

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДАТЧИКА ПОТЕРЬ ПУЧКА НА ОСНОВЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТОВОЛОКНЕ

Ю. И. Мальцева^{а, 1}, А. В. Андрианов^{а, б}

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Рассматривается принцип работы распределенного датчика потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволоконне. Это устройство в режиме реального времени позволяет получить распределение потерь вдоль всего ускорителя. Экспериментально изучены способы улучшения пространственного разрешения датчика на электрон-позитронном инжекционном комплексе в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. При использовании кварцевого оптоволоконна длиной 15 м, диаметром 550 мкм и ФЭУ на микроканальных пластинах достигнуто разрешение, равное 0,5 м.

This paper describes a distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in an optical fiber. Such a device allows one to obtain real-time beam loss distribution along the accelerator. Methods to improve monitor spatial resolution are experimentally studied at the BINP e^-e^+ Injection Complex. By selecting 15 m long quartz fiber (with a large core of 550 μm) and micro-channel plate PMT, 0.5 m monitor spatial resolution can be achieved.

PACS: 29.27.Bd; 29.27.Ac; 29.20.db; 34.80.-i

ВВЕДЕНИЕ

Для диагностики потерь пучка на электрон-позитронном инжекционном комплексе [1] в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) было предложено использовать распределенный датчик потерь пучка на основе излучения Вавилова–Черенкова в оптоволоконне.

Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами электромагнитного ливня, который образуется при попадании пучка на стенку вакуумной камеры ускорителя. Черенковское излучение распространяется по оптоволокону и регистрируется с помощью фотодетектора, который дает информацию о месте и интенсивности потерь пучка. Световой импульс можно регистрировать с обоих торцов оптоволоконна. Схема датчика изображена на рис. 1. Численные оценки характерных параметров оптоволоконного датчика потерь пучка приведены в публикациях [2, 3].

¹E-mail: yuliya.maltseva@gmail.com

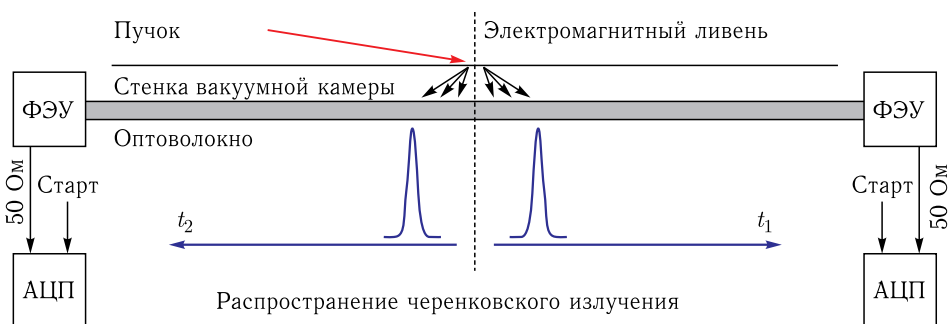


Рис. 1. Схема оптоволоконного датчика потерь пучка. t_1 , t_2 — времена прихода импульсов с торцов, расположенных по/против направления движения пучка соответственно. Запуск АЦП осуществляется внешним синхронным импульсом, привязанным к моменту инжекции/выпуска пучка

В данном сообщении описываются критерии выбора типа оптоволоконного датчика излучения и АЦП, удовлетворяющих требованиям к датчику потерь пучка на электрон-позитронном инжекционном комплексе в ИЯФ СО РАН. Приводятся результаты тестирования различных типов оптоволокон, фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и АЦП. Сделан вывод об оптимальных параметрах оптоволоконного датчика потерь пучка.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКУ ПОТЕРЬ ПУЧКА

К оптоволоконному датчику потерь пучка на электрон-позитронном инжекционном комплексе предъявляются следующие основные требования:

- высокое пространственное разрешение, которое определяется исходя из расстояния между магнитными элементами ускорителя, не хуже 1 м;
- радиационная стойкость, эксплуатация при дозах до 10^3 Гр;
- низкая стоимость.

Пространственное разрешение датчика определяется дисперсией света в оптоволокне, временными характеристиками фотодетектора и АЦП и зависит от того, с какого торца оптоволоконного датчика снимаются световые импульсы. Установлено, что при регистрации сигнала с торца, расположенного в направлении, противоположном направлению движения пучка, пространственное разрешение датчика потерь пучка в 4–5 раз лучше по сравнению с разрешающей способностью при регистрации сигнала, распространяющегося по направлению движения пучка.

Наименьшей дисперсией обладают любые типы кварцевых оптоволокон, менее 0,1 нс/м [3, 4]. Самый худший вариант: многомодовое пластиковое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления (СПП) — 0,25 нс/м. Уменьшить длительность светового импульса на выходе из пластикового оптоволоконного датчика можно при помощи коллиматора.

Однако с точки зрения стоимости пластиковое оптоволокно является самым доступным вариантом, в то время как стоимость кварцевых существенно возрастает

с ростом их диаметра. При этом кварцевые волокна с градиентным профилем показателя преломления (ГППП) или одномодовые на один-два порядка дороже кварцевых ступенчатых.

С точки зрения срока эксплуатации оптоволокна в условиях радиации пластиковое больше подвержено влиянию ионизирующего излучения, чем кварцевое. Радиационными эффектами на качество передаваемого по оптоволокну сигнала можно пренебречь в случае, когда доза не превышает 10^3 и 10^4 Гр — в случае эксплуатации пластикового и кварцевого оптоволокон соответственно [5, 6]. Поэтому оптимальным вариантом с точки зрения пространственного разрешения, радиационной стойкости и стоимости является кварцевое оптоволокно с СППП и диаметром сердцевины 550 мкм.

Среди детекторов излучения наименьшими временными характеристиками за счет малых габаритов обладают ФЭУ на микроканальных пластинах (МКП) и кремниевый ФЭУ. Коэффициент конверсии у первого, как правило, на порядок больше, чем у второго, и составляет $\sim 10^6$, что позволяет регистрировать потери малой величины. АЦП следует подбирать с полосой пропускания не менее 200 МГц.

2. ВЫБОР ФЭУ И АЦП

Для определения вклада детектора излучения в уширение импульса от длины оптоволокна были проведены измерения потерь пучка при помощи оптоволоконного датчика, установленного в конце электронного линейного ускорителя на энергию 300 МэВ. Пучок при помощи магнитного корректора сбрасывался в место расположения оптоволокна.

В качестве фотонного детектора были протестированы ФЭУ на МКП (производства АО «Катод», Новосибирск) и ФЭУ-87, оба имеют спектральный диапазон чувствительности фотокатода в максимуме спектра черенковского излучения (300–600 нм). Время нарастания и длительность анодного тока для ФЭУ на МКП составляет 0,5 и 1,5 нс соответственно, для ФЭУ-87 — не более 2,5 нс и не более 6 нс соответственно. Излучение на ФЭУ приходило с пластикового оптоволокна марки «Voadcom» (HFBR-RUS) длиной 15 м. Сигнал оцифровывался при помощи АЦП с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации $2 \Gamma_{\text{выб}}/\text{с}$.

На рис. 2, а показаны сигналы с ФЭУ на МКП и ФЭУ-87, полуширины импульсов составляют 5,2 и 8,3 нс соответственно. Оценить вклад ФЭУ в результирующее уширение импульса можно по приближительной формуле:

$$t_{\text{вых}}^2 \approx t_{\text{ОВ}}^2 + t_{\text{ФЭУ}}^2 + t_{\text{АЦП}}^2,$$

где $t_{\text{ОВ}}$, $t_{\text{ФЭУ}}$, $t_{\text{АЦП}}$ — длительность импульса за счет вклада оптоволокна, ФЭУ и АЦП соответственно.

Согласно нашим измерениям для данного пластикового оптоволокна мы получили, что на длине 15 м дисперсия уширяет импульс на 3,6 нс. Отсюда можно вычислить, что вклад ФЭУ на МКП и ФЭУ-87 в результирующее уширение импульса составляет примерно 3,6 и 7,4 нс соответственно. ФЭУ-87 уширяет импульс в два раза больше, чем ФЭУ на МКП, поэтому не годится в качестве детектора излучения в оптоволоконном датчике потерь пучка. За счет более аккуратного измерения тока с анода ФЭУ на МКП можно уменьшить его временной вклад до 1,5 нс [7]

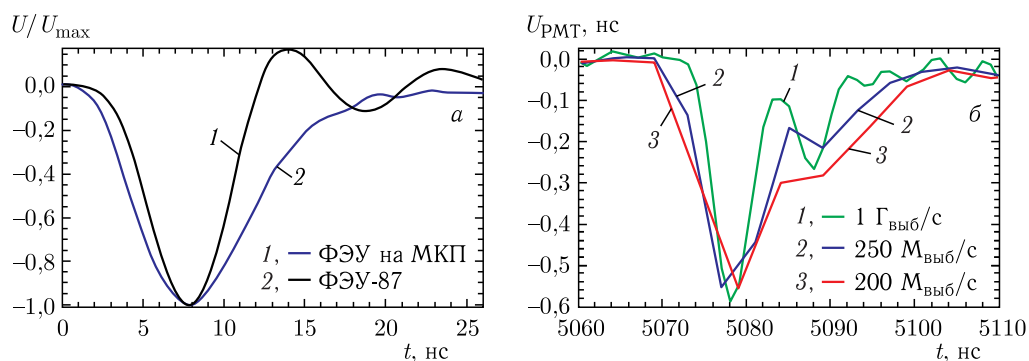


Рис. 2 (цветной в электронной версии). а) Сигналы с ФЭУ на МКП (черная кривая, 1) и ФЭУ-87 (синяя, 2) при длине оптоволоконна 15 м; б) типичный сигнал с датчика потерь пучка, оцифрованный АЦП с полосой пропускания и частотой дискретизации: 300 МГц и 1 Г_{выб}/с (зеленая кривая, 1), 80 МГц и 250 М_{выб}/с (синяя, 2), менее 80 МГц и 200 М_{выб}/с (красная, 3)

На рис. 2, б показаны сигналы, полученные с оптоволоконного датчика потерь пучка, оцифрованные тремя АЦП с разными полосами пропускания и частотами дискретизации. Исходя из теоремы Котельникова, если в случае непериодических аналоговых импульсов период дискретизации больше ширины импульса, то невозможно достоверно оцифровать полученный импульс. По рисунку видно, что при оцифровке типичных сигналов с оптоволоконного датчика потерь пучка с частотой дискретизации 250 М_{выб}/с и ниже теряется существенная часть информации. Поэтому для оптоволоконного датчика потерь пучка следует использовать АЦП с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не менее 500 М_{выб}/с.

3. ВЫБОР ОПТОВОЛОКНА

Для определения вклада оптоволоконна в результирующее уширение сигнала с датчика потерь были протестированы три типа оптоволоконна, обладающие разной величиной дисперсии, их параметры приведены в таблице. Оптоволоконна были закреплены на стенке вакуумной камеры в ожидаемом месте потери пучка на участке накопительного кольца на энергию 500 МэВ. Световой сигнал регистрировался при помощи ФЭУ на МКП.

Основные характеристики исследуемых оптоволокон

Параметр	«Broadcom», HFBR-RUS	Fiberware, G 400/560A	Fiberware, SM 400/125PI
Тип	Многомодовое	Многомодовое	Одномодовое
Профиль	Ступенчатый	Градиентный	Ступенчатый
Материал	Пластик	Кварц	Кварц
∅ сердцевины/оболочки, мкм	1000/—	400/560	2,2/125
NA	0,47	0,29	0,2

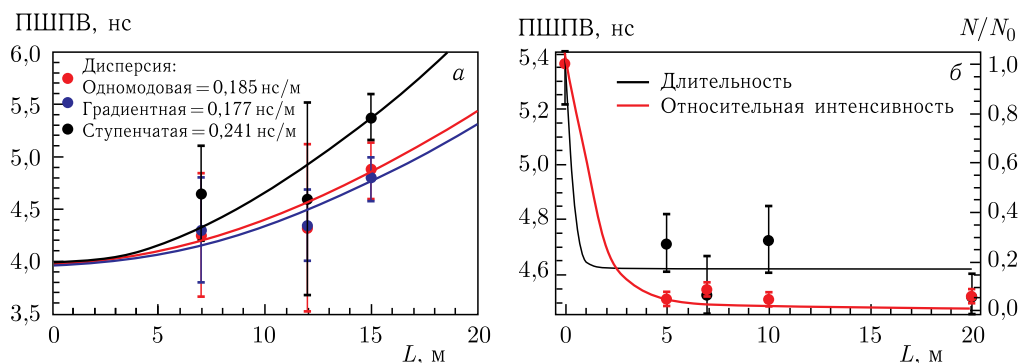


Рис. 3. а) Измеренные полуширины сигналов для оптоволокон с разными показателями дисперсии в зависимости от их длины; б) полуширина и интенсивность светового импульса на выходе из коллиматора в зависимости от его длины. Интенсивность импульса нормирована на значение, полученное в отсутствие коллиматора

На рис. 3, а представлены результаты измерений полуширины сигналов при разных длинах отрезка оптоволокон. Аппроксимация выполнена с учетом временного вклада ФЭУ, равного примерно 3,6 нс. В результате аппроксимации дисперсия света в оптоволоконках, представленных в таблице, с учетом экспериментальных ошибок составила: 0,241 нс/м — для пластикового с СППП, 0,177 нс/м — для кварцевого с ГППП, 0,185 нс/м — для одномодового. Экспериментальные данные для пластикового оптоволокон находятся в хорошем согласии с аналитическими расчетами. Два кварцевых значения получились завышенными, это связано с тем, что ввод излучения не осуществляется напрямую в сердцевину, поэтому часть излучения распространяется по оболочке, подвергаясь модовой дисперсии.

Отдельно была изучена зависимость дисперсии света от длины оптоволокон для кварцевого волокна с СППП «Thorlabs» (FG550UEC) с параметрами: диаметр сердцевины/оболочки — 550/600 мкм, $NA = 0,22$, максимальный коэффициент затухания — 0,01 дБ/м. Получено значение — 0,19 нс/м. Таким образом, с использованием отрезка длиной 15 м и съемом сигнала с торца, расположенного в направлении, противоположном направлению движения пучка, достигнуто пространственное разрешение датчика, равное 0,5 м.

Как можно видеть из полученных экспериментальных данных, любые типы кварцевых волокон обладают наименьшей дисперсией по сравнению с пластиковым. Основной недостаток одномодового оптоволокон — его малый диаметр, что делает его ненадежным и неудобным в эксплуатации. Самым оптимальным вариантом среди них с точки зрения стоимости является кварцевое многомодовое с СППП.

4. КОЛЛИМАТОР ИЗЛУЧЕНИЯ

Иным способом уменьшения длительности светового импульса является комбинация использования многомодового оптоволокон с СППП совместно с коллиматором, который вырезает часть излучения, распространяющуюся под большими углами относительно оси оптоволокон, тем самым уменьшая вклад модовой дисперсии света.

В простейшем случае коллиматор представляет собой полый цилиндр с неотражающими стенками, который устанавливается на очищенный от защитной оболочки конец оптоволоконного волокна. Диаметр отверстия коллиматора равен диаметру оболочки оптоволоконного волокна. Изменяя длину коллиматора, можно регулировать длительность и интенсивность выходного светового сигнала. Зависимость модовой дисперсии от длины коллиматора можно оценить как

$$\frac{t_{\text{мод}}}{L} \approx \frac{1}{cn} \frac{1}{1 + 4l^2/d^2},$$

где c — скорость света в вакууме; n — показатель преломления сердцевины оптоволоконного волокна; l — длина коллиматора; d — диаметр отверстия коллиматора.

Зависимость длительности и интенсивности выходного светового сигнала от длины коллиматора была экспериментально исследована на электронном пучке в конце линейного ускорителя на энергию 300 МэВ. Потеря пучка регистрировалась при помощи пластикового оптоволоконного волокна длиной 10 м и ФЭУ на МКП. Результаты эксперимента представлены на рис. 3, б. В результате аппроксимации экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что коллиматора длиной 2 мм достаточно, чтобы уменьшить вклад модовой дисперсии в результирующее уширение светового сигнала на выходе из оптоволоконного волокна длиной 10 м, что приводит к улучшению пространственного разрешения датчика на 20% и уменьшению интенсивности сигнала в 4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы способы улучшения пространственного разрешения датчика на электрон-позитронном инжекционном комплексе в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Приведены результаты тестирования различных типов оптоволокон, ФЭУ и АЦП. На основе требований, предъявляемых к датчику потерь пучка на инжекционном комплексе, сделан выбор датчика с оптимальными параметрами. Среди оптоволокон оптимальным вариантом с точки зрения пространственного разрешения, радиационной стойкости и стоимости является кварцевое оптоволоконное с СППП и диаметром сердцевины 550 мкм. В качестве фотодетектора необходимо использовать ФЭУ на МКП, который обладает минимальными временными характеристиками. Однако необходимо обеспечить более аккуратное измерение тока с анода, тогда временной вклад ФЭУ может быть уменьшен до 1,5 нс. При использовании кварцевого оптоволоконного волокна длиной 15 м, диаметром 550 мкм и ФЭУ на МКП достигнуто разрешение, равное 0,5 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maltseva Yu. et al.* // Proc. of XXVI Russ. Particle Accelerator Conf. "RuPAC2018", Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 39.
2. *Maltseva Yu. I. et al.* // Phys. Usp. 2015. V. 58, Iss. 5. P. 516–519.
3. *Maltseva Yu., Prisekin V. G.* // Proc. of XXVI Russ. Particle Accelerator Conf. "RuPAC2018", Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 486

4. *Senior J. M.* Optical Fiber Communications Principles and Practice. 3rd ed. Pearson Education Limited, 2009.
5. *O'Keeffe S., Lewis E.* // Intern. J. Smart Sensing and Intelligent Systems. 2009. V. 2, Iss. 3. P. 490–502.
6. *Gorodetzky P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 361. P. 161–179.
7. *Онучин А. П.* Экспериментальные методы ядерной физики. Новосибирск: НГТУ, 2009.