

А. В. Топчиенко^{1}, Д.М. Никулин¹, В.В. Балакин^{2,3}*

Проектирование оптической системы для диагностики параметров пучка заряженных частиц

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

*e-mail: A.V.Topchienko@inp.nsk.su

Аннотация. В связи со спецификой работы Инжекционного Комплекса ВЭПП-5 (Встречные Электрон-Позитронные Пучки) в Институте ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) диагностика параметров пучков заряженных частиц является актуальной задачей. В настоящее время существует множество способов диагностики пучков заряженных частиц, которые делятся на три группы: контактные, электромагнитные и оптические. Выбран метод оптической диагностики по синхротронному излучению пучка заряженных частиц, так как данный метод является не деструктивным и не влияет на параметры пучка заряженных частиц. Целью статьи является проектирование оптической системы для диагностики пучка заряженных частиц на инжекционном комплексе ВЭПП-5. В статье рассматривается проектирование оптической системы в программе «Zemax». Определены обязательные технические требования и необходимые параметры для проектирования оптической системы.

Ключевые слова: инжекционный комплекс, контроль параметров пучка, оптическая система

A. V. Topchienko^{1}, D. M. Nikulin¹, V.V. Balakin^{2,3}*

Optical System Design for Charge Particle Beam Parameters Diagnostic

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: A.V.Topchienko@inp.nsk.su

Abstract. Due to the specifics of the operation of the oncoming electron-positron beams-5 injection complex (VEPP-5) at the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, diagnostics of parameters of charged particle beams is an urgent task. Currently, there are many ways to diagnose charged particle beams, which are divided into three groups: contact, electromagnetic and optical. The method of optical diagnostics based on synchrotron radiation of a charged particle beam is chosen, since this method is not destructive and does not affect the parameters of a charged particle beam. The purpose of this article is to design an optical system for diagnostics of a charged particle beam at the VEPP-5 injection complex. The article discusses the design of an optical system in the Zemax program. The mandatory technical requirements and necessary parameters for the design of the optical system are defined.

Keywords: injection complex, beam parameter control, optical system

Введение

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 [1] является источником электронных и позитронных пучков для двух коллайдеров ИЯФ СО РАН – ВЭПП-4 [2] и ВЭПП-2000 [3].

Инжекционный комплекс состоит из электронной пушки, двух линейных ускорителей, конверсионной системы, накопителя-охладителя и транспортных каналов. Место установки оптической скамьи, на которой располагается оптическая система, показано красной линией (рис. 1).

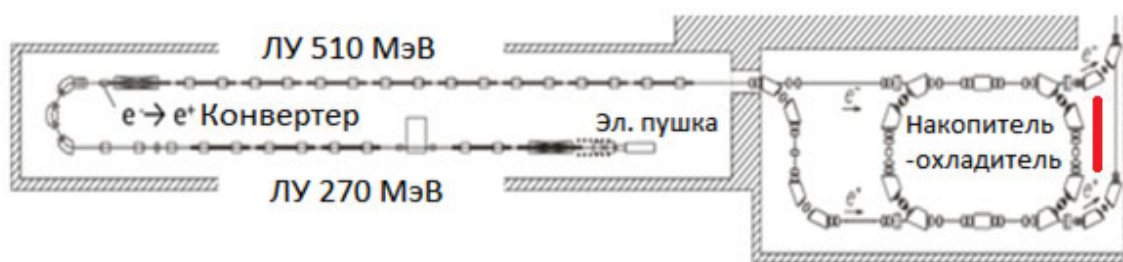


Рис.1. Схема инжекционного комплекса ВЭПП-5

Производительность комплекса и эффективность работы зависит от параметров пучков заряженных частиц. К качеству пучков в современных ускорителях предъявляются высокие требования, поэтому эксплуатация ускорительных установок без точных и надежных систем диагностики пучка, обеспечивающих возможность регулярной настройки параметров ускорителя по результатам измерений, затруднительна.

Среди многообразия оптических методов [4] был выбран способ измерений поперечных размеров пучка заряженных частиц с помощью прибора с зарядовой связью (ПЗС-матрицы).

ПЗС-матрица представляет собой электронный прибор в виде двухмерной решетки из фоточувствительных элементов (пикселей), каждый из которых может регистрировать количество света, попавшего на его поверхность. При попадании света на пиксель его энергия переводится в электрический заряд, который затем с помощью электрических полей считывается и преобразуется в изображение [5].

Проектирование оптической системы

Для того, чтобы зарегистрировать пучок заряженных частиц, пролетающий в ускорителе необходимо разработать принципиальную оптическую систему установки с ПЗС-матрицей. К оптической системе для контроля пучка заряженных частиц предъявлялись следующие технические требования, которые должны быть соблюдены при ее проектировании [6]. Для измерения параметров поперечного пучка заряженных частиц используется ПЗС-матрица размером

6,784×5,427 мм. Из-за особенностей расположения магнитных элементов накопителя-охладителя присутствуют фиксированные расстояния от точки излучения синхротронного излучения до первого зеркала 500 мм и от первого зеркала до расположения второго зеркала 550 мм [7-9].

Расчет оптической схемы проводился по следующим формулам:

$$f'_{\text{экв.}} = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - d'} \quad (1)$$

где f'_1 – фокусное расстояние первого компонента; f'_2 – фокусное расстояние второго компонента; d – расстояние между компонентами.

$$d = 2f' \text{об}_{\text{экв}} \cdot \text{tg} \omega, \quad (2)$$

где $f' \text{об}_{\text{экв}}$ – эквивалентное фокусное расстояние объектива; $\text{tg} \omega$ – расходимость синхротронного излучения, излучаемого пучком заряженных частиц.

В ходе расчета получилось значение эквивалентного фокусного расстояния, равное 1500 мм.

В программе «Zemax» рассчитывались оптические параметры такие как фокусное расстояние, абберрации, отражение, преломление и многие другие. «Zemax» позволяет моделировать световые пучки, распространяющиеся через линзы и другие элементы оптических систем [10]. Редактор проектирования оптической системы представлен на рис. 2.

Тип поверхности	Комментарий	Радиус	Толщина	Стекло	Полудиаметр
OBJ	Стандартная	бесконечность	бесконечность		бесконечность
1	Стандартная	бесконечность	500.000		1.966
2	Разрыв ко..		0.000	–	0.000
3*	Стандартная	бесконечность	0.000	MIRROR	30.000 U
4	Разрыв ко..		-550.000	–	0.000
5	Разрыв ко..		0.000	–	0.000
6*	Стандартная	бесконечность	0.000	MIRROR	30.000 U
7	Разрыв ко..		0.000	–	0.000
8*	Стандартная	бесконечность	500.000		3.799
9	Стандартная	бесконечность	0.000		4.671
10*	Стандартная	97.050	4.000	LZ_K8	15.000 U
11*	Стандартная	-99.310	2.000	LZ_TF1	15.000 U
12*	Стандартная	-648.600	196.000		15.000 U
13	Разрыв ко..		0.000	–	0.000
14*	Стандартная	бесконечность	0.000	MIRROR	20.000 U
15	Разрыв ко..		0.000	–	0.000
16	Стандартная	бесконечность	-25.850 V		0.358
STO	Стандартная	бесконечность	0.000		0.200 U
18*	Стандартная	-32.060	-7.000	LZ_TK2	7.811 U
19*	Стандартная	15.596	-3.000	LZ_TF1	7.811 U
20*	Стандартная	23.390	-218.684 M		7.811 U
IMA	Стандартная	бесконечность	–		2.650

Рис. 2. Редактор оптической системы

С помощью программы «Zemax» изначально спроектировали параксиальную модель для проверки расчета. Впоследствии, вместо параксиальных компонентов, были вставлены реальные линзы. Представленная оптическая система с реальными компонентами приведена на рис. 3.

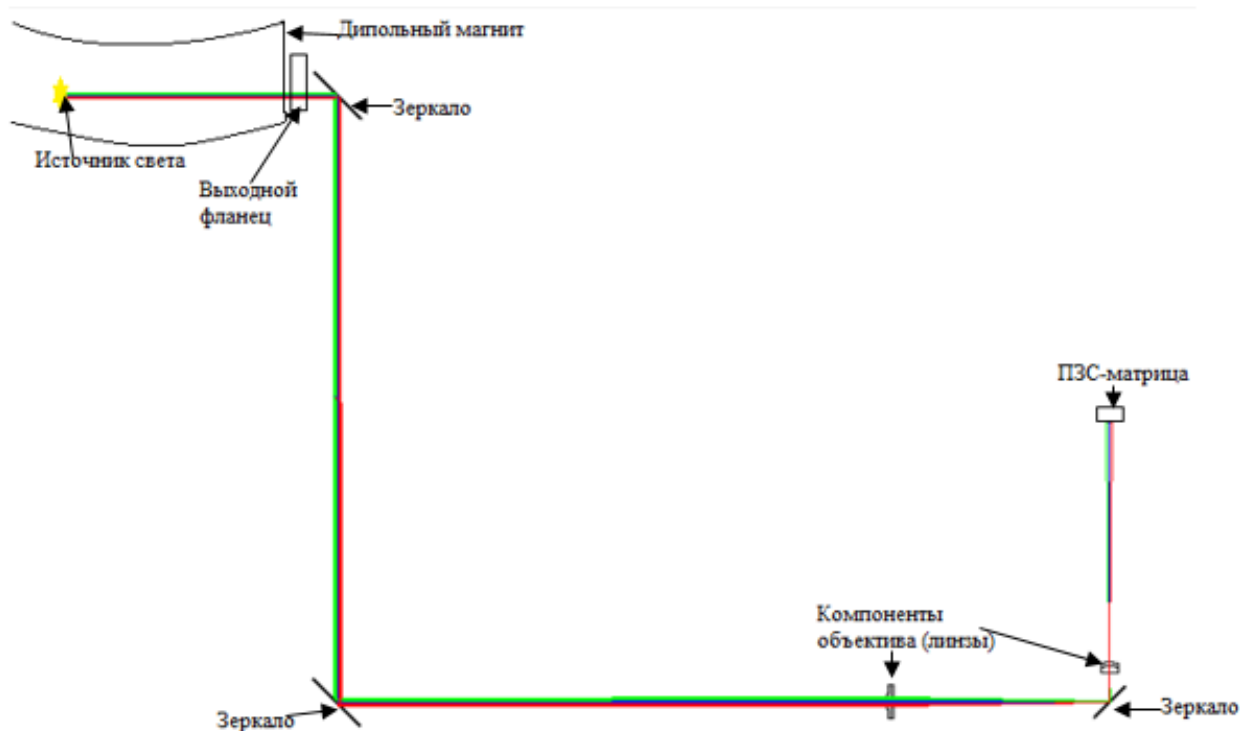


Рис. 3. Оптическая система для диагностики

На рис. 3 показана оптическая схема для диагностики пучка заряженных частиц. В дипольном магните синхротронное излучение, испущенное заряженными частицами, распространяется по касательной к траектории движения пучка заряженных частиц и через систему зеркал по средствам объектива фокусируется на ПЗС-матрице. Объектив состоит из двух компонентов для возможности изменения фокусного расстояния. Расчет показал размер изображения пучка заряженных частиц, равный 5,3 мм, что меньше минимального размера ПЗС-матрицы, что полностью соответствует поставленным требованиям.

Результаты и обсуждение

Был проведен анализ изображения пучка заряженных частиц (рис. 4).

Анализируя данную диаграмму, можно сделать вывод о том, что оптическая система дифракционно-ограниченная, среднееквадратичное значение радиуса много меньше радиуса кружка Эйри.

Спроектированная оптическая система была установлена на оптической скамье на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 и получено изображение пучка позитронов на ПЗС-матрице (рис. 5).

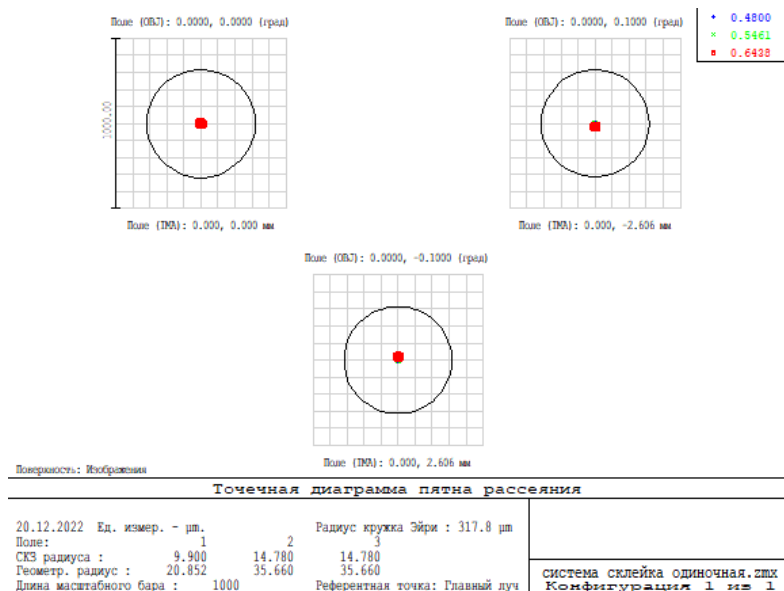


Рис. 4. Диаграмма пятна рассеяния

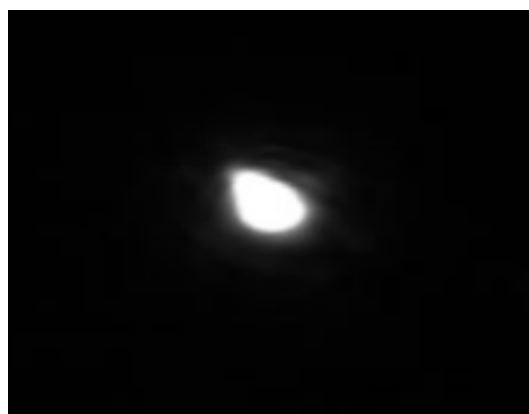


Рис.5. Зарегистрированное ПЗС-матрицей синхротронное излучение от пучка позитронов

Заключение

По заданным техническим требованиям была спроектирована оптическая система на накопителе-охладителе для диагностики пучков заряженных частиц. Оптическая система рассчитана в программе «Zemax», определены ее характерные параметры. Спроектированная оптическая система была установлена на оптической скамье инжекционного комплекса ВЭПП-5, получены первые результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беркаев Д.Е. «VEPP-5 Injection Complex: two colliders operation experience», «Proc. IPAC'17. Paper WEP1K026. – Т №12 2017 г. – С. 2982-2984.
2. Левичев Е.Б. «Status and upgrade of the VEPP-4 storage-ring facility».Phys. Part. Nucl. Lett. 13. – Т №7 2016 г. С. 876-883.

3. Землянский И.М. «Commissioning of e^+/e^- transfer Line from BINP Injection Complex to VEPP-2000 Facility». «Proc. RuPAC'16. Paper TUPSA001». – Т №6 2016 – С. 213-215.
4. Смалюк, В.В. Диагностика пучков заряженных частиц: под ред. чл.-корр. РАН Н.С. Диканского; Параллель, 2009. – 294 с.
5. Дубовик, А.С. Прикладная оптика : учебное пособие для вузов: издательство «Недра», 1989. – 612 с.
6. Мешков, О. Н. Методы оптической диагностики электрон-позитронных пучков и взаимодействия плазмы с сильноточным электронным пучком. Физика элементарных частиц и атомного ядра, Новосибирск – 2019 г. – Т. 43. – С. 451 – 499.
7. Михайлин В. В. Синхротронное излучение в спектроскопии : учебное пособие: московский государственный университет. — Москва : МГУ, 2011. – 164 с.
8. Свешникова, И.С. Расчет и проектирование оптических систем : учебник для вузов. – издательский центр «Логос» – Москва, 2000 – 189 с.
9. Старостенко, А.А. Статус и перспективы инжекционного комплекса ИЯФ: письма в ЭЧАЯ. – 2016. – Т. 13. – № 7. – С. 1493–1499.
10. Хацевич, Т.Н. Компьютерные методы проектирования оптических систем : учебник. – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – 156 с.

© А. В. Топчиенко, Д. М. Никулин, В.В. Балакин, 2023