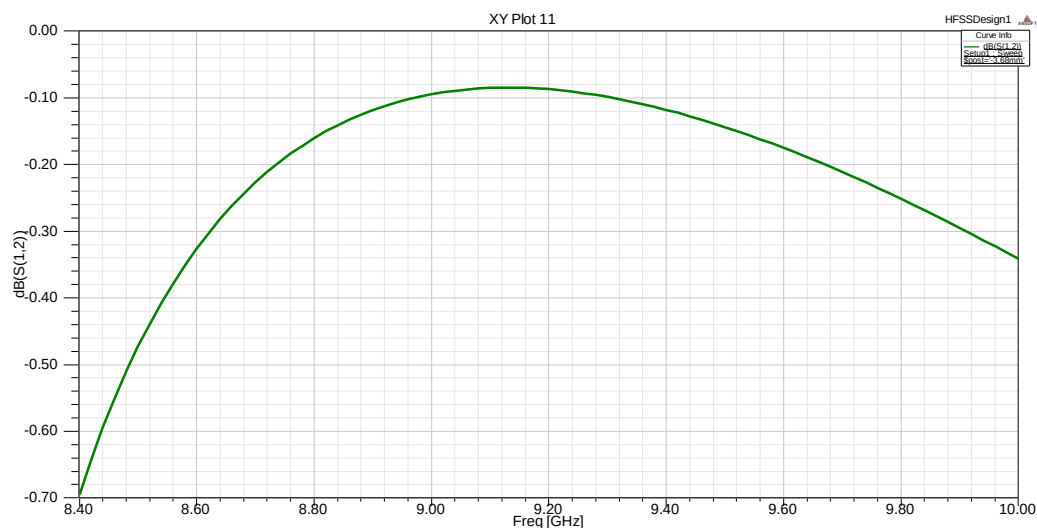


Рис. 3. Значение модуля коэффициента передачи

Рассмотрим влияние высоты слоя припоя на параметры КВП в месте паяного соединения жилы коаксиального кабеля с зондом, тем самым моделируя ситуацию наличия наплывов или натеков припоя (в реальной конструкции перехода жила помещается в прорезь зонда и оплавляется).

На рисунке 4 видны зависимости КСВН от изменения переменной \$Olovo, определяющей толщину слоя припоя и изменяющейся от 50 до 1000 мкм, хорошо просматривается тенденция увеличения значения КСВН при увеличении данного параметра. На рисунке 5 показана зависимость минимального значения

КСВН от толщины припоя. Видно, что КСВН начинает ухудшаться при высотах от 600 мкм, но учитывая, что при изготовлении КВП многие факторы могут повлиять на его параметры, следует минимизировать риски, в том числе за счет качества выполнения паяного соединения.

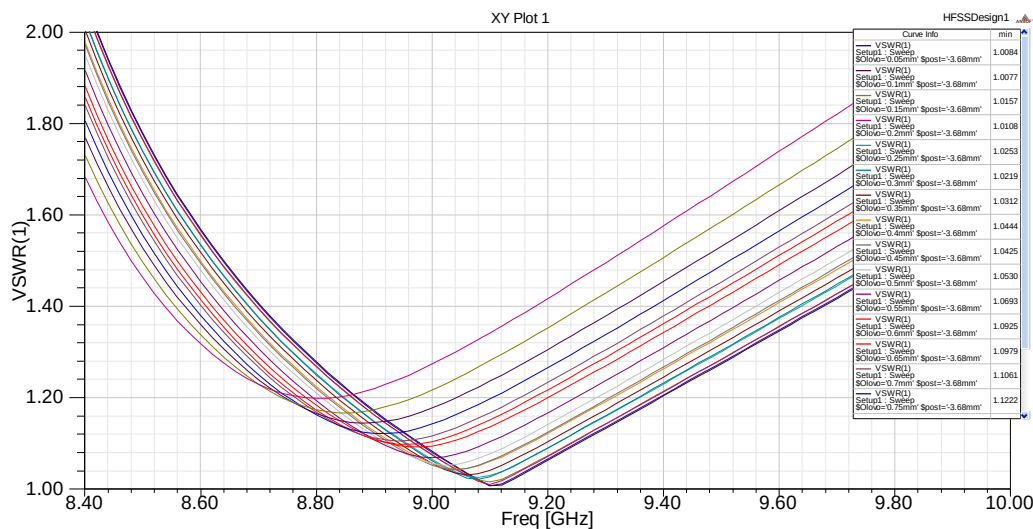


Рис. 4. Значение КСВН в полосе частот при разных толщинах припоя

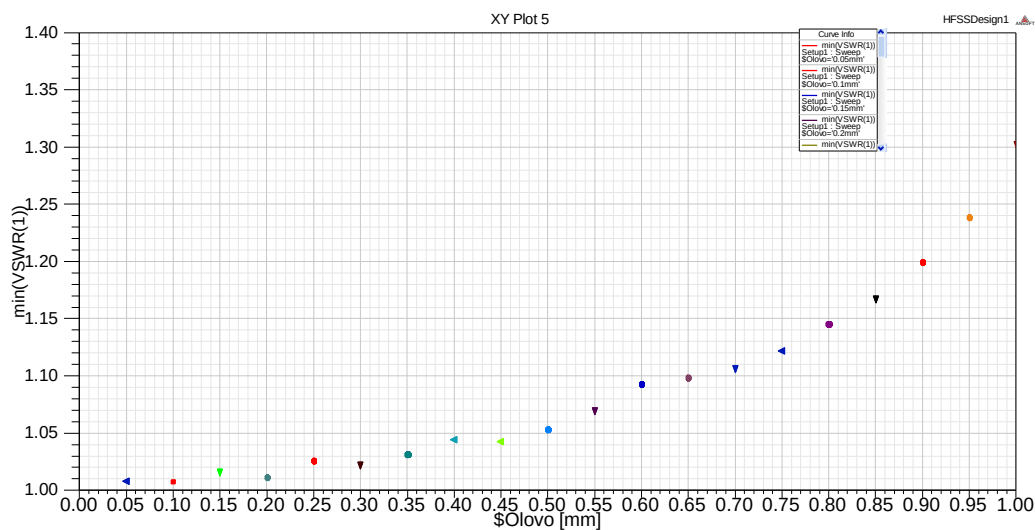


Рис. 5. Минимальные значения КСВН при разных толщинах припоя

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Collin R E. Field Theory of Guided Waves, McGraw-Hill, 1960
2. Н. А. Семенов. Техническая электродинамика: Учебное пособие для электротехнических институтов связи. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
3. Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS – М., ООО «Оркада», 2012

© Л.В. Шебалкова, 2013

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА В ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Андрей Геннадьевич Батури

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (913)902-09-74, e-mail: rock_@mail.ru

Максим Константинович Печёрин

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (913)742-65-80, e-mail: laeling@mail.ru

Большинство существующих оптоэлектронных дальномеров используют два принципа измерения дальности – импульсный и фазовый. При одинаковой средней мощности и прочих равных условиях импульсные дальномеры имеют большую дальность действия по сравнению с фазовыми, имеющими источники непрерывного излучения, но в отношении точности импульсные системы уступают фазовым. В связи с этим весьма перспективной представляется система, в которой импульсный характер излучения сочетался бы с фазовым методом индикации принципом обработки сигналов, что позволяет объединить преимущества двух методов дальнометрии.

В работе рассмотрены три разновидности импульсно-фазовых методов измерения дальности на примере дальномеров ГДФИ-1, ГДФИ-2 и ГДФИ-3. Также в работе предложен вариант практического развития одного из методов.

Ключевые слова: дальномер, оптико-электронные приборы, методы измерения дальности, методы обработки сигнала.

RANGE MEASUREMENTS SIGNAL PROCESSING METHODS ANALYSIS IN PULSE-PHASE SYSTEMS

Andrey G. Baturin

Joint Stock Company «Research institute of electronic devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, head of laboratory, tel (913)902-09-74, e-mail: rock_@mail.ru

Maxim K. Pecherin

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marks prospect, post-graduate, tel (913)742-65-80, e-mail: laeling@mail.ru

Most of existing optical rangefinders use two principles of range measuring – pulse and phase. At the same mean power level and other equal conditions pulse optical rangefinders have a long range compared with the phase that have a source of continuous radiation. In relation to accuracy pulse rangefinders worse than phase rangefinders. In connection with the pulsed character of the radiation system combined with the phase method of signal processing with benefits both methods.

In this article were discussed three types of range measuring methods with example of optical rangefinders GDFI-1, GDFI-2 and GDFI-3. Also an article proposes one of version of the progress about one of thought's methods.

Key words: rangefinder, optical-electronic devices, method of range measuring, signal processing methods.

Импульсно-фазовые системы дальнометрии объединяют преимущества импульсных и фазовых систем. Интерес к данным системам послужил импульсом к исследованиям, позволившим реализовать следующие методы обработки сигнала: модуляцию по амплитуде высокочастотного сигнала сигналом импульса излучения; регистрацию запаздывания отраженного импульса через изменение значения фазы опорного сигнала; преобразование частоты гармонических составляющих отраженного и излученного сигналов. [1]

В импульсно-фазовом методе, основанном на модуляции по амплитуде высокочастотного сигнала сигналом импульса излучения, измеряется фаза высокочастотного сигнала. Сравнение ее значения с фазой опорного колебания осуществляется модуляционным методом детектирования, что позволяет существенно повысить чувствительность индикации. [2] Этот метод реализован в дальнометре ГДФИ-1. Принцип действия заключается в следующем. Положим, что имеется импульс излучения длительностью $\tau_{\text{и}}$, модулированный по интенсивности с частотой $\omega_1 \gg 2\pi/\tau_{\text{и}}$. В этом случае отраженный от объекта сигнал на выходе фотоприемника может быть описан выражением:

$$U_c(t) = U_0 [1 + m \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \varphi_r)] \quad (1)$$

при $n \cdot T < t < n \cdot T + \tau_{\text{и}}$,

где m – коэффициент модуляции,

φ_r – фаза колебания, определяемая значением дистанции,

T – период следования импульсов,

n – кратность периода.

Сигнал с выхода фотоприемника подается на один вход фазового детектора, в то время как на второй подается опорный сигнал:

$$U_r(t) = U_m \cdot \sin \left[\omega_1 \cdot t + \varphi(\tau) + \frac{\pi}{2} (-1)^n \right] \quad (2)$$

где $\varphi(\tau)$ – плавно регулируемая известная фаза.

На выходе фильтра фазового детектора будет вырабатываться импульсный сигнал амплитудой:

$$U_{\text{вых}} = 0,5 \cdot m \cdot U_0 \cdot U_m \cdot \cos \left[\varphi(\tau) - \varphi_r + \frac{\pi}{2} (-1)^n \right] \quad (3)$$

Амплитуды соседних импульсов отличаются друг от друга на значение

$$\Delta U = 0,5 \cdot m \cdot U_0 \cdot U_m \cdot \sin [\varphi(\tau) - \varphi_r] \quad (4)$$

В данной системе неизвестная фаза может быть определена по фазе опорного колебания $\varphi(\tau)$, значение которой отсчитывается в положении, соответствующем равенству амплитуд выходных импульсов. К недостатку такого варианта построения системы относится сложность формирования мощного токового импульса с высоким коэффициентом модуляции при синусоидальной модулирующей функции [1]. Частично данную проблему можно решить с использованием импульсной модуляции.

Существует способ построения дальномера без дополнительной модуляции импульса излучения – преобразование частоты гармонических составляющих отраженного и излученного сигналов. Данный метод реализован в дальномере ГДФИ-3 [3].

Принцип действия заключается в следующем: излучается повторяющийся импульсный сигнал с периодом следования T . Такой сигнал можно изобразить в виде суммы гармонических колебаний частот, кратных $F=1/T$:

$$P(t) = P_0 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(2\pi \cdot n \cdot F \cdot t - \varphi_n), \quad (5)$$

где P_0 – амплитуда мощности импульсов,

A_n – амплитуда гармоник импульса с единичной амплитудой.

Аналогично, выходной сигнал с фотоприемника можно описать следующим образом:

$$U(t) = K \cdot P_0 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\left(2\pi \cdot n \cdot F \cdot t - \varphi_n - \frac{2\pi n \cdot F}{c} \cdot 2D\right), \quad (6)$$

Последний член выражения, расположенного под функцией $\cos$, характеризует значение фазы запаздывания каждой гармоники, связанное с прохождением сигналом удвоенного расстояния до объекта. Очевидно, что это значение тем больше, чем выше номер гармоники n . Таким образом, каждая гармоническая составляющая несет информацию о значении дистанции, которая, следовательно, может быть определена путем измерения разности фаз гармоники одного номера, выделяемых из излучаемого и отраженного сигнала. Выделить и усилить непосредственно колебания таких частот из импульсной последовательности очень сложно, да и нецелесообразно. Наиболее удобно использовать широко распространенный в непрерывно-фазовых системах метод преобразования частоты, при этом значение фазы высокочастотного колебания переносится на колебание низкой частоты, полученное путем смешивания принимаемого сигнала с напряжением гетеродина [3].

Недостатком данного метода является наличие потерь за счет выбора высших гармоник для реализации высокой точности [1].

В системе, основанной на регистрации запаздывания отраженного импульса через изменение значения фазы опорного сигнала, момент излучения жестко

привязан к фазе опорного колебания, а по моменту появления отраженного сигнала фиксируется фазовый набег опорного сигнала [1]. Этот метод, реализованный в дальномере ГДФИ-2, будучи фазовым по методу индикации, не требует дополнительной модуляции излучения, что существенно упрощает передающий тракт и снижает требования к излучаемой длительности импульса [4].

Принцип действия заключается в следующем: положим, что имеется высокочастотное колебание вида $a=A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1)$. Время запаздывания отраженного импульса может быть выражено через изменение значения фазы аргумента аследующим образом:

$$a(t) = A \cdot \sin \left[\omega \cdot t + \varphi_1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot D - k \cdot 2\pi \right) \right], \quad (7)$$

где D – измеряемое расстояние

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot c}{\omega}$$

k – целое число фазовых циклов ω за время запаздывания.

Очевидно, что если имеется возможность точного измерения фаз колебания a , соответствующих моментам излучения и прихода сигнала, то время запаздывания можно определять по разности их значений $\Delta\varphi$. В пределах одного фазового цикла частоты ω время запаздывания $\Delta t = \omega \Delta\varphi$.

В ГДФИ-2 опорное напряжение имеет вид:

$$U_{\text{оп}}(t) = U_m \cdot \cos \left[\omega \cdot t + \varphi_1 + \varphi_n + \frac{\pi}{2} (-1)^n \right], \quad (8)$$

где φ_n – плавно меняющаяся фаза,

n – порядковый номер импульса.

Опорное напряжение $U_{\text{оп}}(t)$ вместе с отраженным импульсом $U(t)$ поступает на фазовый детектор. Амплитуду напряжения на выходе фазового детектора можно представить в виде:

$$U_{\text{вых}} \approx \int_{t_1}^{t_1 + \tau_n} U_{\text{оп}}(t) \cdot U(t) dt, \quad (9)$$

где τ_n – длительность импульса излучения,

$t_1 = 2 \cdot D/c$ – задержка принятого импульса.

На выходе детектора будет существовать последовательность парных импульсов, амплитуды которых отличаются на величину

$$\Delta U = 2U_m \cdot U_c \frac{\sin(\omega \cdot \tau_n / 2)}{\omega \cdot \tau_n / 2} \sin \left(\frac{\omega \cdot T + \omega \cdot \tau_n + \omega \cdot t_1}{2} + \varphi_1 + \varphi_n \right), \quad (10)$$

где U_c – амплитуда входного сигнала $U(t)$,

T – период повторения импульсов сигнала $U(t)$.

Дальность определяется исходя из разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_{n1} - \varphi_{n2}$ при соблюдении условия равенства $\Delta U = 0$ в момент измерения.

Недостатком метода является ограничение выбора опорной частоты из-за необходимости соблюдения условия $\tau_u \ll T_{on}/2$. На период опорного колебания T_{on} , как и в фазовом методе, накладываются ограничения по однозначности измерения с одной стороны и обеспечения минимальной разности фаз для требуемого разрешения по дальности.

В [5] предложен вариант развития данного метода. Суть предложения заключается в следующем: формируются два опорных колебания

$$U_{оп1}(t) = U_m \cdot [1 + \cos(\omega \cdot t + \varphi_1)] \quad (11)$$

$$U_{оп2}(t) = U_m \cdot [1 - \cos(\omega \cdot t + \varphi_1)] \quad (12)$$

Каждое из опорных колебаний $U_{оп1}(t)$ и $U_{оп2}(t)$ вместе с отраженным импульсом $U(t)$ поступают на свой фазовый детектор. Амплитуду сигналов с выходов фазовых детекторов можно описать формулами

$$U_{вых1} \approx \int_{t_1}^{t_1 + \tau_n} U_{оп1}(t) \cdot U(t) dt \quad (13)$$

$$U_{вых2} \approx \int_{t_1}^{t_1 + \tau_n} U_{оп2}(t) \cdot U(t) dt \quad (14)$$

За счет этого исключается необходимость переворота фазы опорного колебания каждый период излучения импульсного сигнала. При изменении фазы опорных колебаний от 0 до π измерения являются однозначными, а в интервале от $0,3\pi$ до $0,7\pi$ зависимость выходного напряжения фазового детектора от дальности в достаточной степени линейна. В связи с тем, что крутизна характеристик фазовых детекторов имеет противоположный знак, вычисление дальности можно свести к отношению амплитуд сигналов с выхода фазовых детекторов.

На основании вышеизложенного могут быть сделаны следующие выводы:

1. Наиболее перспективным представляется реализация импульсно-фазового метода, основанного на регистрации запаздывания отраженного импульса через изменение значения фазы опорного сигнала. В данном методе не требуется сложная модуляция импульса излучения, что делает возможным

применение импульсных излучателей с простым генератором тока накачки, а также удастся избежать применения сложной аналоговой части схемы обработки с использованием гетеродинов и смесителей.

2. Использование двух опорных противофазных колебаний позволяет исключить переворот фазы опорного колебания и свести измерение дальности к сравнению амплитуд двух импульсов с выходов фазовых детекторов. В этом случае, модуляционный фазовый детектор выполняется в виде схемы стробирования опорного колебания входным сигналом с интегратором. Дальнейшая обработка сигналов с выходов модуляционных фазовых детекторов может вестись как аналоговыми, так и цифровыми методами. Однако необходимо учесть, что применение цифровых методов обработки положительно сказывается на стабильности результатов измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусьяков М.П., Миценко И. Д. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. – М.: Радио и Связь, 1991. – 168 с.
2. Дерягин В.Н., Баркалов С.С. Импульсно-фазовый светолокационный дальномер ГДФИ-1 с полупроводниковым излучателем // Оптико-механическая промышленность. – 1970. – № 6. – С. 27-29.
3. Дерягин В.Н., Баркалов С.С., Попов Ю.В. Малогабаритный импульсно-фазовый светодальномер ГДФИ-3 с цифровым выходом на основе полупроводникового квантового генератора // Оптико-механическая промышленность. – 1972. – № 7. – С. 23-27.
4. Дерягин В.Н., Баркалов С.С., Попов Ю.В. Высокоточный импульсный светодальномер ГДФИ-2 с фазовой индикацией на основе неохлаждаемого ПКГ // Оптико-механическая промышленность. – 1970. – № 12. – С. 27-31.
5. Лазерный неконтактный датчик высоты : пат. 73066 Рос. Федерация : МПК⁷ F 42 C 13/02 / Батурин А.Г., Баннов В.Я., Мешков Е.Ю. ; заявл. 27.12.2007 ; опубл. 10.05.2008

© А.Г. Батурин, М.К. Печёрин, 2013

ОЦЕНКА И УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА РАБОТУ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Юрий Анатольевич Печёнкин

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, ведущий инженер, руководитель группы, тел. (913)462-18-73, e-mail: zjapz@yandex.ru

Валерий Анатольевич Колесников

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, ведущий инженер, руководитель группы, тел. (913)945-42-83, e-mail: kolesnikov@cn.ru

В статье приведён метод расчёта помехи обратного рассеяния, с высокой точностью описывающий сигналы реальных оптических локационных систем (ОЛС), применимый в практике инженерных разработок. Предложен способ компенсации влияния помех на работу ОЛС.

Ключевые слова: оптическая локационная система, помеха обратного рассеяния, математическая модель входных сигналов.

EVALUATION AND ACCOUNTING OF THE INFLUENCE OF THE NOISE INVERSE SCATTERING ON THE WORK OF THE OPTICAL LOCATION DEVICES

Yuriy A. Pechenkin

Joint Stock Company «Research institute of electronic devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, senior engineer, tel (913)462-18-73, e-mail: zjapz@yandex.ru

Valeriy A. Kolesnikov

Joint Stock Company «Research institute of electronic devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, senior engineer, tel (913)945-42-83, e-mail: kolesnikov@cn.ru

The article presents a method for calculating the scattering noise with high accuracy describes the real signals for optical location systems (OLS) applicable in practice engineering. It suggests a method of compensating the noise influence on the OLS.

Key words: optical location system, scattering noise, mathematical model of the input signals.

Работа оптических локационных систем (ОЛС) в условиях Земной атмосферы всегда происходит на фоне случайных естественных и искусственных образований (помех), которые ограничивают дальность действия и помехозащищенность этих устройств. Одной из основных проблем синтеза алгоритмов обработки сигналов в ОЛС является получение характеристик сигналов, отраженных от целей и помех, т.е. создание их математических моделей адекватных поставленной перед ОЛС задаче.

Предлагаемые в специализированной научно-технической литературе методы расчёта характеристик сигналов ОЛС содержат ряд упрощений. Приво-

дятся формулы расчёта для стационарного режима излучения, для Гауссовой формы импульса подсвета, для конусообразных диаграмм направленности приёмника и передатчика [1], при этом диаграммы задаются значением их ширины, а не функцией направления.

С другой стороны, теория оптического зондирования атмосферы перегружена разнообразием методов интерпретации лидарных измерений, вплоть до эвристических [2], предметом исследования которых являются эффекты упругого и неупругого взаимодействия излучения с частицами аэрозоля, молекулами и атомами атмосферных газов. При этом в лидарных уравнениях диаграммы направленности приёмника и передатчика считаются идеально совмещёнными и не учитывается зависимость коэффициента их перекрытия от дальности до исследуемого объекта.

Всё это ограничивает возможность применения предлагаемых методов в практике инженерных расчётов при проектировании оптико-локационных устройств, в особенности систем ближней локации.

Решение поставленной задачи будем рассматривать применительно к широко распространённому типу ОЛС, предназначенных для обнаружения различных объектов и оценки расстояний до их поверхности. Работают такие ОЛС на длинах волн не совпадающих с линиями резонансного поглощения (рассеяния) атмосферными газами и взаимодействие излучения со средой ограничивается Релеевским и геометрическим рассеянием.

При работе ОЛС в условиях Земной атмосферы основным видом помехи является обратное рассеяние излучения передатчика в аэрозолях (дымы, пыль, метеообразования). С достаточной для практики точностью процесс распространения лазерных пучков в аэрозольной среде можно описывать, располагая всего двумя оптическими характеристиками: коэффициентом ослабления (рассеяния) σ или плотностью помехи, и индикатрисой рассеяния $\chi(\square)$, частным случаем которой при $\square = \square$ является коэффициент обратного рассеяния $\chi_{\square\square}$. Коэффициент обратного рассеяния различных метеообразований лежит в пределах 0,05-0,2 ; наиболее вероятное значение $\chi_{\square\square} = 0,1$ [3].

Рассматривая среду распространения излучения как линейную систему, что справедливо в широком диапазоне мощностей передатчика, сигнал помехи обратного рассеяния на выходе линейной части фотоприёмного тракта определяется суперпозицией откликов на отражения от бесконечного числа бесконечно тонких слоёв среды:

$$U_{\Pi}(t, R_{\Pi}) := \int_0^{R_{\Pi}} \frac{\varepsilon(R) \cdot \chi_{\Pi} \cdot DX(R)}{4 \cdot \rho_{\Sigma}} \cdot U_{\text{сф}}\left(t - \frac{2 \cdot R}{c}\right) \cdot e^{-2 \cdot \int_0^R \sigma(r) dr} dR, \quad (1)$$

где $\sigma(r)$, $\varepsilon(r)$ – коэффициенты ослабления и рассеяния соответственно, для большинства метеообразований с достаточной для практики точностью можно

считать $\sigma(r)=\varepsilon(r)$, т.е. ослабление сигнала происходит только в результате рассеяния;

$DX(R)$ - дистанционная характеристика ОЛС – зависимость амплитуды сигнала, отражённого от поверхности с коэффициентом диффузного отражения ρ_z , от дальности в незамутнённой среде;

$U_{сф}(t)$ – вид сигнала на выходе линейного тракта приёмной части ОЛС нормированный к амплитуде 1 В.

Дистанционная характеристика может быть получена аналитически как результат оптимизации оптико-конструктивных параметров на этапе проектирования ОЛС, но наиболее достоверный результат даёт расчёт по формуле (1) при использовании дистанционной характеристики, экспериментально снятой в процессе макетирования приёмо-передающих узлов разрабатываемого изделия. Точно также максимально достоверный результат получается при экспериментальном определении зависимости $U_{сф}(t)$ с помощью осциллографа на выходе линейного тракта приёмной части ОЛС.

Полезный сигнал, отражённый от поверхности обнаруживаемого объекта с коэффициентом отражения ρ , находящейся на расстоянии $R_{ц}$ с учётом ослабления $\sigma(R)$ в атмосфере определяется выражением:

$$U_c(t, R_{ц}) = DX(R_{ц}) \cdot \frac{\rho}{\rho_z} \cdot U_{сф}\left(t - \frac{2 \cdot R_{ц}}{c}\right) \cdot e^{-2 \cdot \int_0^{R_{ц}} \sigma(R) dR} \quad (2)$$

Сигналы $U_n(t, R_{ц})$ и $U_c(t, R_{ц})$ аддитивно смешиваются и обработка результирующего сигнала без учёта влияния помех приводит к ошибкам в определение дальности.

Можно показать, что в реальных условиях работы ОЛС для различных методов дальнометрии величина этой ошибки превосходит требуемую точность измерений. Для компенсации ошибки в процессе обработки необходима информация о параметрах помехового сигнала, которая может быть получена по анализу сигналов независимых каналов в многоканальной ОЛС или по специально введённому дополнительному помеховому каналу. Наиболее экономичный вариант реализации помехового канала – светодиод, зондирующий пространство ближней зоны приёмника в промежутке между импульсами излучения лазера основного канала.

На рис. 1 приведён вариант схемы компенсации влияния помехи обратного рассеяния на работу ОЛС.

Описанный способ учёта влияния помехи обратного рассеяния наиболее эффективен для систем ближней локации, работающих на дальностях, для которых окружающие ОЛС помеховые образования можно считать однородными.

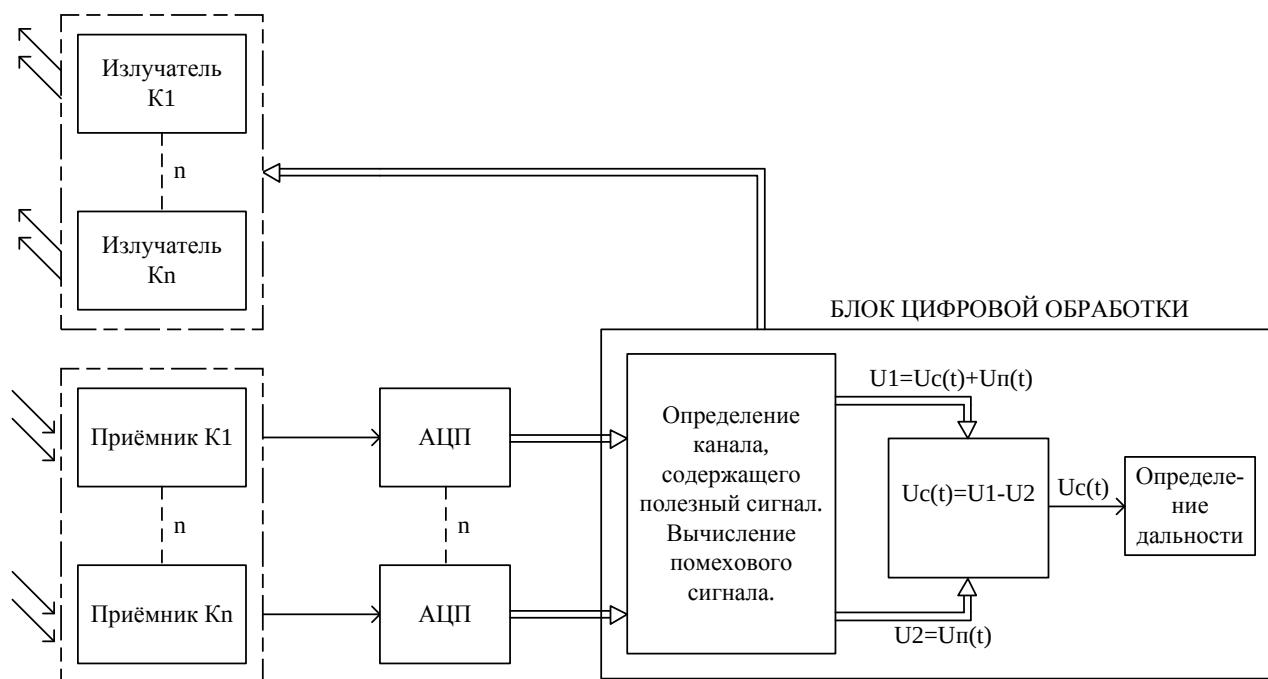


Рис. 1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. В. Молебный. Оптико-локационные системы. – М.: Машиностроение, 1981.– 181 с.
2. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Под ред. В.И. Самохвалова. – Новосибирск: Наука, 1987. – 185 с.
3. Ослабление лазерного излучения в гидропомехах. Под ред. М.А. Колосова. – М.: Наука, 1977. – 340 с

© Ю.А. Печёнкин, В.А. Колесников, 2013

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Неъматжон Рахимович Рахимов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Татьяна Вячеславовна Ларина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры технологии оптического производства, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: larina_t_v@mail.ru

Олег Кузьмич Ушаков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, директор Института оптики и оптических технологий (ИОиОТ) СГГА, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: nst.oot@ssga.ru

Вадим Аркадьевич Жмудь

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 630015, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации, тел. 8-961-875-19-17, e-mail: oao_nips@bk.ru

Павел Вадимович Петров

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зам. директора ИОиОТ СГГА по научно-исследовательской работе студентов, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail p.t.petrov@mail.ru

В статье рассмотрено оптоэлектронное устройство для определения усталости металлических конструкций, которое состоит из датчика и электронного блока.

Ключевые слова: источники и приемники оптического излучения, оптоволокно, оптоэлектронное устройство, усталость материала, усталостная долговечность.

OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR CONTROL OF FATIGUE MACHINE-BUILDING STRUCTURES

Nematgon R. Rakhimov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, D.Sc., Professor of

the Department of special devices, technologies and materials, phone +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Tatiana V. Larina

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, associate Professor of the Department of technology of optical production, body-von +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: larina_t_v@mail.ru

Oleg K. Ushakov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph.D., professor. Director of the Institute of Optics and Optical Technologies (ИОиОТ) SSGA, phone +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: nst.oot@ssga.ru

Vadim A. Zmud

Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630015, Russia, Novosibirsk, St. Karl Marx prospect, 20, D.Sc., Professor, Department of Automation, tel. 8-961-875-19-17, e-mail: oao_nips@bk.ru

Pavel V. Petrov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph.D., professor. Deputy Director of the IO & ot SSGA on scientific-research work of students, phone +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail p.t.petrov@mail.ru

In the article the оптоэлектронное device for determination of fatigue metallic-building designs, which consists of a sensor and an electronic unit.

Key words: sources and receivers of optical radiation, optical fiber, opto-reign-a device, material fatigue, fatigue durability.

Усталостью материалов (в частности, металлов) называется явление разрушения при многократном повторении напряжений. Способность материалов сопротивляться разрушению при повторно-переменных напряжениях называется выносливостью материала [1-5].

Усталостное разрушение наблюдается при наличии, одной из следующих особенностей нагружения:

1) при многократном нагружении одного знака, например, периодически изменяющегося от нуля до максимума;

2) при многократном нагружении, периодически изменяющемся не только по величине, но и по знаку (знакопеременное нагружение), когда на выносливость материала одновременно оказывает влияние и повторность, и переменность нагружения. При этом различают симметричные нагруженные и несимметричные.

Для разрушения от усталости недостаточно переменности напряжений. Необходимо также, чтобы напряжения имели определенную величину. Максимальное напряжение, при котором материал способен сопротивляться, не раз-

рушаясь, при любом произвольно большом числе повторений нагружений, называется пределом выносливости.

На усталость деталей влияет ряд факторов (рис. 1).

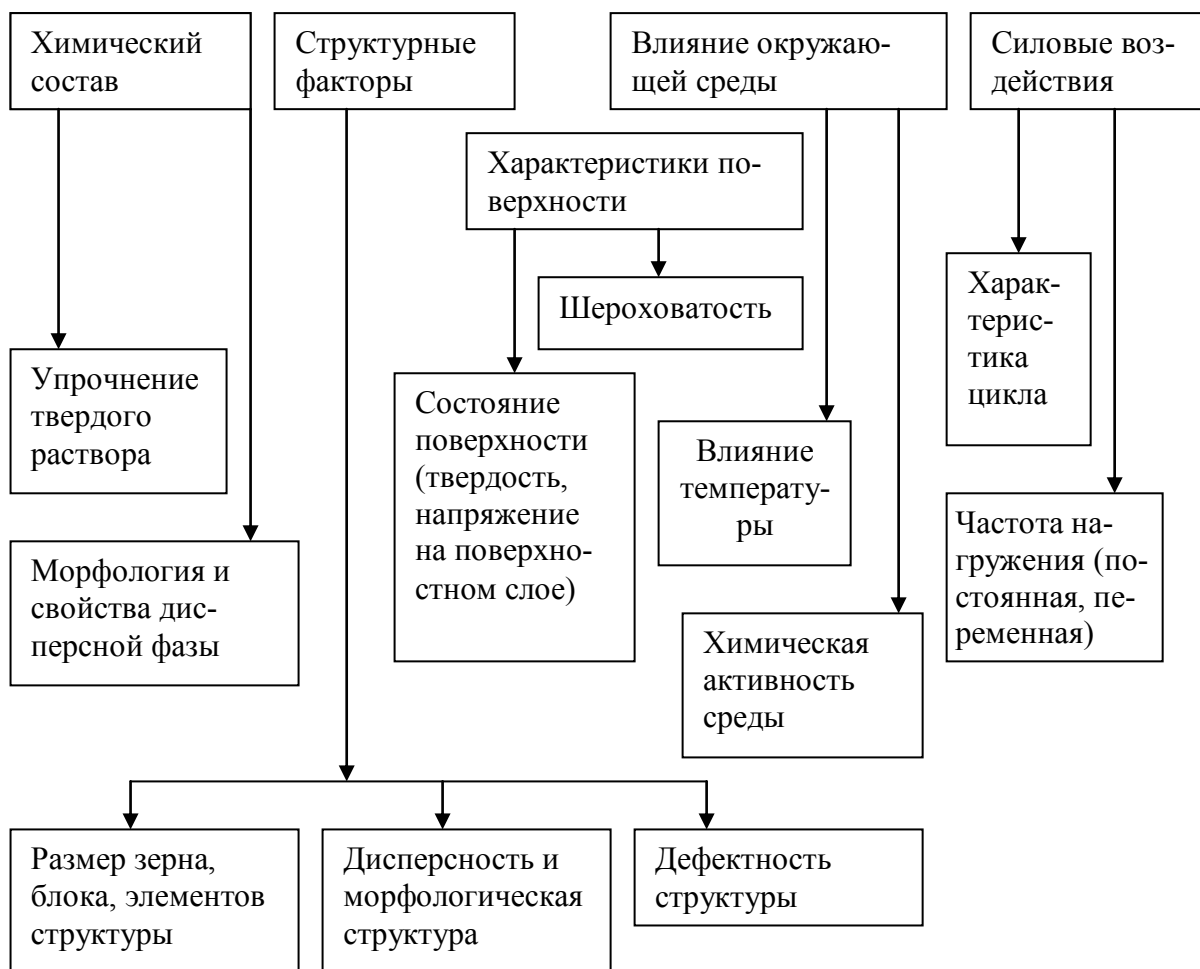


Рис. 1. Факторы, влияющие на усталостную прочность

Разрушение от усталости по сравнению с разрушением от статической нагрузки имеет ряд особенностей:

- оно происходит при напряжениях, меньших, чем при статической нагрузке, меньших пределах текучести или временного сопротивления;

- разрушение начинается на поверхности (или вблизи от нее) локально, в местах концентрации напряжений (деформации). Локальную концентрацию напряжений создают повреждения поверхности в результате циклического нагружения либо надрезы в виде следов обработки, воздействия среды;

- разрушение протекает в несколько стадий, характеризующих процессы накопления повреждений в материале, образования трещин усталости, постепенное развитие и слияние некоторых из них в одну магистральную трещину и быстрое окончательное разрушение;

- разрушение имеет характерное строение излома, отражающее последовательность процессов усталости. Излом состоит из очага разрушения (места образования микротрещин) и двух зон – усталости и долома.

Усталостный излом металла имеет характерный вид. На нем обычно можно наблюдать две зоны: одна из них (А) гладкая, притертая, образованная вследствие постепенного развития трещины; другая (В) крупнозернистая, образованная при окончательном изломе ослабленного развившейся усталостной трещиной сечения детали. Зона В у хрупких материалов имеет крупнокристаллическое, а у вязких – волокнистое строение.

Механизм образования трещин при повторно-переменном напряжении весьма сложен и не может считаться полностью изученным из несомненных положений теории усталости можно отметить следующие.

1) процессы, происходящие в материале при повторно-переменном нагружении носят резко выраженный местный характер;

2) решающее влияние на явление усталости до образования первой трещины оказывают касательные напряжения, вызывающие пластические сдвиги и разрушение путем среза. Развитие усталостных трещин ускоряется при наличии растягивающих напряжений и у пластичных, и в особенности у хрупких материалов (типа чугуна), в которых появление третьей отрыва значительно повышает чувствительность к растягивающим напряжениям.

Предел выносливости определяется экспериментально на соответствующих испытательных машинах путем испытания партии образцов из данного материала в количестве не менее 6–12 штук. Предел выносливости зависит от многих факторов, в том числе от формы и размера образца или детали, способа ее обработки, состояния поверхности, вида напряженного состояния (растяжение – сжатие, кручение, изгиб), закона изменения нагрузки во времени при испытании, температуры и т. п.

Усталость материалов и в настоящее время является одной из основных причин отказа деталей машин и элементов конструкции, подверженных действию напряжений, циклически изменяющихся во времени. В связи с этим для повышения ресурса и надежности подобных конструкций важное значение приобретают вопросы выбора материала, обоснования режимов технологии производства полуфабрикатов и деталей и организации контроля технологического процесса, обеспечивающие стабильное и высокое сопротивление элементов конструкций усталостному разрушению.

Решения проблемы повышения ресурса и надёжности машин обуславливают разработку и внедрение вероятностных методов расчёта на прочность при переменных напряжениях, учитывающих случайный характер действующих нагрузок и вариацию характеристик сопротивления усталости материалов и деталей.

Характеристики сопротивления усталостному разрушению материала изделий определяются в результате испытаний на усталость образцов, моделей, натурных деталей и конструкций в целом, что требует больших материальных затрат и весьма длительного времени, которого, как правило, не хватает

конструктору на стадии проектирования и доводки конструкции. В связи с этим ученые многих стран ведут поиски расчётных (косвенных) методов оценки характеристик сопротивления усталостному разрушению и методов ускоренных и форсированных испытаний на усталость.

Совокупность последовательных значений напряжений за один период их изменения при регулярном нагружении (рис. 3) называется циклом напряжений.

Характеристики цикла напряжений.

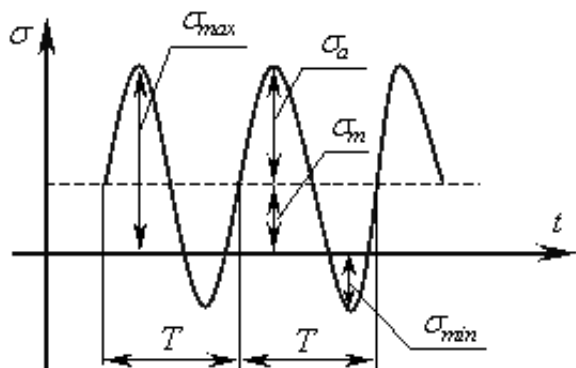


Рис. 2. Циклы напряжений

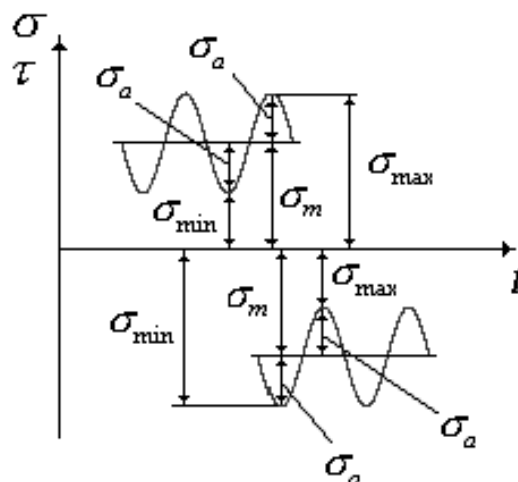


Рис. 3. Параметры циклов нагружения в области растяжения и сжатия

Период цикла T – продолжительность одного цикла напряжений, $T=1/f$ (рис. 2). Максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max}(\tau_{\max})$ – наибольшее по алгебраическому значению напряжение цикла (рис. 2, рис. 3).

Минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min}(\tau_{\min})$ – наименьшее по алгебраическому значению напряжение цикла (рис. 2, 3).

Среднее напряжение цикла $\sigma_m(\tau_m)$ – постоянная (положительная или отрицательная) составляющая цикла напряжений (рис. 2, 3), равная алгебраической полусумме максимального и минимального напряжения цикла,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}$$

Амплитуда напряжений цикла $\sigma_a(\tau_a)$ – наибольшее числовое положительное значение переменной составляющей цикла напряжений (рис. 3, рис. 4), равная алгебраической полуразности максимального и минимального напряжения цикла.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$$

Коэффициент асимметрии цикла напряжений $R_\sigma(R_\tau)$, отношение минимального напряжения цикла к максимальному,

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad R_{\tau} = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}$$

Кривая усталости $N(\sigma)$, $N(\tau)$ или $\sigma(N)$, $\tau(N)$ – график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями или амплитудами цикла и циклической долговечностью одинаковых образцов, построенный по параметру среднего напряжения цикла или по параметру коэффициента асимметрии цикла (рис. 4, а, б). Участок I на рис.3 соответствует малоцикловой усталости, а участки II и III – многоцикловой. Участок III для углеродистых и низколегированных сталей обычно имеет горизонтальный линейный характер. Для высоколегированных сталей и сплавов на магниевой, алюминиевой и титановой основах этот участок представляет собой кривую, стремящуюся к асимптоте при $N = \infty$.

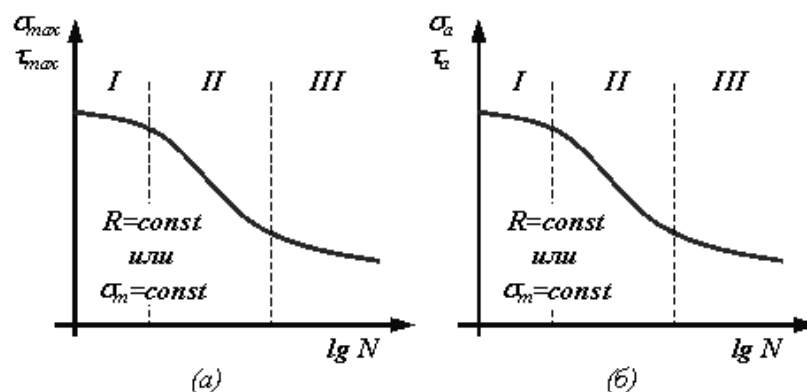


Рис. 4. Варианты представления кривой усталости

Уравнения кривых усталости

Для описания кривых усталости сталей используются:

Уравнение Велера

$$\sigma = a - b \lg N \quad \text{или} \quad \lg N = c - d \sigma \quad (1)$$

Уравнение Басквина

$$\sigma = a N^{-b} \quad \text{или} \quad \lg N = c - d \lg \sigma \quad (2)$$

Уравнение Штрмейера

$$\sigma = \sigma_R + a N^{-b} \quad \text{или} \quad \lg N = c - d \lg(\sigma - \sigma_R), \quad (3)$$

Уравнение Пальмгрена

$$\lg(\sigma - \sigma_R) = a - b \lg(N + B)$$

или

$$\lg(N + B) = c - d \lg(\sigma - \sigma_R) \quad (4)$$

Уравнение Вейбулла

$$\lg \left(\frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_b - \sigma_R} \right) = a - b \lg(N + B)$$

или

$$g(N + B) = c - d \lg \left(\frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_b - \sigma_R} \right) \quad (5)$$

Уравнения (1) и (2) описывают только II участок кривых усталости, уравнение (3) – II и III участки, уравнения (4) и (5) охватывают все три участка кривых усталости. Применительно к легким сплавам (магниевым, алюминиевым и титановым) для указанных участков кривых усталости могут использоваться уравнения (3), (4) и (5). Однако, как показали специальные исследования, более адекватно экспериментальным данным соответствует уравнение Степнова М.Н.

$$\sigma = \sigma_R + \alpha \lg(N + N_1)^{-\alpha} \quad (6)$$

Параметр В в уравнениях (4) и (5), а также параметр N_1 , в уравнении (6), определяют положение кривой усталости только в малоцикловой области (участок I на рис. 4). Поэтому при описании кривой многоцикловой усталости без ущерба для точности принимают $B=0$ и $N_1=0$.

Кривая $\sigma_{\max}=f(N)$ называется кривой усталости или кривой Велера. Из рис. 5 видно, что по мере уменьшения $\sigma_{\max}$, число циклов (N) начинает очень быстро расти, поэтому кривая усталости имеет значительную протяженность вдоль оси абсцисс. Для многих материалов кривая усталости асимптотически приближается к некоторому значению максимального напряжения, начиная с которого образцы не проявляют никаких признаков разрушения. Поэтому при соответствующем числе циклов испытания можно прекратить.

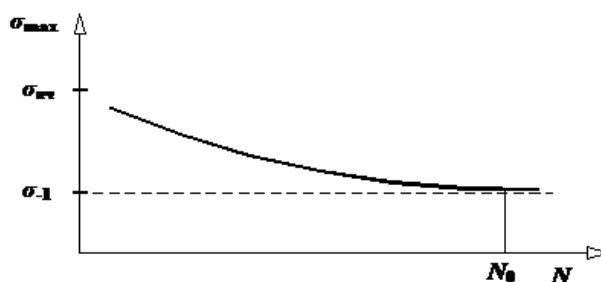


Рис. 5. Кривая Велера

Практика показывает, что образцы, выдержавшие без разрушения 10^7 циклов, могут при данном нагружении проработать неограниченное время (например, ось железнодорожного вагона на пути от Москвы до Владивостока испытывает около 3×10^6 циклов).

Левая ветвь кривой усталости на рис. 7, а соответствует уравнению Велера (1), где $b=\operatorname{tg} \alpha$, а на рис. 4, б – уравнению Басквина (2), которое чаще в технической и учебной литературе представляют в виде

$$\sigma^m N = \sigma_R^m N_G = \text{const}, \text{ где } m = \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{b} \quad (7)$$

Абсцисса точки перелома схематизированной кривой усталости NG (рис. 6, а, б) обычно принимает значения в диапазон $10^6 \dots 3 \cdot 10^6$ циклов.

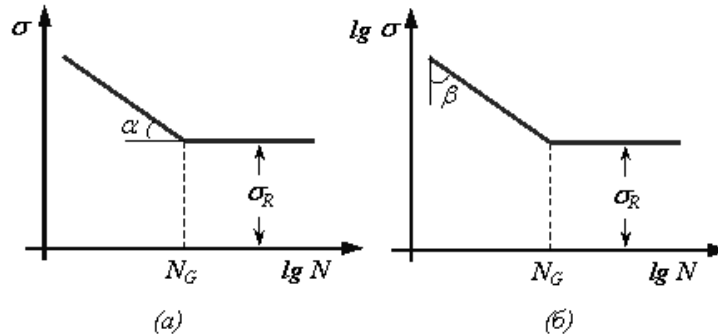


Рис. 6. Схематизированные кривые усталости для сталей

Усталость материалов и в настоящее время является одной из основных причин отказа деталей машин и элементов конструкции, подверженных действию напряжений, циклически изменяющихся во времени. В связи с этим для повышения ресурса и надежности подобных конструкций важное значение приобретают вопросы выбора материала, обоснования режимов технологии производства полуфабрикатов и деталей и организации контроля технологического процесса, обеспечивающие стабильное и высокое сопротивление элементов конструкций усталостному разрушению.

Например, основные принципы определения усталости материалов и усталостной долговечности изложены в работе [6]. Усталостная долговечность - число циклов напряжения или деформации определенной природы, которую данный образец выдерживает перед отказом

Ресурс многих металлических конструкций в значительной степени определяется сопротивлением усталости конструктивных элементов. Усталостная долговечность элементов конструкций зависит от множества факторов.

Долговечность также зависит от уровня технологии производства, качества материалов и полуфабрикатов, деталей, комплектующих частей и агрегатов, особенностей эксплуатации летательного аппарата, полноты и периодичности регламентных и ремонтных работ, технических обслуживаний и осмотров и т. д. Следовательно, обеспечение ресурсных характеристик авиационной техники является комплексной задачей, которая на стадии проектирования производства и эксплуатации изделия решается различными методами.

В данной работе изучено влияние различных технологических факторов на ресурсные характеристики типовых элементов самолетных конструкций. Исследован механизм формирования остаточных напряжений в области типовых концентраторов напряжений. Произведена оценка методов повышения усталост-

стной долговечности, основанных на создании благоприятных остаточных напряжений.

Решение указанных выше задач создает практическую возможность обоснования путем повышения усталостной долговечности элементов конструкций технологическими методами.

По результатам исследований для качественной оценки влияния ряда конструктивно-технологических факторов на характеристики статической прочности и усталостной долговечности образцов определены коэффициенты влияния.

В результате систематизации и унификации результатов прочностных и усталостных испытаний образцов, изготовленных с использованием различных технологических процессов, появилась возможность на основе CALS-технологий создания банка данных по влиянию конструктивно-технологических факторов на статическую прочность и усталостную долговечность конструктивных элементов.

Создан банк данных по влиянию технологической наследственности на характеристики долговечности, который включает в себя механические характеристики материалов и характеристики долговечности материалов и элементов конструкций, выполненных по перспективным и традиционным технологиям с учетом моделирования эксплуатационных условий.

Усталость деталей машин в значительной степени зависит от конструктивных, технологических, эксплуатационных и других факторов, которые в большинстве случаев трудно учесть при расчете механических конструкций на усталостную прочность. В этой связи испытания на усталость материалов и натурных деталей в рабочих условиях, на стадии доводки окончательного варианта конструкции являются решающим звеном в процессе создания надежных и долговечных машин.

Однако такие испытания связаны с многочисленными трудностями, так как трещины усталости чаще всего развиваются на деталях, расположенных в труднодоступных местах, которые часто заполнены различными средами. Поэтому появилась необходимость в создании встроенных средств контроля, позволяющих следить за развитием трещин на деталях в рабочих условиях, не нарушая их функционирования и режима испытаний.

Однако такие испытания связаны с многочисленными трудностями, так как трещины усталости чаще всего развиваются на деталях, расположенных в труднодоступных местах, которые часто заполнены различными средами. Поэтому появилась необходимость в создании встроенных средств контроля, позволяющих следить за развитием трещин на деталях в рабочих условиях, не нарушая их функционирования и режима испытаний.

К настоящему времени разработан ряд оптоэлектронных приборов для неразрушающего контроля различных веществ и материалов [7-12].

Эти устройства позволяют заменить визуальный контроль технологических параметров исследуемой поверхности по ГОСТ 9378-93 сравниваемой с эталонными образцами, причем расчеты показали, что стоимость устройства окажется в несколько раз ниже стоимости зарубежных приборов. При этом

объективность, оперативность и точность контроля данным устройством намного выше, чем при визуальном контроле. Также устройства можно встраивать и в автоматизированное оборудование для одновременного контроля нескольких технологических параметров металлических.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев, В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 1986. – 382 с.
2. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник. В 7-ми т. / Под ред. В.В. Клюева. Т. 6. Магнитные методы контроля, Оптический контроль, Радиоволновый контроль. – М.: Машиностроение, 2004.
3. Терентьев, В. Ф. Усталость металлических материалов. – М., Наука. 2003. – 254.
4. Терентьев, В. Ф. О пределе выносливости металлических материалов // Металловедение и термическая обработка металлов. – № 7. – 2004. – С. 15–19.
5. Москвичев, В.В. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов, 2002, 335 с.
6. Повышение усталостной долговечности заклепочных и сварных соединений авиационных конструкций технологическими методами: монография/ В.К. Белов, Г.Ф. Рудзей, А.А. Калюта – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 180 с.
7. Пат. №2428728 Российская Федерация, МПК 51G01J 3/46. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В., заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». – № 2009147534/28; заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2011. Бюл. № 26. – 7с.: 3 ил.
8. Т.В. Ларина, О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, М.П. Исаев. Оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов. Положительное решение о выдаче патента РФ по заявке № 2012101558/28(002116) от 17.01.2012 г.
9. Ушаков, О.К. Физические основы применения оптоэлектронного метода с использованием световодов для контроля качественных параметров металлических поверхностей / О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, Е.Ю. Кутенкова, В.А. Плиско // ГЕО-Сибирь-2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010», 19 - 29 апреля 2010 г., Новосибирск. - Новосибирск: СГГА, 2010. – Т. 5, ч. 1. – С. 179–185.
10. Ларина, Т. В. Исследование оптронов открытого канала для контроля качественных параметров металлических поверхностей // ГЕО-Сибирь-2011: сб. материалов VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011», 19 - 29 апреля 2011 г., Новосибирск. - Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 5, ч.1. – С. 120–125.
11. Ларина, Т. В. Оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций // ГЕО-Сибирь-2012: сб. материалов VIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2012», 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»: сб. материалов в 2 т. Т.1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 111–115.
12. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 3. – С. 131–132.

© Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, О.К. Ушаков, В.А. Жмудь, П.В. Петров, 2013

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УСТАЛОСТИ

Бахтиержон Нейматович Рахимов

Ташкентский университет информационных технологий, Узбекистан, 700084, Ташкент, ул. Амир Тимура, 108, аспирант кафедры устройств и систем радиосвязи, тел. (+9989) 74618813; e-mail:brah@mail.ru

Татьяна Вячеславовна Ларина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доцент кафедры технологии оптического производства, телефон +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail:larina_t_v@mail.ru

Сезгир Хабибуллаевич Шамирзаев

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Мавлянова, 2 б, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией полупроводниковых приборов, ФТИ АН РУз; тел. (+99871) 1354032; e-mail: shamir@uzsci.net

В статье рассмотрены принципы создания оптоэлектронных датчиков для регистрации усталости.

Ключевые слова: твердые материалы, усталость материала, оптоэлектронные датчики.

MOLECULAR-KINETIC PROCESSES AND PRINCIPLES OF CREATION OF OPTOELECTRONIC SENSORS FOR THE REGISTRATION OF FATIGUE

Bakhtiyorjon N. Rakhimov

The Tashkent University of information technologies, Uzbekistan, 700084, Tashkent, str. Amir Timur, 108, post-graduate student of the chair of devices and systems of radio communications, tel. (+9989) 74618813; E-mail:brah@mail.ru

Tatiana V. Larina

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, associate Professor of the Department of technology of optical production, body-von +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail:larina_t_v@mail.ru

Cergiz H. Shamirzaev

Physical-technical Institute of the NGO «Physics-Sun» of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Uzbekistan, 100084, Tashkent, str. Mavlyanova, 2 b, Dr.Sci, Professor, head of laboratory of semiconductor appliance-pit, the FTI Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan; tel. (+99871) 1354032; E-mail: shamir@uzsci.net

The article considers the principles of creation of optoelectronic sensors for the registration of mouth.

Key words: solid materials, fatigue material, optoelectronic sensors.

Различные твердые материалы, подвергающиеся воздействию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях, значительно меньших значений предела прочности, а иногда и предела пропорциональности материала. Явление разрушения под действием переменных напряжений называется усталостью материала.

Процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин и разрушению детали, называется усталостным разрушением (усталостью). Накопление повреждений идет особенно интенсивно, если амплитуды напряжения меняются не только по величине, но и по знаку.

Материал состоит из связанных между собой кристаллов, между которыми имеются поры и разнообразные включения.

Механизм усталостного разрушения связан с неоднородностью материала: различных размеров и конфигураций отдельных зерен, направлением их кристаллографических плоскостей, наличием неоднородных фаз, включений, дефектов кристаллической решетки (вакансий, дислокаций), остаточных напряжений.

Кристаллы, как правило, анизотропны. Однако поликристаллические материалы, состоящие из большого числа различно ориентированных кристаллов (зерен), проявляют свойства изотропии. Если же в ориентации зерен наблюдается упорядоченность, вызванная специальной обработкой, например, прокаткой металла, его протяжкой и т.п., то материал будет проявлять анизотропные свойства.

Известно [1], что некоторые типы алюминиевых сплавов, находящиеся под усталостной нагрузкой при смачивании жидким галлием довольно быстро (в течение 10 минут) ломаются. Однако природа этого процесса все еще не вполне ясна.

Между тем при растекании жидкости масса ее молекул, оказавшихся в поверхностном слое разуплотняется, увеличиваясь в объеме, с силой равной силе температурного расширения этой жидкости. Чем больше растекается жидкость, тем больше слой разуплотнения.

Принципиально новым является подход к разработке датчиков накопленной усталостной повреждаемости конструкционных материалов [2]. Здесь главной является проблема структурной устойчивости материала. В процессе усталостной эволюции мы не можем считать заданным определенное множество взаимодействующих единиц, или определенное множество преобразований этих единиц. Это означает, что определение системы необходимо модифицировать в ходе эволюции. Такого рода эволюция связана с понятием структурной устойчивости. Речь идет о реакции заданной системы на введение новых единиц, способных размножаться и вовлекать во взаимодействие различные процессы, протекающие в системе.

Проблема устойчивости системы относительно изменений такого типа сводится к следующему. Вводимые в небольшом количестве в систему новые составляющие приводят к возникновению новой сети реакций между её компо-

нентами. Новая сеть реакций начинает конкурировать со старым способом функционирования системы. Если система структурно устойчива относительно вторжения новых единиц, то новый режим функционирования не устанавливается, а сами новые единицы погибают. Но если структурные флуктуации успешно «приживаются» (например, если новые единицы размножаются достаточно быстро и успевают «захватить» систему до того, как они погибнут), то вся система перестраивается на новый режим функционирования: её активность подчиняется новому «синтаксису».

Важной в эволюционной теории усталости является возникающая в итоге обратная связь между макроскопическими структурами и микроскопическими событиями: макроскопические структуры, возникая из микроскопических событий, должны были бы в свою очередь приводить к изменению в микроскопических механизмах. Такие взаимосвязанные процессы порождают очень сложные ситуации, и это обстоятельство необходимо сознавать, приступая к их моделированию.

В данной работе рассматривается влияние на усталость и охрупчивание молекулярно кинетического процесса разуплотнения поверхностного слоя жидкого галлия, растекающегося нанопором в пространстве образцов алюминиевых сплавов. И предлагается оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов, содержащих шесть самостоятельных схожих ветвей (цепочек).

Второй из механизмов заключается в понижении при образовании сплавов замещения силы трения, препятствующей движению дислокаций. Этот процесс может быть обусловлен рядом эффектов [3, 4]:

- а) нарушением строения ядра подвижных дислокаций атомами растворенной примеси;
- б) изменением параметров расщепления ядра винтовых дислокаций;
- в) изменением упругой постоянной матрицы, изменением электронной структуры [5 - 7];
- г) стимулированием образования двойных перегибов на дислокациях [4].

Третий механизм связывают с возрастанием плотности подвижных дислокаций благодаря вызываемому внедренными атомами поперечному скольжению дислокаций. Поперечное скольжение в свою очередь может способствовать увеличению числа источников размножения дислокаций [3], облегчая процесс течения вещества. Пока нет единой точки зрения на процессы, определяющие размягчение кристаллов. Возможно, что реализация каждого из механизмов зависит от конкретных условий опыта. У чистых кристаллов сплава Ta-Re или быстро охлажденных кристаллов Ta-Re-N размягчение отсутствует. У медленно охлажденных кристаллов Ta-Re-N оно есть [10]. Авторы [10] предполагают, что при медленном охлаждении сплава рений успевает извлекать из раствора азот, что вызывает снижение сопротивления деформации. Аналогичный эффект найден у сплава Nb-Mo [5].

Работа [4] посвящена исследованию размягчения металлов группы YI^a (Cr, Mo, W) добавками рения. Существует два механизма размягчения металлов рением:

- 1) у тантала предполагают процесс очистки матрицы от азота;
- 2) в Cr, Mo, W – влиянием на барьер Пайерлса.

Авторы [4, 5] ставили своей целью изменение электронной структуры хрома и механизма деформации легированием хрома элементами YII^a и $YIII$ групп периодической системы. Они считают, что при таких присадках напряжение Пайерлса должно снижаться в связи с ослаблением гомеополярного компонента межатомных сил [7]. Для изменения неблагоприятной электронной структуры, обеспечивающей высокий уровень напряжений Пайерлса у металлов YI^a группы, требуется легирование такими элементами, в результате которого электронная концентрация сплава обычно превышает $6,3 \text{ э/а}$.

Суммарным влиянием катионных примесей, введенных в расплав, и анионных, введенных при отжиге на воздухе, предел текучести Cr может быть увеличен почти в 180 раз. Опыты с ионными кристаллами подкрепляют первый упомянутый механизм ПРК локальной очисткой объема кристалла. Размягчение синтетического кварца наблюдается при деформации образцов, нагреваемых выше 550°C .

Увеличение числа подвижных дислокаций может происходить как под влиянием образования более слабых (по сравнению с Si - O) водородных связей, так и от действия концентрации напряжений, вызываемой водными включениями.

В работе анализируется частотная зависимость акустического импеданса образцов алюминиевого сплава, смоченных жидким галлием. Это позволило выявить степень механической неоднородности сплава. Показано, что для различных моментов времени после смачивания жидким галлием, характер механической неоднородности меняется и сильно зависит от ионного радиуса входящих в состав алюминиевого сплава Cu, Mn, Mg, Si и Li.

В связи этим возникает актуальность в разработке неразрушающего оптоэлектронного метода контроля накопленных усталостных повреждений на первом этапе разрушения, позволяющего контролировать твердые материалы, причем как в процессе эксплуатации, так и при техническом обслуживании. Метод так же должен сочетать высокую локальность контроля, позволяющую выявлять очаги будущего разрушения, простоту средств контроля и их применения, с целью его использования при технической диагностике до начала трещинообразования. В работах [6–13] описаны конструкции анализатора цвета поверхности твердых материалов и оптоэлектронного устройства для определения усталости твердых материалов.

Использование функциональной развертки в такте фоторезистора (ФР) является перспективным для создания оптрона открытого канала (ООК). На рис. 1 приведена упрощенная схема ООК для контроля цвета твердых материалов.

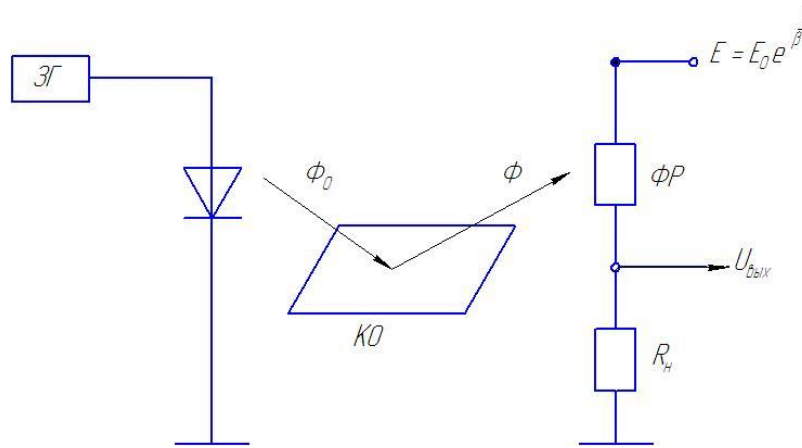


Рис. 1. ЗГ – задающий генератор, СИД – светодиодный диод, ФР – фоторезистор, КО – контролируемый объект, Φ_0 – падающий первоначальный поток, Φ – отраженный от КО

В данном устройстве можно линеаризовать характеристики Φ за счет введения функциональной развертки. Величина сопротивления ФР связана однозначной зависимостью с измерительным параметром объекта и нагруженного резистора R_n , с которого снимается выходной сигнал в виде напряжения $U_{\text{вых}}$. Амплитуда $U_{\text{вых}}$ изменяется во времени по закону, обратному закону передаточной характеристики измерительного преобразователя. Далее можно определить момент равенства первичного измерительного преобразователя (ПИП) постоянному фиксированному значению $U_{\text{пор}}$.

Как известно [14, 15] передаточная характеристика ФР с достаточной характеристикой ФР с достаточной точностью аппроксимируется степенной зависимостью, сопротивления фоторезистора:

$$R_{\Phi} = \frac{1}{A \Phi^{\alpha}} \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент; α – показатель степени.

При этом, $U_{\text{вых}}$ ПИП можно записать

$$U_{\text{вых}} = E \frac{R_n}{R_n + R_{\Phi}} \quad (2)$$

где E – напряжение питания; R_n – сопротивление измерительного резистора.

Если соблюдается $R_n \ll R_{\Phi}$ [2] можно записать

$$U_{\text{вых}} = E \frac{R_n}{R_n + R_{\Phi}} = ER_n A \Phi^{\alpha} \quad (3)$$

Как видно из этого выражения выходные напряжение $U_{\text{вых}}$ нелинейно зависит от интенсивности потока излучения.

Если считать, что интенсивность отраженного излучения связана линейной зависимости с параметром контролируемой поверхности, то можно записать

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kn} \quad (4)$$

где Φ – отраженный поток; Φ_0 – падающий поток; k – коэффициент пропорциональности; n – величина характеризующая параметры твердых материалов.

Тогда, поставляя (3) в (2) имеем

$$U_{\text{вых}} = ER_n A \Phi^\alpha e^{-kn} \quad (5)$$

Для линеаризации характеристики данного оптрона открытого канала следует изменять напряжения питания по закону

$$E = E_0 e^{-\frac{\tau}{\beta}} \quad (6)$$

где E_0 – начальное значение напряжения при $\tau = 0$; β – постоянная времени экспоненциального импульса.

Поставим (6) в (5) получим

$$U_{\text{вых}} = AR_n \Phi_0^\alpha e^{-k\alpha n} E_0 e^{-\frac{\tau}{\beta}} = AR_n \Phi_0^\alpha E_0 e^{\frac{\tau}{\beta} - k\alpha n} \quad (7)$$

Решим (7) относительно времени τ :

$$\frac{\tau}{\beta} = k\alpha n + \ln \frac{U_{\text{вых}}}{AR_n \Phi_0^\alpha E_0} \quad (8)$$

Учитывая, что $U_{\text{вых}} = U_{\text{пор}} = \text{const}$ и $AR_n \Phi_0^\alpha E_0 = \text{const}$

Обозначая $k^* = k\alpha\beta$ и $c = \frac{U_{\text{вых}}}{AR_n \Phi_0^\alpha E_0}$

Получим

$$t = k^* n + c \quad (9)$$

Последнее выражение показывает, что длительность интервала времени t от начала приложения к измерительному преобразователю напряжения питания, которое изменяется во времени по экспоненциальному закону до достижения его результата с выходным сигналом определенного фиксированного уровня $U_{\text{вых}}$, линейно определяется величиной или иным параметром твердого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shamirzaev S. (1996) ADAPTIVE FORECAST OF FATIGUE DAMAGE OF AVIATION DESIGNS WITH HELP HS-CFM. Proceedings for the adaptive distribute parallel computing symposium. Dayton (Fairborn), Ohio, USA, August 8-9, 1996, pp. 344-354.

2. S. Kh. Shamirzaev, N.R.Rakhimov THE THEORY OF OUTPUT PARAMETERS OF A PRESSING POWDER MIXTURE WITH RANDOM PACKAGING DENSITY // Solid State Sciences, vol.6, Issue10 oct., 2004 pp. 1125-1129.5.
3. Shamirzaev S. and Shamirzaeva G. (2000) THE RHEOLOGICAL MODEL OF FATIGUE DAMAGE OF CM. Proceedings of the XIIIth INTERNATIONAL CONGRESS ON RHEOLOGY. Cambridge, United Kingdom, 20th to 25th August, 2000. Published by the British Society of Rheology. Volume 3, pp. 377-379
4. Shamirzaev S. (2000) MODELING A FATIGUE IMPERFECTION OF STRUCTURAL MATERIALS. POSTER SESSION ABSTRACTS. International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials III; September, 17 – 22, 2000, Hyannis, Massachusetts, USA. P1., pp. 5-6.
5. Shamirzaev S., Ganihanov Sh., Shamirzaeva G. (2001) THE MONITORING OF FATIGUE FEATURES OF CM FOR AVERY HIGH CYCLES OF LOADS. Proceedings of the International Conference on FATIGUE in the Very High Cycle Regime. 2-4 July, 2001. Vienna, Austria, pp. 245-252.
6. Анализатор цвета поверхности твердых материалов. Приборы и техника эксперимента. Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова 2012. - № 3, С. 131-132.
7. Пат. №2429456 Российская Федерация, МПК 51G01J 3/46 Анализатор цвета поверхности твердых материалов/Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». - № 2009147534/28; заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2011 Бюл. № 26. – 7с.: 3 ил.
8. Т.В. Ларина, О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, М.П. Исаев. Оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов. Решение о выдаче патента на изобретение от 06.02.2013 № 2012101558/28(002116) от 17.01.2012 г.
9. Ушаков, О.К. Физические основы применения оптоэлектронного метода с использованием световодов для контроля качественных параметров металлических поверхностей / О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, Е.Ю. Кутенкова, В.А. Плиско // ГЕО – Сибирь - 2010: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2010», 19 - 29 апреля 2010 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2010. – Т.5., ч.1. – С. 179 – 185.
10. Ларина, Т. В. Исследование оптронов открытого канала для контроля качественных параметров металлических поверхностей // ГЕО – Сибирь - 2011: сб. материалов VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2011», 19 - 29 апреля 2011 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 5., ч. 1. – С. 120 – 125.
11. Ларина, Т. В. Оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций // ГЕО – Сибирь – 2012: сб. материалов VIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь - 2012», 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 111–115.
12. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова // Приборы и техника эксперимента. - 2012. - № 3. - С. 131 – 132.
13. Оптоэлектронный автоматический колориметр / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Е. Ю. Кутенкова, Т. В. Ларина // Приборы и техника эксперимента. - 2011. - № 5. - С. 161 – 162.
14. М. Мухитдинов, Э.С. Мусаев. Светоизлучающие диоды и их применение. – М.: Радио и связь, 1988. – 78 с.
15. Я. Суэмачу, С. Катаока и др. Основы оптоэлектроники / пер. с яп. – М.: Мир, 1988. – 288 с.

© Б.Н. Рахимов, Т.В. Ларина, С.Х. Шамирзаев, 2013

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Неъматжон Рахимович Рахимов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), 630108, Россия, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Елена Юрьевна Кутенкова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры ТОП, тел. (383)361-07-79, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Михаил Петрович Исаев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), 630108, Россия, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры специальных устройств и технологий, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail:

Исроилжон Махамматисмоилович Болтабоев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры нанотехнологий и оптоэлектроники, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail

В статье предлагается устройство повышенной чувствительности и упрощенной конструкции для измерения влажности сыпучих материалов.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, фотодиод, датчик нарушенного полного внутреннего отражения, шнековое устройство, влагомер, сыпучие материалы.

OPTOELECTRONIC METHOD FOR DETERMINATION OF MOISTURE BULK OF MATERIALS

Nematgon R. Rakhimov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy»; 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, D.Sc., Professor of the Department of special devices, technologies and materials, phone +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Elena Yu. Kutenkova

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», associate Professor at the TOP, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, tel. (383)361-07-79, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Michael P. Isaev

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, post-graduate, engineer of the Department of the special of devices and technologies, tel. (913)777-59-28, e-mail: mihaile54@mail.ru

I.M. Boltaboev

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», graduate student of the Department «N and The» 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, tel. +7 9513662162 e-mail nemrah@mail.ru

The article includes the device high sensitivity and simplified structure of humidity measurement of bulk solids.

Key words: light-emitting diode and photodiode sensor violated total internal reflection, шнековое device, the moisture meter, bulk materials.

Вода является одним из основных веществ, содержащихся в сыпучих материалах и сопровождающих процессы их переработки, при этом влажность часто является одним из главных параметров, по которому оптимизируют технологические процессы и аттестуют качество готовой продукции. Наиболее полно требованиям промышленного контроля отвечают абсорбционные методы контроля в инфракрасной области спектра, так как избирательное поглощение ИК - излучения связано с молекулярным строением вещества и в меньшей степени зависит от структуры, поэтому дальнейшее исследование оптоэлектронного метода и разработка приборов на основе применения новейших достижений оптоэлектроники, позволяющих повысить точность, надежность и быстродействие и уменьшить габариты и энергопотребление является актуальной задачей.

Методы количественного определения содержания влаги в твердых телах и жидкостях принято делить на прямые и косвенные. В прямых методах влагу отделяют определенным способом от сухого вещества и устанавливают количественное соотношение этих частей в исследуемом материале. В косвенных методах измеряют ту или иную физическую величину, функционально связанную с влажностью [1].

В масложировой и других отраслях промышленности наиболее распространенным прямым методом для твердых материалов является термогравиметрический (весовой). Сущность его заключается в высушивании предварительно отобранной и взвешенной пробы материала до постоянного веса (или ускоренной сушке при повышенной температуре в течение определенного времени). Количество влаги в пробе устанавливают по потере ее веса в результате взвешивания пробы до и после сушки. Полученное значение количества влаги можно отнести к первоначальному (масса влажного вещества q_1) или конечному (масса сухого вещества q_2) весу пробы и выразить в долях или процентах. При этом в качестве величины, характеризующей содержание влаги, можно использовать влажность (массовая доля влаги) — отношение массы влаги к массе влажного вещества

$$W = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad \text{или} \quad W\% = \frac{q_1 - q_2}{q_2} 100\%$$

U - влагосодержание (массовое отношение влаги) — отношение массы влаги к массе сухого вещества

$$U = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad \text{или} \quad U\% = \frac{q_1 - q_2}{q_2} 100\%$$

По сложившейся традиции в хлопковых материалах принято исчислять влагосодержание. В производственных же условиях по метрологическим соображениям в них определяют влажность.

Термогравиметрические методы измерения влажности требуют выполнения персоналом трудоемких операций по отбору и подготовке проб. Постоянно включенные сушильные агрегаты повышают температуру воздуха в лаборатории, что создает трудные условия для работы, особенно в летний период (в южных республиках).

Значительно реже, чем термогравиметрические, применяются следующие прямые методы определения влажности твердых материалов:

- дистилляционные, в которых исследуемый образец подогревается в сосуде с жидкостью, не смешивающейся с водой, и затем отгонкой определяется масса выпарившейся из образца воды;
- экстракционные, основанные на извлечении влаги из образца водопоглощающей жидкостью и дальнейшем определении влажности полученного жидкого экстракта;
- химический, основанный на обработке исследуемого образца материала реагентом, вступающим в химическую реакцию только с влагой, содержащейся в образце. При этом количество влаги в образце определяется по количеству жидкого или газообразного продукта реакции.

Целью данной работы является исследование оптоэлектронного метода и разработка устройств контроля влажности сыпучих материалов на основе применения новейших достижений оптоэлектроники.

Для того чтобы получить наиболее равномерное распределение влаги в контролируемом объеме, было решено использовать шнековое устройство.

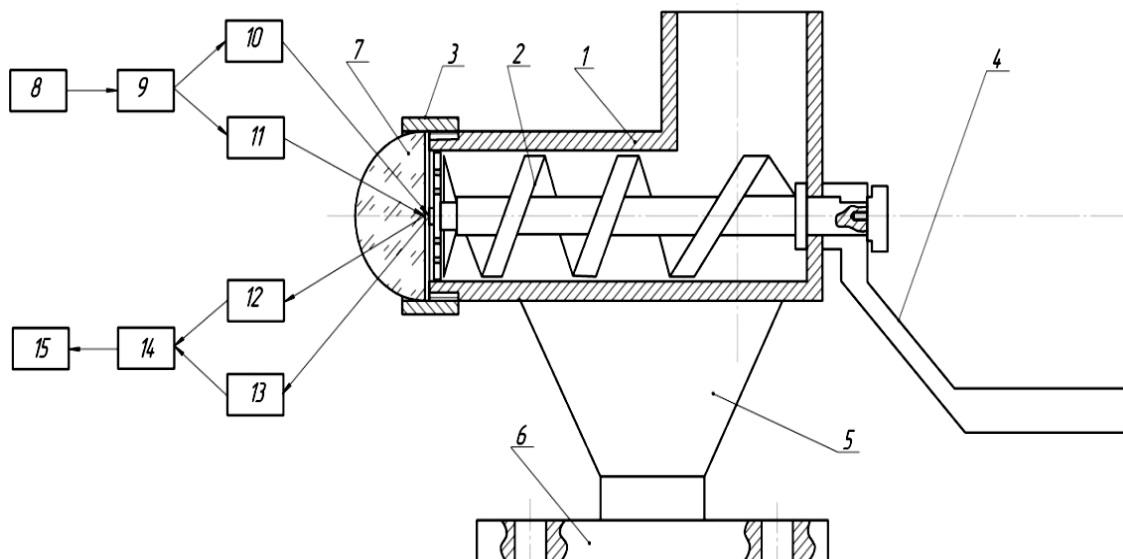
Оно позволяет путем частичного разрешения исследуемого образца выделить влагу, содержащуюся внутри. А также создает достаточное давление исследуемого вещества на линзу чувствительного элемента (датчика) нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), что увеличивает пятно контакта.

Для уменьшения погрешности измерений в данном влагомере используются две длины волны — измерительная и опорная. Это позволяет существенно повысить точность измерений.

Устройство содержит (см. рис. 1): 1 — корпус; 2 — шнековое устройство; 3 — закрепляющее устройство; 4 — рукоятка; 5 — опора; 6 — подставка; 7 — линза в форме полусферы (элемент НПВО); 8 — задающий генератор (ЗГ); 9 — триггер (Т);

10 – светоизлучающий диод (измерительный) - (СИД₁); 11 – светоизлучающий диод (компенсационный) - (СИД₂); 12 – приемник оптического излучения (измерительный)- (ПОИ₁); 13 – приемник оптического излучения (опорный) - (ПОИ₂); 14 – блок обработки фотоэлектрического сигнала (БОФС); 15 – измерительный прибор (ИП).

Устройство работает следующим образом. Исследуемый материал засыпается на шнек 2, который вращаясь при помощи рукоятки 4, проталкивает исследуемый материал к элементу НПВО, создавая давление на него. При этом материал частично разрушается. Затем задающий генератор 8 вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой 8-10 кГц. Эти импульсы подаются на вход триггера 9. Разделённые импульсы подаются на светоизлучающие диоды (измерительные и компенсационные). Поток излучения измерительного светоизлучающего диода фокусируется на измерительных поверхностях и подается на ПОИ₁ (фотодиод). Излучение компенсационного светоизлучающего диода подается на ПОИ₂ (фотодиод). Далее эти сигналы поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала, где реализуется отношение сигналов компенсационного и измерительного потока. Сигнал отношения, пропорциональный величине влажности, подается на измерительный прибор, по показанию которого судят о процентных отношениях влажности в сыпучем материале. Благодаря частичному разрушению материала, а также его прессовке на стенку НПВО, повышается точность измерения за счёт плотного контакта исследуемого вещества с оптическим элементом датчика НПВО.



1 – корпус; 2 – шнековое устройство; 3 – закрепляющее устройство; 4 – рукоятка; 5 – опора; 6 – подставка; 7 – линза в форме полусферы (элемент НПВО); 8 – задающий генератор (ЗГ); 9 – триггер (Т); 10 – светоизлучающий диод(измерительный)- (СИД₁); 11 – светоизлучающий диод (компенсаторный)- (СИД₂); 12 – приемник оптического излучения (измерительный)- (ПОИ₁); 13 – приемник оптического излучения (опорный)- (ПОИ₂); 14 – блок обработки фотоэлектрического сигнала (БОФС); 15 – измерительный прибор (ИП).

Рис. 1. Устройство для измерения влажности сыпучих материалов

Физический смысл заключается в следующем. Используются два световых потока с разными длинами волн, например, $\lambda_1 = 1,93$ мкм (измерительный) и $\lambda_2 = 1,7$ мкм (опорный), соответствующим максимальному и минимальному поглощению воды. Световой поток $\Phi_{0\lambda}$ распространяется из оптически плотной среды с показателем преломления n_1 , в менее плотную с n_2 под углом Θ , превышающим предельный (критический) угол полного внутреннего отражения Θ_k . Световой поток $\Phi_{0\lambda_1}$ частично проникает в среду n_2 ; на глубину порядка длины волны падающего излучения:

$$d_p = \frac{\lambda_1}{2\pi(\sin^2 \Theta - n_{21})^{1/2}}$$

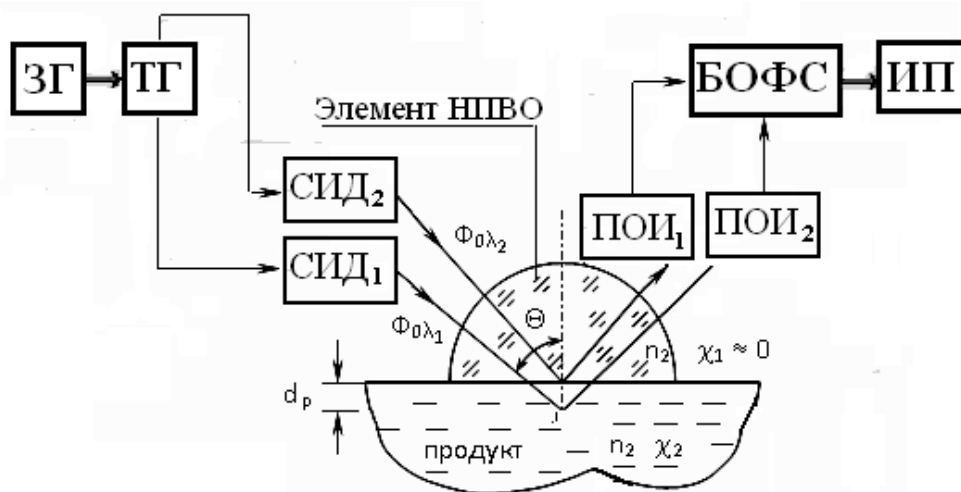
где λ_1 – длина волны излучения в оптически плотной среде с показателем преломления n_1 ;

$n_{21} = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления.

Если угол излучения равен или превышает критический $\Theta_k = \arcsin n_1/n_2$, то наблюдается полное внутреннее отражение (метод ПВО). Поскольку менее плотная среда с комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n_2 - j\chi_2$: обладает поглощением, отражение не будет полным, т.е. условия для этого нарушаются и коэффициент отражения ($R = \Phi_{\lambda_1} / \Phi_{0\lambda_1}$) станет меньше 1. Степень ослабления R пропорциональна показателю поглощения. Таким образом, чем выше поглощение, тем сильнее нарушается отражение. Это называется эффект НПВО [2].

В ИК-области спектра для достижения условия $n_1 > n_2$ используются измерительные элементы НПВО из высокопреломляющих оптических материалов, прозрачных в соответствующем диапазоне [3].

При включении устройства (см. рис. 2), задающий генератор 3Г вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой 8 - 10 кГц. Эти импульсы подаются на вход триггера ТГ. Разделённые импульсы подаются на светоизлучающие диоды СИД₁ (измерительные) и СИД₂ (компенсационные). Поток излучения измерительного светоизлучающего диода фокусируется на измерительных поверхностях и подается на ПОИ₁. Излучение компенсационного светоизлучающего диода СИД₂ подается на ПОИ₂. Далее эти сигналы поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала БОФС, где реализуется отношение сигналов компенсационного и измерительного потока. Сигнал отношения, пропорциональный величине влажности, подается на измерительный прибор ИП, по показанию которого судят о процентных отношениях влажности хлопковых семян. Благодаря разрушению гранулометрического состава трота и мятки, а также прессовки семян на стенку НПВО, повышается точность измерения за счёт плотного контакта исследуемого вещества с оптическим элементом датчика НПВО.



ЗГ- задающий генератор; ТГ- триггер; СИД₁ (измерительные) и СИД₂ (компенсационные) светоизлучающие диоды; ПОИ₁. и ПОИ₂-приемники оптического излучения; БОФС- блок обработки фотоэлектрического сигнала; ИП- измерительный прибор

Рис. 2. Принципиальная схема устройства

Далее исследуем метрологические характеристики для измерения влажности (W) в диапазоне 0,5 ... 6,5 %, за максимальную влажность примем 7 %. Градуировочная характеристика в диапазоне 0,1 ... 6,5 % приведена на рис. 3.

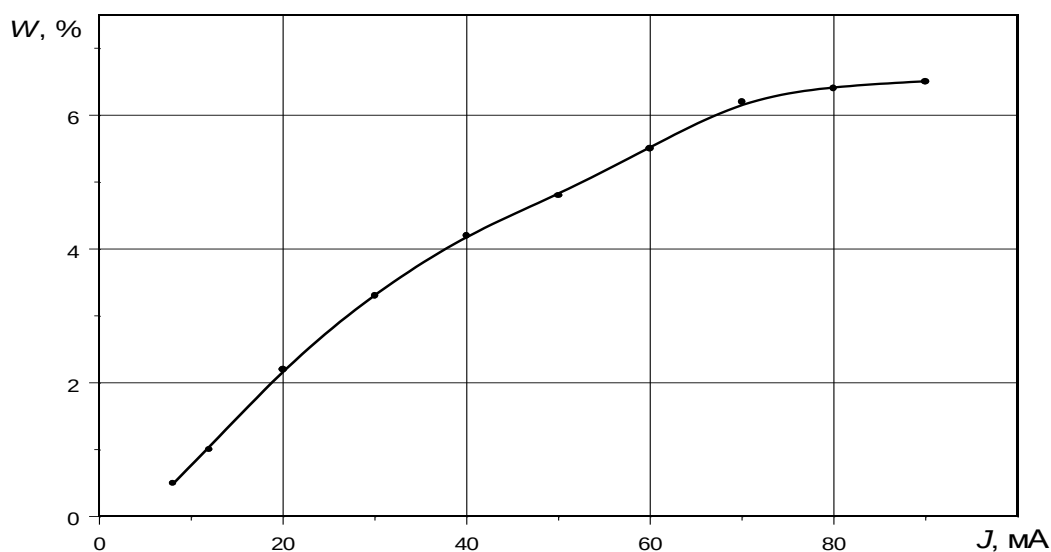


Рис. 3. Градуировочная характеристика прибора

Анализ результатов приведенных исследований показывает, что в выбранном диапазоне влажности чувствительность разработанного датчика выше чувствительности известных (термогравиметрических). Таким образом, приведенные исследования показывают возможность создания НПВО-влажномеров, обладающих повышенной чувствительностью в любом заранее заданном узком диапазоне измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э.С. Мусаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
2. Харрик, Н. Дж. Спектроскопия внутреннего отражения. – М.: Недра, 1968. – 305 с.
3. Мусаев, Э.С. Исследование оптоэлектронного метода и разработка устройства для контроля влажности: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Ташкент, 1986. – 107 с.
4. Рахимов Н.Р., Тожиев Р.Ж., Юлдашев Н.Х., Самадов А. Устройство для измерения влажности хлопковых семян // Патент РУз IDP 2000 0390 от 29.05.2002 г.

© Н.Р. Рахимов, Е.Ю. Кутенкова, М.П. Исаев, И.М. Болтабоев, 2013

К ВОПРОСУ КОМПЛЕКТАЦИИ ЛИНЗ АНАМОРФОТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Наталья Кирилловна Соснова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Александр Николаевич Соснов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Максим Михайлович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Алена Алексеевна Марач

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Лариса Александровна Канушина

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Рассмотрен вопрос комплектации цилиндрических анаморфотных линз в проекционных насадках с целью повышения качества оптического изображения.

Ключевые слова: анаморфотные цилиндрические линзы, aberrации изображения.

TO THE QUESTION OF BUNDLING LENSES ANAMORFON OPTICAL SYSTEMS

Natalia K. Sosnova

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Alexander N. Sosnow

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, Ph.D., Professor of the Department of technology of optical production, tel: (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Maxim M. Kuznetsov

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Alena A. Marash

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, engineer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Larisa A. Kanushina

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, senior lecturer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

The question is considered complete set of cylindrical anamorfon lenses in the projective the nozzles to improve the quality of the optical image.

Key words: anamorfon cylindrical lens aberration image.

Анаморфотные оптические системы широко используемые в современной цифровой киноиндустрии, ^[1] состоят из цилиндрических линз, основным производственным недостатком которых является невозможность 100% изготовления их со строгой параллельностью входной и выходной цилиндрической поверхностей. Это приводит к ухудшению изображения, создаваемого такими системами. Предложенные ранее мероприятия позволили существенно улучшить технологию, тем не менее, определенный процент деталей выходит за пределы допуска. Вопрос о возможности их использования может быть решен путем комплектации линз по величине и знаку разворота цилиндрических поверхностей перед операцией их склеивания.

Теоретическим обоснованием комплектации служит тот факт, что аберрации, вносимые разворотами поверхностей линз насадки, имеют разные знаки. Величина искажений зависит от кривизны поверхности, ее места в системе и величины угла разворота (непараллельности). Расчеты коэффициентов влияния поверхностей по методу Берека не привели к желаемому результату, поскольку формулы не учитывают действие аберраций второго порядка. Коэффициенты влияния разворотов отдельных поверхностей линз были определены практически, путем сравнения графиков аберраций. Значения коэффициентов влияния представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ поверхности	Коэффициент влияния
1	+1
2	0
3	-0.4
4	-0.65
5	0
6	+0.24

Комплектацию можно осуществить следующим образом. На участок склеивания поступают цилиндрические линзы, аттестованные по величине

и знаку разворота поверхностей. Можно утверждать, что aberrации, возникающие при использовании в системе первой линзы с углом разворота поверхностей $\beta_1 = +\rho$ минут, компенсируются любым из следующих вариантов (рис. 1):

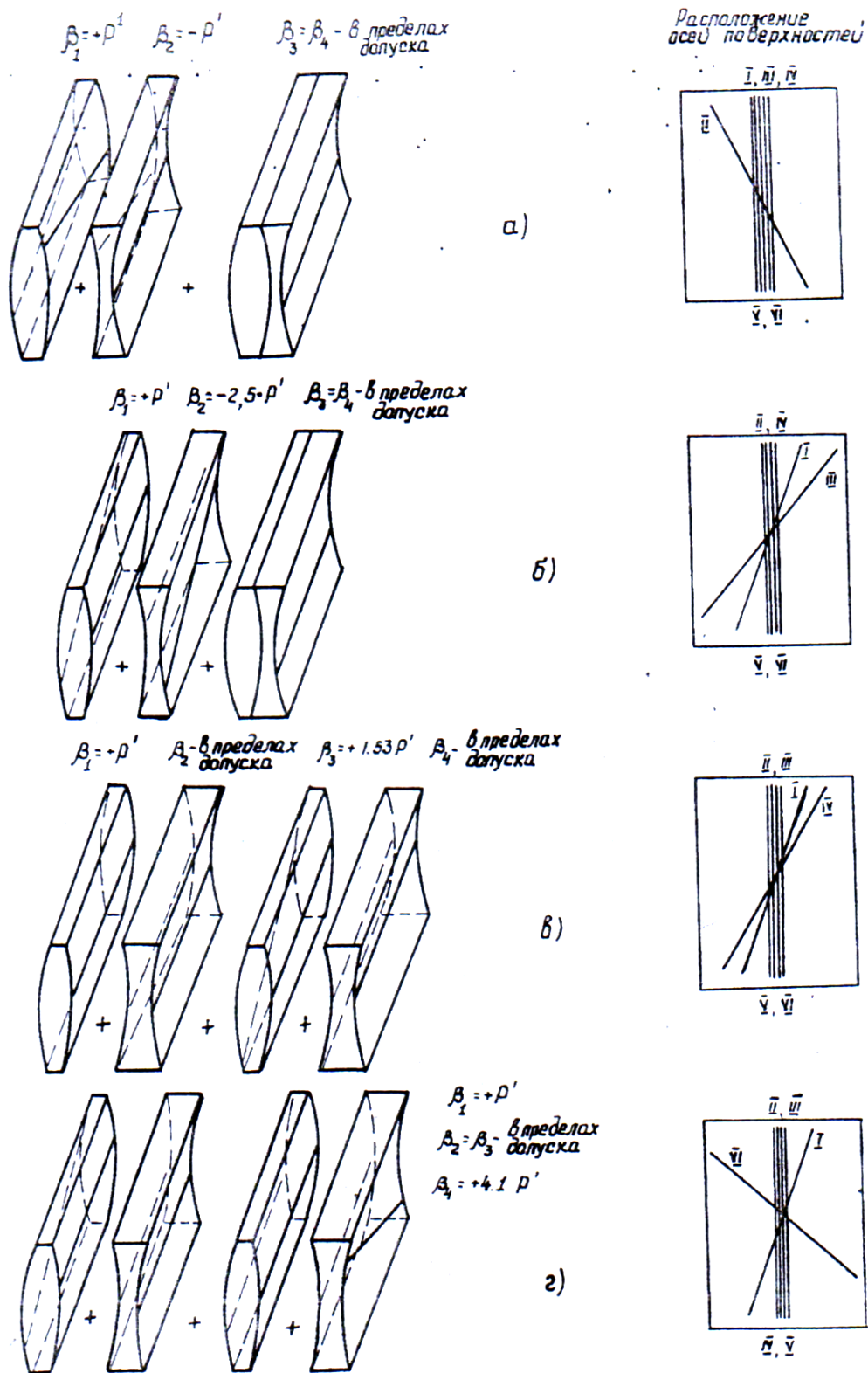


Рис. 1. Схемы комплектации цилиндрических линз по величине и направлению разворота преломляющих поверхностей

1. Вторая линза с углом разворота поверхностей $\beta_2 = -\rho$ (мин.)
2. Вторая линза с углом разворота поверхностей $\beta_2 = -2.5 \times \rho$ (мин.)
3. Третья линза с углом разворота поверхностей $\beta_3 = +1.5 \times \rho$ (мин.)
4. Четвертая линза с углом разворота поверхностей $\beta_4 = +4.1 \times \rho$ (мин.)

При этом предлагается, что остальные линзы для каждого варианта изготовлены в пределах допуска. Первый и второй варианты, использующие различные значения углов разворота поверхностей второй линзы, не противоречат друг другу, поскольку они отличаются и взаимным расположением компонентов в оптической системе. В правой части рис.1 показано взаимное расположение осей поверхностей линз в насадке для всех систем комплектации.

Все варианты были просчитаны на компьютере по специальной программе с построением графиков аберраций и анализом получаемого при этом качества изображения.

Результаты эксперимента полностью подтвердили правильность наших утверждений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пруненко Ю.К. Применение анаморфотной оптики в современном оптическом приборостроении // Сборник трудов конференции молодых ученых. Оптотехника и оптическое приборостроение. – 2009. – Вып. 1. – С. 178.
2. Бегунов Б. Н. Трансформирование оптических изображений. – М.: Искусство, 1965. – С. 232.

© Н.К. Соснова, А.Н. Соснов, М.М. Кузнецов, А.А. Марач, Л.А. Канушина, 2013

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ЭРИТРОЦИТОВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ПСЕВДОЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Максим Михайлович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Алена Алексеевна Марач

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Павел Иванович Петров

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

В статье рассмотрена возможность применения метода псевдоцветного кодирования для целей лабораторной диагностики.

Ключевые слова: метод псевдоцветного кодирования, эритроциты.

DETERMINATION OF THE SHAPE AND SIZE OF RED BLOOD CELLS WITH THE HELP OF THE METHOD OF THE PSEUDO-COLOR IMAGE CODING

Maxim M. Kuznetsov

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Alena A. Marash

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, engineer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Pavel I. Petrov

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, engineer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

The article considers the possibility of applying the method of the pseudo-color coding for the purposes of laboratory diagnostics.

Key words: method of false color coding, the red blood cells.

Основным прибором для непосредственного наблюдения клетки является микроскоп.

Микроскоп - прибор для получения сильно увеличенного изображения объекта и его структур, созданного отраженным светом.

Биологический микроскоп при использовании белого света позволяет наблюдать структуры, размером примерно 0,25 микрометров, при использовании ультрафиолетовых лучей – 0,1 микрометра, а инфракрасных – 0,4 микрометра. Напомним, что размеры форменных элементов крови колеблются, как правило, в пределах 2-120 мкм [1].

Для определения размера и формы тромбоцитов, авторы работы [3], на пример предлагают использовать сканирующий проточный цитометр (СПЦ) принципиальная оптическая схема которого представлена на рис. 1.

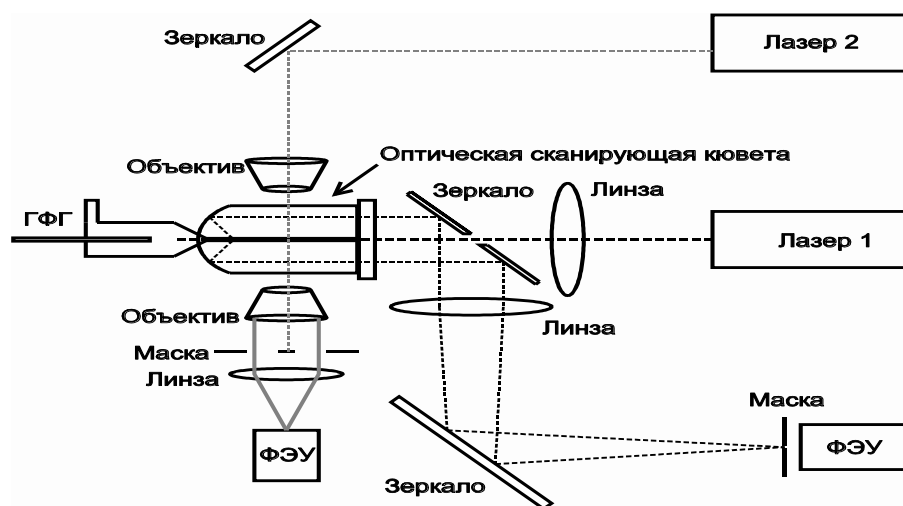
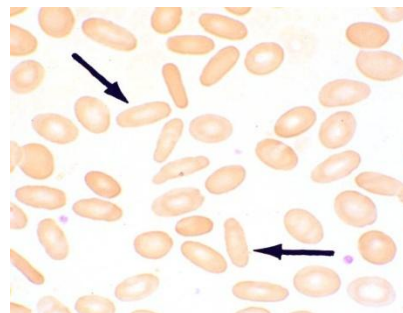
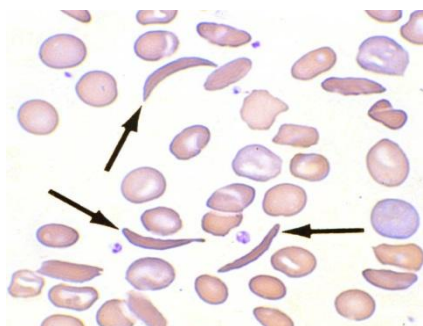


Рис. 1

Предлагаемый в настоящей работе метод основан на использовании результатов, полученным в работах [4, 5] методом псевдоцветового оптического изображения с использованием микроскопа [6], объектом исследования послужили форменные элементы крови – эритроциты, нормальный размер которых составляет 7,16 до 7,98 мкм.

Уменьшение размера эритроцита меньше 6 микрометра (микроцитоз) или, наоборот увеличение размера больше 8 мкм, имеет важное диагностическое значение для определения вида анемии. Основные характеристики параметров измерений представлены в табл. 1.

На фотографиях последовательно представлены изображения разных размеров и формы эритроцитов (рис. 2).



а) дрепаноцит (клетки похожие на серп)

б) эллиптоцит (клетка удлиненной, овальной формы)

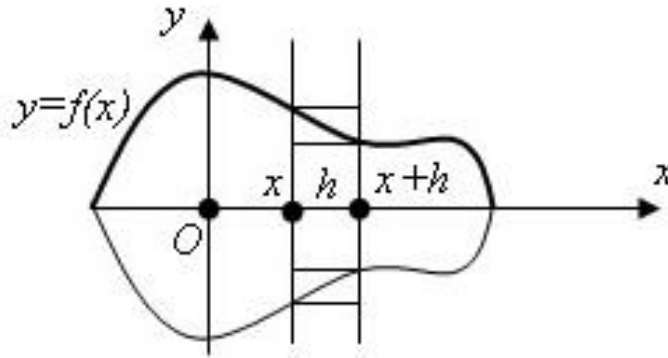
Рис. 2

Таблица 1

Наименование параметра	Характеристика
Анизоцитоз (разный размер клеток)	Микроциты меньше 7,2 мкм, макроциты больше 8 мкм.
Поикилоцитоз (разная форма клеток)	Сфероциты - эритроциты, утратившие свою двояковогнутую форму. Имеют шаровидную форму, большую толщину, у них отсутствует центральное просветление. Различают сфероциты обычных размеров и микросфероциты, диаметр которых 4 - 6 мкм.
	Эллиптоцит (овалоцит) - клетка овальной или удлинённой формы. Бледность в центре не видна.
	Акантоцит (листообразная клетка, шпорообразная клетка) - эритроцит с выпячиваниями различной величины, расположенными на разных расстояниях друг от друга.
	Кодоциты (мишеневидные эритроциты, лептоциты, таргетные клетки, колоколоподобные клетки) - плоские бледные эритроциты с окрашенной периферией и центральным скоплением гемоглобина в виде мишени.
	Дрепаноциты (серповидные клетки) - клетки, похожие на серп или на листья остролиста.
	Стоматоциты - эритроциты, у которых центральное просветление имеет не округлую, а линейную форму, что напоминает ротовое отверстие. Эхиноцит (шишковидная клетка, ягодоподобная клетка, зубчатая клетка) - клетка, напоминающая по форме морского ежа, имеет шипы одинаковых размеров, располагающиеся равномерно по поверхности эритроцита.
	Дегмацит ("надкусанная клетка") - клетка выглядит так, как будто ее надкусили.
	Пузырчатая клетка - клетка выглядит так, как будто на ее поверхности имеется пузырек или волдырь.
	Шистоциты (шизоцит, каскообразная клетка, фрагментированная клетка) - клетки похожи на каски, треуголки, осколки.
	Дакриоциты (слезоподобные клетки) - клетки напоминают каплю или головастика.

Снимки получены стандартным методом на биологическом микроскопе, при помощи метода псевдоцветного кодирования изображений. Объектом исследования послужили: нативные препараты из цельной крови; тонкие мазки неокрашенные; тонкие мазки окрашенные краской Романовского-Гимзе.

Воспользовавшись формулами для расчета тел вращения, в общем случае можно записать следующее. Тело вращения в простейшем случае называется такое тело, которое плоскостями, перпендикулярными оси вращения, пересекаются по кругам с центрами на этой прямой.



Проведем плоскость через ось тела, введение в этой плоскости декартовых координат x, y , принимаем ось тела за ось x . Плоскость xy пересекает поверхность тела по линии, для которой ось x является осью симметрии. Пусть $y = f(x)$ – уравнение той части этой линии, которая расположена над осью x .

Проведем через точку $(x, 0)$ плоскость, перпендикулярную оси x , и обозначим через $V(x)$ объем части тела, лежащей слева от этой плоскости; $V(x)$ является функцией от x . Разность $V(x+h) - V(x)$ представляет собой объем слоя тела толщиной h , заключенного между двумя плоскостями, которые перпендикулярны оси x и проходят через точки с абсциссами x и $x+h$. Пусть M – наибольшее, а m – наименьшее значение функции $f(x)$ на отрезке $[x, x+h]$. Тогда рассматриваемый слой тела содержит цилиндр с радиусом m и высотой h и содержится в цилиндре с радиусом M и той же высотой h .

Поэтому

$$\pi m^2 h \leq V(x+h) - V(x) \leq \pi M^2 h$$

$$\pi m^2 \leq \frac{V(x+h) - V(x)}{h} \leq \pi M^2$$

При стремлении высоты h к нулю левая и правая части последнего неравенства стремятся к одной и той же величине $\pi f^2(x)$. Средняя же часть этого неравенства при стремлении h к 0 стремится к производной $V'(x)$ функции $V(x)$. Значит,

$$V'(x) = \pi f^2(x)$$

По формуле анализа

$$V(b) - V(a) = \int_a^b V'(x) dx = \int_a^b \pi f^2(x) dx, \quad a < b$$

Эта формула и дает объем части тела, заключенной между параллельными плоскостями $x=a$ и $x=b$.

Вывод: использование метода псевдоцветного кодирования изображения для определения формы и размеров эритроцитов позволяет ускорить процесс проведения исследований для измерения ширины распределения эритроцитов по объему и с большей точностью определять степень пойкилоцитоза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы исследования клеток. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ucheba-legko.ru/lections/viewlection/biologiya/10_klass/kletka_-_edinita_jivogo/himicheskiy_sostav_kletki/metodyi_issledovaniya_kletok.
2. Бэктология. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://becmology.blogspot.ru/2011/04/blog-post_6850.html.
3. Колесникова, И.В. Исследование формы тромбоцитов с помощью сканирующей проточной цитометрии, Новосибирск, 2006. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allbest.ru/>
4. Кузнецов, М.М. Способ псевдоцветового кодирования черно-белых фотографических снимков. [Текст] М.Ф.Носков, П.И. Петров // Фундаментальные исследования, 2007, №6, -С.57-58.
5. Носков, М.Ф. Повышение чувствительности оптико-физических измерений путем нелинейной обработки изображений: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 01.04.05 – Оптика (техническая наука) – Новосибирск, 2007.179 с.
6. Паспорт на биологический микроскоп «Лабомед-2» Концепт» с системой визуализации.
7. Анемия симптомы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.medn.ru/statyi/anemiya-simptomy.html>

© М.М. Кузнецов, А.А. Марач, П.И. Петров, 2013

РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Лариса Александровна Канушина

Новосибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры технологии оптического производства тел. (383-61-07-79) e-mail: kaf. top @ ssga.ru

Александр Николаевич Соснов

Новосибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства тел. (383 -61-07-79), e-mail: kaf. top @ ssga.ru

Наталья Кирилловна Соснова

Новосибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии оптического производства, тел. (383 -61-07-79), e-mail: kaf. top @ ssga.ru

В статье описываются влияние оптических неоднородностей оптических материалов на качество изображения и критерии определения их допустимых величин.

Ключевые слова: неоднородности оптических материалов, свили, расчет допусков на размер, градиент показателя преломления, качество изображения.

THE CALCULATION OF TOLERANCES OF THE OPTICAL INHOMOGENEITIES OF OPTICAL MATERIALS

Larisa A. Kanushina

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul Plaxotnogo, the senior lecturer of the Department of technology of optical production

Alexander N. Sosnow

Novosibirsk State Academy of Geodesy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, Russia, Plaxotnogo 10, the senior lecturer of the Department of technology of optical production

Natalia K. Sosnova

Novosibirsk State Academy of Geodesy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, Russia, Plaxotnogo 10, Ph.D., associate Professor of the Department of technology of optical production

The article describes the influence of the optical inhomogeneities of optical materials on the quality of the image and the criteria for determining their limit values.

Key words: the heterogeneity of optical materials, striae, the calculation of tolerances on the size, the gradient of the refractive index, the quality of the image.

Современная технология получения оптических материалов не обеспечивает заготовок, абсолютно однородных по показателю преломления, поэтому для определения влияния дефектов материалов на качество изображения, необ-

ходимо знать допустимую величину градиента показателя преломления и допустимую площадь детали, занятую дефектом.

Для визуальных оптических систем качество изображения оценивается по функции рассеивания изображения точки (ФРТ), по волновой аберрации, по разрешающей способности и по частотно-контрастной характеристике. Каждый из этих критериев имеет определенную численную величину, начиная с которой глаз отмечает ухудшение качества изображения.

В настоящее время нет программ для автоматического расчета допусков на неоднородность и бессвильность материала заготовки, так как не созданы алгоритмы однозначно связывающие критерии качества изображения с величиной градиента показателя преломления, площадью, занимаемой неоднородностью, её положением в объеме детали и положением самой детали в оптической системе.

Известны работы отечественных оптиков [1], например. Д.Максутов, рассматривая неоднородность как цилиндрическую линзу, он установил, что деформация волнового фронта, вызванная ею, равна: $h = \Delta n \cdot d$,

где Δn – градиент показателя преломления;

d – толщина свили.

Свиль вызывает вокруг дифракционного изображения точки рассеянный ореол, причем яркость относительно центра дифракционной точки равна:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{0.36 \times \lambda \times d}{D^2 \times \Delta n} \times \left(\frac{l}{D}\right)^2 \quad (2)$$

Из чего следует, что относительная яркость пропорциональна рабочей длине волны λ , ширине неоднородности d , квадрату отношения длины неоднородности l к диаметру линзы D и обратно пропорциональна квадрату диаметра линзы и градиенту показателя преломления.

Допустимую яркость можно выбирать, исходя из контрастной чувствительности глаза. При самом неблагоприятном случае, когда $l = D$, получим из (2)

$$\Delta n = 1,2 \lambda \cdot d / D^2. \quad (3)$$

По этой формуле можно вычислить для реального объектива допустимый размер неоднородностей, зная градиент показателя преломления или вычислить градиент показателя преломления, зная ширину неоднородности.

Следует отметить приблизительность приведенных выражений. При выводе формулы (3) было принято несколько допущений, например постоянная по площади яркость в дифракционном пятне и ореоле, не учитываются аберрации системы, перераспределяющие энергию из центрального пятна в кольца. Она не учитывает также положение неоднородности по диаметру детали и положение самой детали в приборе. Г.Слюсарев[2] предположил, что малые отклонения конструктивных элементов оптической системы от расчетных значений не

влияют на другие оптические характеристики, а их влияние на aberrации пропорционально величине отклонения:

Дифференцируя закон преломления $n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i'$, получаем, что луч, проходя неоднородную среду, изменяет своё первоначальное направление:

$$di = (dn/n) \cdot tgi \quad (4)$$

Допуская, что в каждом элементарном слое толщиной (dl_i) показатель преломления постоянен, а в соседнем слое показатель преломления ($n_i + \Delta n_i$), луч преломляется, можно вычислить кривизну траектории. В этом случае пластинка с постоянным градиентом показателя преломления работает как клин, допуск на оптическую неоднородность следует рассчитывать исходя из допустимого отклонения луча:

Линза с постоянным градиентом показателя преломления вдоль диаметра обладает комой. Допуск на неоднородность оптического материала для линз, в этом случае, рассчитывается из условия допустимой величины комы.

Г.В. Погаревым [3] в качестве критерия качества изображения используется критерий Релея, согласно которому качество изображения считается первоклассным, если волновая aberrация (Δv) в пределах действующего пучка не превышает $0,25\lambda$, где λ - рабочая длина волны. Здесь действующим или рабочим пучком называют пучок лучей наибольшего сечения ($D_{\text{раб}}$), который строит изображение точки в центре поля зрения и при выходе из системы весь попадает в глаз.

Выражение для расчета допусков, предложенное Погаревым соответствует формуле (1), но оно учитывает положение детали в приборе, имея в своем составе отношения диаметров рабочего и фактического диаметров детали:

$$(\Delta v)_{\text{доп}} = \Delta n \cdot h (D_{\text{раб}}/D_{\text{св}})^2 \quad (5)$$

где h – толщина свили;

$D_{\text{св}}$ – диаметр светового пучка в месте расположения свили.

При назначении допусков на оптическую неоднородность и бессвильность, М. Мальцев [4] учитывает, во-первых разрешающую способность приемника, во-вторых назначение отдельных оптических узлов и их положение в оптическом приборе. В указанной работе, а так же в [3] приводятся таблицы примерно рекомендуемых требований к материалу и изготовлению оптических деталей, составленная на основании опытных данных и расчетов. Выбор допусков по таблицам прост, но весьма приблизителен и зависит от интуиции конструктора разработчика.

Фундаментальные работы по исследованию влияния прямоугольных свилей на качество оптического изображения идеальной оптической системы проведены в середине 60-х годов сотрудниками предприятия Карл Цейс Йена Х. Кёллер и Р. Келлер [5-6]. Ими введено понятие эффективной площади свили F_s

и получена формула для определения величины интенсивности света в центре дифракционного кружка в идеальной системе, содержащей свиль во входном зрачке.

$$F_S = 4bh (1 - \cos 2\pi/\lambda) W(x, y), \quad (6)$$

где h b – длина и ширина свили, отнесенная к плоскости выходного зрачка;

$W(x, y)$ – волновая абберрация, вызванная свилью.

Интенсивность в центре кружка Эри для системы, содержащей свиль в выходном зрачке, рассчитывается по формуле:

$$J_0 = 1 - 2 (F_S / F_P), \quad (7)$$

где F_S – площадь входного зрачка.

Из формулы (6,7) следует, что прямоугольная свиль не влияет на качество изображения, если величина волновой абберрации, вызванная свилью кратна длине волны, а интенсивность дифракционного изображения в центре тем меньше, чем меньше отношение F_S / F_P . Так же установлено, что с увеличением эффективной площади свили увеличивается часть энергии переходящая из дифракционного пятна в кольца. Свиль ухудшает ФПМ [5], особенно на средних частотах, причем ФПМ не зависит от положения свили во входном зрачке [6].

Проводимые Х.Кёлер и Р.Келлер исследования относились к идеальным системам, у которых интенсивность J_0 в центре дифракционного пятна принималась равной единице. В реальных системах из-за наличия абберраций и влияния других свилей J_0 всегда меньше единицы.

Деформация волнового фронта, вызванная свилью, накладывается на деформируемый от вышеуказанных факторов фронт, и может усилить и ослабить возмущения в зависимости от знака деформации, как показано в работах Ch Hofmann, S.Pabst, W.Eichler [7-10].

В статье [7] исследуется влияние оптических неоднородностей на качество изображения (определяющую яркость Штреля) в реальных системах, имеющих малые и значительные волновые абберрации, выведены формулы для точного и приблизительного уменьшения определяющей яркости в результате совместного действия оптических неоднородностей и волновых абберраций. Неоднородности, расположенные не в центре выходного зрачка, как и функции распределения интенсивности в изображении точки становятся не симметричной. В результате экспериментальных исследований [8] установлено, что наиболее сильное влияние на определяющую яркость Штреля оказывают оптические неоднородности, расположенные в центре или на краю выходного зрачка.

Х.Хофманн в [9] установил, что уменьшение интенсивности в центре дифракционного пятна есть сумма трех составляющих:

$$\Delta J = \Delta J_1 + \Delta J_{11} + \Delta J_{111} \quad (7)$$

Первое слагаемое соответствует соотношению для безабберационных систем, второе учитывает остаточные абберации системы и третий член учитывает суммарное действие перекрытых свилей. Так как в реальных системах неоднородности располагаются не в выходном зрачке, как принималось для упрощения при выводе формул, а произвольно, то деформации волнового фронта следует переносить в выходной зрачок. Перенос волновых аббераций производится легко, если оба фронта расположены вблизи входного зрачка и удалены от плоскости изображения. При этом может возникнуть ситуация наложения изображения неоднородностей друг на друга. В работе [10] отмечается, что совместное действие двух перекрытых свилей не равнозначно таким же рядом расположенным свилем, так как в выражении (7) уменьшение интенсивности в дифракционном пятне ΔJ_{11} и лишь линейно от относительной площади ΔJ_{111} .

В публикациях [11-13] указано, что в реальных системах типичные деформации волнового фронта, вызванные свилем, имеют форму близкую к треугольной или синусоидальной у ленточных свилей и квазипараболических у узловых [11]. В результате комплексных исследований [12] было установлено, что ни положение треугольной свили в выходном зрачке, ни её разворот относительно принятых осей координат не влияет на величину числа Штреля. Аналогичные результаты получены при исследовании синусоидальных свилей. Как показано в [13] определительная яркость Штреля не зависит от положения узловых свилей в выходном зрачке, а зависит от их величины и волновой абберации, вызванной ими, при этом максимально допустимая величина зоны, деформированная неоднородностью должна быть меньше $F_S < 1/3F_P$. Установлено, что если зона выходного зрачка меньше допустимой F_S , то число Штреля остается $V > 0,8$ даже при величине деформаций в несколько длин волн.

Приведенный обзор методов расчета допусков на однородность и бессвильность в оптических деталях показывает, что проблеме назначения допусков нельзя считать решенной. В большинстве случаев исследования проводились для частных случаев, формулы недостаточно точны и относились к частным случаям формы оптических неоднородностей. Для использования расчетов в практике конструкторской деятельности требуется применять более удобные для компьютерных расчетов критерии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максutow Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 280 с.
2. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1975. – 640 с.
3. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под ред. В. А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
4. Мальцев М. Д. Расчет допусков на оптические детали. – М.: Машиностроение, 1974. – 168 с. T.W.H.Selwin, Proc. Phys.55.310/268.1943.
5. H.Kohler. Optik 21, Heft 7, 1964.
6. R. Keller. Optik 21, Heft 7, 1964.
7. Ch. Hofmann, S. Pabst, W. Eichler Experimentelle Technik der Physik XXIII, 1975, Heft 5.

8. Ch. Hofmann, S.Pabst, W. Eichler Feingeratetechnik, 25, Heft 10. 1976.
9. Ch. Hofmann, S.Pabst, W. Eichler Feingeratetechnik, 25, Heft 11. 1976.
10. Ch. Hofmann, Eichler Experimentelle Technik der Physik XXVI, 1978, Heft 4.
11. Сокольский М.Н. Выбор требований к оптическому стеклу. Л.: ЛИТМО. 1983.
12. B. Lisowska, K. Pietrasiewicz Optika Aplikata VIII/3, 1978.
13. Зверев В.А., Родионов С.А. Сокольский М.Н. // Оптика и спектроскопия. – Т. XXXV1, вып. 4, 1974.

© Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, 2013

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКОЙ СИСТЕМЫ В СОВРЕМЕННОМ ОПТИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Елизавета Геннадьевна Бобылева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Светлана Васильевна Критинина

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

В статье рассмотрены роль и пути совершенствования транспортно-складского хозяйства на предприятиях приборостроительного комплекса.

Ключевые слова: интегрированные производственные системы, механизация и автоматизация складов, автоматизированное управление.

IMPROVEMENT OF TRANSPORT AND WAREHOUSE SYSTEM TO MODERN-TODAY, OPTICAL ENGINEERING

Elizaveta G. Bobyleva

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, senior lecturer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Svetlana V. Kritinina

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo 10, senior lecturer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

The article considers the role and the ways of improvement of transport-storehouse management of the enterprises of instrument-making complex.

Key words: integrated production systems, mechanization and automatic warehouses, automated management.

На предприятиях оптического приборостроения решается целый комплекс производственных задач, в частности увеличения роста производства и повышения его экономической эффективности, а также освоения новой техники и технологий. Одним из слагаемых, обеспечивающих достижение этих целей, является эффективное управление запасами материально-технических ресурсов на предприятии. Складское хозяйство – одно из важнейших звеньев технологического процесса и организации производства приборостроительного предприятия.

На протяжении длительного промежутка времени предприятия считали основной целью – налаживание производительных и экономичных процессов снабжения, изготовления и потребления, не придавая должного значения внутренним складским операциям. На производственных складах выполнялся большой объем погрузочно-разгрузочных работ, работ по перемещению материалов, и значительную их долю составлял ручной труд. Мало внимания уделялось совершенствованию процессов хранения и обработки запасов, эффективности использования складских площадей, технике и приемам грузопереработки, что указывало на низкий уровень развития оптического производства в целом.

В настоящее время при высокой степени технической вооруженности промышленных предприятий, развитии и применении интегрированных и гибких производственных систем (ГПС) необходимы высокая степень организации складского хозяйства, механизация и автоматизация работ с грузами, использование новейших технологий, совершенствование систем управления, наличие квалифицированных кадров.

Основная тенденция в организационной и технологической работе складских хозяйств сегодня – это оптимизация и автоматизация их деятельности. Под автоматизацией складских систем (АСС) подразумевается совокупность взаимосвязанных и согласованных в производстве процессов, методов и средств, обеспечивающих хранение, перемещение запасов и комплексный учет товарно-материальных ценностей с целью обеспечения ритмичного производственного процесса в ГПС.

Автоматизация складского хозяйства включает ряд мероприятий, как:

- оснащение склада необходимыми техническими средствами, улучшение структуры парка подъемно-транспортных и транспортных машин; создание автоматизированных контейнерных площадок;

- разработка и внедрение комплексной информационной системы, автоматизирующей складскую деятельность. Совершенствование информационных технологий увеличивает гибкость производства, давая возможность складским операторам быстрее реагировать на изменения и оценивать результаты деятельности при различных условиях работы гибкого автоматизированного производства (ГАП);

- изменение организации работы склада в соответствии с новыми требованиями. Это позволит сократить продолжительность и трудоемкость погрузочно-разгрузочных операций, повысить оперативность учета и сохранность груза при транспортировке;

- внедрение систем материально-технического снабжения типа «точно вовремя», которые значительно сократят объем складских запасов;

- улучшение использования складских помещений: применение вертикально-замкнутых (люлечные) складов с программным управлением позволит занимать малые производственные площади при достаточно большой емкости за счет вертикального расположения;

- обучение персонала.

АСС подразумевает также автоматическую выписку необходимых документов, отражающих движение изделий (накладных, счетов, актов списания и т. п.), сопровождение операций по приходу и выдаче производственных средств, списание со складов и т. д. На электронное устройство подается информация со всех участков склада, отсюда даются исполнительные команды на поступление, хранение и выдачу грузов. Процесс автоматизированного управления технологическими процессами современного складского хозяйства представляет собой, таким образом, систему с обратными связями, что позволит кладовщикам, мастерам и руководителям своевременно получать информацию о состоянии дел и при необходимости оперативно корректировать его работу, что еще раз говорит о гибкости этой системы.

В современном промышленном производстве на успешную работу складского хозяйства большое влияние оказывает автоматизированная транспортная система (АТС), являющаяся неотъемлемой частью ГАП. АТС обеспечивает:

- получение из АСС и возврат изделий (полуфабрикатов, материалов, комплектующих изделий, инструмента, технологической оснастки и др.);
- перемещение изделий в заданном направлении с заданной скоростью;
- перекладывание с одних транспортных средств на другие;
- установку на приемные устройства с заданной точностью;
- транспортировку изготовленных изделий на склад готовой продукции и т. д.

Эта система должна удовлетворять требованиям ГАП, сохранять ориентацию перевезенного груза, осуществлять связь с верхним уровнем управления.

Поэтому в состав автоматизированных складов должны входить накопительно-ориентирующие устройства и системы машин, обеспечивающие транспортировку, установку и поиск материалов по специальным программам с использованием роботов (например, электророботы, подвесные транспортные роботы, конвейерные системы, быстродействующие автоматические стропы и захваты). Транспортные роботы являются универсальным гибким средством реализации межучастковых и межоперационных связей. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с другими средствами: малогабаритностью подвижного состава; большим диапазоном регулирования производительности; автоматическим перемещением; полным освобождением проездов после прохождения транспортного робота для других видов транспорта; автономностью.

Для комплексной механизации и автоматизации транспортных операций большое значение имеет также укрупнение грузовых единиц путем применения контейнеров и средств пакетирования (поддоны всех типов, стропы, кассеты, обвязки, прокладки и т. п.).

Система автоматического сопровождения груза в зоне склада требует комплекса электронных устройств для каждого наименования. Поэтому чем больше число наименований грузов охватывается автоматизацией, тем более громоздкой будет сеть информационных, командных и исполнительных каналов. В настоящее время практикой установлено, что автоматизация процессов на

складе с номенклатурой грузов до 50 наименований дает высокую экономическую отдачу, до 100 наименований – достаточно эффективна, 300 и выше – неэкономична.

В связи с этим руководителям предприятий приборостроительной промышленности, приступающих к реализации задачи оптимизации работы складского хозяйства, необходимо решить целый комплекс вопросов. Прежде всего, будет ли экономически обоснованным внедрение системы автоматизации, как и насколько автоматизация складской деятельности позволит сократить запасы и увеличить товарооборот, какие изменения в организации работы склада и во взаимоотношениях с производством необходимо произвести. Кроме того, не менее важно определить, какие требования к навыкам и уровню знаний будут предъявляться к сотрудникам склада для успешного использования системы автоматизации.

В заключение статьи хотелось бы отметить следующее. Организация складского хозяйства является важным звеном в работе предприятия. Приоритетным направлением в развитии транспортно-складского хозяйства является их механизация и автоматизация, внедрение новой техники и методов работы. Более совершенная технология складирования и транспортирования дает возможность автоматического распределения объекта труда вдоль общего интеграционного потока производства. Принцип комплексного подхода позволяет повысить эффективность работы транспортно-складского хозяйства, сократить запасы и повысить товарооборот, минимизировать время выполнения складских операций и увеличить их точность. Все это поможет снизить расходы на содержание этих хозяйств и повысить производительность труда, а, соответственно, и прибыль предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новицкий, Н. И. Организация производства на предприятиях. Учеб.-метод. пособие / – М.: Финансы и статистика, 2001. – 392с.
2. Бухалков, М. И. Внутрифирменное планирование. Учеб. для вузов / – М.: ИНФРА-М, 2001. – 400 с.
3. Бобылева, Е. Г. Интегрированные производственные системы в приборостроении [Текст]: / Е. Г. Бобылева // ГЕО-Сибирь-2010: сб. матер. VI Междунар. науч. конгр., 19-29 апр. 2010 г. – Новосибирск: СГГА, 2010. – Т. 5, ч. 1. – С. 200-202.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studuck.ru/documents/organizatsiya-skladskogo-khozyaistva-na-predpriyatii>
5. Как повысить эффективность складского хозяйства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kimo-consulting.com/page.php?id=492>.

© Е.Г. Бобылева, С.В. Критинина, 2013

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Светлана Васильевна Критинина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), старший преподаватель кафедры технология оптического производства, 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, тел.+7(383)361-07-79, e-mail: kritinina.sveta@yandex.ru

Елизавета Геннадьевна Бобылева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), старший преподаватель кафедры технология оптического производства, 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, тел.+7(383)361-07-79, e-mail: kritinina.sveta@yandex.ru

В статье представлен обзор зарубежного оборудования, используемого для производства оптики на российских предприятиях.

Ключевые слова: оптическое оборудование, точность изготовления, асферические поверхности, электронный микрометр.

MODERN EQUIPMENT IN OPTICAL ENGINEERING

Elizaveta G. Bobyleva

Siberian state geodetic Academy, 630108, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, senior lecturer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Svetlana V. Kritinina

Siberian state geodetic Academy, 630108, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, senior lecturer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

This article provides an overview of the foreign equipment used for the production of optics at the Russian enterprises.

Key words: optical equipment, precision manufacturing, aspherical to-surface, electronic micrometer.

В течение длительного времени одним из немногих производителей современного оптического оборудования для предприятий отрасли был Сморгонский завод оптического станкостроения (г. Сморгонь, Белоруссия). Это предприятие производило широкую номенклатуру станков для традиционной обработки (метод свободного поверхностного притира) и скоростной алмазной обработки оптических заготовок. Конструкции станков постоянно совершенствовались в целях обеспечения максимальной производительности и высокой точности обрабатываемых деталей. Оборудование, изготовленное в те годы и имеющее солидный возраст, до сих пор можно встретить на многих предприятиях отрасли и, более того, оно в работоспособном состоянии и продолжает выполнять свои функции.

Тем не менее, развитие оптических технологий не стоит на месте. На базе развития микроэлектроники стали возможны новые конструктивные решения и использование их при создании оптического оборудования нового поколения. В первую очередь это относится к ведущим мировым фирмам по производству оптического оборудования – «SatisLoh» и «OptoTech». В совокупности с достижениями в области числового программного управления это дало принципиальную возможность создать автоматизированное оборудование для обработки оптических деталей.

Так на предприятии ОАО «НППКП «КВАНТ» в Санкт-Петербурге освоено изготовление точных (до 50 нм) сферических и асферических поверхностей оптических деталей на новейшем оборудовании фирмы «OptoTech» (Германия). Такое оборудование реализует принципиально новые подходы в оптической новой технологии, ставшие возможными благодаря развитию ЧПУ и электро-механических устройств станков (рис. 1).

Благодаря этим станкам предварительное шлифование, тонкое шлифование, полирование и центрирование проводятся за один цикл обработки. Инструмент для предварительной и тонкой шлифовки, а при необходимости и центрирующее устройство представляет собой единое целое, один комбинированный универсальный инструмент.

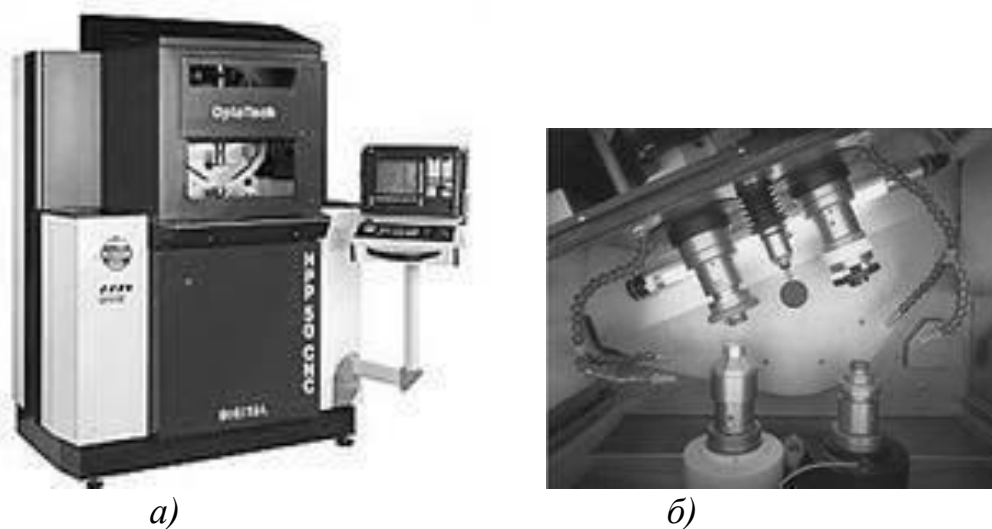


Рис. 1. Внешний вид (а) и рабочая зона (б) станка модели SM100CNC

Одной из новейших технологий, освоенных на Уральском оптико-механическом заводе (УОМЗ), можно считать технологию шлифования и полирования оптических деталей различной кривизны и диаметра на современном оборудовании немецкой фирмы «LOH» (рис. 2). При помощи электронного микрометра, установленного на нем, можно регулировать радиус кривизны, кругление деталей в заданный диаметр и осуществлять фасетирование.

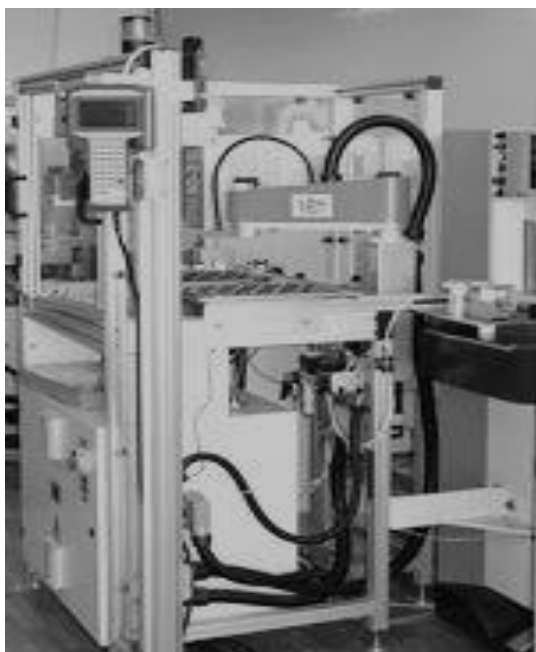


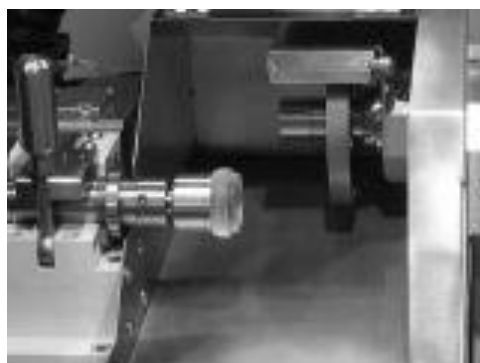
Рис. 2. Многофункциональный станок для обработки оптики фирмы «ЛОН»

Центрирование линз проводится на прецизионном центрировочном станке модели WZM 150 CNC фирмы «OptoTech» (рис. 3). На этом станке осуществляется центрирование линз, фасонная обработка по диаметру, обработка специальных фасок. Центрирование – завершающая операция в цепочке производства оптических деталей, и поэтому является важнейшим звеном всей технологической линии. Технические данные станка:

- рабочий диапазон: Ø 10-150 мм (в зависимости от Ø инструмента);
- диаметр инструмента: 120-180 мм.



а)



б)



в)

Рис. 3. Прецизионный центрировочный станок модели WZM 150 CNC фирмы «OptoTech»: а – внешний вид; б, в – рабочая зона

Новая электронно-лучевая вакуумная установка «Ortus» (рис. 4) компании «Изовак» (Беларусь) предназначена для получения высококачественных алмазоподобных покрытий OpDio. Метод основан на распылении мишени из графита и деструкции углеводородов в плазме газового разряда с последующим формированием ионного пучка, что обеспечивает получение квазиаморфных алмазоподобных пленок. Покрытие используется как защитно-просветляющее для нанесения на германиевые и кремниевые подложки максимальным размером 360 x 340 мм с гарантированной равномерностью покрытия $\pm 3\%$. Однослойное покрытие OpDio может быть оптимизировано для диапазонов 3-5 и 7-14 мкм.

Такие покрытия имеют следующие достоинства:

- низкая дефектность покрытия;
- гарантированная адгезия;
- высокие оптические параметры в ИК диапазоне;
- высокая прочность, износостойкость и сопротивление внешним агрессивным средам.

Германиевые и кремниевые подложки с таким покрытием применяются во входных окнах тепловизоров и систем ночного видения.

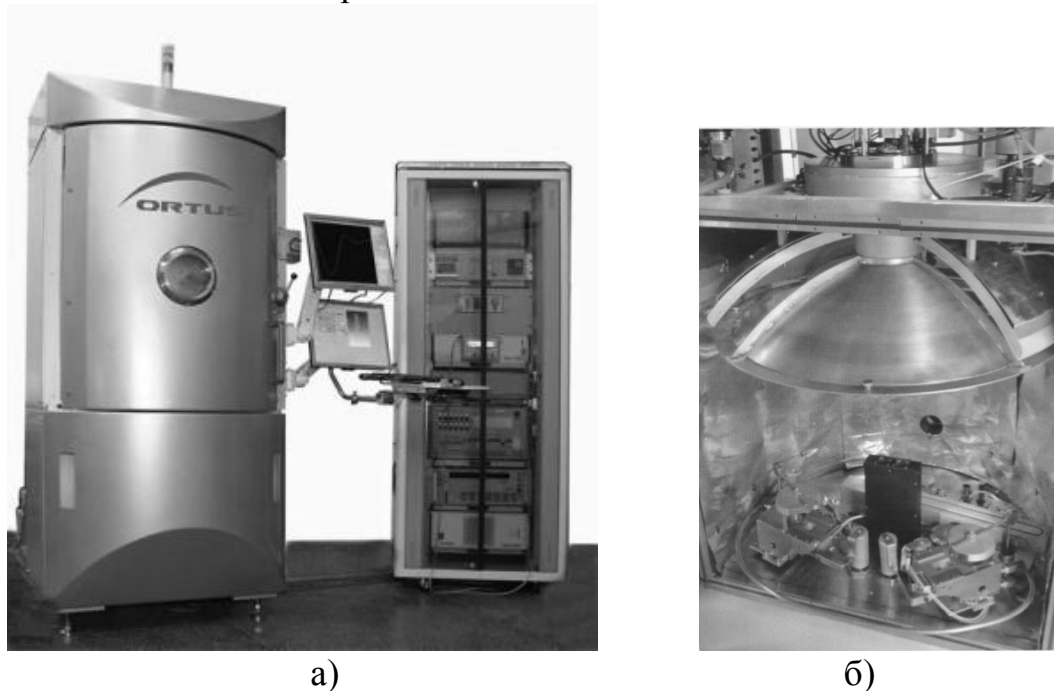


Рис. 4. Внешний вид (а) и рабочая зона (б) электронно-лучевой вакуумной установки «Ortus»

Отличительной особенностью установки является: наличие двух электронно-лучевых испарителей (ЭЛИ) производства Telemark, установленных в одной камере с тиглями различных объёмов. Установка снабжена программным обеспечением автоматического управления системы откачки и автоматического управление технологическими процессами.

Рассмотрены виды оборудования могут быть рекомендованы для внедрения на предприятиях и организациях, входящих в холдинг Швабе корпорации Ростехнологий в реальном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптическое производство. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.uomz.ru /opticheskoe proizvodstvo](http://www.uomz.ru/opticheskoe_proizvodstvo)
2. Оптическое производство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [prkrk.kvant.Ru/technologies/ opticheskoe proizvodstvo](http://prkrk.kvant.Ru/technologies/opticheskoe_proizvodstvo)
3. Критинина, С.В. Инновационные технологии и оборудование оптического производства [Текст]: С.В. Критинина // ГЕО-Сибирь-2011: сб. матер. VII Междунар. науч. конгр., 19-29 апр. 2011 г. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 5, ч. 1. – С. 196-201.

© С.В. Критинина, Е.Г. Бобылева, 2013

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ ТРАВЛЕНИЯ НА СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ

Людмила Борисовна Воробьева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии оптического производства, тел. (383) 361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

Изучен поверхностный слой силикатного стекла, сформированный в результате химического травления. Предложен способ оценки толщины слоя травления по выходу в раствор щелочного катиона и измеренной величине сорбционной емкости.

Ключевые слова: поверхностный слой, силикатное стекло, травление.

FORMATION OF LAYERS OF ETCHING ON SILICATE GLASSES

Ludmila B. Vorobyeva

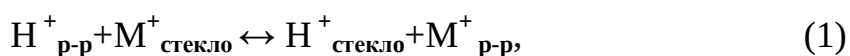
«Siberian State GEODESIC UPR Academy», 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plachotnogo, do-cent, department of technology of the optical production, tel. (383) 361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

Studied the surface layer of silica glass formed by chemical etching. We propose a way to estimate the thickness of the door etching in a solution of alkali cations and measured sorption capacity.

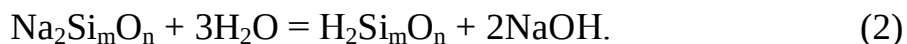
Key words: surface layer, silica glass, etching.

В связи с открытием новых областей применения стеклообразных материалов, где стекла играют не традиционную пассивную (например, оптические среды, электроизоляционные материалы и т.п.), а активную роль (лазерные материалы, материалы для записи информации, элементы электронных приборов, дозиметрические материалы и т.п.). Структура, состав и состояние поверхности оптических элементов определяют функциональные и эксплуатационные возможности оптических узлов приборов [1]. Для адекватного прогнозирования изменения оптических и физико-технических характеристик оптических изделий при различных внешних воздействиях актуальным становится изучение кинетики физико-химических процессов, происходящих на поверхности оптических элементов при химических, механических и прочих воздействиях, а также разработка моделей различных механизмов формирования неоднородной структуры поверхностного слоя, образующегося на элементах, выполненных, в частности, из силикатных стекол. Вопросы кинетики и механизма диффузионных процессов на границе стекло - травящий раствор, сопровождаемых протеканием гетерогенных химических реакций, до сих пор остаются наименее изученными как по наличию экспериментального материала, так и по уровню теоретического осмысления. В силикатном стекле состояние кремнезема является важнейшим фактором, определяющим разрушаемость стекол водными растворами. Ряд исследователей рассматривает химическое взаимодействие

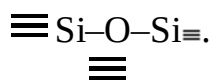
стекла с водными растворами с точки зрения обмена ионов с поверхности стекла на ионы из раствора, сопровождающееся диффузионными процессами (Никольский, 1937; Douglas, Isard, 1949; Boksay, Bouquet, Dobos, 1968). По известным представлениям И. В. Гребенщикова, кремнезем, входящий в состав стекла, имеет двойную природу: часть его не связана с основными окислами и образует весьма прочный кремнеземистый скелет, нерастворимый в воде и в кислотах. Другая часть, связанная с основными окислами в виде силикатов, заполняет промежутки скелета. Кремнекислородные тетраэдры, вершины которых связаны с ионами металлов, являются более уязвимыми звеньями структуры. При воздействии воды или водных растворов происходит ряд одновременно протекающих процессов: обменная адсорбция между ионами металлов в стекле и ионами воды и раствора:



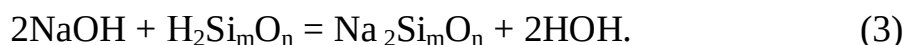
растворение и гидролиз силикатов металлов, с образованием геля кремневой кислоты:



Выделившаяся в результате реакции гидролиза слабая кремниевая кислота содержит четыре группы OH, способные к реакции поликонденсации с образованием связей между атомами кремния через атом кислорода



Вторичное взаимодействие с образующейся щелочью приводит к разрушению поверхностного слоя с переходом в раствор кремниевой кислоты



Целью настоящей работы является изучение кинетики процесса формирования поверхностного слоя на силикатном стекле и поиск простого способа определения его толщины степени разрушенности. Привлечение второго закона Фика для анализа выхода из стекла щелочного компонента как функции от времени травления (t) позволяет получить формулу:

$$\left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)_x = D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right)_t, \quad (4)$$

где n - молярная концентрация щелочного иона; D - коэффициент диффузии; координата x относится к фактическому стеклу, измеряется по нормали к поверхности и равна 0 непосредственно на поверхности стекла.

Введем координату y , движущуюся в толщу стекла со скоростью a , тогда связь между координатами x и y определяется выражением: $x=y+at$. Граничные условия таковы: молярная концентрация щелочных ионов $n=0$ при $y=0$ в каждой точке, включая $t=0$. Последнее отвечает гипотезе, что ионная замена на поверхности происходит очень быстро. Если растворение структурной сетки стекла (структуры SiO_2) происходит медленно или структурная сетка в выбранном травящем растворе не растворима, то $a=0$ и для молярной концентрации щелочного компонента получаем известную формулу [2]

$$n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^r \exp(-p^2) dp, \quad (5)$$

где $r = y/\sqrt{4Dt}$.

Для демонстрации кинетики процесса травления выполнен расчет изменения концентрации щелочного иона для стекла состава 7,7 K_2O -23,1 PbO -69,2 SiO_2 (в мол. %) с коэффициентом диффузии $D \approx 6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{час}$ при 40°C и скоростью растворения сетки $a \approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ см}/\text{час}$. Изменение содержания щелочного катиона в поверхностном слое происходит с высокой скоростью в первые десятки часов травления, затем процесс замедляется по мере приближения к равновесному состоянию. Результат показан на рис. 1.

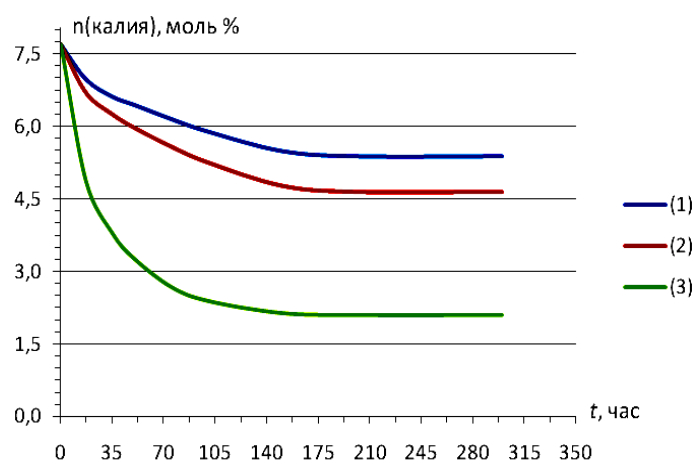


Рис. 1. Изменение содержания щелочного иона в поверхностном слое стекла на глубине $8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ (линия 1), $5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ (линия 2), 10^{-3} мм (линия 3)

Результаты выполненного анализа закономерностей диффузии одно зарядных катионов из силикатного стекла в раствор соотнесены с экспериментально определенным выходом из стекла щелочных ионов. Изучение химического состава травящего раствора позволяет определить выход компонентов стекла в процессе травления и опосредованно оценить толщину нарушенного слоя.

Травление моделировалось на порошках стекол системы K_2O - PbO - SiO_2 . Порошки готовились дроблением в шаровой мельнице с последующей ситовой классификацией. Средний размер частиц порошка стекол – 200 мкм. Предварительно обезжиренная навеска порошка стекла в $0,4 \text{ см}^3$ помещалась в фильтр

Шотта и доводилась до постоянной массы при температуре 120 °С. Разница в массе навески до и после травления (Δm) является мерой разрушения поверхностного слоя стекла. Количества K_2O и PbO в травящем растворе определялись методом пламенной фотометрии. В табл. 1 приведены результаты.

Таблица 1

Выход из стекла щелочного компонента

Характеристики стекла		Травящий раствор	Потеря массы $\cdot 10^3 \text{ г/0,4 см}^3$	Выход K_2O в травящий раствор $\cdot 10^3 \text{ г/0,4 см}^3$
Содержание, мол. %	Плотность г/см^3			
K_2O	PbO			
Состав 1		H_2O	Не обнаружена	0,04
7,7	23,1	0,1н HCl	3,5	0,23
Состав 2		H_2O	1,5	0,02
5,9	41,2	0,1н HCl	51,5	9,06

Кинетика процесса выхода из стекла щелочных ионов (Boksay, Bouquet, Dobos) и формирование на поверхности измененного нарушенного слоя [3] одинаково описываются экспоненциальными зависимостями. Известно, что травление формирует нарушенный пористый слой, характеризующийся развитой поверхностью. Площадь сформированной поверхности позволяет определить степень «нарушенности» материала. В настоящей работе степень развитости поверхностного слоя стекла после травления определена по величине сорбционной емкости метиленового синего (м.с.) и количеству десорбированного аргона. Расчет удельной поверхности стекла по величине сорбционной емкости метиленового синего выполнялся по формуле Ленгмюра, при этом величина поперечного сечения молекулы адсорбата была принята равной $1,35 \text{ нм}^2$, что соответствует плоской ориентации молекул красителя. Результаты измерений площади поверхности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Площадь поверхности образцов стекла после травления

Образец стекла	Травящий раствор	Емкость монослоя по сорбции м.с. 10^4 ммоль/см^3	Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{см}^3$
			По количеству сорбированного м.с.
Состав 1	H_2O	0,2	0,02
	0,1н HCl	45,0	3,60
Состав 2	H_2O	2,0	0,12
	0,1н HCl	96,0	7,70

Для соотнесения результатов выхода из стекла щелочного компонента и определения глубины нарушенного слоя выполнен расчет величины последнего. При расчете была учтена площадь поверхности стекла, определенная по

количеству сорбированного метиленового синего. Для стекла состава 2 толщина выщелоченного слоя соответствует 107,5 нм после обработки в воде и 1282,5 нм после обработки в 0,1н HCl. Такие значения глубины нарушений структуры стекла, вызванных травлением, согласуются с известными сведениями.

Для силикатного стекла изучен выход в воду и кислый раствор щелочных ионов. Рассмотрена кинетика процесса ионного обмена и растворение структурной силикатной сетки в процессе воздействия на стекло воды. Процесс диффузии в поверхностном слое описан выражением, отнесенным к движущейся координатной системе. Предложен способ определения глубины поверхностного слоя по количеству вышедших из стекла в воду или водный раствор ионов щелочного металла.

Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что установленные в работе закономерности процессов диффузии из стекла щелочных ионов могут быть полезны при решении задач, связанных с модификацией поверхности стекла, интенсификацией процессов ионообменного упрочнения стекла, при создании оптических сред с закономерным распределением показателя преломления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьева, Л.Б., Алексеева, З.Е. Влияние дефектов поверхности пластины сегнетоэлектрического кристалла на дифракционную эффективность элемента оптической памяти / Л.Б. Воробьева, З.Е. Алексеева // Сб. матер. VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010». – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 197-199.
2. Boksay Z., Bouquet G., Dobos S. The kinetics of the formation of leached layers on glass surfaces // *Physics and Chemistry of Glasses*. – 1968. – V. 9, № 2. - P. 69–71.
3. Воробьева, Л.Б. Изучение выхода компонентов силикатных стекол в водные растворы / Л.Б. Воробьева // Сб. матер. V Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2009». – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 217-220.

© Л.Б. Воробьева, 2013

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Сергей Сергеевич Овчинников

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, 8-961-872-49-66 serpanya@yandex.ru

Василий Михайлович Тымкул

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры НиО

Максим Михайлович Кузнецов

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТОП, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru

В статье рассмотрен бесконтактный оптический способ контроля шероховатости поверхности.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, бесконтактные измерения.

OPTICAL METHOD FOR THE CONTROL OF SURFACE ROUGHNESS

Sergei S. Ovchinnikov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, post-graduate student, 8-961-872-49-66 serpanya@yandex.ru

Vasily M. Timkul

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph.D., Professor of the chair of the Department

Maxim M. Kuznetsov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, tr. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor, Department head at the TOP, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru.

In the article the author considers the non-contact optical method of control roughness of the surface.

Key words: surface roughness, non-contact measurements.

Контроль геометрических параметров объектов является традиционной областью, в которой эффективно используются оптические методы измерений [1]. крупносерийный и массовый характер современного производства промышленных изделий и необходимость оперативного контроля их геометрических параметров, в том числе и шероховатости, требуют применения для этих целей бесконтактных контрольно-измерительных средств, обладающих высо-

кой производительностью и точностью измерений и позволяющих осуществлять контроль размеров изделий сложной формы, причем в процессе движения их по измерительной позиции. Традиционные средства измерений проекционного типа и их современные автоматизированные аналоги не удовлетворяют этим требованиям в силу низкой производительности.

Согласно существующим требованиям [2], шероховатости поверхности определяется функциональным назначением поверхности. Для неразрушающего контроля шероховатости, может использоваться двойной микроскоп В.П. Линника [3]. Представленный метод [4] псевдоцветового кодирования изображений в своей основе содержит результаты микроскопических исследований, проводимых визуально.

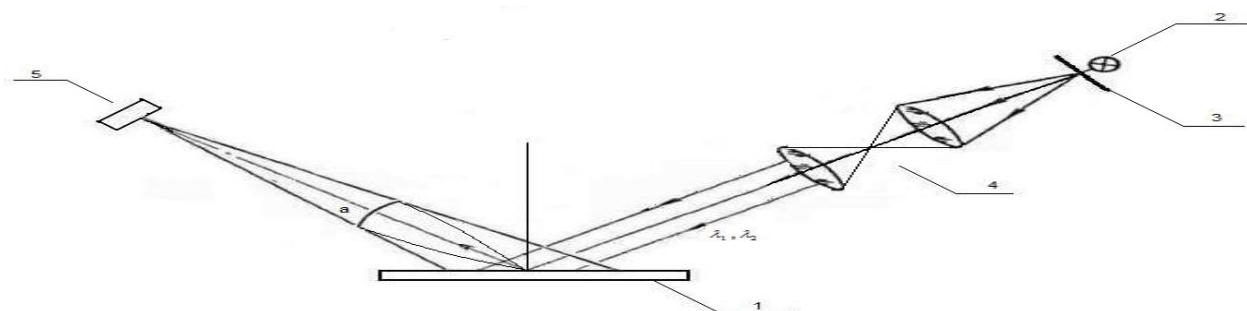


Рис. 1. Принципиальная схема установки

1 – исследуемый образец; 2 – источник излучения; 3 – спектральный фильтр;
4 – формирующая оптическая система; 5 – цифровая видеокамера

Работа способа заключается в следующем: образец, помещается на предметный стол микроскопа, затем устанавливается схема состоящая из источника излучения, спектрального фильтра, формирующей оптической системы, через которую производится подсветка изучаемого объекта, в центр светового пятна направлен объектив цифровой видеокамеры, с помощью которой производится регистрация изображения на длине волны λ_1 . Затем эксперимент повторяется, при этом отличием является замена спектрального фильтра и получения изображение на длине волны λ_2 . Получение изображения на длинах волн λ_1 и λ_2 вводятся в ЭВМ, где производится обработка изображений.

Результат, достигаемый при решении поставленной задачи, заключается в создании физически обоснованного способа бесконтактного измерения параметров шероховатости поверхности, на основе освещения ее излучением на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , приеме регистрации и обработке двумерных картин поля зеркальных компонент отраженного излучения используемой поверхности.

Поставленная задача достигается за счет того, что в способе бесконтактного измерения параметров шероховатости поверхности заключающимся в том, что направляют на измеряемую поверхность пучок зондирующего излучения, формируют область освещенной излучением поверхности, измеряют характеристики отраженного излучения, изменяют размер освещающего пятна x на из-

меряемой поверхности в диапазоне от 0 до L , определяют функцию распределения среднеквадратического отклонения высоты шероховатости зависимости $Rq(x)$ и ее производную $Rq'(x)$, согласно изобретению поверхность освещается поочередно на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , регистрируются в направлении зеркального отражения оптические изображения освещаемых областей поверхности объекта и определяют среднеквадратическое значение высоты неровностей Rq .

При этом, среднеарифметическое значение высоты шероховатости определяется по формуле:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L \sqrt{Rq^2(x) + 2Rq(x)Rq'(x)x} dx \quad (1)$$

где $Rq(x)$ и $Rq'(x)$ – соответственно функция распределения среднеквадратического значения высоты неровности от размера освещающего пятна x и ее производная; L – диапазон изменения текущего размера x освещающего пучка.

Суть метода и физическое обоснование способа бесконтактного измерения параметров шероховатости поверхности объектов приведена в работе [5].

Результат, достигаемый при решении поставленной задачи, заключается в создании физически обоснованного способа бесконтактного измерения параметров шероховатости поверхности, на основе освещения ее излучением на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , регистрации и обработке двумерных картин поля зеркальных компонент отраженного излучения используемой поверхности. Изображение микронеровностей поверхности на разных длинах волн представлены на рис. 2.

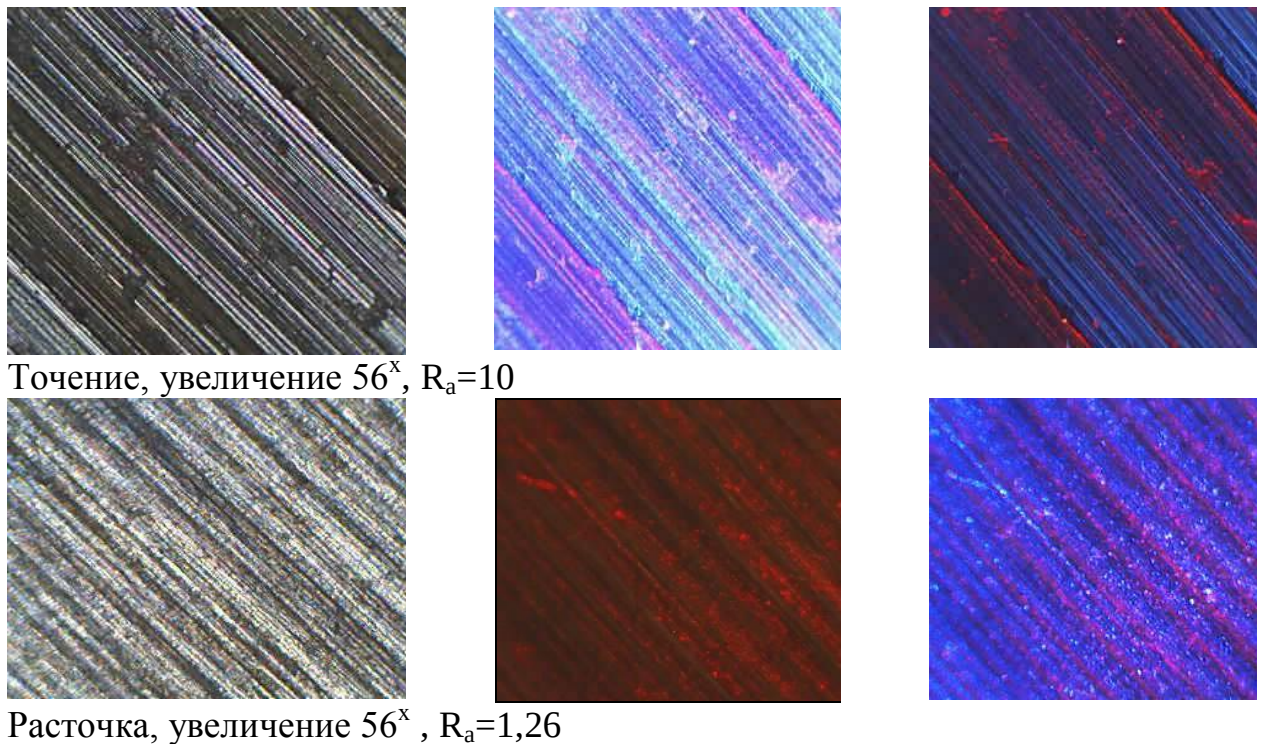


Рис. 2. Изображения микронеровностей поверхностей

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михляев, С.В. Системы технического зрения на основе Фурье-оптики и оптической триангуляции для контроля размеров изделий и диагностики роста кристаллов // Автореф. докт. диссер., Новосибирск, ИАиЭ РО РАН, 2009. – 36 с.
2. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.
3. Дунин-Барковский, И.В., Карташова, А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Кузнецов, М.М. Повышение контраста и информативности изображений на основе спектральной и пространственно-угловой фильтрации излучения [Текст] / М.М. Кузнецов, О.К. Ушаков, В.М. Тымкул, М.Ф. Носков // Вестник СГГА. – 2010. – № 2(13). – С. 96–100.
5. Топорец, А.С. Оптика шероховатости высот поверхности. – Л.: Машиностроение, 1988.

© С.С. Овчинников, В.М. Тымкул, М.М. Кузнецов, 2013

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ПСЕВДОЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Павел Иванович Петров

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, инженер кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Алена Алексеевна Мараш

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, инженер кафедры технологии оптического производства, тел (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Максим Михайлович Кузнецов

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТОП, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru

В статье рассмотрена возможность использования метода псевдоцветового кодирования оптических изображений для контроля качества сварных швов.

Ключевые слова: сварной шов, контроль качества, дефект.

QUALITY CONTROL OF WELDED JOINTS WITH THE HELP OF A METHOD PSEUDO-COLOR IMAGE CODING

Pavel I. Petrov

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, engineer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Alena A. Marash

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, engineer of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Maxim M Kuznetsov

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, str. Novosibirsk, ul. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor of the Department of technology of optical production, tel : (383) 361-07-79, e-mail: kaf.top@ssga.ru

The article considers the possibility to use the method pseuding-color coding of optical images to control the quality of welded joints.

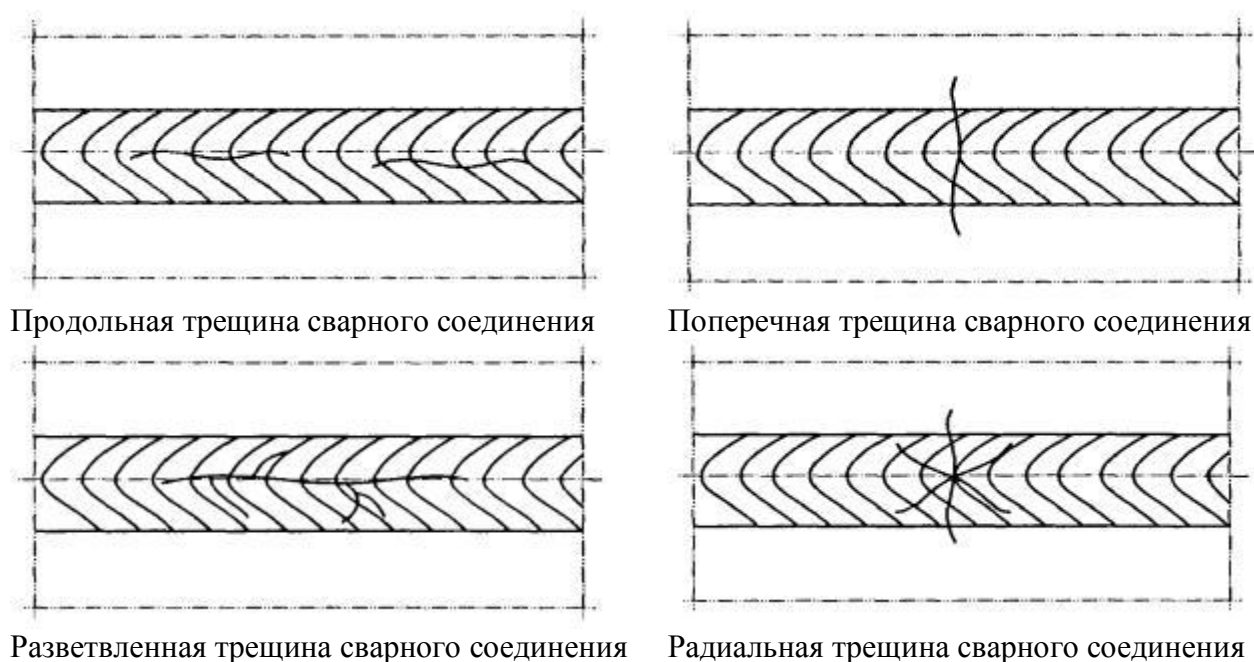
Key words: welding, quality control, defect.

Дефекты сварных соединений различают по причинам возникновения и месту их расположения. В зависимости от причин возникновения их можно разделить на две группы. К первой группе относятся дефекты, связанные с металлургическими и тепловыми явлениями, происходящими в процессе образо-

вания, формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания сварного соединения: горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, поры, шлаковые включения, неблагоприятные изменения свойств металла шва и зоны термического влияния. Ко второй группе дефектов, которые называют дефектами формирования швов, относят дефекты, происхождение которых связано в основном с нарушением режима сварки, неправильной подготовкой и сборкой элементов конструкции под сварку, неисправностью оборудования, небрежностью и низкой квалификацией сварщика и другими нарушениями технологического процесса. К дефектам этой группы относятся несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, незаваренные кратеры и др. [1].

Инструкция по визуальному и измерительному контролю [2] устанавливает порядок проведения визуального и измерительного контроля основного материала (далее - материал) и сварных соединений (наплавки) при изготовлении, строительстве, монтаже, ремонте, реконструкции, эксплуатации, техническом диагностировании (освидетельствовании) технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, подконтрольных Госгортехнадзору России.

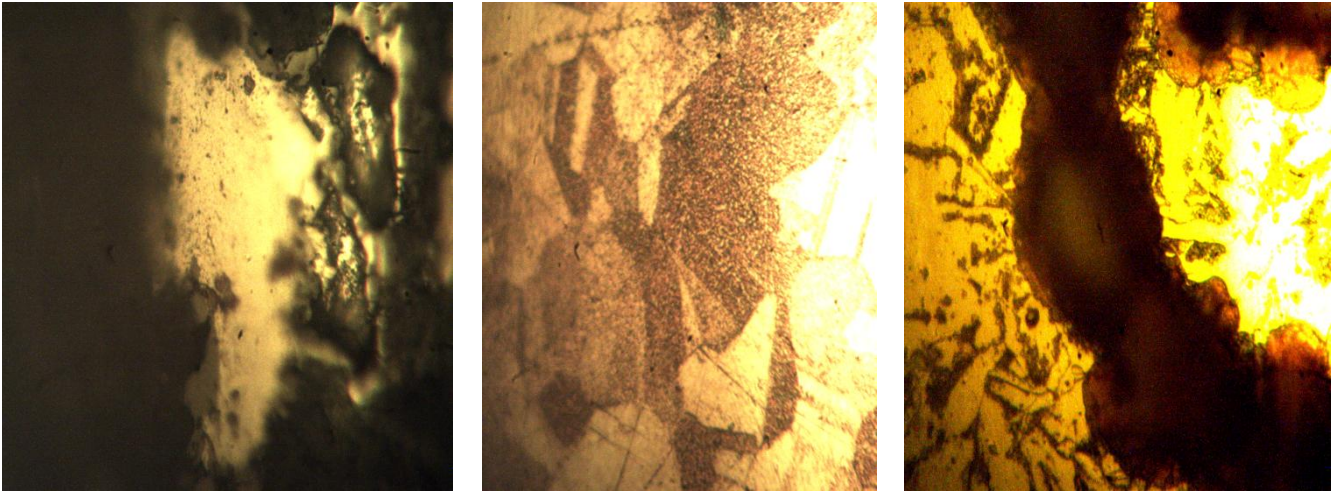
Инструкция устанавливает следующие классы дефектов (трещин) сварных соединений:



В работах [3, 4] предлагается использовать метод псевдоцветового кодирования изображений который в своей основе содержит результаты микроскопических исследований, проводимых визуально.

Используя для практических исследований микроскоп [5] с прилагаемым к нему комплектом стандартных образцов, нами были получены изображения

дефектов сварных швов в псевдоцветах. Фотографии дефектов представлены на рисунке.



При этом погрешности формы поверхности Δ для любого поперечного сечения в соответствии с [6] можно представить в виде ряда Фурье с конечным числом членов $k = n$:

$$\Delta(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi)$$

в котором коэффициенты определяются соотношениями:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta(\varphi) \cos k\varphi d\varphi$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta(\varphi) \sin k\varphi d\varphi$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta(\varphi) d\varphi$$

При таком представлении функции Δ члены ее разложения имеют определенный физический смысл. Нулевой член разложения $a_0/2$ равен среднему значению функции за период $T = 2\pi$. Эта величина характеризует отклонение размера и не зависит от полярной координаты φ . Первый член разложения $\sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cos(\varphi + \varphi_1)$ характеризует эксцентриситет с амплитудой $c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ и фазой φ_1 . Второй член ряда Фурье характеризует овальность, третий – огранку с трехвершинным профилем и т. д. Последующие члены ряда характеризуют волнистость в поперечном сечении, а при больших значениях k – шероховатость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Контроль качества сварных швов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ytk-hermes.com.ua/kontrol-kachestva-svarnix-shvov.html>.
2. Инструкция по визуальному и измерительному контролю // Российская газета. – 21 июня 2003 г. – № 120/1.
3. Кузнецов, М.М. Способ псевдоцветового кодирования черно-белых фотографических снимков. [Текст] М.Ф. Носков, П.И. Петров // Фундаментальные исследования, 2007, № 6. - С. 57-58.
4. Носков, М.Ф. Повышение чувствительности оптико-физических измерений путем нелинейной обработки изображений: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 01.04.05 – Оптика (техническая наука) – Новосибирск, 2007. 179 с.
5. Паспорт на биологический микроскоп «Лабомед-2» Концепт» с системой визуализации.
6. Оценка качества обработанных поверхностей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bru.mogilev.by/students/material/researches/glava15.htm>.

© П.И. Петров, А.А. Марач, М.М. Кузнецов, 2013

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ

Михаил Сергеевич Комбаров

ОАО «Производственное объединение «Новосибирский приборостроительный завод», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/1, заместитель главного инженера по НИОКР, тел. (383) 226-27-20, Kombarov@npzoptics.ru

Максим Михайлович Кузнецов

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТОП, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru

В статье рассмотрены основные тенденции развития оптико-электронных измерительных приборов на мировом и российском рынках.

Ключевые слова: оптико-электронные измерительные системы, обработка результатов измерений.

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF OPTIC-ELECTRONIC MEASURING INSTRUMENTS ON THE RUSSIAN MARKET

Mikhail S. Kombarov

OJSC «Production Association «Novosibirsk instrument-making plant», 630049, Russia, Novosibirsk, ul. Dusi Kovalchuk, 179/1, Deputy chief engineer for R & d, t./f.: (383) 226-27-20, Kombarov@npzoptics.ru

Maxim M. Kuznetsov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor, Department head at the TOP, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru

In the article the basic tendencies of development of optic-electronic measuring extra devices on the Russian and international markets.

Key words: optical-electronic measuring systems, processing of results of measurements.

Основной тенденцией развития оптико-электронных измерительной техники на мировом и российском рынках является практически полный отход от измерительных систем с визуальным отсчетом (классические автоколлиматоры, измерительные микроскопы, делительные головки и другие), а также широкая интеграция отдельных измерительных компонентов в единую систему производственного контроля [1].

Общими тенденциями развития являются:

- автоматизация процесса снятия отсчета за счет применения фотоэлектронных отсчетных систем на основе фотоприемных матриц (линеек), интерферометрических или растровых отсчетных систем;

- автоматизация процесса обработки результатов измерения [2] за счет применения специализированного программного обеспечения;
- создание интегрированных измерительных, в т.ч. многоканальных, систем с автоматизированной системой обработки измерительных сигналов;
- создание полностью автоматизированных программно управляемых систем.

Рассмотрим те тенденции развития оптико-электронных измерительных систем, которые характерны для линейно-угловых средств измерения.

В первую очередь это повсеместное внедрение цифрового отсчета и цифровых интерфейсов (минимум – RS232, но в большинстве случаев – USB или даже оптоволоконный).

Вторым направлением развития является отход от визуального наведения и переход на фотоэлектронные методы наведения – широкое внедрение микроскопов со сканирующим наведением и фотоэлектронных автоколлиматоров и гониометров.

Автоматизированные программные средства обработки результатов измерений обеспечивают получение измерительной информации, её обработку по заданному алгоритму, решение типовых измерительных задач, формирование протоколов измерений в заданном формате, архивацию исходных данных и протоколов результатов измерений.

Средства предназначены для автоматизированной обработки результатов измерений и решения типовых измерительных задач при контроле деталей с помощью инструментальных микроскопов типа ИМЦЛ.

Система автоматизированной обработки результатов измерения, разработанная на предприятии, предназначена для использования в составе инструментального микроскопа ИМЦЛ 200х75,А или его аналогов. Программное обеспечение системы может применяться для других измерительных приборов, аналогичного назначения (измерительных проекторов типа ПИ300, ПИ600).

Система предназначена для вывода изображения поля зрения наблюдаемого в инструментальный микроскоп на экран персонального компьютера, наложения визирных знаков («виртуальных сеток») на полученное изображение, анализ узкого участка полученного изображения с определением момента пересечения границы наблюдаемого объекта, сохранения и распечатки полученного изображения.

Система предназначена для автоматизации обработки результатов измерений, проводимых на измерительных микроскопах и проекторах, использующих блоки цифровой индикации УЦО-209С оснащенные портом USB или RS-232 (имеется также модификация блока УЦО-209АМ для круговых датчиков с микрометрическим винтом) [3, 4]. Данные модификации блоков позволяют по команде, поступающей от персонального компьютера, передавать по последовательному порту текущие значения измеренных координат, характеризующих положение измерительного стола микроскопа (проектора). Скорость обмена информацией 19200 бит/с, в случае применения порта RS232, или 1,1 Мбит/с, для портов USB. Основными приборами, которые комплектуются блоками

УЦО-209С, являются измерительные микроскопы и проекторы, выпускаемые ОАО «ПО «Новосибирский приборостроительный завод». Кроме того, данные блоки успешно используются для модернизации микроскопов производства ЛОМО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, М.М. О технологии на ФГУП ПО НПЗ [Текст] / М.М. Кузнецов, М.С. Комбаров // Сб. матер. междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь 2010», г. Новосибирск, т. 5, ч.1. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 193-196.
2. Кузнецов, М.М. Применение программного обеспечения для измерительных микроскопов в производстве [Текст] / М.М. Кузнецов, М.С. Комбаров // Сб. научных трудов аспирантов и молодых ученых СГГА, 2009 г., г. Новосибирск, вып. 6. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 25-28.
3. Кузнецов, М.М. Программа utco209с для УЦО серии 209. [Текст] / М.М. Кузнецов, А.А. Марач, М.С. Комбаров // Сб. матер. междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь 2008», 24-28 апреля 2008 г., г. Новосибирск, т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 60-63.
4. Кузнецов, М.М. Система технического зрения. [Текст] / М.М. Кузнецов, М.С. Комбаров // Сб. матер. междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь 2010», 19-29 апреля 2010 г., г. Новосибирск, т. 5, ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 166-167.

© М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов, 2013

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОМ ОПТИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Сергей Николаевич Жиров

ОАО «Производственное объединение «Новосибирский приборостроительный завод», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/1, генеральный директор, т./ф.: (383) 226-27-20, salesru@npzoptics.ru

Максим Михайлович Кузнецов

ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТОП, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru.

В статье рассмотрены современные голографические технологии применительно к производству голографических коллиматорных прицелов.

Ключевые слова: голография, коллиматорный прицел.

HOLOGRAPHIC TECHNOLOGY IN THE MODERN OPTICAL INSTRUMENT- MAKING INDUSTRY

Sergey N. Girov

OJSC «Production Association «Novosibirsk instrument-making plant», 630049, Russia, Novosibirsk, ul. Dusi Kovalchuk, 179/1, General Director, t./f.: (383) 226-27-20, salesru@npzoptics.ru

Maxim M. Kuznetsov

Federal state budgetary educational institution of higher professional-national education «Siberian state Academy of geodesy», 630108, Russia, str. Novosibirsk, str. Plaxotnogo, 10, Ph.D., associate Professor, Department head at the TOP, 8-913-921-44-39, a9214439@yandex.ru.

The article considers the modern holographic technologies for the production of holographic collimating sights.

Key words: holography, collimator sight.

Наверное, уже ни для кого не секрет, что открытые прицельные приспособления типа "целика" и мушки уже давно морально и физически устарели и держатся на современном стрелковом оружии только из-за простоты использования и надежности. Оптические прицелы намного капризнее механических, они более восприимчивы к ударам, грязи и пыли, а также очень неудобны при стрельбе "навскидку", но сравнительно недавно современные технологии позволили создать гибрид, совместивший в себе все лучшие особенности оптики и механики – голографические прицелы [1].

За последние 20 лет оптические технологии и микроэлектроника совершили гигантский шаг вперед. Достижения технического прогресса, воплощенные в электронных оптических прицелах, позволили создать новые модели прицелов на основе неизвестных ранее принципов. Так появились лазерные и голографические прицелы, как бы проецирующие выбранный охотником тип при-

цельной марки на цель. Кстати сказать, аналогичный принцип используется при проецировании показаний приборов на внутреннюю поверхность фонаря кабины пилота в современных самолетах [2].

На голограмме могут быть записаны и отображены в пространстве наблюдаемых предметов, как традиционные классические двухмерные прицельные марки – точка, перекрестие, концентрические окружности и прочее, так и трехмерная прицельная марка, представляющая собой линию в пространстве, являющуюся продолжением ствола оружия и направленную на цель. Плоский голографический экран прицела может быть заменен на другой, с подходящей для условий стрельбы прицельной маркой. Яркость изображения прицельной марки регулируется изменением мощности лазера подсветки. Поле зрения голографического прицела является неограниченным, так как в него от прицела попадает только рамка голографического экрана. Вынос зрачка, как и у всех коллиматорных прицелов, произвольный [3].

Прицельная марка у голографических прицелов крупная (обычно – в размер человека, находящегося на удалении 100 м) и прозрачная, чтобы не загораживать и не перекрывать цель, поэтому скорость стрельбы из оружия, оснащенного им, значительно выше, чем при стрельбе с обыкновенным оптическим прицелом. Так как выходное окно прицела плоское, значительно уменьшается вероятность того, что противник заметит отблеск линз.

Следует указать, что голографические прицелы имеют однократное увеличение, к тому же все имеющиеся на рынке голографические прицелы принадлежат к прицелам «открытого» типа. Такой прицел позволяет стрелку пользоваться во время стрельбы обоими глазами, а поскольку в прицеле отсутствуют какие-либо части, загораживающие обзор, стрелок беспрепятственно может контролировать все, что происходит вокруг него.

Еще одна особенность голографического прицела состоит в том, что информация, необходимая для реконструкции изображения прицельной марки записана в каждой частице выходного окна прицела. Даже если прицел будет почти полностью забрызган грязью, залеплен снегом, залит дождем или даже разбит, светящийся зрачок будет четко виден в оставшейся незакрытой части окна.

Как и в случае коллиматорного прицела светящийся зрачок марки виден только стрелку и совершенно незаметен снаружи. Конструкция прицела позволяет использовать его совместно с приборами ночного видения.

Голографический прицел может располагаться на произвольном расстоянии от глаза, его можно устанавливать на любые типы пистолетов, ружей и винтовок. Поле зрения остается полностью открытым: обод голографического экрана практически незаметен, что дает стрелку возможность смотреть обоими глазами и оптимально контролировать ситуацию во время выстрела. Прицельный знак, окружающая местность и цель всегда находятся в поле зрения, обеспечивая непрерывность наблюдения при поиске и обнаружении цели, а также между выстрелами.

Расположение изображения прицельного знака и цели в одной плоскости полностью исключает параллакс и позволяет производить выстрел при наведении

прицельного знака на цель независимо от угла наблюдения цели и положения стрельбы. Эта особенность голографического прицела дает возможность пользоваться им как целеуказателем, когда выстрел производится при совмещении прицельного пятна и цели, при произвольном положении стрелка или оружия.

Стоит отметить, что голографические прицелы не только с успехом продаются по всему миру - ими заинтересовалось высшее командование ВС США, стран Евросоюза, а также специальные ведомства РФ. После недолгих войсковых испытаний ограниченная партия голографических коллиматорных прицелов EOtech была отправлена в Ирак и небольшая партия приборов поступила на вооружение полиции США.

Изготовление данных приборов в Российской Федерации сдерживается с одной стороны нехваткой квалифицированных кадров в области голографии, с другой - нехваткой необходимого оборудования для производства голограмм в заданных объемах, при том что имеющийся парк оборудования устарел не только морально, но и физически [4].

Еще одним фактором сдерживающим широкое распространение голографических прицелов является их значительная цена, относительно слабая защищенность от внешних воздействий и такая особенность, как возникновение цветовых и геометрических искажений наблюдаемых объектов, если в поле зрения прицела попадают яркие источники света [5].

Вместе с тем, резюмируя все выше сказанное можно сделать вывод, что:

- голографический прицел - новый шаг в развитии стрелкового дела, позволяющий повысить скорость, уверенность и точность выполнения различных стрелковых упражнений;
- сегодня, этот тип прицелов еще находится в процессе своего развития; научно-исследовательским институтам, конструкторским бюро и предприятиям предстоит сделать еще многое, чтобы данный вид прицелов занял свое достойное место на соответствующих рынках, прогресс в данных работах, за последнее время, явно налицо;
- использование данного типа прицела позволяет даже не очень опытному стрелку научиться относительно быстро и точно поражать цель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голографические прицелы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.popmech.ru/blogs/post/1210-golograficheskie-pritselyi>
2. Коллиматорные и голографические прицелы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ohotniki.ru/editions/rog/article/2012/11/07/120315-kollimatorynye-i-golograficheskie-pritselyi.html>
3. Коллиматорные прицелы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://adg.h1.ru/p/optica.htm>
4. Кузнецов, М.М. О технологии на ФГУП ПО НПЗ [Текст] / М.М. Кузнецов, М.С. Комбаров // Сб. матер. междунар. науч. конгресс «ГЕО-Сибирь-2010», г. Новосибирск, т. 5, ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 193-196.
5. Коллиматорный и голографический прицел [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pulking.ru/missile/arbalest/equipment/back sight/collimator>

© С.Н. Жиров, М.М. Кузнецов, 2013

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ СРЕД

Неъматжон Рахимович Рахимов

ФГБОУ ВПО «СГГА», 630108, Россия, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Елена Юрьевна Кутенкова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»), 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры ТОП, тел. (383)361-07-79, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Алексей Николаевич Серьезнов

СибНИА им С.А. Чаплыгина, 630051, Россия, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21, доктор технических наук, профессор, науч. рук. СибНИА, 8(383)278-70-03, e-mail: sibnia@sibnia.ru

В статье рассмотрены различные принципы построения оптоэлектронных устройств для контроля полупрозрачных жидкостей и схемы этих устройств.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, фотодиод, полупрозрачные жидкости, рефрактометр, концентрометр.

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF OPTIC-ELECTRONIC DEVICES FOR THE CONTROL OF OPTICAL PARAMETERS OF LIQUID MEDIUMS

Neymatjohn R. Rakhimov

Ph.D., Prof., department of special devices and technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Russia, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Elena Yu. Kutenkova

Assoc. prof., department of optical production technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Russia, Novosibirsk, phone: +7(383)361-07-79, fax +7(383)344-40-58, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Alexey N. Seryoznov

Ph.D., Prof, S.A. Chaplygin Siberian Research Institute of Aviation, 630051, Russia, Novosibirsk, 21 Polzunova st., phone: +7(383)344 40 58, fax +7(383)344 40 58, e-mail: n_rah@ngs.ru.

The article discusses various principles of construction of optic-electronic devices for the control of translucent liquid and the schemes of these devices.

Key words: light-emitting diode and photodiode, translucent liquid, refractometer.

Фотоколориметрические методы определения концентрации вещества основаны на сравнении поглощения или пропускания света стандартным и исследуемым полупрозрачными растворами. В отличие от визуальных методов, в фотоколориметрии степень поглощения света окрашенным раствором определяется не глазом, а при помощи специальных оптических приборов – колориметров с фотоэлементами (фотоколориметров).

Известны схемы контроля [1], при которых поток проходит через слой полупрозрачной жидкости, при этом часть этого потока отражается, часть поглощается, часть рассеивается и часть света проходит через слой контролируемой жидкости (рис. 1).

Интенсивность падающего светового потока при прохождении через поглощающий раствор разлагается на составляющие:

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 \quad (1)$$

где Φ_0 - интенсивность падающего светового потока;

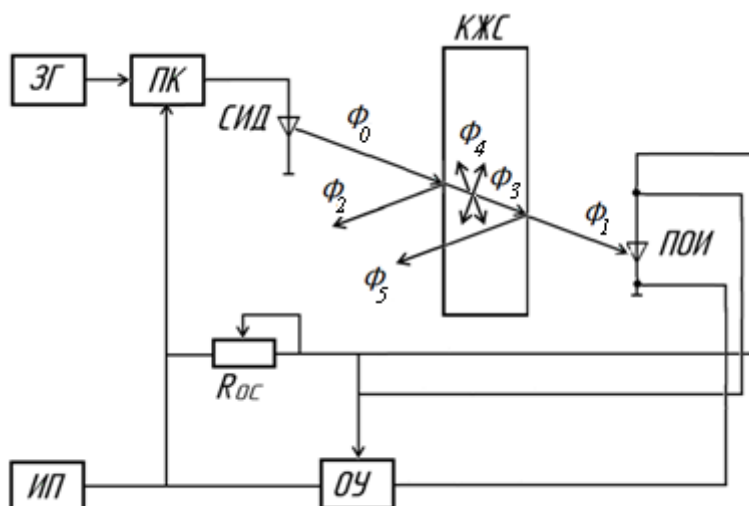
Φ_1 - интенсивность светового потока, прошедшего через слой вещества;

Φ_2 - интенсивность отраженного светового потока от наружной поверхности кюветы, которая может составлять $\approx 1\%$ от Φ_0 ;

Φ_3 - интенсивность светового потока, поглощенного полупрозрачной жидкостью которая может составлять $\approx 1 - 80\%$ от Φ_0 в зависимости от природы исследуемой жидкости;

Φ_4 - интенсивность светового потока, рассеянного полупрозрачной жидкостью $\approx 1 - 20\%$ от Φ_0 в зависимости от особенностей исследуемой жидкости;

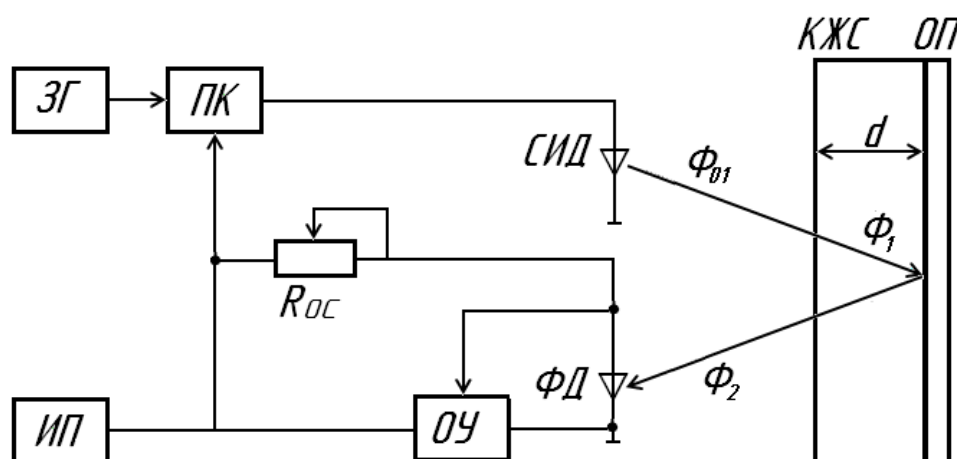
Φ_5 - интенсивность отраженного светового потока от внутренней поверхности кюветы $\approx 1\%$ от Φ_0 .



ЗГ – задающий генератор; ПК – пороговый ключ; КЖС – контролируемая жидкая среда; СИД – светоизлучающий диод; $R_{ос}$ – переменный резистор с отрицательной обратной связью; ФД – фотодиод; ИП – измерительный прибор; ОУ – операционный усилитель

Рис. 1. Блок-схема оптоэлектронного преобразователя для мониторинга жидких сред при прохождении через контролируемый образец

В настоящей работе нами на основе оптоэлектронных первичных преобразователей – оптрона открытого канала предлагается создать простой концентрометр, структурная схема которого представлена на рисунке 2, особенностью которого является двукратное прохождение светового потока через контролируемую жидкость, что позволит уменьшить габариты прибора и при этом обеспечивается высокое качество контроля. Этот принцип положен в основу разработанных авторами оптоэлектронного автоматического колориметра «ОАК - 1М» [2, 3, 4] и многопараметрового автоматического колориметра «ОАК - 5М» [5, 6, 7].



ЗГ – задающий генератор; ПК – пороговый ключ; КЖС – контролируемая жидкая среда; ОП – отражающая поверхность; СИД – светоизлучающий диод; R_{oc} – переменный резистор с отрицательной обратной связью; ФД – фотодиод; ИП – измерительный прибор; ОУ – операционный усилитель

Рис. 2. Блок-схема оптоэлектронного преобразователя для мониторинга жидких сред

В начальный момент ключ (ПК) находится в открытом состоянии и СИД, питающийся от задающего генератора (ЗГ), излучает световой поток, который проходит и, отражаясь от ОП, вторично проходит через контролируемую жидкую среду (КЖС) и преобразуется фотодиодом ФД в фототок в виде сигнала, а операционный усилитель ОУ преобразует фототок в напряжение. При этом КЖС облучается потоком Φ_{01} . Тогда на основе закона Бугера-Ламберта-Бера:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} e^{-\kappa C d}, \quad (2)$$

где κ – коэффициент поглощения, зависящий от цвета контролируемой жидкости;
 d – толщина слоя контролируемой жидкости;
 C – концентрация анализируемого вещества;
 Φ_{01} – световой поток до прохождения через слой контролируемой жидкости;

Φ_1 – световой поток после прохождения через слой контролируемой жидкости.

В нашем случае отраженный поток Φ_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \Phi_{01} e^{-\kappa_1 C d}, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_2 = \Phi_1 e^{-\kappa_2 C d}, \end{array} \right. \quad (4)$$

Из формулы (2) следует, что величина светового потока Φ , проходящего через КЖС, при неизменной величине Φ_{01} , k , d целиком определяется концентрацией анализируемого вещества. Из рисунка 2 видно, что через КЖС поток проходит дважды и поэтому:

$$\Phi_2 = (\Phi_{01} e^{-\kappa_1 C d}) e^{-\kappa_2 C d} \quad (5)$$

Преобразуя зависимость (4), получаем:

$$\Phi_2 = \Phi_{01} e^{-C d (\kappa_1 + \kappa_2)} \quad (6)$$

Если принять, что $\kappa_1 \approx \kappa_2$, то выражение 6 примет вид:

$$\Phi_2 = \Phi_{01} e^{-2\kappa_1 C d} \quad (7)$$

Если преобразовать Φ_{01} , Φ_2 с помощью оптрона открытого канала (рис. 2) в соответствующие электрические сигналы Y_{01} и Y_2 , то по их величине можно определить такие характеристики вещества, как оптическая плотность D , светопоглощение $A\lambda$, светопропускание $T\lambda$ в зависимости от концентрации C . Если $d = \text{const}$ и $t = \text{const}$ (t – температура КЖС), при этом коэффициент поглощения зависит от температуры [8].

Для измерения и контроля оптических параметров полупрозрачных жидкостей можно использовать оптоэлектронные ПВО рефрактометры.

Когда световой луч из более плотной среды (рис. 3, а) попадает на менее плотную среду под углом $i_2 < \varphi$, то наблюдается преломление светового луча с частичным его отражением, а если $i_2 > \varphi$, то световой луч отражается без преломления. Это явление называется полным внутренним отражением (ПВО). При $i_2 = \varphi$ луч и не преломляется, и не отражается, а скользит по границе раздела сред.

При исследовании полупрозрачных сред предельный угол i изменяется в отраженном свете (рис. 3). В этом случае на границу раздела сред направляется пучок световых лучей (1, 2, 3, 4) из более плотной среды под углами, близкими к предельному. В отраженном световом потоке часть лучей с углами падения меньшими φ (1, 2) преломляются, в отличие от лучей

с углами падения большими φ (4), испытывающими полное внутреннее отражение. Вследствие этого в поперечном сечении ПС отраженного светового потока создается достаточно четкая контрастная граница между лучами, подвергшимися полному отражению (более яркая часть потока), и лучами, подвергшимися частичному отражению. Указанная граница светотени определяет угол φ . Тогда, зная абсолютный показатель преломления одной среды, например, n_2 , по величине φ можно определить абсолютный показатель преломления второй среды n_1 [9]:

$$n_1 = n_2 \sin \varphi \quad (8)$$

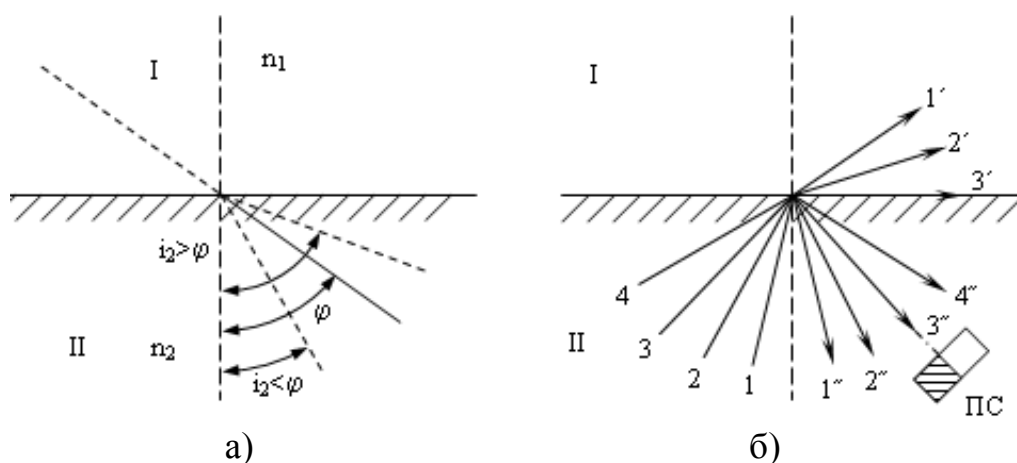
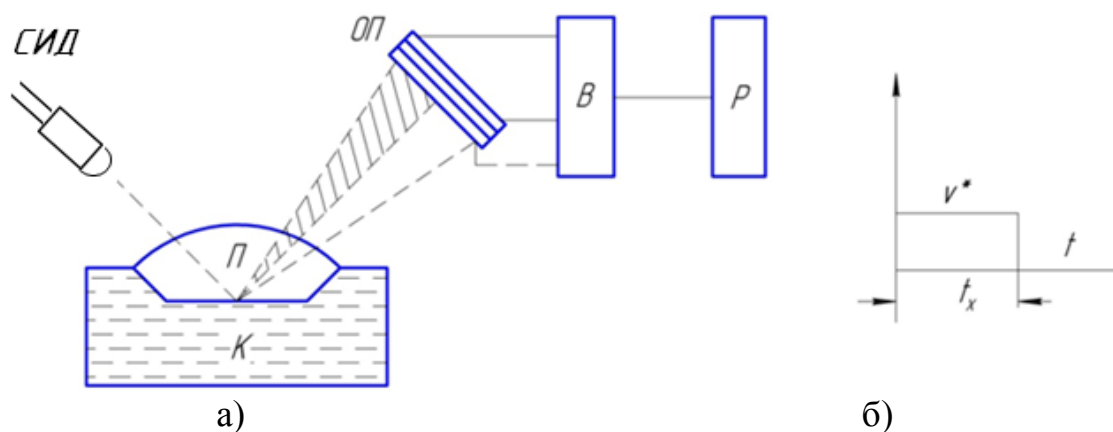


Рис. 3. Эффект ПВО

На рис. 4, а приведена схема оптоэлектронного рефрактометра, построенного на этом принципе. Световой поток от источника И направляется соответствующим образом на сферическую поверхность измерительной призмы П (которая может иметь разную конфигурацию), помещенной частично в кювету с исследуемой средой. Поток, отразившись от плоской поверхности призмы, через выходную сферическую поверхность, играющую роль объектива, попадает на оптоэлектронный преобразователь ОП. Так как призма выполняется из стекла, имеющего больший показатель преломления, чем у исследуемой среды, то этим обеспечивается полное внутреннее отражение для части светового потока, т. е. в отраженном потоке создается светотеневая защита.

С помощью ОП определяется координата светотени. Для обеспечения наибольшей точности целесообразно в качестве ОП использовать преобразователи развертывающего типа, например полупроводниковые. Выходной сигнал ОП, выделяемый схемой выделения В, измеряется и при необходимости регистрируется устройством Р. В случае использования сканисторов во время импульсного режима выходной сигнал имеет прямоугольную форму, длительность которого t_x определяет координату светотени (рисунок 4, б). Величина t_x измеряется цифровым прибором.



СИД – светоизлучающий диод, П – измерительная призма, К – контролируемая жидкость, ОП – оптоэлектронный преобразователь, В – схема выделения, Р – регистрирующий прибор,

Рис. 4. Схема рефрактометра ПВО

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булатов, М.И. Практическое руководство по фотоколориметрическим и спектрофотометрическим методам анализа / М.И. Булатов, И.П. Калинин. – 3-е изд., переработ. и доп. – Л.О.: Химия, 1972. – 408 с.
2. Пат. 2413201 Российская Федерация, МПК51 G01N 21/03. Оптоэлектронный фотоколориметр/ Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». - №2009146659/28; заявл. 15.12.2009; опубл. 27.02.11, Бюл. №6. – 4 с. : ил.
3. Рахимов, Б.Н. Оптоэлектронный автоматический колориметр/Б.Н. Рахимов, О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, Т.В. Ларина//Приборы и техника эксперимента, 2011. - № 5. - С. 161 – 162.
4. Кутенкова, Е.Ю. Разработка оптоэлектронного фотоколориметра для автоматического анализа жидких сред/ Е.Ю. Кутенкова// ГЕО–Сибирь–2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 1: сб. матер. VII Междунар. научн. конгр. «ГЕО–Сибирь–2011», 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск.– Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 191–195.
5. Заявка № 2011153209 Российская федерация. Оптоэлектронный многопараметровый колориметр / Б.Н. Рахимов и др.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия.
6. Кутенкова, Е.Ю. Оптоэлектронный многопараметровый автоматический колориметр / Е.Ю. Кутенкова // Датчики и системы. – 2012. – № 4 (155). – С. 37–39.
7. Ушаков, О.К. Автоматический колориметр на основе оптоэлектронных преобразователей/ О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, А.Н. Серьезнов // Интерэкспо ГЕО – Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10 – 20 апреля 2012 г. Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 146
8. Математическая модель оптоэлектронного преобразователя для мониторинга жидких сред / Рахимов Н.Р., Кутенкова Е.Ю., Исломов Д.Д. и др. // Автоматика и программная инженерия. – 2012. – № 2 (2). – С. 36–41.
9. Рахимов, Н.Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве: монография. – Фергана: Техника, 2004. – 91 с.

© Н.Р. Рахимов, Е.Ю. Кутенкова, А.Н. Серьезнов, 2013

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОЙ БАЛЛИСТИКИ НА ПРИМЕРЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИЦЕЛ-ДАЛЬНОМЕРА «РЫСЬ-ЛД»

Алексей Анатольевич Топорков

ОАО «ЦКБ «Точприбор», Главный конструктор прицелов и комплексов для стрелкового оружия, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, тел: (383-2) 225-93-97, e-mail: topor.a.a@gmail.com

Михаил Николаевич Павлов

ОАО «ЦКБ «Точприбор», заместитель начальника лаборатории, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, тел: (383-2) 226-35-01, e-mail: pavlovmn@yandex.ru

Иван Сергеевич Бутримов

Сибирский филиал федерального казенного учреждения «Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России, старший научный сотрудник, 630055, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 3, тел: (383-2) 332-07-55, e-mail: butrimov@ngs.ru

В статье рассматриваются вопросы повышения точности стрельбы из стрелкового оружия путём ввода в баллистический вычислитель автоматизированного прицела функции программирования реальной баллистики. Приведена математическая модель рассматриваемой функции и результаты практических проверок на примере автоматизированного прицел-дальномера «Рысь-ЛД», используемого в составе снайперской винтовки СВД.

Ключевые слова: автоматизированный прицел, баллистика, баллистический вычислитель, стрелковое оружие, точность стрельбы.

REAL BALLISTICS PROGRAMMING IN RYS-LD AUTOMATED LASER RANGEFINDER RIFLE SCOPE

Aleksey A. Toporkov

Open Joint-Stock Company «Central Design Bureau «Tochpribor», 630049, Russia, Novosibirsk, ul. Dusi Kovalchuk, 179/1, tel. (383-2) 225-93-97, e-mail: topor.a.a@gmail.com

Michail N. Pavlov

Open Joint-Stock Company «Central Design Bureau «Tochpribor», 630049, Russia, Novosibirsk, ul. Dusi Kovalchuk, 179/1, tel. (383-2) 226-35-01, e-mail: pavlovmn@yandex.ru

Ivan S. Butrimov

Siberian branch of the federal government institutions «Scientific and Production Association» Special equipment and communication, the Russian Interior Ministry, Senior Research Fellow, 630055, Russia, Novosibirsk, ul. Kutateladze, 3, tel. (383-2) 332-07-55, e-mail: butrimov@ngs.ru

In this paper discuss the increasing of small arms shooting accuracy by insert the function of real ballistics programming to the ballistic calculator of Automated Laser Rangefinder Rifle Scope. The mathematic model of this function is presented. RYS-LD Automated Laser Rangefinder Rifle Scope was tested on Dragunov Sniper Rifle (SVD) and test results are presented.

Key words: automated scope, ballistic, ballistic calculator, small arms, shooting accuracy.

Для повышения вероятности поражения цели с первого выстрела вместе с наличием высокоточного снайперского оружия необходим учёт реальной баллистики используемого боеприпаса. Официальные баллистические таблицы составлены для усреднённых экземпляров оружия, стандартного боеприпаса и идеального стрелка. На практике использование баллистических таблиц, при неблагоприятных сочетаниях внешних факторов влияющих на результат стрельбы, приводит к заметным отклонениям средних точек попадания от точек прицеливания даже для штатных боеприпасов. При использовании нештатных боеприпасов ситуация усугубляется. Для повышения результативности стрельбы предлагается ввести в прицел функцию расчета баллистики конкретного боеприпаса.

В основе расчета баллистического уравнения лежит квадратичная зависимость углов прицеливания от дистанции стрельбы. Для расчета коэффициентов баллистической кривой необходимо иметь значения аргумента и функции в трех точках. При практическом применении снайперского оружия в качестве таких точек используют дальность приведения оружия к нормальному бою и две точки на произвольных дистанциях.

Для построения баллистического уравнения обеспечивающего необходимую и достаточную точность прицеливания в автоматизированном оптическом прицеле вводятся следующие данные:

- 1 Температура воздуха и заряда;
- 2 Атмосферное давление;
- 3 Высота визирной оси прицела над осью канала ствола;
- 4 Дистанция, на которой осуществляется приведение оружия к нормальному бою;
- 5 Отклонение СТП от КТ при приведении оружия к нормальному бою;
- 6 Дистанция определяющей стрельбы на первом рубеже дальности;
- 7 Отклонение (снижение) СТП относительно КТ на первом рубеже дальности;
- 8 Дистанция определяющей стрельбы на втором рубеже дальности;
- 9 Отклонение (снижение) СТП относительно КТ на втором рубеже дальности.

После ввода всех параметров прицел автоматически производит расчет баллистических коэффициентов по следующему алгоритму:

К введенным отклонениям в соответствии с заданными дальностями прибавляется поправка на возвышение оси прицела над осью канала ствола, в результате чего устраняется параллакс между осью прицеливания и осью бросания. Полученная парабола с достаточной точностью описывает баллистическую зависимость на заданных дальностях.

Для вычисления коэффициентов данной кривой решается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} al_0^2 + bl_0 + c = \alpha_0 \\ al_1^2 + bl_1 + c = \alpha_1 \\ al_2^2 + bl_2 + c = \alpha_2 \end{cases}$$

где l_0 – дальность приведения оружия к нормальному бою;

l_1 и l_2 – дальности определительной стрельбы;

α_0 – ошибка совмещения СТП с КТ при приведении оружия к нормальному бою;

α_1 и α_2 – отклонения СТП относительно точки прицеливания на соответствующих дальностях.

Решением данной системы уравнений являются коэффициенты a , b и c . Полученные коэффициенты позволяют описать баллистическую кривую без учета ошибки параллакса. Для учета данной ошибки вычитается поправка на возвышение оси канала ствола над осью прицела.

Полученные коэффициенты и поправки на температуру окружающей среды и атмосферное давление записываются в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) прицела, сформированной баллистике присваивается новое имя и адрес, которые записываются в файловую систему ПЗУ. По окончании расчета прицел автоматически записывает рассчитанные коэффициенты в энергонезависимую память и присваивает баллистике новое название.

Описанный выше алгоритм формирования новой баллистики реализован в автоматизированном прицел-дальномере «Рысь-ЛД» [1], разработанном ОАО «Центральное конструкторское бюро точного приборостроения», г. Новосибирск.

Автоматизированный прицел-дальномер «Рысь-ЛД» предназначен для установки на стрелковое оружие с целью обеспечения прицеливания с учетом реальных условий стрельбы. Прицел обеспечивает измерение дальности до цели встроенным лазерным дальномером и автоматическое измерение температуры окружающей среды. Вручную вводятся атмосферное давление, скорость движения цели и скорость бокового ветра. На основе этих параметров в зависимости от баллистических характеристик используемого оружия и боеприпаса автоматически устанавливается угол прицеливания. Вычисленная боковая поправка отображается на цифровом индикаторе в поле зрения прицела. Прицел имеет несколько встроенных баллистик: СВД, ВСК, ВСС, ОСВ-96, АК-74, Тигр, Вепрь. Кроме этого, отличительной чертой рассматриваемого прицела является возможность программирования баллистики произвольного оружия и боеприпаса по результатам стрельбы на трех различных дистанциях. Внешний вид прицел-дальномера показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид прицел-дальномера «Рысь-ЛД»

В целях практического исследования функции программирования баллистики Сибирским филиалом ФКУ НПО «СТиС» МВД России были проведены стрельбовые проверки прицела «Рысь-ЛД» в составе снайперской винтовки СВД.

Сущность проверок заключалась в программировании в баллистическом вычислителе прицела баллистики штатного боеприпаса СВД (7,62 мм патрон с пулей со стальным сердечником) и в последующем определении показателей точности стрельбы на различных дальностях. В качестве критерия точности принималось, что отклонения средних точек попадания от соответствующих точек прицеливания при контрольной стрельбе не будут превышать одной угловой минуты (~3 см на дальности 100 м, 6 см на 200 м и т.д.).

Последовательность действий при программировании баллистики в прицеле «Рысь-ЛД» заключалась в приведении оружия к нормальному бою на дальности 100 м и в последующей определительной стрельбе по мишеням, установленным на дальностях 200 и 300 м с определением отклонений СТП от КТ. Определённые в ходе стрельбы отклонения СТП от КТ вводились в баллистический вычислитель прицела, после чего автоматически производился расчёт экспериментальной баллистики. Далее производилась проверочная стрельба по мишеням, расположенным на дальности 200 и 300 м. Стрельба осуществлялась из винтовки СВД лёжа с упора сериями по шесть выстрелов. В качестве мишеней использовались грудные мишени, закреплённые на щитах, размером 1,5 м × 1,5 м. Точка прицеливания – середина нижнего основания грудной мишени.

В ходе стрельбы были определены отклонения СТП от КТ по вертикали, представленные в табл. 1.

Из приведённой таблицы видно, что в результате проверочной стрельбы на дальность 200 и 300 м из СВД с прицелом «Рысь-ЛД», в котором произведен расчёт экспериментальной баллистики, СТП имеет отклонение около одной угловой минуты, что соответствует принятому для данных проверок критерию точности.

Таблица 1

**Величины отклонения СТП от КТ по вертикали в результате
определятельной и проверочной стрельбы**

Дальность стрельбы, м	Отклонения СТП от КТ, см	
	определятельная стрельба без учёта баллистики	проверочная стрельба с учётом сформированной баллистики
100	3	2
200	17	3
300	45	7

Для более полной проверки правильности вычисленной баллистики, была произведена контрольная стрельба на некруглое значение дальности, превышающее максимальную дальность при определятельной стрельбе.

В ходе контрольной стрельбы на 412 м зафиксировано вертикальное отклонение СТП от КТ, составляющее 6 см вниз, что составляет 0,5 угловых минут.

Таким образом, автоматизированный прицел-дальномер «Рысь-ЛД» обеспечивает программирование баллистики с учётом конкретного экземпляра оружия, наименования боеприпаса, прицельного устройства и стрелка. При этом точность стрельбы – отклонение средней точки попадания от контрольной точки – не превышает одной угловой минуты, что соответствует принятому критерию точности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прицел-дальномер «Рысь-ЛД». Паспорт АЩЕЗ. 812.105-03 ПС.

© А.А. Топорков, М.Н. Павлов, И.С. Бутримов, 2013

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА УДОКАНСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

Александр Алексеевич Малюженко

ОАО «Забайкальское аэрогеодезическое предприятие», 672010, Россия, г. Чита, ул. Амурская, 7, заместитель начальника ПЭО, тел. (3022) 36-46-69, e-mail: malikrus@mail.ru

Описана история и причины изучения геодезическими методами осовремененных движений земной кора на Удоканском геодинамическом полигоне.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, геодинамический полигон.

HISTORY OF STUDYING OF RECENT MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST IN THE UDOKANSKY GEODYNAMIC POLYGON

Alexander A. Maljuzhenko

JSC «Zabaikalye aerogeodetic enterprise», 72010, Russia, Chita, 7 Amurskaya, 6, the deputy chief Economic Planning Departmen, tel. (3022) 36-46-69, e-mail: malikrus@mail.ru

The history and the studying causes by geodetic methods of recent movements of the earth's crust in on Udokansky geodynamic polygon is described.

Key words: satellite observations, geodynamic polygon.

Изучение современных движений земной коры геодезическими методами в Забайкальском крае осуществляется на Удоканском геодинамическом полигоне. Удоканский ГДП создан в соответствии с техническим заданием, разработанным совместно с ЦНИИГАиК и ИЗК СО АН СССР и согласованным с Советом по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР [1].

По административно-территориальной принадлежности территория Удоканского геодинамического полигона относится к Каларскому району Забайкальского края и расположена между $56^{\circ}15'$ и $56^{\circ}55'$ северной широты, $118^{\circ}00'$ и $118^{\circ}45'$ восточной долготы (рис. 1). На территории полигона расположены населенные пункты: с. Чара (районный центр), п.г.т. Новая Чара, с. Кюсть-Кемда, п. Удокан. Наиболее крупным населенным пунктом является с. Чара, центр Каларского района.

Полигон создавался в целях обеспечения безопасного строительства и эксплуатации Удоканского горно-обогатительного комбината расположенного возле крупнейшего месторождения медных руд в России и третьего в мире по запасам. Второй причиной проведения создания является то, что полигон расположен в северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны - одной из наиболее высокосейсмичных внутриконтинентальных зон Земли. Исходя из этого, результаты повторных геодезических измерений могут быть использованы для изучения геодинамических процессов, а так в целях прогнозирования землетрясений.

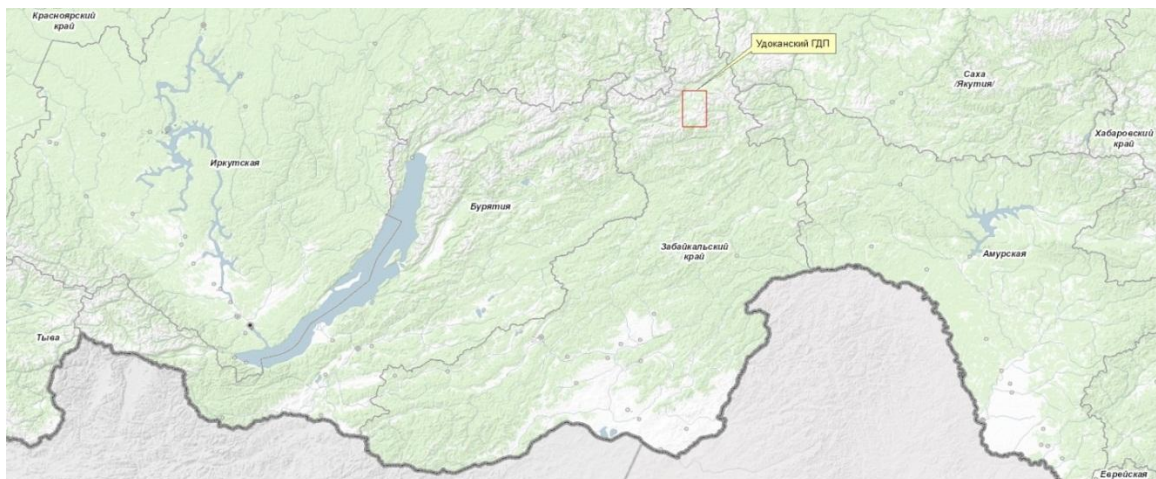


Рис. 1. Географическое положение Удоканского ГДП

В районе расположения полигона выделяют ряд главнейших неотектонических структур:

- Кодарский горст;
- Чарская впадина;
- Удоканское сводно-глыбовое поднятие.

Схема сейсмического районирования приведена на рис. 2.

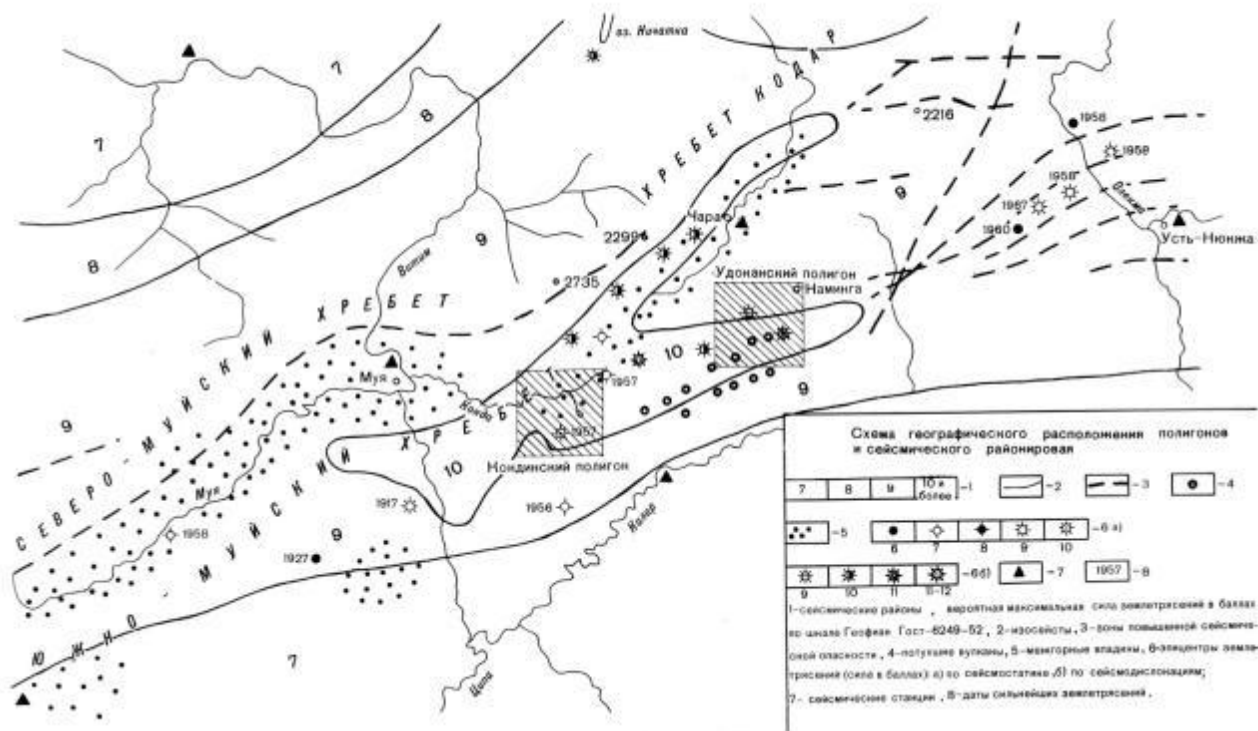


Рис. 2. Схема сейсмического районирования

Территория, где расположен Удоканский ГДП характеризуется напряженной тектонической и магматической активностью, о чем свидетельствуют данные

Условные обозначения

Граница Удоканского ГДП

Эпицентры землетрясений за период 2008-2012 гг.

Энергетический класс

- 8.6 - 9.1
- ★ 9.2 - 10
- ★ 10.1 - 11.1
- ★ 11.2 - 12.8
- ★ 13.2 - 15.9

Начиная с 1975 года ОАО «Забайкальское аэрогеодезическое предприятие» начало выполнение геодезических измерений на Удоканском ГДП. На настоящий момент на Удоканском ГДП выполнено девять циклов непосредственных высокоточных геодезических измерений. Работы по I циклу были выполнены в 1975-80 гг., по II циклу в 1979-81 гг., по III циклу в 1984-85 гг., по IV циклу в 1987-90 гг., по V циклу в 1996-97 гг. и VI-IX циклы выполнены в период с 2009-2012 года. Территория, на которой расположены геодезические построения полигона, составляет около 1400 кв.км. За девять циклов на полигоне выполнены традиционные геодезические построения в виде плановых и высотных сетей, которые подразделяются на площадные и локальные, а также в последние годы (период с 2009-2012) развита спутниковая геодезическая сеть 1 класса (рис. 4).

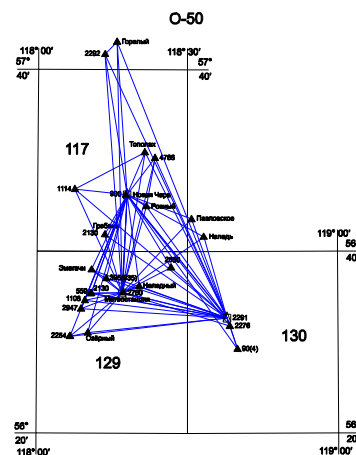


Рис. 4. Схема СГС-1 Удоканского ГДП

Разности координат пунктов на территории Удоканского ГДП в период за 2009-2011 года показаны в табл. 1.

Таблица 1

Разности координат пунктов между циклами мм 2009-2011					
2010-2009		2011-2010		2011-2009	
ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
-8,00	-5,00	0,00	0,00	-8,00	-5,00
-9,00	-3,00	4,00	-7,00	-5,00	-10,00
-21,00	0,00	2,00	-16,00	-19,00	-16,00
-30,00	-15,00	16,00	-12,00	-14,00	-27,00
-33,00	-7,00	-9,00	-8,00	-42,00	-15,00
-25,00	-19,00	-5,00	-3,00	-30,00	-22,00
-13,00	10,00	-12,00	8,00	-25,00	18,00
-22,00	12,00	1,00	14,00	-21,00	26,00
-23,00	19,00	-20,00	-13,00	-43,00	6,00
-46,00	11,00	1,00	-5,00	-45,00	6,00
-14,00	31,00	7,00	-5,00	-7,00	26,00
-37,00	-30,00	10,00	-18,00	-27,00	-48,00
5,00	-34,00	-6,00	17,00	-1,00	-17,00
-5,00	-26,00	6,00	2,00	1,00	-24,00
-3,00	13,00	-4,00	-21,00	-7,00	-8,00
-29,00	-27,00	0,00	-3,00	-29,00	-30,00
-28,00	13,00	5,00	-12,00	-23,00	1,00
-10,00	-4,00	-5,00	1,00	-15,00	-3,00
-3,00	-20,00	2,00	2,00	-1,00	-18,00
-25,00	-53,00	0,00	-6,00	-25,00	-59,00
-15,00	11,00	-11,00	10,00	-26,00	21,00
-2,00	18,00	0,00	-12,00	-2,00	6,00
-36,00	-32,00	11,00	5,00	-25,00	-27,00
-21,00	-9,00	0,00	-6,00	-21,00	-15,00

Результаты выполненных геодезических измерений, за 2009-2012 годы и происходящая тектоническая и магматическая активность показывают необходимость в продолжение постоянных наблюдений на Удоканском ГДП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технический проект на объект 03.01.03.07.2230 - ФГУП «Заб.АГП» 1997. – С. 10-15
2. Технический отчет по объекту 03.01.07.2594– ФГУП «Заб.АГП» 2009,2010,2011,2012

© А.А. Малюженко, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. Д.Г. Макарова. О выборе технологии формообразования поверхностей линз для субмиллиметрового диапазона длин волн	3
2. А.В. Голицын, В.С. Ефремов, И.О. Михайлов, Н.В. Оревова, Б.В. Федоров, В.Б. Шлишевский. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов.....	7
3. В.С. Ефремов, И.О. Михайлов, В.Б. Шлишевский. Жидколинзовый конденсор	12
4. А.В. Голицын, В.С. Ефремов, Т.В. Колмыкова. Двухкомпонентная жидколинзовая система изменения увеличения	16
5. И.С. Глебус, С.Н. Макаров. Моделирование интерферометрических сигналов в оптоволоконных схемах с использованием частотно-модулированного излучения	21
6. Е.В. Сысоев, И.А. Выхристюк, Р.В. Куликов, В.В. Широков. Влияние случайного сдвига фазы интерферограмм на погрешность измерений рельефа поверхности интерференционным профилометром	28
7. В.П. Бессмельцев. Проблемы создания автоматизированных комплексов лазерной микрообработки	32
8. Е.В. Сысоев, И.А. Выхристюк, А.В. Запреев, Р.В. Куликов. Определение фазового сдвига в интерференционном профилометре	39
9. А.В. Кирьянов, В.В. Чуканов, В.П. Кирьянов, С.В. Перебейнос. Информационно-управляющая система активного аэростатического подшипника на базе фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа	43
10. И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов, Н.Т. Ясакова, Л.В. Омелянчук, В.Ф. Семешин. Спектральная зависимость показателя поглощения в ядрах клеток, окрашенных по Фёльгену	51
11. П.С. Загубисало, А.Г. Паулиш. Моделирование теплофизических процессов в тонкоплёночном конвертере миллиметрового излучения в инфракрасное с целью определения параметров визуализатора миллиметрового излучения	57
12. В.Б. Шлишевский. Способ исправления кривизны спектральных изображений в призмённых видеоспектрометрах	62
13. В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, А.Н. Поликанин. Энергетический расчет тепловизионных систем. Часть 1. Методика расчета дальности действия	67
14. В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Е.В. Лантев, М.П. Исаев, Е.А. Кративко, Ю.А. Фесько. Энергетический расчет тепловизионных систем. Часть 2. Алгоритм и результаты расчетов дальности обнаружения	73

15. <i>В.Е. Митрохин, А.В. Тараскин.</i> Физическое моделирование магнитооптического эффекта и влияния температуры на оптическое волокно и места его соединения	80
16. <i>Е.А. Крапивко, И.О. Михайлов.</i> Основные принципы моделирования трехмерного пространства объектов	84
17. <i>В.Е. Митрохин, М.В. Митрохин.</i> Дистанционный мониторинг заземлений и устройств защиты.....	89
18. <i>В.Л. Парко, Т.Н. Хацевич.</i> Способ апохроматической коррекции в зеркально-линзовом объективе с использованием одного оптического материала	94
19. <i>В.И. Наливайко, О.Я. Абель.</i> Сканер на основе плоской отражательной внеосевой парабола в халькогенидном слое	99
20. <i>Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков.</i> Датчики перемещений с двумерной дифракционной решеткой	104
21. <i>В.П. Корольков.</i> Применение контурной маски для повышения дифракционной эффективности ДОО с кусочно-непрерывным рельефом	110
22. <i>Ю.Ц. Батомункуев, Н.А. Мещеряков.</i> Циклическая схема записи объемного голограммного оптического элемента	115
23. <i>В.П. Корольков, А.С. Конченко, В.В. Черкашин, Н.Г. Миронников.</i> Прибор для автоматизированного измерения карты глубины рельефа бинарных синтезированных голограмм	118
24. <i>Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова, Т.В. Маганакова, В.А. Райхерт, Н.А. Харитошин.</i> Компьютерный синтез дискретных дифракционных оптических элементов	124
25. <i>В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.В. Кочкарев.</i> Исследование лазерно-индуцированных процессов формирования микро столбиковых структур на поверхности кремниевой пластины	130
26. <i>В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева.</i> Высокодобротные оптические резонаторы полного внутреннего отражения.....	143
27. <i>Е.В. Лантев, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.В. Кочкарев.</i> Разработка методики лазерного пиролизического осаждения углеродных плёнок на никелевых подложках	154
28. <i>В.В. Кузнецов.</i> Теплофизические проблемы разработки микрожидкостных систем.....	159
29. <i>Д.В. Кочкарев.</i> Экспериментальное исследование лазерно-индуцированных процессов формирования столбиковых микро структур.....	164
30. <i>И.А. Козулин, В.В. Кузнецов, В.И. Орешкин, Н.А. Ратахин, А.Г. Русских.</i> Экспериментальное исследование динамики распада вещества при импульсном нагреве жидкости и электрическом взрыве проводников	172
31. <i>Н.Р. Рахимов, В.А. Жмудь, Ш.И. Мадумаров.</i> Автоматизированная оптоэлектронная система для определения содержания серы в нефти и нефтепродуктах	178

32. <i>В.Г. Эдвабник</i> . Способы повышения достоверности и надежности виброиспытаний	182
33. <i>В.Г. Эдвабник</i> . Методика выбора условной точки управления для повышения достоверности и качества вибрационных испытаний	187
34. <i>С.А. Степанова</i> . Влияние окислителей на разложение гербицидов в почве.....	192
35. <i>В.Г. Эдвабник, Ю.М. Фартышев, А.К. Гаутцель, М.М. Кузнецов</i> . Об оценке стабильности производственных процессов в условиях единичного и мелкосерийного производства	195
36. <i>Д.А. Герус, В.С. Кулик, В.Б. Ромодин</i> . Разработка линейного коллиматора для антенных измерений	201
37. <i>В.И. Ознобихин, В.Б. Ромодин</i> . Расчет допусков геометрических параметров волноводно-щелевых антенн	206
38. <i>В.И. Ознобихин, В.Б. Ромодин</i> . Влияние металлических кромок на диаграмму направленности волноводно-щелевой антенны	211
39. <i>Л.В. Шебалкова</i> . Моделирование системы возбуждения низкoproфильного волновода.....	214
40. <i>А.Г. Батурин, М.К. Печёрин</i> . Анализ методов обработки сигнала в импульсно-фазовых системах измерения дальности.....	219
41. <i>Ю.А. Печёнкин, В.А. Колесников</i> . Оценка и учёт влияния помехи обратного рассеяния на работу оптико-локационных устройств	225
42. <i>Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, О.К. Ушаков, В.А. Жмудь, П.В. Петров</i> . Оптоэлектронная система для контроля усталости машиностроительных конструкций	229
43. <i>Б.Н. Рахимов, Т.В. Ларина, С.Х. Шамирзаев</i> . Молекулярно-кинетические процессы и принципы создания оптоэлектронных датчиков для регистрации усталости	239
44. <i>Н.Р. Рахимов, Е.Ю. Кутенкова, М.П. Исаев, И.М. Болтабоев</i> . Оптоэлектронный метод определения влажности сыпучих материалов.....	246
45. <i>Н.К. Соснова, А.Н. Соснов, М.М. Кузнецов, А.А. Марач, Л.А. Канушина</i> . К вопросу комплектации линз анаморфотных оптических систем.....	253
46. <i>М.М. Кузнецов, А.А. Марач, П.И. Петров</i> . Определение формы и размера эритроцитов при помощи метода псевдоцветового кодирования изображений.....	257
47. <i>Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова</i> . Расчет допусков на оптические неоднородности оптических материалов.....	262
48. <i>Е.Г. Бобылева, С.В. Критинина</i> . Совершенствование транспортно-складской системы в современном оптическом приборостроении	268
49. <i>С.В. Критинина, Е.Г. Бобылева</i> . Современное оборудование оптического производства	272
50. <i>Л.Б. Воробьева</i> . Формирование слоев травления на силикатных стеклах.....	277

51. <i>С.С.Овчинников, В.М. Тымкул, М.М. Кузнецов.</i> Оптический способ контроля шероховатости поверхности	282
52. <i>П.И. Петров, А.А. Марач, М.М. Кузнецов.</i> Контроль качества сварных швов при помощи метода псевдоцветового кодирования изображений	286
53. <i>М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов.</i> Перспективы развития оптико-электронных измерительных приборов на российском рынке	290
54. <i>С.Н. Жиров, М.М. Кузнецов.</i> Голографические технологии в современном оптическом приборостроении	293
55. <i>Н.Р. Рахимов, Е.Ю. Кутенкова, А.Н. Серьезнов.</i> Принципы построения оптоэлектронных устройств для контроля оптических параметров жидких сред.....	296
56. <i>А.А. Топорков, М.Н. Павлов, И.С. Бутримов.</i> Реализация функции программирования реальной баллистики на примере автоматизированного прицел-дальномера «Рысь-ЛД»	302
57. <i>А.А. Малюженко.</i> История изучения современных движений земной коры на Удоканском геодинамическом полигоне	307

CONTENTS

1. <i>D.G. Makarova</i> . About the choice of technology of forming surfaces of lenses for submillimeter wavelength range	3
2. <i>A.V. Golitsyn, V.S. Efremov, I.O. Mikhailov, N.V. Orevkova, B.V. Fedorov, V.B. Shlishevsky</i> . Liquid lenses as the new optical element base for optical and optoelectronic devices	7
3. <i>V.S. Efremov, I.O. Mikhailov, V.B. Shlishevsky</i> . Liquid lenses condensor	12
4. <i>A.V. Golitsyn, V.S. Efremov, T.V. Kolmykova</i> . Zoom lens design with two liquid filled components	16
5. <i>I.S. Glebus, S.N. Makarov</i> . Simulation of interferometric signals in the fibre-optical schemes using frequency-modulated radiation	21
6. <i>E.V. Sysoev, I.A. Vykhristyuk, R.V. Kulikov, V.V. Shirokov</i> . Effect of interferograms random phase shift to error of surface measurement in the white light interferometer	28
7. <i>V.P. Bessmeltsev</i> . Problems of laser microprocessing automated complexes creation	32
8. <i>E.V. Sysoev, I.A. Vykhristyuk, A.V. Zapreev, R.V. Kulikov</i> . Determination of phase shift in white-light interferometer	39
9. <i>A.V. Kiryanov, V.V. Chukanov, V.P. Kiryanov, S.V. Perebeynos</i> . The information-controlling system for an active aerostatic bearing on a base of combined photoelectric encoder	43
10. <i>I.G. Palchikova, E.S. Smirnov, N.T. Yasakova, L.V. Omelyanchuk, V.F. Semeshin</i> . The absorption coefficient spectrum of Felgen-stained cells nuclei	51
11. <i>P.S. Zagubisalo, A.G. Paulish</i> . Simulation of the thermal processes in the thin-film converter of millimeter radiation into infrared radiation for capability check of millimeter waves imager	57
12. <i>V.B. Shlishevsky</i> . The method of spectral field curvature correction in imaging spectrometers	62
13. <i>V.M. Tymkul, L.V. Tymkul, Yu.A. Fesko, A.N. Polikanin</i> . Energy calculations in systems. Part 1. Calculation of the range	67
14. <i>V.M. Tymkul, L.V. Tymkul, E.V. Laptev, M.P. Isayev, E.A. Krapivko, Yu.A. Fesko</i> . Energy calculations in systems. Part 2. Algorithm and calculations of range of the thermal imager	73
15. <i>V.E. Mitrokhin, A.V. Taraskin</i> . Physical modeling of magneto-optical effect and influence of temperature on optical fiber and place of its connection	80
16. <i>E.A. Krapivko, I.O. Mikhailov</i> . The fundamental principles of modeling the 3d object space	84

17. V.E. Mitrokhin, M.V. Mitrokhin. Remote monitoring of the grounding device.....	89
18. V.L. Parko, T.N. Khatsevich. The approach of apochromatic correction in the catadioptric lens with use of one optical material.....	94
19. V.I. Nalivaiko, O.Ya. Abel. Scanner on basis of flat reflective off-axis parabola in chalcogenide layer	99
20. Yu.Z. Batomunkuev, N.A. Meshcheryakov. Devices of shift with two-dimensional diffraction grating	104
21. V.P. Korolkov. Application of contour mask for enhancing a diffraction efficiency of continuous-relief DOEs	110
22. Yu.Z. Batomunkuev, N.A. Meshcheryakov. Cycle scheme for recording of volume holographic optical element.....	115
23. V.P. Korolkov, A.S. Konchenko, V.V. Cherkashin, N.G. Mironnikov. A device for automatized measurement of structure depth map for binary synthesized holograms	118
24. Yu.Z. Batomunkuev, A.A. Dianova, T.V. Maganakova, V.A. Reichert, N.A. Haritoshin. Computer synthesis of discrete diffractive optical elements.....	124
25. V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, D.V. Kochkarev. Investigation of laser-induced processes of formation micropost structures on the surface of a silicon substrate.....	130
26. V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, A.S. Syrneva. High q-factor optical resonator of full internal reflection	143
27. E.V. Laptev, V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, D.V. Kochkarev. The development of the technique of laser pyrolytic deposition of carbon films on nickel substrates	154
28. V.V. Kuznetsov. Thermophysical problems in microfluidic systems design.....	159
29. D.V. Kochkarev. Experimental study of laser-induced processes of formation posts microstructures	164
30. I.A. Kozulin, V.V. Kuznetsov, V.I. Oreshkin, N.A. Ratakhin, A.G. Russkikh. Experimental study dynamics decay of matter during pulse heating in liquid and electric explosion of the wire	172
31. N.R. Rakhimov, V.A. Zhmud, S.I. Madumarov. Principles of construction of optic-electronic devices for the control of optical parameters of liquid mediums	178
32. V.G. Edvabnik. The vibration testing accuracy and reliability improving methods.....	182
33. V.G. Edvabnik. The technique of a conventional control point choosing for reliability and quality of the vibration tests increasing.....	187
34. S.A. Stepanova. The influence of oxidizers on the decomposition of herbicides in soil	192

35. V.G. Edvabnik, Yu.M. Fartishev, A.K. Gautsel, M.M. Kuznetsov. The assessment of the stability of production processes in the conditions of the single and small-batch production	195
36. D.A. Gerus, V.S. Kulik, V.B. Romodin. Linear collimator design for antenna measure	201
37. V.I. Oznobixin, V.B. Romodin. The calculation of tolerances of the geometric parameters of a waveguide-slot antennas	206
38. V.I. Oznobixin, V.B. Romodin. The influence of the metal edges on the direction diagram of a waveguide-slot antenna	211
39. L.V. Shebalkova. Low-profile waveguide excitation system simulation	214
40. A.G. Baturin, M.K. Pecherin. Range measuring signal processing methods analysis in pulse-phase systems	219
41. Yu.A. Pechenkin, V.A. Kolesnikov. Evaluation and accounting of the influence of the noise inverse scattering on the work of the optical location devices	225
42. N.R. Rakhimov, T.V. Larina, O.K. Ushakov, V.A. Zmud, P.V. Petrov. Optoelectronic system for control of fatigue machine-building structures	229
43. B.N. Rakhimov, T.V. Larina, C.H. Shamirzaev. Molecular-kinetic processes and principles of creation of optoelectronic sensors for the registration of fatigue	239
44. N.R. Rakhimov, E.Yu. Kutenkova, M.P. Isaev, I.M. Boltabaev. Optoelectronic method for determination of moisture bulk of materials	246
45. N.K. Sosnova, A.N. Sosnow, M.M. Kuznetsov, A.A. Marash, L.A. Kanushina. To the question of bundling lenses anamorphic optical systems	253
46. M.M. Kuznetsov, A.A. Marash, P.I. Petrov. Determination of the shape and size of red blood cells with the help of the method of the pseudo-color image coding	257
47. L.A. Kanushina, A.N. Sosnow, N.K. Sosnova. The calculation of tolerances of the optical inhomogeneities of optical materials	262
48. E.G. Bobyleva, S.V. Kritinina. Improvement of transport and warehouse system to modern-day, optical engineering	268
49. S.V. Kritinina, E.G. Bobyleva. Modern equipment in optical engineering	272
50. L.B. Vorobyeva. Formation of layers of etching on silicate glasses	277
51. S.S. Ovchinnikov, V.M. Timkul, M.M. Kuznetsov. Optical method for the control of surface roughness	282
52. P.I. Petrov, A.A. Marash, M.M. Kuznetsov. Quality control of welded joints with the help of a method pseudo-color image coding	286
53. M.S. Kombarov, M.M. Kuznetsov. Prospects of development of optic-electronic measuring instruments on the Russian market	290
54. S.N. Girov, M.M. Kuznetsov. Holographic technology in the modern optical instrument-making industry	293

55. <i>N.R. Rakhimov, E.Yu. Kutenkova, A.N. Seryoznov.</i> Principles of construction of optic-electronic devices for the control of optical parameters of liquid mediums.....	296
56. <i>A.A. Toporkov, M.N. Pavlov, I.S. Butrimov.</i> Real ballistics programming in Rys-LD automated laser rangefinder rifle scope.....	302
57. <i>A.A. Maljuzhenko.</i> History of studying of recent movements of the earth's crust in the Udokansky geodynamic polygon.....	307

Научное издание

IX Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2013

Международная научная конференция

СибОптика-2013

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Л.Н. Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 16.04.2013. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 18,54. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГГА
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.