

А. В. Топчиенко^{1}, Д. М. Никулин¹*

Методы контроля параметров пучка заряженных частиц

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: A.V.Topchienko@inp.nsk.su

Аннотация. Контроль параметров пучка заряженных частиц является актуальной задачей при разработке и эксплуатации ускорителей заряженных частиц. Качество пучков в современных ускорителях имеет непосредственное отношение к эффективности их работы. В первую очередь осуществляется контроль геометрических характеристик пучка заряженных частиц. В статье рассматриваются известные методы контроля параметров пучка заряженных частиц, основанные на контактных, оптических и электромагнитных датчиках. Приводятся физические принципы, на которых работают контактные, оптические и электромагнитные датчики. Целью данной работы: изучить и проанализировать известные методы контроля параметров пучка заряженных частиц, выявить недостатки и преимущество одних методов относительно других.

Ключевые слова: пучок заряженных частиц, синхротронное излучение, ускоритель заряженных частиц

A. V. Topchienko^{1}, D. M. Nikulin¹*

Methods for Monitoring Parameters of a Charged Particle Beam

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: Topchienko-AV2021@sgugit.ru

Abstract. Charged particle accelerator Monitoring the parameters of a charged particle beam is an urgent task in the development and operation of charged particle accelerators. The quality of beams in modern accelerators is directly related to the efficiency of their operation. First of all, the geometric characteristics of the charged particle beam are controlled. The article discusses well-known methods for monitoring the parameters of a charged particle beam based on contact, optical and electromagnetic sensors. The physical principles on which contact, optical and electromagnetic sensors work are given. The purpose of this work is to study and analyze known methods for controlling the parameters of a charged particle beam, to identify the disadvantages and advantages of some methods relative to others.

Keywords: a beam of charged particles, synchrotron radiation, charged particles accelerator

Введение

Пучки заряженных частиц являются необходимым инструментом при разработке перспективных технологий в области проведения исследований физических, химических и механических свойств материалов [1]. В мире работают и ежегодно запускаются ускорители заряженных частиц – один из основных инструментов физиков и научных работников об изучении фундаментальных свойств материи [2, 3]. Ускорители заряженных частиц применяются в медицин-

ских целях: получение и использование радиоактивных изотопов в медицине, позитронно-эмиссионная томография, радионуклидная терапия, производство ядерных мембран и т.д. [4-7].

Так как одной из главных задач является транспортировка заряженных частиц из одного места в другое, контролируются в основном геометрические характеристики пучка: группировка, фокусировка, поперечные и продольные размеры. Данные характеристики управляются при помощи согласованной работы многих устройств, в первую очередь прецизионных электромагнитных устройств, с помощью которых пучок заряженных частиц фокусируют, отклоняют, поворачивают и ускоряют.

Сложность измерения параметров пучка движущихся в ускорителях заряженных частиц связана, в первую очередь, с энергиями и скоростями, близкими к скорости света.

Известные методы контроля параметров пучка заряженных частиц

Все разнообразие методов контроля параметров пучка заряженных частиц можно разделить на три типа по физическим принципам, лежащим в основе работы датчика:

- контактные датчики, непосредственно взаимодействующие с частицами пучка;
- оптические датчики, регистрирующие излучение пучка в видимом, ультрафиолетовом или рентгеновском диапазонах;
- электромагнитные датчики, сигналы которых формируются электромагнитными полями, индуцированными пучком [8].

1. Контактные датчики

Так как контактные датчики взаимодействуют с пучком заряженных частиц, плотность мощности которых может достигать до 10^{15} Вт/см², то они используются для однопролетной диагностики. Главным недостатком контактных датчиков является вызываемое им разрушающее воздействие на пучок заряженных частиц при физическом взаимодействии с ним. Самыми распространенными контактными датчиками являются:

1. Цилиндр Фарадея. По сути, является металлическим электродом, располагающемся на пути пролета пучка заряженных частиц. Возникающий в электроде ток, при поглощении материалом электрода пучка заряженных частиц является мерой тока пучка в вакууме.

2. Люминофорный экран. Помещается на пути пучка заряженных частиц, под действием которых люминофор начинает светиться и позволяет визуализировать пучок на люминофоре (рис. 1).

3. Микроканальный датчик. Представляет собой микроканальную пластину, предназначенную для усиления тока вторично-эмиссионных электронов, с помощью которых формируется изображение пучка заряженных частиц.

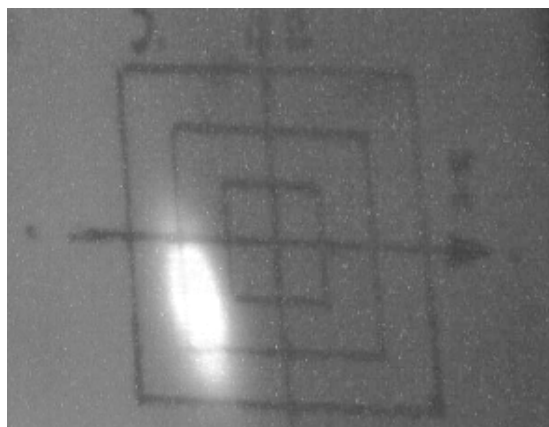


Рис. 1. Изображение пучка заряженных частиц на люминофоре

4. Ионизационный датчик. Изображение пучка заряженных частиц формируется электронами при ионизации им остаточного газа.

5. Пучковый датчик. Принцип работы заключается в сканировании электронным (пробным) пучком исследуемого пучка заряженных частиц (рис. 2).

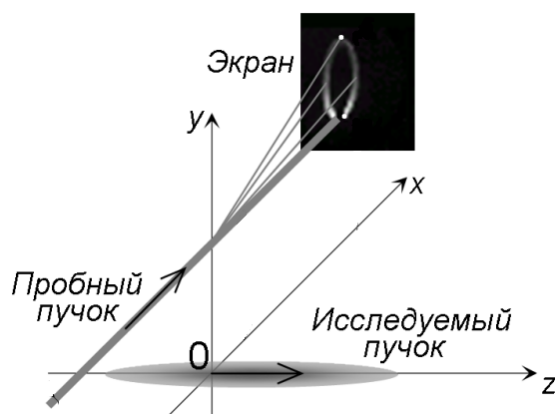


Рис. 2. Расположение пробного и исследуемого пучков

6. Лазерные измерители профиля пучка. Основаны на эффекте Комптона – рассеянии фотонов на пучке заряженных частиц [9].

II. Оптические датчики

Оптические датчики используются для визуального наблюдения синхротронного излучения (магнитотормозное излучение), генерируемого релятивистским пучком в поле поворотных магнитов. Оптическими датчиками могут быть:

1. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – чувствительный прибор, работающий в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах (рис. 3) [10]. Способен усиливать световой поток до 10^8 раз, что позволяет регистрировать до одного фотона.

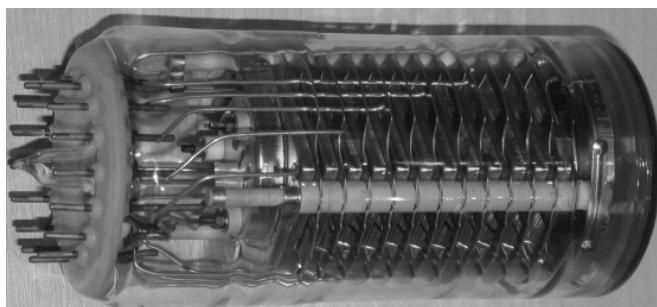


Рис. 3. Фотоэлектронный умножитель

2. Диссектор – представляет из себя электронно-оптический преобразователь [11] (рис. 4), в котором, вместо люминесцентного экрана устанавливается диафрагма с малым отверстием.

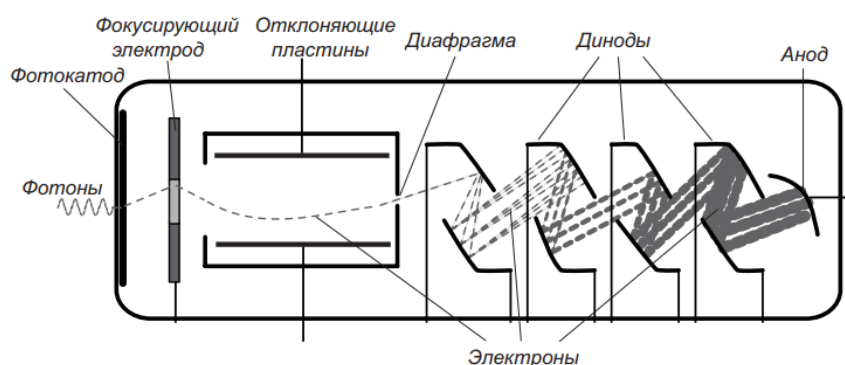


Рис. 4. Устройство диссектора

3. Стрик-камера – электронно-оптическая камера со скоростной разверткой, позволяющая диагностировать пучок заряженных частиц с пикосекундным временным разрешением, высокой частотой сканирования и высокой чувствительностью [12].

4. ПЗС-матрица – оптико-электронный преобразователь, формирующий двумерное изображение поперечного распределения плотности пучка заряженных частиц.

III. Электромагнитные датчики

Электромагнитные датчики основаны на эффекте возбуждения в них электромагнитного поля пролетающим пучком заряженных частиц. Физические характеристики поля несут информацию о параметрах пучка заряженных частиц. Перечисленные ниже датчики, нашли распространение практически на всех ускорителях заряженных частиц:

1. Резонаторный датчик – представляет собой замкнутый объем (напр. цилиндрический резонатор) с проводящими стенками, в которых возникают стоячие электромагнитные волны, возбуждаемые пучком заряженных частиц. По вза-

имодействию электромагнитной волны с пробным зарядом можно судить о параметрах пучка заряженных частиц.

2. Электростатический датчик – представляет собой систему из двух проводников, один из которых заземлен, а другой является сигнальным. Движущиеся заряды пучка индуцируют ток в цепи сигнального проводника, содержащей сопротивление нагрузки, на котором возникает напряжение, являющееся выходным сигналом датчика [8].

3. Магнитоиндукционный датчик. В магнитоиндукционном датчике проводник образует виток, в котором возникает электродвижущая сила, благодаря изменению потока магнитного поля, создаваемого движущимися зарядами пучка. В виток включено сопротивление нагрузки, с которого снимается сигнал датчика. Достоинством магнитоиндукционного датчика является нечувствительность к частицам пучка, попадающим в датчик, а также к вторичным электронам, выбиваемым частицами пучка из вакуумной камеры и тоже попадающим в датчик [8].

Заключение

Разнообразие методов контроля параметров заряженных частиц позволяет исследователям и разработчикам использовать тот, который наиболее подходит в конкретных случаях. Учитываются сложность, доступность, стоимость. Самым простым, с точки зрения используемой аппаратуры, смотрятся оптические методы контроля пучка заряженных частиц, т.к. оптические датчики взаимодействуют не с самим пучком, а с его синхротронным излучением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. F. Watt, A.A. Bettiol, J.A. van Kan et al. // Int. Journal of Nanoscience, vol.4, No.3 (2005), pp. 269-286
2. Дмитриев С.Н., Реутов В.Ф. Ядерная физика и нанотехнология. Дубна: Изд. ОИЯИ, 2008. 73с
3. Пенионжкевич Ю.Э., Вахтель В.М. Современные ускорители заряженных частиц и их приложение. Воронеж, Изд. дом ВГУ, 2018
4. Флеров Г.Н. Вестник АН СССР. 1984; 4: 35.
5. Черняев А.П. Ускорители в современном мире. М.: МГУ, 2012. 368с.
6. Penionzhkevich Yu.E. Phys. At. Nucl. 2008; 71: 1127.
7. Ю. Э. Пенионжкевич. Современные ускорители заряженных частиц и их приложение. Вестник международной академии наук (Русская секция). Т.1. 2021. С.77-83.
8. Смалюк, В.В. Диагностика пучков заряженных частиц / Под ред. чл.-корр. РАН Н.С. Диканского. Новосибирск: Параллель, 2009. 294 с.
9. Гинзбург И.Ф., Коткин Г.Л., Сербо В.Г., Тельнов В.И. // Ядерная физика. 1983. Т. 38. С. 372–377.
10. Flyckt S.O., Marmonier C. Photomultiplier Tubes: Principles and Applications. Brive: Photonis, 2002.
11. Зинин Э.И. Стробоскопический метод электронно-оптической хронографии с пикосекундным разрешением на основе диссектора с электростатической фокусировкой и отклонением: Препр. ИЯФ СО АН СССР 81-84. Новосибирск, 1981.
12. Scheidt K. Review of Streak Cameras for Accelerators : Features, Applications and Results // Proc. of EPAC 2000. Vienna, Austria, 2000.

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