

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
ПОТЕРИ В СПЕКТРОСМЕЩАЮЩЕМ ОПТИЧЕСКОМ  
ВОЛОКНЕ ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА  
SPD@NICA**

Студент \_\_\_\_\_ А. Д. Манаконов

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ П. Е. Тетерин

Москва 2024

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ПОТЕРИ В СПЕКТРОСМЕЩАЮЩЕМ ОПТИЧЕСКОМ  
ВОЛОКНЕ ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА  
SPD@NICA**

Студент \_\_\_\_\_ А. Д. Манаконов

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ П. Е. Тетерин

Рецензент,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ М. Г. Коротков

Секретарь ГЭК,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,  
д.ф.-м.н., проф. \_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Определения обозначения и сокращения</b>	<b>4</b>
<b>Введение</b>	<b>5</b>
Задачи . . . . .	5
Актуальность . . . . .	5
<b>1 SPD@NICA</b>	<b>7</b>
1.1 ВВС и SPD . . . . .	7
1.1.1 Описание элементов . . . . .	7
1.1.2 Общая схема ВВС . . . . .	10
<b>2 Сцинтилляционные материалы</b>	<b>11</b>
2.1 Сцинтилляторы . . . . .	11
2.2 Спектросмещающее оптоволокно . . . . .	13
<b>3 Механизмы потери света</b>	<b>14</b>
3.1 Поглощение . . . . .	14
3.2 Внутреннее поглощение материала . . . . .	14
3.3 Поглощение внешних примесных ионов . . . . .	15
3.4 Рассеяние . . . . .	15
3.5 Потеря макроизгиба . . . . .	16
3.6 Потеря микроизгиба . . . . .	16
<b>4 Экспериментальная часть и результаты обработки</b>	<b>18</b>
4.1 Установка . . . . .	18
4.2 Обработка данных эксперимента . . . . .	19
<b>5 Моделирование света в среде COMSOL Multiphysics</b>	<b>22</b>
5.1 Моды СВ и ПВ . . . . .	22

5.2	Потери света в прозрачном оптическом волокне . . . . .	27
5.2.1	Визуализация лучей в оптоволокне . . . . .	29
5.2.2	Моделирование потерь света . . . . .	31
	<b>Заключение</b>	<b>35</b>
	<b>Список использованных источников</b>	<b>36</b>

# ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе применяются следующие обозначения и сокращения:

**BBC** — Beam-Beam Counters, счетчик лучей

**NICA** — Nuclotron-based Ion Collider fAcility, Коллайдер на базе нуклотрона

**SPD** — Spin Physics Detector, спиновый физический детектор

**TOF** — Time-of system, Времяпролетный детектор

**MCP** — A microchannel plate, микроканальная пластина

**SiPM** — Silicon photomultiplier, кремниевый фотоумножитель

**CB** — Спектросмещающее оптоволокно

**ПВ** — Прозрачное оптоволокно

**RS** — Range System, мюонная система детектирования

**ST** — Straw Tracker, трековые детекторы на тонких трубках

**VD** — Vertex Detector, вершинный детектор

**ECal** — Electromagnetic Calorimeter, Электромагнитный калориметр

# ВВЕДЕНИЕ

Предполагается установить Spin Physics Detector (SPD) на Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) с целью изучения спиновой структуры протона, дейтрона и явлений, сопряжённых со спином. Эксперимент будет проходить под действием сталкивающихся пучков дейтронов и нейтронов с энергиями до 27 ГэВ и со светимостью до  $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , он покроет кинематический разрыв между низкоэнергетическими измерениями в экспериментах ANKE-COSY и SATURNE, и высокоэнергетическими измерениями, полученными на БАК [1].

## ЗАДАЧИ

Основной целью работы является создание прототипа детектора ВВС (Beam-Beam Counter) для эксперимента SPD на коллайдере NICA в Дубне. К задачам работы относится освоение методик работы со сцинтилляционными детекторами, подбор компонентов для создания оптимальной конфигурации, изучение световых потерь в прозрачных (ПВ) и спектросмещающих волокнах (СВ) от длины и, соответственно, диаметра скручивания, изучение и моделирование оптических характеристик волноводов.

Цель этой работы — изучение световых потерь в ПВ от выпрямленной длины и СВ от диаметра скручивания, наряду с этим изучение и других оптических характеристик волноводов.

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Актуальность темы бакалаврской работы обусловлена необходимостью изучения оптических характеристик СВ и ПВ для детектора ВВС, которые позволят сделать ключевой выбор в сторону конкретных оптиче-

ских волокон с рациональной совокупностью характеристик для данного детектора, таких как: светособирающая способность, энергетическое разрешение, относительная длина волновода. Также актуальность объясняется отсутствием работ в которых были изучены световые потери при скручивании СВ и сравнены с результатами симуляции данного процесса.

Наряду с этим необходимо изучить характеристики на каждом модуле самого детектора для подбора оптического клея с наиболее подходящими характеристиками и относительной легкостью при производстве рабочих модулей детектора.

# 1 SPD@NICA

## 1.1 ВВС И SPD

### 1.1.1 ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Два счетчика лучей (ВВС) будут расположены непосредственно перед системой PID (Particle Identification) в торцевых чашках установки SPD. Детектор должен состоять из двух частей: внутренней и внешней, они будут разработаны на основе разных технологий. Внутренняя часть ВВС будет использовать быстросегментированную пластину MicroChannel plate (МСП), она будет функционировать внутри лучевой трубы (также обсуждается замена МСП на сцинтиллятор со спектросмещающим волокном в конечном варианте), в то время как внешняя часть ВВС будет работать на быстрых пластиковых сцинтилляционных плитках. Внутренняя часть охватывает прием  $30 \div 60$  мрад и должна быть разделена на 4 слоя, состоящих из 32 азимутальных секторов [2; 3].

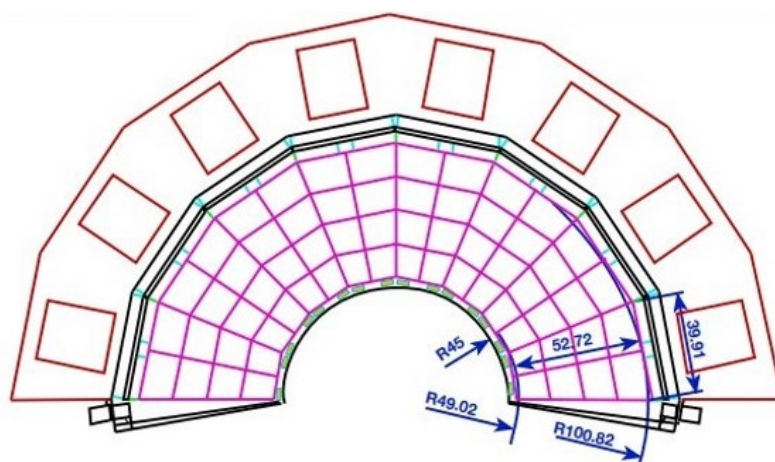


Рисунок 1.1 — ВВС: сегментизация по азимуту и полярному углу. Все размеры в миллиметрах [2]

Внешняя часть, закрывающая полярные углы от  $60$  до  $500$  мрад бу-





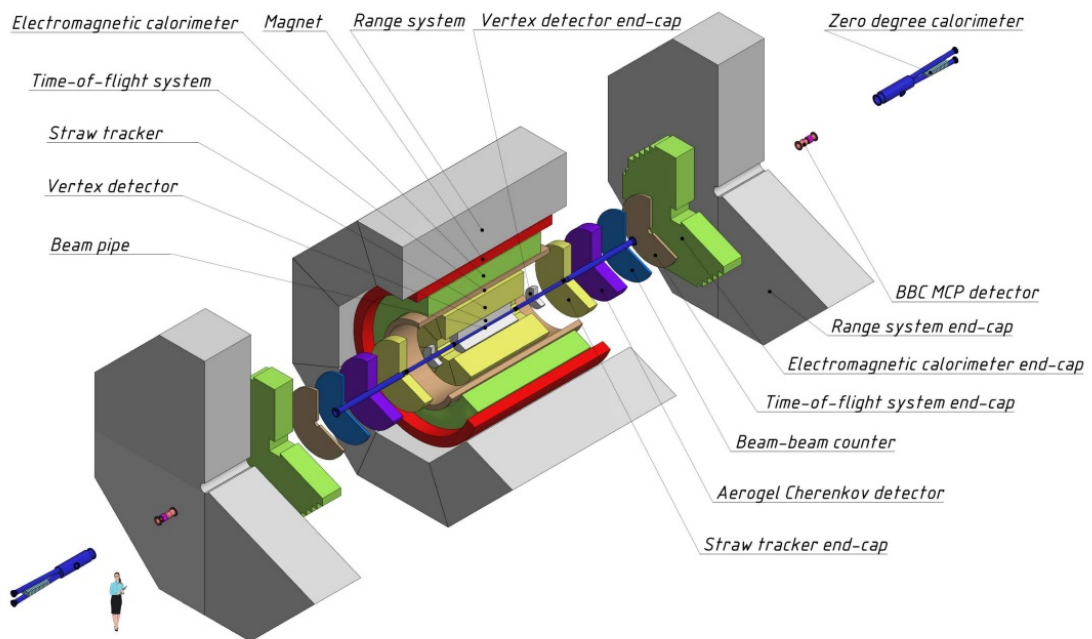


Рисунок 1.3 — Общий план SPD [2]

Рисунок 1.3 иллюстрирует схему детектора SPD. Пояснение к Рисунку 1.3.

- 1) Beam-beam counter (BBC) — Счётчик пучков;
- 2) Range System (RS) — Мюонный детектор;
- 3) Range System end-cap — Торцевой мюонный детектор;
- 4) Time-of system (TOF) — Времяпролетный детектор;
- 5) Time-of system end-cap — Торцевой времяпролетный детектор;
- 6) Straw Tracker (ST) — Трековый детектор на основе тонких трубок;
- 7) Straw Tracker end-cap — Торцевой трековый детектор на основе тонких трубок;
- 8) Vertex detector (VD) — Вершинный детектор;
- 9) Vertex detector end-cap (VD) — Торцевой вершинный детектор;
- 10) Electromagnetic calorimeter (Ecal) — Электромагнитный калориметр;
- 11) Electromagnetic calorimeter end-cap — Торцевой электромагнитный калориметр;
- 12) Magnet — Магнитная система;
- 13) Beam-pipe — Вакуумная трубка;
- 14) Zero degree calorimeter — Адронный калориметр;
- 15) BBC MCP detector — Микроканальный детектор в счётчике пучков;
- 16) Aerogel Cherenkov detector — Аэрогелевый черенковский детектор [2; 3; 5].

## 1.1.2 ОБЩАЯ СХЕМА ВВС

Общая схема детектора ВВС будет состоять из 16 угловых сегментов, в каждом из них по 7 модулей пластиковых сцинтилляторов с заложенным внутри скрученным СВ, далее СВ выводится и соединяется с ПВ через устройство, затем ПВ соединяется с массивом SiPM, и после этого сигналы выводятся на модуль CAEN FERS-5200 и с них будет происходить наблюдение (Рисунок 1.4).

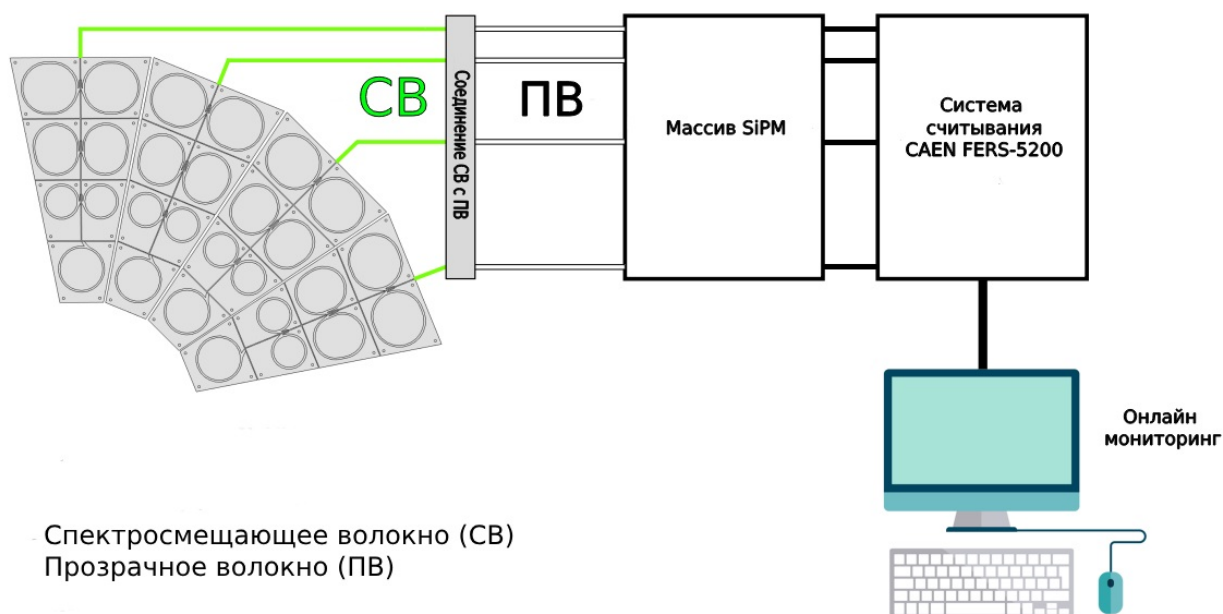


Рисунок 1.4 — Общая схема ВВС [2]

## 2 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 2.1 СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

Материалы которые характеризуются на особой способности к эмиссии фотонов за счёт взаимодействия с ионизирующими излучениями называются сцинтилляторы. Возбуждаются данные вещества только за счет ионизации, это и является их отличительной способностью. Высвечивание света происходит в течении крайне малого временного интервала равного порядка  $\sim (10^{-9} - 10^{-12})$  с. С помощью сцинтилляторов можно собирать энергетические спектры, так как отличительная способностью данных веществ заключается в пропорциональном количестве излученных фотонов от энергии, поглощенной под воздействием излучения, это работает только при взаимодействии с излучением одного типа [5].

Сцинтилляторы можно разделить на определенные группы. Например, их можно разделить по типу вещества, из которого они сделаны. В основном их делят на две группы: органические и неорганические. Органические сцинтилляторы в основном представляют собой органические кристаллы, а также пластмассы и жидкие сцинтилляторы. Неорганические сцинтилляторы, как правило, имеют кристаллическую структуру на основе неорганические соединения (оксиды, галогениды, силикаты и тд.). В то время как органические сцинтилляторы состоят из органических соединений и могут быть в жидком, твердом или газообразном агрегатном состоянии. Основное отличие по свойствам между этими двумя классами сцинтилляторов заключается в том, что у органических малый показатель световыхода по сравнению с неорганическими, но на порядок ниже время высвечивания, что может способствовать разработке временных детекторов. Основные характеристики органических и неорганических сцинтилляторов перечислены, соответственно, в таблице 2.2 и 2.1 [8; 9].

Таблица 2.1 — Характеристики неорганических сцинтилляторов. Световыход ( $LY$ ), время затухания в  $e$  раз ( $\tau$ ), время нарастания ( $t$ ), длина волны максимума излучения ( $\lambda_{max}$ ), коэффициент преломления ( $n$ ), плотность ( $\rho$ ) [6; 7]

Вещество	$LY$ , фотоны/кэВ	$\tau$ , нс	$t$ , нс	$\lambda_{max}$ , нм	$n$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
<i>CsI(Na)</i>	41	630	45	420	1,84	4,51
<i>CsI(Ti)</i>	54	1000	85	550	1,79	4,51
<i>LYSO</i>	33	36	1 – 4	420	1,81	7,1
<i>BGO</i>	8 – 10	300	20	480	2,15	7,13
<i>CdWO<sub>4</sub></i>	12 – 15	14000	5 – 20	475	2,3	7,9
<i>NaI(Tl)</i>	38	230–240	1 – 2	419	1,85	3,67

Таблица 2.2 — Характеристики органических сцинтилляторов. Световыход ( $LY$ ), время затухания в  $e$  раз ( $\tau$ ), время нарастания ( $t$ ), длина волны максимума излучения ( $\lambda_{max}$ ), коэффициент преломления ( $n$ ), плотность ( $\rho$ ) [7; 10; 11]

Вещество	$LY$ , фотоны/МэВ	$\tau$ , нс	$t$ , нс	$\lambda_{max}$ , нм	$n$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Нафталин	$4 \cdot 10^3$	11	0,5	348	1,58	1,15
Антрацен	$4 \cdot 10^4$	30	2 – 3	448	1,59	1,25
n-Терфенил	$1,2 \cdot 10^4$	6 – 12	3	391	1,65	1,23
Полистирол	$1,2 \cdot 10^4$	20	1,5	400	1,58	1,06-1,15

Также нужно рассказать подробнее о том, что представляют собой органические сцинтилляторы (в силу их дальнейшего применения в сборке прототипа ВВС) — это виды органических материалов, с помощью которых детектируются фотоны в видимой части светового спектра после взаимодействия с ионизирующим излучением. Сцинтилляция в органических и неорганических форме существенно отличается по своей структуре. В первом случае сцинтилляция происходит в результате энергетического перехода уровня одной молекулы, а во втором — за счет структуры кристаллической решетки. Данный факт объясняет, почему свечение материала можно наблюдать независимо от агрегатного состояния самого вещества. Также следует перечислить основные типы органических сцинтилляторов:

- 1) **Чистые органические кристаллы.** Данные кристаллы состоят из стильбена, антрацена и нафталина. В основном они используются для детектирования  $\beta$  - излучения. Так же они обладают низким временем затухания  $\sim 10$  нс, но в связи с их кристаллической структурой

большого масштаба данные сцинтилляторы выращивать физически крайне затруднительно.

- 2) **Жидкие органические сцинтилляторы.** Они представляют собой растворенный в некоторой органической среде сцинтиллятор.
- 3) **Пластиковые сцинтилляторы.** Пластмассовые сцинтилляторы — это вещества, что состоят из самого пластика и сцинтилляционной добавки. Такие материалы обладают наименьшей константой затухания среди всех вышеперечисленных веществ  $\sim 1 - 2$  нс. В частности они могут применяться в детекторах быстрых нейтронов из-за высокого содержания водорода в веществе. Наряду с этим они излучают меньше света при прохождении частицы, по сравнению с неорганическими сцинтилляторами, поэтому они предпочтительны для детектирования частиц высоких энергий [12].

## 2.2 СПЕКТРОСМЕЩАЮЩЕЕ ОПТОВОЛОКНО

Спектросмещающее оптоволокно — это оптическое волокно с люминесцентной добавкой, основным свойством его является — высвечивание поглощенного спектра света на определённую длину волны. В силу особенностей физических характеристик СВ не полностью прозрачно к своему собственному излучению и поэтому относительная длина затухания света (длина на которой интенсивность света падает в  $e$  раз)  $\sim 2 - 4$  м, что не позволяет отдалять на существенное расстояние сам фотоприемник от сцинтилляционного материала, в то время как относительная длина затухания света для ПВ на тех же длинах волн  $\geq 10$  м [13; 14].

Существуют разные типы оптических волокон, соответственно разные характеристики материала и потери при изгибах и сферы применения. Нас интересует количество потерь в сцинтилляторе при фотосборе благодаря СВ, поэтому необходимо описать основные механизмы потерь света в оптоволоконках.

## 3 МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРИ СВЕТА

### 3.1 ПОГЛОЩЕНИЕ

Одинаковое количество материала поглощает одинаковую долю света с одинаковой длиной волны. Поглощение также является кумулятивным, поэтому оно зависит от общего количества материала, через который проходит свет. Если поглощение составляет 2% на сантиметр, оно поглощает 2% света на первом сантиметре и 2% света на следующем сантиметре и так далее [15].

### 3.2 ВНУТРЕННЕЕ ПОГЛОЩЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Данный тип потерь возникает в результате взаимодействия световой волны с внутренними компонентами материала волокна. От потерь данного рода можно избавиться только путем изменения материала волокна. Например, инфракрасная полоса поглощения  $SiO_2$  — это и есть внутреннее поглощение материала, но при длинах волн видимого света (0,38 – 0,78 мкм), инфракрасные хвосты поглощения вносят незначительный вклад. На Рисунке 3.1 иллюстрирован график зависимости потерь света от длины волны [15].

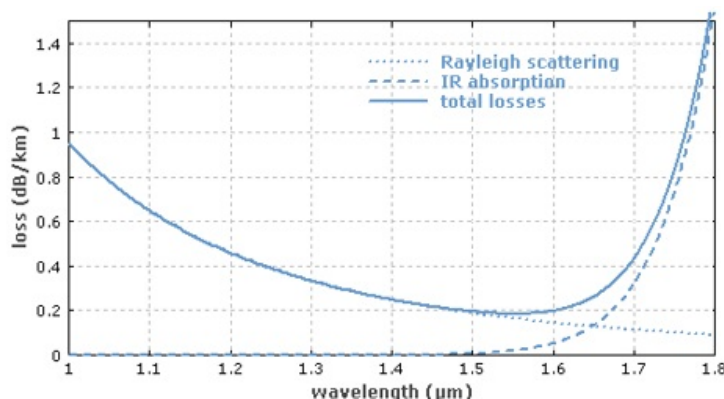


Рисунок 3.1 — График зависимость потерь света в оптоволокне от длины волны [15]

### 3.3 ПОГЛОЩЕНИЕ ВНЕШНИХ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ

Данный тип поглощения связан именно с наличием определенного количества ионов металла, например:  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  и иона  $OH^-$  из воды, растворенной в стекле. Затухание от этих примесных ионов показано в следующей Таблице 3.1 [15].

Таблица 3.1 — Параметры ионных примесей в сцинтилляторах. Потери при 1 ppm примеси, максимум длины волны излучения ( $\lambda_{max}$ ) [15]

Примесный ион	Потери при 1 ppm примеси, дБ/км,	$\lambda_{max}$ , нм
$Fe^{2+}$	0,68	1,1
$Fe^{2+}$	0,15	0,4
$Cu^{2+}$	1,1	0,85
$Cr^{3+}$	1,6	0,625

Примечание: 1 ppm =  $10^{-3}$  %, в случае твердых примесей 1 ppm = 1 мг/кг

### 3.4 РАССЕЯНИЕ

Рассеивание света это процесс в котором происходит взаимодействие волны с частицей так, что энергия переносится в другие направления, то есть часть свет распространяется в других направлениях. Как и в случае поглощения, так и в случае рассеяния происходят потери света. Существует два основных типа рассеяния: линейное рассеяние и нелинейное рассеяние.



В первом случае мощность рассеянного света пропорционально мощности самой волны и после рассеяния частота света не меняется (в отличие от нелинейной). Если в волокне распространяется электрическое поле с высоким значением оптической мощности, то происходит нелинейное рассеяние, оно является причиной высоких потерь света во всех стороны распространения [15].

### 3.5 ПОТЕРЯ МАКРОИЗГИБА

Макроизгиб — это глобальная деформация волокна, представляющая собой изгиб радиус которого гораздо больше радиуса самого волокна. Сам макроизгиб может быть причиной существенных потерь только при малом значении радиуса самого изгиба. В случае большого значения радиуса изгиба ( $\sim 15 - 30$  см) потери крайне малы и могут пренебрегаться. Однако, когда волокна подвергаются изгибу радиус которого меньше определённого значения, потери света существенно возрастают. Схема вылетающих фотонов при макроизгибе показана на Рисунке 3.2 [15].

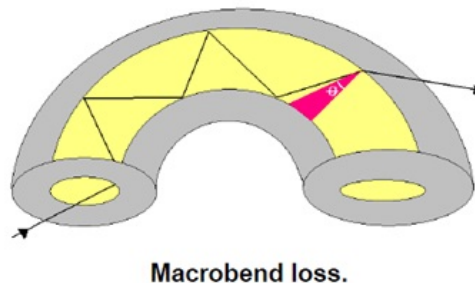


Рисунок 3.2 — Потеря при макроизгибе [15]

### 3.6 ПОТЕРЯ МИКРОИЗГИБА

Микроизгибы — это локальные деформации волокна на границе раздела сердцевина-оболочка. Появляются они в результате дефекта при производстве или взаимодействий с внешними объектами, оказывающими существенное локальное напряжение на волокно. Сами деформации представляют собой локальное осевое смещение волокна (порядка мкм). На Рисунке 3.3 отображена схема потерь при микроизгибе оптоволокна [15].

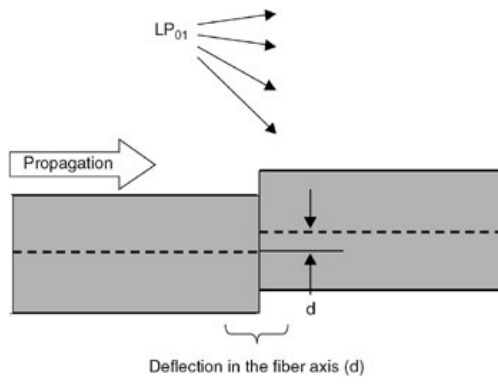


Рисунок 3.3 — Потеря при микросдвиге осей [15]

# 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

## 4.1 УСТАНОВКА

Была собрана установка для сбора спектра сигнала с вычетом пьедестала, для волокон Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow, Kuraray, схема отображена на Рисунке 4.1.

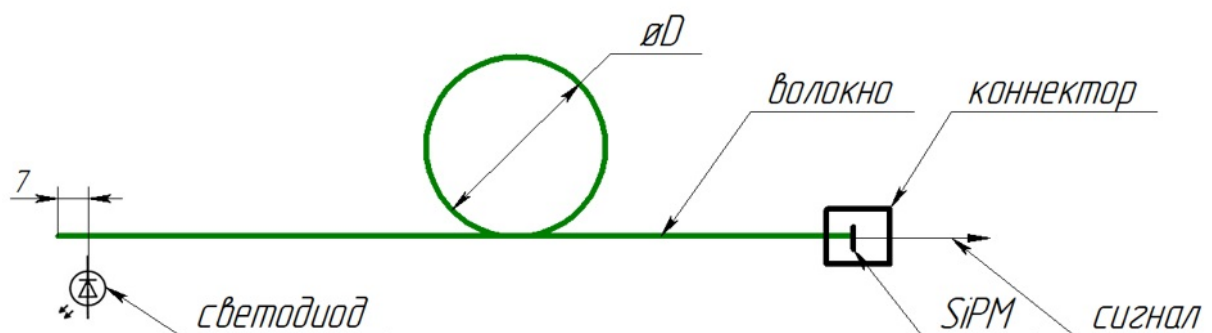


Рисунок 4.1 — Схема установки



Рисунок 4.2 — Фото установки

На светодиод подавался сигнал с генератора и тот работал на длине волны  $\lambda = 450$  нм, далее стыковался вплотную к СВ (с помощью распечатанной 3D детали) на расстоянии 7 мм от конца, далее волокно скручивалось в форму окружности с диаметрами  $D = 28,7; 39,8; 38,8; 45$  мм и второй конец волокна стыковался с SiPM с которого снимался сигнал на осциллографе Лесроу, для заметного снижения шумов, сигнал с SiPM считывался только по сигналу с первого канала, куда подавался напрямую сигнал с генератора (фото установки на Рисунке 4.2). Спектры сигнала получились гауссовой формы, и на осциллографе Лесроу снималась координата максимума распределения, наряду со среднеквадратичным отклонением.

## 4.2 ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА

Потери света в волокне в результате скручивания вычислялись по формуле (4.1)

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{x_n}{x_0}\right) \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где  $x_n$  — максимум распределения сигнала при скручивании,  $x_0$  — максимум выпрямленного волокна,  $\eta(\%)$  — процент потерь света в волокне при скручивании волокна в определённый диаметр. И после этого рассчитывалась погрешность для самих потерь через погрешность косвенных измерений по формуле (4.2)

$$\Delta\eta(\%) = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_n}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_0}{x_0^2}\right)^2} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где  $\Delta x_n$  — изменения среднеарифметического значения в спектре сигнала,  $\Delta x_0$  — погрешность для выпрямленного волокна. Для волокон не менялись настройки на генераторе сигнала и источнике тока с целью получения наиболее точных данных. В процессе измерений было замечено, что среднее арифметическое стабилизируется после длительности измерений в  $t \approx 1$  мин, далее спектр пропорционально возрастает по количеству вхождений. Все спектры собирались за время  $t \geq 2$  мин. Затем тот же самый метод и ход измерений был применен для волокон Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow. Построены графики для сравнения зависимости % потерь света от

диаметра скручивания для выше перечисленных типов СВ (Рисунок 4.3).

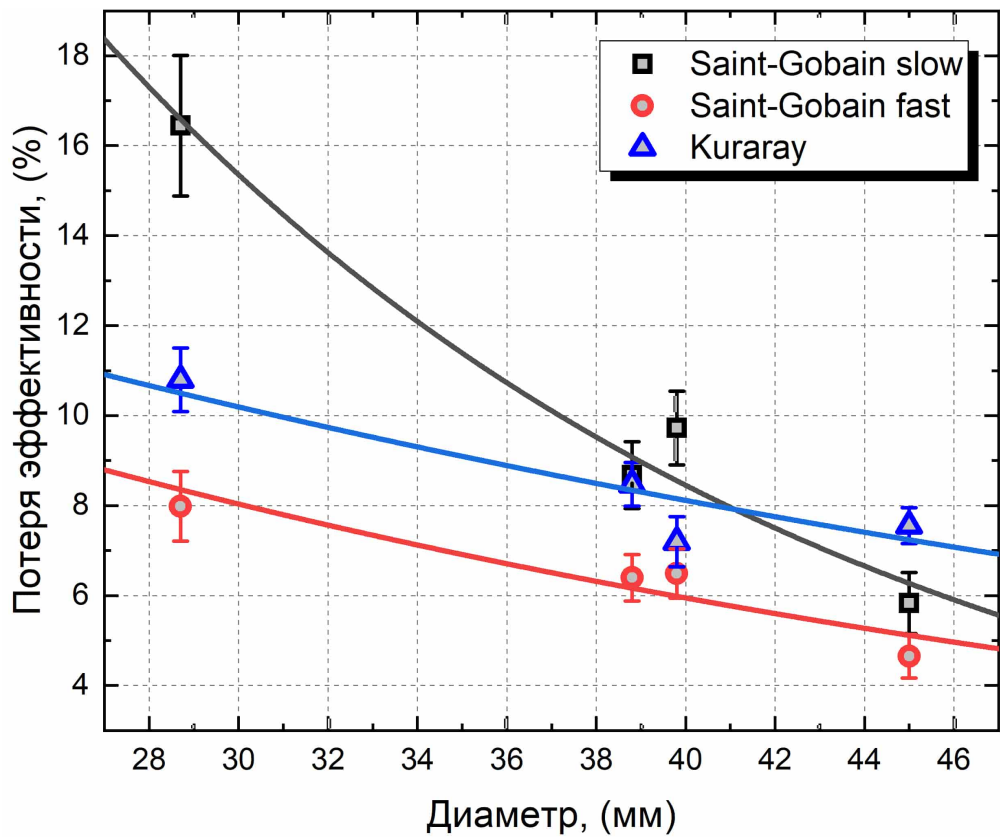


Рисунок 4.3 — Экспериментальные потери света в СВ Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow, Kuraray

также Рисунок 4.4 выведены спектры сигналов полученные при скручивании волокон марки Saint-Gobain slow, fast и Kuraray. Ось ОХ отображает заряд, собранный на SiPM со спектрсмещающего волокна. Размерность оси ОХ В·с была определена со спектров полученных на осциллографе.

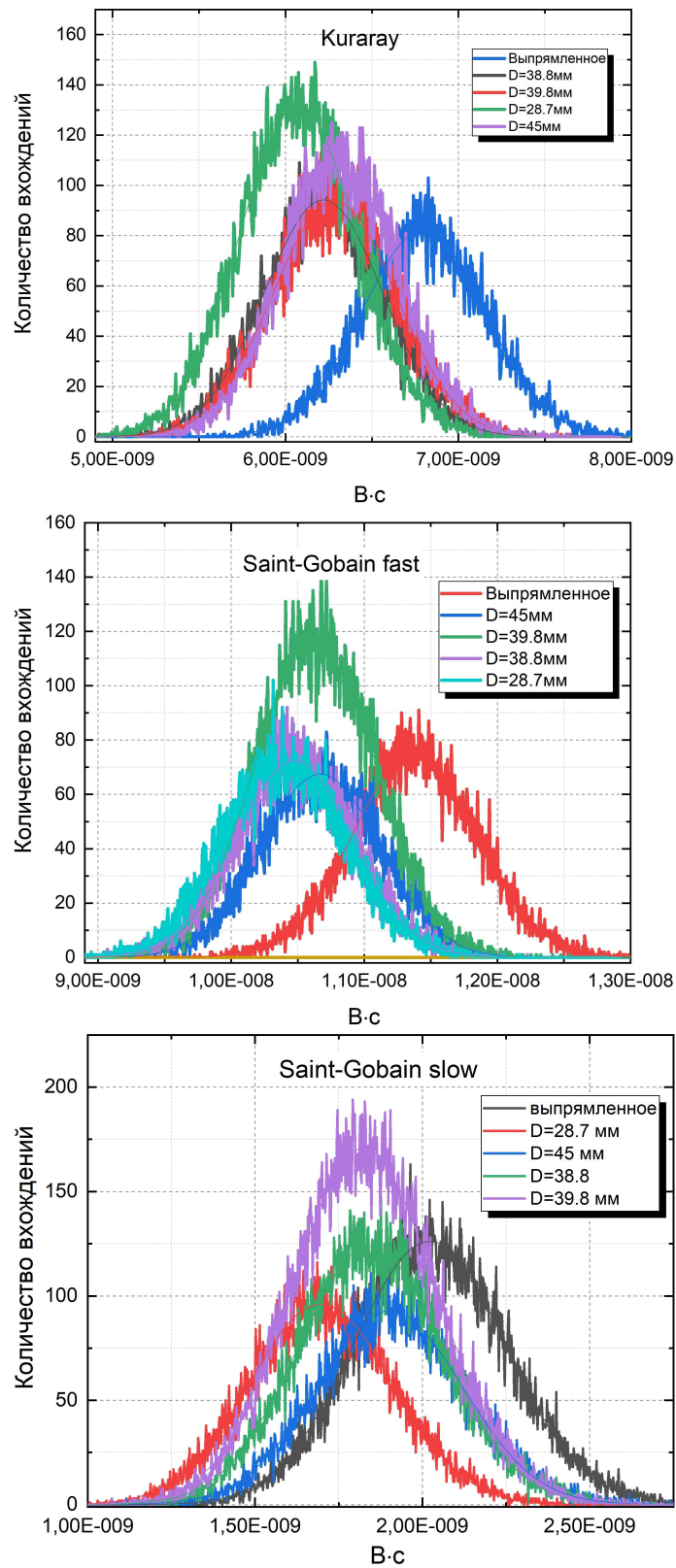


Рисунок 4.4 — Полученные спектры сигнала со скрученного СВ (сверху вниз) Kuraray, Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow при различных диаметрах и выпрямленном волокне

## 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТА В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS

### 5.1 МОДЫ СВ И ПВ

Первоначально нужно дать определение, что такое мода в волноводе. Мода – стабильное состояние электромагнитного поля внутри световода или оптического резонатора. Представляет собой одно из решений уравнений Максвелла для определённой, заданной условиями структуры.

Далее была поставлена цель понять какой модовый состав у СВ и прозрачного волокна при работе на длине волны  $\lambda = 450$  нм и был проведен модовый анализ оптоволокон с внешним диаметром  $D_{clad} = 1$  мм и коэффициентом преломления  $n_{clad} = 1,49$  с внутренним диаметром  $D_{core} = 0,96$  мм коэффициентом преломления  $n_{core} = 1,59$  (СВ);  $D_{out-clad} = 1$  мм внешний диаметр облицовки с коэффициентом преломления  $n_{out-clad} = 1,42$ , внутренний диаметр облицовки  $D_{in-clad} = 0,98$  мм, коэффициентом преломления  $n_{in-clad} = 1,49$ , внутренний диаметр сердцевины  $D_{core} = 0,96$  мм с коэффициентом преломления  $n_{core} = 1,59$ . Чтобы определить является ли волокно Saint-Gobain slow, fast и Kurray многомодовым или одномодовым, был применен такой параметр, как  $V$  – волноводный параметр или волноводная частота, представляющий собой безразмерную величину, объединяющую такие величины, как:  $\lambda$  – длина волны,  $n_{core}$  – максимальное значение коэффициента преломления в сердцевине,  $n_{clad}$  – коэффициент преломления в наружной части СВ,  $\rho$  – радиус внутреннего слоя (*clad*), сам волноводный параметр рассчитывается по формуле (5.1)

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \rho (n_{core}^2 - n_{clad}^2), \quad (5.1)$$

при  $\lambda = 550$  нм,  $\rho = 0,48$  мм,  $n_{core} = 1,59$ ,  $n_{clad} = 1,49$  получается  $V \approx 3047$ , то

есть  $V \gg 1$ , вывод формулы (5.1) подробно расписан в [16]. Согласно этим данным, можно сделать вывод, что волокна являются многомодовым. Число решений для направляемых мод волоконного световода —  $M_{bm}$ , и для многомодового волоконного световода мы имеем  $V \gg 1$ , и у него количество мод будет выражаться через соотношение  $M_{bm} = \text{Int}(V^2/2)$  [16], где  $\text{Int}$  — это функция, выводящая наименьшее целое число превышающее  $V^2/2$ . В данном случае получается, что  $M_{bm} \approx 4,6 \cdot 10^6$ . Также можно сказать, что многомодовые волокна — это оптические волокна, которые могут поддерживать более одной моды распространения света в сердцевине волокна. Эти волокна зависят от их параметров, таких как радиус сердцевины и преломляющая способность материала.

В силу малой разницы геометрических и физических параметров между волокнами Saint-Gobain всех типов и Kuraray, был проведен модовый анализ для СВ типа Kuraray и вместе с этим для прозрачного волокна той же марки.

Была разработана 2D модель для сечения СВ с вышеперечисленной геометрией и ПВ, и добавлен наружный слой  $D=1,2$  мм обозначающий воздух с коэффициентом преломления  $n=1$ . Далее была создана сетка этих чертежей для расчёта математической модели в программе COMSOL Multiphysics (Рисунок 5.1 отображает созданную геометрию сечения и сетку сечения ПВ и СВ).



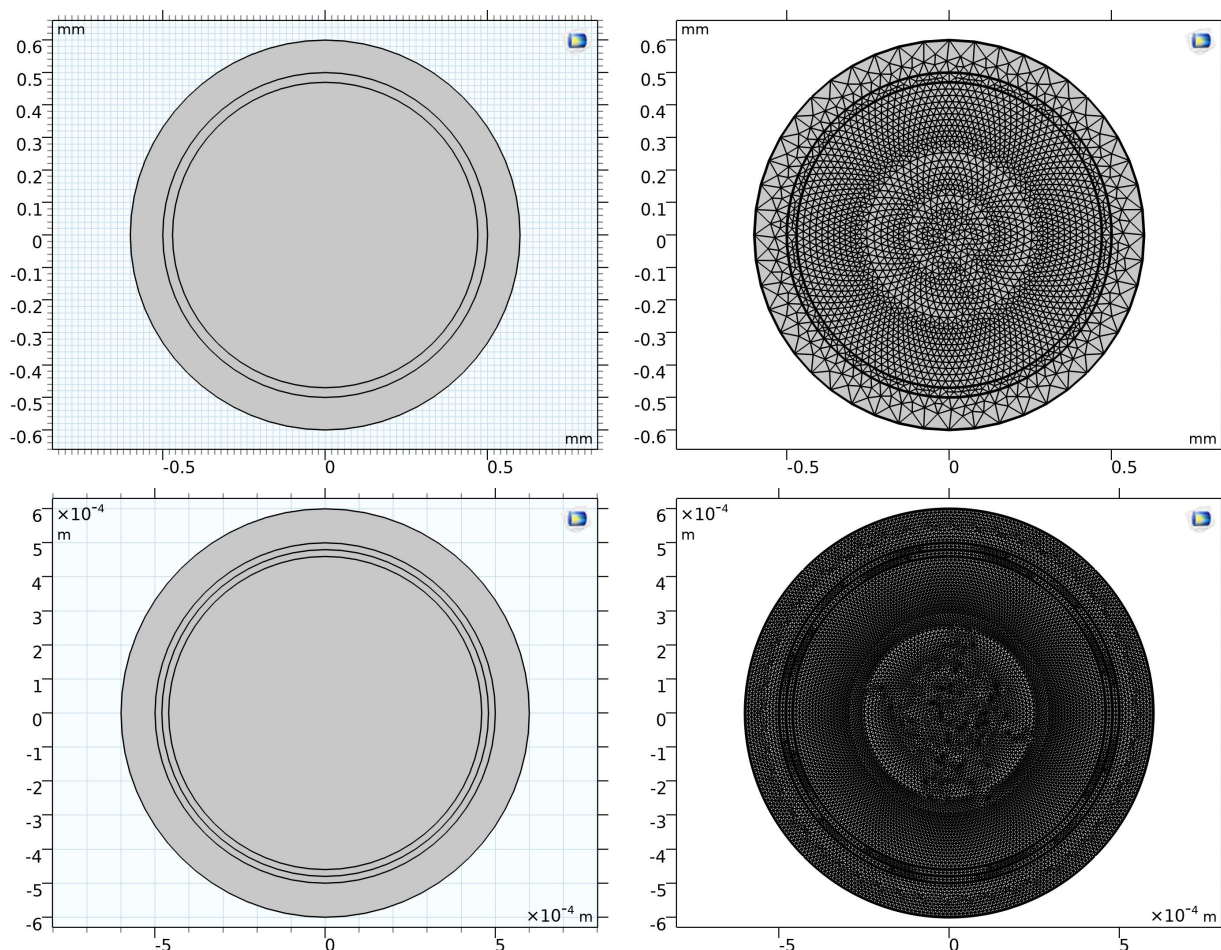


Рисунок 5.1 — Верхний ряд: Геометрия сечения СВ (слева); Сетка сечения СВ (справа). Нижний ряд: Геометрия сечения прозрачного волокна (слева); Сетка сечения прозрачного волокна (справа) [17]

Анализ проводился с помощью подключённого физического раздела «Волновая оптика, электромагнитные волны, частотная область» (ewfd), он используется для расчёта распределений электромагнитного поля, гармонического по времени, затем подключался аналитический раздел на анализ мод оптоволокна (Boundary Mode Analysis). В ходе моделирования была взята длина волны света распространяющегося  $\lambda = 450$  нм, а частота волны бралась равной  $f_0 = \frac{c}{\lambda} \approx 660$  ТГц, поиск мод проводился относительно коэффициента преломления сердцевины, то есть  $n_{core} = 1,59$ . На Рисунке 5.2 отображены первые 16 мод в спектросмещающем волокне. На Рисунке 5.3 отображены первые 16 мод в прозрачном волокне.

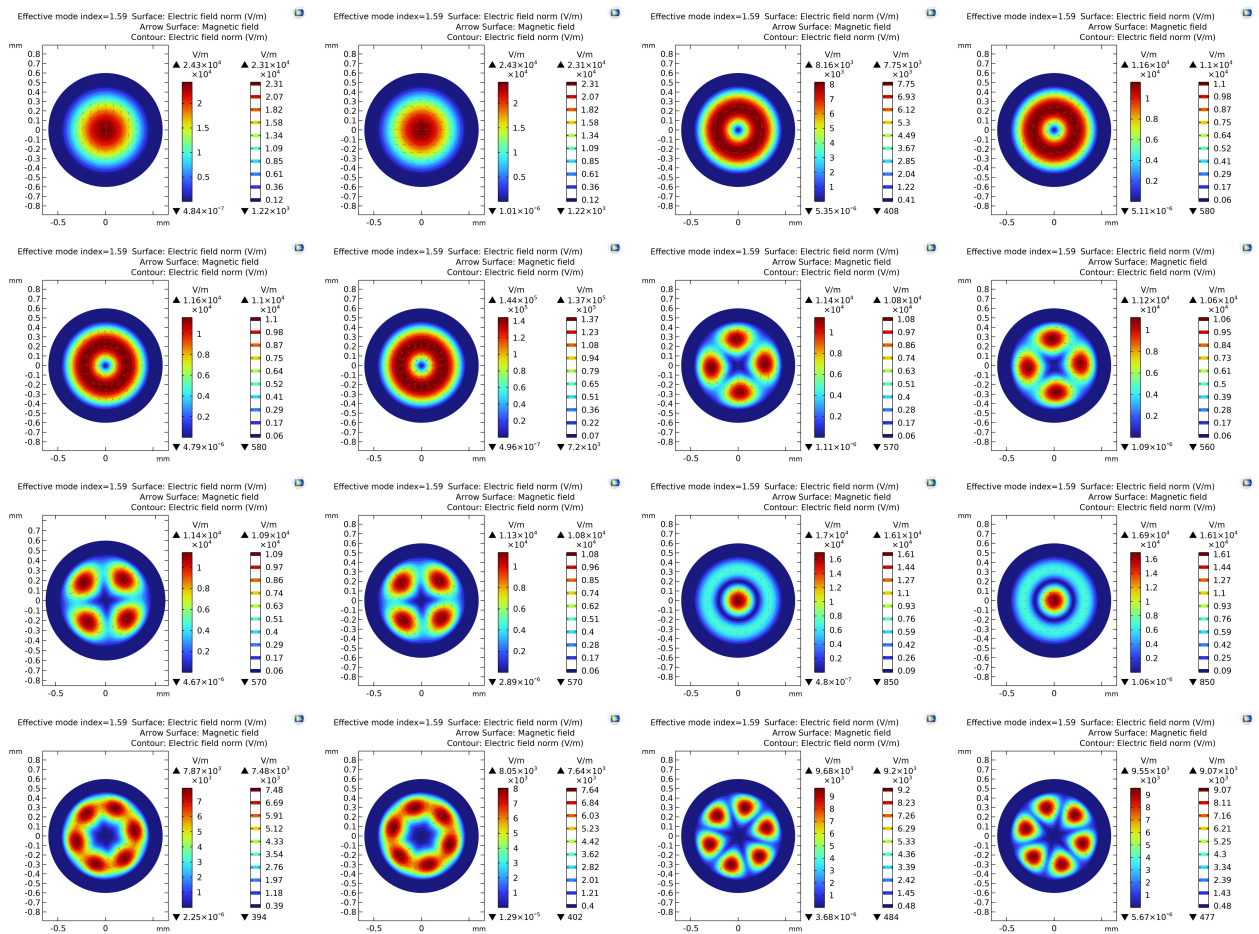


Рисунок 5.2 — Первые 16 мод в СВ марки Kuga-gau. Цветовая гамма отображает электрическое поле, красные направляющие стрелки магнитное поле

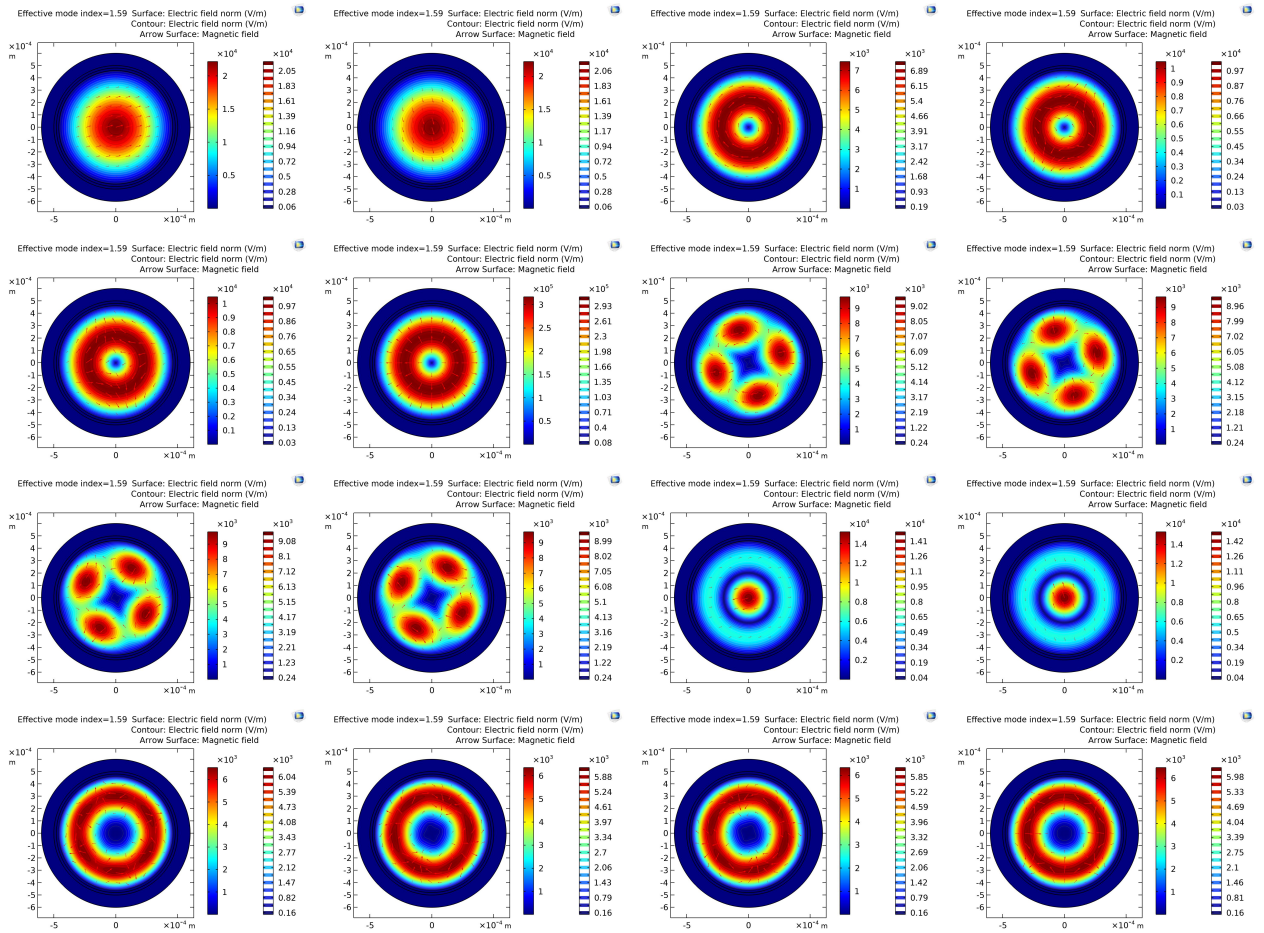


Рисунок 5.3 — Первые 16 мод в ПВ марки Kuga-gau. Цветовая гамма отображает электрическое поле, красные направляющие стрелки магнитное поле

## 5.2 ПОТЕРИ СВЕТА В ПРОЗРАЧНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

В детекторе ВВС после вывода СВ из модулей пластиковых сцинтилляторов, оно будет стыковаться с прозрачным волноводом марки Kuraray Clear, затем соединиться с SiPM и сигнал будет выводиться для обработки данных. Таким образом необходимо оценить потери света в прозрачном оптоволокне от его длины, наряду с этим был проведен аналогичный анализ для прозрачного оптоволокна Saint-Gobain BCF-98. Был взяты данные от графика для СВ Kuraray Y-11, так как он будет использоваться для создания прототипа ВВС. На Рисунке 5.4 выведены спектры поглощения и высвечивания для волокон марки Kuraray Y-7; -8; -11.

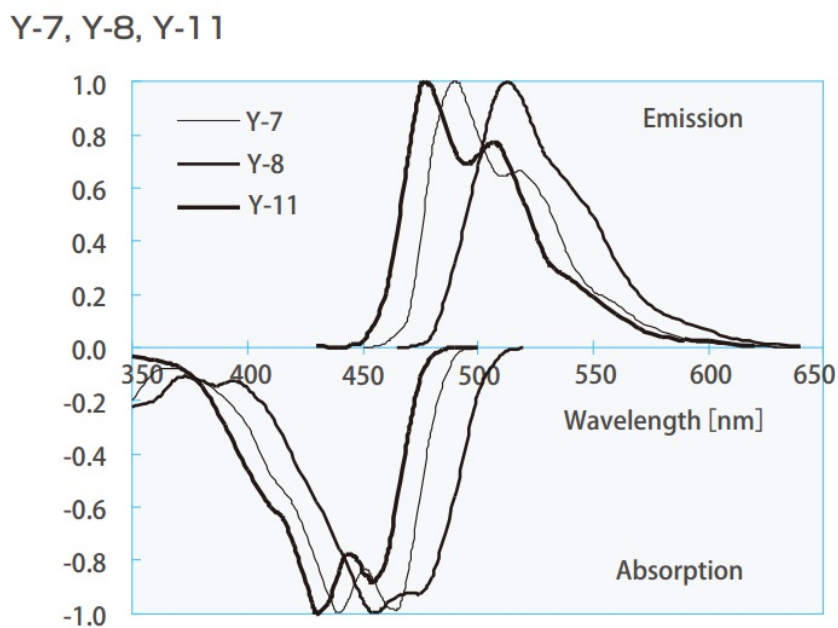


Рисунок 5.4 — Спектр поглощения и высвечивания света в СВ Kuraray Y-7; -8; -11 [13]

Затем спектр высвечивания Y-11 был оцифрован с помощью программы Origin, и полученный массив данных из которого было найдено среднее арифметическое значение  $\bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\sum y_i}$ , где  $x_i, y_i$  — координата оси абсцисс и ординат точки в массиве,  $\bar{\lambda} \approx 503$  нм. Из графиков потерь света от длины волны (Рисунки 5.5, 5.6) для прозрачных оптоволокон были построены графики потерь света от длины самого волокна.  $\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%$ , так как

$P_{out} = P_{in} \cdot e^{-\alpha x}$ , то получаем формулу 5.2

$$\eta(\%) = e^{-\alpha x} \cdot 100\%, \quad (5.2)$$

где  $\eta(\%)$  – эффективность волокна на длине  $x$ ,  $P_{out}$  – мощность света выходящая из прозрачного оптоволокна,  $P_{in}$  – мощность света входящая в ПВ,  $\alpha(\text{м}^{-1})$  – коэффициент ослабления. Затем был перевод из  $\alpha(\frac{\text{дБ}}{\text{км}})$  в  $\alpha(\text{м}^{-1})$ , через формулу (5.3)

$$\alpha(\text{м}^{-1}) = 0,23 \cdot 10^3 \cdot \alpha(\frac{\text{дБ}}{\text{км}}). \quad (5.3)$$

Таким образом из графиков удельных потерь было получено для волокна марки Kuraray  $\alpha_K(\frac{\text{дБ}}{\text{км}}) \approx 310 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$  и  $\alpha_K(\text{м}^{-1}) \approx 0,0713 \text{ м}^{-1}$ , для волокна марки Saint-Gobain Clear BCF-98  $\alpha_S(\frac{\text{дБ}}{\text{км}}) \approx 338 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$  и  $\alpha_S(\text{м}^{-1}) \approx 0,0777 \text{ м}^{-1}$ . В Wolfram Mathematica 12.1 были построены графики (Рисунок 5.7) эффективности в прозрачном волокне марки Kuraray Clear и Saint-Gobain Clear BCF-98 от длины самого волокна по формуле (5.2), была найдена  $L_{\text{отн}}=14,02 \text{ м}$  для Kuraray и  $L_{\text{отн}}=12,83 \text{ м}$  для Saint-Gobain обозначающая длину волновода на конце которого свет ослабевает в  $e$  раз.

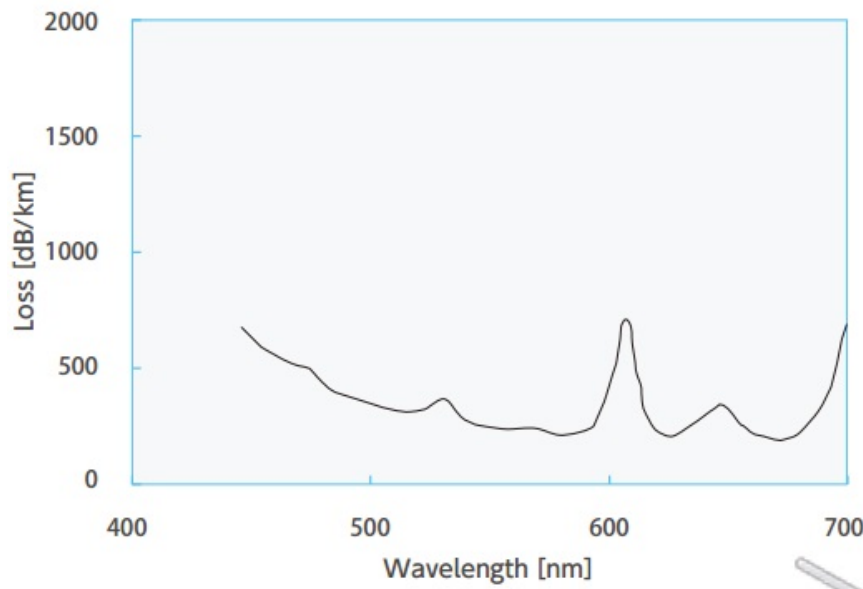


Рисунок 5.5 — График удельных потерь света от длины волны в оптоволокне марки Kuraray Clear [13]

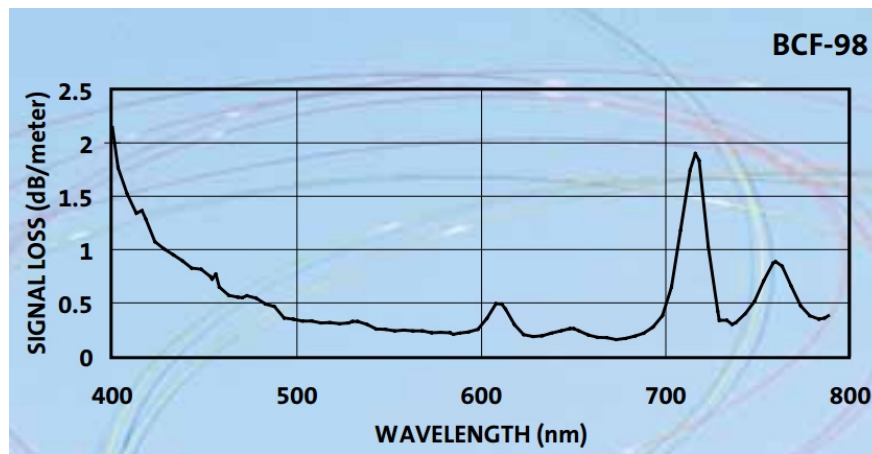


Рисунок 5.6 — График удельных потерь света от длины волны в оптоволокне марки Saint-Gobain Clear BCF-98 [14]

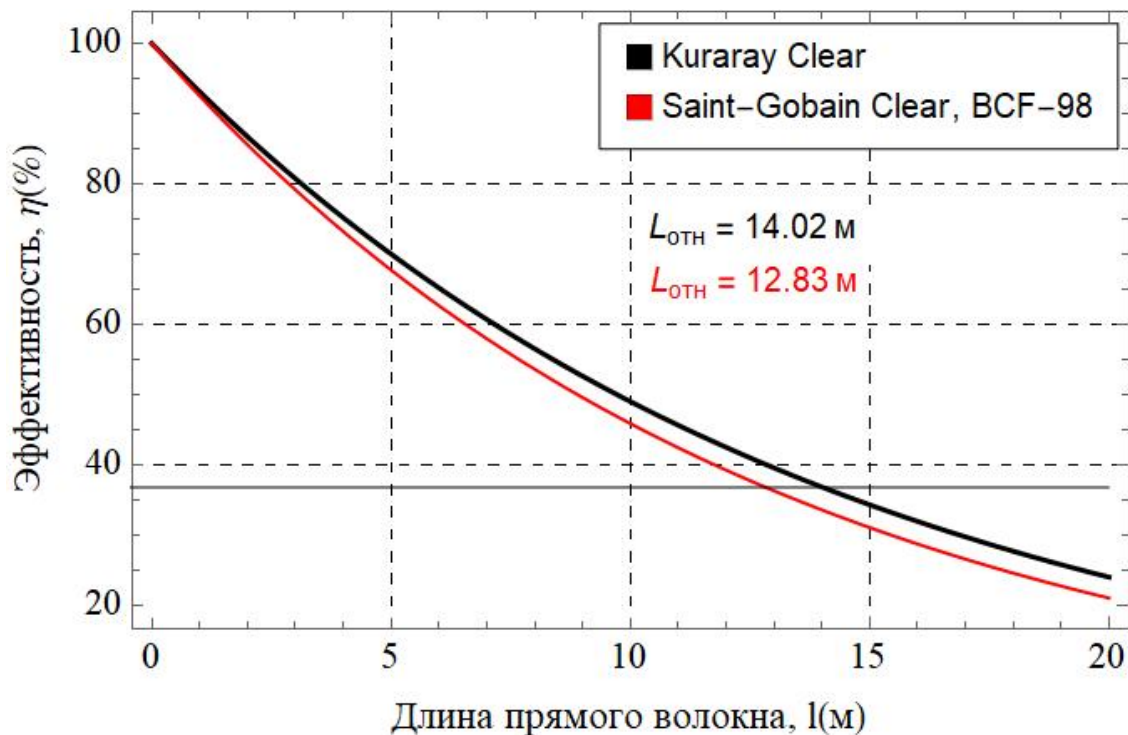


Рисунок 5.7 — Теоретический график эффективности в прозрачном волокне марки Kuraray Clear и Saint-Gobain Clear BCF-98 от длины самого волокна

### 5.2.1 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛУЧЕЙ В ОПТОВОЛОКНЕ

Была создана 3D модель скрученного оптоволокна с геометрией сечения и физическими характеристиками для спекстрсмещающего волокна марки Kuraray, 3D модель описывается характеристиками спирали: диаметром скручивания 20 мм, шагом витка 1,05 мм, кол-во витков 1; длина

прямого волокна в каждую сторону 40 мм, далее была создана сетка разбиения, затем была подключена физика Геометрической оптики (gor), и в качестве анализа использовался раздел Трассировки лучей (Ray Tracing), также было подключено раздел позволяющий не просчитывать и не отображать не нужные лучи (Ray Termination), источник света сферического типа помещался внутрь волокна на расстояние от торца 1 мм, количество вторичных лучей было равно 0, первичных 5000, длина волны источника  $\lambda = 550$  нм, расчёт лучей происходил в диапазоне от 0 см до 20 см с шагом 1 мм, со скоростью света с учетом коэффициентом преломления соответствующей каждой среде (снаружи 3D модели задана среда воздух с коэффициентом преломления  $n = 1$ ), снаружи волокна (слева от источника света) была добавлена деталь для замораживания лучей выходящих из оптоволокна (для уменьшения шумового загрязнения лучами рисунка). На Рисунке 5.8 показана геометрия разработанной модели и наложенная сетка для математического расчёта.

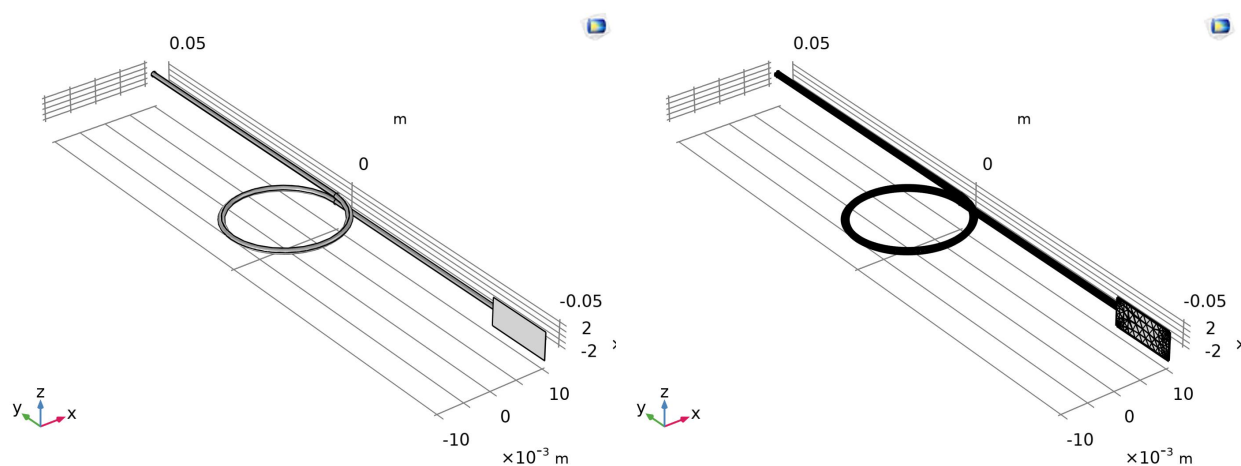


Рисунок 5.8 — 3D модель волокна (слева); 3D модель с сеткой разбиения (справа)

На Рисунке 5.9 указаны траектории световых лучей, в правой части указана логарифмическая шкала времени, позволяющая по цветовой гамме определить в какое время находился луч в определённой области. Общее время распространения света  $t = 1,06$  нс.

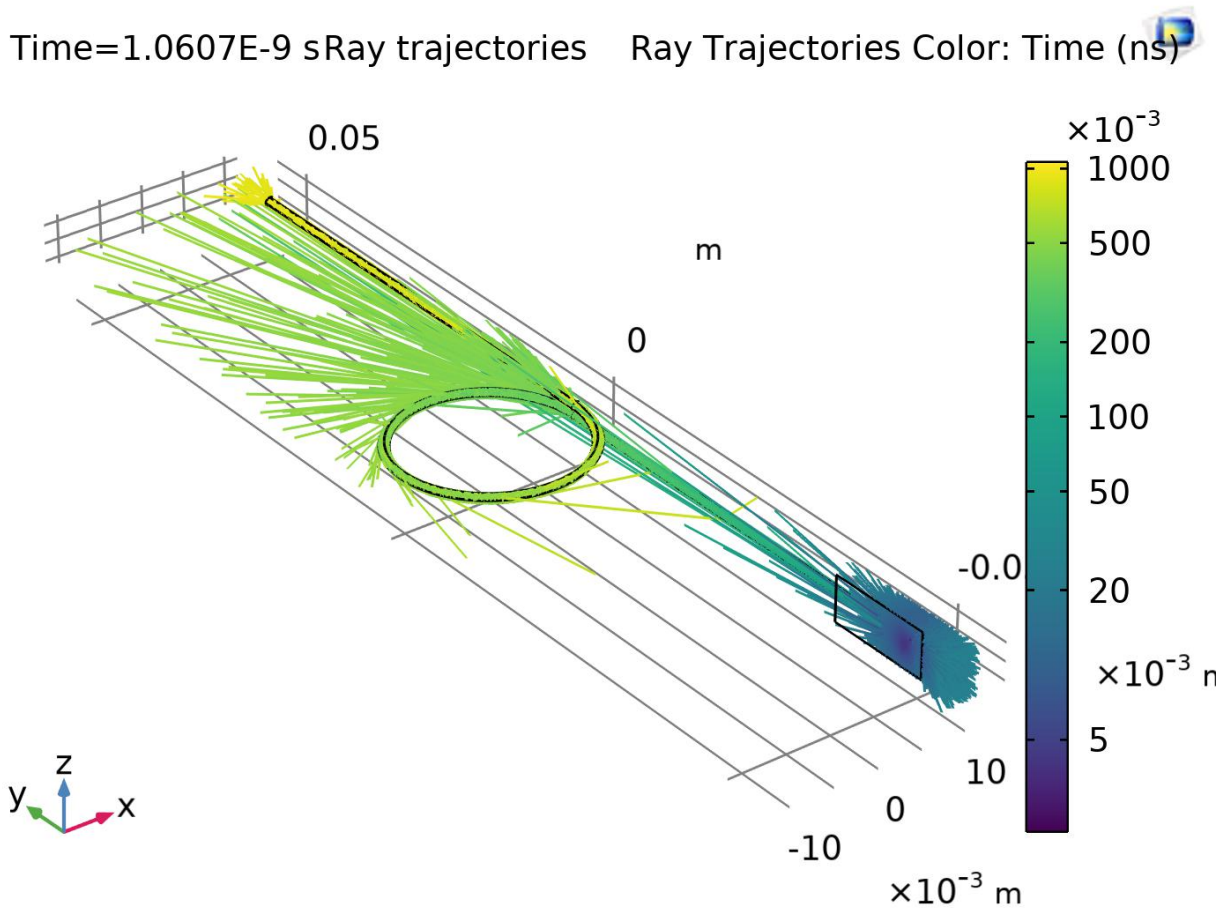


Рисунок 5.9 — Схема распространения света в скрученном СВ Kuraray

## 5.2.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ СВЕТА

Модель из предыдущего раздела была дополнена цилиндрическим аккумулятором над волокном в районе сферического источника света (с целью полного счёта количества вылетающих лучей из волокна, все они не оказывают влияние на картину потери света, происходящую далее в волокне), так же была уменьшена длина выпрямленные части волокна с 40 мм до 15 мм, вместе с этим была создана параметрическая сферическая оболочка радиуса  $1,5R$  и толщиной 1 мм, ее функция заключается в подсчёте лучей вылетающих из волокна при скручивании. Моделирование происходило радиусов скручивания  $R$  от 10 до 30 мм с шагом 5 мм. Источник света испускал волны в голубой области длин волн (450 нм), количество первичных лучей 1000, вторичных 0. Расчёт потерь света производился по формуле (5.4)

$$\eta(\%) = \frac{N_{out}}{1000 - N_{noise}} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$



где  $N_{noise}$  — количество лучей вылетающих из волокна и поглощающихся цилиндром над источником,  $N_{out}$  — количество лучей вылетающих из-за скручивания и поглощающихся сферической оболочкой снаружи,  $\eta(\%)$  — процент потерь света в волокне при скручивании волокна определённым диаметром. На Рисунке 5.10 сверху показано фото модели для которой происходил расчёт, при  $R = 1$  мм, снизу схема распространения света для модели указанной на первом фото (по цветовой шкале справа можно определить при каком времени лучи находились в волокне и за ним).

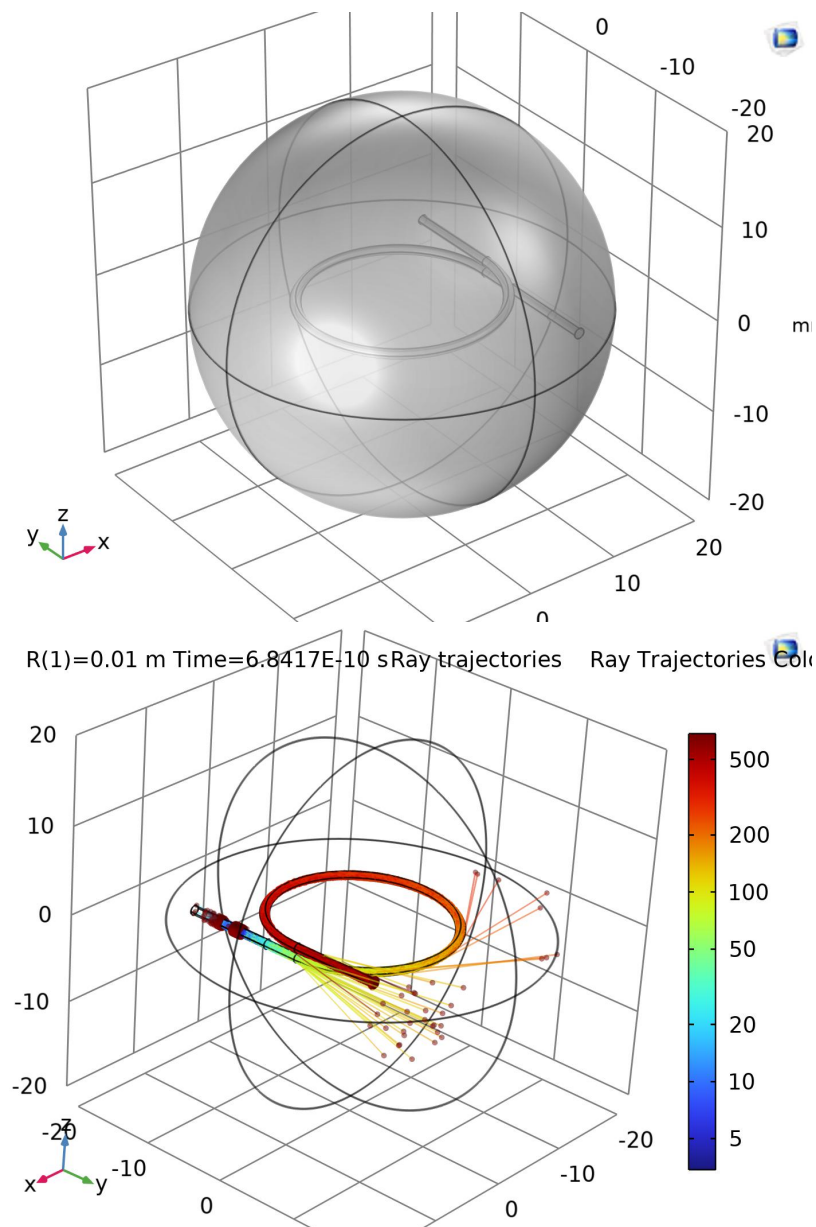


Рисунок 5.10 — 3D модель схемы измерения потерь света в скрученном волокне (наверху); Фото с потерями света, распространяющегося при скручивании оптоволокна (внизу)

Сфера окрест волокна работает в качестве счётчика вылетающих фотонов. Цилиндр над участком прямого волокна, внутри которого сферический источник света, собирает лучи, вылетающие из волокна и не влияющие на дальнейший процесс распространения света. Лучи, достигающие противоположного дальнего торца волокна относительно источника света, замораживаются на торце и не долетают до сферы.

Далее был получен график потерь света при моделировании и был построен на одной плоскости вместе с данными полученными от эксперимента (графики иллюстрированы на Рисунке 5.11) и для сравнения были построены графики моделирования, экспериментальных и технические данные от производителя для волокна Kuraray (Рисунок 5.12).

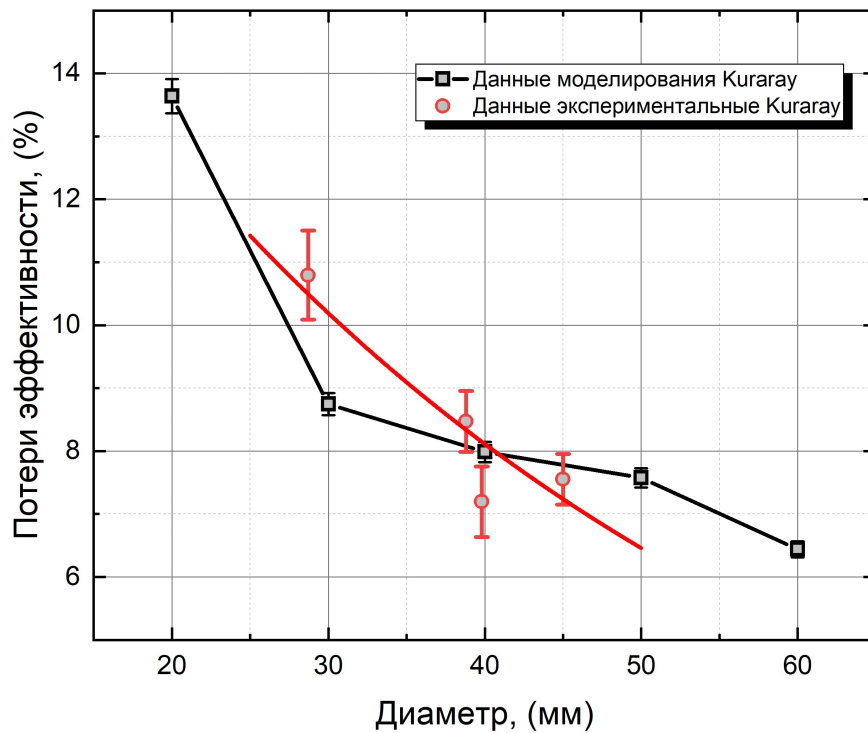


Рисунок 5.11 — Графики потерь эффективности при моделировании и измерении для волокна марки Kuraray

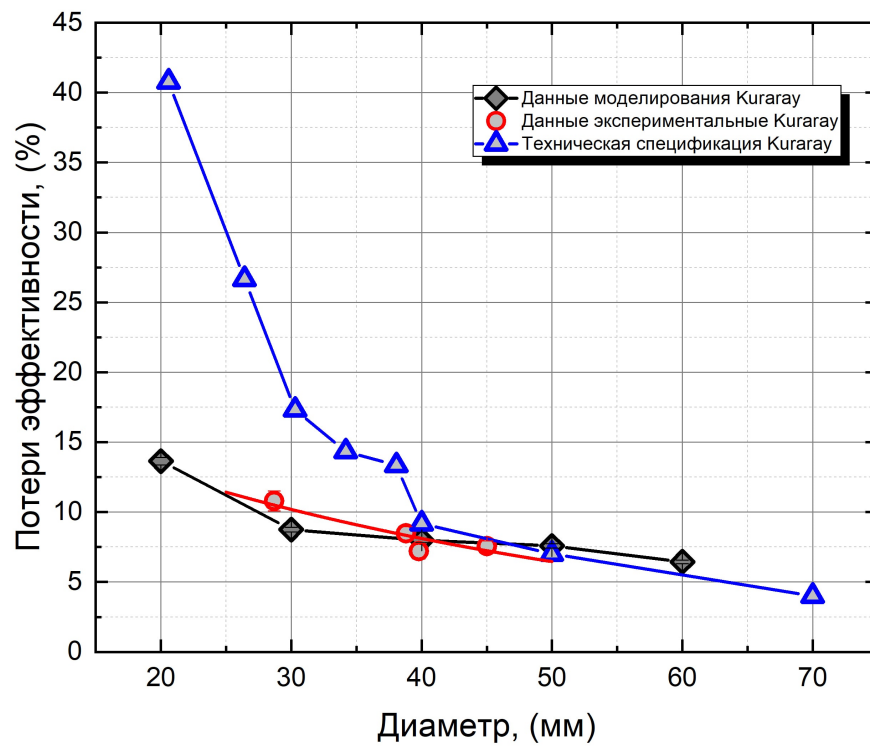


Рисунок 5.12 — Графики потерь эффективности при моделировании и измерении для волокна марки Kuraray

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены измерения потерь света в СВ марки Kuraray и Saint-Gobain fast, slow, построены графики (Рисунок 4.3).

Проведен модовый анализ и получены моды для СВ и ПВ Kuraray (Рисунок 5.2,5.3).

Из технических характеристик прозрачного оптоволокна Kuraray и Saint-Gobain VCF-98 была оценена эффективная длина падения интенсивности в  $e$  раз, соответственно:  $L_{отн}=14,02$  м и  $L_{отн}=12,83$  м для средней длины волны испускаемого излучения  $\lambda = 503$  нм, построен график эффективности пропускания света от длины самих волокон (Рисунок 5.7).

Получена схема распространения света в скрученном волокне в зависимости от времени распространения (Рисунок 5.9).

Были рассчитаны потери света по результатам моделирования света в СВ с геометрическими характеристиками марки Kuraray, построен график со сравнением экспериментальных данных и данных моделирования (Рисунок 5.11) и график сравнения технических данных от производителя, экспериментальных и моделирования (Рисунок 5.12). Из Рисунка 5.11 видно, что все точки моделирования и эксперимента совпадают на уровне  $2\sigma$ . На Рисунке 5.12 можно наблюдать отклонение экспериментальных и моделируемых данных от технических в точках с диаметром меньше 40 мм, это объясняется некачественными данными от производителя, в силу наличия повторяющихся отклонений результатов независимых измерений у разных лабораторий от данных производителя.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Guskov A.* Spin physics detector project at JINR // arXiv preprint arXiv:2110.08930. — 2021.
2. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [et al.]. — 2022. — arXiv:2102.00442 [hep-ex, physics:physics].
3. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / T. S. Collaboration [et al.]. — 2024. — arXiv: [2404.08317](https://arxiv.org/abs/2404.08317) [hep-ex].
4. The STAR event plane detector / J. Adams [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Vol. 968. — P. 163970.
5. *Gruppen C., Shwartz B.* Particle Detectors. — 2nd ed. — Cambridge University Press, 2023. — ISBN 978-1-00-940153-1.
6. *Solutions L.* Crystal Scintillators. — Дата доступа: 08.06.2024. <https://luxiumsolutions.com/radiation-detection-scintillators/crystal-scintillators>.
7. Сцинтилляционные детекторы. — Дата доступа: 08.06.2024. [https://msu-dubna.ru/hep/pluginfile.php/597/mod\\_resource/content/1/lekciya\\_3.pdf](https://msu-dubna.ru/hep/pluginfile.php/597/mod_resource/content/1/lekciya_3.pdf).
8. *Болоздыня А., Ободовский И.* Детекторы ионизирующих частиц и излучений: принципы и применения. — М. : Интеллект, 2012.
9. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П.* Частицы и атомные ядра. — М. : Издательство ЛКИ, 2007.

10. *Немченко И.* Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. — Дубна : Объединенный институт ядерных исследований, 2019.
11. *Solutions L.* Plastic Scintillators. — Дата доступа: 08.06.2024. <https://luxiumsolutions.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators>.
12. *Cerrito L.* Radiation and Detectors: Introduction to the Physics of Radiation and Detection Devices. — Springer International Publishing, 2017. — (Graduate Texts in Physics).
13. *Kuraray Trading Co. L.* Scintillating Fibers Wavelength Shifting Fibers Clear Fibers. — 2020. — Дата доступа: 08.06.2024. [https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf).
14. *Saint-Gobain Ceramics & Plastics I.* Plastic Scintillating Fibers. — 2010. — Дата доступа: 08.06.2024. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/specialinterest/phys/particlephysics/precisionphysicsatlowenergydam/TeachingContent/ASL/bicronfiber.pdf>.
15. Optical Fiber Loss and Attenuation. — Дата доступа: 08.06.2024. <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95048006-optical-fiber-loss-and-attenuation>.
16. Optical waveguide theory. Vol. 175 / A. W. Snyder, J. D. Love, [et al.]. — Chapman, hall London, 1983. — P. 656.
17. Investigation of Planar and Helical Bend Losses in Single- and Few-Mode Optical Fibers / A. V. Velamuri [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2019. — Vol. 37, no. 14. — P. 3544–3556.