

## Лабораторная работа №2

# Исследования взаимных влияний в многосердцевинных оптических волокнах

### 1 Цель работы:

1.1 Исследования взаимных влияний в многосердцевинных оптических волокнах,

1.2 Определение параметров многосердцевинных оптических волокон, при которых обеспечивается уменьшение взаимных влияний между сердцевинами, в целях увеличения пропускной способности одного волокна.

### 2 Литература:

[1] Волокна будущих петабитных сетей [Электронный ресурс]: <https://nag.ru/material/30950>

[2] Многосердцевинное оптическое волокно со ступенчатыми одномодовыми сердцевинами. Часть 1. Изоляция сплошными оболочками, 2022.

[3] Новые возможности многосердцевинных волоконных световодов / <https://www.ojournal.org/article/doi/10.29026/oea.2022.210055>

[4] Мануал OptiBPM <https://optiwave.com/OptiBPM-manuals/fdtd-wave-setup-introduction/>

### 3 Подготовка к занятию:

3.1 Прочитать материал из списка литературы.

3.2 Прочитать материал из приложения.

### 4 Содержание отчета:

1. Титульный лист и цель работы.
2. Модель многосердцевинного оптического волокна.
3. Рисунки моделей волокон в программе OptiBPM.
4. Графики результатов исследования

### 5 Выполнение задания:

Новые разработки ОВ открывают новые возможности передачи, но и требуют новых решений по элементной базе для функционирования волоконных линий передачи.

**Задание 1.** Нарисовать 5 различных моделей многосердцевинных оптических волокон с различными структурами расположения сердцевины. Отметить особенность каждой конструкции ОВ.

**Задание 2.** Используя программную среду OptiBPM, провести исследование зависимости величины перекрестных помех от расстояния между сердцевинами MCF.

Первым экспериментом смоделировать оптическое волокно с двумя сердцевинами. Данный опыт позволит выяснить зависимость перекрестных помех от расстояния между центрами сердцевины.

Модель волокна, построенная в программе OptiBPM (рисунок 1), представляет собой три цилиндра: один диаметром 125 мкм и два диаметром 10 мкм.

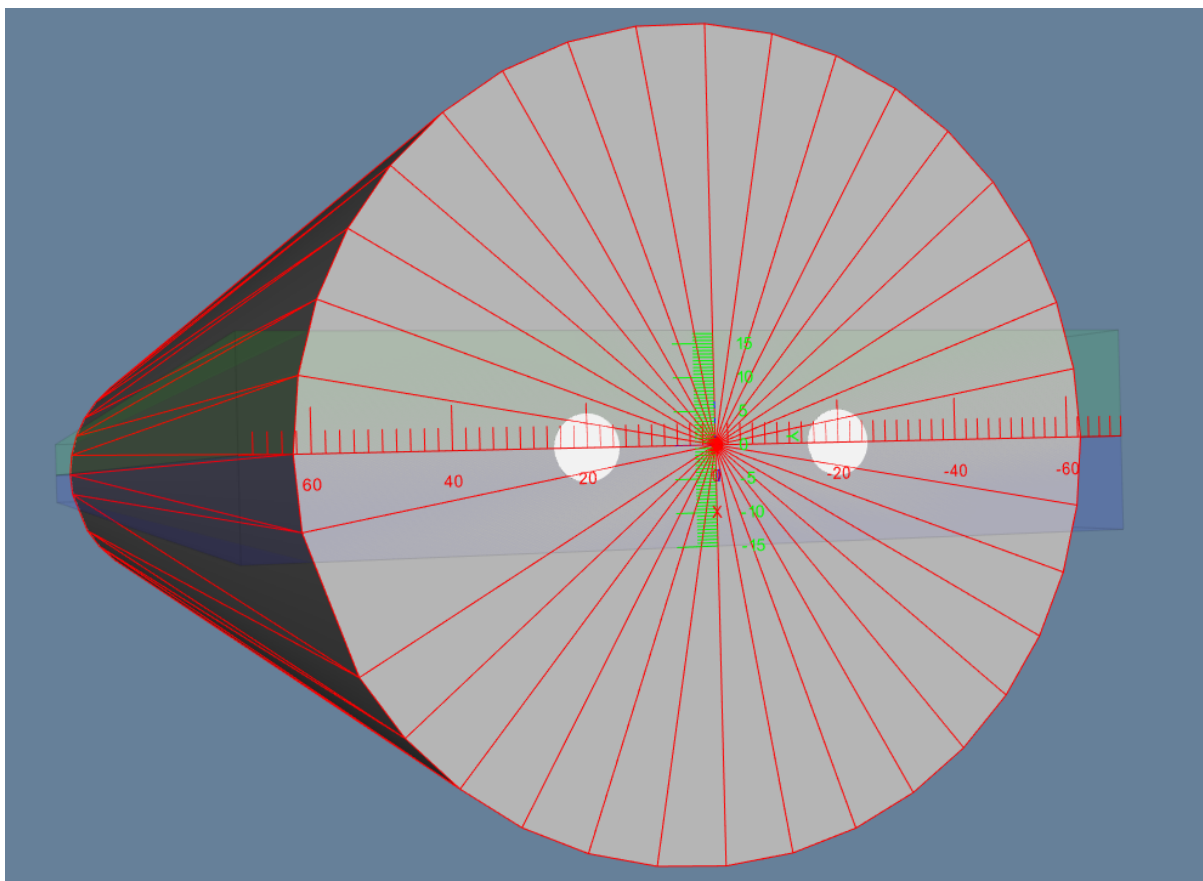


Рисунок 1 – Трехмерная модель многосердцевинного оптического волокна

Произведем расчет модели волокна и рассмотрим перекрестные помехи на дальнем конце FEXT при различных значениях расстояния между центрами сердцевины в интервале 10-95 мкм.

Приведите графики распределение интенсивности излучения при удалении центров сердцевины на 20 мкм и 40 мкм (см. пример на рисунке 2).

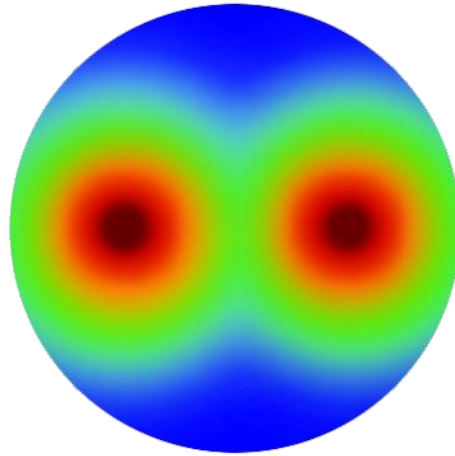


Рисунок 2 – Распределение интенсивности излучения

Сделайте вывод по полученным данным.

**Задание 3.** Оцените перекрестные помехи между сердцевинами волокна при макроизгибе.

Рассмотрим многосерцевинное оптическое волокно с макроизгибом радиус которого составляет 20 мм. На рисунке 3 представлена 3D модель волокна с макроизгибом в трех проекциях: вид сверху (XZ View); вид сбоку (XY View); вид с торца (YZ View).

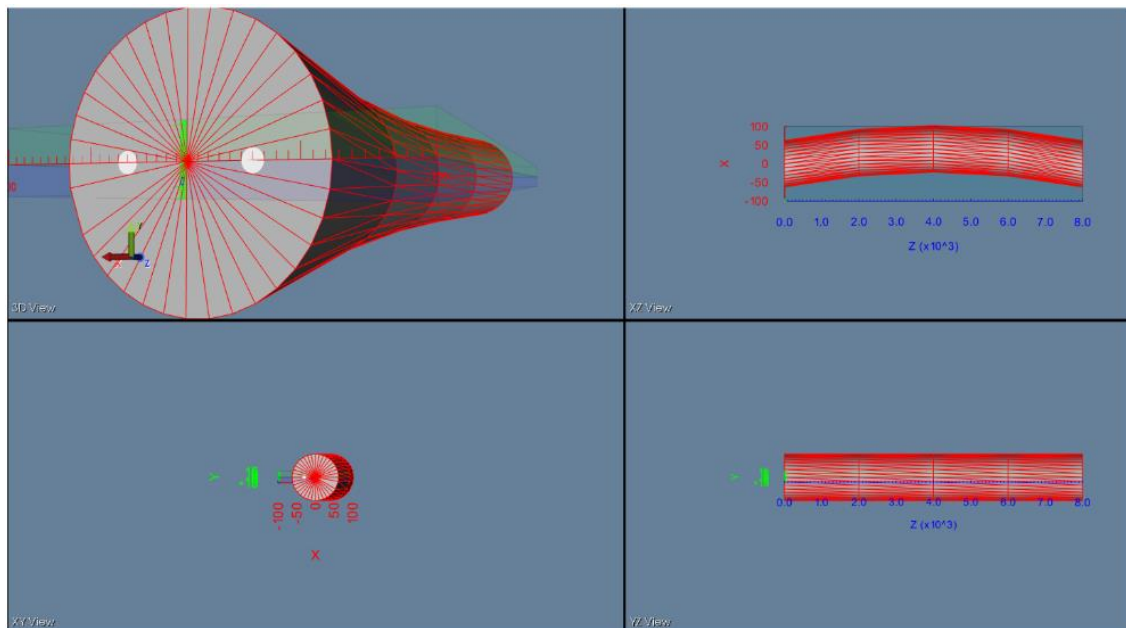


Рисунок 3 – 3D модель волокна в трех проекциях

Данный эксперимент позволит изучить перекрестные помехи на дальнем конце при изменении расстояния между сердцевинами волокна в пределах 10–95 мкм, при радиусе изгиба волокна 20 мм.

Постройте график зависимости перекрестных помех FEXT от расстояния между сердцевинами, при радиусе изгиба N мм.

Вариант	Радиус изгиба N мм
1.	20
2.	15
3.	10
4.	25
5.	30

Сделайте вывод по полученным данным.

**Задание 4.** Исследуйте многосердцевинное оптическое волокно с двухслойной оболочкой. Произведите расчет модели волокна и оцените перекрестные помехи при различных значениях расстояния между сердцевинами в интервале 10–95 мкм.

Рассмотрим оптическое волокно с двухслойной оболочкой, которое представлено на рисунке 4. Такое волокно состоит из сердцевины, оболочки с пониженным показателем преломления и стандартной оболочки. В данном случае фтором легируется только внутренняя оболочка.

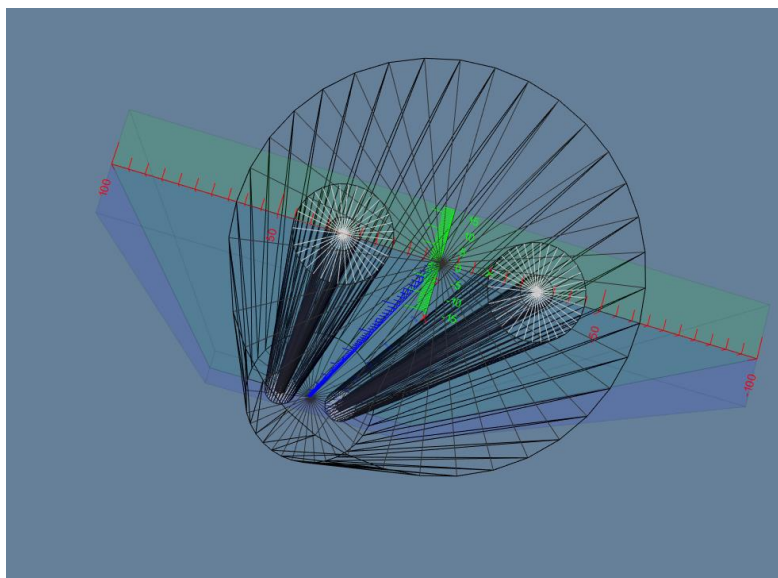


Рисунок 4 – Оптическое волокно с двухслойной оболочкой

Постройте график зависимости ослабления сигнала от расстояния между сердцевинами в волокне с двухслойной оболочкой.

Сделайте вывод по полученным данным.

**Дополнительное задание.** Исследовать многосердцевинное оптическое волокно с двухслойной оболочкой при различных радиусах изгиба, модель которого представлена на рисунке 5.

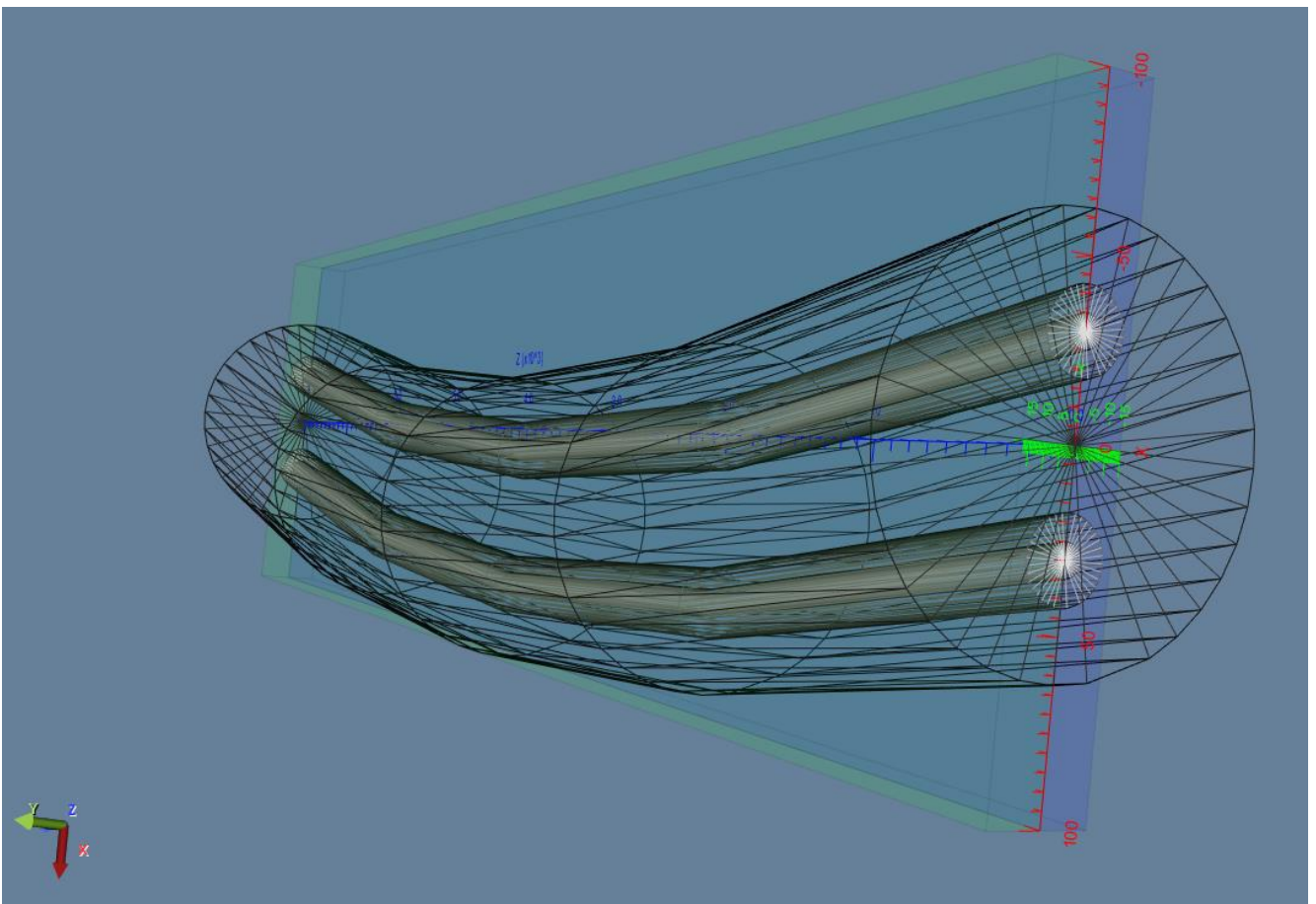


Рисунок 5 – Модель многосердцевинного оптического волокна с двухслойной оболочкой при различных радиусах изгиба

**Задание 5.** Исследуйте взаимные влияния в оптических волокнах с большим количеством сердцевины при их различных схемах расположения.

Геометрические размеры оболочки оптического волокна позволяют разместить большое количество сердцевин в одном оптическом волокне. В соответствии с вариантом постройте модель ОВ:

Вариант	Модель волокна MCF
1.	гексагональная плотноупакованная структура (HCPS) (рисунок 6)
2.	однокольцевая структура (ORS) (рисунок 7)
3.	двухкольцевая структура (DRS) (рисунок 8)
4.	структура с квадратной решеткой (SLS) (рисунок 9)

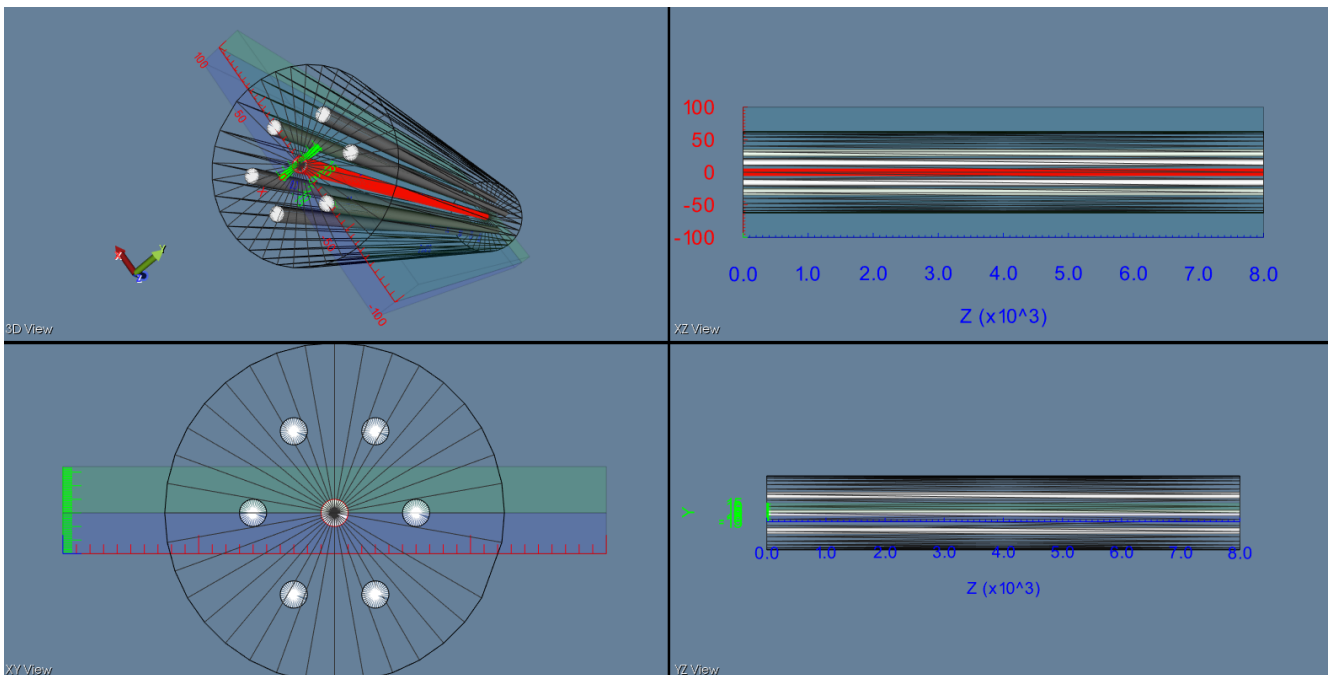


Рисунок 6 – Гексагональная плотноупакованная структура (HCPS)



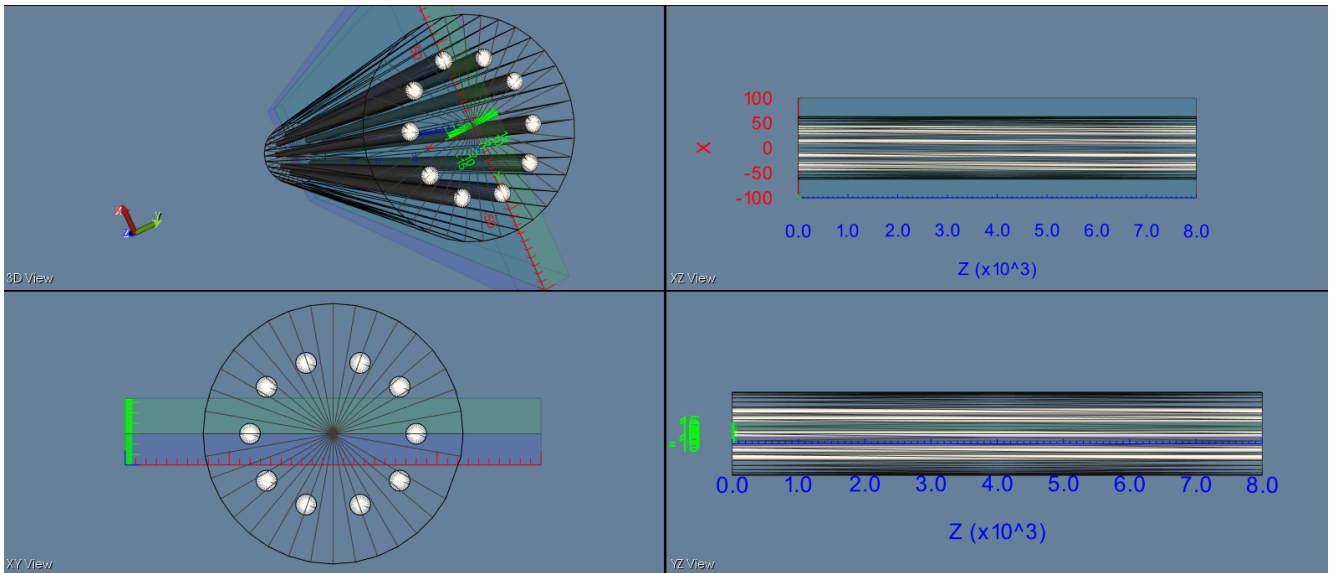


Рисунок 7 – Однокольцевая структура (ORS)

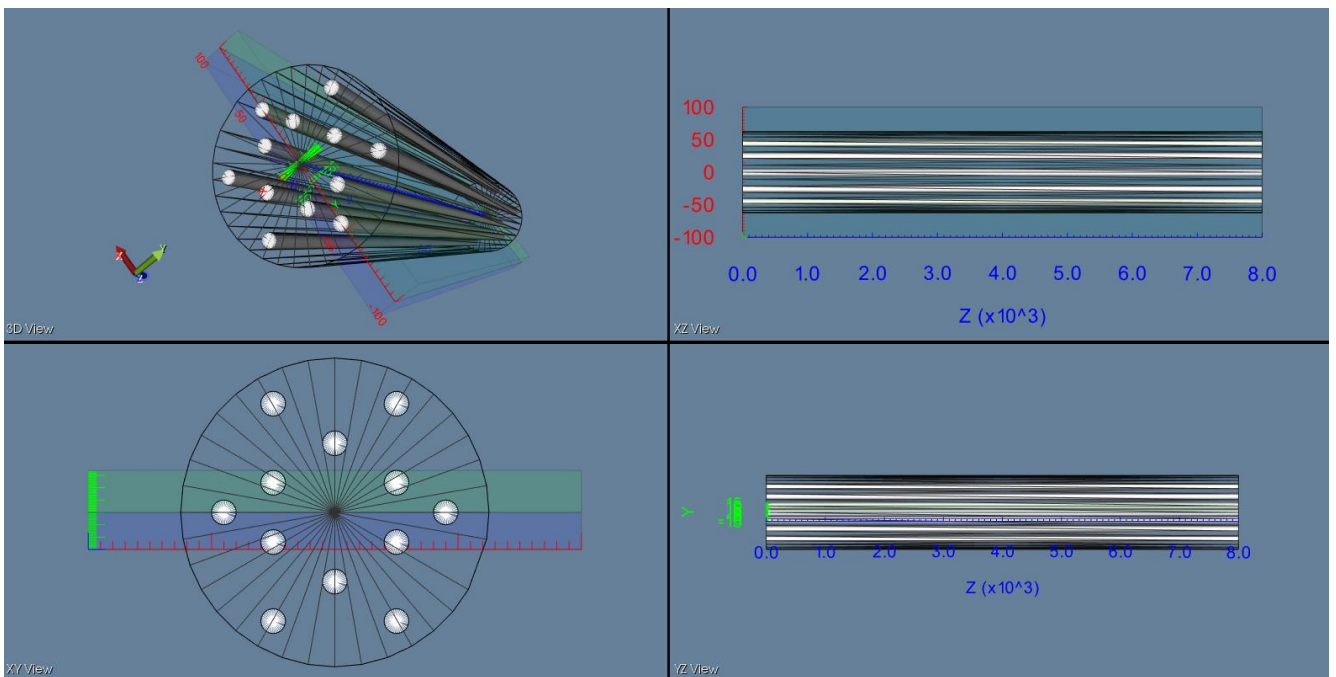


Рисунок 8 – Двухкольцевая структура (DRS)

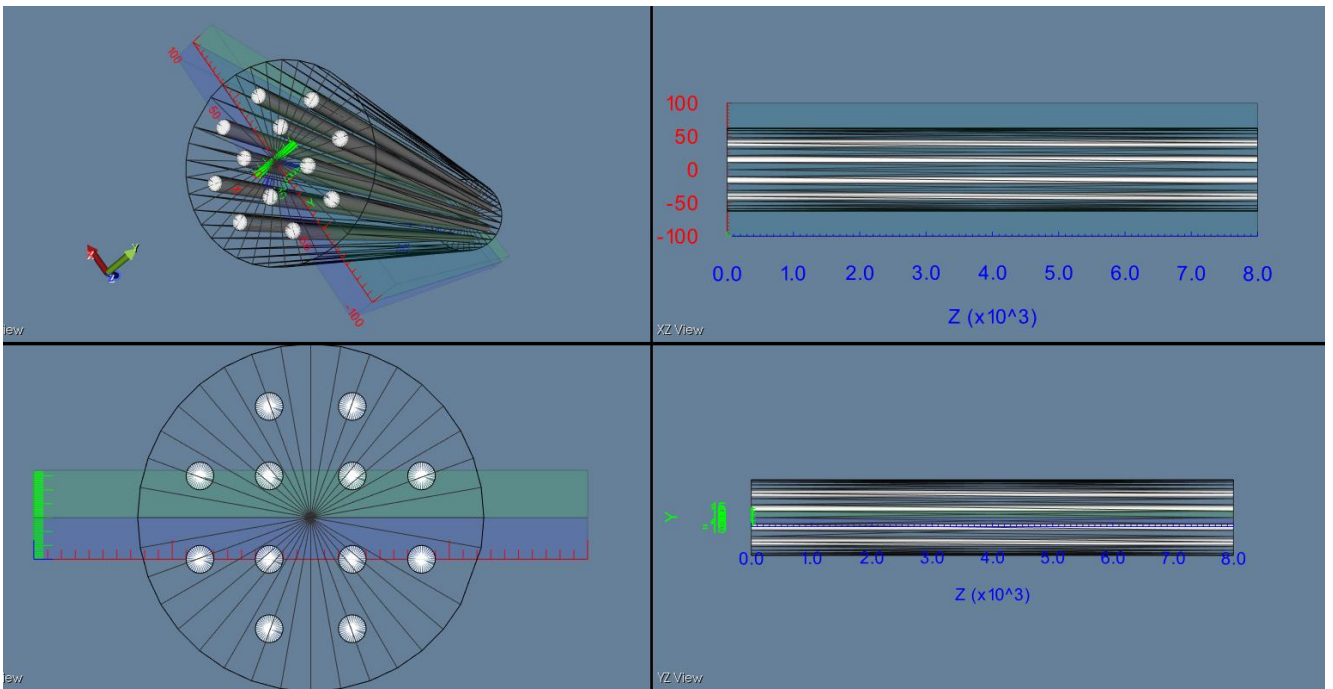


Рисунок 9 – Структура с квадратной решеткой (SLS)



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Многосердцевинные оптические волокна

История развития технологии оптической связи, способствующей увеличению пропускной способности оптических сетей, показана на рис. 1.

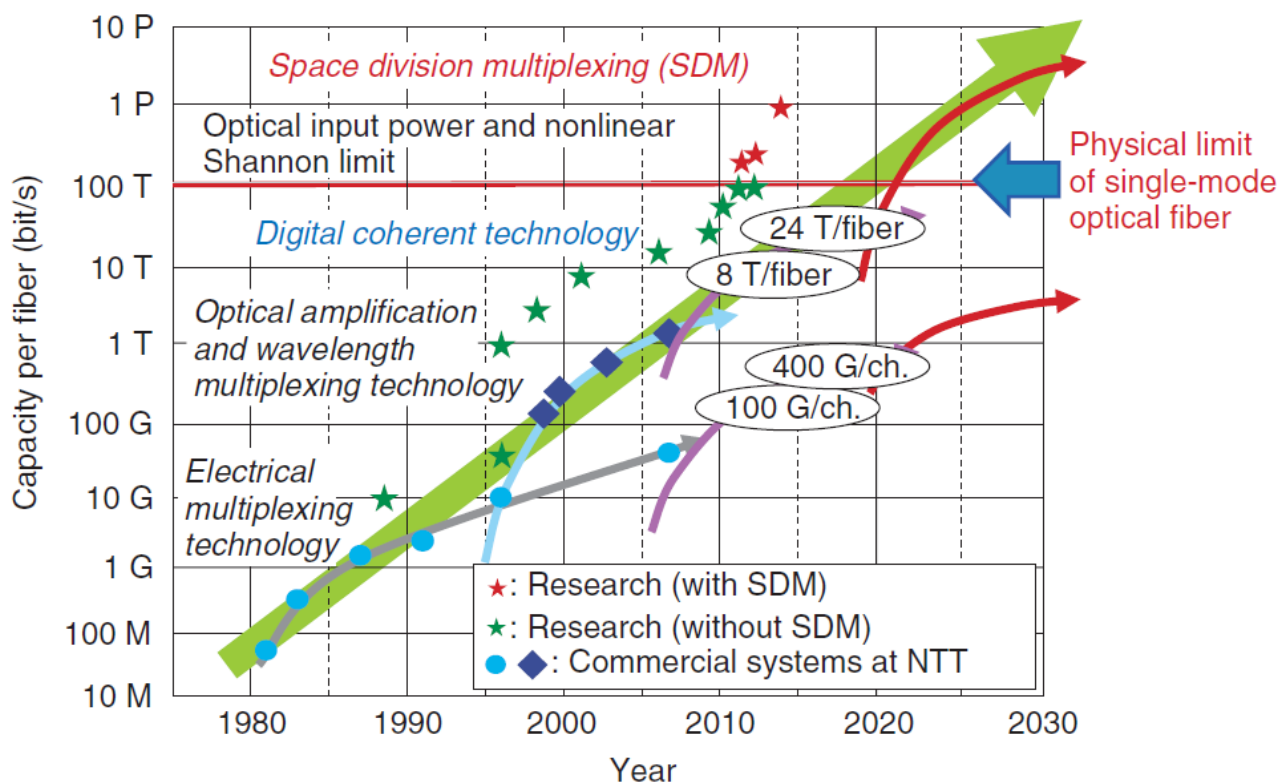


Рисунок 1 – Эволюция систем оптической связи и будущие разработки

До настоящего времени основной средой передачи в оптической сети было одномодовое оптическое волокно, спроектированное только с одной сердцевиной на волокно и одним волноводным режимом. За последние 30 лет лаборатории NTT внесли свой вклад в увеличение пропускной способности почти на пять порядков, исследуя, разрабатывая и коммерциализируя экономичные передовые оптические системы передачи, которые максимизируют широкополосные характеристики этого одномодового оптического волокна. В 1980-х годах пропускная способность класса Гбит/с была впервые достигнута с помощью технологии электрического мультиплексирования, которая позволяла

осуществлять высокоскоростную модуляцию на одной длине волны. С помощью этой технологии NTT построила надежную и экономичную базовую сеть для телефонной связи. Затем, в середине 1990-х годов, возникла потребность в оптической сети, которая могла бы экономично передавать большие объемы трафика данных, вызванного распространением Интернета, а развитие технологии оптического усиления и технологии мультиплексирования по длине волны позволило внедрить системы мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM) для одновременного передача нескольких длин волн. Затем, когда производительность фильтров WDM улучшилась за счет использования планарных световолновых схем на основе кремнезема, а количество каналов с мультиплексированием по длине волны превысило 30, системы плотного мультиплексирования по длине волны стали реальностью.

В настоящее время на практике используется система оптического усиления с плотным мультиплексированием по длине волны, имеющая пропускную способность около 1 Тбит/с (= 1000 Гбит/с), использующая одножильное волокно. Кроме того, недавние достижения в области крупномасштабных сверхскоростных интегральных схем CMOS (комплементарный металл-оксид-полупроводник) привлекли внимание к цифровой когерентной технологии, которая может обеспечить высокочувствительное когерентное обнаружение с использованием сверхскоростной цифровой обработки сигналов на скоростях свыше 100 Гбит/с на канал. В настоящее время ведется большая научно-исследовательская деятельность (R&D), направленная на внедрение практических коммуникационных технологий и повышение эффективности передачи данных.

Однако, когда пропускная способность увеличивается более чем на 100 Тбит/с, в оптической среде передачи и системе передачи начинают проявляться различные ограничения. На этом фоне мультиплексирование с пространственным разделением (spatial division multiplexing, SDM) было предложено в качестве технологии оптической передачи высокой пропускной способности, которая может преодолеть физические ограничения обычного одномодового оптического

волокна за счет добавления пространственной степени свободы волоконно-оптической среде и повышения уровня цифровой обработки сигналов. В последние годы исследования и разработки SDM были довольно активными.

Инновационный центр фотонных сетей в NTT Network Innovation Laboratories занимается исследованиями и разработками инновационных фундаментальных технологий будущего, которые могут повысить плотность технологии SDM и обеспечить развертывание долгосрочной масштабируемой оптической сети с пропускной способностью 1 Пбит/с (= 1000 Тбит/с). класс, преодолевающий уровень в 100 Тбит/с. Рассмотрим далее вариант реализации технологии density SDM как одной из фундаментальных технологий для создания масштабируемой оптической сети, которая может устойчиво увеличивать пропускную способность в будущем.

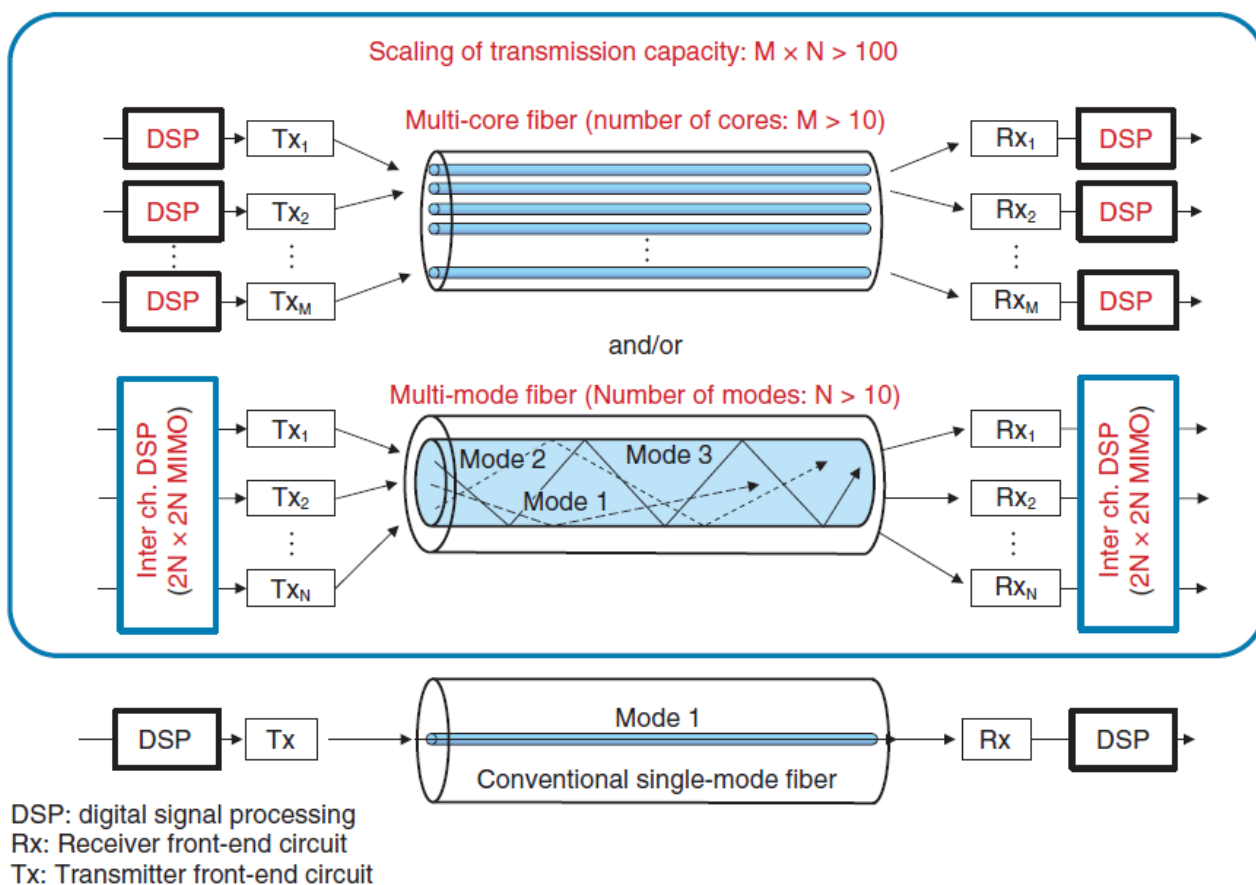


Рисунок 2 – Обзор технологии оптической связи SDM

В последние годы разрабатывается множество новых типов оптических волокон одними из них являются многосердцевинные оптические волокна (Multicore Fibers, MCF). Преимущество оптической системы связи SDM, использующей многосердцевинные оптические волокна, заключается в том, что общая пропускная способность на волокно может быть увеличена без увеличения плотности мощности на ядро. Здесь перекрестные помехи оптического сигнала между ядрами являются наиболее важным конструктивным соображением в многоядерной волоконно-оптической системе связи, целью которой является обеспечение независимости каждого ядра. При использовании многоядерной волоконно-оптической системы связи, состоящей из одномодовых ядер, как это используется в обычном оптическом волокне, правильное проектирование расположения ядер с учетом перекрестных помех между ядрами позволяет увеличить пропускную способность системы за счет увеличения количества ядер только с помощью одного волокна. В системах этого типа также могут использоваться оптические передатчики и приемники того же типа, что и в обычных одномодовых волоконно-оптических системах.

Главным препятствием остаются взаимные влияния между сердцевинами в многосердцевинном оптическом волокне и как следствие уменьшение эффективной дальности передачи сигнала. Так же стоит отметить, что увеличение числа сердцевин оптического волокна значительно усложняет сам процесс производства волокна.

MCF могут быть классифицированы на связанные MCF и несвязанные MCF [3]. В случае связанных MCF, LP-моды в каждой сердцевине сильно связаны между собой, и формируют супермоды. Благодаря супермодам может быть уменьшена межмодовая дисперсия. Напротив, несвязанные MCF используют сердцевинны в качестве независимых волноводов, чтобы уменьшить нагрузку по обработке сигналов. Указанные FM-МС волокна были основаны главным образом на несвязанной технологии MCF. При проектировании несвязанных FM-МС волокон необходимо учитывать следующие вопросы, касающиеся конструкции MCF:

- взаимные влияния между сердцевинами или перекрестные помехи (IC-XT);

- компоновка сердцевин;

- взаимные влияния между модами (IM-XT)

- межмодовая дисперсия (DMD).

Для уменьшения взаимных влияний между сердцевинами волокна прибегают к увеличению шага между сердцевинами, что приводит к увеличению диаметра оболочки и ухудшению механических свойств волокна[4].

В MCF предполагается, что все сердцевинки несут примерно одинаковую энергию и каждая сердцевинка получает IC-XT от всех соседних сердцевин исходя из чего суммарные взаимные влияния рассчитываются по формуле

$$IC-XT_{\text{сумм}} = IC-XT + 10 \times \log n,$$

где  $n$  – количество соседних сердцевин, окружающих каждую сердцевинку.

Небольшое число сердцевин предпочтительно для подавления IC-XT<sub>сумм</sub>. Чтобы максимально увеличить количество сердцевин MCF и уменьшить  $n$ , были предложены различные схемы расположения сердцевин для SM-MCF, и некоторые из них также используются для FM-MCF.

На рисунке 1.1 изображены схемы расположения сердцевин MCF, представленные современными исследователями в научных работах: гексагональная плотноупакованная структура (HCPS) [4], однокольцевая структура (ORS) [5], двухкольцевая структура (DRS) [6] и структура с квадратной решеткой (SLS) [7].

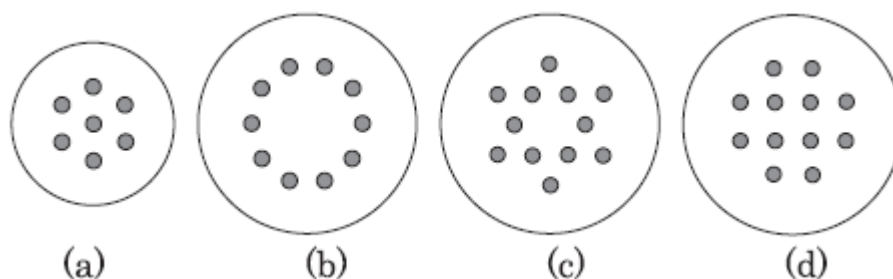


Рисунок 1.1 – Основные схемы расположения сердцевин в MCF: (a) HCPS (b) ORS (c) DRS (d) SLS.

Для использования MCF на больших расстояниях необходимо реализовать низкую DMD и низкую IC-XT.

## 1.2 Практические модели multi-core fiber

### 1.2.1 Семи сердцевинное оптическое волокно с диаметром оболочки 130 мкм

В 2012 году OFS Laboratories представило статью, в которой говорилось о волокне с внешним диаметром оболочки из стекла 130 мкм, которое немного больше, чем у обычного оптического волокна с диаметром оболочки 125 мкм. Волокно, содержащее семь отдельных сердцевин, успешно передавало семь сигналов на длине волны 1310 нм и семь сигналов на длине волны 1490 нм, на скорости 2,5 Гбит/секунду, на расстояние 11,3 км. Зависимость километрического затухания от длины волны излучения представлена на рисунке 1.2 [8].

Предназначенное для одномодовой работы, волокно имеет семь волоконных сердцевин диаметром 8 мкм, расположенных в гексагональной решетке с шагом сердцевин 38 мкм. Диаметр оболочки составил 130 мкм, волокно покрыто акрилатом до конечного наружного диаметра 250 мкм. Затухание в центральной сердцевине составляет 0,39/0,30 дБ/км при 1310/1490 нм, а среднее затухание для шести внешних сердцевин составляет 0,41/0,53 дБ/км при 1310/1490 нм.

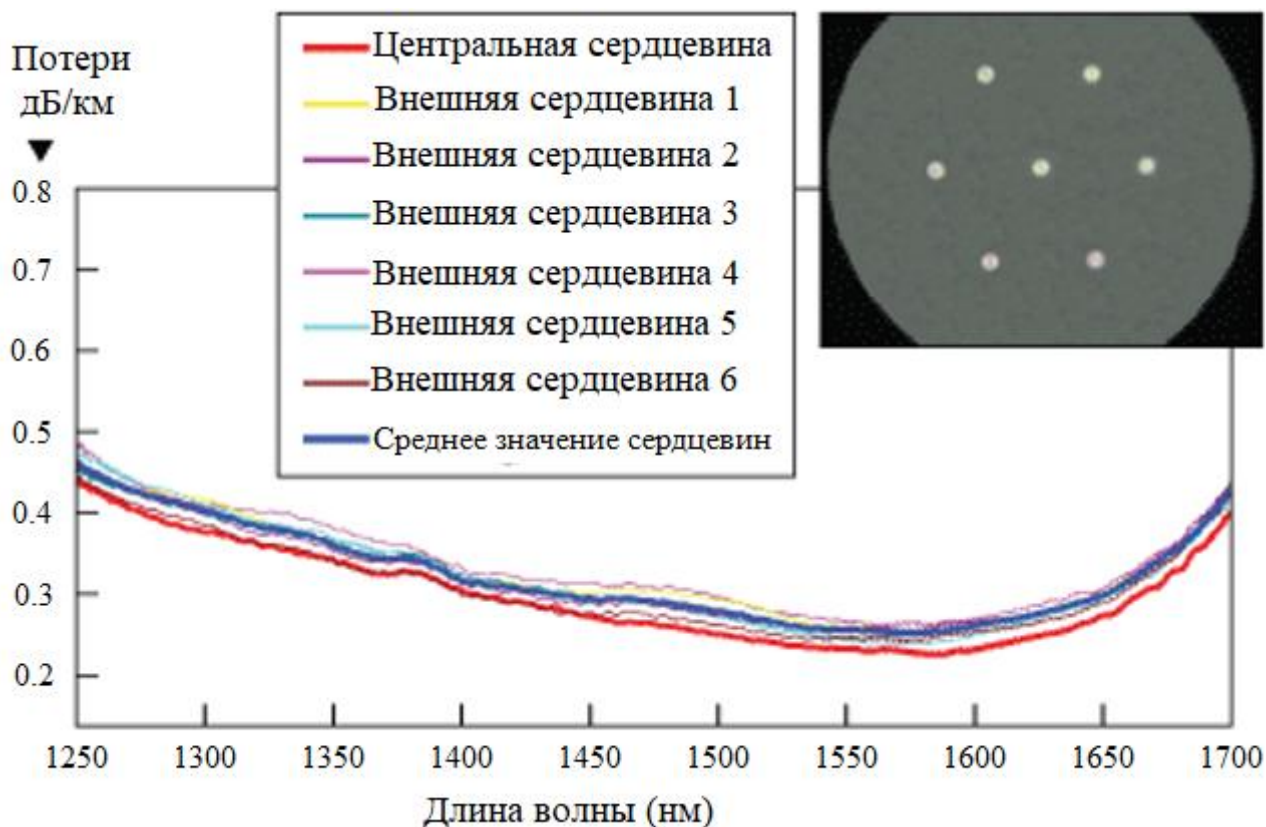


Рисунок 1.2 – Зависимость километрического затухания от длины волны излучения

Максимальные перекрестные помехи - чрезвычайно важный параметр для передачи данных – составляют менее минус 38/ минус 24 дБ при 1310/1490 нм, что более чем достаточно для удовлетворения требований PON. Чтобы соединить многосердцевинное оптическое волокно с семью отдельными сердцевинами, был разработан специальный конусный многосердцевинный волоконный соединитель путем сужения и сплавления волокон до размера, который соответствует структуре многосердцевинного волокна, достигая средних значений потерь на сращивание 0,10 дБ, сопоставимых с обычными волокнами.

Компания Sumitomo в сотрудничестве с Национальным институтом информационно-коммуникационных технологий (NICT) Японии представили



волокно с шестью сердцевинами, расположенными вокруг центральной сердцевины. Поперечное сечение волокна приведено на рисунке 1.3 [9].

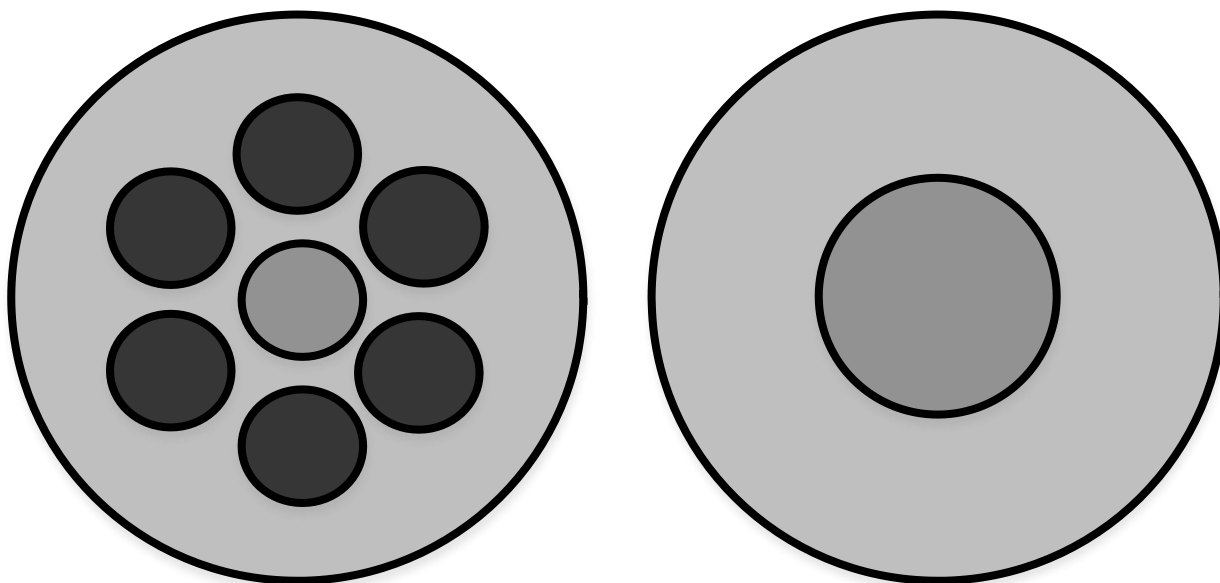


Рисунок 1.3 – Поперечное сечение волокна: слева - нового типа, справа - многомодовое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм.

При разработке данных волокон внешний диаметр волокна оставили стандартным 125 мкм, что позволило сохранить максимальную совместимость данных волокон с обычными оптическими компонентами. Диаметр сердцевины составляет 26 мкм, а расстояние между осями сердцевины – 39 мкм. Вследствие очень близкого расположения сердцевины друг относительно друга в волокне возникают сильные перекрестные помехи. Другие параметры волокна остались в пределах норм, например, коэффициент затухания на длине волны 1300 нм не превышает 0,5 дБ/км.

### **1.2.2 Многосердцевинное волокно с уменьшенным значением показателя преломления оболочки по периметру сердцевины**

Минимальные перекрестные помехи и большое число сердцевины – это противоречивые требования для многосердцевинного волокна. Для преодоления данного противоречия многие компании, в том числе и Fujikura, начали

конструировать многосердцевинное волокно с уменьшенным значением показателя преломления оболочки по периметру сердцевин [10].

Поперечное сечение семисердцевинного ОВ приведено на рисунке 1.4.

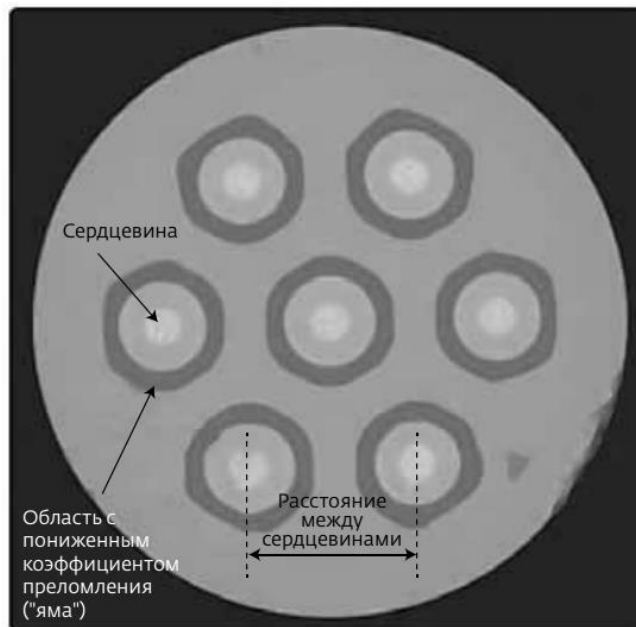


Рисунок 1.4 – Поперечное сечение семисердцевинного ОВ с уменьшенным значением показателя преломления оболочки по периметру сердцевин

На рисунке 1.5 приведены графики зависимости уровня перекрестных помех от расстояния между сердцевинами для двух различных видов многосердцевинных ОВ. Перекрестные помехи с уменьшенным значением показателя преломления оболочки по периметру сердцевин ниже на 20 дБ чем при «классическом» для стандартного одномодового волокна профиле показателя преломления, при условии одинакового шага между сердцевинами. Специалисты компании уверяют что этого вполне достаточно для стабильной связи и что данное нововведение позволит размещать сердцевин меньшим на 16 % расстоянием.

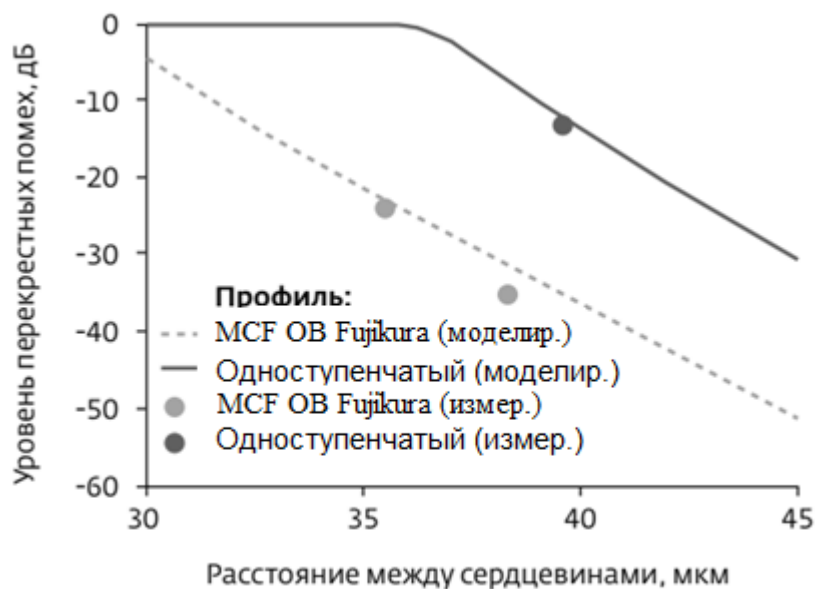


Рисунок 1.5 – Графики зависимости уровня перекрестных помех от расстояния между сердцевинами для двух различных видов многосердцевинных ОВ

Fujikura продолжает исследование и разработку оптических волокон для систем оптической передачи информации нового поколения. В 2012 году компания Fujikura установила мировой рекорд пропускной способности в 1,01 Пбит/с, организовав в одном 12-сердцевинном ОВ передачу 222 WDM-каналов с модуляцией 32QAM-PDM [11].

### 1.2.3 Четырехсердцевинное оптическое волокно с уменьшенным значением показателя преломления оболочки по периметру сердцевины

Компания Sumitomo Electric разработала четырехсердцевинное оптическое волокно с уменьшенным значением показателя преломления оболочки по периметру сердцевины, поперечный разрез которого представлен на рисунке 1.6. Оптическое волокно содержит четыре сердцевины и маркируется компанией как coupled-core MCF или CC-MCF. Внешний диаметр волокна 125 мкм обеспечивает совместимость с существующим оборудованием по производству кабелей.

По заявлению компании данное волокно предназначается для систем передачи данных на сверхдальние расстояния.

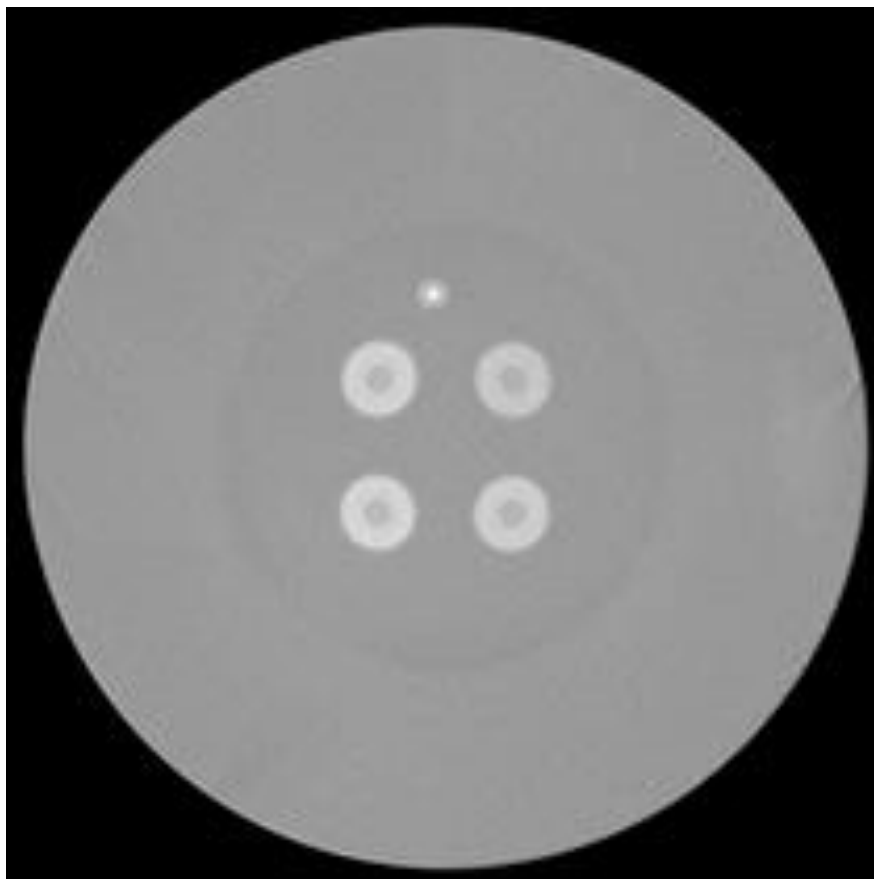


Рисунок 1.6 – Торец СС-МСФ волокна с четырьмя сердцевинами

В данных волокнах, обеспечивающих пространственное мультиплексирование каналов, конструкторам удалось достичь рекордных значений коэффициента затухания и значений пространственной межмодовой дисперсии.

Графики зависимости километрического затухания и пространственной межмодовой дисперсии от длины волны представлены на рисунках 1.7 и 1.8 (Точками показаны полученные при измерении значения, сплошной линией – аппроксимация результатов измерений) соответственно.

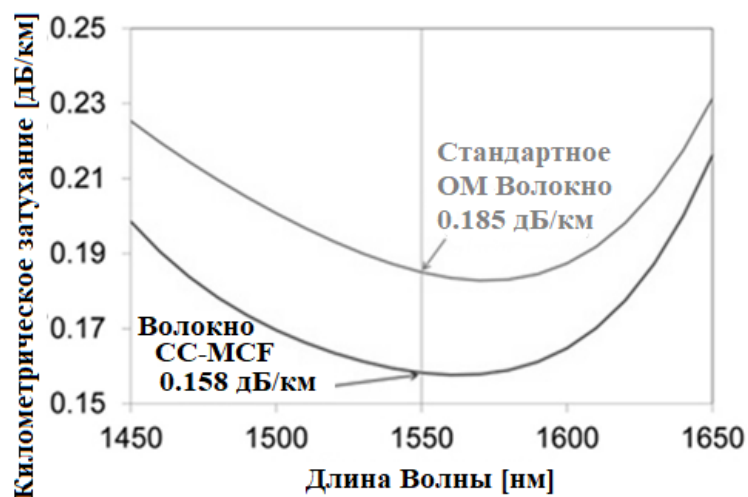


Рисунок 1.7 – График зависимости километрического затухания от длины волны.

Километрическое затухание представленного волокна составило 0,158 дБ/км на длине волны 1550 нм, а межмодовая дисперсия 6,1 пс/ $\sqrt{\text{км}}$  для длин волн от 1520 до 1580 нм. Представленные значения параметров волокна являются рекордно низкими для оптических волокон, произведенных с применением технологии пространственного мультиплексирования.

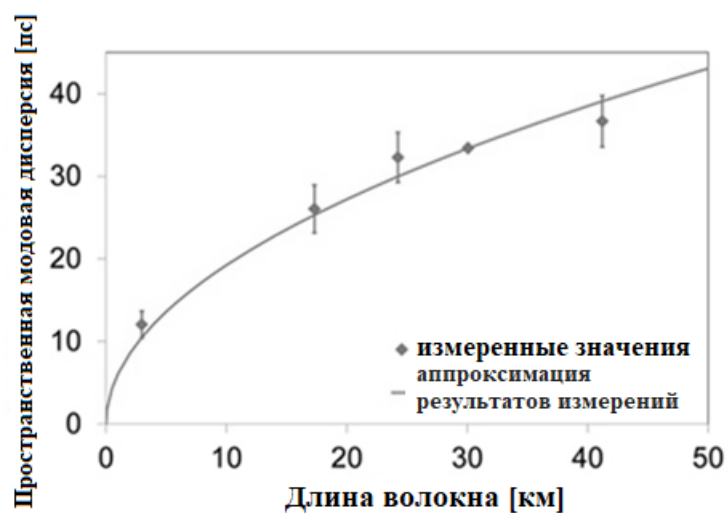


Рисунок 1.8 – График зависимости пространственной модовой дисперсии от длины волокна

Уменьшенная величина затухания позволяет передавать сигналы с меньшим уровнем шумов в сравнении с предыдущими версиями многосердцевинных волокон.

С 2009 года Sumitomo Electric смогла достичь ощутимых результатов в исследовании и разработке оптических волокон с применением технологии пространственного мультиплексирования. В компании заявляют, что будут продолжать исследования в данном направлении [12].

Специалисты планируют устранить сложности практического внедрения данного типа волокон, а также увеличить количество сердцевин без снижения пропускной способности отдельной сердцевины. Ожидается, что механические характеристики данного типа волокон будут лучше, чем у стандартных ОМ-волокон.

### **Критерии оценивания взаимных влияний**

Перекрыстные помехи на дальнем конце (FEXT), дБ – это затухание, которое испытывает помеха при переходе из начала влияющей направляющей системы в конец подверженной влиянию направляющей системы.

$$FEXT = 10 \lg \frac{P_1}{P_2},$$

где  $P_1$  – мощность сигнала в первой сердцевине;

$P_2$  – мощность сигнала во второй сердцевине.

Если предположить, что MCF изгибается с постоянным радиусом  $R$  и непрерывно скручен с постоянным шагом, то перекрыстные помехи (ХТ) между двумя сердечниками с длиной  $L$  легко оценить как:

$$FEXT = \tanh(h_{mn}L),$$

где  $h_{mn}$  – коэффициент связи по мощности (функция Лоренса).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Волокна будущих петабитных сетей [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://nag.ru/articles/article/100004/volokna-buduschih-petabitnyih-setey.html>;

2 О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы [Электронный ресурс]: Указ Президента РФ - от 9 мая 2017 г. №203. – Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41919>;

3 R. Ryf, R. Essiambre, J. Von Hoyningen-Huene, and P. J. Winzer, “Analysis of mode-dependent gain in Raman amplified few-mode fiber,” in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2012, pp. 1–3;

4 K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, M. Suzuki, 1.03-Exabit/s\_kmsupernyquist-WDM transmission over 7326-km seven-core fiber, in: Proc. of Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun., London, U.K., Sept. 2013, Paper PD3.E.3;

5 B.J. Puttnam, R.S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. DeigadoMendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, J. Marciante., 2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb, in: Proc. of Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun., Valencia, Spain, Sept. 2015, Paper PDP3.1;

6 K. Igarashi, D. Souma, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, T. Tsuritani, I. Morita, M. Suzuki, 114 space-division-multiplexed transmission over 9.8-km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers, in: Proc. of the Opt. Fiber Commun. Conf., Los Angeles, CA, USA, 2015, Paper Th5C.4;

7 T. Sakamoto, T. Matsui, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Takenaga, T. Mizuno, Y. Abe, K. Shibahara, Y. Tobita, S. Matsuo, K. Aikawa, S. Aozasa, K. Nakajima, Y. Miyamoto, Low-loss and low-DMD few-mode multi-core fiber with highest core



multiplicity factor, in: Proc. of Opt. Fiber Commun. Conf., Anaheim, CA, USA, 2016, Paper Th5A.2;

8 S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh, M. Koshiba, 12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission, Opt. Express 20 (2012) 28398–28408;

9 K. Takenaga, Multicore fiber with dual-ring structure, in: Proc. Of OptoElectronics and Communication Conf./Australian Conf. on Optical Fibre Technol., Melbourne, July 2014, Paper MO1E-5;

10 F. Ye, K. Saitoh, H. Takara, R. Asif, T. Morioka, High-count multi-core fibers for space-division multiplexing with propagation-direction interleaving, in: Proc. of Opt. Fiber Commun. Conf., Los Angeles, CA, USA, 2015, Paper Th4C.3;

11 P. Sillard, M. Bigot-Astruc, D. Boivin, H. Maerten, L. Provost, Few-mode fiber for uncoupled mode-division multiplexing transmissions, in: Proc. of the Eur. Conf. Exhib. Opt. Commun., Torino, Italy, Sept. 2011;

12 Y. Sasaki, K. Takenaga, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, Large effective-area uncoupled few-mode multi-core fiber, Opt. Express 20 (2012) B77–B84;

13 Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов; Пер. с англ. – Радио и связь, 1987. – 656 с.;