

Распределённый датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне

Ю.И. Мальцева, Ф.А. Еманов, А.В. Петренко, В.Г. Присекин

Рассматривается распределённый датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне, установленный на Инжекционном комплексе ВЭПП-5 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Принцип работы датчика заключается в регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами, рождающимися в электромагнитном ливне при попадании электрона (либо позитрона) на стенку вакуумной камеры ускорителя. Черенковское излучение регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). По времени прихода сигнала можно судить о месте потерь пучка. В эксперименте с оптоволокном длиной 20 м получено пространственное разрешение датчика, равное 3 м. Для улучшения пространственного разрешения необходимо оптимизировать работу датчика и выбрать оптоволокно и ФЭУ с оптимальными параметрами. Согласно нашим оценкам, пространственное разрешение датчика можно улучшить до 0,5 м.

Ключевые слова: датчик потерь пучка, черенковское излучение, оптоволокно, ускоритель заряженных частиц, электроны, позитроны, фотоэлектронный умножитель

PACS numbers: 29.27. – a, 41.60.Bq, 41.75.Ht, 42.81. – i

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505m.0553

Содержание

1. Введение (553).
 2. Теоретический анализ (554).
 - 2.1. Электромагнитный ливень.
 - 2.2. Черенковское излучение.
 - 2.3. Передача светового импульса.
 3. Пространственное разрешение датчика (555).
 4. Экспериментальные данные (555).
 5. Заключение (555).
- Список литературы (556).

1. Введение

Одна из основных задач, возникающих при наладке и запуске ускорителей заряженных частиц, — минимизация потерь пучка вдоль всего ускорителя. Для регистрации потерь используют датчики потерь пучка. Такие датчики размещают вдоль ускорителя в тех местах, где потери наиболее вероятны. По сигналам, полученным с датчиков, можно определить место и величину потерь.

Ю.И. Мальцева, Ф.А. Еманов, А.В. Петренко, В.Г. Присекин.
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск,
Российская Федерация
E-mail: Yu.I.Maltseva@inp.nsk.su

Статья поступила 19 января 2015 г.

Широко используемые типы датчиков потерь пучка: ионизационные камеры, сцинтилляционные счётчики, вторично-эмиссионные датчики. В настоящее время в крупных ускорительных центрах, таких как ЦЕРН, Немецкий электронный синхротрон (DESY), Брукхейвенская национальная лаборатория, разрабатывается методика использования оптического волокна в качестве черенковского датчика потерь пучка [1–3]. Данная методика разрабатывается также в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) на Инжекционном комплексе ВЭПП-5¹ [4].

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 — это интенсивный источник электронных и позитронных пучков с энергией 510 МэВ, который с запасом будет обеспечивать все потребности работающих в ИЯФ СО РАН установок на встречных электрон-позитронных пучках. Комплекс находится на стадии запуска и состоит из линейного ускорителя электронов на энергию 300 МэВ, линейного ускорителя электронов и позитронов на энергию 510 МэВ, а также накопителя-охладителя с каналами впуска и выпуска пучков. Поскольку Инжекционный комплекс не имеет штатной системы диагностики потерь пучка, нами было предложено разработать распределённый датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне. Схема датчика изображена на рис. 1.

¹ ВЭПП — аббр. от "встречные электрон-позитронные пучки".

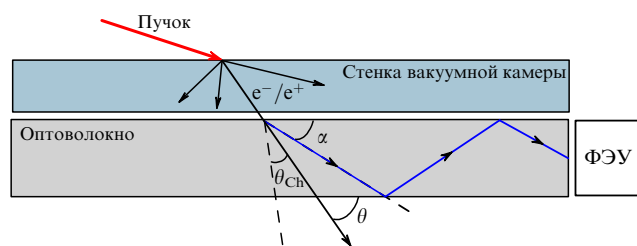


Рис. 1. Схема распределённого датчика потерь пучка.

Принцип работы датчика заключается в регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими электронами и позитронами, рождающимися в электромагнитном ливне при попадании электрона (или позитрона) на стенку вакуумной камеры ускорителя. Черенковское излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). По времени прихода сигнала можно судить о месте потерь, а по амплитуде сигнала — о количестве потерянных частиц.

Основное преимущество данного датчика по сравнению с локальными датчиками потерь заключается в том, что использование одного длинного отрезка оптоволокну вместо большого числа локальных датчиков потерь позволяет получить непрерывную картину потерь вдоль всего ускорителя. Благодаря малой длительности вспышки черенковского излучения (< 1 нс) такой датчик является быстродействующим, что позволяет проводить поворотные измерения для накопителей заряженных частиц. Кроме того, датчик нечувствителен к магнитному полю. Основными недостатками датчика являются его довольно высокая чувствительность к радиации, которая ограничивает срок его службы, и проблема калибровки сигнала датчика. Повысить стойкость датчика к радиации можно, выбрав оптоволоконно, изготовленное из кварца, и экранировав ФЭУ.

В настоящей статье проведён теоретический анализ основных физических процессов, на которых основан принцип работы распределённого датчика потерь пучка, изучены факторы, определяющие пространственное разрешение датчика, и способы его улучшения. Представлены результаты тестирования распределённого датчика потерь пучка на Инжекционном комплексе ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН.

2. Теоретический анализ

2.1. Электромагнитный ливень

Для моделирования электромагнитных ливней использовался код G4beamline [5] на основе метода Монте-Карло. Получено угловое распределение вторичных электронов и позитронов относительно направления движения пучка (рис. 2).

Способность распределённого датчика регистрировать потери пучка определяется условием возникновения черенковского излучения. Для генерации черенковского излучения кинетическая энергия заряженных частиц, проходящих сквозь диэлектрическую среду, должна удовлетворять условию

$$E_k > E_0 \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right), \quad (1)$$

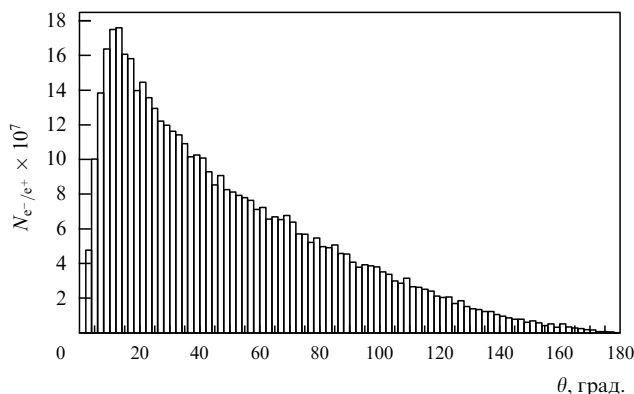


Рис. 2. Угловое распределение вторичных электронов и позитронов, проходящих сквозь оптоволоконно, относительно направления движения пучка. Электронный пучок (10^{10} частиц) с энергией 270 МэВ ударяется о стальную стенку вакуумной камеры толщиной 2 мм под углом 1° . Оптоволоконно диаметром 1 мм расположено в месте потери. Полное число заряженных частиц, пролетающих сквозь оптоволоконно, $0,5 \times 10^{10}$.

где E_0 — энергия покоя частицы, n — показатель преломления среды.

Следовательно, для того чтобы энергии вторичных заряженных частиц ливня удовлетворяли неравенству (1), энергия электронного или позитронного пучка должна превышать 10 МэВ, а протонного пучка — 5 ГэВ.

2.2. Черенковское излучение

Черенковское излучение расходится конусом вокруг движущейся в среде заряженной частицы, скорость которой больше фазовой скорости света в этой среде, с углом раствора конуса θ_{Ch} :

$$\cos \theta_{Ch}(\lambda) = \frac{1}{\beta n(\lambda)}, \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения, β — относительная скорость частицы, $\beta = v/c$.

Число черенковских фотонов определяется выражением

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = 2\pi \alpha z^2 \sin^2 \theta_{Ch}(\lambda) \frac{1}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где N — число фотонов, x — расстояние, пройденное заряженной частицей в среде, α — постоянная тонкой структуры, z — заряд частицы.

Пренебрегая дисперсией показателя преломления, из формул (2) и (3) можно оценить число черенковских фотонов в видимом диапазоне длин волн ($400 \text{ нм} < \lambda < 700 \text{ нм}$) от одного релятивистского электрона, пролетающего сквозь оргстекло ($n = 1,49$). Это число составляет примерно 30 фотонов на 1 мм, а угол, под которым они испускаются относительно направления движения заряженной частицы, равен приблизительно 48° . ФЭУ может регистрировать не только черенковское, но и переходное излучение [6]. Однако число фотонов переходного излучения, согласно нашим оценкам, в 10^4 раз меньше, чем черенковских. Таким образом, переходным излучением можно пренебречь.

2.3. Передача светового импульса

Передача черенковского излучения по оптоволокну осуществляется за счёт явления полного внутреннего

отражения, которое возникает при определённом угле распространения света внутри оптоволокну α :

$$\alpha \leq \alpha_{\max} = \arcsin \frac{NA}{n_c}, \quad (4)$$

где NA — числовая апертура, n_c — показатель преломления сердцевины оптоволокну.

Таким образом, оптоволокну захватывает ту часть черенковского излучения, которая генерируется релятивистскими заряженными частицами, пролетающими сквозь оптоволокну под углами $\theta \in [|\theta_{Ch} - \alpha_{\max}|, \theta_{Ch} + \alpha_{\max}] \cup [\pi - |\theta_{Ch} - \alpha_{\max}|, \pi - (\theta_{Ch} + \alpha_{\max})]$. Например, при $\beta = 1$, $NA = 0,47$ и $n_c = 1,492$ угол θ лежит в промежутках $30^\circ - 66^\circ$ и $114^\circ - 150^\circ$ относительно направления движения пучка, что соответствует захвату примерно 33 % излучения, распространяющегося по волокну в направлении движения пучка, и 5 % излучения, распространяющегося против направления движения пучка. Следовательно, интенсивность светового сигнала, направленного по движению пучка, в семь раз больше интенсивности сигнала, распространяющегося в противоположном направлении.

Кроме того, на основе проведённого теоретического анализа был сделан вывод, что датчик способен регистрировать единичные потери пучка с вероятностью 1 %, что, предположительно, позволит использовать аналогичный датчик для регистрации потерь пучка вследствие эффекта Тушека [7] в накопителях заряженных частиц.

3. Пространственное разрешение датчика

Пространственное разрешение датчика зависит от дисперсии света в оптоволокну и от разрешений ФЭУ и электронных устройств. Существует два основных вида дисперсии в оптоволокну: модовая и хроматическая. Модовая дисперсия обусловлена тем, что лучи света, распространяющиеся по оптоволокну под разными углами, затрачивают различное время на прохождение одного и того же отрезка оптоволокну. Хроматическая дисперсия обусловлена различным временем распространения света в среде для разных длин волн. При передаче сигнала по оптоволокну длиной L вклад каждой из дисперсий в уширение импульса можно оценить как

$$\frac{t_{\text{mod}}}{L} = \frac{n_c}{c} \left(\frac{1}{\cos \alpha_{\max}} - 1 \right), \quad (5)$$

$$\frac{t_{\text{chr}}}{L} \approx \frac{1}{c} (n_c(\lambda_1) - n_c(\lambda_2)), \quad (6)$$

где λ_1 и λ_2 задают диапазон длин волн.

В многомодовых оптоволокнух со ступенчатым показателем преломления искажение светового импульса в основном вызвано модовой дисперсией, в волокнах с градиентным показателем преломления преобладает хроматическая дисперсия, а модовая — несущественна. В одномодовых волокнах модовая дисперсия отсутствует, но амплитуда сигнала на выходе из такого оптоволокну будет существенно меньше таковой в случае многомодовых волокон. Для многомодового оптоволокну со ступенчатым показателем преломления, которое использовалось в наших экспериментах, $t_{\text{mod}}/L = 0,25 \text{ нс м}^{-1}$, $t_{\text{chr}}/L = 0,05 \text{ нс м}^{-1}$, т.е. модовая дисперсия уширяет световой сигнал в пять раз сильнее, чем

хроматическая. Поэтому для улучшения пространственного разрешения датчика следует использовать оптоволокну с градиентным показателем преломления или одномодовое оптоволокну, кроме того, следует использовать ФЭУ с микроканальными пластинами (МКП), который обладает высоким временным разрешением, а также как можно более быстрые электронные устройства.

Как показано в разделе 2.3, световой сигнал можно регистрировать с обоих торцов оптоволокну. В связи с тем что скорость пучка βc больше скорости света в оптоволокну c/n , сигнал, распространяющийся в направлении движения пучка, сжимается в два раза по отношению к пучку, а сигнал с противоположного торца растягивается в 2,5 раза. Таким образом, регистрация сигнала, распространяющегося в направлении, противоположном направлению движения пучка, позволяет в пять раз улучшить способность датчика разрешать многократные потери пучка от близко расположенных друг к другу магнитных элементов, по сравнению с разрешающей способностью при регистрации сигнала, распространяющегося в направлении движения пучка, но интенсивность сигнала при этом будет в семь раз меньше.

4. Экспериментальные данные

Для того чтобы протестировать принцип работы распределённого датчика потерь пучка, был создан его прототип на линейном ускорителе электронов Инжекционного комплекса ВЭПП-5. Вдоль вакуумной камеры были протянуты два отрезка оптоволокну Avago Tech. HFBR-RUS500Z (диаметр сердцевины 1 мм, $n_c = 1,492$, $NA = 0,47$) длиной 20 и 60 м, к которым были подсоединены ФЭУ-85 (область спектральной чувствительности 300–600 нм).

На этапе тестирования датчика было важно контролируемым образом, с помощью корректоров, создать ошибки в структуре ускорителя, для того чтобы пучок электронов был искусственно сброшен на стенку вакуумной камеры.

На рисунке 3а представлен результат эксперимента, в котором пучок был сброшен в конце первой ускоряющей структуры. Из рисунка видно, что пространственное разрешение датчика составляет примерно 3 м при длине оптоволокну 20 м и длине пучка 1,5 м. Полученное пространственное разрешение совпало с расчётным. Было установлено, что при одногустковом режиме работы ускорителя (длина пучка 4 мм) пространственное разрешение датчика можно улучшить до 0,5 м, если использовать многомодовое оптоволокну с градиентным показателем преломления или одномодовое волокну и ФЭУ с МКП.

На рисунке 3б представлен результат эксперимента, в котором пучок был сброшен в конце четвёртой ускоряющей структуры. Из полученного распределения потерь следует, что, помимо заданной потери в конце четвёртой ускоряющей структуры, существуют ещё две неконтролируемые ошибки в магнитной системе ускорителя.

5. Заключение

Датчики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокну в настоящее время разрабатываются во многих крупных ускорительных лабораториях. Нами

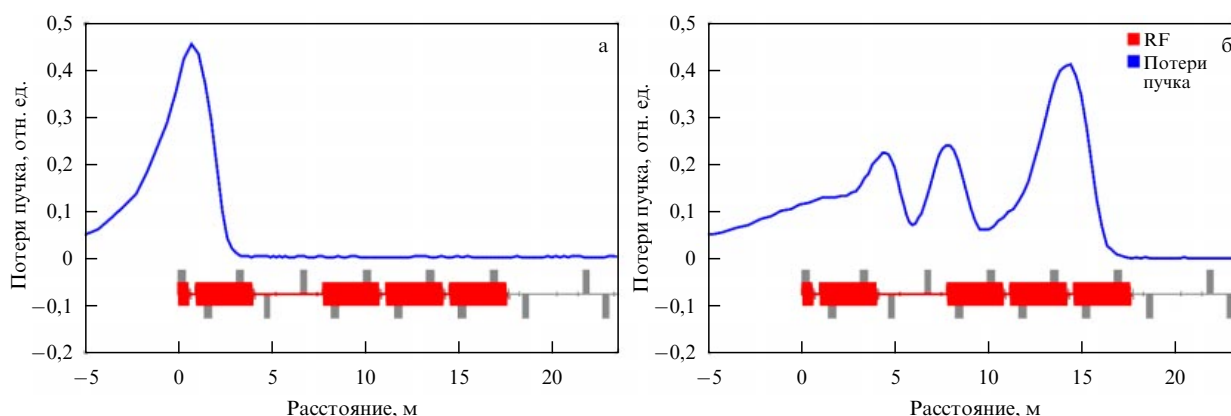


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Потери пучка электронов вдоль линейного ускорителя: (а) пучок сброшен в конце первой ускоряющей структуры, длина оптоволокну 20 м, (б) пучок сброшен в конце четвёртой ускоряющей структуры, длина оптоволокну 60 м.

был разработан и протестирован такой распределённый датчик потерь пучка на Инжекционном комплексе ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН. Получено пространственное разрешение датчика, равное 3 м при длине оптоволокну 20 м. Разрешение можно улучшить до 0,5 м, используя многомодовое оптоволокну с градиентным показателем преломления или одномодовое волокну и ФЭУ с МКП. Установлено, что датчик способен регистрировать единичные потери пучка с вероятностью 1 %, что позволит использовать этот датчик для регистрации потерь вследствие эффекта Тушека в накопителях заряженных частиц. В настоящее время датчик работает в штатном режиме на накопителе-охладителе Инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Список литературы

1. Mallows S et al., in *Proc. of the HB2012, 52nd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams*, Beijing, China, September 17–21, 2012, p. 596
2. Wulf F, Körfer M, in *Proc. of the DIPAC 2009, 9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators*, May 25–27 2009, Basel, Switzerland, p. 411
3. Kramer S L, in *Proc. of the 2012 Beam Instrumentation Workshop BIW12*, April 15–19, 2012, Newport News, VA, USA, p. 272
4. Астрелина К В и др. *ЖЭТФ* **133** 94 (2008); Astrelina K V et al. *JETP* **106** 77 (2008)
5. G4beamline, <http://www.muonsinternal.com/muons3/G4beamline>
6. Гинзбург В Л *Природа* (8) 56 (1975)
7. Bernardini C et al. *Phys. Rev. Lett.* **10** 407 (1963)

Distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in an optical fiber

Yu.I. Maltseva, F.A. Emanov, A.V. Petrenko, V.G. Prisekin

*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation
E-mail: Yu.I.Maltseva@inp.nsk.su*

This review discusses a distributed beam loss monitor which is based on the Cherenkov effect in an optical fiber and which has been installed at the VEPP-5 Injection Complex at the Budker Institute of Nuclear Physics. The principle of the device consists in detecting the Cherenkov radiation generated in an optical fiber by relativistic charged particles that are produced in an electromagnetic shower when highly relativistic beam particles (electrons or positrons) hit the vacuum pipe. Our experiments used a photomultiplier tube (PMT) to detect the Cherenkov light. Knowing when the PMT signal arrives tells where the beam loss occurs. Using a 20 m long optical fiber allowed a detector spatial resolution of 3 m. The way to improve the resolution is by optimizing the monitor working conditions and optical-fiber and PMT parameters, potentially leading to a resolution of as fine as 0,5 m according to our estimates.

Keywords: beam loss monitor, Cherenkov radiation, optical fiber, charged particle accelerator, electrons, positrons, photomultiplier tube

PACS numbers: **29.27.** – a, 41.60.Bq, 41.75.Ht, **42.81.** – i

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505m.0553

Bibliography — 7 references

Received 19 January 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 553–556 (2015)

Physics – Uspekhi **58** (5) (2015)