

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
Исследование потерь в оптоволокне для детектора
ВВС

Научный руководитель
Доцент

_____ П. Е. Тетерин

Выполнил

_____ А. Д. Манаконов

Москва 2024

Оглавление

1	Цели работы	3
2	ВВС и SPD	3
	2.1 Описание элементов	3
	2.2 Общая схема ВВС	5
3	Сцинтилляторы	6
4	Оптоволокно	8
	4.1 Механизмы потери света	8
5	Экспериментальная часть и результаты обработки	11
	5.1 Установка	11
	5.2 Моды спектросмещающего волокна	14
	5.3 Потери света в прозрачном оптическом волокне Kuraray	15
	5.4 Визуализация лучей в оптоволокне	19
	5.5 Моделирование на потери света	21
6	Итоги	24
	Список использованных источников	25

1 Цели работы

Основной задачей является проведение подбора материалов для сцинтилляционного детектора для эксперимента SPD на коллайдере NICA в Дубне. Освоить сцинтилляторы, которые уже есть, а затем образцы других. В дальнейшем задача заключается в подборке оптоволоконна, клея и фотоумножителя, для данного проекта. Наряду с этим исследование потерь в оптоволоконне.

2 ВВС и SPD

2.1 Описание элементов

Два счетчика лучей (ВВС) будут расположены непосредственно перед системой PID в торцевых чашках установки SPD. Детектор должен состоять из двух частей: внутренней и внешней, которые на основе разных технологий. Внутренняя часть ВВС будет использовать быстросегментированную пластину MicroChannel. Концептуальный проект Детектора спиновой физики 99 (MCP) детекторы и должны работать внутри лучевой трубы, в то время как внешняя часть ВВС будет производиться из быстрых пластиковых сцинтилляционных плиток. Внутренняя часть охватывает приемку $30 \div 60$ мрад и должна быть разделена на 4 слоя, состоящих из 32 азимутальных секторов.

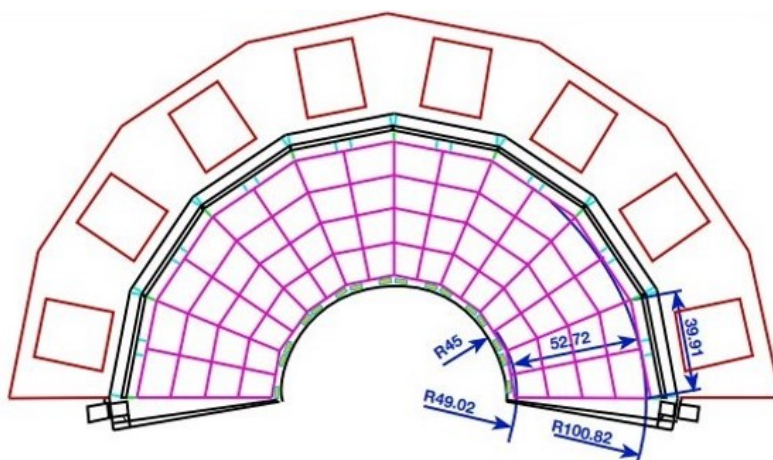


Рисунок 1 – ВВС: сегментизация по азимуту и полярному углу. Все размеры в миллиметрах.[1]

Внешняя часть, закрывающая полярные углы от 60 до 500 мрад будут разделены на 5 или 6 концентрических слоев с 16 азимутальными секторами в каждый из них. Окончательная степень детализации зависит от дальнейшей оптимизации для всего диапазона энергий. столкновения на SPD. Пурпурная часть представляет MCP детектор, в то время как внутренний слой внешней части показан красным цветом. Основными задачами Beam-Beam Counters являются:

1. Локальная поляриметрия в SPD на основе измерений азимутальных

асимметрий в инклюзивном рождении заряженных частиц в столкновениях;

2. Мониторинг столкновений пучков ;
3. Участие в точное определение времени столкновения t_0 для событий, в которых другие детекторы не могут быть использованы для этого (например, в случае упругого рассеяния) ;

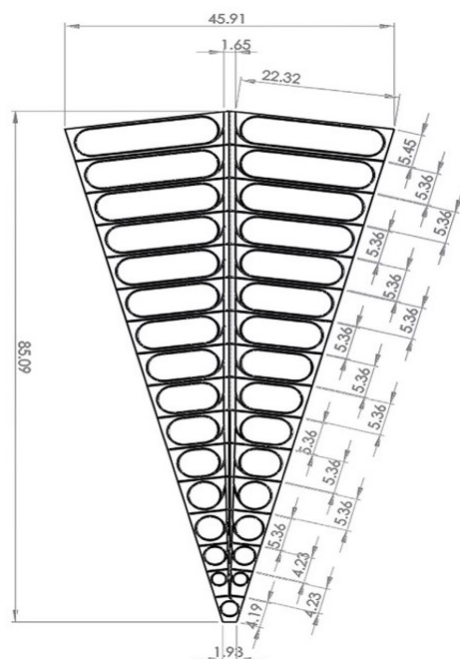


Рисунок 2 – Детальный эскиз одного сектора с масштабом в см [2]

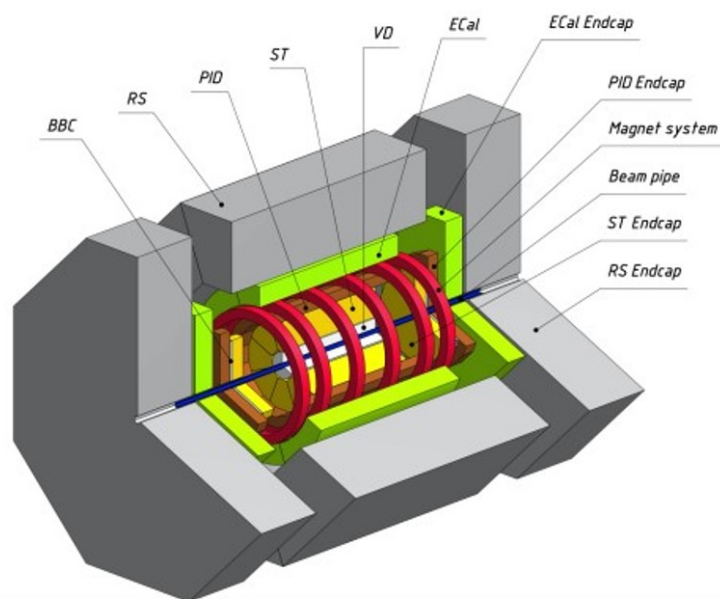


Рисунок 3 – Общий план SPD [1]

Пояснение к Рисунку 3.

1. BBC – луч-луч счетчик
2. RS – мюонная система детектирования
3. PID -Система учета времени полета
4. ST- Система слежения на основе тонкой трубки
5. VD – детектор амплитуд
6. Ecal -пробоотборным электромагнитным калориметром
7. Ecal Endcap –торцевая крышка Ecal
8. PID Endcap - торцевая крышка PID
9. Magnet system –магнитная система
10. ENDcap – торцевая крышка системы слежения на основе тонкой трубки

2.2 Общая схема BBC

Общая схема детектора BBC будет состоять из 16 угловых сегментов, в каждом из них по 7 модулей пластиковых сцинтиляторов с заложенным внутри скрученным *спектрсмещающим волокном* (СВ), далее спектрсмещающее волокно выводится и соединяется с *прозрачным волокном* (ПВ) через устройство, затем прозрачное волокно соединяется с массивом SiPM, и после этого сигналы выводятся на модуль CAEN FERS-5200 и с них будет происходить наблюдение.

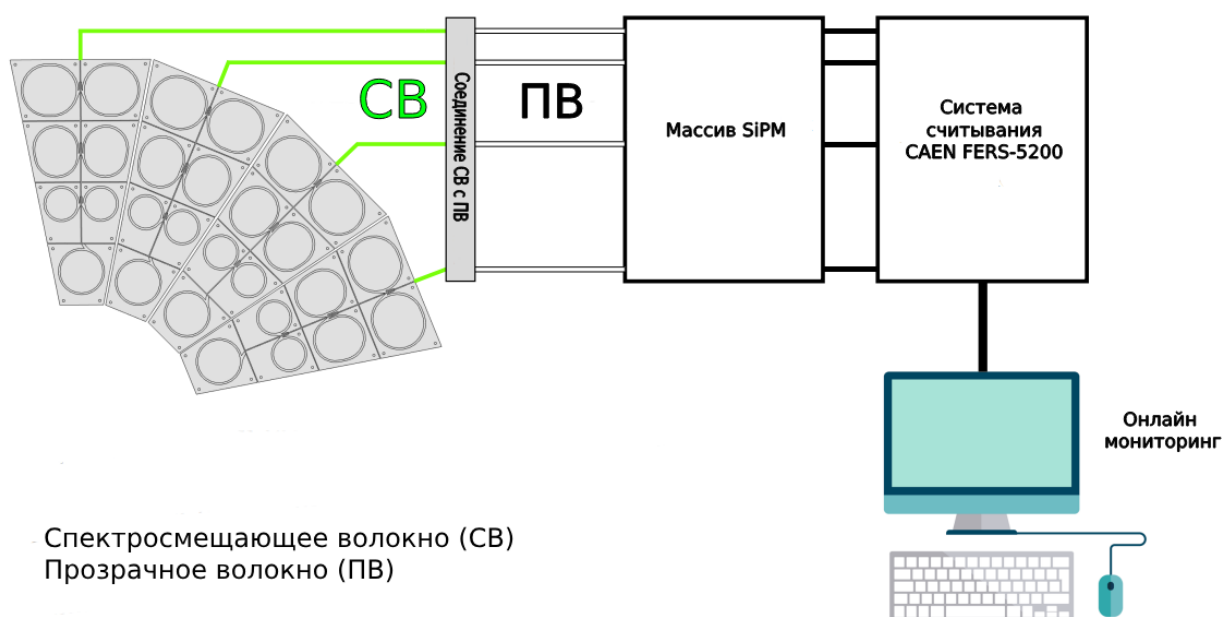


Рисунок 4 – Общая схема BBC [1]

3 Сцинтилляторы

Сцинтилляторы — это особые вещества, обладающие способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения, например, гамма-кванты. В отличие от, например, люминесценции, здесь возбуждение происходит именно за счет ионизации, а не за счет механического воздействия. Высвечивание света происходит быстро, в форме мгновенной вспышки. Также особенностью сцинтилляторов является то, что излучаемое количество фотонов для данного типа излучения имеет близкую к пропорциональной зависимость от поглощённой энергии излучения. Благодаря этим свойствам можно выделить энергетические спектры излучения по энергии вспышек.

Сцинтилляторы бывают разных типов в зависимости от вещества, из которого они сделаны. В целом это деление на типы можно представить как деление в органические и неорганические сцинтилляторы. Неорганические сцинтилляторы — это чаще всего неорганические монокристаллы. Есть также еще газовые сцинтилляторы и стекла. Органические сцинтилляторы — это органические кристаллы, а также пластики и жидкие сцинтилляторы. Все эти типы характеризует, прежде всего, разный механизм сцинтилляций. Неорганические сцинтилляторы характеризуются большим световыходом, однако, также и большим временем высвечивания (порядка микросекунд).

Органические же наоборот характеризуются небольшим световыходом, но их время высвечивания мало (порядка десятков наносекунд). Примером неорганического сцинтиллятора является NaI(натрий-йод), гигроскопичное вещество, с огромным световыходом. Пример органических — антрацен (C_4H_{10}). Кроме различных свойств светимости есть и другое важное практическое отличие. Неорганические кристаллы трудно вырастить большого размера. Как и кристаллы вообще.

Таблица 1: Характеристики неорганических сцинтилляторов. Время затухания (τ), длина волны максимального излучения (λ_{max}), коэффициент преломления (n), плотность (ρ) [3]

Вещество	Световыход,	τ ,нс	t,нс	λ_{max} ,нм	n	ρ , $g/(cm)^3$
CsI(Na)	54	45	630	420	1,84	4,51
CsI(Ti)	41	85	1000	550	1,79	4,51
LYSO	33	87	36	420	1,81	7,1
BGO	8-10	20	300	480	2,15	7,13
CdWO ₄	12-15	14000	1,9	475	2,3	7,9

Так же нужно рассказать о том, что представляют собой органические сцинтилляторы - это виды органических материалов, которые обеспечивают обнаружение фотонов в видимой части светового спектра после прохождения заряженной частицы или фотона. Механизм сцинтилляции в органических материалах сильно отличается от механизма в неорганических кристаллах. В неорганических сцинтилляторах, например, NaI, CsI, сцинтилляция возникает из-за структуры кристаллической решетки. Механизм флуоресценции в органических материалах возникает в результате переходов энергетических уровней одной молекулы. Следовательно, флуоресценцию можно наблюдать независимо от физического состояния (пар, жидкость, твердое вещество).

Таблица 2: Характеристики органических сцинтилляторов. Время затухания (τ), длина волны максимального излучения (λ_{max}), коэффициент преломления (n), плотность (ρ) [3]

Вещество	Световыход,	τ ,нс	t,нс	λ_{max}	n	$\rho, g/(cm)^3$
Нафталин	$4 * 10^3$	45	11	348	1,58	1,15
Антрацен	$4 * 10^4$	85	30	448	1,59	1,25
n-Терфенил	$1.2 * 10^4$	87	6-12	391	1,65	1,23
Полистирол	$1.2 * 10^4$	20	2,2	400	1,58	1,06-1,15

Органические сцинтилляторы обычно имеют быстрое время затухания (обычно 10^{-8} с), в то время как неорганические кристаллы обычно работают намного медленнее (10^{-6} с), хотя у некоторых также есть быстрые компоненты в их реакции. Существует три типа органических сцинтилляторов:

1. **Чистые органические кристаллы.** Чистые органические кристаллы включают кристаллы антрацена, стильбена и нафталина. Время распада этого типа люминофора составляет приблизительно 10 наносекунд. Этот тип кристалла часто используется для обнаружения бета-частиц. Они долговечны, но их реакция анизотропна (что ухудшает разрешение по энергии, когда источник не коллимирован). Они не поддаются легкой механической обработке и не могут быть выращены в больших размерах. Поэтому они не очень часто используются.;
2. **Жидкие органические растворы.** Жидкие органические растворы получают путем растворения органического сцинтиллятора в растворителе.;

3. **Пластиковые сцинтилляторы.** Пластиковые люминофоры изготавливаются путем добавления сцинтилляционных химикатов в пластиковую матрицу. Константа затухания является самой короткой из трех типов люминофоров, приближаясь к 1 или 2 наносекундам. Пластиковые сцинтилляторы больше подходят для использования в средах с высоким потоком и для измерения мощности высокой дозы. Пластик имеет высокое содержание водорода. Поэтому он полезен для детекторов быстрых нейтронов. Для получения детектируемого фотона в сцинтилляторе требуется значительно больше энергии, чем в электронно-ионной паре путем ионизации (обычно в 10 раз). Поскольку неорганические сцинтилляторы излучают больше света, чем органические, они лучше подходят для применения при низких энергиях.;

4 Оптоволокно

Существуют разные типы оптоволокна, соответственно разные характеристики материала и потери при изгибах и сферы применения. Нас интересует количество потерь в сцинтилляторе при фотосборе благодаря fiber.

4.1 Механизмы потери света

Поглощение

Поглощение равномерное. Одинаковое количество одного и того же материала всегда поглощает одинаковую долю света с одинаковой длиной волны. Если у вас есть три блока из стекла одного типа толщиной в 1 сантиметр каждый, все три будут поглощать одинаковую долю проходящего через них света. Поглощение также является кумулятивным, поэтому оно зависит от общего количества материала, через который проходит свет. Если поглощение составляет 1

Внутреннее поглощение материала

Внутреннее поглощение вызвано взаимодействием распространяющейся световой волны с еще одним, более важным компонентом стекла, составляющим материальный состав волокна. Эти потери представляют собой фундаментальный минимум достижимых потерь и могут быть преодолены только путем замены материала волокна. Примером такого взаимодействия является инфракрасная полоса поглощения SiO_2 , показанная на приведенном выше рисунке. Однако в областях длин волн, представляющих интерес для оптической связи (0,8-0,9 мкм и 1,2-1,5 мкм), инфракрасные хвосты поглощения вносят незначительный вклад.

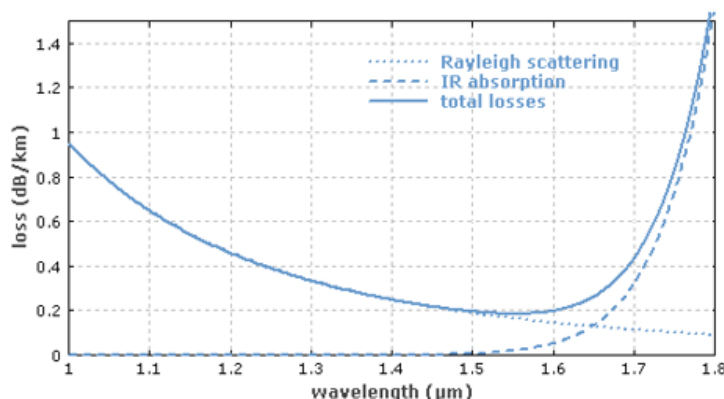


Рисунок 5 – График зависимость потерь света в оптоволокне от длины [4]

Поглощение внешних примесных ионов

Поглощение внешних примесных ионов вызвано присутствием незначительного количества ионов металлов (таких как Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+}) и иона OH^- из воды, растворенной в стекле. Затухание от этих примесных ионов показано в следующей таблице.

Таблица 3: Характеристики органических сцинтилляторов. Время затухания (τ), длина волны максимального излучения (λ_{max}), коэффициент преломления (n), плотность (ρ) [3]

Примесный ион	Потери 1 ppm примеси /(),	λ_{max}
Fe^{2+}	0.68	1.1
Fe^{2+}	0.15	0.4
Cu^{2+}	1.1	0.85
Cr^{3+}	1.6	0.625

Рассеяние

Потери при рассеянии возникают, когда волна взаимодействует с частицей таким образом, что энергия в направленной распространяющейся волне удаляется и переносится в другие направления. Свет не поглощается, а просто направляется в другом направлении. Однако различие между рассеянием и поглощением не имеет большого значения, поскольку свет теряется из волокна в любом случае. Существует два основных типа рассеяния: линейное рассеяние и нелинейное рассеяние.

Для линейное рассеяние количество световой мощности, которая передается от волны, пропорционально мощности в волне. Он характеризуется отсутствием изменений в частоте рассеянной волны. С другой стороны, нелинейное рассеяние сопровождается сдвигом частоты рассеянного света. Нелинейное рассеяние вызвано высокими значениями электрического поля внутри волокна (от небольшой до высокой оптической мощности).

Нелинейное рассеяние приводит к рассеиванию значительной мощности в прямом, обратном или боковом направлениях.

Потеря макроизгиба

Макросгиб происходит, когда волокно изгибается с большим радиусом кривизны относительно диаметра волокна (большие изгибы). Эти изгибы становятся отличным источником потерь мощности, когда радиус изгиба составляет менее нескольких сантиметров. В лотке для сращивания или в согнутом оптоволоконном кабеле может находиться макрогиб. Макроперегиб не приведет к значительным потерям излучения, если он имеет достаточно большой радиус. Однако, когда волокна изгибаются ниже определенного радиуса, излучение вызывает большие потери мощности света, как показано на рисунке ниже.

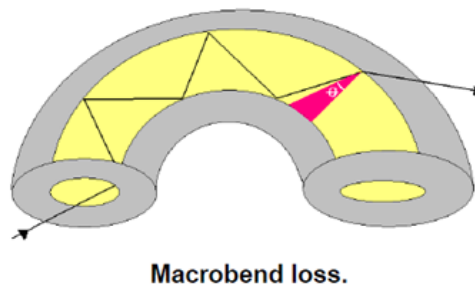


Рисунок 6 – Потеря при изгибе [4]

Потеря макроизгиба

Микроизгибы - это небольшие изгибы на границе раздела сердцевина-оболочка. Эти локальные изгибы могут возникать во время развертывания волокна или могут быть вызваны локальными механическими нагрузками на волокно, такими как напряжения, вызванные прокладкой кабеля или намоткой волокна на катушку. Микроизгибание также может происходить в процессе производства волокна. Это резкие, но микроскопические изгибы, которые создают локальное осевое смещение на несколько микрон (мкм) и пространственное смещение длины волны на несколько миллиметров.

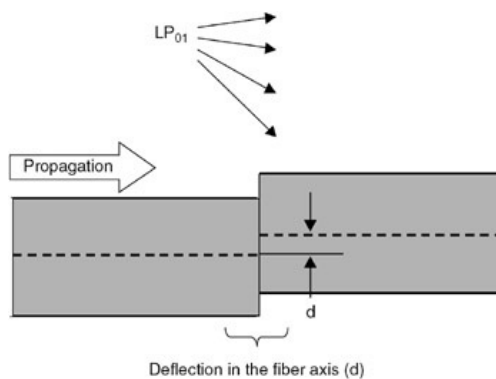


Рисунок 7 – Потеря при микросдвиге осей[4]

5 Экспериментальная часть и результаты обработки

5.1 Установка

Была собрана установка для измерения спектров сигнала с вычетом pedestala, для волокон Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow, Kuraray.

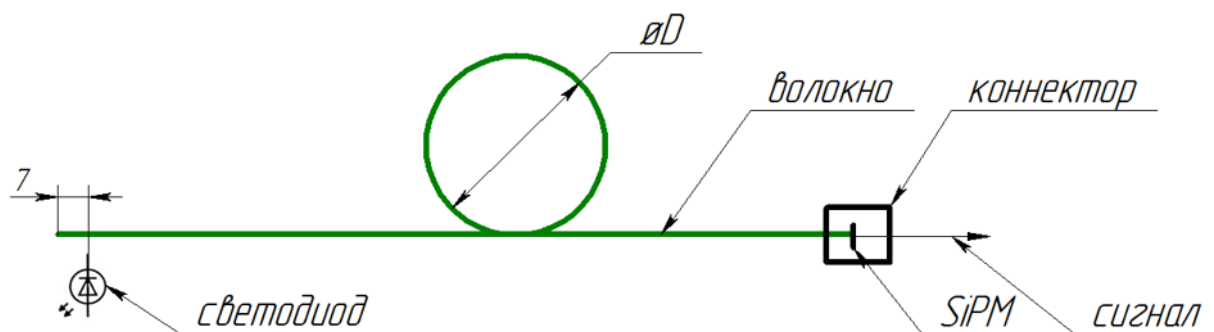


Рисунок 8 – Схема установки



Рисунок 9 – Фото установки

На светодиод подавался сигнал с генератора и тот работал при $\lambda = 450$ нм, далее стыковался вплотную к спектросмещающему волокну (с помощью распечатанной 3D детали) на расстоянии 7 мм от конца, далее волокно скручивалось в форму окружности с определенными 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. Спектры сигнала получились гауссовой формы, и на осциллографе Лесгоу снималась координата максимума распределения, наряду со среднеквадратичным отклонением. Далее потери света в волокне в результате скручивания вычислялись по формуле.

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

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, где Δx_n - погрешность вхождений для n-ого номера гистограммы, Δx_0 - погрешность для выпрямленного волокна;

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

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, после этого спектр пропорционально возрастает по количеству вхождений, и Δx_n - изменения среднеарифметического значения в спектре сигнала. 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 спектросмещающих волокон.

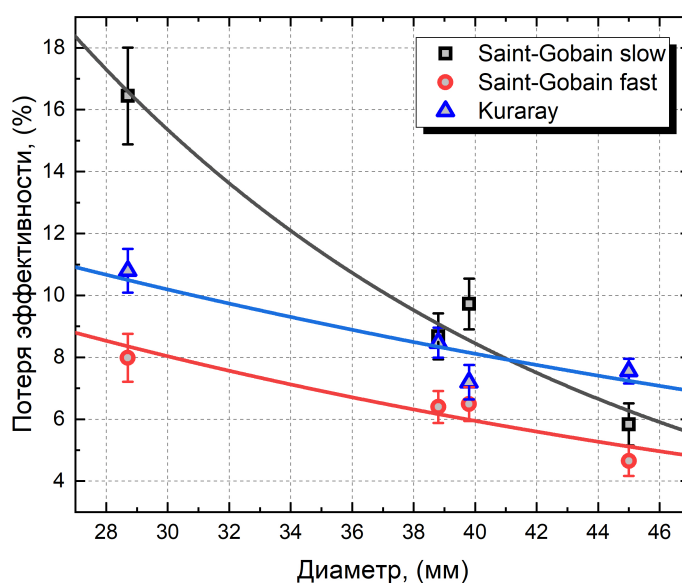


Рисунок 10 – Потери света в спектросмещающих волокнах Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow, Kuraray

так же Рисунке 11 выведены спектры сигналов полученные при скручивании волокон марки Saint-Gobain slow, fast и Kuraray.

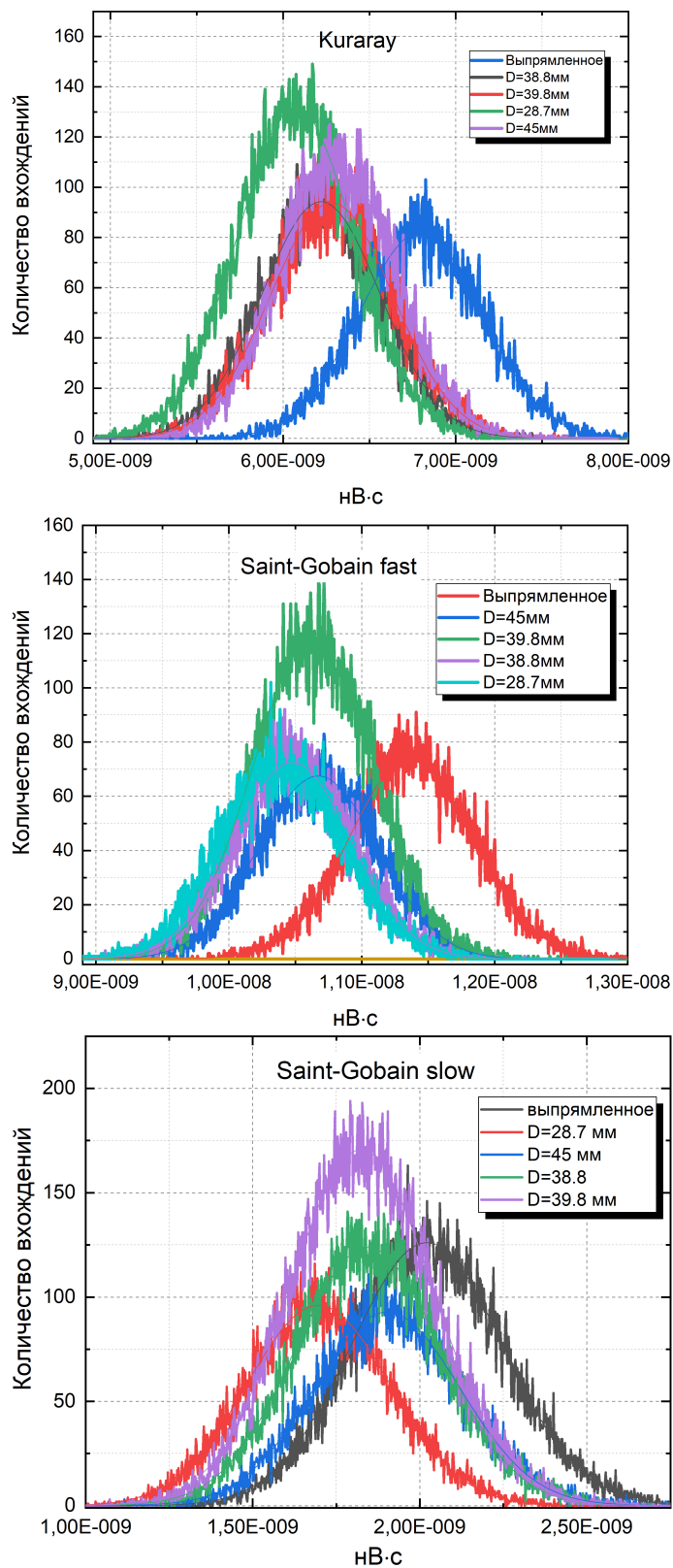


Рисунок 11 – Полученные спектры сигнала со скрученного волокна (сверху вниз) Kuraray, Saint-Gobain fast, Saint-Gobain slow при различных диаметрах и выпрямленном волокне

5.2 Моды спектросмещающего волокна

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 спектросмещающего волокна и прозрачного волокна при работе на длине волны $\lambda = 450$ нм и был проведен модовый анализ для оптоволокон с внешним диаметром $D_{clad} = 1$ и коэффициентом преломления $n_{clad} = 1.49$, с внутренним диаметром $D_{ore} = 0.96$ коэффициентом преломления $n_{core} = 1.59$ (спектросмещающее волокно); $D_{out-clad} = 1$ внешний диаметр оболочки коэффициентом преломления $n_{out-clad} = 1.42$, $D_{in-clad} = 0.98$ внешний диаметр оболочки коэффициентом преломления $n_{in-clad} = 1.49$, с внутренним диаметром сердцевины $D_{ore} = 0.96$ 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*, это безразмерная величина объединяющая такие параметры, как: λ - длина волны, n_{core} -максимальное значение коэффициент преломления в сердцевине, n_{clad} -коэффициент преломления в наружной части спектросмещающего волокна, ρ - радиус внутреннего слоя (*clad*)

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \rho (n_{core}^2 - n_{clad}^2) [5] \quad (3)$$

При $\lambda = 550$ нм, $\rho = 0.48$ мм, $n_{core} = 1.59$, $n_{clad} = 1.49$, получается $V \simeq 3047$, то есть $V \gg 1$, согласно этим данным, можно сделать вывод, что волокна являются многомодовым. Пусть число решений для направляемых мод волоконного световода, это - M_{bm} , и для многомодового волоконного световода мы имеем $V \gg 1$, и у него количество мод будет выражаться через соотношение $M_{bm} = \text{Int}(V^2/2) [5]$, где Int это наименьшее целое число превышающее $V^2/2$. В данном случае получается, что $M_{bm} \simeq 4.6 \cdot 10^6$ Так же можно сказать, что *многомодовые волокна - это оптические волокна, которые могут поддерживать более одного мода 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 Kurray, был проведен модовый анализ для спектросмещающего волокна типа Kurray и вместе с этим для прозрачного волокна той же марки.

Была разработана 2D модель для сечения спектросмещающего волокна с вышеперечисленной геометрией и прозрачного волокна, и добавлен наружный слой $D = 1.2$ мм обозначающий воздух с коэффициентом преломления $n = 1$. Далее была создана сетка этих чертежей для расчета математической модели в программе COMSOL Multiphysics.

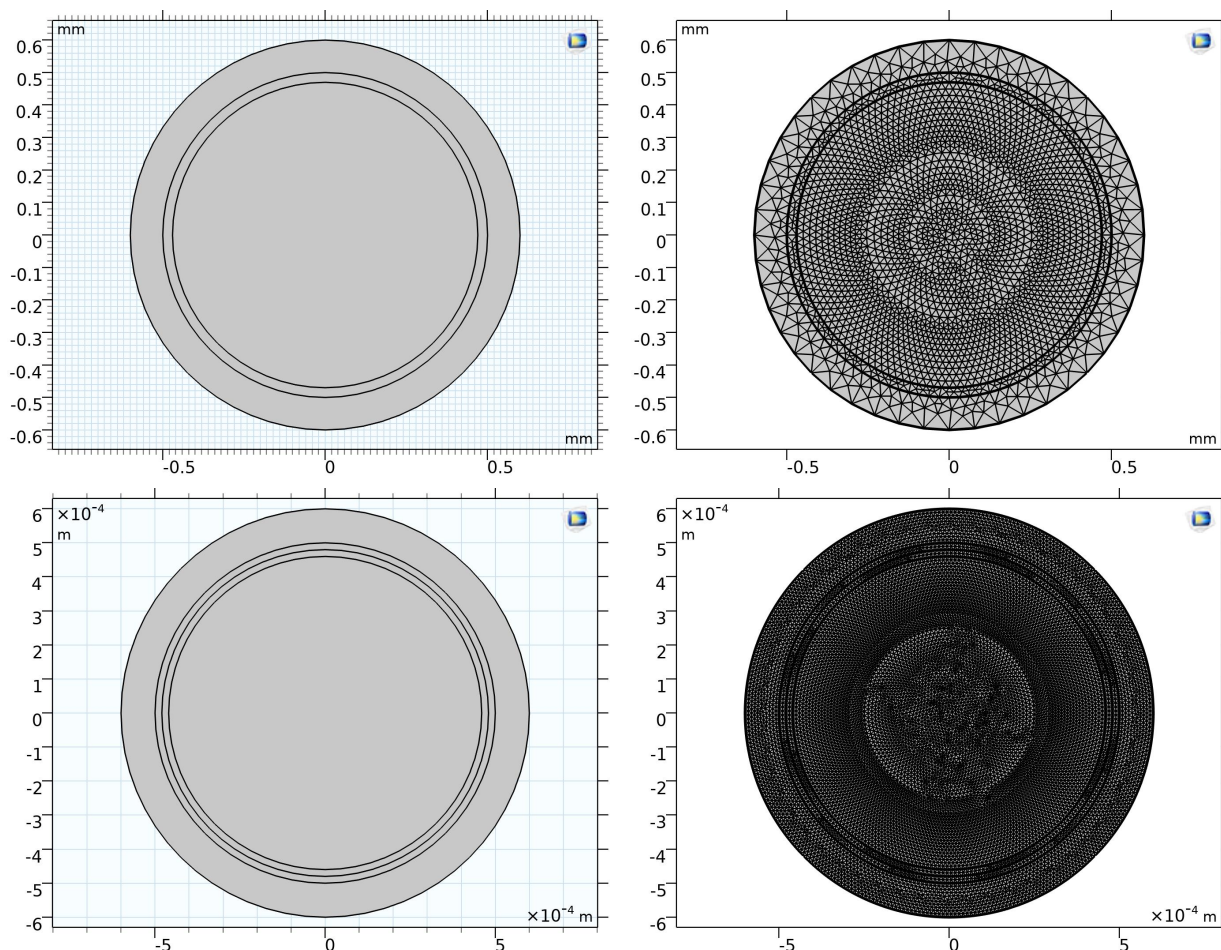


Рисунок 12 – Верхний ряд: Геометрия сечения спектросмещающего волокна (слева); Сетка сечения спектросмещающего волокна (справа). Нижний ряд: Геометрия сечения прозрачного волокна (слева); Сетка сечения прозрачного волокна (справа)[6]

Анализ проводился с помощью подключённого физического раздела «Волновая оптика, электромагнитные волны, частотная область» (ewfd), он используется для расчета 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 13 отображены первые 16 мод в спектросмещающем волокне. На Рисунке 14 отображены первые 16 мод в прозрачном волокне.

5.3 Потери света в прозрачном оптическом волокне Kuraray

В детекторе ВВС после вывода спектросмещающего волокна 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

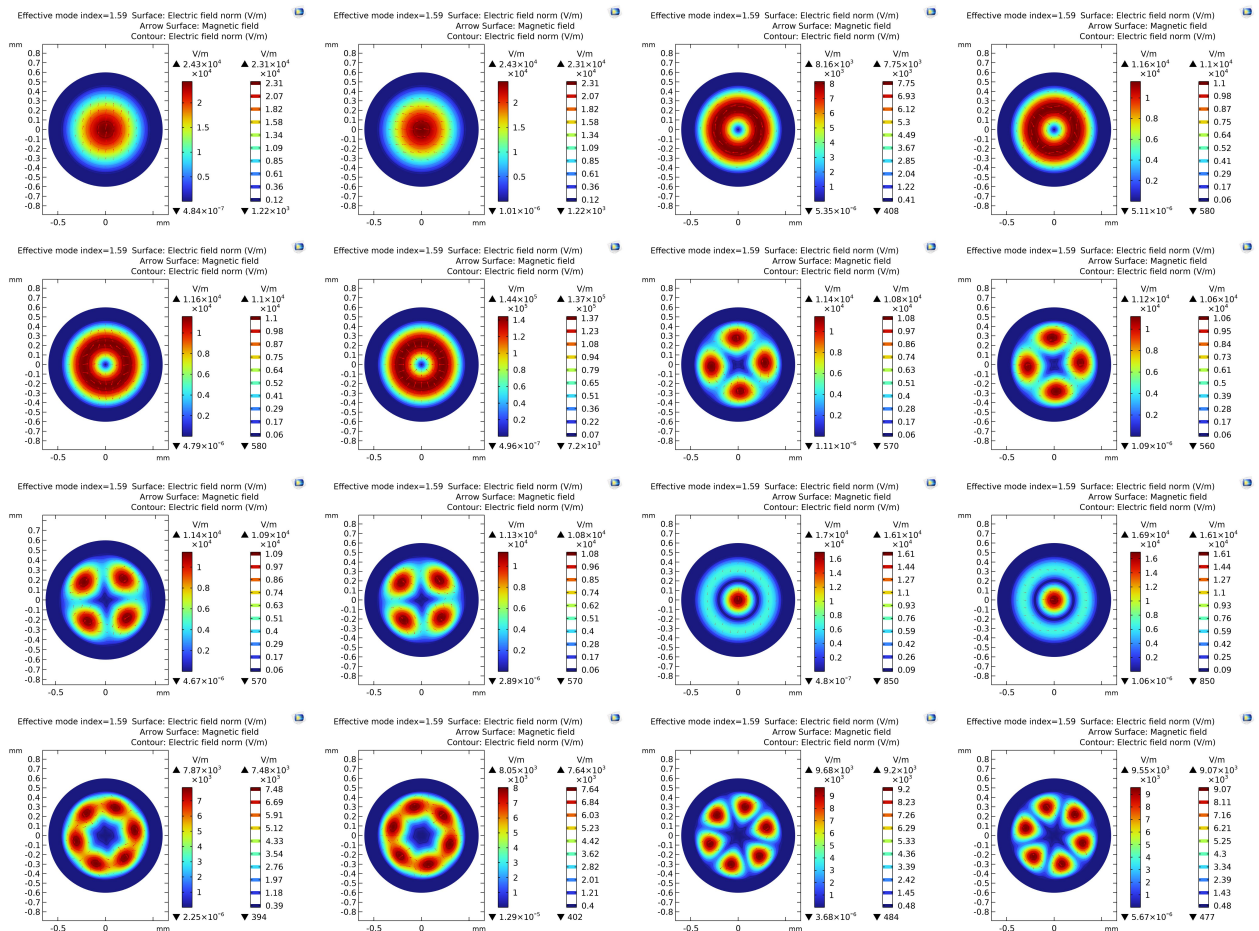


Рисунок 13 – Первые 16 мод в спектрсмещающем оптоволокне марки Kugaгау. Цветовая гамма отображает электрическое поле, красный направляющие стрелки магнитное поле.

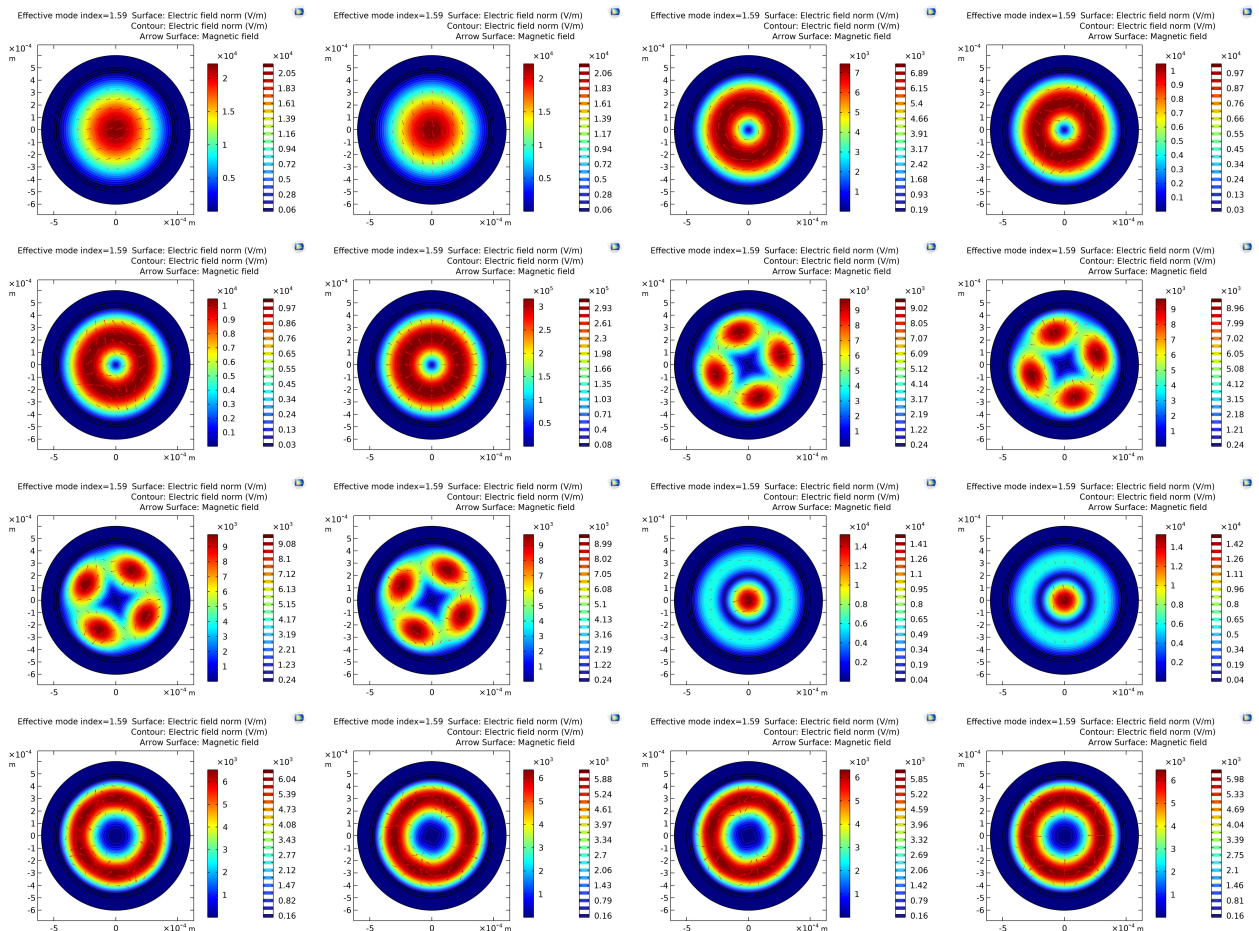


Рисунок 14 – Первые 16 мод в прозрачном волокне марки Кугагау. Цветовая гамма отображает электрическое поле, красный направляющие стрелки магнитное поле.

потери света в прозрачном волокне от его длины. Был взяты данные от графика для спектросмещающего волокна Kuraray Y-11, так как он будет использоваться для создания прототипа ВВС. На рисунке 15 выведены спектры поглощения и высвечивания для волокон марки Kuraray Y-7;8;11.

Y-7, Y-8, Y-11

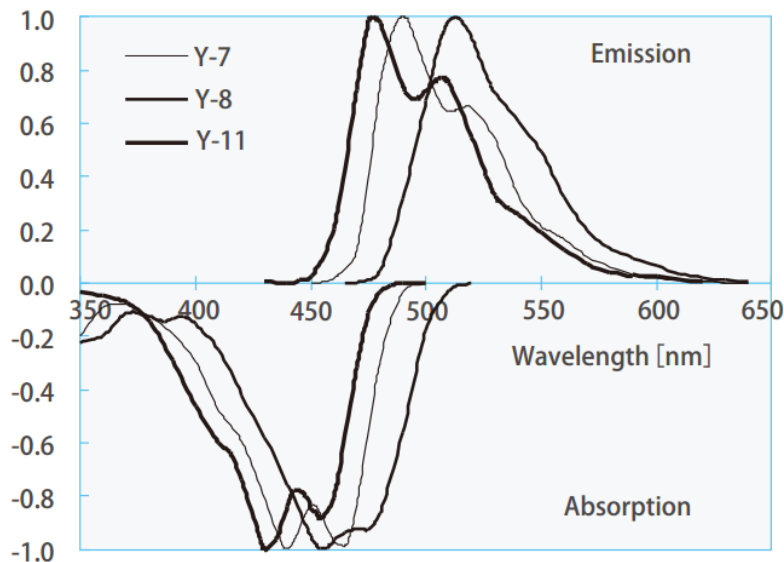


Рисунок 15 – Спектр поглощения и высвечивания света в спектросмещающих волокнах Kuraray Y-7,8,11 [7]

Затем спектр высвечивания Y-11 был оцифрован с помощью программы Origin, и получен массив данных из которых было найдено среднее арифметическое значение $\bar{x} = \frac{\sum x_i y_i}{\sum y_i}$, где $x_i; y_i$ - координата оси абсцисс и ординат точки в массиве, $\bar{\lambda} \approx 503$ нм. Из графика потерь света от длины волны (рисунок 16) для прозрачного оптоволокна были построен график 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

$$\eta(\%) = 100 \cdot e^{-\alpha x}(\%) \quad (4)$$

, где $\eta(\%)$ - эффективность волокна от длины волокна, P_{out} - мощность света выходящая из прозрачного оптоволокна, P_{in} - мощность света входящая в прозрачное оптоволокно, $\alpha(m^{-1})$ - коэффициент ослабления. Затем был был перевод из $\alpha(\frac{dB}{km})$ в $\alpha(m^{-1})$, через

$$\alpha(m^{-1}) = 0.23 \cdot 10^3 \cdot \alpha(\frac{dB}{km}) \quad (5)$$

Таким образом из графика удельных потерь было получено, $\alpha(\frac{dB}{km}) \approx 310 \frac{dB}{km}$, и был проведен перевод $\alpha(m^{-1}) \approx 0.0713(m^{-1})$. В Wolfram Mathematica

12.1 был построен график (Рисунок 17) эффективности в прозрачном волокне марки Kuraray Clear от длины самого волокна по формуле (4), и была найдена $L = 14.02$ м, обозначающая длину волновода на конце которого свет ослабевает в e раз.

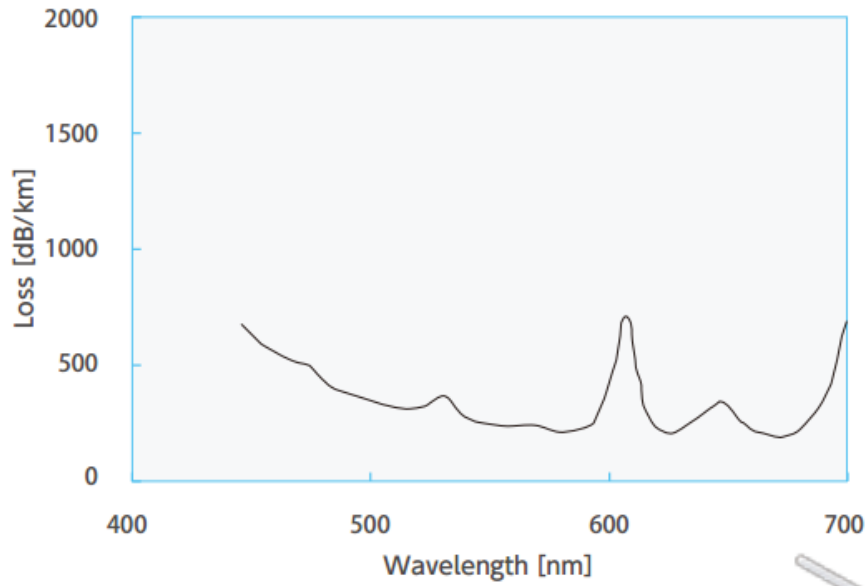


Рисунок 16 – График потерь света от длины волны в оптоволокне марки Kuraray Clear [7]

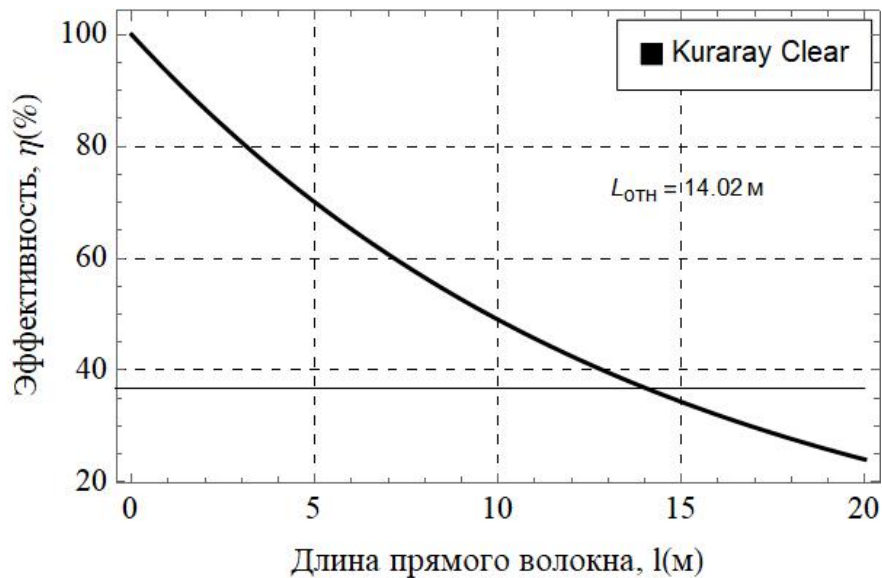


Рисунок 17 – График потерь света от длины волны в оптоволокне марки Kuraray Clear

5.4 Визуализация лучей в оптоволокне

Была создана 3D модель скрученного оптоволокна с геометрией сечения и физическими характеристиками для спекстросмещающего волокна

марки Kuraray, 3D модели 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), так же 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 $[0; 0.01; 20]$ см, 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 18 показана геометрия разработанной модели и наложенная сетка для математического расчета.

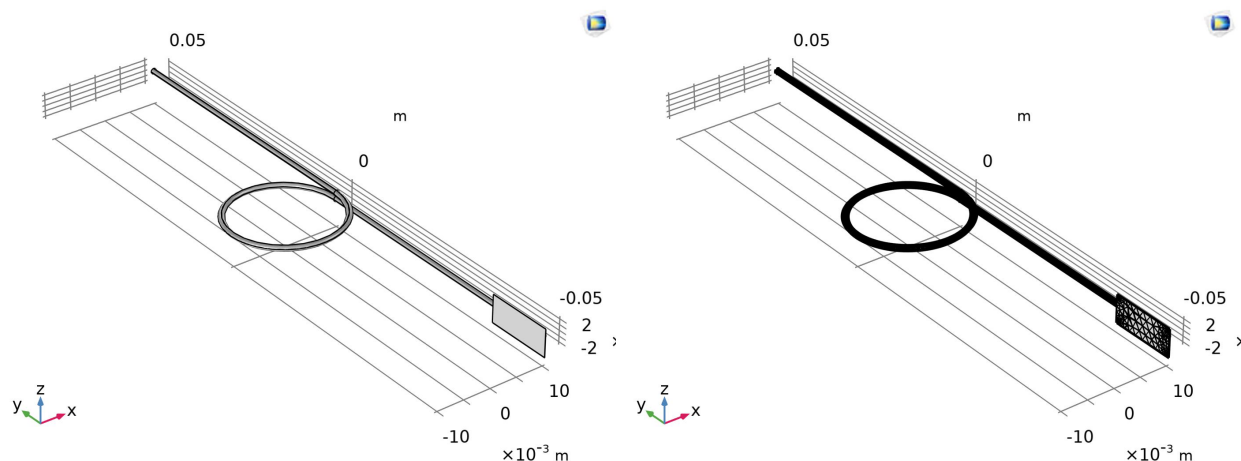


Рисунок 18 – 3D модель волокна (слева); 3D модель с сеткой разбиения (справа)

На Рисунке 19 указаны траектории световых лучей, в правой части указана логарифмическая шкала времени, позволяющая по цветовой гамме определить в какое время находился луч в определенной области. Общее время распространения света $t = 1.06$ нс.

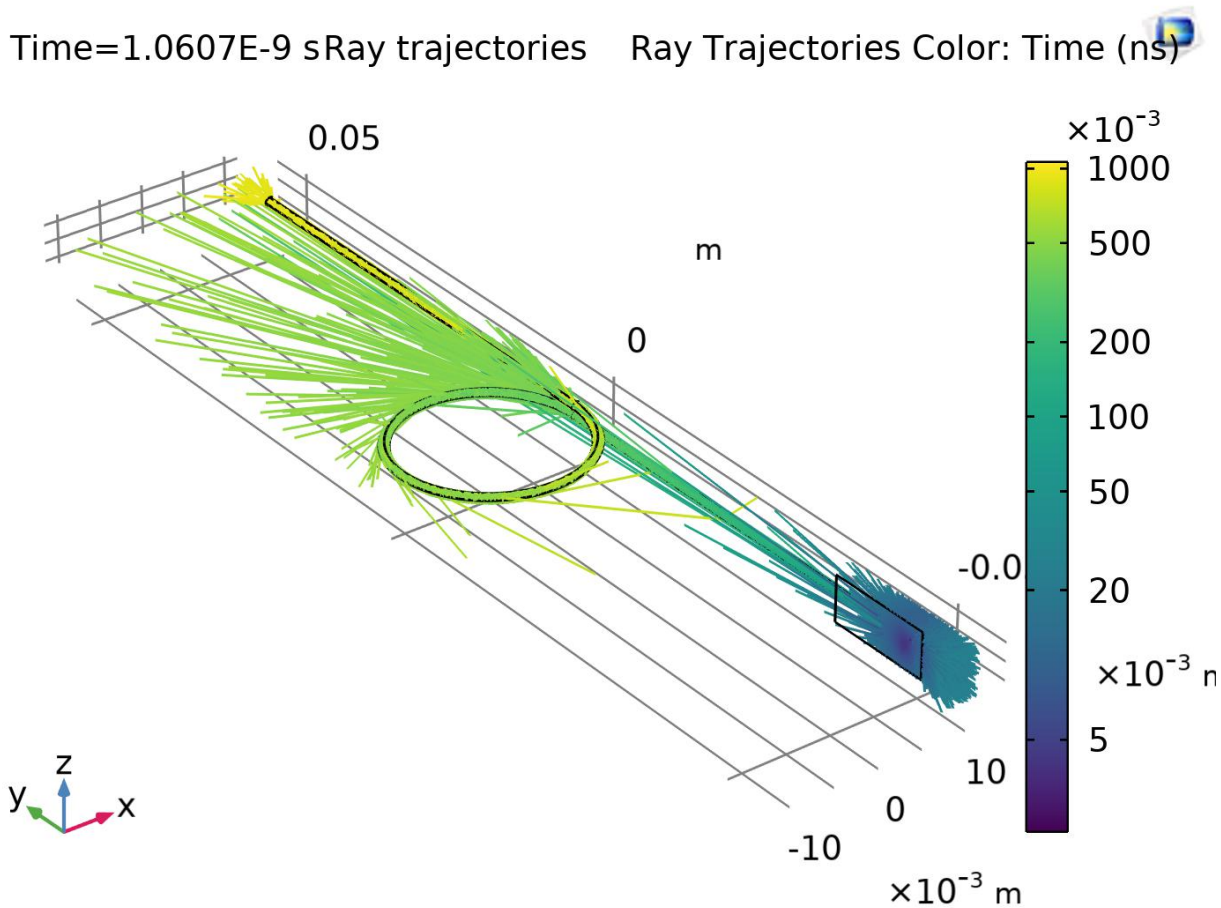


Рисунок 19 – Схема распространения света в скрученном спектросмещающем оптоволокне Kuraray

5.5 Моделирование на потери света

Модель из предыдущего раздела была дополнена цилиндрическим аккумулятором над волокном в районе в 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), 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 при радиусах скручивания R от 10 до 30 мм с шагом 5 мм (range(10;5;30)). Источник света испускал волны в голубой области длин волн (450 нм), количество первичных лучей 1000, вторичных 0. N_{noise} -количество лучей вылетающих из волокна и поглощающихся цилиндром над источником, N_{out} - количество лучей вылетающих из-за скручивания и поглощающихся сферической оболочкой. Расчет потерь света проиводился по формуле - $\eta(\%) = \frac{N_{out}}{1000 - N_{noise}} \cdot \%$. На Рисунке 19 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).

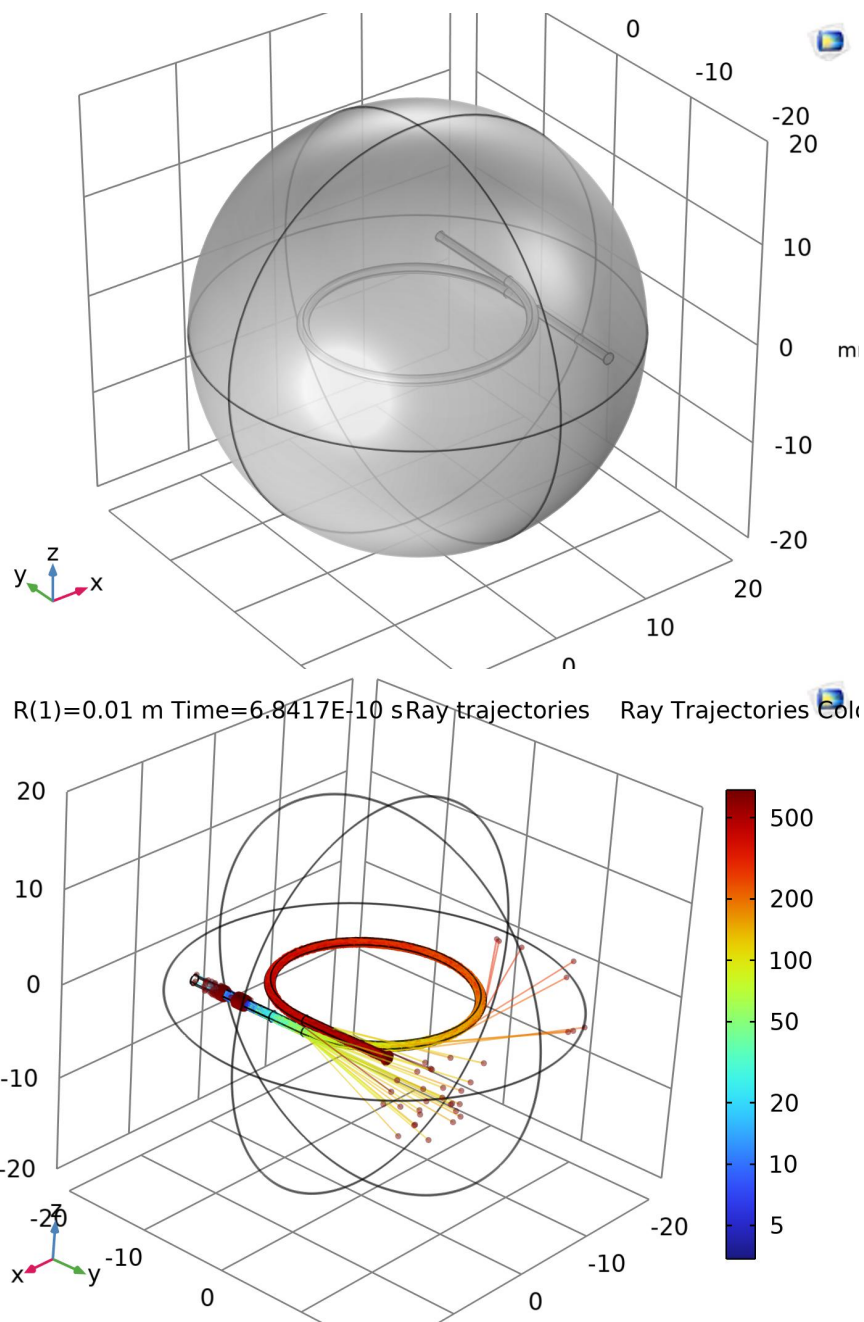


Рисунок 20 – 3D модель схемы измерения потерь света в скрученном волокне (наверху); Фото с потерями света ,распространяющегося при скручивани оптоловкна (внизу)

Далее был получен график потерь света при моделировании и был построен на одной плоскости вместе с данным полученными от эксперимента (отображено на Рисунке 21)

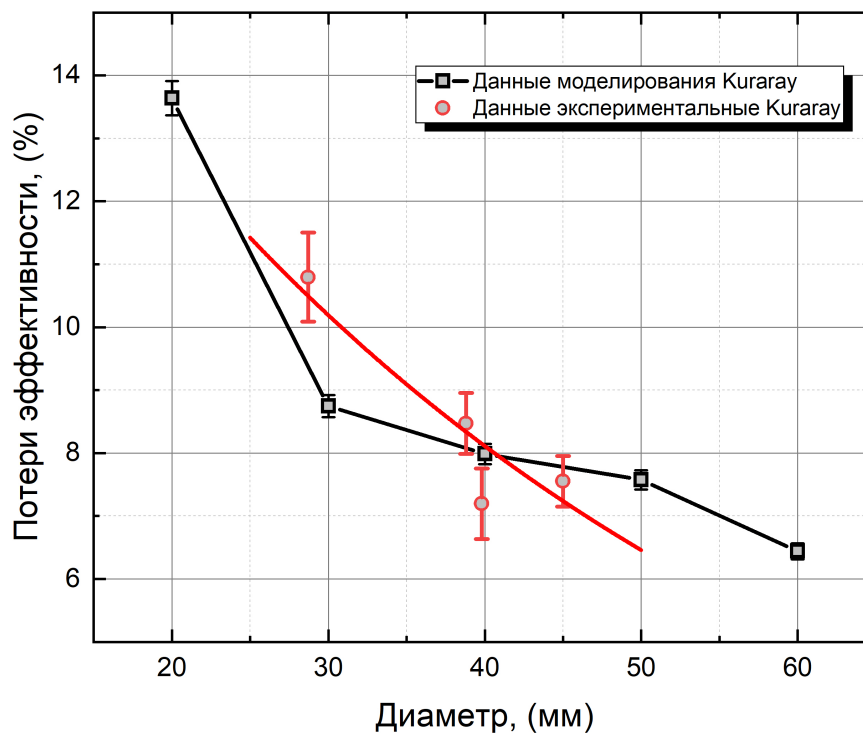


Рисунок 21 – Графики потерь эффективности при моделировании и измерении для волокна марки Kuraray

и для сравнения были построены графики данных моделирования, экспериментальных, технические от производителя для волокна Kuraray (Рисунок 22).

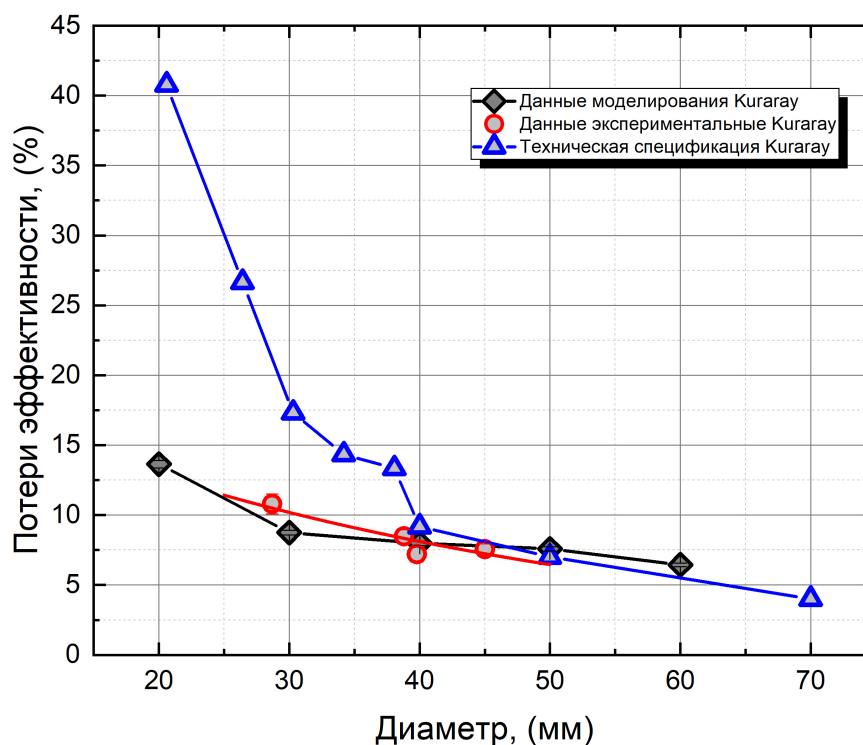


Рисунок 22 – Графики потерь эффективности при моделировании и измерении для волокна марки Kuraray

6 Итоги

В данной работе были проведены измерения потерь света в спектросмещающих оптоволоконках марки Kuraray и Saint-Gobain fast, slow, построены графики (Рисунок 10).

Проведен модовый анализ и получены моды для спектросмещающего и прозрачного оптоволокна Kuraray (Рисунок 13,14).

Из технических характеристик прозрачного оптоволокна Kuraray была оценена эффективная длина падения интенсивности в e раз $L = 14.02$ м для средней длины волны испускаемого излучения $\lambda = 503$ нм, построен график эффективности для данного волокна от длины волны (Рисунок 17).

Получена схема распространения света в скрученном волокне в зависимости от времени распространения (Рисунок 19).

Были рассчитаны потери света по результатам моделирования света в спектросмещающем оптоволоконке с геометрическими характеристиками марки Kuraray, построен график со сравнением экспериментальных данных и данных моделирования (Рисунок 21) и график сравнения технических данных от производителя, экспериментальных и моделирования (Рисунок 22). Из Рисунка 21 видно, что все точки моделирования и эксперимента совпадают на уровне 2σ . На Рисунке 22 можно наблюдать отклонение экспериментальных и моделируемых данных от технических в точках с диаметром меньше 40 мм, далее будет проведен анализ причин такого расхождения значений.

В дальнейшем планируется проведение моделирования для волокон марки Saint-Gobain (как спектросмещающих, так и прозрачного), подробный анализ мод волокон.

Список используемых источников

- [1] V.P. Ladugin. Bbc status report. 2022.
- [2] J. Adams, A. Ewigleben, S. Garrett, W. He, T. Huang, and P.M. Jacobs. Nuclear inst. and methods in physics research, a. *Nuclear medicine communications*, 2020.
- [3] И.Б Немченко. Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики. *Дубна. Дисертация на соискание ученой степени.*
- [4] John A.Jay. Optical fiber loss and attenuation.
- [5] Allan W Snyder, John D Love, et al. *Optical waveguide theory*, volume 175. Chapman and hall London, 1983.
- [6] Ashitosh Venkatasai Velamuri, Krupal Patel, Ishan Sharma, Shakti S Gupta, Sandeep Gaikwad, and Pradeep Kumar Krishnamurthy. Investigation of planar and helical bend losses in single-and few-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 37(14):3544–3556, 2019.
- [7] Ltd. Kuraray Trading Co. Scintillating fibers wavelength shifting fibers clear fibers.