ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Мальцева Юлия Игоревна

Оптоволоконный датчик потерь пучка на основе черенковского излучения для Инжекционного комплекса ВЭПП-5

01.04.20 —
Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Беркаев Дмитрий Евгеньевич

Новосибирск — 2021

Оглавление

Стр.

Введение 5

Глава 1. Выбор системы диагностики потерь пучка для Инжекционного комплекса 11

1.1 Обзор типов датчиков потерь пучка 12

1.2 Предъявляемые требования к датчику потерь пучка на Инжекционном комплексе 16

1.3 Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка 18

1.4 Исторический обзор использования оптоволокна в качестве датчика потерь пучка 19

Глава 2. Анализ физических процессов, лежащих в основе работы датчика 21

2.1 Взаимодействие электронов с веществом 21

2.2 Излучение Вавилова-Черенкова 22

2.3 Прочие механизмы излучения равномерно движущихся зарядов . 24

2.4 Распространение света в оптоволокне 25

2.4.1 Структура оптических волокон, их разновидности и классификация 26

2.4.2 Лучевая теория распространения света 28

2.4.3 Затухание сигнала 30

2.4.4 Дисперсия сигнала 32

2.4.5 Межсимвольная интерференция сигналов 34

2.4.6 Радиационная стойкость оптоволокна 35

2.5 Особенности распространения излучения Вавилова-Черенкова в оптоволокне 38

2.5.1 Эффективность захвата излучения 38

2.5.2 Число фотонов на выходе из оптоволокна 41

2.5.3 Затухание излучения 43

2.6 Выводы к главе 2 44

Стр.

Глава 3. Численное моделирование работы датчика 46
3.1 Описание численной модели 47
3.2 Калибровка сигнала 49
3.3 Условие генерации излучения и применимости датчика 50
3.4 Влияние поля магнитов на ливень 51
3.5 Зависимость интенсивности ливня от параметров пучка 53
3.6 Распределение электронной компоненты ливня по поверхности вакуумной камеры 54
3.7 Продольное угловое распределение электронной компоненты ливня 56
3.8 Вероятность захвата черенковского излучения в оптоволокно и световыход 57
3.9 Длительность и профиль выходного светового импульса 60
3.10 Влияние дисперсии на длительность выходного светового импульса 61
3.11 Выводы к главе 3 62

Глава 4. Выбор оптимальных элементов датчика и способов регистрации потерь 64
4.1 Выбор оптимального оптоволокна 65
4.1.1 Измерение дисперсии в разных типах оптоволокна 65
4.1.2 Дисперсия и затухание сигнала в пластиковом оптоволокне 69
4.1.3 Измерение пропускной способности облученного пластикового оптоволокна 72
4.2 Выбор оптимального ФЭУ 75
4.2.1 ФЭУ на микроканальных пластинах 77
4.2.2 Кремниевый ФЭУ 80
4.3 Оцифровка сигнала 82
4.4 Способы регистрации потерь 83
4.4.1 Направление регистрации оптического сигнала 84
4.4.2 Комбинация из четырех датчиков 86
4.4.3 Вывод излучения посредством коллиматора 88
4.5 Оценка порога чувствительности датчика 91
4.6 Выводы к главе 4 93

Стр.

Глава 5. Опыт внедрения и использования датчика на Инжекционном комплексе 95
5.1 Описание экспериментальной установки 95
5.2 Алгоритм обработки сигнала 98
5.3 Программа контроля потерь пучка 101
5.4 Пример использования датчика в каналах выпуска 103
5.5 Пооборотные измерения в накопительном кольце 108
5.6 Выводы к главе 5 109

Заключение 111

Список сокращений и условных обозначений 113

Список литературы 114

Введение

Начиная с 2015 г. Инжекционный комплекс (ИК) ВЭПП-5 [1–3] введен в эксплуатацию и обеспечивает высокоэнергетическими пучками электронов и позитронов два действующих коллайдера ИЯФ СО РАН. Коллайдеры ВЭПП-2000 [4] и ВЭПП-4М [5] представляют собою уникальные установки для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками высоких энергий.

Получая и накапливая пучки с энергией до 500 МэВ и интенсивностью до 10^{11} частиц, ИК ВЭПП-5 доставляет пучки по транспортным каналам К-500 [6] до потребителей. Типичная величина потерь интенсивности пучка в процессе его транспортировки до потребителей может достигать 50 %, поэтому продолжается активная работа по улучшению производительности и стабильности ИК ВЭПП-5. Таким образом, от надежности функционирования комплекса напрямую зависит эффективность работы коллайдеров ИЯФ СО РАН.

Диагностика потерь пучка важна на всех этапах работы ускорителя заряженных частиц, начиная от его запуска и наладки и заканчивая оптимизацией потерь в режиме реального времени в процессе штатной работы установки. Для регистрации потерь используют датчики потерь пучка, которые размещают с внешней стороны вакуумной камеры в тех местах, где потери наиболее вероятны.

При пролете пучка заряженных частиц по ускорителю амплитуда колебаний некоторых частиц может стать столь значительной, что приведет к их потере на стенке вакуумной камеры. В случае пучков релятивистских электронов либо позитронов, попадая на металлическую стенку вакуумной камеры, они генерируют электромагнитный ливень. Датчик регистрирует частицы ливня и тем самым определяет место потери пучка и количество потерянных частиц.

Во время запуска и наладки ускорителя система диагностики потерь позволяет минимизировать потери пучка либо полностью от них избавиться. В штатном режиме работы ускорителя, помимо оптимизации типичных потерь пучка, она позволяет регистрировать потери по причине аварийного выхода из строя какой-либо системы ускорителя (магнитной, вакуумной, высокочастотной и т. д.). В таком случае, система диагностики потерь работает как дозиметрическая система для контроля уровня радиации в режиме онлайн и может

производить сброс пучка по аварийному сигналу в случае величин потерь, потенциально опасных для элементов ускорителя и рабочего персонала.

В отсутствие выделенной системы диагностики потерь пучка, проводка пучка по ускорителю на ИК ВЭПП-5 осуществлялась по иным системам диагностики пучка (люминофорным экранам, датчикам положения пучка, датчику тока, цилиндру Фарадея и пр.). При этом на первичную проводку пучка при помощи диагностических устройств, как правило, уходило много пучкового времени. Часть устройств, такие как люминофорные экраны, цилиндр Фарадея, разрушают пучок и при этом требуется существенное время на приведение их в рабочее положение. Настройка комплекса также усложнена тем, что система диагностики пучка состоит из локальных датчиков, которые имеются в небольшом количестве, таким образом, между двумя датчиками располагается большое количество магнитных элементов, которые могут требовать настройки. Датчики положения пучка при первичной настройке ускорителя, для которой характерна большая величина потерь, являются ненадежным инструментом, т. к. под воздействием большой дозы радиации могут выдавать ложную информацию.

Поэтому для минимизации потерь в процессе наладки и штатной работы ИК ВЭПП-5 возникла необходимость разработать и внедрить систему диагностики потерь пучка. В качестве такой системы было предложено использовать распределенные датчики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне. Такая система позволила ускорить настройку комплекса и повысит эффективность его работы на потребителей.

Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами ливня. Черенковское излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется при помощи фотодетектора. Время прихода светового импульса на фотодетектор дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц.

Последние два десятилетия метод диагностики потерь пучка заряженных частиц на основе черенковского излучения в оптоволокне широко используется на крупных электронных ускорителях по всему миру. Толчком для развития данной методики послужило развитие оптоволоконной техники и начало массового производства оптоволокон.

Впервые использование оптоволокна в качестве датчика потерь пучка с быстрым откликом было осуществлено на установке KEK-PS в 2000 г. [7; 8]. После чего, начиная с 2002 г., многие ускорительные центры начали внедрять данную методику в качестве штатной системы диагностики потерь пучка: DESY на DELTA, FLASH [9; 10], CERN – CLIC Test Facility 3 [11], RIKEN – Spring-8 X-FEL [12], SLAC – LCLS-II [13], FERMI – ELETTRA [14], ANSTO – ASP [15], Институт Кокрофта – ALICE [16] и другие. Однако для каждого конкретного ускорителя система диагностики потерь пучка разрабатывается с учетом требований к точности обнаружения потерь и зависит от параметров ускорителя.

Целью данной работы является разработка оптоволоконного датчика потерь пучка и ввод его в эксплуатацию на однопролетных и кольцевых участках ИК ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН. При этом разработка системы диагностики потерь пучка предполагает исчерпывающее исследование основных процессов, лежащих в основе принципа работы датчика, для дальнейшего использования аналогичных датчиков потерь пучка на других электронных установках. По результатам диссертационной работы планируется использовать аналогичную систему диагностики потерь пучка в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ», г. Новосибирск.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Исследовать физические процессы, лежащие в основе принципа работы оптоволоконного датчика потерь пучка, чтобы определить особенности распространения черенковского излучения в оптоволокне.
2. Провести моделирование взаимодействия пучка заряженных частиц со стенкой вакуумной камеры ускорителя и процесса генерации и распространения оптических фотонов в оптоволокне с точки зрения эффективности регистрации черенковского излучения при различных параметрах ускорителя.
3. Исследовать работу различных типов оптоволокна с точки зрения наименьшей дисперсии излучения, оптимального числа собираемых фотонов и допустимого срока эксплуатации в условиях радиации, чтобы выбрать наиболее подходящий тип и длину отрезка оптоволокна для достижения требуемого пространственного разрешения датчика потерь пучка.

4. Исследовать работу различных типов фотодетекторов и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с точки зрения их оптимальных временных характеристик, чтобы выбрать наиболее подходящие типы для регистрации световых сигналов, приходящих с оптоволокна, и для достижения требуемого пространственного разрешения датчика потерь пучка.
5. Создать программное обеспечение для обработки сигналов с оптоволоконного датчика потерь пучка, которое позволяет оператору ускорительного комплекса в режиме реального времени отслеживать распределение потерь пучка вдоль выбранного участка ускорителя.
6. Ввести систему диагностики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне в эксплуатацию с учетом предъявляемых требований к точности локализации потерь, а также с учетом параметров и особенностей ускорителя.

Научная новизна:

1. Впервые выполнено детальное исследование характеристик потерь пучка электронов в ускорителях заряженных частиц на энергию до 500 МэВ и способов их регистрации при помощи оптоволоконного датчика потерь на основе черенковского излучения. Были произведены измерения дисперсии и интенсивности сигналов датчика потерь для разных типов оптоволокон. Экспериментально показаны возможные способы улучшения пространственного разрешения датчика.
2. Впервые на основе численного моделирования выполнена калибровка оптоволоконного датчика потерь. Абсолютная величина количества теряемых частиц учитывает эффект затухания света в оптоволокне, и нормирована на коэффициент усиления фотодетектора и первоначальный ток пучка до его потерь.
3. Предложен способ, позволяющий с помощью комбинации из четырех датчиков, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, определить место потери пучка в поперечной плоскости относительно направления движения пучка.
4. Впервые выполнено исследование временных и амплитудных характеристик датчика потерь пучка на основе пластикового оптоволокна. Благодаря выбору оптимальных элементов датчика пространственное разрешение составило менее 1 м, а его пороговая чувствитель-

ность $\sim$ 1 пКл. Из эксперимента посчитана радиационная стойкость пластикового оптоволокна в условиях эксплуатации на электронных ускорителях.

5. Разработанная система диагностики потерь пучка была введена в эксплуатацию на ИК ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН. Данная система впервые сделала возможным в режиме реального времени контролировать распределение потерь пучка вдоль выбранного участка ускорителя и эффективнее настраивать прохождение пучков до потребителей.

Научная и практическая значимость:

Введение в эксплуатацию системы диагностики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне позволило реализовать контроль распределения потерь пучка в режиме реального времени в процессе наладки и штатной работы ИК ВЭПП-5. Начиная с 2019 года данная система диагностики потерь стабильно работает в числе штатной диагностики пучка на ИК ВЭПП-5.

Наработанные методы моделирования потерь пучка в ускорителях заряженных частиц и способов их регистрации при помощи оптоволоконного датчика потерь на основе черенковского излучения позволяют производить подбор компонентов датчика с оптимальными временными и амплитудными характеристиками.

Полученные в рамках диссертационной работы результаты исследования имеют большое значение для создания аналогичных систем диагностики потерь пучка на современных ускорительных комплексах, коллайдерах и источниках синхротронного излучения.

Оптоволоконная система диагностики потерь пучка будет использована в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» и на линейных участках действующего коллайдера ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проведено моделирование и расчеты параметров оптоволоконного датчика потерь пучка, в результате которых были сделаны выводы об условиях применимости датчика, о его пространственном разрешении и калибровке сигнала для электронных ускорителей.
2. Экспериментально продемонстрированы особенности работы различных типов оптоволокна, фотодетекторов и АЦП. В результате исследования был выбран наиболее подходящий тип и длина отрезка

оптоволокна, а также тип фотодетектора и АЦП с оптимальными временными характеристиками для достижения требуемого пространственного разрешения датчика для ИК ВЭПП-5.

3. Создано и успешно испытано в экспериментах необходимое для работы оптоволоконного датчика потерь пучка программное обеспечение. Оно интегрировано в общую систему автоматизации ИК ВЭПП-5, реализует все необходимые режимы работы прибора и обрабатывает сигнал, предоставляя информацию о местах потери пучка и о количестве потерянных частиц.
4. Впервые успешно испытан и введен в эксплуатацию оптоволоконный датчик потерь пучка с оптимизированными параметрам в составе каналов выпуска электронов и позитронов, а также циклического накопителя на ИК ВЭПП-5.

Апробация работы. Основные результаты работы по теме диссертации были представлены на XXIV Всероссийской Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (RUPAC-2014, Обнинск, Россия), на научной сессии Отделения физических наук РАН «К 110-летию со дня рождения П.А. Черенкова» (Москва, Россия, 2014), на 6-й Международной Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (IPAC-2015, Ричмонд, США), на XXVI Всероссийской Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (RUPAC-2018, Протвино, Россия), на XIII Международном научном семинаре памяти профессора В.П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» (Алушта, Россия, 2019), на 8-й Международной Конференции по Диагностике Пучков Заряженных Частиц (IBIC-2019, Мальмё, Швеция).

Личный вклад. Все основные результаты по теме исследования получены автором лично. Автор принимал активное участие в постановке задачи, участвовал в проведении экспериментов, проводил обработку и анализ экспериментальных данных, проводил расчеты и численное моделирование, написал программное обеспечение, а также участвовал в подготовке публикаций. Вклад автора явился определяющим для реализации оптоволоконного датчика потерь пучка на ИК ВЭПП-5.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 статей, среди них 4 статьи в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК [17–20], 2 статьи в трудах международных конференций [21;22], 2 статьи в трудах всероссийских конференций [23; 24].

Глава 1. Выбор системы диагностики потерь пучка для Инжекционного комплекса

Диагностика потерь пучка важна на всех этапах работы ускорителя заряженных частиц, начиная от его запуска и наладки и заканчивая оптимизацией потерь в режиме реального времени в процессе штатной работы установки. В случае, если ускорительный комплекс, такой как синхротрон или накопитель, обладает высокой накопленной энергией в пучке ($\sim$ 100 Дж и более), то диагностика потерь пучка служит необходимым элементом системы радиационной защиты ускорителя: производится сброс пучка по аварийному сигналу в случае величин потерь, потенциально опасных для элементов ускорителя и рабочего персонала [25].

Для регистрации потерь используют датчики потерь пучка, которые размещают снаружи вакуумной камеры вдоль ускорителя в тех местах, где потери наиболее вероятны. В случае, если теряются релятивистские электроны либо позитроны, то, попадая на металлическую стенку вакуумной камеры, они генерируют электромагнитный ливень (ЭЛ). Задача датчика потерь пучка заключается в регистрации продуктов взаимодействия частиц ливня с рабочей средой детектора. Сигнал с датчика пропорционален числу потерянных заряженных частиц.

Для того, чтобы определиться с местом размещения датчика потерь пучка на ускорителе, необходимо учитывать, что потери пучка делятся на два типа: регулярные и нерегулярные. Регулярные потери, как правило, неизбежны и определяют время жизни пучка. Такие потери возникают, например, в местах, где установлены коллиматоры, септум-магниты, или за счет эффекта Тушека, рассеяния на остаточном газе, неустойчивостей, взаимодействий между пучками и т. д. Обычно о существовании таких потерь все известно и они не требуют контроля. Нерегулярные потери возникают в процессе запуска и наладки ускорителя или в результате неисправности одной из его систем (магнитной, вакуумной, высокочастотной и т.д.). Штатная система диагностики потерь пучка позволяет минимизировать такие потери либо полностью от них избавиться.

1.1 Обзор типов датчиков потерь пучка

В настоящее время на электронных ускорителях широко используются следующие типы датчиков потерь пучка: ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики, черенковские счетчики и PIN-диоды. Поскольку продольный размер ЭЛ, который служит источником регистрируемого сигнала, составляет всего несколько сантиметров, необходимо заранее исследовать предполагаемые места потерь. Как правило, для получения полного распределения потерь на ускорителе требуется большое количество таких датчиков. Альтернативой локальным датчикам являются распределенные датчики потерь пучка такие, как ионизационная трубка Панофского, сцинтилляционное или оптическое волокно в паре с фотодетектором. Детальный обзор на эти и другие датчики потерь пучка можно найти в литературе [26; 27].

Для каждого конкретного ускорителя система диагностики потерь пучка подбирается с учетом требований к точности обнаружения потерь и зависит от параметров ускорителя. Целью данной работы является создание датчика потерь пучка, который может использоваться как в однопролетных каналах транспортировки пучка, так и в кольцевом ускорителе периметром несколько десятков метров. Для решения данной задачи подходит распределенный датчик потерь пучка.

Распределенные датчики покрывают большие участки ускорителя, позволяя получить распределение потерь на выбранном промежутке установки. Например для ИК ВЭПП-5, один отрезок распределенного датчика длиною 10 м способен заменить около 10 локальных датчиков, что существенно позволяет сэкономить ресурсы и пространство возле вакуумной камеры ускорителя. Также это упрощает обслуживание системы диагностики потерь. Недостатками распределенных датчиков по сравнению с локальными являются ограниченная точность локализации места потери пучка и, в случае с оптическими датчиками, трудность калибровки абсолютной величины потерь вследствие затухания и дисперсии светового импульса в оптоволокне.

При выборе распределенного датчика потерь пучка необходимо учитывать следующие критерии: быстродействие, чувствительность, пространственное разрешение, радиационная стойкость, стоимость, габариты, а также чувствительность к магнитному полю и наличие шумов, связанных с гамма- и

синхротронным излучением. В таблице 1 приводятся основные параметры трех типов распределенных датчиков потерь пучка.

Таблица 1 — Основные критерии выбора распределенного датчика потерь пучка

Критерий	Ионизационная трубка Панофского	Сцинтилляционный датчик	Черенковский датчик
Быстродействие эффекта, нс	250	$\sim$ 1-10	< 0.1
Пространственное разрешение, м	$\geqslant 0.25$	$\geqslant 1$	$\geqslant 0.5$
Чувствительность, нКл/рад/м	10^2	10^7	10^5
Характерная длина отрезка, м	~ 100	~ 1	~ 10
Сечение, мм	20	$\sim$ 0.1-1	$\sim$ 0.1-1
Радиационная стойкость, Гр	10^6	10^4	$10^3 - 10^5$
Чувствительность к магнитному полю	да	нет	нет
Наличие шумов	нет	γ-излучение, СИ	нет

Ионизационная трубка Панофского представляет собой коаксиальный кабель, заполненный газом, на который подается высокое напряжение от 100 В до нескольких кВ. Схема трубки представлена на рисунке 1.1. Заряженная частица, пролетая сквозь рабочий объем трубки, ионизирует газ. За счет приложенного напряжения электроны атомов газа дрейфуют к центральному проводнику (аноду), с которого измеряется ток. Например, время дрейфа электронов в кабеле сечением 2 см, заполненного аргоном, марки Andrew HELIAX HJ4.5-50, составляет 0.25 мкс и делает ионизационные трубки непригодными для диагностики потерь пучка в кольцевых ускорителях периметром несколько десятков метров.

Место потери определяется по разности времен прихода сигналов, регистрируемых с двух торцов кабеля (либо при регистрации с одного торца прямого и отраженного сигналов). За счет малой дисперсии в кабеле пространственное разрешение ионизационной трубки составляет около 20 см на длине сотни метров. Отсутствие затухания и малое расплывание сигнала обеспечивают простоту калибровки трубок.

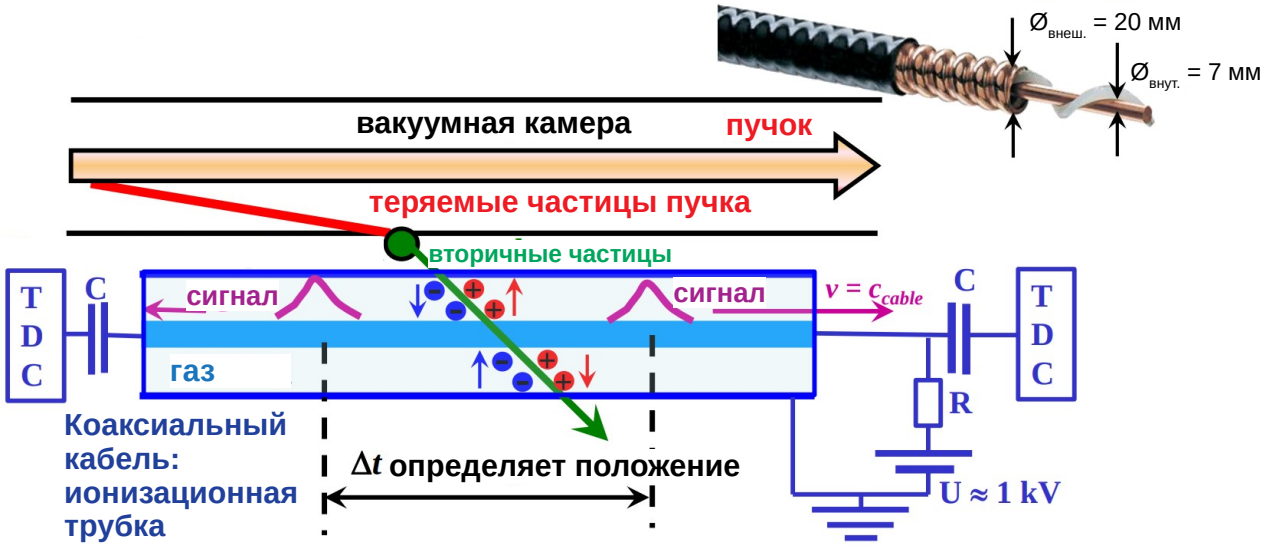


Рисунок 1.1 — Схема ионизационной трубки Панофского и изображение трубки марки Andrew HELIAX HJ4.5-50

Как правило, ионизационные камеры используют в качестве элементов системы радиационной защиты на адронных ускорителях (LHC, SNS, RHIC и пр.), но есть и случаи применения на электронных машинах, например на SLC [28]. Они обладают высокой радиационной стойкостью до 10^6 Гр, просты в использовании и имеют низкую стоимость, однако чувствительны к магнитному полю, поэтому их не размещают внутри магнитных элементов.

Два распределенных оптических датчика: сцинтилляционный и черенковский, схожи внешне и состоят из оптического волокна и фотодетектора, но различаются по типу источника регистрируемого сигнала. За счет эффекта полного внутреннего отражения излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется при помощи фотодетектора. Время распространения светового импульса дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц.

В первом случае, используется оптоволокно, изготовленное из сцинтиллирующего материала. При пролете заряженной частицы сквозь такое волокно

происходит возбуждение атомов вещества с их последующим переходом в невозбужденное состояние посредством испускания фотонов люминесценции.

Во втором случае, используется стандартное телекоммуникационное оптоволокно, выполненное из пластика либо кварца. В таких волокнах не содержатся флюоресцентные легирующие добавки, поэтому уровень сцинтилляции пренебрежимо мал по сравнению с излучением Вавилова-Черенкова(ИВЧ).

ИВЧ возникает при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью большей, чем фазовая скорость света в этой среде, и является излучением атомов среды, расположенных вдоль траектории движения частицы и поляризованных ее электрическим полем. Поскольку ИВЧ генерируется только от заряженных частиц, у черенковского датчика отсутствуют шумы, связанные с гамма- и синхротронным излучением в отличие от сцинтилляционного датчика.

В отличие от ионизационной трубки оптические датчики компактны (диаметр $\sim$ 0.1–1 мм) и не чувствительны к магнитному полю, что позволяет прокладывать их внутри магнитных элементов. Они обладают сравнительно низкой радиационной стойкостью до 10^3–10^5 Гр, которая существенно зависит от материала оптоволокна. Чувствительность оптических датчиков пропорциональна коэффициенту усиления фотодетектора. Если выбрать в качестве фотодетектора – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с коэффициентом усиления на уровне 10^6, то их чувствительность на три-пять порядков больше чувствительности ионизационной трубки.

Сравним два оптических датчика между собой. По природе излучения интенсивность сцинтилляционного излучения на один-два порядка больше, чем интенсивность черенковского. Но при этом время высвечивания органического сцинтиллятора составляет $\tau \sim 10^{-9}$–10^{-8}с [29], а длительность испускания света в случае черенковского излучения значительно меньше 10^{-10}с [30]. Время высвечивания сцинтиллятора сравнимо с временем сбора света, что существенно сказывается на временном разрешении датчика, в то время как в случае черенковского излучения временем высвечивания можно пренебречь.

Основным недостатком использования сцинтилляционных волокон является их высокий коэффициент затухания, который составляет примерно 2 дБ/м, что ограничивает длину отрезков волокна величиной 10 м. В тоже время у обычного оптоволокна коэффициент затухания составляет 0.02–0.2 дБ/м. Поэтому вследствие сильного затухания сцинтилляционные оптоволокна часто

используют совместно со стандартными оптоволокнами, когда свет «собирают» в небольшом отрезке сцинтиллятора, а затем выводят его по оптоволокну [31]. В таком случае, как и для локального датчика, необходимо знать предполагаемое место потери пучка и за счет осуществления оптического контакта оптоволокна со сцинтиллятором происходит усложнение устройства.

1.2 Предъявляемые требования к датчику потерь пучка на Инжекционном комплексе

При выборе системы диагностики потерь пучка для любого ускорителя необходимо руководствоваться конкретными требованиями, предъявляемыми к качеству диагностики.

ИК ВЭПП-5 является электрон-позитронным ускорителем на проектную энергию 510 МэВ с величиной накопленной энергии в пучке, не превышающей 10 Дж, поэтому для него проблема радиационной защиты не стоит так остро, как например, на адронных ускорителях, где накопленная энергия в пучке достигает 300 МДж. При этом типичная величина потерь пучка в процессе его транспортировки до потребителей может достигать 50 %. По этой причине система диагностики потерь пучка на ИК ВЭПП-5 необходима для наладки режимов и контроля потерь пучка в процессе штатной работы ускорителя, чтобы обеспечить максимальную производительность комплекса.

ИК ВЭПП-5 состоит из двух последовательных линейных ускорителей на энергию 300 и 500 МэВ, кольца накопителя-охладителя и каналов впуска-выпуска отдельно для каждого сорта частиц с последующей транспортировкой пучков до потребителей. Схема комплекса показана на рисунке 1.2. В сезоне 2018/2019 комплекс работал на энергию 400 МэВ с частотой инжекции электронов – 2 Гц, позитронов – 5 Гц. Частота выпуска из накопителя достигала 1 Гц. Скорость накопления электронов составляла – $1.5 \cdot 10^9$ e-/выстрел, а позитронов – $2.5 \cdot 10^8$ e+/выстрел. Максимальный выпуск накопленных частиц достигает $1.2 \cdot 10^{11}$. В накопителе с периметром 27.4 м оптимальный ток пучка составляет 20–40 мА, а длительность пучка в многосгустковом режиме – менее 1 нс, что соответствует размеру в 30 см.

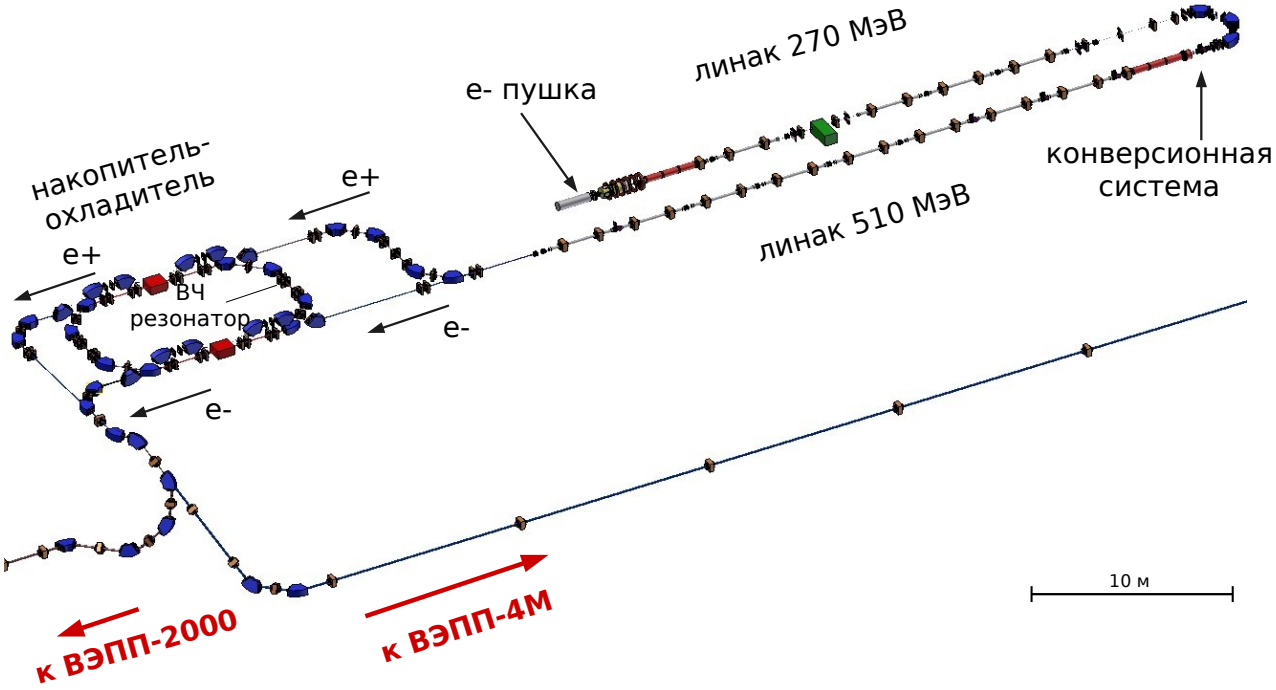


Рисунок 1.2 — Схема ИК ВЭПП-5 с каналами транспортировки до потребителей

Основные требования, которые предъявляются к датчику потерь пучка на ИК ВЭПП-5:

- Пространственное разрешение не хуже 1 м, которое определяется, исходя из среднего расстояния между магнитными элементами ускорителя.
- Способность регистрировать потери на уровне 1 % от заряда пучка ($\sim$ 0.1 нКл).
- Радиационная стойкость, позволяющая использование датчика при дозах до 10^3 Гр.
- Быстродействие и возможность пооборотных измерений.
- Оптимальная стоимость компонентов.

При условии подбора компонентов датчика с оптимальными временными и амплитудными характеристиками, всем этим требованиям соответствует распределенный датчик потерь пучка на основе ИВЧ в оптоволокне. Поэтому данный датчик был выбран в качестве штатной системы диагностики ИК ВЭПП-5. В дальнейшем в тексте под оптоволоконным датчиком потерь пучка (ОДП) будет подразумеваться датчик на основе ИВЧ.

1.3 Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка

Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами ЭЛ, который образуется при попадании пучка на стенку вакуумной камеры ускорителя. Черенковское излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется при помощи фотодетектора. Сигнал с фотодетектора оцифровывается при помощи АЦП. Время прихода светового импульса дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц. Световой импульс можно регистрировать с обоих торцов оптоволокна. Схема датчика изображена на рисунке 1.3.

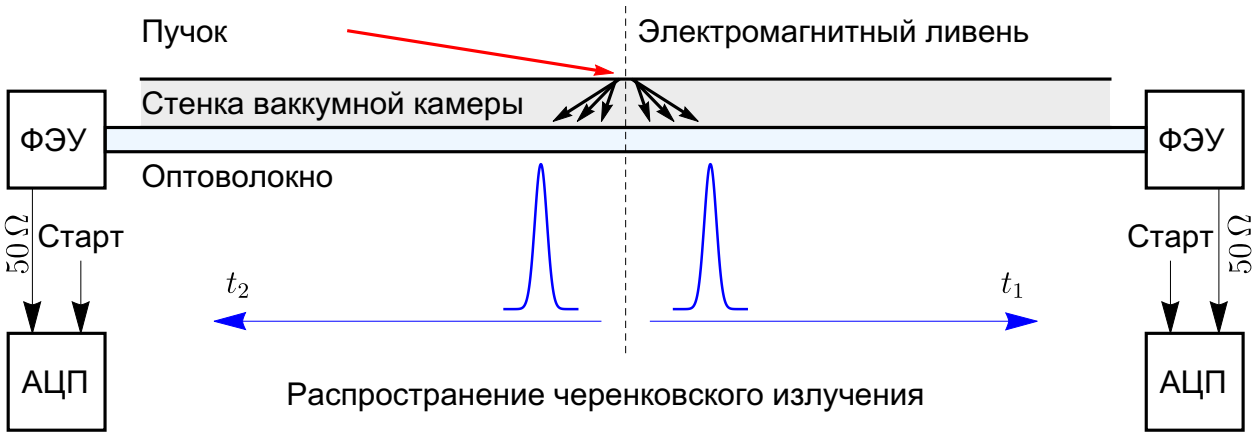


Рисунок 1.3 — Схема оптоволоконного датчика потерь пучка. Запуск АЦП осуществляется внешним синхроимпульсом, привязанным к моменту инжекции/выпуска пучка

Как показано в данной работе, пространственное разрешение датчика определяется дисперсией света в оптоволокне, временными характеристиками фотодетектора и АЦП, и зависит от того, с какого торца оптоволокна 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 способность при регистрации сигнала, распространяющегося по направлению движения пучка.

1.4 Исторический обзор использования оптоволокна в качестве датчика потерь пучка

До 1990-х годов оптоволокно в основном использовали как вспомогательный элемент для передачи излучения в сцинтилляционных детекторах для спектрометрии в физике высоких энергий. В 1995 г. были представлены первые результаты использования оптоволокна в качестве основного элемента прототипа калориметра для детектора LHC [32–34].

В 1983 г. впервые было упомянуто [35], что оптические волокна могут быть использованы в качестве дозиметрических датчиков для контроля уровня радиации в режиме реального времени в тех местах, где располагается чувствительная к радиации аппаратура или компоненты ускорителя. В 2000 г. такая методик была введена в эксплуатацию на TESLA Test Facility 1 [36] и основана на измерении дозы радиации путем пропускания лазерного излучения по облучаемому оптоволокну и измерения уровня затухания излучения. Используя при этом оптический рефлектометр, возможно вычислить местоположение потери пучка, которая наводит радиацию, однако, такой способ не является быстродействующим и имеет пространственное разрешение на порядок хуже, чем быстрая оптоволоконная система диагностики потерь пучка.

Впервые использование оптоволокна в качестве датчика потерь пучка с быстрым откликом было осуществлено на установке KEK-PS в 2000 г. [7; 8]. В 2002 г. оптоволоконная система потерь пучка была внедрена на источнике синхротронного излучения DELTA [9].

В дальнейшем данная методика начала широко применяться в качестве штатной системы диагностики потерь пучка на многих современных источниках синхротронного излучения: лазеры на свободных электронах – FLASH [10], ELETTRA [14], Spring-8 X-FEL [12], LCLS-II [13] и другие; синхротроны – SLS-2 [31], ASP [15], MAX IV и другие. Кроме того, оптоволоконная система потерь пучка используется на электронной установке CLIC Test Facility 3 в CERN [11], на ускорителе-рекуператоре электронной научно-исследовательской установки ALICE в Институте Кокрофта [16]. На всех этих установках диагностика предназначается для локализации потерь высокоэнергетических электронных пучков. В работе [37] приводится пример использования оптово-

локонного датчика потерь для пучка электронов с низкой энергией (5 МэВ) на прототипе источника обратного комптоновского рассеяния ThomX.

На вышеперечисленных установках, как правило, используют кварцевые оптоволокна диаметром сердцевины 200–600 мкм и длиною несколько десятков метров. В качестве фотодетекторов используют либо ФЭУ на микроканальных пластинах (МКП), либо кремниевые ФЭУ. Пространственное разрешение датчика составило около 0.5–1 м в зависимости от параметров его компонентов. Для кольцевых источников синхротронного излучения данные значения были получены в односгустковом режиме, в многосгустковом режиме пространственное разрешение определяется в основном длительностью пучка. Например, на австралийском синхротроне ASP при полной загрузке пучка длительностью 150 нс пространственное разрешение датчика составило около 10 м при длине оптоволокна 50 м.

На установке ALICE датчик имеет отличительную от всех конструкцию, связанную с требованием к пространственному разрешению датчика, равному 10 см. Для достижения данного разрешения потери пучка регистрировались одновременно двумя отрезками оптоволокон, параллельными друг другу. Причем одно из волокон имело петли диаметром 6 или 8 мм через каждые 15 см для увеличения затухания передаваемого по оптоволокну светового сигнала. Сигналы регистрировались с двух оптоволокон одновременно и место потери пучка определялось по отношению амплитуд двух сигналов.

Глава 2. Анализ физических процессов, лежащих в основе работы датчика

В этой главе содержится описание физических процессов, на которых основан принцип работы ОДП и которые влияют на его способность определять место потери пучка в ускорителе и количество потерянных частиц. К таким процессам относятся взаимодействие теряемых электронов пучка с веществом стенки вакуумной камеры, генерируемое в оптоволокне ИВЧ и механизм передачи излучения по оптоволокну.

В главе подробно описывается устройство оптоволокна, рассматриваются существующие типы оптоволокон и физические процессы, влияющие на качество передачи светового импульса. Для того, чтобы исследовать влияние параметров оптоволокна на распространение излучения и на световыход, используется лучевая теория распространения света. Особое внимание уделено передаче ИВЧ по оптоволокну с учетом особенностей его генерации и спектра излучения. Механизм распространения ИВЧ рассматривается на примере многомодового оптоволокна со ступенчатым профилем показателя преломления.

2.1 Взаимодействие электронов с веществом

Источником ИВЧ в оптоволокне являются релятивистские вторичные электроны и позитроны, вылетающие с внешней стенки вакуумной камеры, – продукт взаимодействия теряемого пучка в ускорителе с веществом стенки вакуумной камеры и окружающих элементов ускорителя.

Потери энергии электрона, при прохождении через вещество, являются суммой ионизационных и радиационных потерь. Энергия электрона, при которой радиационные потери становятся равными ионизационным, называется критической энергией, ее можно оценить по формуле [38]:

$$E_{кр} = \frac{800}{Z_0}[MeV],$$

где Z_0 – средний заряд ядер атомов среды.

При попадании электрона на металлическую поверхность, например, железа, критическая энергия составляет примерно 30 МэВ. Начиная с 30 МэВ, преобладают потери энергии на тормозное излучение, которое с ростом энергии (>100 МэВ) переходит в ЭЛ, продолжающийся до тех пор, пока энергия электронов не станет меньше критической. Вследствие тормозного излучения, энергия электрона, при его прохождении через слой вещества толщиной t, уменьшается экспоненциально по следующей формуле:

$$E = E_0 e^{-\frac{t}{X_0}},$$

где E_0 – начальная энергия электрона, t – толщина вещества в г/см^2, равная $t = x\rho$, x – толщина в см, ρ – плотность в г/см^3, X_0 – радиационная единица вещества в г/см^2.

Поскольку в данной работе электронами, взаимодействующими с веществом, являются частицы пучка ИК ВЭПП-5 с энергией 500 МэВ, много большей $E_{кр}$, в веществе образуется ЭЛ, а ионизационными потерями можно пренебречь.

Для расчета ЭЛ применяют программы на основе метода Монте-Карло, поскольку аналитически эту задачу решить невозможно. Существует ряд программ, которые позволяют моделировать прохождение частиц через вещество, – Geant4 [39], FLUKA [40], EGS [41] и другие.

2.2 Излучение Вавилова-Черенкова

Любой датчик потерь пучка регистрирует теряемые заряженные частицы посредством их взаимодействия с веществом детектора. Взаимодействие релятивистских заряженных частиц с диэлектрической средой оптоволокна приводит к генерации ИВЧ.

ИВЧ возникает при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью большей, чем фазовая скорость света в этой среде [42]:

$$v > \frac{c}{n(\lambda)},$$

где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды, λ – длина волны излучения.

Согласно условию генерации ИВЧ, кинетическая энергия заряженных частиц должна быть больше, чем:

$$E_к > E_0 \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right), \tag{2.1}$$

где E_0 – энергия покоя частицы, $E_к$ – кинетическая энергия.

Из формулы (2.1) следует, что в кварце ($n \approx 1.5$) кинетическая энергия электрона, участвующего в генерации черенковского излучения, должна быть больше 175 кэВ.

Волновой фронт ИВЧ представляет поверхность конуса, угол раствора которого φ определяется скоростью частицы и свойствами среды, пренебрегая дисперсией показателя преломления, косинус угла можно записать как:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\beta n} = \frac{E_0 + E_к}{n\sqrt{{E_к}^2 + 2E_0E_к}}, \tag{2.2}$$

где β – относительная скорость частицы, $\beta = v/c$.

Из формулы (2.2) можно выразить зависимость угла раствора конуса ИВЧ от кинетической энергии заряженной частицы. Пример для электрона, пролетающего сквозь кварц, представлен на рисунке 2.1. На рисунке видно, что при кинетических энергиях больше 2 МэВ, угол раствора конуса φ выходит на плато и составляет примерно 48°.

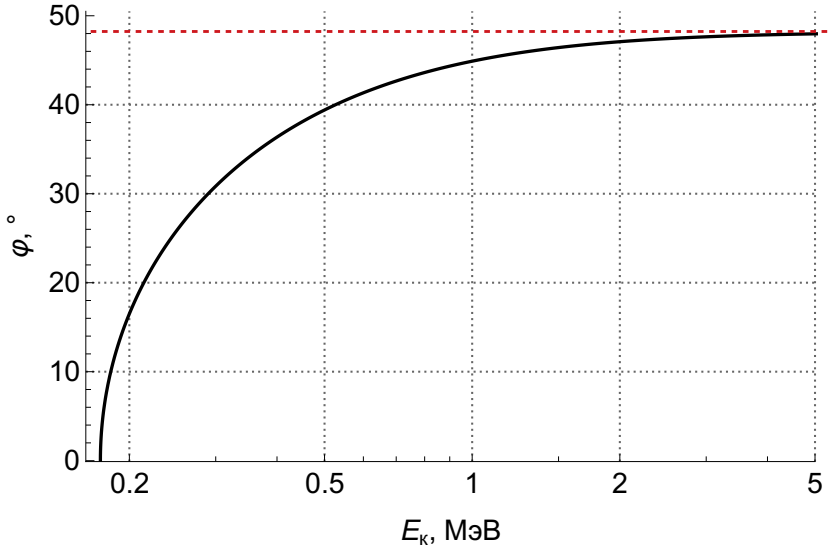


Рисунок 2.1 — Зависимость угла раствора конуса ИВЧ от кинетической энергии электрона, пролетающего сквозь кварц

Другим важным показателем ИВЧ является его интенсивность. Число фотонов на единицу длины, пройденной заряженной частицей в прозрачной среде, и на единицу длины волны излучения определяется по формуле Франка-Тамма [43]:

$$\frac{d^2 N_\phi}{dl d\lambda} = 2\pi\alpha z^2 \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \varphi, \tag{2.3}$$

где N_ϕ – число фотонов, l – расстояние, пройденное заряженной частицей в среде, $\alpha \approx 1/137$ – постоянная тонкой структуры, z – заряд частицы.

Из формулы (2.3) следует, что интенсивность излучения падает с увеличением длины волны, что объясняет, почему наблюдаемое черенковское излучение сине-фиолетового цвета, но в действительности большая часть фотонов находится в невидимом для глаза ультрафиолетовом спектре.

Рассмотрим пример генерации ИВЧ в случае релятивистского электрона, пролетаеющего сквозь кварц. Используя формулы (2.2) и (2.3), число фотонов ИВЧ в диапазоне длин волн от ближнего ультрафиолета (УФ) до верхней границы видимого света (300 нм $\leqslant \lambda \leqslant$ 700 нм) составляет примерно 50 фотонов на 1 мм.

2.3 Прочие механизмы излучения равномерно движущихся зарядов

При пролете равномерно движущейся заряженной частицы сквозь прозрачную среду помимо ИВЧ может возникать сцинтилляционное излучение и переходное излучение на границе раздела сред. Эффект сцинтилляции может проявиться в эффекте Вавилова-Черенкова, но только в том случае, если сцинтилляция обладает узким линейчатым спектром. В плотной среде такой, как кварц или оргстекло, такое излучение вряд ли возможно, и если оно возможно, то не имеет такого направленного излучения, характерного для ИВЧ [30].

Как правило, в современных кварцевых и пластиковых оптоволокнах не содержится флюоресцентных легирующих добавок, поэтому уровень сцинтилляции пренебрежимо мал по сравнению с ИВЧ.

Интенсивность переходного излучения, которое возникает при пролете заряженной частицы на границе раздела двух сред, примерно на три-четыре порядка меньше интенсивности ИВЧ в случае пролета сквозь оптоволокно толщиной 0.1–1 мм и составляет менее 10^{-2} фотонов от одной заряженной частицы [42; 44].

Следовательно, при рассмотрении генерации излучения в оптоволокне сцинтилляцией и переходным излучением можно пренебречь.

2.4 Распространение света в оптоволокне

Одним из элементов ОДП является оптическое волокно, именно в нем при пролете заряженных частиц возникает ИВЧ и распространяется на большие расстояния ($\sim$ 10–100 м). В данном разделе рассматривается устройство оптоволокна, проводится анализ различных типов волокон, описываются фундаментальные явления, происходящие в световодах, и как они влияют на качество передачи светового импульса. Для полноты изложения физические закономерности, определяющие процесс передачи информации по оптоволокну, рассматриваются как с точки зрения лучевой теории распространения световых волн, так и в рамках теории электромагнитных волн. Однако при дальнейшем анализе мы будем рассматривать процесс передачи излучения по оптоволокну в рамках лучевой теории, основанной на законах геометрической оптики, что заметно упрощает математический анализ, при этом обеспечивает хорошую точность для вычислений в случае простейших световодов большого диаметра.

Основное применение оптического волокна – это использование его в качестве среды передачи на волоконно-оптических телекоммуникационных сетях различных уровней: от межконтинентальных магистралей до домашних компьютерных сетей. Кроме того, оптическое волокно может быть использовано как датчик для измерения напряжения, температуры, давления и других параметров. В сравнении с другими типами датчиков, волоконно-оптические датчики обладают следующими преимуществами:

– Состоят из диэлектрических материалов, что позволяет использовать их, например, в местах с высоким электрическим напряжением.

– Не подвержены электромагнитным помехам и радиации и сами по себе не электризуют другие устройства.
– Их можно безопасно использовать во взрывоопасной среде, потому, что нет риска возникновения электрической искры, даже в случае поломки.
– Имеют очень широкий диапазон рабочих температур, гораздо больший, чем у электронных устройств.

2.4.1 Структура оптических волокон, их разновидности и классификация

В данный момент существует большое разнообразие различных оптоволокон, в том числе предназначенных под различные узкоспециализированные задачи. В данном разделе будут рассмотрены только те виды, которые подходят для генерации и передачи ИВЧ для задачи диагностики потерь пучка заряженных частиц.

Оптическое волокно, как правило, имеет круглое сечение и состоит из трех частей: сердцевины, отражающей оболочки и специального внешнего покрытия, которое защищает сердцевину и оболочку от влаги и внешних воздействий. Иногда внешнее покрытие состоит из двух слоев для уменьшения потерь на микроизгибы. Обычно сердцевина и оболочка изготавливаются либо из полимерных материалов (таких как оргстекло), либо особого кварцевого стекла, полученного путем плавления синтетического диоксида кремния. При этом материал оболочки содержит легирующие добавки (Ge, F, P и др.), которые слегка уменьшают ее показатель преломления, тем самым позволяя, лучам света распространяться по сердцевине, многократно отражаясь от оболочки. Для дальнего инфракрасного диапазона могут использоваться другие стекла, такие как фторцирконат, фторалюминат и халькогенидные стекла. Внешнее покрытие изготавливают из полимерных материалов (полиимид, акрилат, силикон и др.).

Помимо деления оптических волокон по типу материалов сердцевины и оболочки на кварцевые и пластиковые, фундаментальным является деление оптических волокон по количеству распространяющихся в них мод на многомодовые и одномодовые. В оптике модами называются лучи света, введенные

в волокно под разными углами. Многомодовое оптическое волокно обладает относительно большим диаметром сердцевины $\sim$ 100–1000 мкм, что позволяет распространяться в нем одновременно большому числу мод. Уменьшая диаметр сердцевины и разность показателей преломления сердцевины и оболочки, можно добиться распространения по волокну лишь одной моды электромагнитного излучения. Такое оптоволокно называется одномодовым, диаметр сердцевины одномодовых волокон составляет от 7 до 10 мкм.

Многомодовые волокна подразделяются на волокна со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления. В ступенчатых волокнах показатель преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачком. В градиентных волокнах показатель преломления сердцевины плавно уменьшается от центра к краям. Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим, треугольным и т. д. [45] На рисунке 2.2 представлены различные варианты профилей показателя преломления и траектории, по которым распространяется излучение.

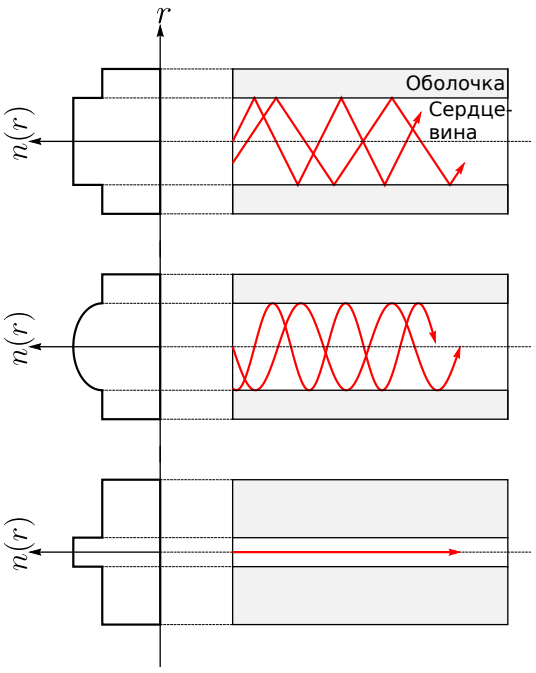


Рисунок 2.2 — Профиль показателя преломления и траектории, по которым распространяется излучение в многомодовом оптоволокне со ступенчатым профилем (сверху), в многомодовом – с градиентным профилем (посредине), в одномодовом оптоволокне (снизу)

2.4.2 Лучевая теория распространения света

Явление распространения света в оптоволокне описывается законами электродинамики. Согласно волновой теории, свет представляет собою электромагнитную волну, а оптоволокно как прозрачная диэлектрическая среда позволяет передавать электромагнитную энергию в требуемом направлении. В случае, когда длина волны излучения много меньше характерных поперечных размеров пучков света, волновой природой излучения можно пренебречь и описывать распространение света в оптоволокне в рамках лучевой теории света, что заметно упрощает математический анализ процессов, происходящих при распространении света в оптоволокне. Таким образом, многомодовые оптоволокна, у которых диаметр сердцевины много больше длины волны излучения, можно рассчитывать упрощенно с помощью лучевой теории. Одномодовые волокна, у которых диаметр сердцевины соизмерим с длиной волны, требуют рассмотрения в рамках волновой теории.

Опираясь на законы геометрической оптики, пучок света рассматривается как световой луч, вдоль которого переносится световая энергия. Световые лучи являются решением волновых уравнений в эйкональном приближении. Лучи изображают направленными по нормали к волновой поверхности, в оптически однородных средах лучи прямолинейны. Существует два типа лучей: меридиональные, которые пересекают ось оптоволокна, и косые, которые эту ось не пересекают, а двигаются по спиралевидной траектории, как изображено на рисунке 2.3.

Далее для наглядности рассмотрим принцип распространения излучения в многомодовом оптоволокне со ступенчатым профилем показателя преломления. В соответствии с законами геометрической оптики передача излучения по оптоволокну со ступенчатым профилем показателя преломления осуществляется за счет явления полного внутреннего отражения света на границе сердцевины и оболочки оптоволокна. Эффект полного внутреннего отражения на границе сердцевина-оболочка возникает при определенном угле распространения света внутри оптоволокна α:

$$\alpha \leqslant \alpha_{max} = \sin^{-1}(NA/n_c), \tag{2.4}$$

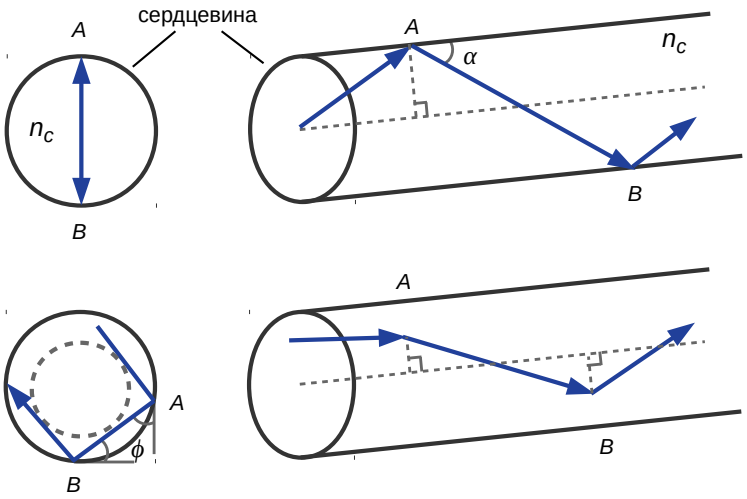


Рисунок 2.3 — Траектории лучей и их проекции на поперечное сечение в сердцевине оптоволокна со ступенчатым профилем: траектория меридионального луча, лежащая в плоскости оси оптоволокна (сверху), спиралевидная траектория косого луча (снизу) [46]

где NA – числовая апертура, n_c – показатель преломления сердцевины оптоволокна.

Лучи с углами больше, чем α_{max}, покидают сердцевину и распространяются либо в оболочке (моды оболочки) за счет полного внутреннего отражения от границы оболочка-защитное покрытие, однако, мощность такого излучения убывает по экспоненте, либо выходят за оболочку, рассеиваясь в защитном покрытии (моды излучения). На рисунке 2.4 показано распространение лучей света в простейшем оптоволоконном кабеле.

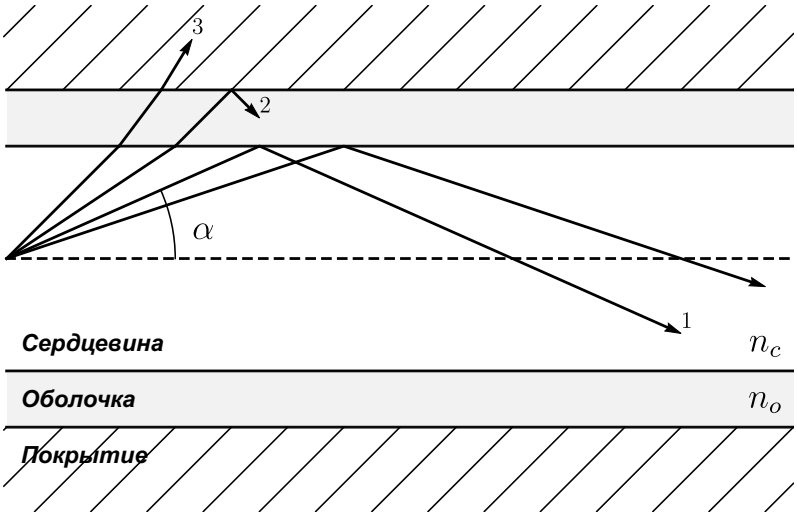


Рисунок 2.4 — Распространение лучей в ступенчатом оптоволокне: 1 – направляемые моды, 2 – моды оболочки, 3 – моды излучения

Числовая апертура характеризует эффективность ввода световых лучей в оптическое волокно и зависит от конструкции волокна. Для оптоволокна со ступенчатым профилем показателя преломления $NA = \sqrt{{n_c}^2 - {n_o}^2}$, показатель преломления оболочки n_o для обеспечения полного внутреннего отражения делают несколько ниже показателя преломления сердцевины n_c.

Для кварцевых оптоволокон числовая апертура может варьироваться примерно от 0.1 до 0.6, однако, значения выше 0.4 крайне редки [47], для пластиковых – числовая апертура, как правило, лежит в пределах 0.47–0.49.

Например, для кварцевого оптоволокна при $NA = 0.22$ и $n_c = 1.46$ по формуле (2.4) α_{max} получается равным примерно 9°. Для пластикового оптоволокна при $NA = 0.47$ и $n_c = 1.49$, α_{max} равен 18°. Таким образом, в кварцевом оптоволокне распространение излучения возможно при углах падения лучей $\alpha \leqslant 9°$ относительно оси оптоволокна, в пластиковом – при $\alpha \leqslant 18°$, чем больше числовая апертура, тем больше захват света в оптоволокно.

Стоит отметить, что указанная формула для NA учитывает только меридиональные лучи, такая числовая апертура называется номинальной и, как правило, указана в спецификации. Однако, в реальных условиях при распространении света в оптоволокне преобладают косые лучи. Законы распространения косых лучей гораздо сложнее, формула для числовой апертуры в случае косых лучей (эффективная числовая апертура) выглядит следующим образом [48]:

$$NA_{эфф}{}^2 = 1 - \frac{2}{\pi}\left(NA\sqrt{1 - NA^2} + (1 - 2NA^2)\cos^{-1}(NA)\right).$$

Отношение эффективной числовой апертуры к номинальной может достигать 1.35 в зависимости от разности показателей преломления сердцевины и оболочки оптоволокна. Но для математических выкладок нам достаточно использовать формулу для номинальной числовой апертуры.

2.4.3 Затухание сигнала

Способность оптического волокна передавать световой сигнал характеризуется двумя основными процессами: затуханием и дисперсией, которые

отвечают за качество передаваемого по оптоволокну сигнала. Обе эти величины накладывают ограничение на длину отрезка оптоволокна. Чем меньше затухание распространяемого света и его дисперсия в оптоволокне, тем лучше пространственное разрешение датчика и тем длиннее отрезки оптоволокна можно использовать.

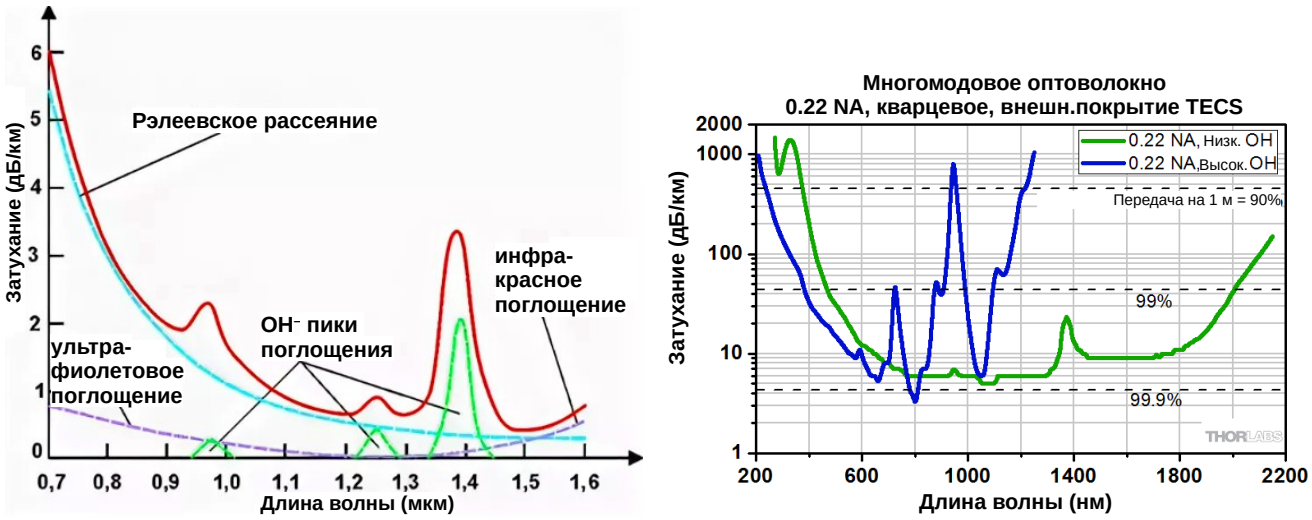
Затухание – уменьшение средней мощности светового сигнала по мере его распространения по волокну. На затухание светового сигнала в оптоволокне влияют такие факторы, как потери за счет собственного поглощения (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение) и поглощения на примесях ионов гидроксильных групп, потери за счет рэлеевского рассеяния, кабельные потери (скрутка, деформация, изгиб волокон). Вычислить, какая часть мощности теряется при переносе светового сигнала по оптоволокну, можно по следующей формуле:

$$P_{вых} = P_{вх} 10^{-\frac{\alpha L}{10}}, \tag{2.5}$$

где $P_{вых}$, $P_{вх}$ – выходная и входная мощности, α – коэффициент затухания в дБ/м, L – длина отрезка оптоволокна в метрах.

Типичная спектральная зависимость коэффициента затухания для кварцевого оптоволокна показана на рисунке 2.5а. Фундаментальным эффектом является молекулярное рассеяние Рэлея, который преобладает в основном в УФ и видимой части спектра излучения [49]. Тогда, пренебрегая кабельными потерями, коэффициент затухания $\alpha = a\lambda^{-4}$ [мкм] $\sim \lambda^{-4}$, где $a = 0.82 \cdot 10^{-3}$ для кварца [50] и $a = 1.56 \cdot 10^{-3}$ для пластика (полиметилметакрилат (ПММА)) [51]. Отсюда следует, что у кварцевых оптоволокон коэффициент затухания меньше, чем у пластиковых.

Уменьшить коэффициент затухания в области ближнего УФ можно, выбрав кварцевые волокна с повышенным содержанием OH^-. На рисунке 2.5б изображены спектральные зависимости коэффициентов затухания кварцевых оптоволокон марки Thorlabs с повышенным и пониженным содержанием гидроксильных ионов OH^-, например, на длине волны 400 нм коэффициенты затухания составляют – 30 и 200 дБ/км, соответственно. Однако, начиная с 700 нм, в оптоволокне с повышенным содержанием OH^- излучение затухает сильнее.



а) б)

Рисунок 2.5 — а) Типичная спектральная зависимость коэффициента затухания для кварцевого оптоволокна, б) спектральная зависимость коэффициента затухания для кварцевых оптоволокон марки Thorlabs с повышенным (синий) и пониженным (зеленый) содержанием OH^-

2.4.4 Дисперсия сигнала

Вторым важным параметром оптоволокна является величина дисперсии. Дисперсия существенно влияет на качество передачи сигнала по оптоволокну. В данном контексте, дисперсия – это уширение длительности импульса света по мере его распространения в волокне. Существует два основных вида дисперсии: 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 оптоволокна. Хроматическая дисперсия обусловлена различием времен задержек различных спектральных составляющих сигнала и подразделяется на материальную и волноводную. Материальная дисперсия обусловлена различным временем распространения света в среде для разных длин волн, а волноводная обусловлена наличием волноводной структуры, которая изменяет профиль показателя преломления в пространстве. По сравнению с материальной дисперсией волноводная мала, поэтому при расчетах полной дисперсии ею можно пренебречь.

В многомодовом оптоволокне со ступенчатым профилем показателя преломления искажение светового импульса в основном вызвано модовой

дисперсией, в волокне с градиентным профилем показателя преломления преобладает материальная дисперсия, а модовая – несущественна. В одномодовом волокне модовая дисперсия отсутствует, а материальная является основным видом дисперсии, но амплитуда сигнала на выходе из такого оптоволокна будет существенно меньше по сравнению с многомодовым ввиду его малого диаметра $\sim$ 10 мкм. Однако в дальнейшем будет показано, что в нашей области применения ввод излучения не осуществляется напрямую в сердцевину оптоволокна, поэтому часть излучения распространяется по оболочке, подвергаясь модовой дисперсии.

Рассматривать влияние дисперсии на искажение передаваемого по оптоволокну сигнала следует в предположении, что моды излучения независимы между собой и не обмениваются энергией. В простейшем виде длительность импульса рассчитывается на половине уровня его мощности. Тогда длительность импульса на выходе из оптоволокна с учетом дисперсии равна:

$$t_{вых}^2 = t_{вх}^2 + t_{дис}^2 = t_{вх}^2 + t_{мод}^2 + t_{мат}^2,$$

где $t_{вых}$ и $t_{вх}$ – длительность выходного и входного импульса на половине уровня его мощности, соответственно, $t_{дис}$ – суммарная дисперсия, $t_{мод}$ и $t_{мат}$ – уширение длительности импульса за счет модовой и материальной дисперсий, соответственно.

При передаче светового импульса по многомодовому оптоволокну со ступенчатым профилем показателя преломления длиной L вклад каждой из дисперсий в уширение импульса можно оценить как:

$$\frac{t_{мод}}{L} = \frac{n_c}{c}\left(\frac{1}{cos\alpha_{max}} - 1\right) \approx \frac{NA^2}{2cn_c}, \tag{2.6}$$

$$\frac{t_{мат}}{L} = \frac{n_c(\lambda_1) - n_c(\lambda_2)}{c}, \tag{2.7}$$

где λ_1 и λ_2 определяют спектральный разброс излучения.

Для градиентного оптоволокна с параболическим профилем показателя преломления модовая дисперсия равна [50]:

$$\frac{t_{мод}}{L} = \frac{n_c}{2c}\left(\frac{1}{cos\alpha_{max}} - 1\right)^2 \approx \frac{NA^4}{8cn_c^3}. \tag{2.8}$$

Как видно из формул (2.6) и (2.8) модовая дисперсия существенно зависит от значений числовой апертуры. По формулам (2.6—2.8) можно оценить

вклад модовой и материальной дисперсий в длительность выходного сигнала для пластикового ($NA = 0.47$) и кварцевого ($NA = 0.22$) оптоволокон, результаты представлены в таблице 2. Для расчетов световой сигнал был задан в диапазоне длин волн от ближнего УФ до верхней границы видимого света (300–700 нм), типичные спектры показателя преломления сердцевины оптоволокна от длины волны излучения для обоих типов оптоволокон представлены в источниках [52; 53].

Согласно значениям в таблице 2, можно сделать вывод, что в пластиковом многомодовом оптоволокне со ступенчатым профилем показателя преломления для видимого диапазона длин волн модовая дисперсия уширяет световой сигнал в три-пять раз больше, чем материальная. Для пластикового оптоволокна с градиентным профилем показателя преломления материальная дисперсия является определяющей. Следовательно, по сравнению с оптоволокном со ступенчатым профилем показателя преломления суммарная дисперсия меньше примерно в три-пять раз.

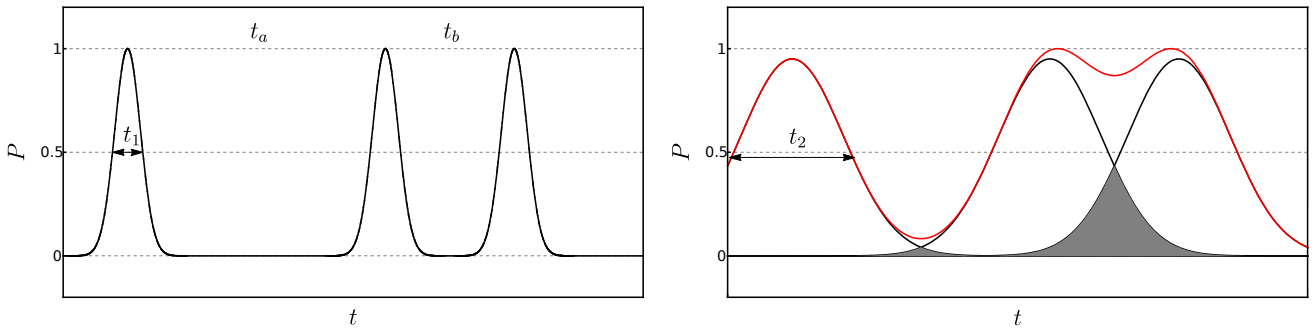
Таблица 2 — Значения модовой и материальной дисперсий для разных типов оптоволокон

Материал	Пластик		Кварц	
Профиль показателя преломления	Ступенчатый	Градиентный	Ступенчатый	Градиентный
$t_{мод}/L$, нс/м	0.25	0.01	0.1	0.001
$t_{мат}/L$, нс/м	$\leqslant 0.1$	$\leqslant 0.1$	$\leqslant 0.1$	$\leqslant 0.1$
$t_{дис}/L$, нс/м	0.27	0.1	0.15	0.1

2.4.5 Межсимвольная интерференция сигналов

В случае высокой частоты следования импульсов по оптоволокну дисперсия ограничивает его пропускную способность. На определенном расстоянии от источника излучения импульсы, уширяясь, могут начать перекрываться во времени как показано на рисунке 2.6, такое явление называется межсимвольной интерференцией. Если период следования импульсов меньше ширины спектра

сигналов, межсимвольная интерференция приводит к тому, что на выходе из оптоволокна происходит перекрывание соседних импульсов, теряется часть информации, что приводит к ее ошибочной интерпретации.



а) б)

Рисунок 2.6 — Перекрывание импульсов, вследствие уширения их длительности за счет дисперсии в оптоволокне, вызывающее межсимвольную интерференцию: а) входной сигнал с шириной импульсов t_1, б) выходной сигнал после прохождения по оптоволокну некоторого расстояния, красным обозначен суммарный сигнал, ширина импульсов $t_2 > t_1$, в случае времени следования импульсов $t_a > t_2$ – допустимые искажения сигнала, межсимвольная интерференция не существенна, при $t_b < t_2$ – существенная межсимвольная интерференция, потеря информации

Метод борьбы с межсимвольной интерференцией заключается только в уменьшении дисперсии сигналов, т.к. в случае использования оптоволокна в качестве датчика потерь пучка в ускорителях заряженных частиц, мы не в силах повлиять на частоту следования импульсов, а повышение мощности сигнала не улучшает достоверность передачи информации.

2.4.6 Радиационная стойкость оптоволокна

При использовании оптоволокна на ускорителе заряженных частиц немаловыжным параметром является его радиационная стойкость. Радиационная стойкость оптоволокна определяет его способность противостоять действию ионизирующего излучения и, как следствие, определяет срок его эксплуатации. Под действием ионизирующего излучения (гамма-излучение, рентгеновское

излучение, потоки нейтронов и т.д.) в материале оптического волокна возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски), которые приводят к образованию полос поглощения и излучению фотонов с меньшей энергией, следовательно, световой сигнал, распространяющийся по световоду, затухает сильнее [54].

Помимо увеличения оптических потерь, радиация влияет на такие характеристики оптоволокна, как показатели преломления сердцевины и оболочки, полоса пропускания, плотность и прочность, однако изменения невелики и проявляются только при дозах более 10^6 Гр [49].

Величина оптических потерь зависит от дозы облучения, мощности дозы и времени экспозиции. Чем больше накопленная доза, тем больше наведенные потери оптоволокна. При этом, если мощность дозы не превышает некую критическую величину, то после прекращения воздействия облучения оптоволокно постепенно восстанавливает свои характеристики. Например, для световода с сердечником, легированным германием, время восстановления характеристик после импульсного облучения электронами составляет примерно 10^{-2} с при мощности дозы $2 \cdot 10^6$ Гр/с [49]. Поэтому продолжительное экспонирование волокна при низкой мощности дозы приводит к более сильному росту затухания, чем та же доза, полученная за более короткое время. Тип радиации не оказывает существенного влияния на наведенные потери оптоволокна при дозах, не превышающих 10^4–10^5 Гр.

В кварцевом оптоволокне под воздействием радиации происходит ионизация молекул SiO_2, миграция электронов, миграция легирующих примесей и образование гидроксильных ионов OH^- из свободного водорода. Эти изменения приводят к появлению полос поглощения, главным образом, в УФ и видимой части спектра. Природа данных полос поглощения до конца не установлена [55;56]. Так как переносимым по оптоволокну сигналом является ИВЧ, которое имеет максимум в УФ части спектра, то эти полосы поглощения приводят к значительной потере мощности рабочего сигнала, приводя к недостоверным измерениям. Поэтому в условиях повышенных доз радиации полосы поглощения должны быть тщательно исследованы.

На протяжении последних десятилетий активно ведутся исследования в области оптоволоконной дозиметрии с использованием кварцевых волокон [57–59], также был проведен ряд исследований: как ионизирующее излучение влияет на передачу ИВЧ по оптоволокну [34; 60]. Исследования с различными

источниками радиации показали, что при дозах, не превышающих 10^4–10^5 Гр, ионизирующее излучение не оказывает существенного влияния на наведенные потери оптоволокна. В результате удалось прийти к выводу, что наиболее радиационно стойким оптоволокном является оптоволокно с повышенным содержанием OH^- с сердечником из чистого кварца и кварцевой оболочкой, легированной фтором [61]. Такое оптоволокно может эксплуатироваться до 10^7 Гр как при короткоимпульсном, так и при длительном облучении. Согласно литературе [62], оптоволокна с защитной оболочкой из полиимида в два раза более устойчивы к радиации, чем с акрилатной или силиконовой защитной оболочкой.

Интерес к исследованиям пластиковых волокон в условиях радиации появился относительно недавно, поэтому данная тема не до конца изучена. Известно, что воздействие ионизирующего излучения приводит главным образом к деполимеризации ПММА [63], вследствие чего затухание сигнала растет тем сильнее, чем меньше его длина волны. Как и в случае кварцевого волокна, УФ и видимая области спектра более подвержены затуханию [63; 64]. Несмотря на то, что радиационная стойкость пластика хуже кварца, для пластикового оптоволокна наблюдается слабый рост наведенных потерь при дозах ниже 10^3 Гр, а его эксплуатация в условиях радиации возможна вплоть до 10^4 Гр, когда коэффициент затухания достигает максимума 2 дБ/м и выходит на плато [63;65]. Недавние исследования показали, что перфторированный ПММА обладает лучшей радиационной стойкостью, чем обычный ПММА [66].

В результате исследований [58; 67] было установлено влияние профиля показателя преломления оптоволокна на его радиационную стойкость. Для многомодовых волокон со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления рост наведенных потерь примерно одинаков, в то время как одномодовые волокна оказались менее чувствительны к радиации за счет малой концентрации легирующих добавок, необходимых для создания разности показателей преломления сердцевины и оболочки.

При эксплуатации оптоволокна в условиях жесткой радиации для контроля роста оптических потерь, приводящего к ошибкам измерений, необходимо периодически калибровать сигнал, полученный с оптоволокна, сравнивая его с неким референсным значением, например, полученным до момента его облучения.

Однако в случае, если на установке существуют постоянные локальные источники радиации, это может привести к локально высокому коэффициенту затухания вследствие радиации и в последствие к недостоверным амплитудам сигнала и как результат, калибровка всей системы с использованием оптоволокна становится сложно выполнимой.

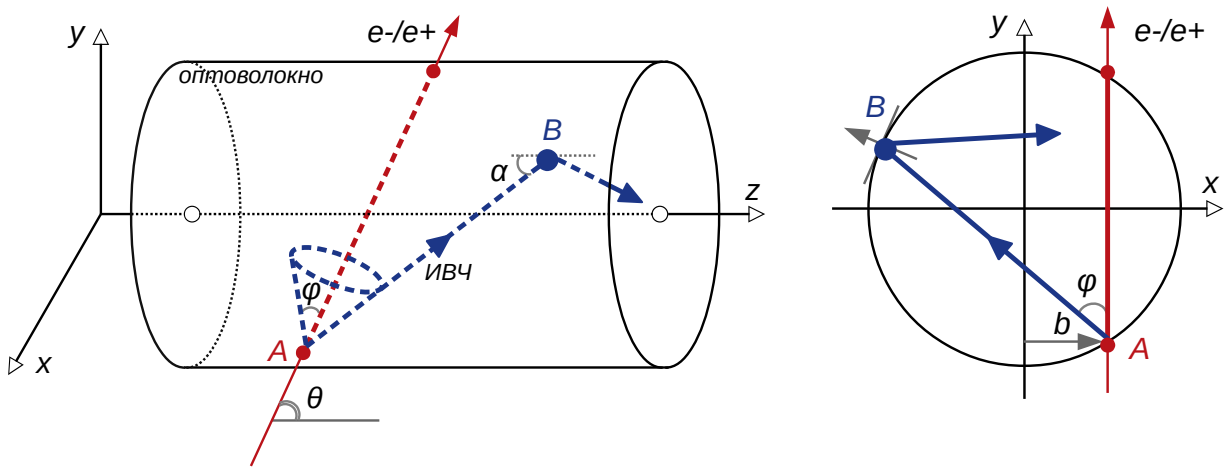
2.5 Особенности распространения излучения Вавилова-Черенкова в оптоволокне

В этом разделе теория передачи светового импульса по оптоволокну, описанная в п.2.4, будет применена конкретно к ИВЧ с учетом особенностей его генерации и спектра излучения. Для того, чтобы исследовать, как параметры оптоволокна влияют на распространение излучения и на световыход, мы воспользуемся лучевой теорией распространения света и рассмотрим механизм распространения ИВЧ на примере многомодового оптоволокна.

2.5.1 Эффективность захвата излучения

Как было описано в п.2.2, волновой фронт ИВЧ представляет собой поверхность конуса, вершиной которого является заряженная частица, а осью – ее траектория пролета сквозь оптоволокно. ИВЧ генерируется непосредственно в оптоволокне, дальнейшее распространение излучения по оптоволокну происходит за счет полного внутреннего отражения на границе сердцевина-оболочка. Излучение распространяется к торцу оптоволокна, где на границе сердцевина-воздух может также претерпевать полное внутреннее отражение. Таким образом, лишь часть от сгенерированного излучения захватывается в оптоволокно, распространяется по нему и покидает оптоволокно с его торца. Остаточное излучение выходит из оптоволокна конически в пределах угловой апертуры – угол между крайними лучами конического светового пучка на выходе из волокна.

Рассмотрим, какая часть ИВЧ захватывается и распространяется по оптоволокну при пролете заряженной частицы сквозь оптоволокно под некоторым углом относительно оси оптоволокна. Эффектами затухания пока можно пренебречь, затухание светового сигнала в оптоволокне будет рассмотрено в п.2.5.3. На рисунке 2.7 схематически изображено формирование эффекта Вавилова-Черенкова в оптоволокне при его облучении релятивистской заряженной частицей.



а) б)

Рисунок 2.7 — Схематическое изображение эффекта Вавилова-Черенкова в оптоволокне. Заряженная частица (красным) проходит сквозь оптоволокно под углом θ относительно его оси, испуская поток фотонов (синим) из точки A в конус под углом φ вдоль своей траектории. Фотоны распространяются по оптоволокну, отражаясь от границы сердцевина-оболочка под углом α относительно оси оптоволокна: а) Трехмерное изображение, б) Изображение в плоскости, перпендикулярной оси оптоволокна, где b – прицельный параметр

Доля захваченного в оптоволокно излучения с дальнейшим его выходом в пределах угловой апертуры равна [68]:

$$k = \frac{N_{ф,вых}}{N_{ф,вх}} = \frac{1}{\pi}\cos^{-1}\left(\frac{\beta\sqrt{{n_c}^2 - NA^2} - \cos\theta}{\sin\theta\sqrt{\beta^2{n_c}^2 - 1}}\right), \tag{2.9}$$

где θ – угол пролета заряженной частицы через оптоволокно относительно его оси.

Например, доля передаваемого излучения по пластиковому оптоволокну: $n_c = 1.49$, $NA = 0.47$, и кварцевому: $n_c = 1.46$, $NA = 0.22$, вычисленная по формуле (2.9), представлена на рисунке 2.8. Как можно видеть из рисунка,

эффективность передачи ИВЧ по оптоволокну существенно зависит от угла влета заряженной частицы в оптоволокно.

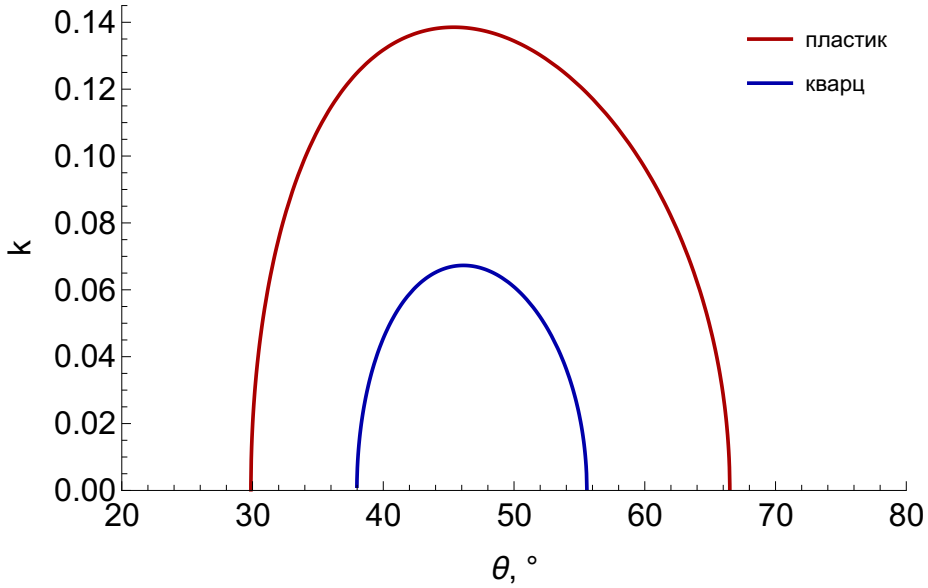


Рисунок 2.8 — Зависимость вероятности передачи излучения по пластиковому оптоволокну (красным) и кварцевому (синим) с дальнейшим его выходом в пределах угловой апертуры от угла влета заряженной частицы в оптоволокно

По пластиковому оптоволокну передается та часть ИВЧ, которая генерируется частицами, пролетающими сквозь оптоволокно под углами в интервале примерно [30°, 66°] относительно его оси, а максимум излучения приходится на угол, примерно равный углу раствора конуса ИВЧ. Для кварца это значение лежит в интервале [38°, 56°]. Упрощенно этот интервал углов можно задать как $\theta \in [|\varphi - \alpha_{max}|,\ \varphi + \alpha_{max}]$. В дальнейшем в тексте для обозначения этого интервала углов будет использоваться термин «рабочий диапазон углов».

Проинтегрировав выражение (2.9) по *рабочему* диапазону углов, получается, что лишь 10 % от всего сгенерированного излучения способно распространяться по пластиковому оптоволокну и 5 % – по кварцевому. Как было указано в п.2.4.1, у кварцевого оптоволокна захват фотонов в два раза меньше, чем у пластикового, в основном за счет разных показателей числовой апертуры.

2.5.2 Число фотонов на выходе из оптоволокна

Аналитическое выражение для световыхода ИВЧ от одной заряженной частицы может быть получено путем перемножения числа входных фотонов на эффективность их захвата в оптоволокно. Число первичных фотонов можно получить, проинтегрировав формулу (2.3) для сгенерированного ИВЧ по $d\lambda$ в диапазоне длин волн излучения от λ_1 до λ_2 и по длине пути dl, пройденной частицей в оптоволокне. Длина пути траектории частицы в сердцевине оптоволокна может быть выражена как:

$$l = \sqrt{{d_c}^2 - 4b^2}/\sin\theta,$$

где d_c – диаметр сердцевины оптоволокна, b – прицельный параметр, кратчайшее расстояние от оси оптоволокна до пути частицы.

Таким образом, получаем число фотонов, на выходе с торца оптоволокна в пределах угловой апертуры при пролете релятивистской заряженной частицы $z = 1$ через оптоволокно:

$$N_{ф,вых} = \frac{2\sqrt{{d_c}^2 - 4b^2}\sin^2\varphi}{137\sin\theta}\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1\lambda_2}\cos^{-1}\left(\frac{\beta\sqrt{{n_c}^2 - NA^2} - \cos\theta}{\sin\theta\sqrt{\beta^2{n_c}^2 - 1}}\right). \quad (2.10)$$

В случае, когда оптоволокно используют в качестве датчика потерь пучка в ускорителях заряженных частиц, через оптоволокно пролетает поток заряженных частиц, составляющих электронную компоненту ЭЛ, образовавшегося при попадании пучка на стенку вакуумной камеры ускорителя. Поскольку поперечные размеры ЭЛ намного больше диаметра оптоволокна, сквозь оптоволокно пролетает лишь часть ЭЛ. При этом поток влетающих в оптоволокно электронов и позитронов, как показано на рисунке 2.9, зависит как от диаметра, так и от расположения оптоволокна относительно центра ЭЛ.

Для расчета световыхода ИВЧ из оптоволокна от потока заряженных частиц необходимо учитывать их линейную плотность при влете в оптоволокно (число электронов и позитронов на единицу длины диаметра оптоволокна), которая вычисляется из поперечного распределения электронной компоненты ЭЛ $n_L(x)$:

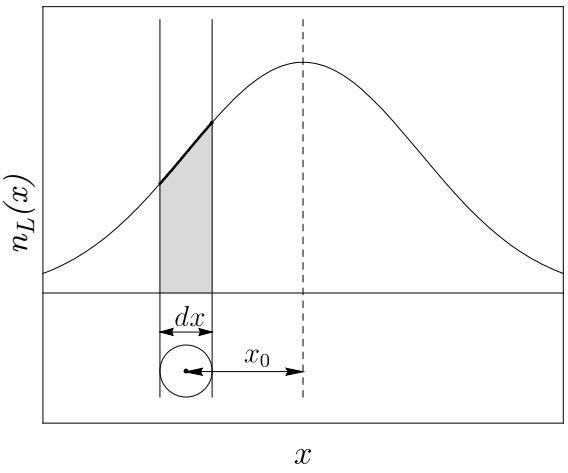


Рисунок 2.9 — Схематичное изображение поперечной функции распределения электронной компоненты ЭЛ, а также положения и размеров оптоволокна относительно ее максимума. Максимум функции соответствует месту потери первичного пучка

$$N^{полн}{}_{ф,вых} = \frac{1}{d_c}\int_{-d_c/2}^{+d_c/2} N_{ф,вых}db \cdot \int_{x_0-d_c/2}^{x_0+d_c/2} n_L(x)dx,$$

где x_0 – расстояние от центра места потери пучка до оси оптоволокна в плоскости, перпендикулярной оси оптоволокна.

Поперечное распределение электронной компоненты ЭЛ вдоль сечения оптоволокна можно считать однородным $n_L \neq n_L(x)$ (сечение оптоволокна много меньше поперечного размера ливня), тогда выражение для световыхода от потока заряженных частиц получается следующим:

$$N^{полн}{}_{ф,вых} \approx \frac{n_L {d_c}^2 \sin^2\varphi}{137\sin\theta}\frac{\lambda_2-\lambda_1}{\lambda_1\lambda_2}\cos^{-1}\left(\frac{\beta\sqrt{{n_c}^2-NA^2}-\cos\theta}{\sin\theta\sqrt{\beta^2{n_c}^2-1}}\right). \qquad (2.11)$$

Согласно формуле (2.11), световыход оптоволокна квадратично зависит от диаметра сердцевины и слабо зависит от числовой апертуры оптоволокна. Этот факт стоит учитывать в случае детектирования малых потерь, когда максимальный захват света играет важную роль. В таком случае стоит использовать оптоволокна с большим диаметром. Например, световыход для одномодового оптоволокна с диаметром сердцевины 10 мкм на четыре порядка меньше, чем световыход многомодового пластикового оптоволокна с диаметром сердцевины 1 мм. Проблема использования кварцевых оптоволокон большого диаметра заключается в том, что их стоимость существенно возрастает с ростом их диаметра.

2.5.3 Затухание излучения

Как показано в п.2.4.3, для УФ и видимой части спектра в оптоволокне преобладают потери на рэлеевское рассеяние. Пренебрегая кабельными потерями, коэффициент затухания пропорционален λ^{-4}. Тогда, используя формулы для числа фотонов ИВЧ (2.3) и для затухания излучения (2.5), можно определить зависимость интенсивности сигнала ИВЧ на выходе из оптоволокна от длины волны с учетом эффекта затухания:

$$\frac{dN_{ф,вых}}{d\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^2} 10^{-\frac{aL[m]}{10\lambda^4[\mu m]}},$$

где $a = 0.82 \cdot 10^{-3}$ для кварца [50] и $1.56 \cdot 10^{-3}$ для пластика (ПММА) [51].

На рисунке 2.10 представлены спектры начального излучения ИВЧ (серым) и остаточного излучения после прохождения света по пластиковому оптоволокну разной длины. Интегрирование по диапазону от 300 до 700 нм дает световыход на торце для заданной длины отрезка оптоволокна. Например, при прохождении света по оптоволокну длиной 10 м световой сигнал уменьшается на 13 %, 20 м – 25 %, 30 м – 33 %, 50 м – 45 %, 100 м – 65 %, 200 м – 80 %.

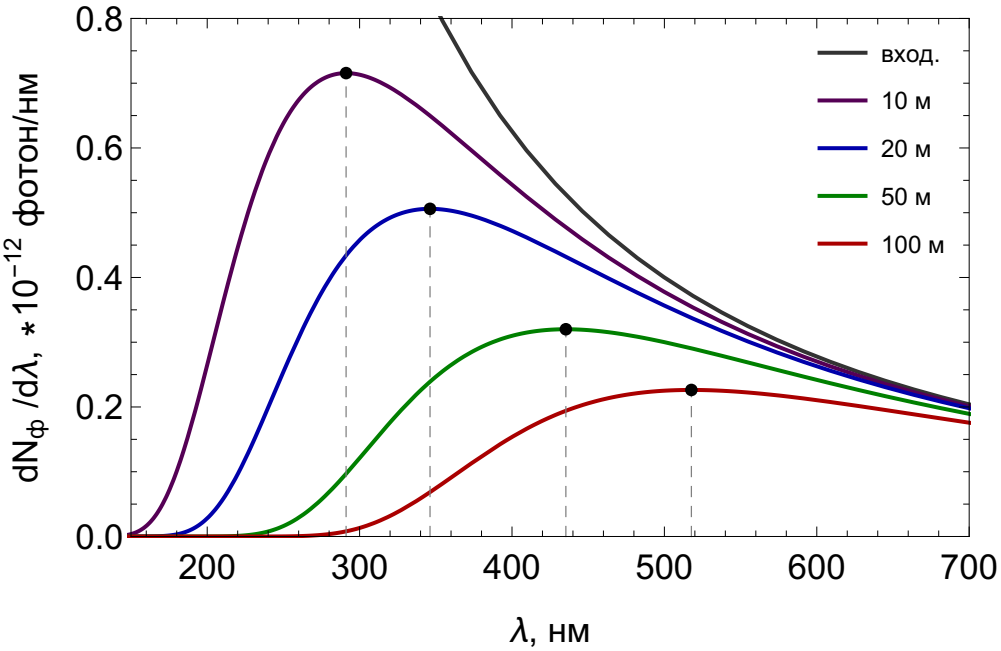


Рисунок 2.10 — Влияние эффекта затухания в оптоволокне на спектр ИВЧ. Цветом показан спектр остаточного излучения после прохождения по оптоволокну заданной длины, кабельные потери не учитывались

Несмотря на то, что, согласно формуле (2.3), спектр ИВЧ имеет максимум в УФ диапазоне, чем больше расстояние по оптоволокну проходит излучение, тем сильнее оно затухает в УФ диапазоне. Поэтому при использовании длинных отрезков оптоволокна не целесообразно выбирать оптоволокна с рабочей областью длин волн в УФ диапазоне.

Обобщая картину для датчика в целом, следует выбирать оптоволокна с рабочей областью длин волн в диапазоне, в котором находится область спектральной чувствительности ФЭУ. Как правило, это видимый диапазон длин волн и ближний УФ. Например, в данной работе область максимальной спектральной чувствительности ФЭУ находится в области длин волн 350–450 нм.

2.6 Выводы к главе 2

В данной главе подробно исследованы физические процессы, на которых основан принцип работы ОДП и влияющих на его способность определять место потери пучка в ускорителе и количество потерянных частиц. К таким процессам относятся взаимодействие теряемых электронов пучка с веществом стенки вакуумной камеры, ИВЧ, генерируемое в оптоволокне, и механизм передачи излучения по оптоволокну.

Показано, что на качество передачи сигнала по оптоволокну влияют такие эффекты, как затухание и дисперсия световых импульсов. Наименьшим коэффициентом затухания, как правило, обладают кварцевые оптоволокна, особенно с повышенным содержанием гидроксильных групп. Уменьшить эффект затухания сигнала в оптоволокне можно, используя небольшие отрезки оптоволокна. Наименьшей дисперсией обладают одномодовые волокна. Среди многомодовых наименьшей дисперсией обладают кварцевые волокна с градиентным профилем показателя преломления, а худшим вариантом с точки зрения дисперсии являются пластиковые оптоволокна со ступенчатым профилем.

Применяя оптоволокна в местах с повышенным уровнем радиации, следует учитывать, что ионизирующее излучение приводит к уменьшению мощности передаваемого сигнала по оптоволокну и определяет срок его эксплуатации. Исследования в данной области показывают, что пластиковое оптоволокно больше подвержено влиянию ионизирующего излучения, чем кварцевое. Наиболее ради-

ационно стойким оптоволокном является кварцевое оптоволокно с повышенным содержанием OH^- с сердечником из чистого кварца и кварцевой оболочкой, легированной фтором. Радиационными эффектами на качество передаваемого по оптоволокну сигнала можно пренебречь в случае, когда доза не превышает 10^3 Гр и 10^4 Гр в случае эксплуатации пластикового и кварцевого оптоволокон, соответственно.

Показаны основные результаты, связанные с особенностями распространения ИВЧ в оптоволокне:

- Малая часть (5–10 %) от всего сгенерированного в оптоволокне ИВЧ распространяется по оптоволокну согласно условию полного внутреннего отражения и выходит из оптоволокна в пределах угловой апертуры.
- Интенсивность распространяемого ИВЧ зависит от угла влета частицы в оптоволокно относительно его оси. Максимум интенсивности распространяемого ИВЧ лежит в области углов влета частиц, примерно равных углу раствора конуса ИВЧ.
- Полное число распространяемого ИВЧ от падающего ЭЛ пропорционально квадрату диаметра сердцевины оптоволокна и слабо зависит от числовой апертуры оптоволокна. В одномодовых волокнах из-за их малого диаметра световыход на 3–4 порядка ниже, чем в многомодовых.
- Затухание в оптоволокне влияет на спектр ИВЧ, по мере распространения ИВЧ по оптоволокну подавляется УФ диапазон, остается видимый диапазон длин волн и ближний УФ.

Глава 3. Численное моделирование работы датчика

В главе описывается численная модель процесса регистрации потери пучка при помощи ОДП в структуре ИК ВЭПП-5. Результаты моделирования различных сценариев потерь пучка, с параметрами, максимально близко подобранными к параметрам ИК ВЭПП-5, позволяют определить, какими характеристиками должен обладать датчик, каким способом регистрировать сигнал и в каком месте его следует разместить.

Поскольку практически невозможно измерить точную эффективность любого датчика потерь пучка за счет неопределенности места потери и наличия углового разброса ЭЛ, численное моделирование используют для абсолютной калибровки сигнала с точки зрения отношения величины сигнала к количеству потерянных частиц [26].

В данной работе численное моделирование проводилось при помощи программы FLUKA [40] на основе метода Монте-Карло. Помимо моделирования взаимодействия частиц с веществом данная программа позволяет моделировать рождение оптических фотонов: ИВЧ, сцинтилляционное и переходное излучение, и их распространение в прозрачной оптической среде.

Созданная модель описывает различные сценарии потерь пучка как с точки зрения параметров теряемых частиц: угол падения, кинетическая энергия, так и различной геометрии и свойств места потери: пустой промежуток или наличие магнитных элементов с различными компонентами поля. Параметры моделирования были выбраны максимально приближенными к параметрам пучка и геометрии ускорителя на ИК ВЭПП-5.

Исследование углового, энергетического и поперечного распределения электронной компоненты ЭЛ при падении пучка на стенку вакуумной камеры, позволяет определить условие применимости ОДП, эффективность регистрации потерь и в каком месте относительно места потери пучка его следует разместить.

Исследование распространения ИВЧ по оптоволокну было проведено в зависимости от угла падения пучка на стенку вакуумной камеры и диаметра оптоволокна. Показаны временная структура светового импульса и влияние дисперсии в оптоволокне на длительности светового импульса на выходе из оптоволокна.

3.1 Описание численной модели

Для расчета параметров ЭЛ было рассмотрено три основных места потери пучка в ускорителе: в пустом промежутке, в дипольном магните и в квадрупольной линзе. ОДП был представлен как отрезок оптоволокна, вплотную прилегающий к внешней стенке вакуумной камеры. Если не указано обратное, то оптоволокно по умолчанию устанавливалось вдоль места потери пучка. На рисунке 3.1 представлена геометрия места потери пучка с квадрупольной линзой, выполненная в программе FLUKA.

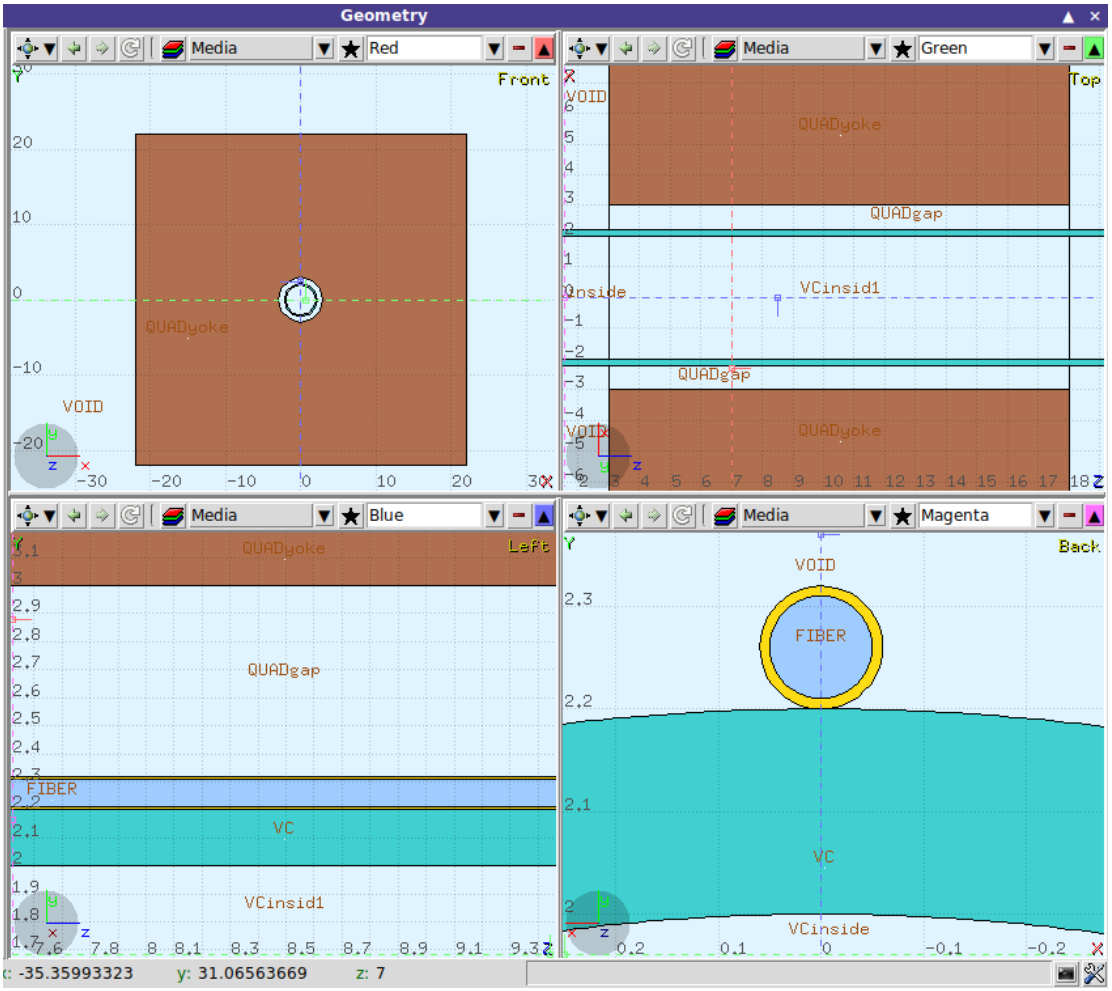


Рисунок 3.1 — Схема участка вакуумной камеры с квадрупольной линзой и оптоволокном

В модели точечный пучок электронов (либо позитронов) с энергией 500 МэВ падает на стенку вакуумной камеры под углом 1°. Однако для полноты картины были рассмотрены различные углы падения и энергии пучка. Отличие параметров ЭЛ, инициированного позитроном, от электронного заключается

только в возможности аннигиляции позитронов с электронами атома. Но, как показало моделирование, такое различие несущественно (0.1–1 %) и в дальнейшем потери пучка электронов либо позитронов будут рассмотрены только на примере электронного пучка.

Вакуумная камера задана приближенно к участку вакуумной камеры в канале выпуска К-500 и была представлена в виде полого цилиндра из нержавеющей стали с внешним диаметром 44 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина вакуумной камеры составляла 4 м, по 2 м в каждую сторону от места потери пучка.

Для учета влияния магнитного поля на распространение ЭЛ в модели были созданы дипольный магнит и квадрупольная линза с упрощенной геометрией, поскольку интерес представляет только область, где расположено оптоволокно. Магнитное поле было задано внутри вакуумной камеры и в воздушном зазоре между вакуумной камерой и полюсами магнитов.

Магниты былы заданы в виде железного ярма формы прямоугольного параллелепипеда с цилиндрическим отверстием. Внешний радиус дипольного магнита составляет – 230 мм, внутренний – 170 мм, длина ярма – 856 мм. Величина основного поля диполя была задана равной 1.52 Тл, что соответствует максимально допустимому значению поля в дипольных магнитах в канале выпуска ИК ВЭПП-5. Внешний радиус квадрупольной линзы – 220 мм, внутренний – 30 мм, длина ярма – 150 мм. Максимальный градиент поля – 27 Тл/м.

Исследование распространения ИВЧ по оптоволокну было рассмотрено на примере многомодового оптоволокна со ступенчатым профилем показателя преломления, изготовленного из пластика или кварца. В большинстве случаев, где материал оптоволокна не имел значения, было задано пластиковое оптоволокно. Создание оптоволокна с градиентным профилем показателя преломления в программе FLUKA не предусмотрено. Моделирование одномодового оптоволокна не производилось, поскольку его малый световыход требует большого количества ресурсов для вычислений с хорошей точностью.

В модели оптоволокно состоит из сердцевины и оболочки с диаметрами 1.0/1.1 мм, соответственно. Длина отрезка изменялась от 2 до 35 м и указана отдельно в каждом пункте. Для пластикового оптоволокна типичные значения показателей преломления сердцевины и оболочки были заданы равными 1.492/1.417, соответственно, $NA = 0.47$. Для кварцевого – 1.460/1.443, соответ-

ственно, $NA = 0.22$. Спектр фотонов ИВЧ был задан в диапазоне длин волн 300–700 нм.

3.2 Калибровка сигнала

Задача калибровки сигнала с любого датчика потерь пучка сводится к поиску количества потерянных частиц пучка по измеренной форме регистрируемого сигнала. За счет неопределенности места потери пучка относительно местоположения датчика и наличия углового разброса ЭЛ практически не возможно произвести абсолютную калибровку сигнала. При подборе численной модели, максимально приближенной к реальной установке, возможно решить задачу калибровки сигнала.

Интегрируя по времени полученный сигнал с ФЭУ, можно определить число вторично-эмиссионных электронов. Отношение среднего числа вторично-эмиссионных электронов к среднему количеству теряемых электронов пучка можно выразить как:

$$N_{вээ}/N_{тер} = N_{e-/e+}\eta N_{ф,вых}10^{-\alpha L/10}\varepsilon_{в}\varepsilon_{фк}K_{ус}, \tag{3.1}$$

где $N_{e-/e+}$ – число регистрируемых вторичных электрон-позитронов, η – отношение числа регистрируемых вторичных электрон-позитронов к их общему числу, $N_{ф,вых}$ – число фотонов ИВЧ на выходе с торца оптоволокна от одного электрона или позитрона без учета затухания, $10^{-\alpha L/10}$ – коэффициент затухания оптического излучения в оптоволокне, $\varepsilon_{в}$ – эффективность ввода излучения из оптоволокна в ФЭУ, $\varepsilon_{фк}$ – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ, $K_{ус}$ – коэффициент усиления ФЭУ.

В данной главе при помощи численной модели будут определены значения для $N_{e-/e+}$, η и $N_{ф,вых}$. Полное число вторичных электрон-позитронов зависит как от параметров теряемого пучка: кинетическая энергия, угол падения, так и от различной геометрии и свойств места потери: пустой промежуток или наличие магнитных элементов с различными компонентами поля.

Однако датчиком потерь регистрируется только часть вторичных электрон-позитронов, а именно те, которые пролетают сквозь оптоволокно. Число регистрируемых частиц зависит как от расположения оптоволокна на внешней

стороне вакуумной камеры относительно места потери (поперечное распределение ЭЛ неравномерно), так и от направления регистрации оптического сигнала.

Число фотонов ИВЧ на выходе из торца оптоволокна от одного электрона или позитрона зависит как от параметров оптоволокна, так и от углового распределения электронной компоненты ЭЛ. Эффективность ввода излучения в ФЭУ и параметры ФЭУ будут рассмотрены в следующей главе.

3.3 Условие генерации излучения и применимости датчика

В п.2.1 была приведена зависимость угла раствора конуса ИВЧ от кинетической энергии заряженной частицы, пролетающей сквозь оптически прозрачную среду. Согласно формуле (2.2), при кинетической энергии частицы меньше 2 МэВ, ИВЧ в прозрачной среде с $n \approx 1.5$ будет расходиться конусом с углами от 0–48°, при больших энергиях угол раствора конуса ИВЧ выходит на плато и составляет примерно 48°.

Согласно моделированию, при энергиях первичного пучка ~ 100 МэВ число электронов или позитронов с $E_к < 2$ МэВ от общего количества вторичных частиц, пролетающих сквозь оптоволокно в диапазоне углов, необходимом для последующего захвата ИВЧ в оптоволокно, не превышает 5 %. Средняя кинетическая энергия электронной составляющей ЭЛ равна 15 МэВ.

Следовательно, с хорошей точностью можно считать, что в оптоволокне все фотоны ИВЧ испускаются в конус с углом раствора примерно 48° относительно направления движения частицы. Тогда, согласно условию полного внутреннего отражения, по оптоволокну передается та часть ИВЧ, которая генерируется частицами, пролетающими сквозь оптоволокно под углами в *рабочем* диапазоне углов относительно его оси. Данный диапазон углов численно описан в п.2.5.1.

Условие возникновения ИВЧ накладывает ограничение на область энергий пучка, при которых распределенный датчик может регистрировать потери. Для генерации ИВЧ кинетическая энергия заряженных частиц, проходящих сквозь оптоволокно, должна быть больше пороговой энергии 175 кэВ, определяемой по формуле (2.1). Из моделирования следует, что частицы с такими энергиями получаются от пучка электронов, падающих на стенку вакуумной

камеры, с энергиями больше 3 МэВ. Их количество составляет $\sim 10^{-3}$ от первичного электрона. Поэтому регистрация потерь на малых энергиях возможна только при большом заряде пучка.

3.4 Влияние поля магнитов на ливень

В ускорителе заряженных частиц во время его запуска и наладки существует два основных сценария потерь пучка: вследствие чрезмерного изменения орбиты пучка однородным магнитным полем или в результате его де-/фокусировки, (когда происходит увеличение размера пучка в одной из поперечных плоскостей и амплитуда колебаний некоторых частиц может достигать стенки вакуумной камеры, что приводит к их потере). Типичные места потерь: дипольные магниты, корректоры, квадрупольные лизны и пустые промежутки.

В модели в качестве источника магнитного поля были использованы поворотный магнит серии «3М» (с основным полем 1.52 Тл) и квадрупольная линза ДУ60 (с максимальным градиентом 27 Тл/м) [69]. Оба магнита были заданы с упрощенной геометрией: в виде прямоугольного параллелепипеда с цилиндрическим отверстием, сквозь которое проходит вакуумная камера. Силовые линии магнитного поля присутствовали внутри вакуумной камеры и в воздушном зазоре магнита. За пределами магнита поле не было задано, т.к. оно достаточно слабое и существенно не влияет на параметры ЭЛ.

Для исследования влияния магнитного поля на параметры ЭЛ, сравнивались случаи потери пучка в магните и в пустом промежутке. Для дипольного магнита с заданными параметрами максимально допустимый угол падения пучка составил 5° относительно оси вакуумной камеры, для квадруполя – 1°. В случае пустого промежутка угол падения был задан равным 1°.

У квадруполя с железным ярмом толщиной 19 см в ярме теряется более 90 % частиц ЭЛ, которые в него попадают. Соответственно, чтобы не потерять существенную часть информации о потерях пучка, оптоволокно следует прокладывать внутри магнитов. Поэтому в модели оптоволокно проходило внутри магнита по внешней стороне вакуумной камеры вдоль места потери пучка.

По результатам моделирования наличие магнитного поля, соответствующего полю магнитных элементов ИК ВЭПП-5, существенно не отражается на

продольной ширине ЭЛ и, как в случае пустого промежутка, полуширина составляет примерно 4 см в месте потери пучка. Также неизменным остается продольное угловое распределение заряженных частиц в ЭЛ. Число вторичных электронов и позитронов, проходящих сквозь оптоволокно, при падении пучка в магнитном поле квадруполя увеличивается максимум на 20 %. На рисунке 3.2 показан флюенс электронов и позитронов ЭЛ при потере пучка в поле фокусирующего квадруполя и в пустом промежутке, в первом случае флюенс частиц повышен.

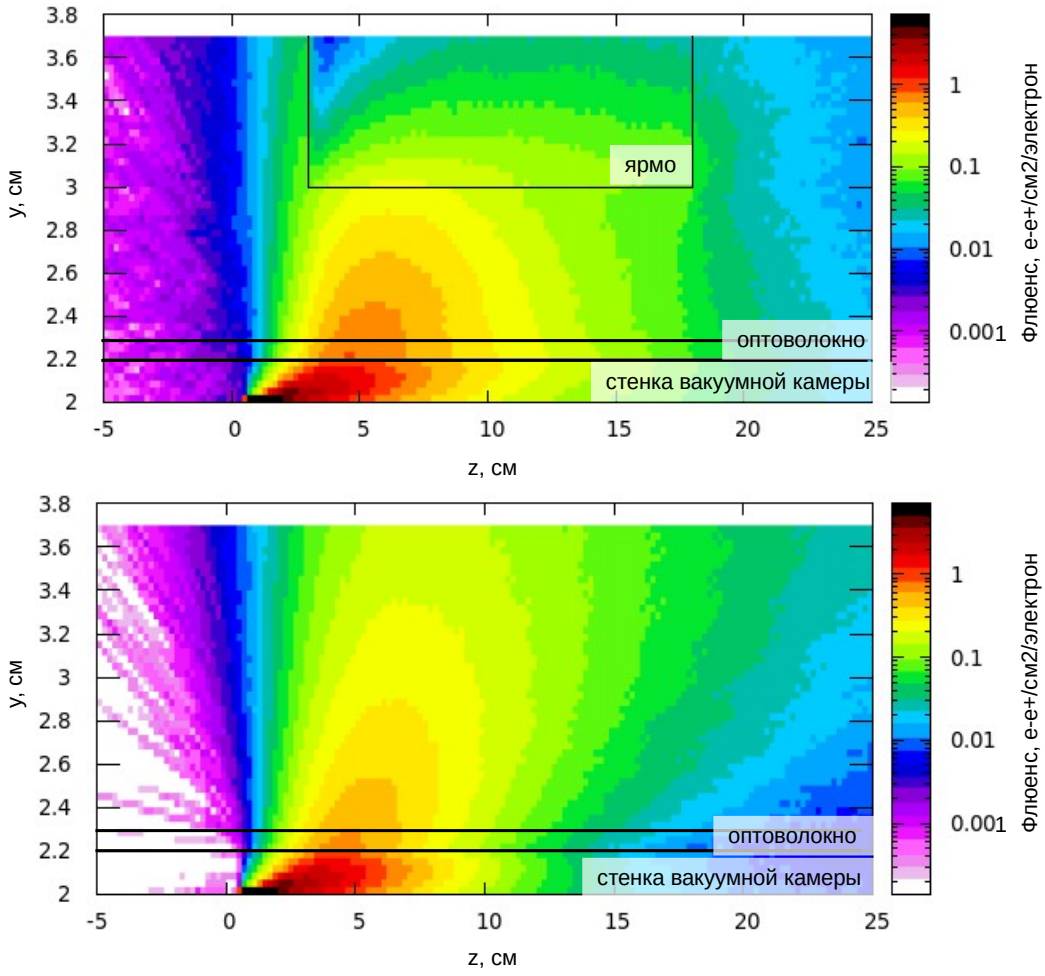


Рисунок 3.2 — Флюенс частиц электронной компоненты ЭЛ при потере пучка: в поле фокусирующего квадруполя (сверху), в пустом промежутке (снизу)

В поле диполя усредненное число вторичных частиц, проходящих сквозь оптоволокно, увеличивается максимум в два раза по сравнению с потерей пучка в пустом промежутке. В п.3.6 будет показано, что распределение ЭЛ по поверхности вакуумной камеры неоднородно, и что ширина области с максимальным числом частиц в диполе составляет всего 1 мм на поверхности вакуумной камеры.

Таким образом, все расчеты, выполненные для пустого промежутка, с учетом усреднения числа вторичных частиц, практически применимы для сценария потери пучка в магнитном поле, характерном для элементов ИК ВЭПП-5. Дальнейшее моделирование в данной работе было выполнено для случая потери пучка в пустом промежутке.

3.5 Зависимость интенсивности ливня от параметров пучка

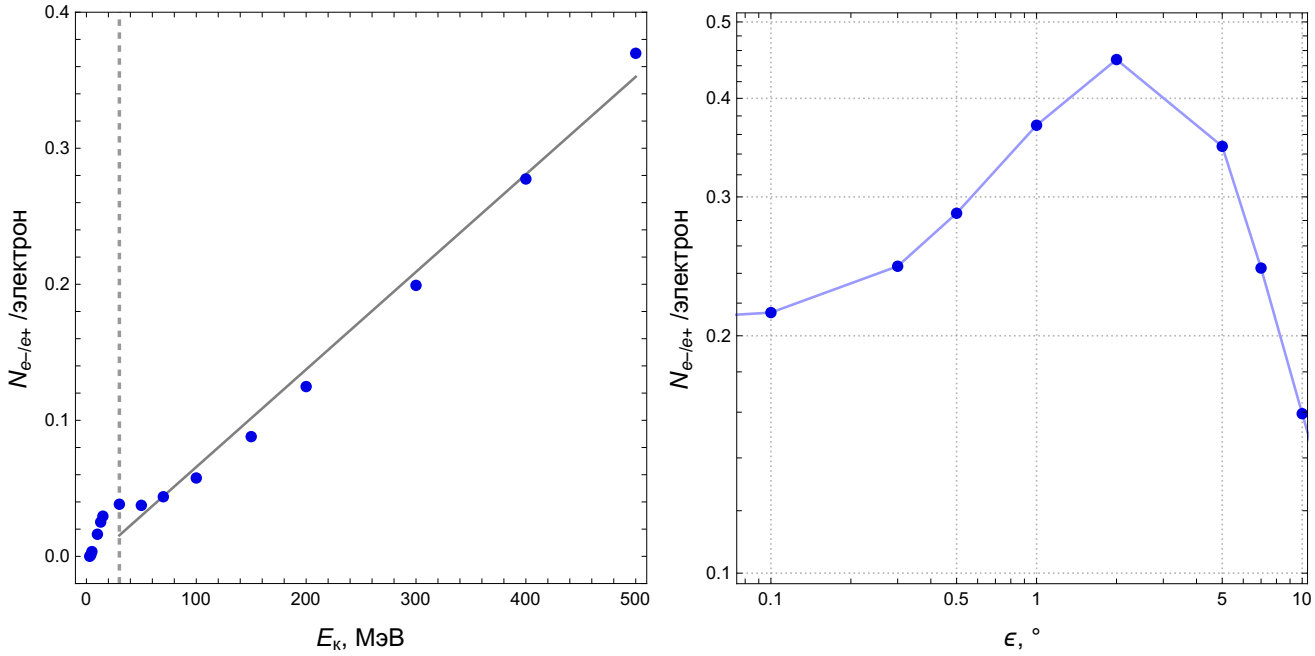
Численная модель позволяет определить число вторичных электронов и позитронов в зависимости от кинетической энергии и угла падения теряемого пучка.

На рисунке 3.3а представлена зависимость числа вторичных электрон-позитронов, пролетающих сквозь оптоволокно в *рабочем* диапазоне углов, от кинетической энергии пучка, падающего на стенку вакуумной камеры. Выбранный диапазон углов, как описано в п.2.5.1, определяется из условия захвата и распространения ИВЧ в оптоволокне. Оптоволокно расположено вдоль места потери пучка. Угол падения составляет 1° относительно оси вакуумной камеры. Пунктирной линией обозначена критическая энергия, равная 30 МэВ. При энергиях пучка больше критической, рост числа частиц электронной компоненты ливня слабо зависит от кинетической энергии первичного электрона $\sim 10^{-3} E_к$.

От общего числа заряженных частиц, вылетевших с внешней стенки вакуумной камеры, в оптоволокно в *рабочем* диапазоне углов попадает примерно 3–5 % частиц.

Угол падения пучка на стенку вакуумной камеры определяет пройденную толщину материала, что отражается на продольной ширине ЭЛ и на количестве электрон-позитронов, выходящих с поверхности. Как правило, в ускорителях заряженных частиц пучки теряются под малыми углами относительно их направления движения, $\sim 0.1^\circ$–10°.

На рисунке 3.3б представлена зависимость числа заряженных частиц, пролетающих сквозь оптоволокно в *рабочем* диапазоне углов, от угла падения пучка электронов на стенку вакуумной камеры. Максимум числа вторичных частиц приходится на угол падения примерно в 2°, что соответствует пройденной толщине материала в 4 см (при заданной толщине стенки из нержавеющей



а) б)

Рисунок 3.3 — Зависимости числа вторичных электрон-позитронов, пролетающих сквозь оптоволокно в *рабочем* диапазоне углов относительно направления движения пучка, от: а) кинетической энергии пучка, падающего на стенку вакуумной камеры под углом 1°, б) угла падения единичного электрона с энергией 500 МэВ на стенку вакуумной камеры

стали в 2 мм). Это объясняется тем, что для нержавеющей стали глубина, на которой число частиц ЭЛ максимально, составляет 4 см.

Таким образом, число регистрируемых вторичных электронов и позитронов от одного теряемого электрона при его кинетической энергии в диапазоне 300–500 МэВ и при типичных углах падения в диапазоне 0.1°–10° слабо изменяется и с хорошей точностью можно считать одинаковым – 0.3 вторичных частиц на один теряемый электрон пучка.

3.6 Распределение электронной компоненты ливня по поверхности вакуумной камеры

Поскольку диаметр оптоволокна много меньше периметра вакуумной камеры, а потеря пучка может произойти в любой точке на ее периметре, существенным является исследование распределения электронной компоненты ЭЛ

по внешней стороне вакуумной камеры. Помимо того, что ЭЛ обладает ненулевым поперечным размером, который дается радиусом Мольера [70], существует переотражение частиц ливня внутри вакуумной камеры с их последующим выходом с противоположной стороны вакуумной камеры. Таким образом, выход заряженных частиц происходит по всему периметру вакуумной камеры. Стоит отметить, что поперечный размер ливня не зависит от кинетической энергии первичного электрона [71].

На рисунке 3.4 изображено распределение заряженных частиц по внешнему периметру вакуумной камеры, удовлетворяющих дальнейшему условию захвата ИВЧ в оптоволокно, в случае потери пучка в пустом промежутке и в дипольном магните с полем 1.52 Тл. Место падения первичного электрона находится в точке $P = 0$, при внешнем радиусе вакуумной камеры 2.2 см, периметр $P = 13.8$ см. Размер разбиения гистограммы соответствует выбранному диаметру сердцевины оптоволокна d_c в 1 мм, следовательно, в одном разбиении содержится число вторичных электрон-позитронов, регистрируемых при помощи ОДП.

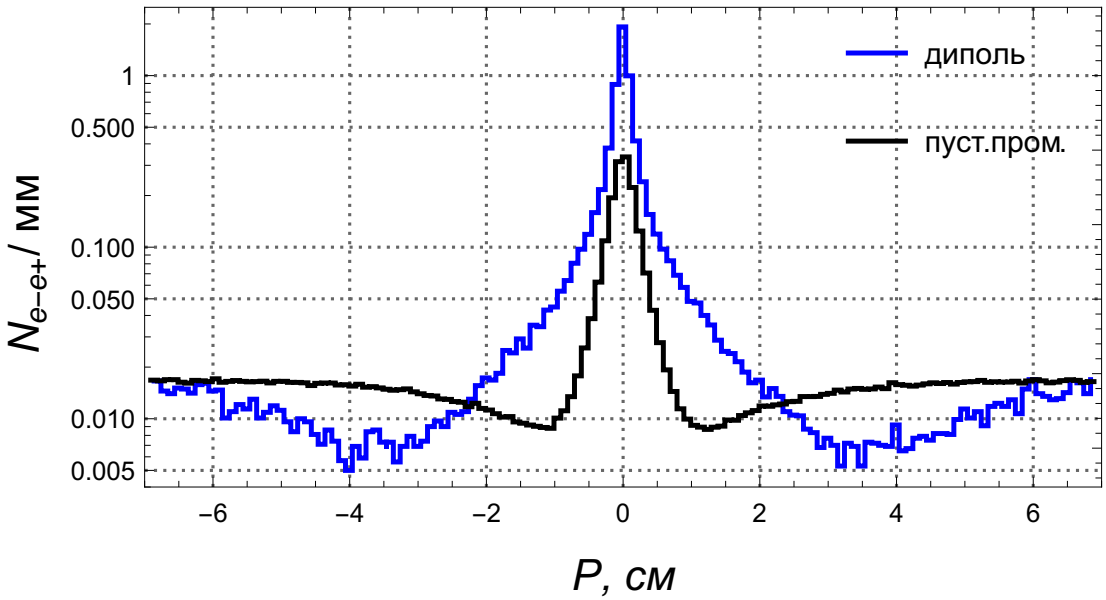


Рисунок 3.4 — Распределение электронной компоненты ЭЛ, удовлетворяющей дальнейшему условию захвата ИВЧ в оптоволокне, от единичного электрона вдоль внешнего периметра вакуумной камеры: в дипольном магните (синим), в пустом промежутке (черным)

Из рисунка видно, что в оптоволокно, расположенное вдоль места потери пучка, попадает на порядок больше заряженных частиц, чем в случае, когда оптоволокно удалено от места потери пучка. В случае пустого промежутка

область с максимальным выходом составляет примерно 4 мм (полуширина), что составляет всего 3 % от периметра вакуумной камеры в 13.8 см. В случае диполя – 1 мм (менее 1 % от периметра). На остальном участке поверхности вакуумной камеры среднее число вторичных электронов и позитронов примерно одного уровня.

Ввиду небольшой ширины пика относительно периметра вакуумной камеры, для расчета калибровочных коэффициентов датчика распределение электронной компоненты ЭЛ можно принять однородным. Тогда среднее число регистрируемых вторичных электрон-позитронов $N_{e-/e+}$ составляет: 0.025 для пластикового оптоволокна и 0.013 для кварцевого оптоволокна одинакового диаметра в 1 мм. Значения отличаются примерно в два раза, это связано с различными *рабочими* диапазонами углов для каждого типа оптоволокна. Отношение числа регистрируемых вторичных электрон-позитронов к их общему числу η определяется как d_c/P и равно $7.25 \cdot 10^{-3}$.

3.7 Продольное угловое распределение электронной компоненты ливня

Вторичные электроны и позитроны ЭЛ на выходе из вакуумной камеры обладают большим продольным угловым разбросом относительно оси вакуумной камеры. На рисунке 3.5 показано угловое распределение заряженных частиц, проходящих сквозь оптоволокно, расположенное в месте потери единичного электрона, падающего на стенку вакуумной камеры. Вследствие широкого углового распределения этих частиц, сгенерированное в оптоволокне ИВЧ может распространяться как в направлении движения первичного пучка, так и в противоположном направлении.

Число регистрируемых вторичных электрон-позитронов в направлении, противоположном движению пучка, на порядок меньше, чем в сонаправленном случае и составляет $N_{e-/e+} = 0.0035$ для пластикового оптоволокна и 0.0018 для кварцевого оптоволокна с диаметром сердцевины в 1 мм. Отношение числа фотонов с двух торцов оптоволокна также будет отличаться на порядок.

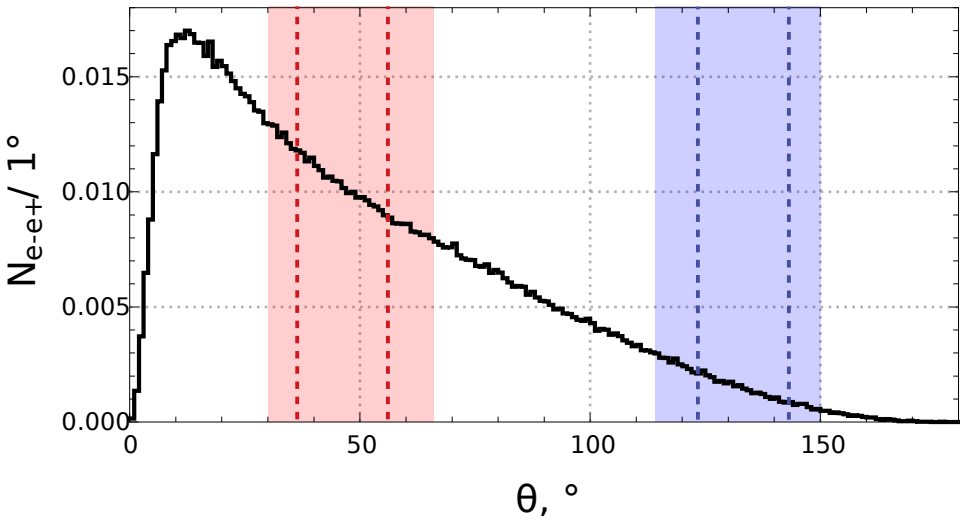


Рисунок 3.5 — Угловое распределение вторичных электронов и позитронов, проходящих сквозь оптоволокно. Красным цветом выделен *рабочий* диапазон углов для дальнейшего захвата ИВЧ по направлению движения первичного пучка в пластиковом (сплошная область) и кварцевом (пунктирными линиями) оптоволокнах, аналогично синим цветом – в обратном направлении

3.8 Вероятность захвата черенковского излучения в оптоволокно и световыход

При помощи численного моделирования был исследован процесс генерации ИВЧ с его последующим распространением по оптоволокну. В качестве эталонного теста программы FLUKA полученные результаты моделирования необходимо сравнить с теоретическими выкладками, представленными в п.2.5.2.

На рисунке 3.6 представлен световыход ИВЧ с торца 2-хметрового оптоволокна в зависимости от угла пролета вторичного релятивистского электрона с энергией 15 МэВ (средняя кинетическая энергия электронной составляющей ЭЛ) сквозь оптоволокно относительно его оси. Результаты, полученные при помощи численной модели и аналитически по формуле (2.10), согласуются. Таким образом, в случае калибровки сигнала датчика расчет числа фотонов $N_{ф,вых}$ для калибровочной формулы (3.1) можно производить аналитически.

Зная зависимость числа фотонов на выходе из оптоволокна от угла пролета единичной заряженной частицы сквозь него (рисунок 3.6), а также полученное из моделирования угловое распределение электронной компоненты ЭЛ, проходящей сквозь оптоволокно (рисунок 3.5), можно получить угловое

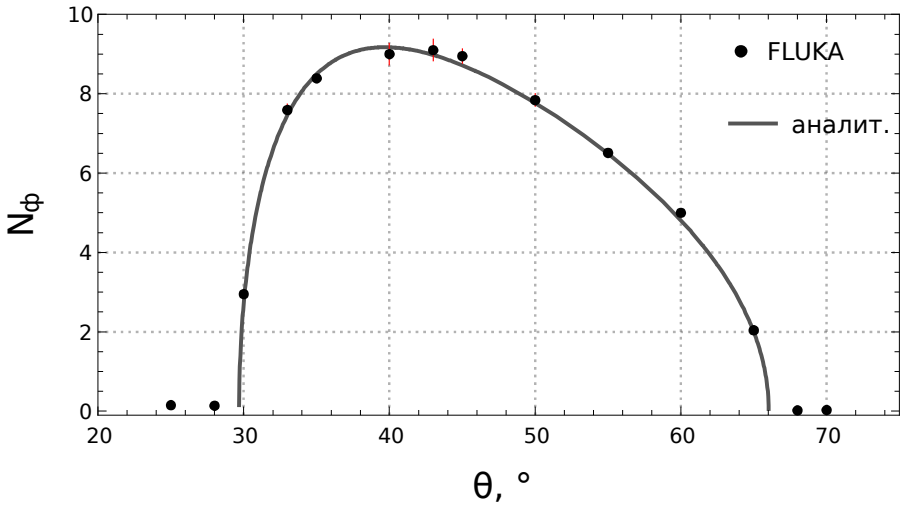


Рисунок 3.6 — Зависимость числа фотонов на выходе из оптоволокна от угла пролета заряженной частицы сквозь оптоволокно. Линией обозначена аналитическая кривая, точками – результат, полученный из численной модели

распределение фотонов ИВЧ на выходе из оптоволокна от единичного электрона, падающего на стенку вакуумной камеры.

На рисунке 3.7 представлено продольное угловое распределение фотонов, которые сгенерировались в оптоволокне в процессе развития ЭЛ от падающего единичного электрона пучка (красная линия), и угловое распределение фотонов, которые распространились по оптоволокну и вышли с его торца в пределах угловой апертуры.

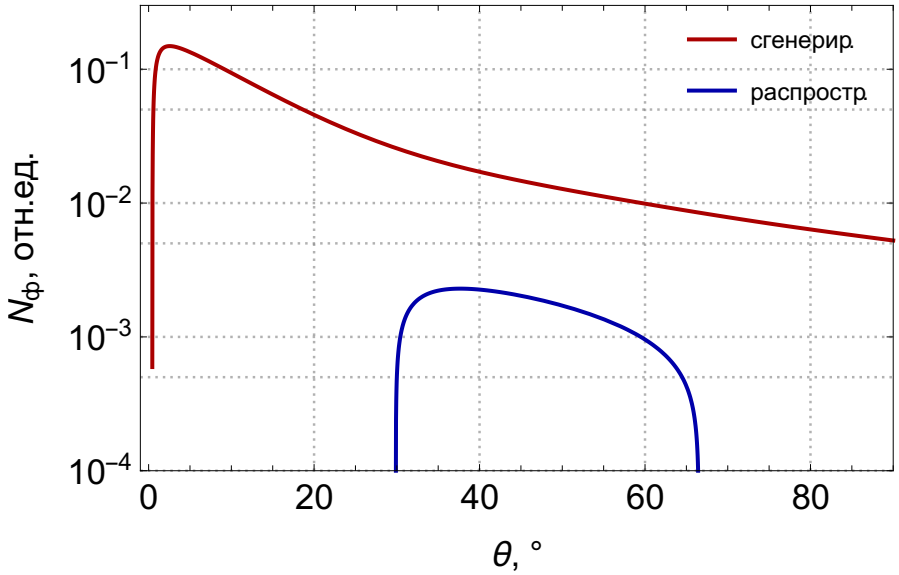


Рисунок 3.7 — Продольное угловое распределение фотонов, рожденных при пролете частиц ЭЛ сквозь оптоволокно от падающего единичного электрона пучка (красным), и фотонов на выходе из оптоволокна (синим). Угол падения первичного электрона составляет 1°

Как было описано в п.2.5.2, согласно формуле (2.11), световыход оптоволокна квадратично зависит от диаметра сердцевины при его облучении потоком частиц с широким поперечным размером. Было проведено моделирование для разных стандартных размеров многомодового оптоволокна – соотношение диаметров сердцевина/оболочка: 200/220, 300/330, 400/440, 550/600, 600/660, 800/880, 940/1000 мкм. Оптоволокно облучалось электромагнитным ливнем, поперечный размер которого составляет 5 мм, что значительно больше диаметра оптоволокна.

На рисунке 3.8 показаны зависимости световыхода от диаметра оптоволокон, изготовленных из пластика и кварца. В обоих случаях зависимость световыхода от диаметра оптоволокна квадратична с хорошей точностью. Этот факт стоит учитывать в случае детектирования малых потерь, когда максимальный захват света играет важную роль. В таком случае стоит использовать оптоволокна с большим диаметром.

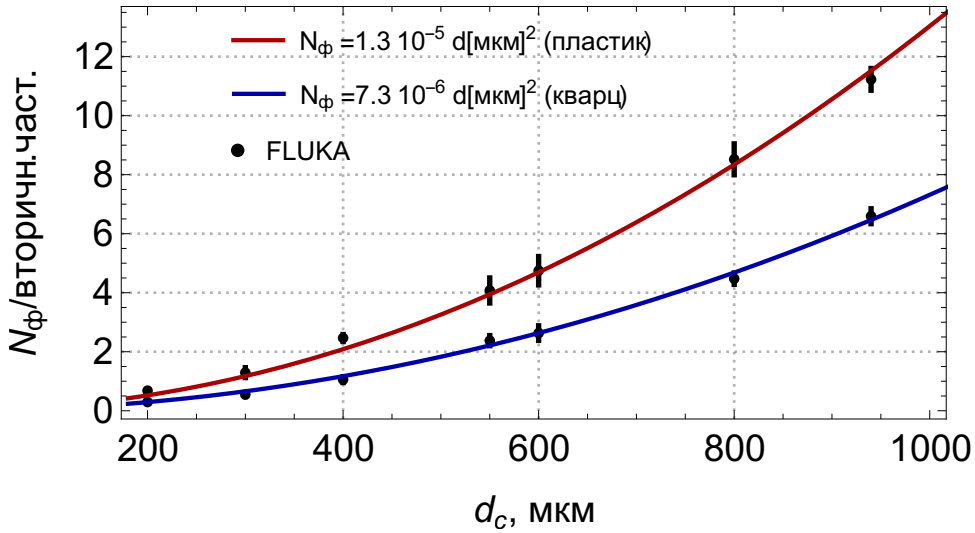


Рисунок 3.8 — Зависимость световыхода от диаметра пластикового (красным) и кварцевого (синим) оптоволокна. Точками обозначен результат моделирования облучения оптоволокон различных диаметров потоком заряженных частиц с поперечным размером, большим размеров оптоволокна. Сплошной линией показана аппроксимация функцией второй степени

3.9 Длительность и профиль выходного светового импульса

Результат моделирования формы светового импульса на выходе из оптоволокна в зависимости от угла падения первичного электрона на стенку вакуумной камеры представлена на рисунке 3.9. Были рассмотрены характерные для ускорителей малые углы падения первичного электрона: 0.1°, 0.5°, 1°, 5°. Для таких углов падения длительность выходного импульса примерно одинаковая и составляет 0.6 ± 0.06 нс при прохождении светом оптоволокна длиною 2 м. Данное значение примерно совпадает со значением, посчитанным для пластикового оптоволокна с учетом дисперсии, равной 0.27 нс/м из таблицы 2 в п.2.4.4, при длине 2 м – 0.54 нс.

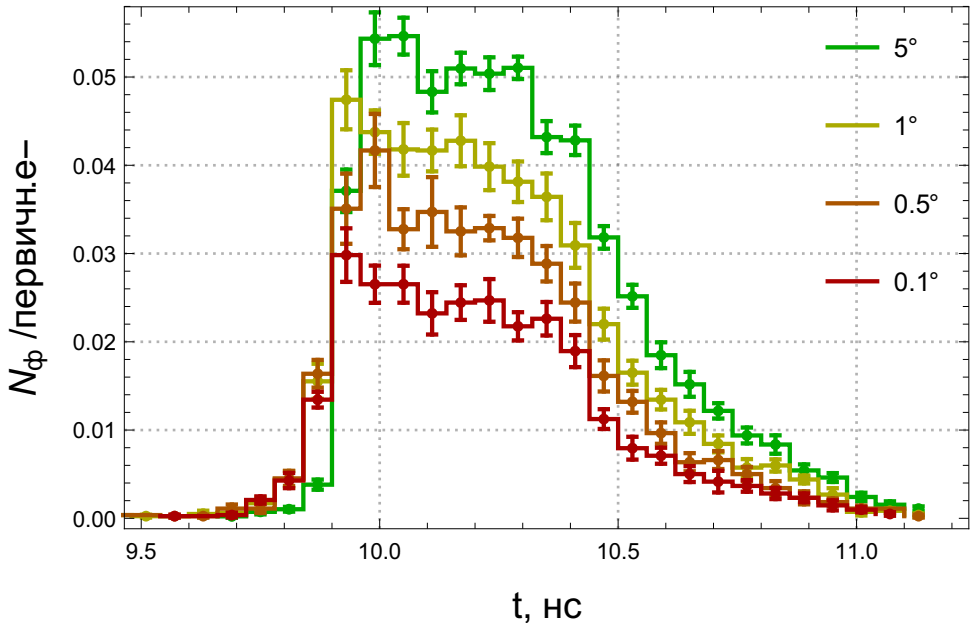


Рисунок 3.9 — Временной профиль светового импульса на выходе из оптоволокна при разных углах падения пучка на стенку вакуумной камеры

Время прихода сигнала практически не зависит от угла падения. С точки зрения распределения фотонов во времени световой импульс имеет видимый резкий подъем и длинный спад на конце.

Было также проанализировано влияние положения оптоволокна относительно места потери пучка на форму светового импульса. На рисунке 3.10 показаны временные профили светового импульса на выходе из оптоволокна при его разном положении снаружи вакуумной камеры. Длительность импульса и время его прихода в каждом из случаев получились одинаковые, с точностью не хуже 0.2 нс. Как и в случае с распределением ЭЛ, амплитуда сигнала

в месте потери пучка на порядок больше, чем в местах, удаленных от места потери пучка.

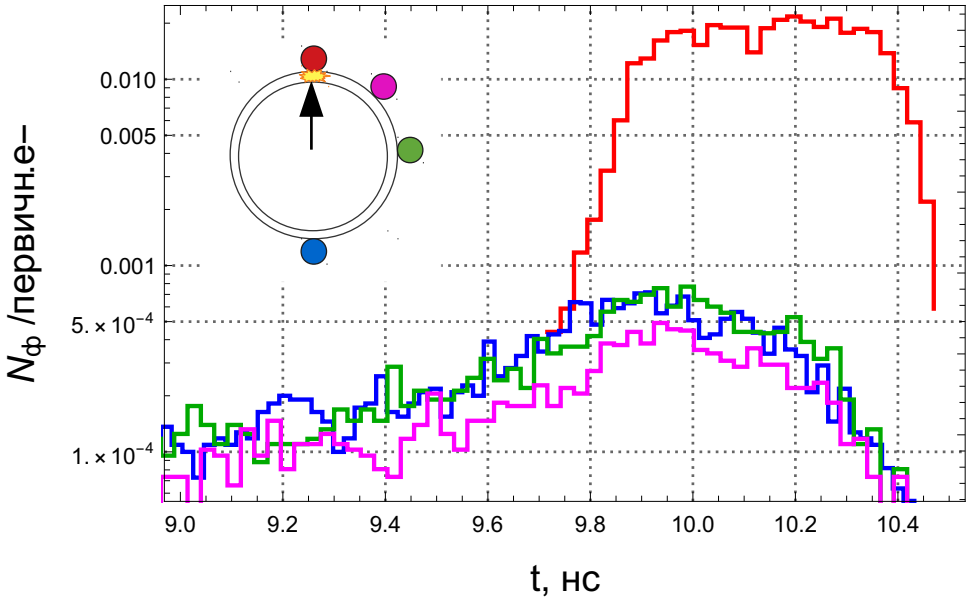


Рисунок 3.10 — Временной профиль выходного светового импульса в зависимости от расположения оптоволокна на поверхности вакуумной камеры относительно места потери пучка

3.10 Влияние дисперсии на длительность выходного светового импульса

Поскольку в дальнейшем рассматриваются эксперименты с различными длинами оптоволокон, необходимо исследовать, как изменяется длительность импульса на выходе из оптоволокна при прохождении оптоволокна разной длины. Как было показано в п.2.4.4, рост длительности светового сигнала происходит линейно с ростом длины оптоволокна.

На рисунке 3.11 показана зависимость длительности выходного светового импульса от длины оптоволокна, изготовленного из пластика и кварца. Из рисунка следует, что рост длительности светового сигнала происходит линейно с ростом длины оптоволокна. Величина дисперсии для пластикового оптоволокна составила $\Delta t/L = 0.27$ нс/м, для кварцевого $\Delta t/L = 0.15$ нс/м. Оба эти значения совпадают с аналитическими результатами, представленными в таблице 2 для данных типов оптоволокон.

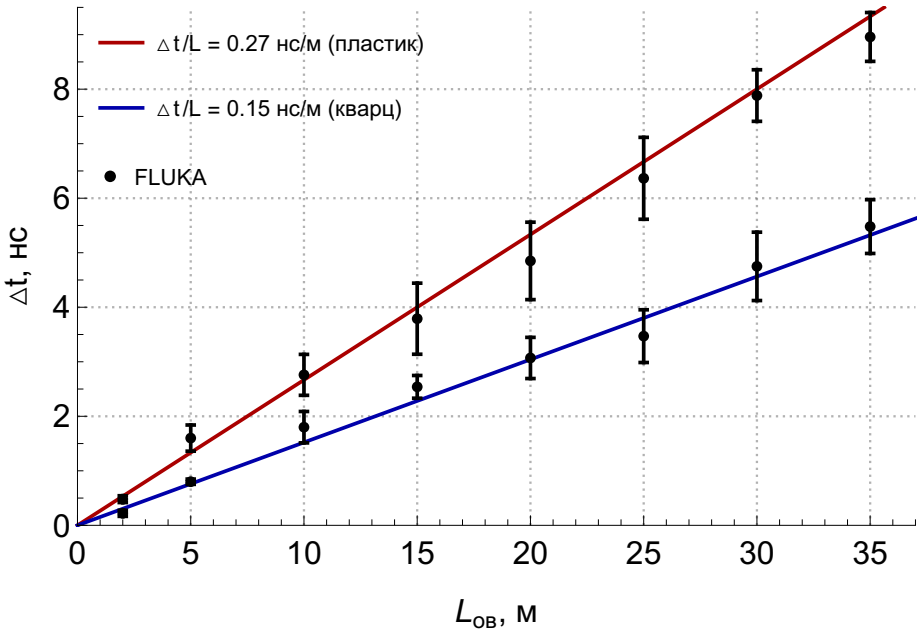


Рисунок 3.11 — Длительность выходного светового импульса (полуширина) при разных длинах оптоволокна. Точками обозначен результат моделирования. Сплошной линией показана аппроксимация функцией первой степени для пластикового (красным) и кварцевого (синим) оптоволокна

3.11 Выводы к главе 3

В результате численного моделирования основных физических процессов, лежащих в основе принципа работы ОДП можно выделить основные положения:

- Наличие магнитного поля, характерного для элементов ИК ВЭПП-5, существенно не сказывается на параметрах ЭЛ, за исключением числа вторичных частиц.
- Число вторичных электронов и позитронов принято брать усредненным по всей поверхности вакуумной камеры, такие средние значения при наличии магнитного поля и в случае пустого промежутка отличаются не более чем в два раза.
- Число частиц электронной компоненты ЭЛ слабо зависит от кинетической энергии в области релятивистских скоростей и слабо зависит от угла падения теряемой частицы.
- На основе численной модели определены калибровочные коэффициенты для расчета числа вторичных электронов-позитронов.

- За счет углового разброса ЭЛ сгенерированное в оптоволокне ИВЧ может распространяться по оптоволокну как в направлении движения первичного пучка, так и в противоположном направлении. При этом число фотонов, собираемое с торца оптоволокна по направлению движения пучка, на порядок больше, чем с противоположного.
- Численное моделирование генерации ИВЧ и его распространения по оптоволокну согласуется с аналитическими расчетами в рамках лучевой теории распространения света, что позволяет использовать аналитическую формулу для оценки числа фотонов.
- Зависимость световыхода от диаметра оптоволокна квадратичная.
- Длительность выходного светового импульса не зависит от угла падения пучка и от местоположения оптоволокна, но растет линейно с ростом длины оптоволокна. Рост вызван в основном модовой дисперсией.

Представленные в этой главе результаты моделирования используются при выборе отрезка оптоволокна оптимальной длины и для калибровки абсолютной величины потерь при регистрации сигнала с ОДП.

Глава 4. Выбор оптимальных элементов датчика и способов регистрации потерь

В данной главе описываются критерии выбора параметров оптоволокна, детектора излучения и АЦП, удовлетворяющих предъявляемым требованиям к датчику потерь пучка на ИК ВЭПП-5. Приводятся результаты экспериментального исследования разных типов оптоволокон, ФЭУ и АЦП с точки зрения оптимального пространственного разрешения датчика, его калибровки, простоты и надежности использования.

Пространственному разрешению датчика было уделено особое внимание, поскольку именно оно отвечает за точность локализации местоположения потерь пучка, регистрируемых при помощи распределенного датчика потерь. Пространственное разрешение датчика напрямую зависит от уширения регистрируемого сигнала за счет временных характеристик элементов датчика.

В простейшем виде длительность импульса на выходе ОДП рассчитывается на половине уровня его мощности. Тогда вклад каждого элемента датчика в результирующее уширение импульса можно оценить по формуле:

$$t_{вых}^2 \approx t_{вх}^2 + t_{ОВ}^2 + t_{ФЭУ}^2 + t_{АЦП}^2, \tag{4.1}$$

где $t_{вх}$ – входная длительность импульса, соответствующая длительности пучка, которая не превышает 1 нс для ИК ВЭПП-5 [3], $t_{ОВ}$, $t_{ФЭУ}$, $t_{АЦП}$ – уширение длительности импульса за счет вклада оптоволокна, ФЭУ и АЦП, соответственно.

В случае, когда электрический сигнал до АЦП передается при помощи длинных радиочастотных кабелей, необходимо также учитывать их временные характеристики.

Были протестированы четыре типа оптоволокна, различающихся по материалу сердцевины, профилю показателя преломления и количеству передаваемых мод излучения. Для каждого из них было вычислено значение дисперсии и сделан вывод об оптимальной длине отрезка оптоволокна, при которой пространственное разрешение ОДП будет лучше 1 м. Для пластикового оптоволокна, как для наиболее доступного варианта, был также определен коэффициент затухания излучения и изучено влияние радиации на качество передачи светового импульса.

Были рассмотрены способы эффективного ввода излучения из оптоволокна в ФЭУ. Описаны основные характеристики ФЭУ, показаны результаты сравнения временных характеристик разных типов ФЭУ. Проведено сравнение оцифровки сигнала при помощи АЦП с разными временными характеристиками. Сделан выбор элементов ОДП с оптимальными параметрами для ИК ВЭПП-5. Кроме того, проведена оценка порога чувствительности датчика и его возможность использования на других аналогичных установках.

4.1 Выбор оптимального оптоволокна

Способность оптического волокна передавать световой сигнал характеризуется двумя основными параметрами: затуханием и дисперсией, которые отвечают за качество передаваемого по оптоволокну сигнала. Обе эти величины накладывают ограничение на длину отрезка оптоволокна. Чем меньше затухание распространяемого света и его дисперсия в оптоволокне, тем лучше результирующее пространственное разрешение датчика и тем длиннее отрезки оптоволокна можно использовать. В экспериментах с ИВЧ были протестированы четыре типа оптоволокна, различных по материалу сердцевины, профилю показателя преломления и количеству передаваемых мод излучения.

Использование оптоволокна в условиях радиации приводит к большему затуханию сигнала по мере его использования и изменению спектра регистрируемого излучения и, как итог, накладывает ограничения на срок его эксплуатации. Поэтому радиационная стойкость оптоволокна также требует рассмотрения. В данном разделе будет изучена пропускная способность пластикового оптоволокна, как наименее радиационно стойкого из всех вариантов, после продолжительного периода эксплуатации на ИК ВЭПП-5.

4.1.1 Измерение дисперсии в разных типах оптоволокна

В п.2.4.1 было описано, что по числу распространяемых мод излучения оптоволокна делятся на многомодовые и одномодовые, по материалу сердце-

вины и оболочки – на кварцевые и пластиковые, по профилю показателя преломления – на ступенчатые и градиентные.

Для определения величины дисперсии в оптоволокнах разного типа были протестированы четыре типа оптоволокна, обладающие разной величиной дисперсии, их параметры приведены в таблице 3. Оптоволокна были закреплены на стенке вакуумной камеры в ожидаемом месте потери пучка на участке накопительного кольца. Световой сигнал регистрировался при помощи ФЭУ на МКП, временные характеристики которого описываются в п.4.2.1. Сигнал с ФЭУ выводился при помощи коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом и длиною 10 м. Оцифровка сигнала производилась осциллографом с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации 1 Гвыб/с на канал.

Таблица 3 — Основные параметры исследуемых оптоволокон

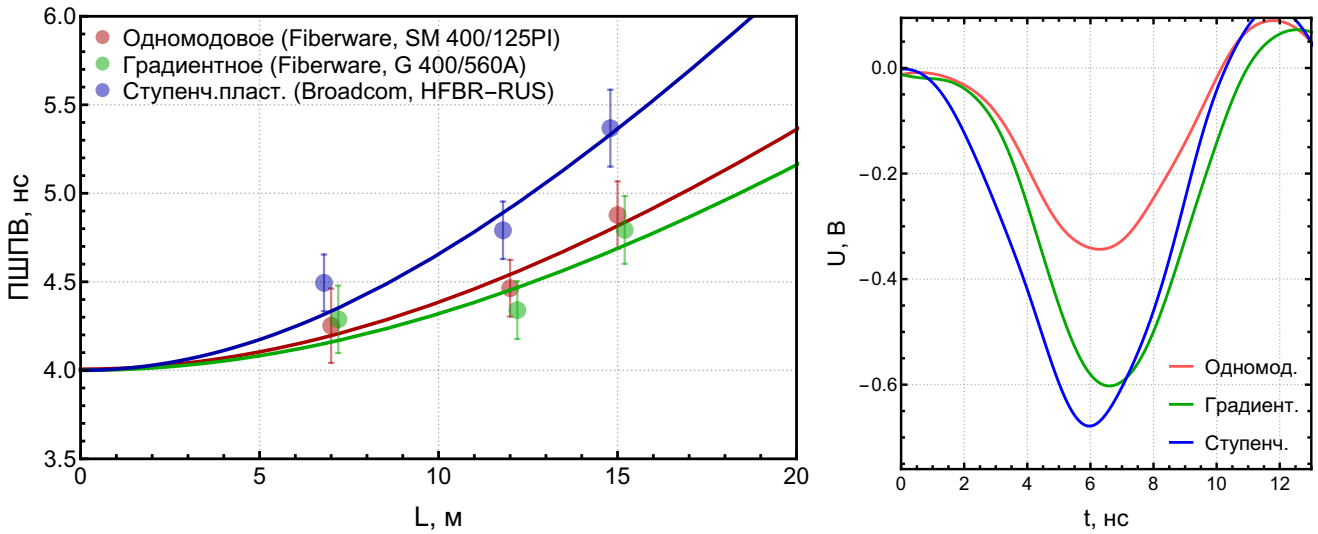
Название	Broadcom, HFBR-RUS	Thorlabs, FG550UEC	Fiberware, G 400/560A	Fiberware, SM 400/125PI
Тип	Многомодовое	Многомодовое	Многомодовое	Одномодовое
Профиль	Ступенчатый	Ступенчатый	Градиентный	Ступенчатый
Материал	Пластик	Кварц	Кварц	Кварц
⊘ сердцевины/ оболочки, мкм	1000/-	550/600	400/560	2.2/125
NA	0.47	0.22	0.29	0.2
Коэффициент затухания, дБ/м	0.22 (@660 нм)	0.01 (@660 нм)	0.01	0.065 (макс.)
Цена, \$/м на 2020г.	1	25	50	30

На рисунках 4.1а и 4.2 представлены результаты измерений полуширины сигналов при разных длинах отрезков исследуемых типов оптоволокон. Аппроксимация зависимостей была выполнена в соответствии с формулой (4.1). В результате измеренная дисперсия света наряду с расчетной величиной дисперсии для каждого типа оптоволокна приведена в таблице 4.

Для кварцевого оптоволокна на рисунке 4.2 приводится сравнение экспериментальных данных длительности выходного светового импульса при разной длине оптоволокна с данными численного моделирования. При этом измеренный временной вклад ФЭУ в результирующее уширение импульса, равный

примерно 3.5 нс, был добавлен к результатам численного моделирования. Экспериментальные данные для значения дисперсии находится в хорошем согласии с результатами численного моделирования.

Типичный вид сигналов ОДП для трех типов оптоволокон одинаковой длины показан на рисунке 4.1б. Сигналы были измерены одновременно тремя однотипными ФЭУ. С учетом поданного напряжения на каждый ФЭУ и их коэффициента усиления при данном напряжении питания, интенсивности сигналов с одномодового, градиентного и ступенчатого волокон соотносятся как 1:5:10. Однако, согласно полученной квадратичной зависимости числа фотонов от диаметра сердцевины кварцевого оптоволокна, $N_ф = 7.3 \cdot 10^{-6} d[мкм]^2$, интенсивность сигнала для одномодового оптоволокна с диаметром сердцевины 2.2 мкм должна быть на три порядка меньше, чем измеренная. Поскольку ввод излучения не осуществляется напрямую в сердцевину оптоволокна, весьма вероятно, часть излучения распространяется по оболочке, диаметр которой составляет 125 мкм. В таком случае интенсивность сигнала сопоставима с измеренной.



а) б)

Рисунок 4.1 — а) Измеренные полуширины сигналов для оптоволокон с разными показателями дисперсии в зависимости от их длины: кварцевое одномодовое, градиентное и пластиковое ступенчатое, б) Типичный вид сигналов для трех типов оптоволокон одинаковой длины

Несмотря на то, что исследованы относительно небольшие длины оптоволокон, экспериментальные данные для пластикового и кварцевого многомодового оптоволокон находится в хорошем согласии с аналитическими расчетами.

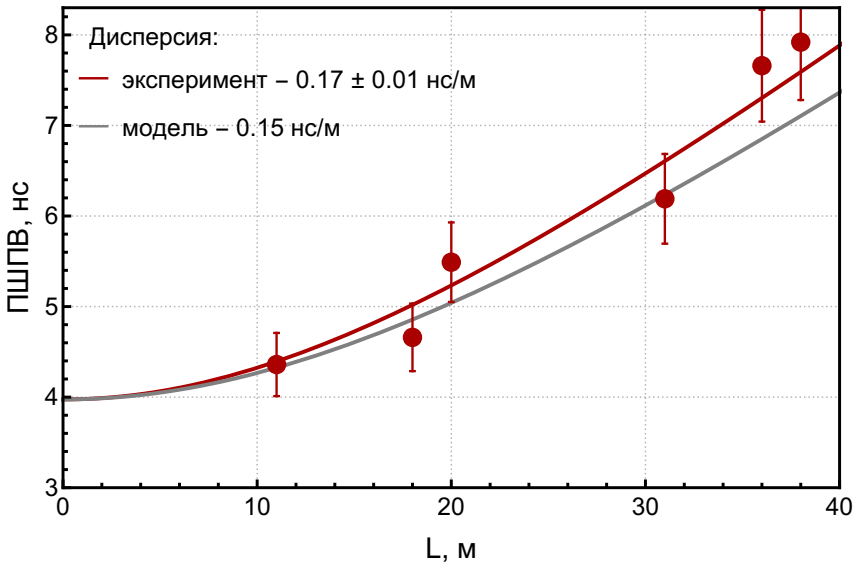


Рисунок 4.2 — Измеренные полуширины сигналов для кварцевого оптоволокна марки Thorlabs FG550UEC в зависимости от длины отрезка оптоволокна, серым – модельная функция

Таблица 4 — Расчетные и измеренные значения дисперсий для разных типов оптоволокон

Название	Broadcom, HFBR-RUS	Thorlabs, FG550UEC	Fiberware, G 400/560A	Fiberware, SM 400/125PI
Расчетная $t_{дис}/L$, нс/м	0.27	0.15	0.1	$\leqslant 0.1$
Измеренная $t_{дис}/L$, нс/м	0.24 ± 0.02	0.17 ± 0.01	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.03

Для одномодового оптоволокна значение дисперсии получилось завышенным примерно в два раза относительно аналитической оценки. Можно также предположить, что это связано с тем, что часть излучения распространяется по оболочке, подвергаясь модовой дисперсии, и не успевает затухнуть на столь короткой длине оптоволокна.

Как можно видеть из полученных экспериментальных данных, в кварцевых волокнах величина дисперсии меньше, чем в пластиковом. Показатель дисперсии и коэффициент затухания излучения в кварцевом оптоволокне позволяют использовать более длинные отрезки оптоволокна, чем в случае пластикового, для достижения предельно допустимого временного разрешения.

Если проводить сравнение исследуемых типов кварцевых оптоволокон, то основным недостатком одномодового оптоволокна является его малый диаметр, что делает его неудобным в эксплуатации, а основным недостатком градиентного волокна – его высокая цена по сравнению с другими. Поскольку для

одномодового и градиентного оптоволокон не наблюдается ожидаемого выигрыша в показателе дисперсии света, такие типы оптоволокон не подходят в качестве элемента ОДП с оптимальными параметрами.

Самым оптимальным вариантом среди кварцевых волокон с точки зрения дисперсии, затухания, прочности и стоимости является кварцевое многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Выбранный вариант обладает повышенным содержанием OH^- и имеет рабочий спектральный диапазон 250–1200 нм. Кроме того, его сердечник изготовлен из чистого кварца, а кварцевая оболочка легирована фтором, такое оптоволокно наиболее радиационно стойкое и, как указано в п.2.4.6, может эксплуатироваться до 10^7 Гр.

При выборе оптимального типа оптоволокна необходимо также сопоставлять стоимость. Высокая стоимость оптоволокна не всегда обоснована в случае, если одной из основных характеристик датчика потерь ставится его цена. Стоимость пластиковых оптоволокон на порядок меньше кварцевых. Поэтому в дальнейших экспериментах было использовано два типа: кварцевое и пластиковое многомодовые оптоволокна.

4.1.2 Дисперсия и затухание сигнала в пластиковом оптоволокне

Для пластикового многомодового оптоволокна со ступенчатым профилем показателя преломления были измерены значения дисперсии и коэффициента затухания ИВЧ. Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с результатами численного моделирования.

Для определения вклада дисперсии в уширение импульса и расчета коэффициента затухания ИВЧ в оптоволокне были проведены измерения потерь пучка в конце электронного линейного ускорителя ИК ВЭПП-5.

Пучок при помощи магнитного корректора направлялся в место расположения оптоволокна. Для эксперимента было выбрано пластиковое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления марки «Broadcom» (HFBR-RUS) с диаметром сердцевины – 1 мм, $NA = 0.47$, $n = 1.49$ и коэффициентом затухания – 0.22 дБ/м на длине волны 660 нм. Световой сигнал регистрировался при помощи ФЭУ на МКП с торца оптоволокна, расположенного по направлению движения пучка.

Измерения были проведены для разных длин оптоволокна путем создания петель в ожидаемом месте потери пучка. Таким образом, вспышка излучения от одного события проходила разные расстояния по оптоволокну. Одна из таких осциллограмм представлена на рисунке 4.3 для отрезков оптоволокна длиною 2, 9, 19 м. По горизонтальной оси отложено время прихода сигнала на ФЭУ, чем больше время, тем большее расстояние проходит световой импульс. На этом рисунке виден спад уровня сигнала с ростом длины оптоволокна, а также уширение сигнала в следствие дисперсии.

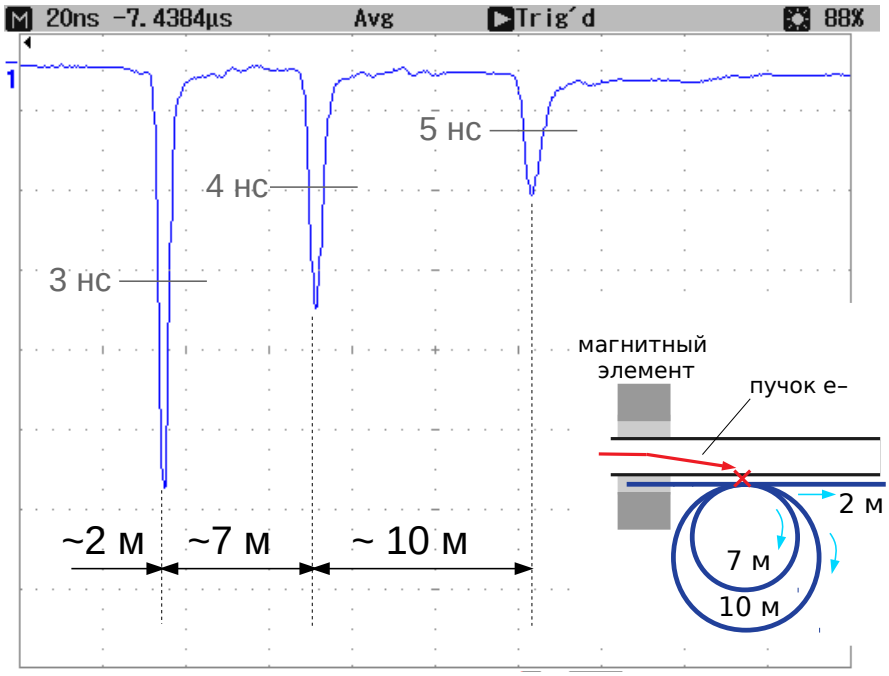


Рисунок 4.3 — Осциллограмма потери пучка в случае петель из оптоволокна и схематическое изображение этих петель в месте потери пучка

На рисунке 4.4а представлены экспериментальные данные и данные численного моделирования полуширины выходного сигнала при разных длинах отрезка оптоволокна. При этом измеренный временной вклад ФЭУ в результирующее уширение импульса, равный примерно 3.5 нс, был добавлен к результатам численного моделирования дисперсии света в оптоволокне. Дисперсия света в оптоволокне в результате аппроксимации формулой (4.1) равна 0.23 ± 0.01 нс/м и свидетельствует о преобладании модовой дисперсии в пластиковом оптоволокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Экспериментальные данные для дисперсии находится в хорошем согласии с результатами численного моделирования. Также можно сделать вывод, что для оптоволокна длиною более 20 м временные разрешения ФЭУ и электроники

незначительны по сравнению с вкладом дисперсии и зависимость от длины оптоволокна становится линейной.

На рисунке 4.4б представлены экспериментальные данные относительной интенсивности выходного светового сигнала при разных длинах отрезка оптоволокна. При прохождении света по оптоволокну длиной 15 м, световой сигнал уменьшается на 70 %, в основном за счет кабельных потерь (скрутка, деформация, изгиб волокон). Путем аппроксимации экспериментальных данных, получен коэффициент затухания, равный 0.33 ± 0.03 дБ/м. Это значение немного больше указанного в спецификации, т.к. спектр черенковского излучения смещен в УФ область, где затухание излучения происходит сильнее.

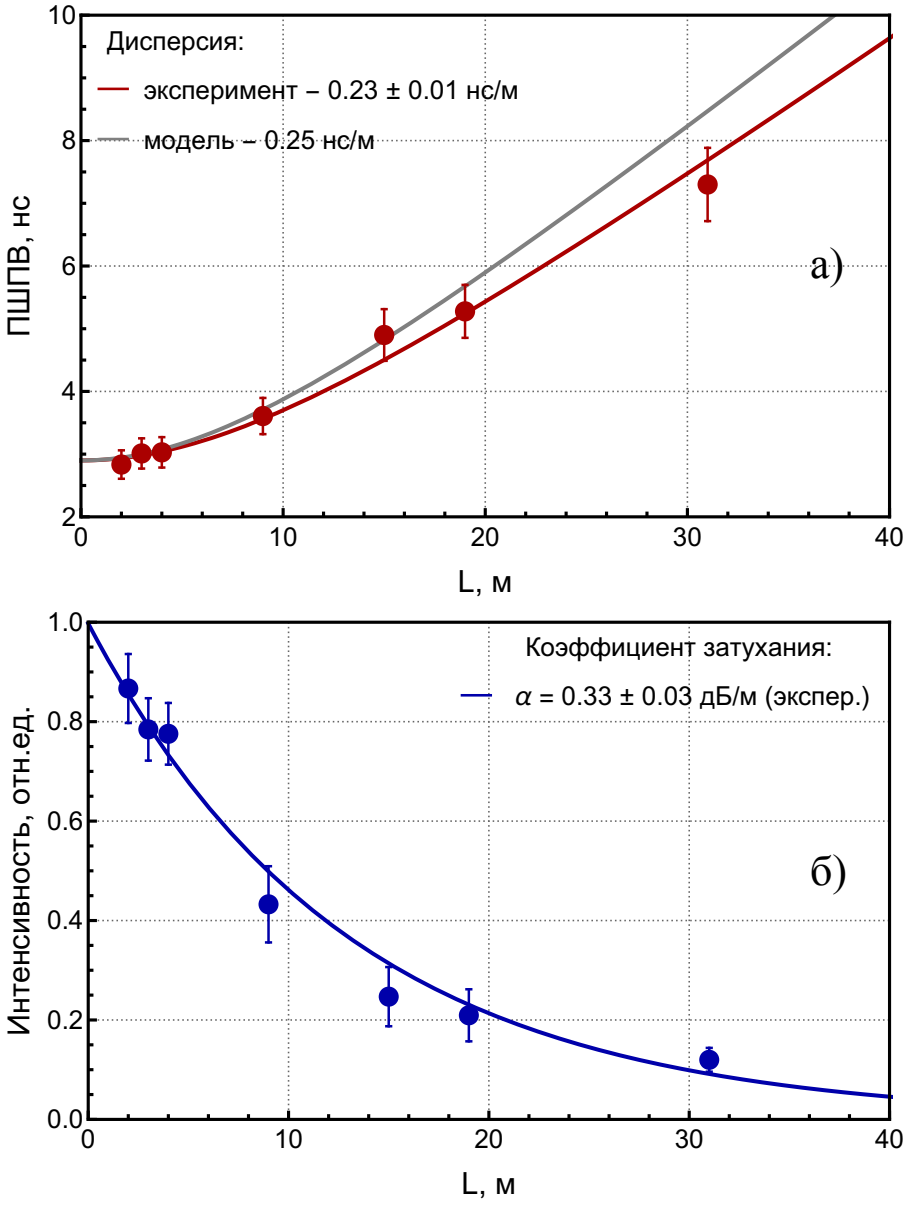


Рисунок 4.4 — а) Измеренные полуширины сигналов с ФЭУ при разных длинах пластикового многомодового оптоволокна, серым – модельная функция; б) Измеренные интенсивности сигналов с ФЭУ при разных длинах оптоволокна

4.1.3 Измерение пропускной способности облученного пластикового оптоволокна

Как описано в п.2.4.6, эксплуатация оптоволокна в условиях радиации приводит к росту затухания передаваемых оптических сигналов. До сих пор не существует точной модели, которая могла бы предсказать влияние различных доз радиации на свойства и качество работы оптоволокна, потому как природа многочисленных ядерных эффектов, происходящих в оптоволокне под действием ионизирующего излучения, до конца не изучена. В работе [72] приведены результаты измерения коэффициента затухания некоторых марок оптических волокон под действием высоких мощностей доз радиации и при длительном времени облучения. Однако данные значения доз сильно отличаются от тех, которые характерны для ИК ВЭПП-5.

Радиационную стойкость оптоволокна можно вычислить, только проведя его тестирование в заданных условиях, экстраполяция полученных данных крайне ненадежна. Поскольку пластиковое оптоволокно на протяжении нескольких лет эксплуатировалось на ИК ВЭПП-5 в качестве различных прототипов ОДП, то можно измерить рост оптических потерь под действием радиации за этот период времени.

Были протестированы шесть отрезков оптоволокон длиною 10 м, которые облучались при мощности дозы до 10 мЗв/час ($\sim$ 100 Гр/год) различный период времени, и было протестировано одно необлученное оптоволокно. В качестве тестового источника света использовалась галогеновая лампа с монохроматором, длина волны выделенного монохроматором излучения была выбрана 400 нм (фиолетовый свет), 470 нм (синий) и 550 нм (зеленый). Излучение вводилось в один из торцов оптоволокна и регистрировалось при помощи фотодиода Hamamatsu S1227-1010BQ.

На рисунке 4.5 показан коэффициент передачи излучения для разных длин волн излучения в зависимости от срока эксплуатации оптоволокна. Коэффициент передачи – безразмерная величина и равен отношению потока фотонов, проходящего через облученное оптоволокно, к потоку, проходящему через необлученное.

Как можно видеть из рисунка, чем меньше длина волны излучения, тем сильнее оно подвергается затуханию, вызванного радиацией. Это утверждение

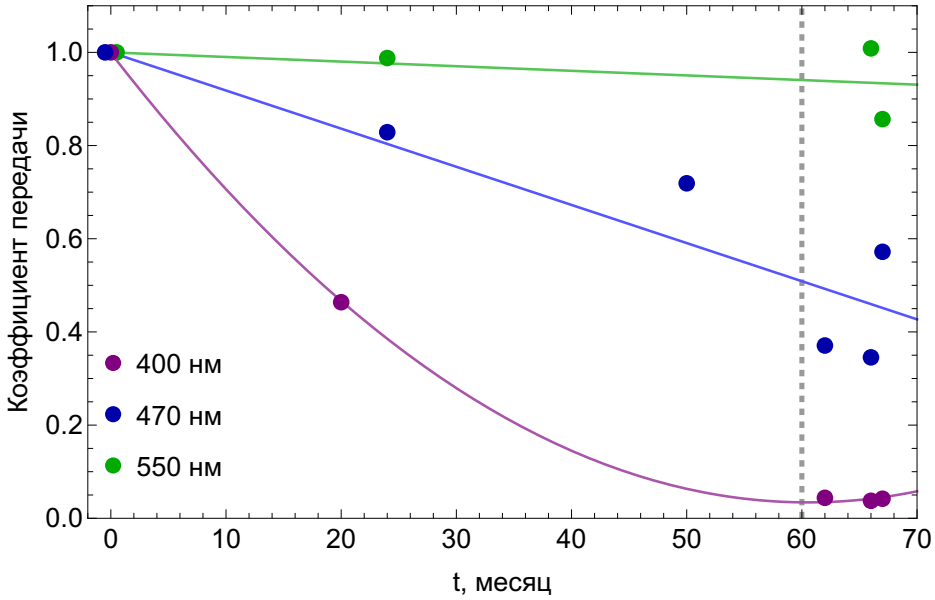


Рисунок 4.5 — Коэффициент передачи излучения по оптоволокну длиною 10 м для разных длин волн излучения в зависимости от срока эксплуатации оптоволокна

верно как для пластикового, так и для кварцевого оптоволокна. Например, за 5 лет использования оптоволокна (пунктирная линия) в типичном режиме работы ИК ВЭПП-5 коэффициент передачи излучения длиной волны 400 нм составляет всего около 0.05 (т.е. передается 5 % излучения от первоначального), для длины волны излучения 470 нм – 0.5, для длины волны 550 нм – 0.95, наблюдается слабое уменьшение передачи излучения.

Для того, чтобы оценить срок эксплуатации оптоволокна в радиационных условиях на ИК ВЭПП-5, необходимо вычислить полный коэффицент затухания излучения в оптоволокне, который определяется в виде суммы двух коэффицентов затухания:

$$\alpha_{полн} = \alpha_{рэл} + \alpha_{рад},$$

где $\alpha_{рэл}$ – коэффицент затухания за счет рэлеевского рассеяния, который был описан в п.2.5.3, $\alpha_{рад}$ – коэффицент затухания за счет радиации.

Например, выбрав срок эксплуатации оптоволокна, равный пяти годам, можно вычислить величину коэффициента затухания $\alpha_{рад}$ в зависимости от длины волны излучения в выбранный момент времени. Коэффицент затухания за счет радиации можно оценить на основе экспериментальных данных, представленных на рисунке 4.5.

На рисунке 4.6 показаны сдвиги спектров излучения ИВЧ после прохождения света по пластиковому оптоволокну разной длины, облученного мощностью дозы ~ 100 Гр/год в течение пяти лет, относительно необлученного случая. Видно, что вклад радиации в полный эффект затухания излучения в оптоволокне спадает с ростом длины отрезка, поскольку чем длиннее используемый отрезок оптоволокна, тем меньше по нему переносится излучения в области ближнего УФ за счет рэлеевского рассеяния, для которого $\alpha_{рад}$ максимален.

Интегрирование по диапазону длин волн от 300 до 700 нм дает световыход на торце для заданной длины отрезка оптоволокна. Например, для длины отрезка оптоволокна, равной 10 м, интенсивность светового сигнала под действием радиации падает на 30 %, для 50 м – на 20 %.

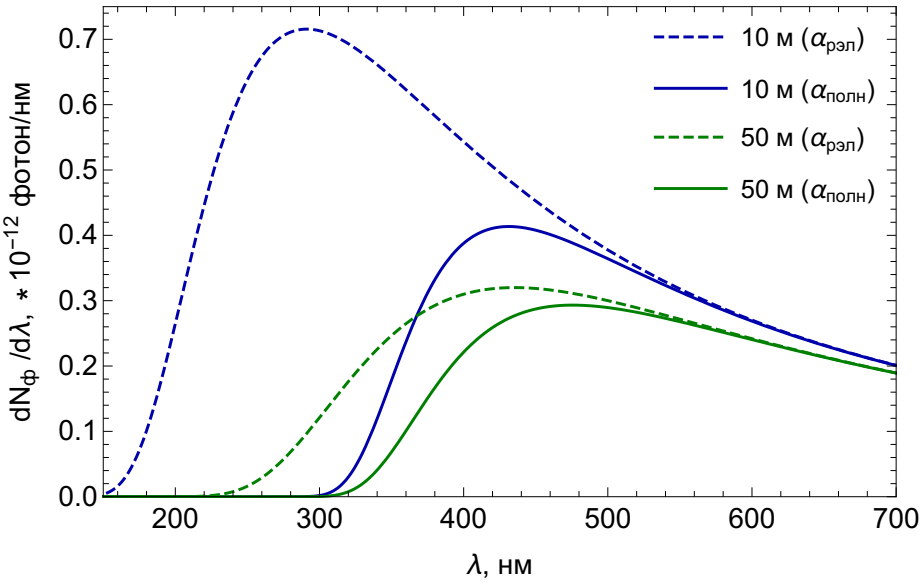


Рисунок 4.6 — Влияние радиации на затухание спектра ИВЧ в оптоволокне длиною 10 м (синим) и 50 м (зеленым). Пунктирными линиями показан спектр остаточного излучения под действием рэлеевского рассеяния, сплошными линиями – с учетом затухания за счет радиации

Таким образом, можно сделать вывод, что на ИК ВЭПП-5 пластиковое оптоволокно можно эксплуатировать около пяти лет, при этом уровень сигнала падает не более, чем на треть. При больших сроках эксплуатации оптоволокно становится хрупким и ненадежным в использовании.

4.2 Выбор оптимального ФЭУ

Сигнал с оптоволокна регистрируется при помощи фотодетектора. В качестве фотодетектора в датчиках потерь пучка часто используют ФЭУ. В данном пункте рассмотрены основные характеристики ФЭУ и показаны результаты сравнения временных характеристик разных типов ФЭУ.

Основными параметрами ФЭУ, влияющими на форму сигнала, являются квантовая эффективность фотокатода, его спектральная характеристика, коэффициент усиления динодной системы, тип конструкции динодов, а также материал окна ФЭУ.

Квантовая эффективность фотокатода $\varepsilon_{фк}$ показывает какая часть от падающих на фотокатод фотонов преобразуется в фотоэлектроны. Для оценки среднее число фотоэлектронов можно представить как:

$$\langle N_{фэ} \rangle \approx \langle N_{ф} \rangle \langle \varepsilon_{фк} \rangle.$$

Изменение квантовой эффективности от длины волны падающего на фотокатод излучения называется спектральной характеристикой и определяет рабочую область длин волн [73]. Помимо фотокатода спектральный отклик ФЭУ определяет также его входное окно, т.к. оно может быть изготовлено как из боросиликатного, так и кварцевого стекла, первый вариант не пропускает УФ спектр излучения. На рисунке 4.7 представлена зависимость квантовой эффективности фотокатодов от длины волны излучения для различных материалов.

Наиболее важной характеристикой ФЭУ является коэффициент усиления вторично-эмиссионных электронов $K_{ус}$. У промышленных ФЭУ коэффициент усиления составляет 10^5–10^8 и весьма чувствителен к изменению напряжения источника питания. Для обеспечения постоянства коэффициента усиления с точностью 1 % необходима стабильность напряжения 0.1 % [71].

При чрезмерном повышении напряжения питания ФЭУ начинает сказываться объемный заряд электронного облака на конечных стадиях размножения, что приводит к насыщению коэффициента усиления и нелинейности ФЭУ [74]. Максимум вторичной эмиссии для обычных динодных ФЭУ достигается при напряжениях около 1–2 кВ, для ФЭУ на МКП – при 3 кВ. При этом амплитуда сигнала может достигать минус 10 В (при нагрузке 50 Ом), при меньших значениях амплитуды линейность работы ФЭУ нарушена.

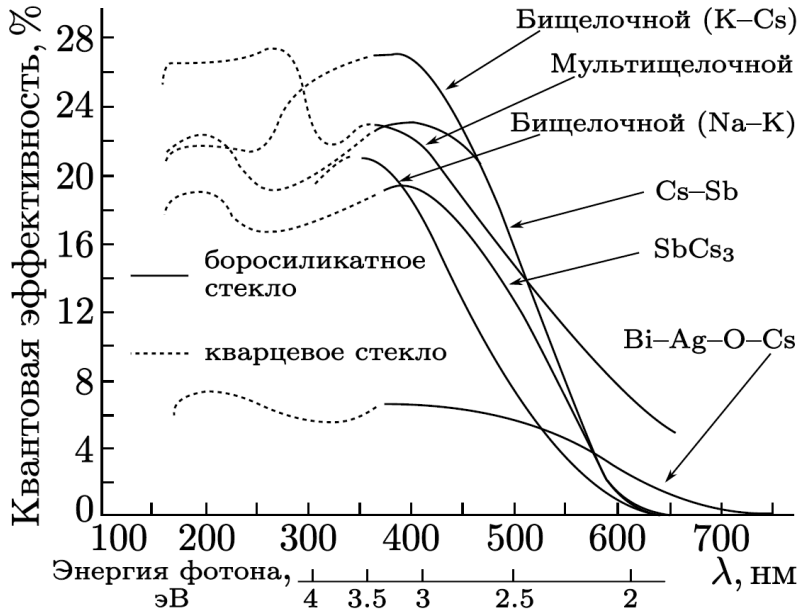


Рисунок 4.7 — Квантовая эффективность различных фотокатодов с учетом материалов входного окна ФЭУ [71]

Снимаемое выходное напряжение с анода прямо пропорционально числу вторично-эмиссионных электронов, проинтегрировав сигнал с ФЭУ по времени, можно вычислить их среднее число за импульс:

$$N_{вээ} = \frac{\int |U_a| dt}{eR_a}, \tag{4.2}$$

где U_a – значение напряжения, снимаемое с анода, e – заряд электрона, R_a – сопротивление нагрузки, в нашем случае $R_a = 50$ Ом.

По типу конструкций динодов ФЭУ подразделяются на ФЭУ с корытообразными, с торовидными динодами, с динодами типа «жалюзи», микросеточные диноды и микроканальные пластины (МКП) [74–77].

К ФЭУ, которые используются для детектирования ИВЧ, предъявляются особые требования к их временным характеристикам ввиду малых постоянных высвечивания ИВЧ $< 10^{-10}$ сек [30]. Временное разрешение ФЭУ характеризуется разбросом времени пролета вторично-эмиссионных электронов в ФЭУ при образовании сигнала одним фотоэлектроном. Временное разрешение дискретно-динодных ФЭУ для сигнала от одного фотоэлектрона составляет 2.5 нс, ФЭУ с микросеточными динодами – 100 пс, ФЭУ на МКП – 35 пс [78–80]. Время задержки сигнала в обычных динодных ФЭУ близко к 30 нс, в то время как в ФЭУ на МКП – меньше 1 нс, за счет его малых габаритов и, как следствие, уменьшения суммарной протяженности траекторий электронов при их умножении.

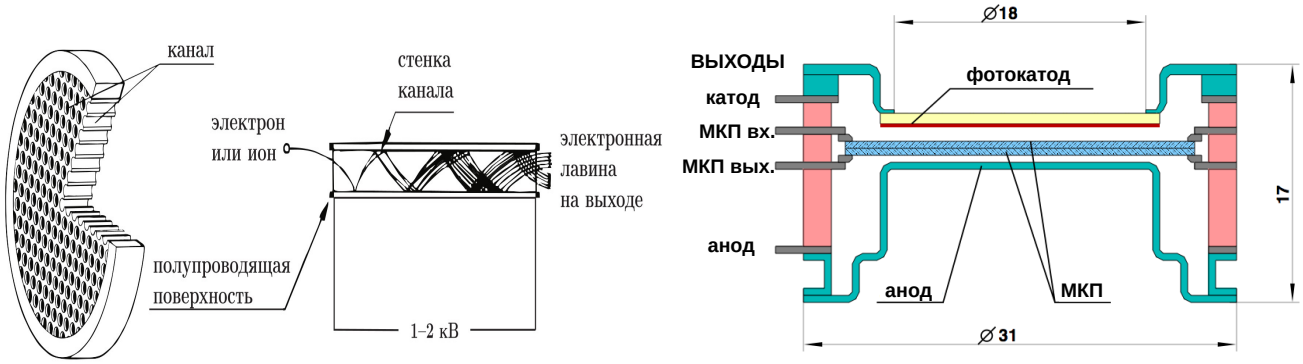
Помимо хорошего временного разрешения ФЭУ на МКП обладает малой деградацией коэффициента усиления в магнитном поле. Например, при 1.5 Тл коэффициент усиления падает в 3–5 раз [81], в то время как у ФЭУ с микросеточными динодами он падает в 10^3 раз [71], у прочих типов ФЭУ коэффициент усиления уменьшается в два раза уже при величине поля $\sim$ 0.1–1 мТл [74]. Таким образом, ФЭУ на МКП возможно использовать вблизи магнитных элементов ускорителей заряженных частиц без необходимости магнитной экранировки.

В качестве детектора излучения, мы выбрали ФЭУ на МКП, по причине его хорошего временного разрешения и слабой чувствительности к магнитному полю.

4.2.1 ФЭУ на микроканальных пластинах

ФЭУ на МКП имеют малые габариты, диаметр пластин варьируется от нескольких миллиметров до 10 см, а толщина составляет менее 1 мм. Сотовые структуры пластин, образуются большим числом стеклянных трубок (каналов) диаметром 5–15 мкм, как изображено на рисунке 4.8а.

Поскольку на одной пластине нельзя получить коэффициент усиления больше, чем 10^4 за счет ионной обратной связи, используют, как правило, две МКП, как показано на рисунке 4.8б. При такой конфигурации удается получить коэффициент 10^6 [71].



а) б)

Рисунок 4.8 — а) Конструкция и принцип работы МКП, б) Схематический вид ФЭУ на двух МКП

Для ОДП на ИК ВЭПП-5 были выбраны ФЭУ на МКП совместного производства АО «Катод» и ЗАО «Экран» (г. Новосибирск). Его основные параметры приведены в таблице 5. Для двух однотипных ФЭУ на МКП была проведена калибровка коэффициента усиления при однофотонных импульсах. На рисунке 4.9 для каждого ФЭУ представлена зависимость коэффициента усиления от напряжения питания ФЭУ.

Таблица 5 — Основные параметры исследуемых ФЭУ

Название	ФЭУ на МКП	ФЭУ-87
Тип умножительной системы	Микроканальный	Динодный
Тип фотокатода	Мультищелочной	Мультищелочной
Квантовая эффективность, $\varepsilon_{фк}$	23 %	23 %
Спектральный диапазон работы	300–600 нм	300–600 нм
Типовой коэффициент усиления, $K_{ус}$	10^6	10^6
Темновой ток при $K_{ус} = 10^6$	< 1 нА	100 нА

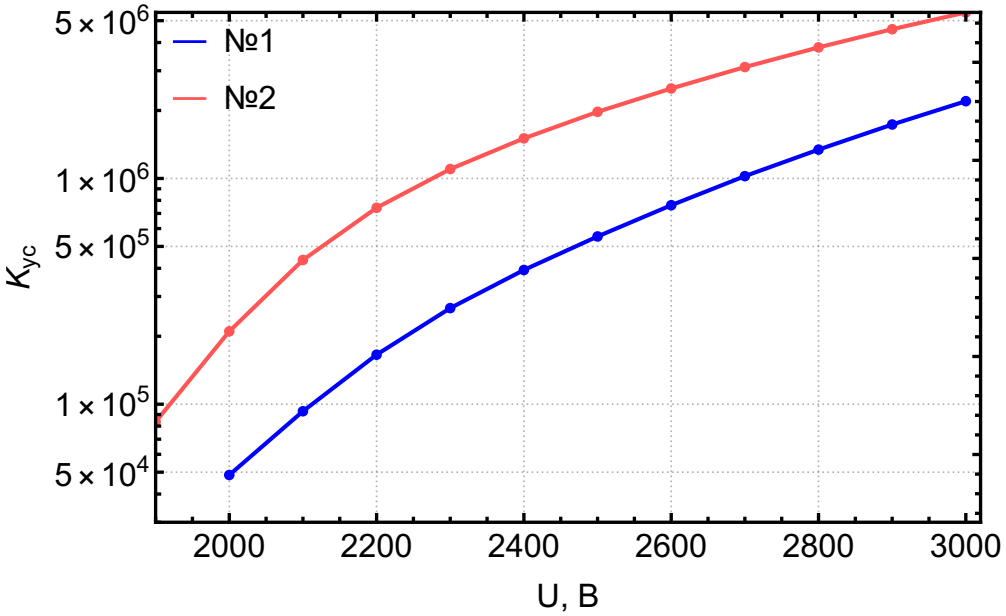


Рисунок 4.9 — Зависимость коэффициента усиления от напряжения питания двух однотипных ФЭУ на МКП

В одноэлектронном режиме работы ФЭУ на МКП были изучены его временные характеристики такие, как длительность фронта нарастания и длительность импульсной характеристики на полувысоте.

На рисунке 4.10а показана форма сигнала с ФЭУ на МКП при регистрации единичных фотонов. Время нарастания сигнала составляет 1 нс, оно

определяется как время изменения сигнала от 0.1 до 0.9 от его амплитуды. Полуширина сигнала составляет 3.2 нс. За счет более аккуратного измерения тока с анода ФЭУ длительность сигнала можно уменьшить до 1.5 нс [82].

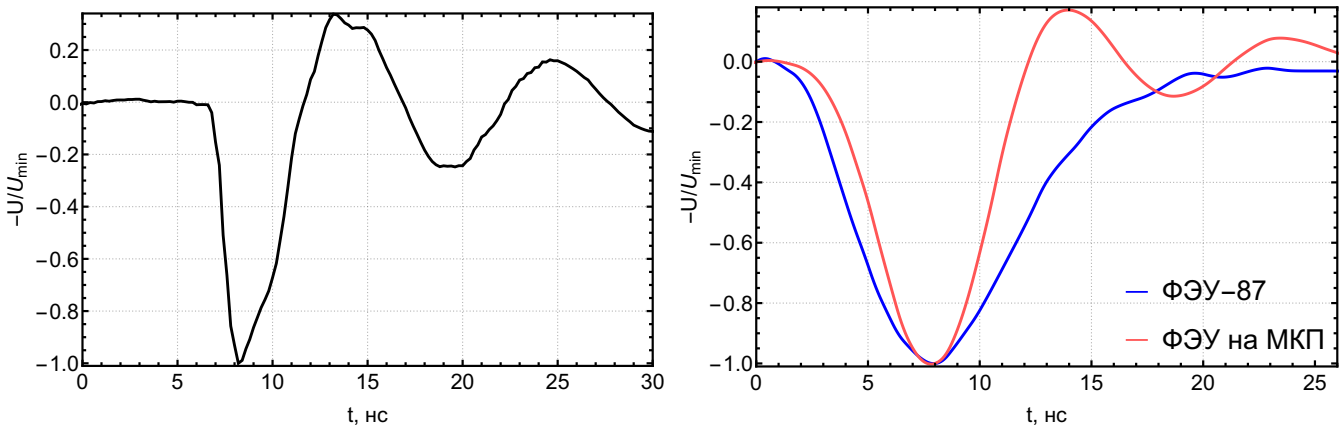
Когда на ФЭУ подается короткий световой импульс, происходит возбуждение контура между динодами, в результате чего после спада сигнала появляются колебания, как показано на рисунке 4.10а. Если форма импульса существенна, то частично ситуацию можно исправить, поставив дополнительное сопротивление в динодную цепь. Это уменьшит добротность контура и, следовательно, подавит колебания [71].

Для определения вклада детектора излучения в уширение импульса с ОДП были протестированы ФЭУ на МКП и ФЭУ-87, последний специально предназначен для временных измерений. Основные параметры ФЭУ-87 приведены в таблице 5. Оба фотодетектора имеют спектральный диапазон чувствительности фотокатода в максимуме спектра ИВЧ (300–600 нм).

Как было показано ранее, длительность анодного тока в случае регистрации единичных фотонов для ФЭУ на МКП составляет 3.2 нс, для ФЭУ-87, согласно документации, – не более 6 нс.

Датчик был установлен в конце электронного линейного ускорителя. Пучок при помощи магнитного корректора терялся на стенке вакуумной камеры в месте расположения оптоволокна. Излучение на ФЭУ приходило с пластикового оптоволокна длиною 15 м. Сигнал оцифровывался при помощи АЦП с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации 2 Гвыб/с.

На рисунке 4.10б представлены сигналы с ФЭУ на МКП и ФЭУ-87, полуширины импульсов составляют 5.1 нс и 8.3 нс, соответственно. Согласно нашим измерениям для данного пластикового оптоволокна, мы получили, что на длине 15 м дисперсия уширяет импульс на 3.6 нс (см. таблицу 4). Временной вклад АЦП составляет 0.5 нс. Тогда, используя формулу (4.1), можно оценить вклад ФЭУ в результирующее уширение импульса для ОДП: временной вклад ФЭУ на МКП составляет примерно 3.6 нс, ФЭУ-87 – 7.4 нс. ФЭУ-87 уширяет импульс в два раза больше, чем ФЭУ на МКП, поэтому не подходит в качестве детектора излучения для ОДП.



а) б)

Рисунок 4.10 — а) Форма сигнала с ФЭУ на МКП при регистрации единичных фотонов, б) Форма сигналов с ФЭУ-87 (синим) и ФЭУ на МКП (красным) в составе ОДП на ИК ВЭПП-5 при длине оптоволокна 15 м

4.2.2 Кремниевый ФЭУ

Помимо традиционных вакуумных ФЭУ в последнее время находит применение новый быстро развивающийся тип твердотельных умножителей – кремниевые микропиксельные лавинные фотодиоды (Si-ФЭУ) [80; 83–85]. В лавинных фотодиодах с пиксельной структурой каждый пиксель является счетчиком единичных фотонов в виде p-n-переходов, работающим в гейгеровском режиме. Выходной сигнал Si-ФЭУ представляет собой сумму сигналов со всех пикселей, сработавших при поглощении ими фотонов. На рисунке 4.11 представлена конструкция одного пикселя кремниевого фотоумножителя. В гейгеровском режиме сигнал от одного фотона, поступающий на нагрузку в 50 Ом, может составлять несколько вольт.

Таким образом, кремниевые фотоумножители представляют собой компактные детекторы, обладающие хорошими временными характеристиками (до 100 пс), высоким быстродействием и широким динамическим диапазоном, что позволяет регистрировать единичные фотоны. Коэффициент усиления варьируется от 10^5–10^7 и имеет малый разброс от пикселя к пикселю (около 10 %). Квантовая эффективность сравнима с характеристиками вакуумных ФЭУ и составляет 20–30 % в «голубом» диапазоне видимого излучения, 50 % – в «желто-зеленом» и 40 % – в «красном» [86].

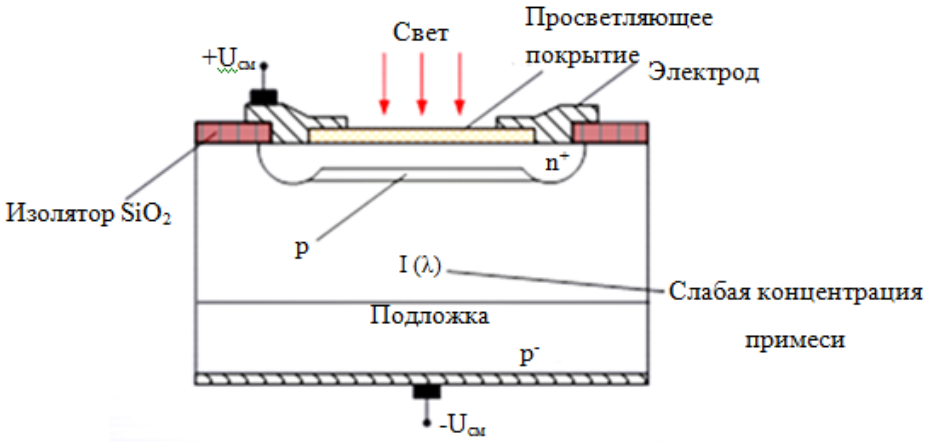


Рисунок 4.11 — Конструкция одного пикселя Si-ФЭУ

Помимо этого Si-ФЭУ нечувствительны к магнитному полю, работают от низкого напряжения питания < 100 В, а также значительно дешевле традиционных ФЭУ. Основными недостатками кремниевых фотоумножителей являются их высокий уровень собственных шумов (необходимо охлаждение) [87;88] и плохая радиационная стойкость [89].

В работе [90], выполненной Барняковым А.Ю. и др., были проведены сравнительные измерения временных характеристик Si-ФЭУ и ФЭУ на МКП. На рисунке 4.12 показаны формы сигналов с ФЭУ на МКП и Si-ФЭУ при регистрации потоков фотонов ИВЧ одинаковой интенсивности. Время нарастания сигнала у Si-ФЭУ хуже, чем у ФЭУ на МКП, при этом полуширина сигнала лучше, но теряется информация о форме импульса.

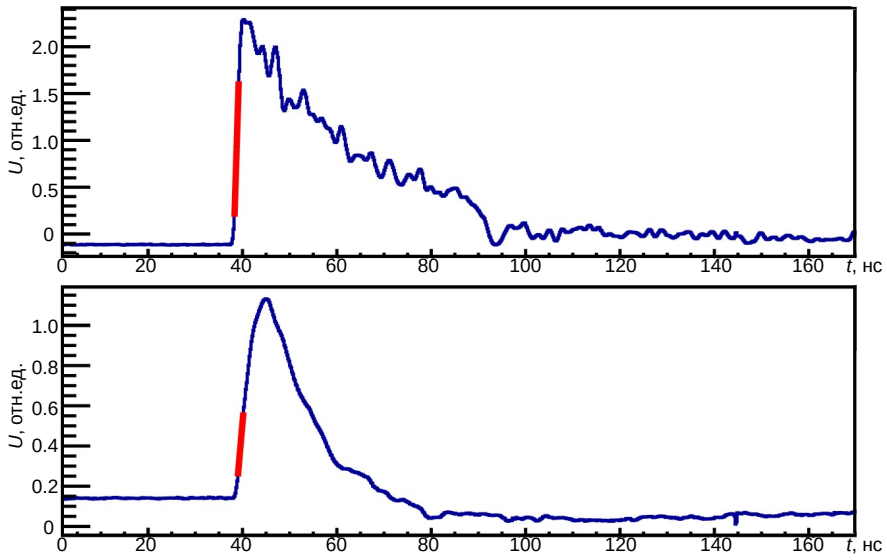


Рисунок 4.12 — Регистрация оптических сигналов ИВЧ одинаковой интенсивности при помощи: ФЭУ на МКП (сверху), Si-ФЭУ (снизу) [90]

Кремниевый фотоумножитель, наряду с ФЭУ на МКП, может также быть использован в качестве детектора ИВЧ для ОДП. Например, на австралийском синхротроне ASP в качестве фотодетектора для ОДП используют Si-ФЭУ марки «Hamamatsu» (s12572-015C).

4.3 Оцифровка сигнала

Для считывания сигналов, полученных с ФЭУ, необходимо выбирать АЦП, обладающий, главным образом, достаточной полосой пропускания и частотой дискретизации. Существует эмпирическое правило, согласно которому, чтобы произвести точные измерения (с погрешностью 5 %) аналоговых сигналов полоса пропускания АЦП должна в три раза превышать верхнюю частоту измеряемого сигнала, а для точного воспроизведения формы сигнала частота дискретизации должна быть в 4–5 раз больше полосы пропускания. Частота дискретизации определяет частоту выборки цифровых значений из аналогового сигнала. Исходя из теоремы Котельникова, если в случае непериодичных аналоговых импульсов период дискретизации больше полуширины импульса, то невозможно достоверно оцифровать полученный импульс. Соответственно, частота дискретизации АЦП вносит вклад в уширение выходного цифрового сигнала, полученного с датчика потерь пучка.

На рисунке 4.13 показаны типичные сигналы ОДП, оцифрованные тремя АЦП с разными полосами пропускания и частотами дискретизации. Для определения критерия разрешимости двух импульсов, воспользуемся случаем, когда импульсы гауссовой формы. Такие импульсы могут быть разрешены, если они расположенные на расстоянии ширины, а их суммарная огибающая обладает минимумом в центре и составляет 0.92 от амплитуды импульса с наименьшей амплитудой.

Таким образом, на рисунке 4.13 видно, что при частоте дискретизации 200 Мвыб/с (красным) два импульса, соответствующие потерям пучка от двух соседних магнитных элементов, не разрешены. При оцифровке сигналов с частотой дискретизации 250 Мвыб/с (синим) обе потери разрешены, но теряется существенная часть информации. Поэтому для точного измерения сигнала с

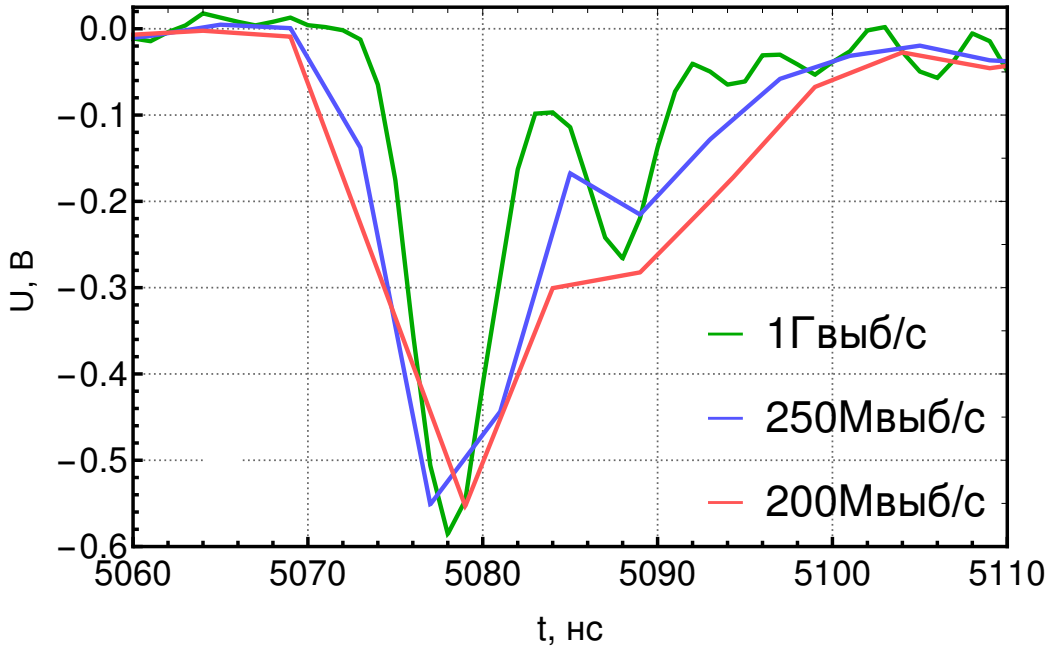


Рисунок 4.13 — Сигнал с датчика, оцифрованный АЦП с полосой пропускания и частотой дискретизации: 300 МГц и 1 Гвыб/с (зеленым), 80 МГц и 250 Мвыб/с (синим), менее 80 МГц и 200 Мвыб/с (красным)

ОДП следует использовать АЦП с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не менее 500 Мвыб/с.

4.4 Способы регистрации потерь

Наличие широкого углового распределения ЭЛ, в случае потери пучка на стенке вакуумной камеры, позволяет выделить несколько способов регистрации потерь пучка, используя один и более датчиков.

За счет ненулевого продольного распределения вторичных заряженных частиц, участвующих в генерации ИВЧ в оптоволокне, излучение распространяется по оптоволокну как в направлении движения пучка, так и в противоположном направлении. Поэтому световой сигнал можно регистрировать с обоих торцов оптоволокна. В данном пункте будет показано, что способ регистрации оптического излучения влияет на выбор оптимальной длины отрезка оптоволокна.

За счет ненулевого поперечного распределения ЭЛ по внешней поверхности вакуумной камеры, оптоволокно может быть расположено в любой точке по

ее периметру. А, используя несколько оптоволокон, можно повысить чувствительность ОДП. В случае расположения четырех оптоволокон, равноудаленных по периметру камеры, сигнал с которых регистрируется отдельными ФЭУ, можно определить место потери пучка в поперечной плоскости.

Также в рамках задачи оптимального способа регистрации потерь пучка рассмотрена эффективность ввода излучения из оптоволокна в ФЭУ при помощи оптического коллиматора.

4.4.1 Направление регистрации оптического сигнала

Вследствие широкого углового распределения заряженных частиц, проходящих сквозь оптоволокно, ИВЧ распространяется по оптоволокну как в направлении движения пучка (направление «1»), так и в противоположном направлении (направление «2»). Поэтому световой сигнал можно регистрировать с обоих торцов оптоволокна. Поскольку скорость движения пучка βc больше скорости распространения света в оптоволокне c/n, как показано на рисунке 4.14, то сигнал в случае близких друг к другу потерь, регистрируемый в направлении движения первичного пучка, сильнее подвергается межсимвольной интерференции и как следствие это влияет на пространственное разрешение ОДП.

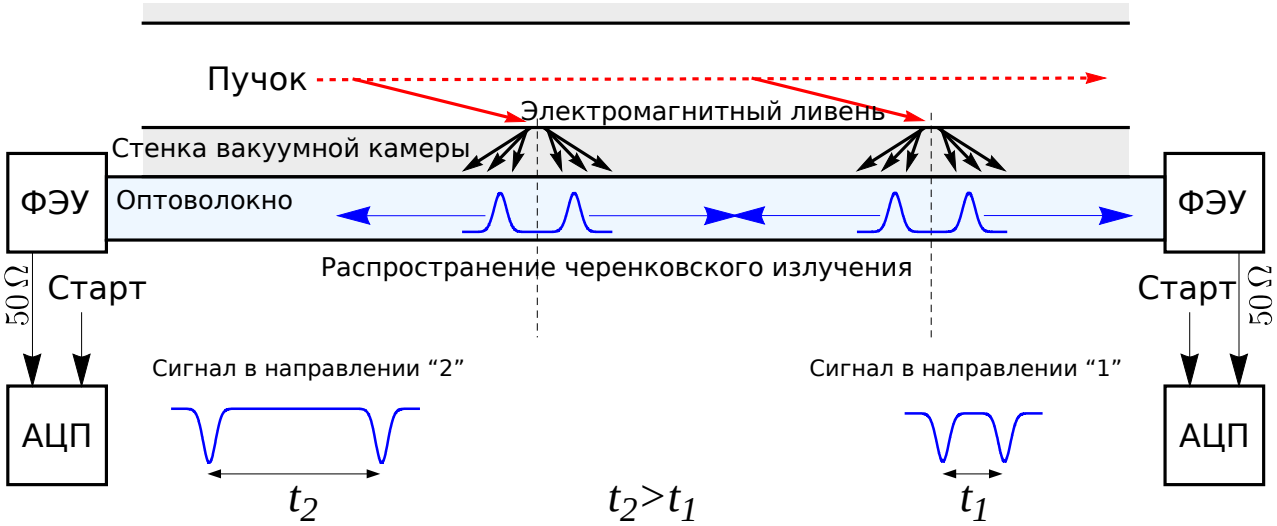


Рисунок 4.14 — Схема регистрации светового сигнала с обоих торцов оптоволокна в ОДП

За счет различия скорости пучка и скорости излучения в оптоволокне отношение пространственных разрешений датчика при регистрации сигнала с торца в направлении «1» и «2» можно выразить как:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{n+1}{n-1},$$

где s_1, s_2 – шаг дискретизации по координате при регистрации импульсов с торцов, расположенных по и против направления движения пучка, соответственно, n – показатель преломления среды сердцевины оптоволокна, $n \approx 1.5$.

Таким образом, пространственное разрешение датчика при регистрации сигнала, распространяющегося в направлении «2», примерно в пять раз лучше, чем разрешение датчика при регистрации сигнала по направлению «1». При этом, согласно численной модели, интенсивность сигнала в направлении «2» будет на порядок меньше интенсивности сигнала в направлении «1».

Полученные в эксперименте распределения потерь электронного пучка при регистрации с двух торцов кварцевого многомодового оптоволокна представлены на рисунке 4.15. Регистрация сигнала, распространяющегося в направлении «2», позволяет получить информацию о трех существенных местах потерь пучка. В то время как сигнал с противоположного торца дает информацию только о двух местах потерь, при этом пик «Г» является комбинацией потерь «Б» и «В», которые неразличимы вследствие межсимвольной интерференции света в оптоволокне. Полуширина пика «Г» составляет 3.8 м при пройденной импульсом длине оптоволокна 31 м, а пика «Б» – 0.9 м при пройденной длине оптоволокна 19 м.

Таким образом, регистрация сигнала, распространяющегося в направлении «2», дает в 4 раза лучшее пространственное разрешение датчика, по сравнению регистрацией сигнала в направлении «1». С учетом разницы коэффициентов усиления ФЭУ, интенсивность сигнала при этом на порядок меньше. Оба эти вывода согласуются с результатами аналитических расчетов и численного моделирования.

При регистрации светового импульса в направлении «2» с учетом рассчитанной в п.4.1.1 дисперсии излучения для разных типов оптоволокон, можно определить оптимальную длину отрезка оптоволокна с точки зрения требуемого пространственного разрешения. Для пластикового оптоволокна оптимальная длина, при которой пространственное разрешение ОДП не хуже 1 м, составляет примерно 30 м, для многомодового кварцевого – 40 м.

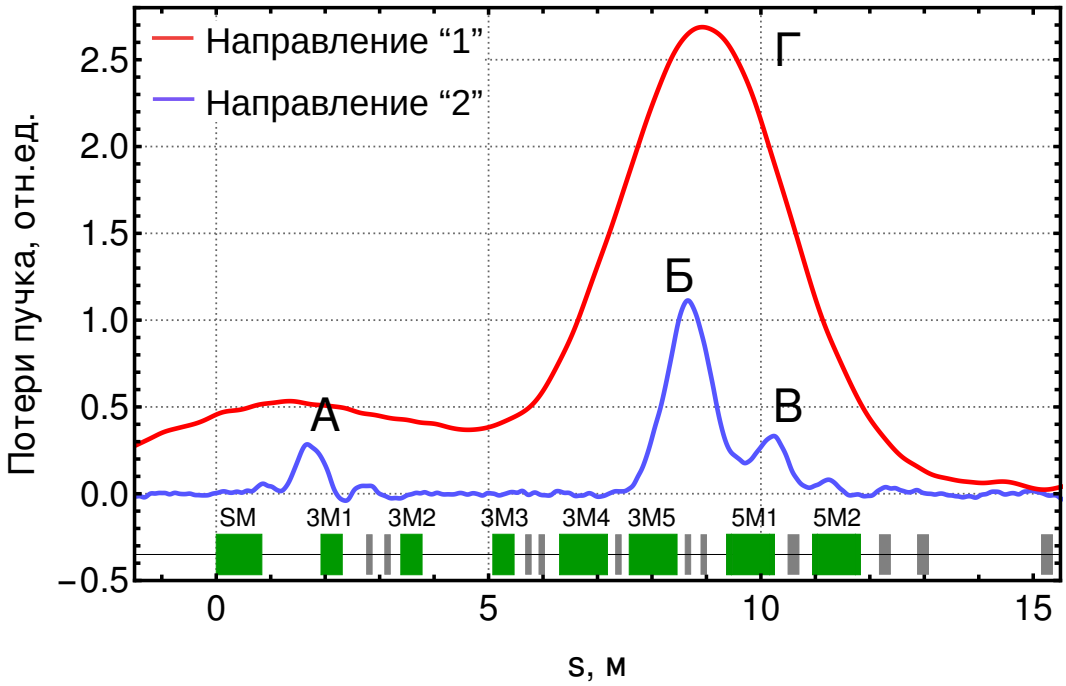


Рисунок 4.15 — Потери пучка электронов, полученные с двух торцов кварцевого многомодового оптоволокна: синим – с торца, расположенного в направлении «2», красным – в направлении «1»

4.4.2 Комбинация из четырех датчиков

Наличие ненулевого поперечного распределения ЭЛ по внешней поверхности вакуумной камеры, описанное в п.3.6, позволяет регистрировать потери пучка при помощи нескольких датчиков, расположеных в разных точках по периметру вакуумной камеры.

Как было показано на рисунке 3.4 при помощи численного моделирования, поперечное распределение вторичных частиц неоднородно и имеет максимум в месте потери пучка. Используя несколько оптоволокон, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, можно не только повысить чувствительность ОДП, но и определить место потери пучка в сечении вакуумной камеры.

Для того, чтобы наглядно в этом убедиться, были проведены измерения потерь пучка для четырех оптоволокон, которые были расположены сверху, снизу, слева и справа на поверхности вакуумной камеры, как показано на рисунке 4.16. Чтобы исключить влияние коэффициентов усиления разных ФЭУ на амплитуду сигнала, сигналы со всех четырех оптоволокон попеременно измерялись одним ФЭУ. Поскольку измерения проводились в коротком временном

интервале, параметры пучка существенно не изменились. Для большей достоверности сигналы с каждого датчика были усреднены по пяти измерениям потерь пучка.

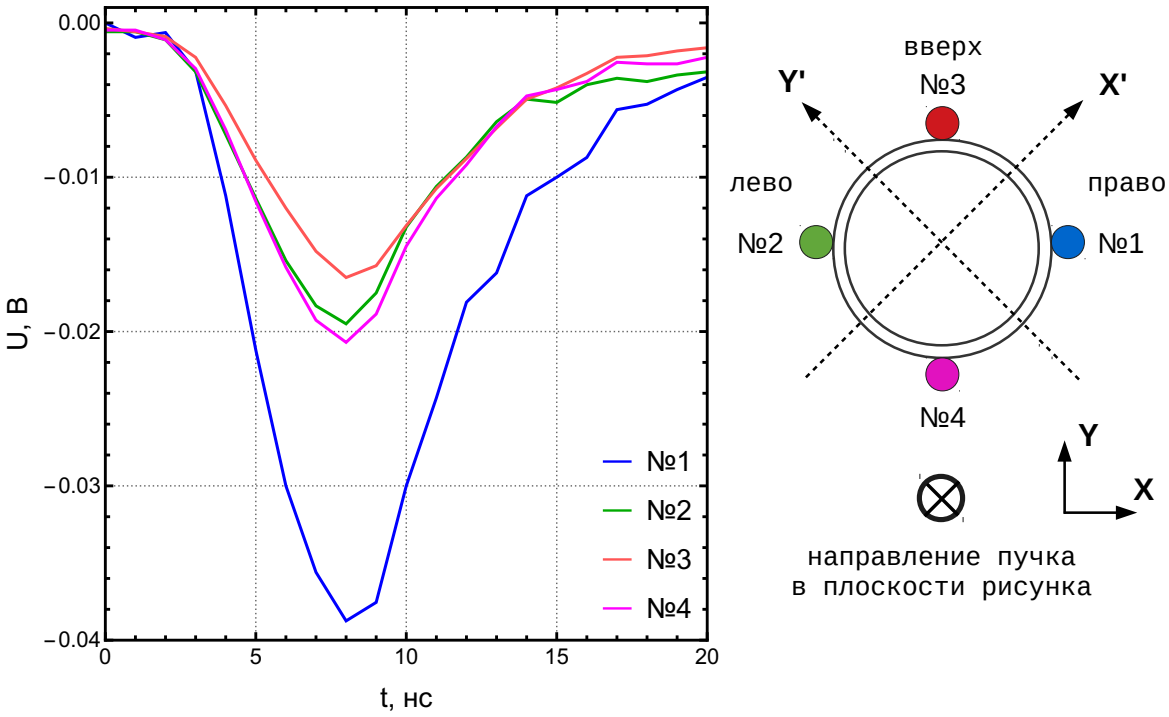


Рисунок 4.16 — Сигналы ФЭУ, полученные с четырех оптоволокон при потере пучка электронов путем его отклонения вправо и схема расположения оптоволокон на вакуумной камере относительно направления движения пучка

При помощи горизонтального магнитного корректора пучок был отклонен вправо относительно его направления движения, полученные при этом сигналы с четырех датчиков показаны на рисунке 4.16. Видно, что сигнал датчика, расположенного в направлении потери пучка, имеет наибольшую амплитуду. В то время как амплитуды сигналов других датчиков примерно одинаковые.

Используя все четыре сигнала с датчиков, можно вычислить сигналы двух огибающих:

$$X' = \frac{|U_1 + U_3| - |U_2 + U_4|}{const},$$

$$Y' = \frac{|U_2 + U_3| - |U_1 + U_4|}{const}.$$

На рисунке 4.17 приведены сигналы огибающих X' и Y', экстремумы которых соответствуют значениям абсциссы и ординаты на тригонометрическом круге с осями $X'Y'$, соответственно. По отношению значений амплитуд

огибающих можно определить угол наклона теряемого пучка в поперечной плоскости относительно его направления движения. Значение угла равно $\alpha = \operatorname{arctg} Y'/X' \approx -55°$. Если перейти к привычным осям, то получается, что в плоскости XY пучок был отклонен горизонтальным корректором вправо, что соответствует действительности. И место потери находится на 10° ниже горизонтальной оси, как изображено на рисунке. Используя ОДП во время первичной проводки пучка, достаточно определять места потерь на поверхности вакуумной камеры с точностью до квадранта.

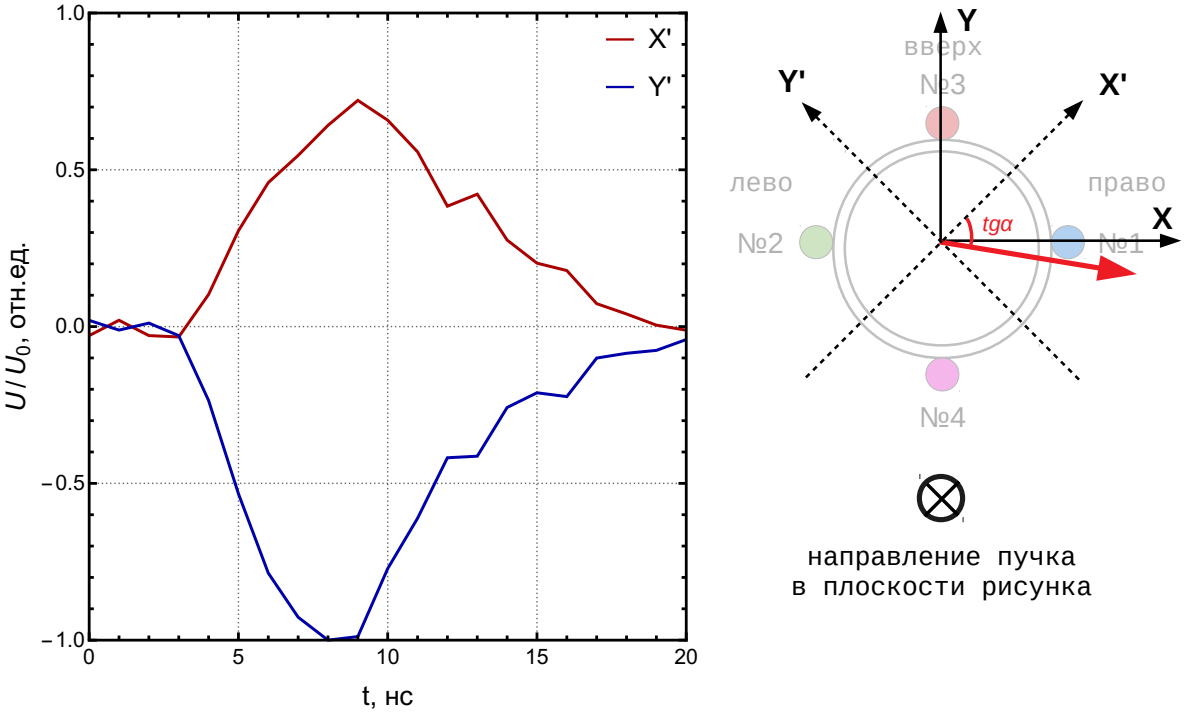


Рисунок 4.17 — Огибающие сигналов с четырех ФЭУ, полученные при потере пучка электронов путем его отклонения вправо и схематичное изображение полученного места потери пучка

4.4.3 Вывод излучения посредством коллиматора

Эффективность ввода излучения с торца оптоволокна в фотодетектор, которым служит ФЭУ, зависит от угловой апертуры выходящих из оптоволокна лучей, способа ввода излучения в ФЭУ, зазора между оптоволокном и ФЭУ и от диаметра рабочей поверхности фотоприемника (у ФЭУ это фотокатод). Существует два способа оптической связи ФЭУ с оптоволокном: самый простой

и надежный – через воздушный зазор или можно использовать оптическую смазку для лучшего оптического контакта, т.к. путем установки необходимого показателя преломления смазки, существует возможность получать необходимые углы преломления света при входе в ФЭУ.

В простейшем случае с воздушным зазором расстояние между выходным торцом оптоволокна и поверхностью фотокатода ФЭУ должно выбираться таким образом, чтобы на рабочую площадь ФЭУ попадали фотоны, выходящие из оптоволокна в пределах угловой апертуры, как показано на рисунке 4.18а. Синус апертурного угла выходящего с торца конического светового луча определяется по закону Снелла как:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_c}{n_0} \sin \alpha_{max},$$

где α_0 – апертурный угол, угол между крайним лучом конического светового пучка на выходе из оптоволокна и его осью, n_0 – показатель преломления воздуха, $n_0 = 1$.

Соответственно, максимально допустимая длина зазора, необходимая для ввода излучения из оптоволокна, испущенного в пределах угловой апертуры, в зависимости от радиуса рабочей площади фотокатода ФЭУ $r_{фк}$ можно записать как:

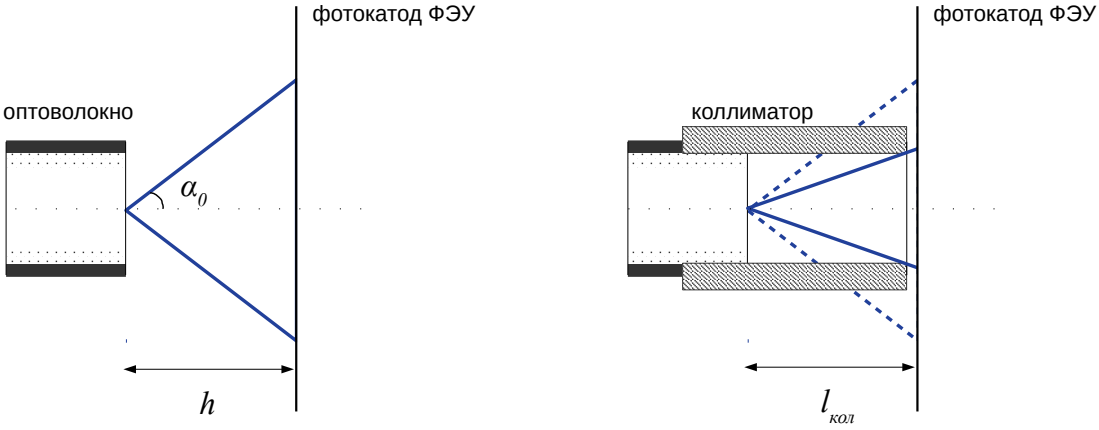
$$h = r_{фк} \sqrt{\frac{1}{{n_c}^2 \sin^2 \alpha_{max}} - 1}. \tag{4.3}$$

Например, для пластикового оптоволокна $h \approx 2r_{фк}$. У ФЭУ на МКП радиус рабочей площади фотокатода составляет 9 мм, следовательно, максимально допустимое расстояние от ФЭУ до выходного торца оптоволокна для полного ввода излучения составляет примерно 20 мм.

В случае, когда необходимо уменьшить временной разброс светового импульса, вызванный модовой дисперсией, на выходе из оптоволокна можно установить коллиматор, который вырезает часть излучения, распространяющееся под большими углами относительно оси оптоволокна, тем самым уменьшая вклад модовой дисперсии света.

В простейшем случае коллиматор представляет собою полый цилиндр с неотражающими стенками, который устанавливается на очищенный от защитной оболочки конец оптоволокна, как изображено на рисунке 4.18б. Диаметр отверстия коллиматора равен диаметру оболочки оптоволокна, изменяя длину

коллиматора, можно регулировать длительность и интенсивность выходного светового сигнала.



а) б)

Рисунок 4.18 — а) Воздушный зазор между оптоволокном и ФЭУ, б) коллиматор оптического излучения

Для определения длины коллиматора подходит формула (4.3), описывающая длину воздушного зазора, где радиус фотокатода $r_{фк}$ заменяется на радиус коллиматора. Тогда зависимость модовой дисперсии света в оптоволокне из формулы (2.6) от длины коллиматора можно оценить как:

$$\frac{t_{мод}}{L} \approx \frac{1}{cn_c} \frac{1}{1 + 4{l_{кол}}^2/{d_{кол}}^2},$$

где $l_{кол}$ – длина коллиматора, $d_{кол}$ – диаметр отверстия коллиматора.

Зависимость длительности и интенсивности выходного светового сигнала от длины коллиматора была экспериментально исследована на электронном пучке в конце линейного ускорителя ИК ВЭПП-5. Потеря пучка регистрировалась при помощи пластикового оптоволокна длиною 10 м и ФЭУ на МКП. Результаты измерений представлены на рисунке 4.19. В результате анализа экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что коллиматора длиною 2 мм достаточно, чтобы уменьшить вклад модовой дисперсии в результирующее уширение светового сигнала на выходе оптоволокна длиною 10 м, что приводит к улучшению пространственного разрешения датчика на 20 % и уменьшению интенсивности сигнала в 4 раза.

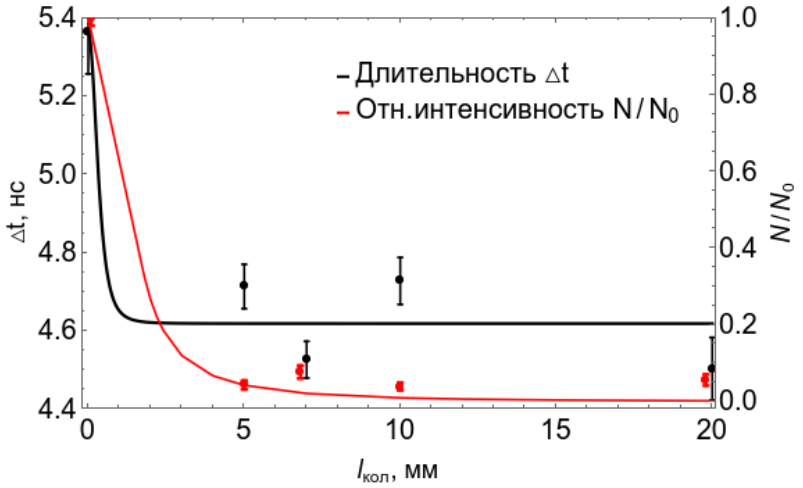


Рисунок 4.19 — Полуширина и интенсивность светового импульса на выходе из коллиматора в зависимости от его длины. Интенсивность импульса нормирована на значение, полученное в отсутствие коллиматора

4.5 Оценка порога чувствительности датчика

Под пороговой чувствительностью подразумевается наименьшая величина теряемого заряда пучка, которая может быть зарегистрирована датчиком. Для определения этой величины были произведены измерения потерь пучка разной величины заряда при введенном люминофорном экране. Проходя сквозь пластину люминофора пучок частично теряет свою энергию, что приводит к полной потере заряда в следующих за экраном поворотных магнитах.

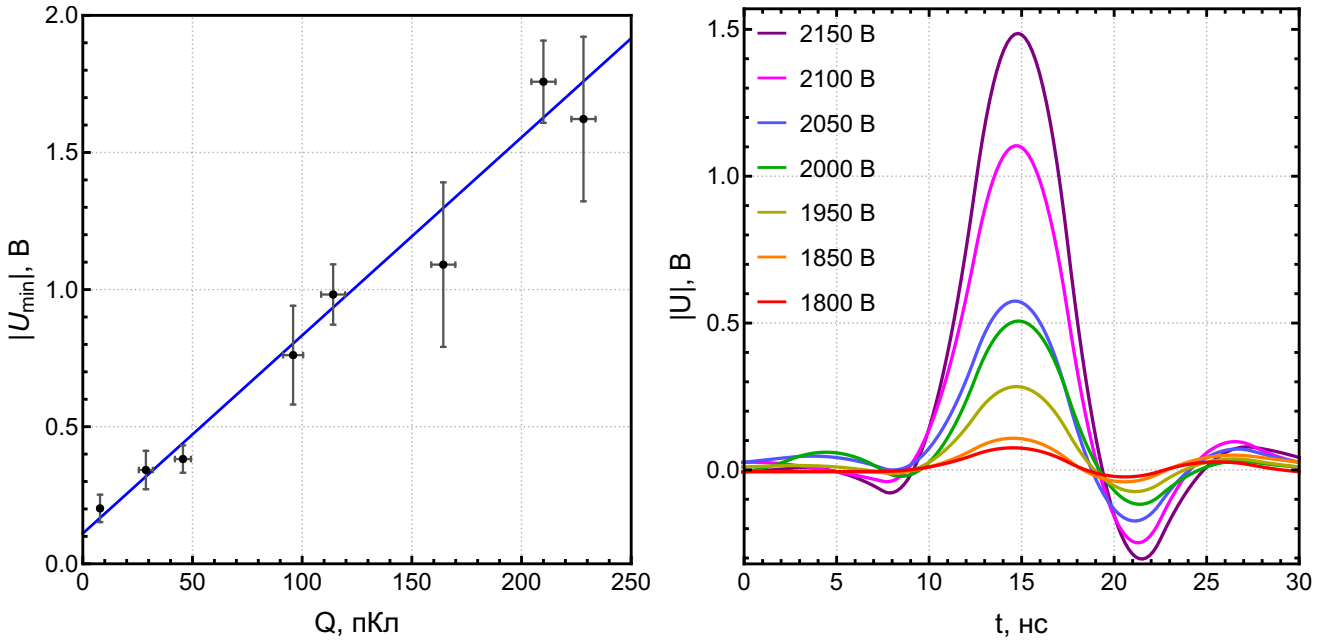
Измерения проводились на участке выпуска позитронов из накопителя. Недалеко от места выпуска, в пяти метрах от септум-магнита, был введен люминофорный экран. Поэтому регистрируемый датчиком сигнал от полностью теряемого заряда пучка можно считать равным накопленному заряду в накопителе, который определяется по датчику тока пучка.

ОДП состоял из отрезка пластикового оптоволокна, ФЭУ на МКП и АЦП с частотой дискретизации 200 Мвыб/с. Оптический сигнал от потери пучка после люминифора распространялся по оптоволокну на расстояние около 10 м.

Изменяя величину накопленного тока пучка в накопителе, были произведены измерения отклика ОДП. На рисунке 4.20а показаны значения амплитуды сигнала датчика при одинаковом напряжении питания ФЭУ в зависимости от заряда пучка. Как и ожидалось, наблюдается линейная зависимость отклика

датчика от величины заряда. Минимальное значение заряда пучка составляет примерно 8 пКл, ниже этого значения измерения не производились, поскольку отсутствовала стабильность накопления заряда в кольце.

Для полученного минимального заряда пучка в 8 пКл были измерены формы сигналов потерь в зависимости от напряжения, подаваемого на ФЭУ. Типичные формы сигналов ФЭУ представлены на рисунке 4.20б. Из рисунка видно, что при приложенном напряжении 1.8 кВ, сигнал потерь от заряда пучка в 8 пКл сравним с уровнем шумов. Однако при напряжении 1.95 кВ и выше сигнал становится различим. При этом максимальное значение (по модулю), которое допустимо подавать на ФЭУ на МКП составляет 3 кВ.



а) б)

Рисунок 4.20 — а) Зависимость амплитуды сигнала датчика от теряемого заряда пучка при одинаковом напряжении питания ФЭУ, б) Формы сигналов ФЭУ, полученные для величины теряемого заряда 8 пКл, в зависимости от напряжения питания.

Аналогичные измерения были проведены для кварцевого оптоволокна, выбранного в п.4.1.1 в качестве оптимального варианта для датчика потерь. Поскольку диаметр данного кварцевого оптоволокна примерно в два раза меньше пластикового, потери пучка с зарядом в 8 пКл были зарегистрированы при напряжении питания ФЭУ 2.7 кВ и выше.

Таким образом, ОДП, в состав которого входит ФЭУ на МКП, позволяет гарантировано регистрировать потери пучка вплоть до 10 пКл. Такая пороговая

чувствительность ОДП с запасом удовлетворяет требованию к его использованию на ИК ВЭПП-5, которое составляет $\sim$ 0.1 нКл. И дает возможность использовать аналогичную систему диагностики потерь пучка в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» (г.Новосибирск). Планируется осуществлять проводку пучка на этих участках в односгустковом режиме работы, где заряд сгустка пучка будет составлять 270 пКл. Таким образом, чувствительность ОДП позволит регистрировать потери на уровне 3 % от заряда сгустка для СКИФ.

4.6 Выводы к главе 4

В данной главе исследованы способы улучшения пространственного разрешения ОДП. Приведены результаты тестирования различных типов оптоволокон, ФЭУ и АЦП. Основываясь на требованиях, предъявляемых к датчику потерь пучка на ИК ВЭПП-5, сделан выбор элементов датчика с оптимальными параметрами.

Среди оптоволокон оптимальным вариантом с точки зрения пространственного разрешения, затухания, радиационной стойкости и прочности, является кварцевое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром сердцевины 550 мкм. С точки зрения стоимости самый лучший вариант – пластиковое оптоволокно. В зависимости от бюджета оба эти варианта являются оптимальными. Срок эксплуатации пластикового оптоволокна в условиях жесткой радиации на ИК ВЭПП-5 рассчитан равным пяти годам, при этом уровень сигнала падает не более, чем на треть.

Было показано, что полученные при помощи численного моделирования значения дисперсии для многомодового оптоволокна со ступенчатым профилем показателя преломления, изготовленного из пластика и кварца, находится в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В качестве фотодетектора необходимо использовать ФЭУ на МКП либо Si-ФЭУ, которые обладают минимальными временными характеристиками. Их временной вклад в результирующую длительность импульса с ОДП составляет 3.5 нс. Для регистрации сигнала следует использовать АЦП с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не менее 500 Мвыб/с.

Установлено, что при регистрации сигнала с торца, расположенного в направлении, противоположном направлению движения пучка, пространственное разрешение датчика потерь пучка в 3–5 раз лучше по сравнению с разрешающей способность при регистрации сигнала, распространяющегося по направлению движения пучка. Для пластикового оптоволокна оптимальная длина составляет примерно 30 м, для многомодового кварцевого – 40 м.

Показано, что комбинация из четырех датчиков, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, позволяет не только повысить чувствительность ОДП, но и определить место потери пучка в поперечной плоскости относительно направления движения пучка.

Проведенная в данной главе экспериментальная оценка порога чувствительности датчика показала, что он способен регистрировать потери заряда пучка вплоть до 10 пКл. Такая пороговая чувствительность с запасом удовлетворяет требованию к использованию ОДП на ИК ВЭПП-5, и кроме того, позволит использовать аналогичный датчик для строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» в односгустковом режиме работы. Таким образом, чувствительность ОДП позволит регистрировать потери на уровне 3 % от заряда сгустка для СКИФ.

Глава 5. Опыт внедрения и использования датчика на Инжекционном комплексе

В данной главе описывается экспериментальное изучение особенностей практического применения ОДП на ускорителе ИК ВЭПП-5. Демонстрируется успешная работа оптимизированного ОДП, рассчитанного на работу в составе каналов выпуска электронов и позитронов, а также циклического накопителя. Приводится описание программного обеспечения, которое интегрировано в общую систему автоматизации всего ускорительного комплекса и позволяет контролировать потери пучка в ускорителе в режиме реального времени.

5.1 Описание экспериментальной установки

Описание ИК ВЭПП-5 представлено в п.1.2. Для контроля потерь пучка и их минимизации при его проводке до потребителей приоритетной задачей была установка системы ОДП в каналах выпуска электронов и позитронов. Настройка проводки пучка по этим каналам является нетривиальной, поскольку по каналам транспортировка пучков осуществляется сразу в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Как показано на рисунке 5.1 один отрезок оптоволокна (красным) покрывает электронный выпуск из кольца с дальнейшей транспортировкой до ВЭПП-4М, другой (синим) – протянут вдоль позитронного выпуска с дальнейшей транспортировкой до ВЭПП-2000. Оптоволокно прокладывается вплотную к вакуумной камере, проходя внутри магнитных элементов, как показано на рисунке 5.2.

Для канала выпуска электронов из накопителя-охладителя в сторону ВЭПП-4М было выбрано кварцевое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления марки «Thorlabs» (FG550UEC) длиною 50 м. Измеренное значение дисперсии – 0.17 ± 0.01 нс/м. Для канала выпуска позитронов из накопителя-охладителя в сторону ВЭПП-2000 было выбрано пластиковое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления марки «Broadcom» (HFBR-RUS), длиною 40 м. Из-

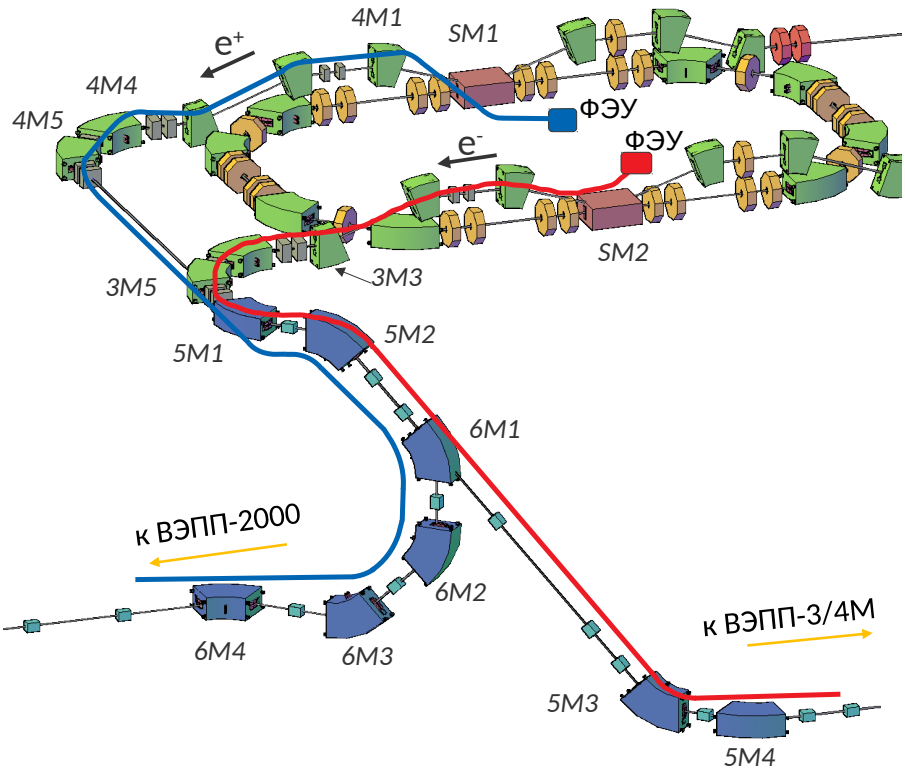


Рисунок 5.1 — Схема расположения датчика потерь пучка в каналах транспортировки К-500

меренное значение дисперсии – 0.23 ± 0.01 нс/м. Для достижения наилучшего пространственного разрешения датчика, световой сигнал регистрируется с торца, противоположного направлению движения пучка.

В качестве фотодетектора выбран ФЭУ на МКП совместного производства АО «Катод» и ЗАО «Экран» (г. Новосибирск). ФЭУ имеет мультищелочной фотокатод со спектральным диапазоном чувствительности в максимуме спектра ИВЧ (300–600 нм). Время нарастания фронта составляет 3.4 нс, длительность импульса анодного тока (полуширина) – 3.6 нс. Для защиты от окружающего света ФЭУ помещен в закрытый корпус с разъемами для питания и вывода сигнала.

Светосбор на фотокатод осуществляется с отполированного торца оптоволокна через воздушный зазор длиною 5 мм, что обеспечивает полный сбор света с его распределением по всей поверхности фотокатода. Как показано на рисунке 5.3а на торце оптоволокна установлен оптический разъем, который крепится на корпус ФЭУ. ФЭУ запитан от высоковольтного источника питания с отрицательной полярностью «Б0308» производства ИЯФ СО РАН. Сигнал с ФЭУ поступает на АЦП через коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом и длиною не более 1 м.

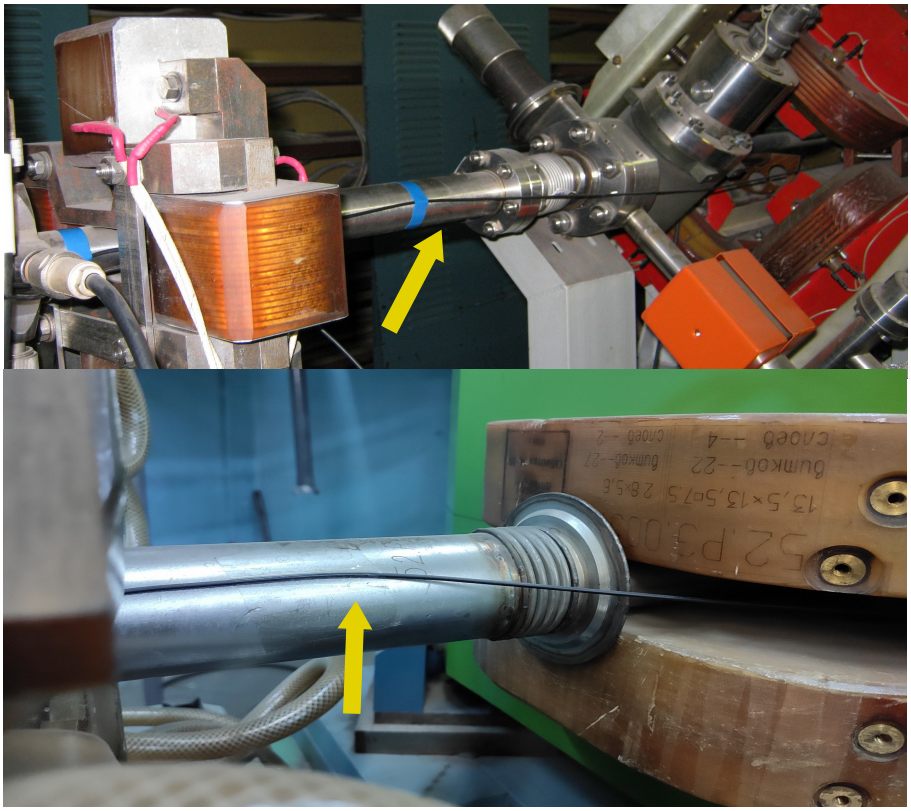
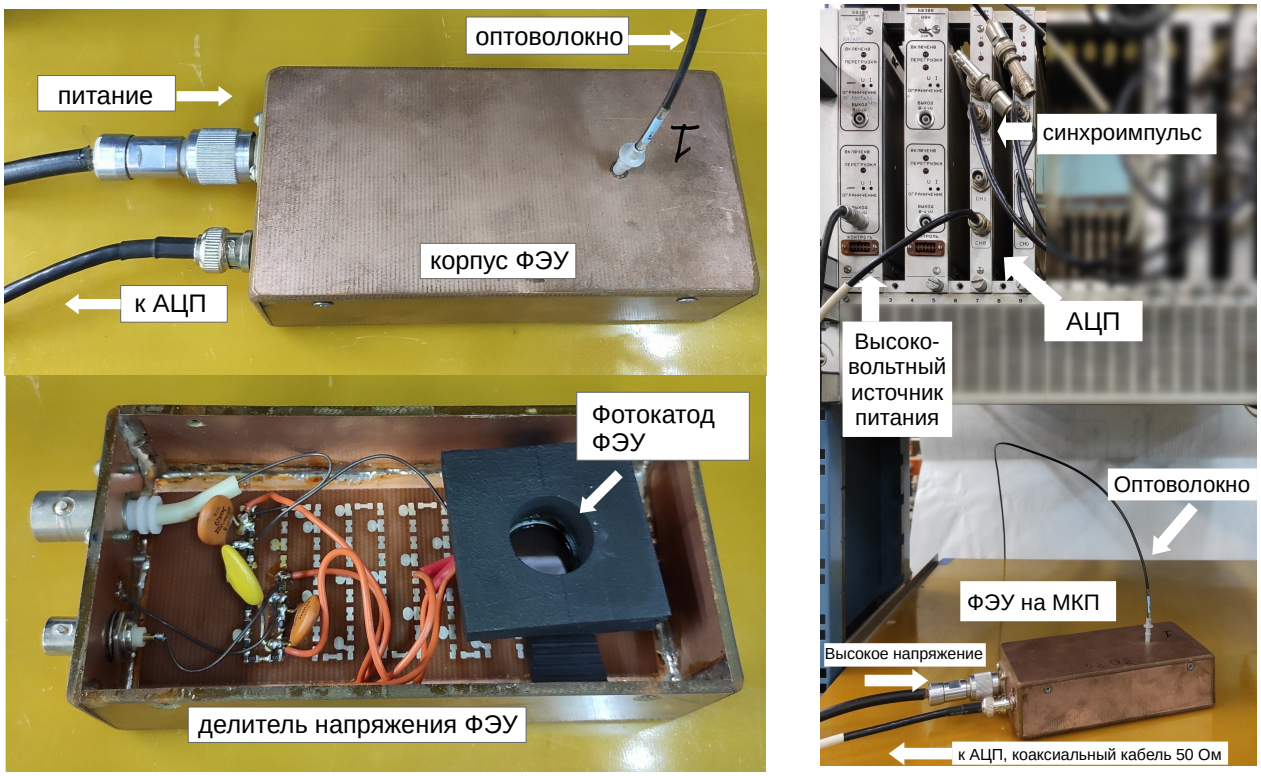


Рисунок 5.2 — Прокладка оптоволокна внутри магнитных элементов

Сигнал оцифровывается при помощи 8-разрядного АЦП «ADC200» с полосой пропускания менее 80 МГц и частотой дискретизации 200 Мвыб/с. Объём памяти составляет до 128 тысяч отсчетов на канал, было выбрано 1024 отсчетов. При заданном объёме памяти частота обновления осциллограмм составляет не менее 200 Гц, это заведомо больше частоты повторения инжекций/выпуска пучка на ИК ВЭПП-5 – до 12.5 Гц.

АЦП с данной частотой дискретизации позволяет детектировать потери пучка, но при этом теряется часть информации о форме сигнала, поэтому планируется заменить его на АЦП с частотой дискретизации не менее 500 Мвыб/с. Запуск АЦП осуществляется внешним синхроимпульсом, привязанным к моменту выпуска пучка из накопительного кольца. На рисунке 5.3б показаны все элементы системы диагностики.



а) б)

Рисунок 5.3 — а) Схема подключения оптоволокна к ФЭУ и расположение ФЭУ внутри корпуса, б) Элементы системы диагностики потерь

5.2 Алгоритм обработки сигнала

Для определения места потери пучка вдоль структуры ускорителя необходимо пересчитать время прихода сигнала с датчика в продольную координату. Как показано на рисунке 5.4, на временной осциллограмме с ОДП за начало отсчета принимается время начала регистрации потерь пучка на ФЭУ – t_{s0}, которое должно соответствовать началу координат откуда отложено оптоволокно. Это время рассчитывается как сумма времени прихода пучка к месту расположения оптоволокна и времени, затрачиваемого излучением, чтобы пройти расстояние по свободному концу оптоволокна от ускорителя до места расположения ФЭУ:

$$t_{s0} = t_0 + l_0/\nu,$$

где t_0 – время, которое рассчитывается по времени регистрации пучка на одном из пикапов (электростатическом датчике положения пучка),

l_0 – длина свободного конца оптоволокна от ускорителя до места расположения ФЭУ, ν – коэффициент пересчета времени в координату при регистрации импульсов с торца, расположенного против направления движения пучка, $\nu = c/(n+1) \approx 0.12$ м/нс.

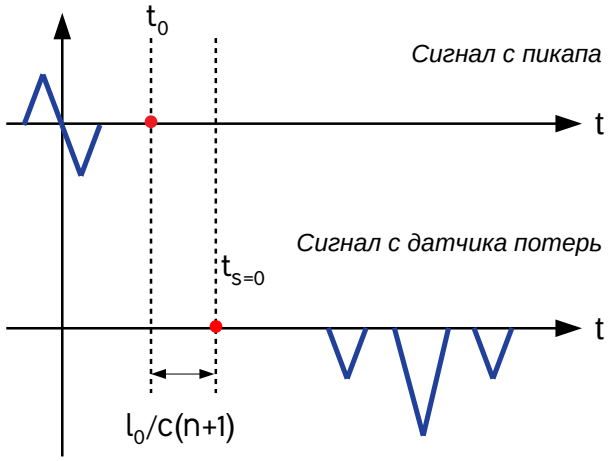


Рисунок 5.4 — Временные диаграммы пикапа и ОДП

Несмотря на то, что оптоволокно проложено вплотную к вакуумной камере, за счет неоднородной поверхности вакуумной камеры (вакуумные соединения, вставные устройства и т.д.) существует поправочный коэффициент на прокладку оптоволокна. На рисунке 5.5 показано соответствие отложенной длины оптоволокна к его положению на структуре ускорителя. Для пластикового оптоволокна поправочный коэффициент на его прокладку составил $p = 0.97$, для кварцевого – $p = 0.94$.

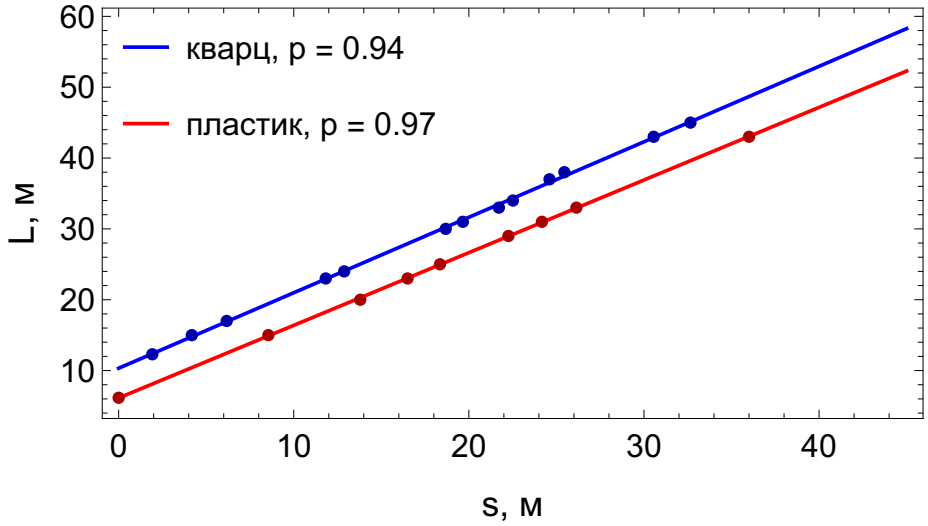


Рисунок 5.5 — Отношение отложенной длины оптоволокна к его положению на структуре ускорителя. Сплошной линией показана аппроксимация функцией первой степени для пластикового (красным) и кварцевого (синим) оптоволокна

Таким образом, пересчет временн*о*го сигнала потерь в продольную координату, соответствующую участку структуры ускорителя, где проложено оптоволокно, рассчитывается по формуле:

$$s = p\nu(t - t_0) - pl_0.$$

После того, как временной сигнал с АЦП сопоставлен со структурой участка ускорителя, необходимо произвести расчеты для отдельных импульсов, чтобы получить информацию о месте потерь пучка и о количестве потерянных частиц. Для удобства восприятия сигнал, приходящий с АЦП, инвертируется.

Экспериментально установлено, что уровень шума при рабочем напряжении питания ФЭУ не превышает 0.1 В по амплитуде, поэтому необходимо обрабатывать каждый импульс, амплитуда которого более 0.1 В. Для таких импульсов вычисляется ПШПВ, которая определяет область места потери пучка на структуре. Для определения средней величины потерь пучка в каждом импульсе необходимо проинтегрировать каждый импульс по времени, тем самым получив количество вторично-эмиссионных электронов, согласно формуле (4.2), и поделить на калибровочные коэффициенты, согласно формуле (3.1).

Информация о количестве потерянных частиц от общего числа частиц в пучке в процентном соотношении для выбранных кварцевого и пластикового датчиков рассчитывается по следующим формулам, соответственно:

$$N_{mep} = 1.8 \cdot 10^{16} \frac{\int |U_a| ds}{10^{-0.001L[m]} K_{yc}} \frac{1}{N_{пучка}} [\%],$$

$$N_{mep} = 1.7 \cdot 10^{15} \frac{\int |U_a| ds}{10^{-0.022L[m]} K_{yc}} \frac{1}{N_{пучка}} [\%].$$

Значение пути L, пройденного световым импульсом по оптоволокну, вычисляется по координате положения максимума каждого импульса. Значение коэффициента усиления ФЭУ K_{yc} вычисляется согласно поданному напряжению питания на ФЭУ, рассчитанная зависимость коэффициента усиления от напряжения питания ФЭУ представлена на рисунке 4.9. Количество частиц в пучке, выпускаемых из накопителя, $N_{пучка}$ вычисляется по значению накопленного тока с датчика тока пучка в кольце.

Полученная информация отображается в программе контроля потерь пучка. Поскольку для каждого события расчетные значения количества теряемых

частиц учитывают эффект затухания света в оптоволокне, зависимость коэффициента усиления ФЭУ от напряжения питания и нормированы на накопленный ток пучка, они сопоставимы между собой.

5.3 Программа контроля потерь пучка

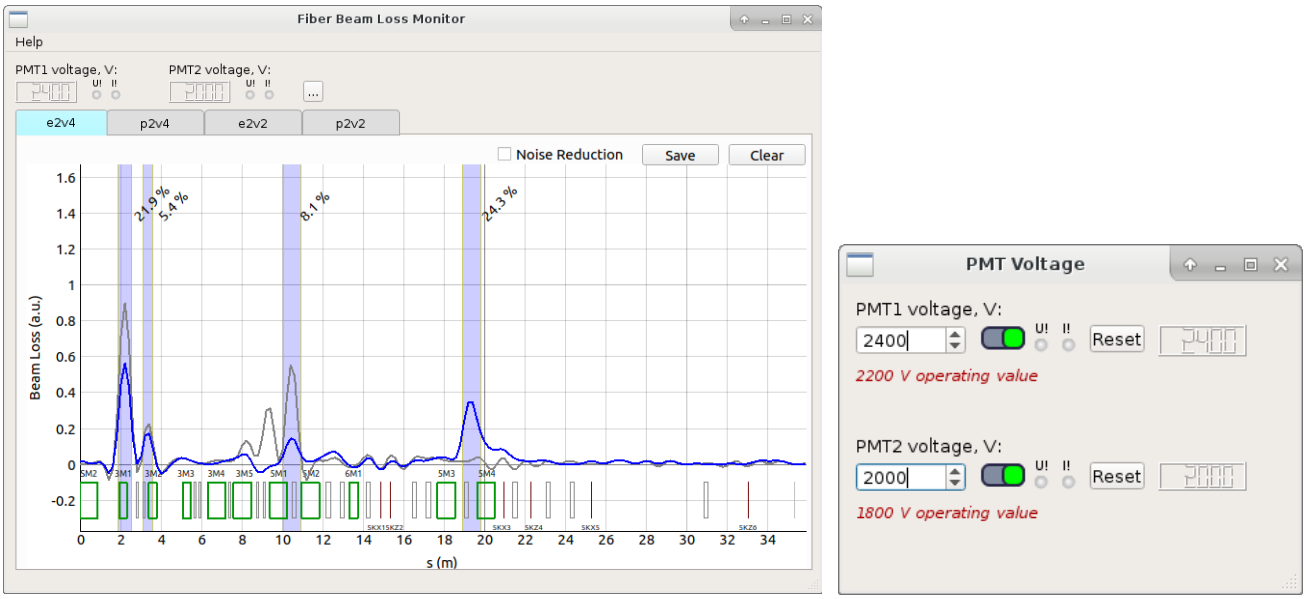
В рамках работы была создана клиентская программа с удобным и простым интерфейсом контроля потерь пучка в каналах выпуска и транспортировки К-500. Данная программа написана на языке Python с использованием графической библиотеки Qt. Основное окно программы «Fiber Beam Loss Monitor» показано на рисунке 5.6а.

В верхней части программы выводятся значения напряжений питания, подаваемых на ФЭУ, а также расположены индикаторы, которые светятся красным в случае блокировок источника питания по току или напряжению.

Управление напряжениями питания ФЭУ, а также включением/выключением источников питания осуществляется через дополнительное окно «PMT Voltage», которое вызывается при нажатии кнопки «...». Внешний вид этого окна представлен на рисунке 5.6б. Для каждого ФЭУ имеется своя кнопка включения/выключения источника питания и поле ввода значения напряжения, подаваемого от источника питания на ФЭУ. При этом напряжение поднимается с шагом 20 В/с, максимальное значение (по модулю), которое допустимо подавать на ФЭУ установлено в 3 кВ. Кнопка «Reset» предназначена для сброса блокировок. Здесь же для каждого ФЭУ с учетом его коэффициента усиления приводится рекомендуемое напряжение питания во избежание насыщения ФЭУ и существенных шумов в сигнале.

В основном окне программы для каждого режима канала К-500 существует своя вкладка с магнитной структурой и сигналом с датчика потерь пучка. Цветовое обозначение вкладок подобрано в соответствии с устоявшимися обозначениями для режимов К-500, которые приведены в таблице 6. При этом вкладки программы автоматически переключаются при переключении режимов выпуска ИК ВЭПП-5.

Для каждой вкладки на графике выводится обработанный сигнал с ОДП, привязанный к структуре ускорителя. Для удобства восприятия результиру-



а) б)

Рисунок 5.6 — а) Основное окно программы «Fiber Beam Loss Monitor», б) Дополнительное окно программы по управлению состоянием высоковольтных источников питания и напряжением питания ФЭУ

Таблица 6 — Рабочие режимы транспортного канала К-500 по числу комбинаций потребителей и частиц

Значение	Описание
e2v4	выпуск и транспортировка электронов потребителю ВЭПП-4М
p2v4	выпуск и транспортировка позитронов потребителю ВЭПП-4М
e2v2	выпуск и транспортировка электронов потребителю ВЭПП-2000
p2v2	выпуск и транспортировка позитронов потребителю ВЭПП-2000

ющий сигнал инвертируется и для определения его максимального значения интерполируется квадратичным сплайном. Снизу вкладки изображено положение магнитных элементов в структуре ускорителя. Выделенная цветом область указывает на места потери пучка на структуре. Для каждого пика с амплитудой, выше установленного порогового значения в 0.1 В, выводится информация о количестве потерянных частиц от общего числа частиц в пучке в процентном соотношении.

В соответствии с конфигурацией двух оптоволокон в каналах выпуска, как показано на рисунке 5.1, для режимов «e2v4» и «p2v2» сигналы берутся с одного АЦП, для двух других режимов сигналы берутся с двух АЦП одновременно, один сигнал выводится от септум-магнита до магнита «6M1», другой – от «6M1» до места окончания оптоволокна в направлении одного из потребителей.

В каждой вкладке пользователю также доступны следующие опции:

– Флажок «Noise Reduction» позволяет вычитать шум, записанный в отсутствие пучка.
– Кнопка «Save» дает возможность сохранить на момент нажатия текущий сигнал в текстовый файл (для его последующей обработки) и выводить для сравнения его значения на экран вместе с последующими сигналами.
– Кнопка «Clear» чистит сохраненные данные.

5.4 Пример использования датчика в каналах выпуска

В данном пункте показана работа клиентской программы ОДП на примере ее использования при настройке проводки электронного пучка по каналу К-500 в сторону ВЭПП-4М и позитронного пучка – в сторону ВЭПП-2000.

Для проверки степени достоверности вычисляемого значения теряемых частиц, было предложено получить сигнал с ОДП при введенном люминофорном экране. Проходя сквозь пластину люминофора пучок частично теряет энергию, что приводит к полной потере заряда в последующих поворотных магнитах. Это означает, что, в идеальном случае, датчик потерь пучка должен показать 100 % величину потерь пучка.

На рисунке 5.7 показаны потери пучка при введенном люминофорном экране. Люминофор расположен в промежутке между поворотными магнитами «3М3» и «3М4». Из рисунка видно, что существенная часть пучка теряется после люминофора, в области расположения поворотного магнита «3М4». Также присутствуют потери пучка в области септум-магнита, как правило, они неизбежны, их можно только минимизировать. Суммарные потери составляют 105 % $\pm$ 10 % от тока пучка, накопленного в накопителе. Таким образом, расчетное значение теряемых частиц по порядку величины получилось верным.

Для корректной длительной работы ОДП в радиационных условиях, необходимо регулярно производить калибровку сигнала по одному из люминофорных экранов, что позволит избавиться от ошибок измерений, связанных с ростом оптических потерь вследствие радиации.

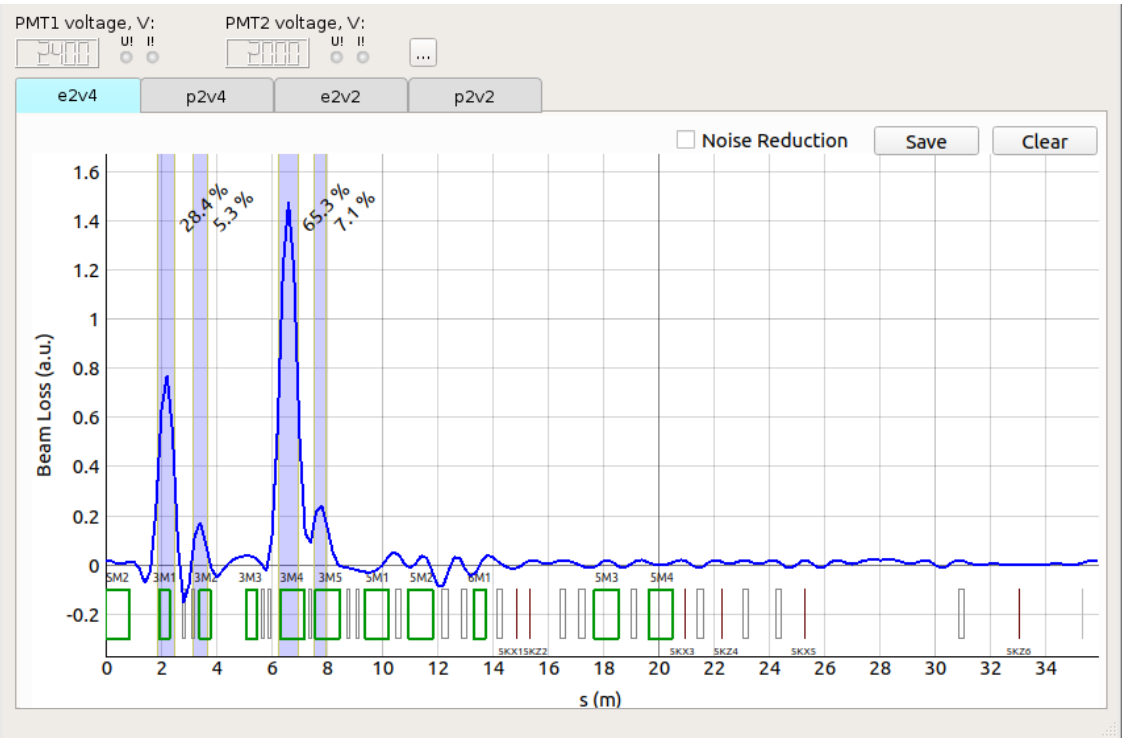


Рисунок 5.7 — Окно вывода данных распределения потерь пучка электронов при введенном люминофорном экране

Было также произведено сравнение расчетных значений потерь пучка в программе ОДП со значениями количества частиц в пучке, измеряемыми при помощи пикапов канала К-500. На рисунке 5.8 сверху показано окно программы ОДП с распределением потерь электронов по каналу К-500 в направлении ВЭПП-4М, снизу – окно программы пикапов.

Среди информации с пикапов интерес представляет разность значений частиц в пучке между двумя соседними пикапами, что свидетельствует о потерях пучка в промежутках между этими пикапами. Измеряемые пикапами значения количества частиц в пучке на рисунке подчеркнуты красной линией и обозначены как «N» в 10^8.

При изменении тока дипольной коррекции магнита «5M1» на 700 мА (с 1920 мА до 1220 мА) датчик потерь локализует две потери: сразу после поворотного магнита «5M1» и на спуске перед поворотным магнитом «5M3». Судя по информации с пикапов, пучок полностью теряется в промежутке выпускного канала до местоположения пикапа «5DT4». По информации с датчика потерь суммарная величина потерь на всем протяжении датчика составляет 84 %.

Величина первой потери составляет 47 % от накопленного числа частиц или 61 % (47/(100-23)=61) от оставшегося пучка, что сопоставимо с относительной разностью величин количества частиц в пучке между двумя пикапами

Рисунок 5.8 — Окно вывода данных распределения потерь пучка электронов по каналу К-500 в направлении ВЭПП-2000 при смещенном значении коррекции магнита «5М1» (сверху), окно вывода данных с пикапов о поперечном положении пучка и регистрируемом количестве частиц в пучке (снизу)

«3DT1» и «5DT1» в 48 % ((156-80)/156=48). На участке от «5М2» до «5М3» ОДП не локализует существенных потерь, что подтверждается измерениями с пикапов: между «5DT1» и «5DT2» также нет существенных потерь заряда. Величина второй потери с ОДП составляет 15 % от накопленного числа частиц или 43 % (13/(100-70)=43) от оставшегося пучка. У пикапов с «5DT2» по «5DT4» относительная разность количества частиц пучка составляет 88 %. Стоит учитывать, что значения с пикапов также являются неточными, поскольку присутствуют погрешности их калибровки.

Отсюда можно сделать вывод, что точность расчетных значений потерь пучка при помощи ОДП по порядку величины совпадает с точностью имеющихся на данный момент пикапов. При этом ОДП за счет своей распределенной конструкции дает подробную информацию о местоположении потерь.

Ввиду сложности получения позитронов и более длительного их накопления по сравнению с электронами, повышение стабильности и надежности их транспортировки до потребителей представляет больший интерес. И, следовательно, растет необходимость в надежной диагностике потерь пучка в канале выпуска К-500.

На рисунке 5.9 показано окно программы ОДП с распределением потерь в процессе наладки выпуска пучка позитронов по каналу К-500 в направлении ВЭПП-2000. В поле отображения данных изображены типичные распределения потерь пучка в процессе наладки режима транспортировки.

Из рисунка видно, что потери пучка в области септум-магнита неизбежны, их можно только минимизировать. Также путем настройки основного поля и дипольной коррекции в поворотных магнитах удалось избавиться от потерь пучка большой величины в области магнитов, которые расположены в первой половине спуска, и добиться проводки пучка с некоторыми потерями в области магнитов «6М2» и «6М3».

Пространственное разрешение датчика составило, как и требовалось, менее 1 м. Для улучшения пространственного разрешения датчика в дальнейшем планируется заменить имеющиеся АЦП на другие с лучшими временными характеристиками, что также позволить точнее измерять интегралы импульсов без существенного зарезания их амплитуды.

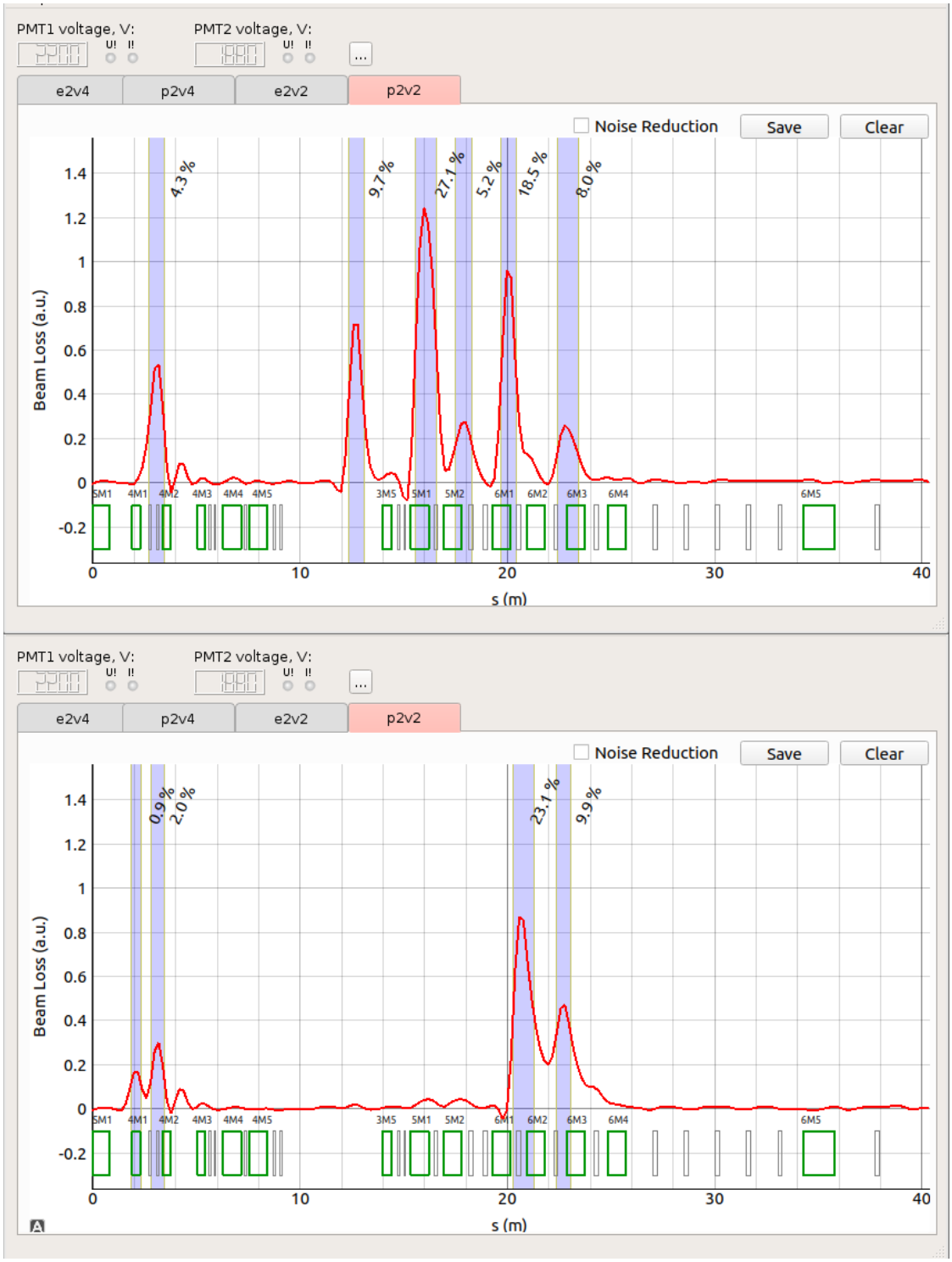


Рисунок 5.9 — Окно вывода данных распределения потерь пучка позитронов по каналу К-500 в направлении ВЭПП-2000: до наладки выпуска (сверху), в процессе наладки (снизу)

5.5 Пооборотные измерения в накопительном кольце

В циклических ускорителях датчики потерь пучка могут быть использованы как для настройки инжекции в кольцо, так и для минимизации потерь в процессе накопления пучка. А в случае коллайдеров и источников СИ – дополнительно служат для контроля потерь, ограничивающих время жизни пучка, в процессе работы с накопленным пучком.

При настройке инжекции в кольцо, датчик выводит распределение потерь пучка при инжекции в однооборотном режиме и его использование аналогично работе датчика в однопролетных участках ускорителя (линак, транспортные каналы). При минимизации потерь в процессе накопления, датчик потерь строит распределение потерь пучка на нескольких оборотах после инжекции.

Для контроля и минимизации потерь пучка в накопителе-охладителе по его периметру был установлен прототип ОДП, аналогичный тому, который установлен в каналах выпуска. За счет быстроты испускания ИВЧ (< 0.1 нс), ОДП способен регистрировать пооборотные потери пучка в накопительном кольце ИК ВЭПП-5, период обращения которого составляет 92 нс.

Пластиковое оптоволокно длиною 40 м было размещено по внешней стороне вакуумной камеры в горизонтальной плоскости по внутреннему радиусу кольца. В качестве фотодетектора был выбран ФЭУ на МКП, световой сигнал собирался с торца, противоположного направлению движения пучка.

На рисунке 5.10 изображено распределение потерь пучка электронов на семи первых оборотах в накопителе-охладителе, началу первого оборота соответствует начало инжекции в кольцо. Регистрируются существенные потери пучка на 1, 3, 5 и 7 оборотах в месте расположения электронного септум-магнита, что свидетельствует об известном ограничении апертуры и потери пучка в этой области неизбежны. Поэтому при следующей прокладке оптоволокна стоит избегать его расположения в месте инжекции в кольцо.

Используя ОДП в циклических ускорителях, при регистрации сигнала с торца оптоволокна, противоположного направлению движения пучка, существует ограничение на максимальную длину отрезка оптоволокна. Во избежание перекрытия потерь пучка с разных оборотов за счет различных скоростей движения пучка и распространения света по оптоволокну, максимальная длина отрезка оптоволокна должна быть не более:

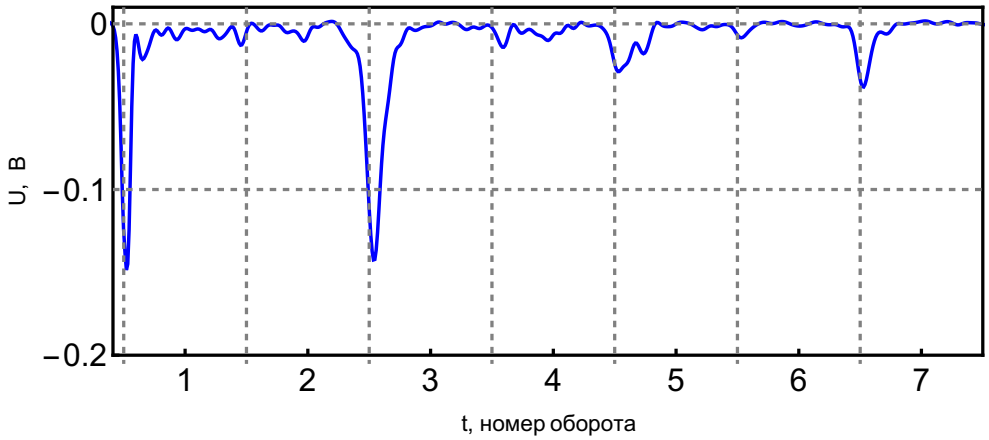


Рисунок 5.10 — Пооборотные измерения потерь пучка электронов в процессе инжекции в накопительное кольцо

$$L \leqslant \frac{P}{n+1}, \tag{5.1}$$

где P – периметр ускорительного кольца, n – показатель преломления сердцевины оптоволокна.

Согласно формуле (5.1), для кольца периметром 27.4 м, необходимо использовать датчик потерь, состоящий из отрезков оптоволокна, покрывающих не более 11 м структуры кольца каждый. Однако накопитель-охладитель ИК ВЭПП-5 имеет два места инжекции: отдельно для электронов и, через половину периода – для позитронов, поэтому для удобной эксплуатации ОДП стоит использовать четыре отрезка оптоволокна, по одному на каждый квадрант, покрывающих примерно по 7 м структуры кольца. Таким образом, в данной конфигурации ОДП может быть использован как инструмент для запуска и наладки накопителя-охладителя ИК ВЭПП-5.

5.6 Выводы к главе 5

В данной главе описаны результаты использования ОДП с выбранными оптимальными параметрами в каналах выпуска электронов и позитронов на ИК ВЭПП-5. Для обработки сигналов с датчика написана клиентская программа, которая позволяет оператору в режиме реального времени контролировать потери пучка вдоль структуры, производя при этом подстройку транспортировки пучка до потребителей. Программа синхронизована с текущим режимом

комплекса (сорт частиц/потребитель) и позволяет управлять напряжением питания, подаваемым на ФЭУ. В основном окне программы выводится информация о местах потерь пучка вдоль каналов выпуска и о количестве теряемых частиц, соответствующему каждому месту потерь. Пространственное разрешение датчика составило, как и требовалось, менее 1 м.

За счет азимутальной неопределенности места потери пучка невозможно точно определить абсолютную величину потерь. Однако, при помощи математического моделирования и калибровки ФЭУ удалось получить оценочные значения по порядку абсолютной величины потерь. Расчетные значения количества теряемых частиц по всей длине датчика учитывают эффект затухания света в оптоволокне, зависимость коэффициента усиления ФЭУ от напряжения питания и нормированы на накопленный ток пучка. Такая нормировка позволяет сопоставлять величины потерь пучка между собой.

Было также произведено сравнение количества теряемых частиц, полученных при помощи ОДП, со значениями, полученными на основе информации с пикапов путем нахождения разности значений частиц в пучке между двумя соседними пикапами. Получено, что точность расчетных значений потерь пучка при помощи ОДП по порядку величины схожа с точностью имеющихся на данный момент пикапов. При этом ОДП за счет своей распределенной конструкции дает подробную информацию о местоположении потерь.

Кроме того, в данной главе приводятся результаты использования прототипа датчика потерь в накопителе-охладителе, аналогичного тому, который установлен в каналах выпуска. Показано, что ОДП способен регистрировать потери пучка на нескольких оборотах после инжекции и может быть использован как инструмент для запуска и наладки накопителя-охладителя ИК ВЭПП-5. Поскольку накопитель-охладитель не предназначен для длительной работы с накопленным пучком, в контроле регулярных потерь, отвечающих за время жизни пучка, нет существенной необходимости. В дальнейшем планируется осуществить более аккуратную прокладку оптоволокна и заменить имеющиеся АЦП на другие, с лучшими временными характеристиками.

Заключение

В результате проделанной работы был разработан оптоволоконный датчик потерь пучка и введен в эксплуатацию на однопролетных и кольцевых участках ИК ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН. Оптимизация параметров элементов датчика позволила получить пространственное разрешения датчика не хуже 1 м.

В результате моделирования и расчетов физических процессов, положенных в основу принципа работы оптоволоконного датчика потерь пучка, были определены условия применимости датчика, процессы, существенным образом влияющие на его пространственное разрешение, и были рассчитаны коэффициенты для калибровки сигнала с датчика. Расчетная абсолютная величина потерь пучка получилась верной по порядку величины.

Были экспериментально изучены свойства различных типов оптоволокна, фотодетекторов и АЦП. В результате исследования, основываясь на требованиях, предъявляемых к датчику потерь пучка на ИК, был выбран датчик с оптимальными параметрами. Наиболее подходящим типом оптоволокна с точки зрения пространственного разрешения, затухания, радиационной стойкости и механической прочности является кварцевое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром сердцевины 550 мкм. Оптимальная длина отрезка оптоволокна составляет примерно 40 м.

При этом установлено, что регистрируя световой сигнала с торца оптоволокна, расположенного в направлении, противоположном направлению движения пучка, пространственное разрешение датчика потерь пучка улучшается в 3–5 раз по сравнению с противоположным торцом.

Было продемонстрировано, что комбинация из четырех датчиков, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, позволяет не только повысить чувствительность ОДП, но и определить место потери пучка в поперечной плоскости относительно направления движения пучка.

Показано, что среди фотодетекторов одним из наиболее подходящих типов является ФЭУ на МКП, который обладает минимальными временными характеристиками. Временной вклад в результирующую длительность импульса с датчика потерь составляет 3.5 нс. Для оцифровки сигнала достаточно

использовать АЦП с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации 500 Мвыб/с.

Проведенная в данной главе экспериментальная оценка порога чувствительности ОДП на основе ФЭУ на МКП показала, что он способен регистрировать потери заряда пучка вплоть до 10 пКл. Такая пороговая чувствительность с запасом удовлетворяет требованию к использованию ОДП на ИК ВЭПП-5.

В рамках представленного проекта было создано программное обеспечение для обработки сигналов с ОДП в каналах выпуска электронов и позитронов ИК ВЭПП-5, которое интегрировано в общую систему автоматизации всего ускорительного комплекса. Данное программное обеспечение позволяет оператору ускорительного комплекса в режиме реального времени отслеживать распределение потерь пучка вдоль выбранного участка ускорителя и с хорошей эффективностью настраивать прохождение пучков по каналам К-500 до потребителей.

Представленные в данной работе результаты исследования подходят для дальнейшего применения аналогичных датчиков потерь пучка на других электрон-позитронных установках. По результатам диссертационной работы планируется использовать оптоволоконную систему диагностики потерь пучка, оптимизированную для работы в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» в г.Новосибирск и на линейных участках действующего коллайдера ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН.

Автор выражает благодарность и искреннюю признательность научному руководителю Д.Е. Беркаеву за поддержку, помощь и за общее руководство работой. Автор благодарит П. В. Логачева за поддержку работы, О.И. Мешкова и И.А. Коопа за ценные замечания и полезные дискуссии в процессе подготовки рукописи, А.В. Петренко, А.Р. Фролова, В.Г. Присекина, Ф.А. Еманова, М.Ю. Барнякова, И.А. Куянова за помощь в проведении изменений и обсуждении результатов. Также хотелось бы выразить признательность коллективу лаборатории 5-1, совместно с которыми автор работал на ИК ВЭПП-5. Автор также благодарит О.Н. Бобровникову за оказание информационной поддержки и помощь в подготовке диссертационных документов.

Список сокращений и условных обозначений

ИК	Инжекционный комплекс
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ЭЛ	электромагнитный ливень
ИВЧ	излучение Вавилова-Черенкова
ФЭУ	фотоэлектронный умножитель
ОДП	оптоволоконный датчик потерь пучка
МКП	микроканальная пластина
УФ	ультрафиолетовый
ПММА	полиметилметакрилат
$N_{ф,вых}$	число фотонов на выходе из оптоволокна
$N_{ф,вх}$	число фотонов, сгенерированных в оптоволокне
$N_{вээ}$	число вторично-эмиссионных электронов
$N_{тер}$	число теряемых электронов пучка
Si-ФЭУ	кремниевый фотоумножитель

Список литературы

1. *Астрелина К. и др.* Инжекционный комплекс ВЭПП-5: статус и перспективы // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 367–373.

2. *Berkaev D. et al.* VEPP-5 Injection Complex: Two Colliders Operation Experience // *8th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2017 - Proceedings.* — 2017. — Pp. 2982–2984.

3. *Maltseva Yu.I. et al.* VEPP-5 Injection Complex performance improvement for two collider operation // *XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2018 - Proceedings.* — 2018. — Pp. 39–43.

4. *Shatunov P. et al.* High Luminosity at VEPP-2000 Collider with New Injector // *8th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2017 - Proceedings.* — 2017. — Pp. 2989–2991.

5. *Piminov P. et al.* Status of the Electron-Positron Collider VEPP-4 // *8th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2017 - Proceedings.* — 2017. — Pp. 2985–2988.

6. *Zemlyansky I.M. et al.* Commissioning of e+/e- Transfer Line from BINP Injection Complex to VEPP-2000 Facility // *XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2016 - Proceedings.* — 2016. — Pp. 213–215.

7. *Kawakubo T. et al.* Fast-response beam loss monitor // *15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV 2000 - Proceedings.* — 2000. — Pp. 299–307.

8. *Kawakubo T., Sanami T., Ishida T.* High speed beam loss monitor and its deterioration by radiation // *9th European Particle Accelerator Conference, EPAC 2004 - Proceedings.* — 2000. — Pp. 2649–2651.

9. *Schmidt G. et al.* Optical Fibre Beam Loss Monitors for Storage Rings at DELTA // *8th European Particle Accelerator Conference, EPAC 2002 - Proceedings.* — 2002. — P. 1969–1971.

10. *Wulf F., Korfer M.* Local Beam Loss and Beam Profile Monitoring with Optical Fibers // *9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC 2009 - Proceedings.* — 2009. — P. 411–417.

11. *Nebot Del Busto E. et al.* Position Resolution of Optical Fibre-Based Beam Loss Monitors Using Long Electron Pulses // *4th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2015 - Proceedings.* — 2015. — P. 580–584.

12. *Marechal X.-M., Asano Y., T. Itoga.* Design, development, and operation of a fiber-based Cherenkov beam loss monitor at the SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2012. — Vol. 673. — P. 32–45.

13. *Fisher Alan S. et al.* Beam-Loss Detection for LCLS-II // *8th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2019 - Proceedings.* — 2019. — P. 229–232.

14. *Frohlich L. et al.* Instrumentation for machine protection at FERMI@Elettra // *10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC 2011 - Proceedings.* — 2011. — P. 286–288.

15. *Giansiracusa Paul J. et al.* A distributed beam loss monitor for the Australian Synchrotron // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2019. — Vol. 919. — P. 98–104.

16. *Intermite A., Putignano M., Wolski A.* Cherenkov Fibre Optic Beam Loss Monitor at ALICE // *2nd International Particle Accelerator Conference, IPAC 2011 - Proceedings.* — 2011. — P. 1383–1385.

17. *Мальцева Ю.И. и др.* Распределённый датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне // *Усп. физ. наук.* — 2015. — Т. 185, № 5. — С. 553–556.

18. *Мальцева Ю.И., Астрелина К.В.* Сравнение численной модели оптоволоконного датчика потерь пучка с экспериментальными данными // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 633–637.

19. *Мальцева Ю.И., Андрианов А.В.* Методы улучшения пространственного разрешения распределенного датчика потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 638–644.

20. *Мальцева Ю.И., Астрелина К.В.* Оптимизация параметров оптоволоконного датчика потерь пучка для Инжекционного комплекса ВЭПП-5 // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 645–648.

21. *Maltseva Yu.I. et al.* Distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in optical fiber // *6th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2015 - Proceedings.* — 2015. — Pp. 1004–1006.

22. *Maltseva Yu.I., Prisekin V.G., Frolov A.R.* Beam loss measurements using the Cherenkov effect in optical fiber for the BINP e-e+ Injection Complex // *8th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2019 - Proceedings.* — 2019. — Pp. 233–237.

23. *Maltseva Yu.I. et al.* Distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in optical fiber // *XXIV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2014.* — 2014. — Pp. 374–376.

24. *Maltseva Yu.I., Prisekin V.G.* Optical fiber based beam loss monitor for the BINP e-e+ Injection Complex // *XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2018.* — 2018. — Pp. 486–488.

25. *Schmidt R.* Introduction to Machine Protection. — arXiv: 1608.02433. — 2016.

26. *Wittenburg K.* Beam loss monitors // *CAS - CERN Accelerator School: Course on Beam Diagnostics.* — 2009. — Pp. 249–280. — URL: https://cds.cern.ch/record/1213279.

27. *Zhukov A.* Beam loss monitors (BLMS): Physics, simulations and applications in accelerators // *14th Beam Instrumentation Workshop, BIW 2010 - Proceedings.* — 2010.

28. Long ion chamber systems for the SLC / J. Rolfe, R. Gearhart, R. Jacobsen et al. // *13th IEEE Particle Accelerator Conference, PAC 1989.* — 1989. — Pp. 1531–1533.

29. Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ / Г.И. Бритвич, В.В. Бреховских, С.А. Холоденко, В.К. Семенов // *Препринт ИФВЭ*. — 2013. — № 23.

30. *Франк И. М.* Длительность вспышки в эффекте Вавилова—Черенкова // *Усп. физ. наук*. — 1956. — Т. 58, № 1. — С. 111–150.

31. *Aiba Masamitsu et al.* SLS-2 Conceptual Design Report. — PSI-Bericht 17-03. — 2017. — December 21. — Editor: Streun, Andreas.

32. *Anzivino G. et al.* Recent developments in quartz fibre calorimetry // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 1995. — Vol. 357, no. 2. — Pp. 369–379.

33. *Anzivino G. et al.* Quartz fibre calorimetry — Monte Carlo simulation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 1995. — Vol. 357, no. 2. — Pp. 380–385.

34. *Gorodetzky P. et al.* Quartz fiber calorimetry // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 1995. — Vol. 361, no. 1. — Pp. 161–179.

35. *Gaebler W, Braeunig D.* Application of optical fibre waveguides in radiation dosimetry // *IEE Conf. Publ.; (United Kingdom)*. — 1983. — Pp. 185–189.

36. *Henschel H. et al.* Fiber Optic Radiation Sensing Systems for TELSA. — TESLA Report No. 2000-26. — 2000.

37. *Chaikovska I. et al.* Optical fiber beam loss monitor for the PHIL and ThomX facilities // *5th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2014 - Proceedings*. — 2014. — Pp. 3433–3435.

38. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. — Москва: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.

39. *Agostinelli S., et al.* GEANT4 – a simulation toolkit // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — 2003. — Vol. 506, no. 3. — Pp. 250–303.

40. *Battistoni G. et al.* Overview of the FLUKA code // *Annals Nucl. Energy.* — 2015. — Vol. 82. — Pp. 10–18.

41. *Del Guerra A., Nelson Walter R.* High-Energy Physics Applications of EGS // Monte Carlo Transport of Electrons and Photons / Ed. by Theodore M. Jenkins, Walter R. Nelson, Alessandro Rindi. — Springer US, 1988. — Pp. 599–622.

42. *Гинзбург В. Л.* Излучение равномерно движущихся источников (эффект Вавилова—Черенкова, переходное излучение и некоторые другие явления) // *Усп. физ. наук.* — 1996. — Т. 166, № 10. — С. 1033–1042.

43. *Тамм И. Е., Франк И. М.* Когерентное излучение быстрого электрона в среде // *Усп. физ. наук.* — 1967. — Т. 93, № 10. — С. 388–393.

44. *Платонов К. Ю., Флейшман Г. Д.* Переходное излучение в случайно-неоднородных средах // *Усп. физ. наук.* — 2002. — Т. 172, № 3. — С. 241–300.

45. *Иоргачев Д.В, Бондаренко О.В.* Волоконно-оптические кабели и линии связи. — Москва: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. — 276 с.

46. *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. — Москва: Радио и связь, 1987. — 656 с.

47. *Wadsworth W. J. et al.* Very high numerical aperture fibers // *IEEE Photonics Technology Letters.* — 2004. — Vol. 16, no. 3. — Pp. 843–845.

48. *Potter Robert J., Donath Eric, Tynan Richard.* Light-Collecting Properties of a Perfect Circular Optical Fiber // *J. Opt. Soc. Am.* — 1963. — Vol. 53, no. 2. — Pp. 256–260.

49. *Мурадян А.Г. и др.* Оптические кабели многоканальных линий связи. — Москва: Радио и связь, 1987. — 200 с.

50. *Senior J.M., Jamro M.Y.* Optical Fiber Communications: Principles and Practice. — Pearson Education, 2009. — 1075 pp.

51. *Ioannides N. et al.* Approaches to mitigate polymer-core loss in plastic optical fibers: a review // *Materials Research Express.* — 2014. — Vol. 1, no. 3. — P. 032002.

52. *Ishigure T., Nihei E., Koike Y.* Optimum Refractive-Index Profile of the Graded-Index Polymer Optical Fiber, Toward Gigabit Data Links // *Applied optics.* — 1996. — Vol. 35, no. 12. — Pp. 2048–53.

53. *Huang T. et al.* Efficient one-third harmonic generation in highly Germania-doped fibers enhanced by pump attenuation // *Optics express.* — 2013. — Vol. 21, no. 23. — Pp. 28403–13.

54. *Bondarenko A.V. et al.* A study of radiation resistance of silica optical fibers under conditions of reactor irradiation // *Instrum Exp Tech.* — 2006. — Vol. 49, no. 2. — Pp. 190–198.

55. Fundamental Defect Centers in Glass: The Peroxy Radical in Irradiated, High-Purity, Fused Silica / E. J. Friebele, D. L. Griscom, M. Stapelbroek, R. A. Weeks // *Phys. Rev. Lett.* — 1979. — May. — Vol. 42. — Pp. 1346–1349.

56. *Gavrilov V.B. et al.* Absorption spectra of pure quartz fiber lightguides irradiated with -quanta from a 60Co source // *Instruments and Experimental Techniques.* — 1997. — 07. — Vol. 40, no. 4. — Pp. 457–466.

57. *Henschel H. et al.* Optical fibres for high radiation dose environments // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* — 1994. — Vol. 41, no. 3. — Pp. 510–516.

58. Optical fiber waveguides in radiation environments, II / E.J. Friebele, C.G. Askins, M.E. Gingerich, K.J. Long // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* — 1984. — Vol. 1, no. 2-3. — Pp. 355–369.

59. *Akchurin N., Wigmans R.* Quartz fibers as active elements in detectors for particle physics // *Review of Scientific Instruments.* — 2003. — Vol. 74, no. 6. — Pp. 2955–2972.

60. *Hagopian V.* Radiation damage of quartz fibers // *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements.* — 1999. — Vol. 78, no. 1-3. — Pp. 635–638.

61. *Sanada Kazuo, Shamoto Naoki, Inada Kouichi.* Radiation resistance of fluorine-doped silica-core fibers // *Journal of Non-Crystalline Solids.* — 1994. — Vol. 179. — Pp. 339–344.

62. *Ott Melanie N.* Fiber optic cable assemblies for space flight: II. Thermal and radiation effects // *Photonics for Space Environments VI.* — 1998. — Vol. 3440. — Pp. 37–46.

63. *O'Keeffe Sinead, Lewis Elfed.* Polymer optical fibre for in situ monitoring of gamma radiation processes // *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems.* — 2009. — 01. — Vol. 2. — Pp. 490–502.

64. Radiation damage to polymer optical fibres / C. Yan, S.H. Law, N. Suchowerska, S.H. Hong // *Proceedings of the 5th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 2007).* — 2007. — 01. — Vol. 1. — Pp. 830–834.

65. A review of optical fibre radiation dosimeters / Sinead O'Keeffe, Colin Fitzpatrick, Elfed Lewis, A. Al-Shamma // *Sensor Review.* — 2008. — 03. — Vol. 28. — Pp. 136–142.

66. *Stajanca P., Krebber K.* Radiation-induced attenuation of perfluorinated polymer optical fibers for radiation monitoring // *Sensors.* — 2017. — Vol. 17, no. 9. — P. 1959.

67. *Friebele E. J., Schultz P. C., Gingerich M. E.* Compositional effects on the radiation response of Ge-doped silica-core optical fiber waveguides // *Appl. Opt.* — 1980. — Sep. — Vol. 19, no. 17. — Pp. 2910–2916.

68. Optical fiber design and the trapping of Cerenkov radiation / S. H. Law, S. C. Fleming, N. Suchowerska, D. R. McKenzie // *Appl. Opt.* — 2006. — Dec. — Vol. 45, no. 36. — Pp. 9151–9159.

69. *ГНЦ РФ Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера.* Физический проект комплекса ВЭПП-5. — Новосибирск, 1995.

70. *Групен К.* Детекторы элементарных частиц. — Новосибирск: Сиб. хронограф, 1999. — 408 с.

71. *Онучин А.П.* Экспериментальные методы ядерной физики. — Новосибирск: НГТУ, 2010. — 220 с.

72. *Ott M. N.* Radiation effects data on commercially available optical fiber: database summary // IEEE Radiation Effects Data Workshop. — 2002. — Pp. 24–31.

73. *В.Н.Евдокимов, В.А.Поляков, В.И.Рыкалин.* Спектральные характеристики некоторых типов фотоумножителей // *Препринт ИФВЭ.* — 1986. — № 86-34.

74. *Hamamatsu Photonics K.K., Editorial Committee.* Photomultiplier tubes: basics and applications, 3rd edition. — 2007. — URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf.

75. *Barnyakov A.Yu. et al.* R&D of microchannel plate phototubes // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2006. — Vol. 567, no. 1 SPEC. ISS. — Pp. 17–20.

76. *Barnyakov A.Yu. et al.* Investigation and development of microchannel plate phototubes // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2007. — Vol. 572, no. 1 SPEC. ISS. — Pp. 404–407.

77. *Дмитриев В. Д. и др.* Микроканальные пластины в экспериментальной ядерной физике // *Препринт ОИЯИ.* — 1980. — № 13-80-535.

78. *Долотов А., Коновалов П., Нуртдинов Р.* Сильноточный ФЭУ на микроканальной пластине для регистрации субнаносекундных световых импульсов // *Фотоника.* — 2015. — № 5. — С. 82–97.

79. *Milnes James S., Howorth J.* Picosecond time response characteristics of microchannel plate PMT detectors. — 2005. — Vol. 5580. — Pp. 730–740.

80. *Va'vra J.* High precision time measurements in future experiments. — arXiv: 1906.11322. — 2020.

81. *Barnyakov A. Yu. et al.* Test of microchannel plates in magnetic fields up to 4.5 T // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2017. — Vol. 845. — Pp. 588–590.

82. *Barnyakov A.Yu. et al.* Investigation of Cherenkov radiation component in LYSO(Ce) crystals // *Journal of Physics: Conference Series.* — 2020. — jun. — Vol. 1561. — P. 012018.

83. *Golovin V., Saveliev V.* Novel type of avalanche photodetector with Geiger mode operation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2004. — 02. — Vol. 518. — Pp. 560–564.

84. *Buzhan P. et al.* The advanced study of silicon photomultiplier // Advanced Technology and Particle Physics. — Pp. 717–728.

85. *Buzhan P. et al.* Silicon photomultiplier and its possible applications // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* — 2003. — Vol. 504. — Pp. 48–52.

86. *Kovalchuk V.D. et al.* Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2005. — Vol. 538. — Pp. 408–415.

87. *Kosuke O. et al.* Characterization of new photo-detectors for the future dark matter experiments with liquid xenon // *Journal of Physics: Conference Series.* — 2020. — feb. — Vol. 1468. — P. 012238.

88. *Асаенок М.А., Зеневич А.О.* Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей // *Прикладная физика.* — 2018. — № 6. — С. 49–53.

89. *Biro B. et al.* A Comparison of the Effects of Neutron and Gamma Radiation in Silicon Photomultipliers. — arXiv: 1809.04594. — 2019.

90. *Barnyakov A.Y. et al.* Experimental study of Cherenkov radiation component in LYSO(Ce) crystals // *Journal of Instrumentation.* — 2020. — oct. — Vol. 15, no. 10. — P. C10010.