

На правах рукописи

Насибулин Евгений Андреевич

Исследование параметров современных оптических разветвителей

Направление подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
направленность – Сети, системы и устройства телекоммуникаций
программа академической магистратуры

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации
на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

Научный руководитель, к.т.н., доцент

Д.В. Кусайкин

Рецензент, к.т.н., доцент

Д.В. Денисов

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9.00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

Секретарь Государственной аттестационной комиссии

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

На сегодняшний день спрос на услуги оптической связи обуславливается увеличением объема передаваемой информации, максимально быстрым откликом и передачу информации на огромные расстояния. Для построения таких линий связи требуется использование специализированного активного и пассивного оборудования, а также применение специальных инструментов и приборов. Разветвитель (Optical Splitter) – небольшое, но необходимое устройство, используемое при строительстве пассивных сетей связи с использованием оптического волокна.

Оптические разветвители уже давно и успешно применяются на практике в волоконно-оптических сетях и еще большее применение нашли с появлением и развитием технологии PON (Passive Optical Network), которая в настоящее время стала популярной и доступной. Улучшение параметров разветвителей является главной задачей проводимых исследований. Данный вопрос в основном исследуется в зарубежных публикациях, тогда как в отечественных публикациях крайне мало уделено данному вопросу должного внимания. В настоящее время проводятся различные исследования в данной области. В 2018 году Rajdi Agalliu, Catalina Burtscher и другие исследовали оптимизированный по длине до 120000 мм планарный сплиттер 1×64 с древовидной структурой Y-типа с уменьшенным значением световодов $5,5 \times 5,5$ мкм², проведя сравнение его параметров неравномерности, вносимых потерь и фонового шума со стандартным сплиттером длиной 318000 мм и размером световодов 6×6 мкм². В 2019 году Yu Zheng, Bingxin Xia и другие проанализировали влияние температуры на планарный сплиттер 1×8 и обнаружили зависимость вносимых потерь при разных температурах. В 2019 году W. Purnamaningsih и другие сконструировали четырехсегментный сплиттер, в котором в качестве материала для световодов используется нитрид галлия, для буферного слоя – нитрида алюминия. Как отмечают авторы, данный сплиттер простой в изготовлении, что обеспечивает перспективное использование в оптических сетях связи. Как видно из представленного обзора, исследования в данной области актуальны и разнообразны, однако не уделено должного внимания исследованию характеристик сплиттера в случае изменения его геометрических размеров, что является основной темой исследования данной работы. В работе приведены результаты исследования зависимости оптических параметров планарных делителей 1×8 с древовидной структурой от изменения их геометрических размеров и размеров световодов.

Объект исследования – оптические разветвители.

Предмет исследования – зависимость значений параметров оптических разветвителей 1×8 с древовидной структурой с размером световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² от изменения их геометрических размеров и размеров световодов.

Целью работы является исследование степени изменения параметров оптических планарных сплиттеров 1×8 с размерами световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² при изменении их геометрических размеров и размеров световодов путем

имитационного моделирования с помощью специализированного программного обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) проведение анализа публикаций по теме исследования;
- 2) выбор программного инструментария для моделирования процесса работы планарных разветвителей с различными характеристиками и параметрами;
- 3) разработка и построение модели планарного сплиттера 1×8 с размером световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² в специализированной программной среде;
- 4) исследование зависимости значений параметров оптических разветвителей 1×8 с древовидной структурой с размером световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² от изменения их геометрических размеров и размеров световодов.

Практическая значимость заключается в анализе возможности улучшения параметров планарного сплиттера: вносимых потерь (IL), неравномерности (ILu), отношения сигнал/шум (SNR) при изменении его геометрических размеров и при изменении размера диаметра световодов с 6×6 мкм² до $5,5 \times 5,5$ мкм² и 5×5 мкм². Улучшение параметров разветвителей имеет практическую значимость в рамках построения эффективных волоконно-оптических пассивных сетей.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач моделирования, расчета и оценки результатов использовалось программное обеспечение OptiBPM от компании Optiwave. Данный инструмент обеспечивает все необходимые требования при проектировании и симуляции работы различных оптических систем, построенных пользователем. Так же он позволяет тонко настраивать необходимые параметры световодной структуры применяя пользовательские значения к каждому элементу устройства. OptiBPM позволяет оценить уровень сигнала и наглядно продемонстрировать как распространяется свет в любой точке световодной системы. В мануале к данному программному обеспечению приводятся все формулы ко всем алгоритмам распространения света, каждый из которых пользователь может настроить самостоятельно.

Эффективность построенного разветвителя оценивалась путем сравнения параметров разветвителя при стандартных размерах длины 37000 мкм и ширины 1100 мкм и размером световодов 6×6 мкм² с другими разветвителями при измененных данных геометрических параметрах и измененных размерах световодов на длинах волн $\lambda = 1550$ нм, 1310 нм и 850 нм.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) анализ отечественных и зарубежных публикаций по теме исследования;
- 2) метод проведения исследования;
- 3) построенные модели планарных сплиттеров 1×8 с размером световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² в среде OptiBPM;
- 4) Результаты исследования степени изменения параметров оптических планарных сплиттеров 1×8 с размерами световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² при изменении их геометрических размеров и размеров световодов.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием, при моделировании и исследовании, программного обеспечения OptiBPM от компании Optiwave, являющейся лидером в разработке программ для проектирования, моделирования и симуляции работы различных оптических

систем. Структуры были сформированы согласно известным методам, представленным в научных публикациях. Результаты исследования эффективности и моделирования планарных оптических сплиттеров с древовидной Y-структурой получены при различных условиях и согласно техническим требованиям.

Апробация результатов.

1) материалы XX научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, I этап, «Сравнение оптических свойств 1×8 разветвителей на основе Y-ветви и MMI», г. Екатеринбург, 2018 г.;

2) материалы V Межвузовского научного семинара «Информационные технологии и когнитивная электросвязь» УрТИСИ СибГУТИ, «Анализ параметров современных оптических сплиттеров пассивных оптических сетей», г. Екатеринбург, 2019г.;

3) материалы XII международной молодежной научно-практической конференции «Инфоком-2019», «Анализ параметров современных оптических сплиттеров пассивных оптических сетей», г. Ростов-на-Дону, 2019 г.;

4) материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, I этап «Исследование параметров современных оптических разделителей», г. Екатеринбург, 2019 г.;

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 2 статьи в научных журналах РИНЦ, 3 статьи в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ. По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 19 наименований. Объем диссертации 84 страницы, включены также 81 рисунок, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы магистерской диссертации, определены объект и предмет исследования, приведены цель и задачи работы, описаны научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Анализ публикаций по теме исследования» проведен анализ публикаций по теме исследования, который позволил определить степень проработанности вопроса достижений в области параметров современных оптических сплиттеров, сложности их улучшения и анализ возможных путей для улучшения их эффективности работы. Изученные материалы отражают популярные направления развития исследований в данной области.

В результате анализа трудов таких авторов, как С. Бурчера, Михала Луки, Даны Сейрингер, Дечао Чжана, Хана Ли, Лей Вана, Лян Гэна, Шигуан Вана, Шэна Лю, Ян Гао, К. Рангхуванши, В. Кумара, Девенды Чак, Сантош Кумара, Раджди Агаллиу, Каталины Бурчер и других, были сделаны выводы, подтверждающие актуальность темы магистерской диссертации.

Данными авторами были проведены исследования сравнения выходных параметров планарных сплиттеров с древовидной Y-структурой и сплиттеров основанных на многомодовой интерференции, сплиттера, состоящего из нескольких делителей, основанных на двух сплавных параллельных световодах,

позволяющего менять коэффициент деления сигнала, зависимость выходных параметров планарных сплиттеров с древовидной Y-структурой от ее угла, зависимость параметров планарных сплиттеров с древовидной Y-структурой от их длины, влияние температуры на параметры планарного сплиттера, применение новых материалов в изготовлении сплиттера и использовании связи мод при распространении по нему света.

Представленные достижения являются основополагающими в формировании выбора, в качестве объекта исследования, оптических разветвителей. Однако, в рассмотренных публикациях не было уделено должного внимания исследованию характеристик планарных сплиттеров в случае комплексного изменения его геометрических размеров и размеров световодов. Данным исследованиям посвящена настоящая магистерская диссертация.

Во второй главе «Метод проведения экспериментального исследования» рассматривается используемое программное обеспечение, применяемое для проектирования, моделирования и симуляции работы планарного сплиттера, с последующим анализом зависимости выходных параметров от его геометрических значений и размеров световодов.

Было выбрано программное обеспечение OptiBPM от компании Optiwave благодаря ее преимуществам:

- наблюдение распространения луча в реальном времени по всей световодной структуре;
- множество параметров настройки подаваемого излучения;
- зарубежные исследования на тему планарных сплиттеров проводилось именно в этом программном обеспечении;
- возможность оценить световой сигнал в любой точке световодной структуры;
- построение графиков различных параметров, необходимых для исследования в данной диссертационной работе;
- построение графиков в двухмерном и трехмерном пространстве;
- задание сетки поля при симуляции, что дает более точные измерения светового потока;
- понятная документация программы с приведением и выводом формул для каждого способа распространения луча света;
- бесплатная лицензия с полным функционалом программы на 30 дней, без нужды регистрироваться на официальном сайте.

Так же в данной главе были рассмотрены некоторые численные методы моделирования в данной программной среде. Среда обработки OptiBPM содержит метод распространения луча (BPM) в качестве основного элемента, а также средства определения режима, совместимые с его алгоритмами. BPM основан на численном решении уравнений, управляющих распространением света в диэлектрических средах. BPM учитывает монохроматические сигналы и связан с решением уравнения Гельмгольца. Модели распространения, основанные на аппроксимациях уравнения Гельмгольца, используются для следующих целей:

- упрощения моделирования;
- сокращения времени обработки;
- уменьшения объема занимаемой памяти компьютера.

Симулятор 2D BPM основан на устойчивом алгоритме метода конечных разностей Кранка-Николсона. В зависимости от дизайна возможно настроить следующие параметры программы:

- алгоритмы, дающие выбор между ТЕ и ТМ поляризацией;
- широкоугольное распространение на основе аппроксимаций Паде, Паде (1,1) и Паде (2,2) до Паде (4,4);
- выбор светового потока может задаваться различными режимами, гауссовским пучком, прямоугольным излучением или настраиваемыми пользовательскими параметрами;
- излучение светового потока можно задавать под углом;
- выбор показателя преломления как модального, среднего или определенного пользователем;
- простое или полностью прозрачное граничное условие (ТВС).

Симулятор BPM 3D основан на:

- неявных схемах метода чередующихся направлений (схемы ADI);
- скалярных алгоритмах;
- полу-векторных алгоритмах, дающих выбор между квази-ТЕ и квази-ТМ поляризацией;
- полно-векторных алгоритмах, управляющих обоими компонентами поперечного поля.

Для того, чтобы добиться оптимальных значений параметров, программа автоматически сканирует заданные значения. Чтобы найти оптимальные условия при моделировании, необходимо повторять моделирование с различными проектными параметрами. OptiBPM позволяет выполнять автоматические циклические вычисления, называемые расчетами сканирования параметров.

Программное обеспечение OptiBPM использует режим решателей, они совместимы с алгоритмом 2D и 3D BPM. Решатели используют разные методы:

- матричный метод переноса (ТММ) в 2D для многослойных плоских структур;
- метод неявного изменения направления (ADI) в 3D;
- метод корреляционных функций (CFM) в 2D и 3D.

Программа для планарных структур основана на решении нескольких граничных условий на диэлектрических границах между слоями. Во время распространения пользовательского поля CFM рассчитывает интеграл корреляции между входным полем и распространяющимся полем в каждой точке. Это создает функцию корреляции амплитуды поля для световода. Функция корреляции предоставляет всю информацию, необходимую для полного модального описания полей, включая:

- константы распространения;
- вес каждого режима;
- режим собственных функций.

Метод ADI разделяет производные X и Y на две части одного шага итерации. Этот метод превосходит другие методы конечных разностей из-за его быстрой сходимости. Метод ADI также обеспечивает все константы распространения и собственные функции моды.

В третьей главе «Экспериментальная часть» проведен анализ зависимости выходных параметров планарного сплиттера от его геометрических значений и размеров световодов.

Исследуемый планарный оптический сплиттер состоит из кварцевой подложки, представляющей из себя отражающий слой-оболочку из кварцевого стекла и отражающий слой, представляющий из себя систему световодов. Особое внимание было уделено показателям преломления этих слоев – установлены показатели преломления сердцевины световодов $n_c=1,456$ и оболочки, $n_o=1,445$ со стандартным показателем преломления $\Delta n=0,75\%$. Размеры сердцевины световодов устанавливались равными 6×6 мкм² и $5,5\times 5,5$ мкм².

Планарный оптический сплиттер был смоделирован при помощи специализированной программной среды OptiBPM Designer. В данной программном комплексе имитация распределения электромагнитного излучения оптического диапазона в конструируемых системах основывается на методе распространения луча (Beam Propagation Method, BPM), имитирующем прохождение света через любую волноводную среду, как изотропную, так и анизотропную. Данный метод, как и метод конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD), обеспечивает численное решение уравнений Максвелла, используя конечные разности вместо частных производных. В связи с этим BPM требует больших вычислительных ресурсов, однако может обеспечить построение адекватных моделей для достаточно широкого ряда устройств.

При моделировании была использована структура планарного сплиттера 1×4 , построенная с использованием predefined формы «s-bend-arc», заложенной в OptiBPM. Выбор данной формы обоснован тем, что она обеспечивает наименьшие потери [3]. На рисунке 1 изображена структура построенного планарного сплиттера 1×8 . Из рисунка видно, что сплиттер состоит из линейного входного порта, представляющий из себя прямолинейный световод длиной 1000 мкм, восемь линейных выходов и семь узлов разветвлений, которые распределены по трем сегментам. Длина первого сегмента ветвления составляет 5000 мкм, второй сегмент ветвления удваивается и составляет 10000 мкм, третий сегмент ветвления также удваивается и составляет 20000 мкм. При построении разветвителя шаг между световодами в каждом слое автоматически удваивался, в первом слое он составил 120 мкм, во втором – 240 мкм, в третьем – 480 мкм. После третьего сегмента ветвления добавлен сегмент с прямолинейными световодами длиной 1000 мкм. Таким образом, длина построенного планарного сплиттера 1×8 составляет 37000 мкм, ширина 840 мкм. Имитационное моделирование процесса работы исследуемого планарного оптического сплиттера 1×8 проводилось на трех длинах волн: $\lambda=1550$ нм, 1310 нм, 850 нм.

В качестве параметров, оценивающих эффективность выполнения сплиттера, выступали: дисбаланс уровня мощности сигнала на выходах (IL_u), отношение мощности сигнал-шум (SNR) и вносимые потери (IL).

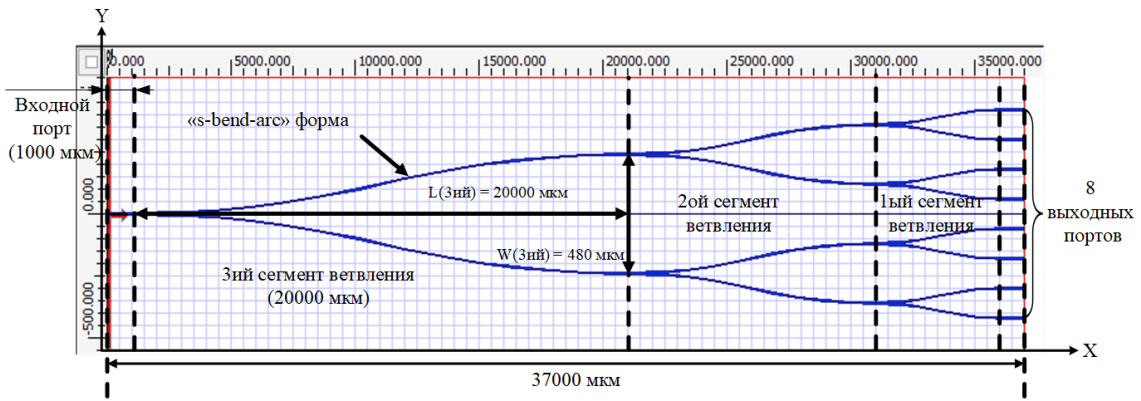


Рисунок 1 – Макет стандартного планарного сплиттера 1×8 с использованием инструмента OptiBPM

Дисбаланс мощности сигнала (Insertion Loss uniformity) – параметр, показывающий, на сколько отличаются уровни мощности сигналов на выходах сплиттера, уравнение:

$$ILu = 20 \log \left(\frac{E_{\min}}{E_1} \right) - 20 \log \left(\frac{E_{\max}}{E_1} \right), \quad (1)$$

где E_{\max} и E_{\min} – максимальное и минимальное значение напряженности электромагнитного излучения на выходах сплиттера соответственно;

E_1 – напряженность электромагнитного излучения на входе планарного сплиттера.

Отношение мощности полезного сигнала к мощности фонового шума (Signal to Background Noise Ratio) – параметр, характеризующий шум, который обусловлен выходом электромагнитного излучения из направляющей системы, измеренного по оси Y

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_S}{P_{BN}} \right), \quad (2)$$

где P_S – мощность полезного сигнала;

P_{BN} – энергия фонового шума.

Вносимые потери (Insertion Loss) – параметр, показывающий насколько уменьшилась мощность сигнала при его прохождении через сплиттер

$$IL = \left| 20 \log \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \right|, \quad (3)$$

где E_2 – напряженность электромагнитного излучения на выходе планарного сплиттера.

На входной порт подавался гауссов пучок единичной амплитуды с ТЕ поляризацией. На рисунке 2 представлены результаты распределения напряженности поля на выходных портах сплиттера при длине волны излучения $\lambda=1550$ нм. По оси Y было получено 5000 измеренных значений. На рисунке 3 представлен график распределения вносимых потерь на выходных портах сплиттера на длине волны 1550 нм.

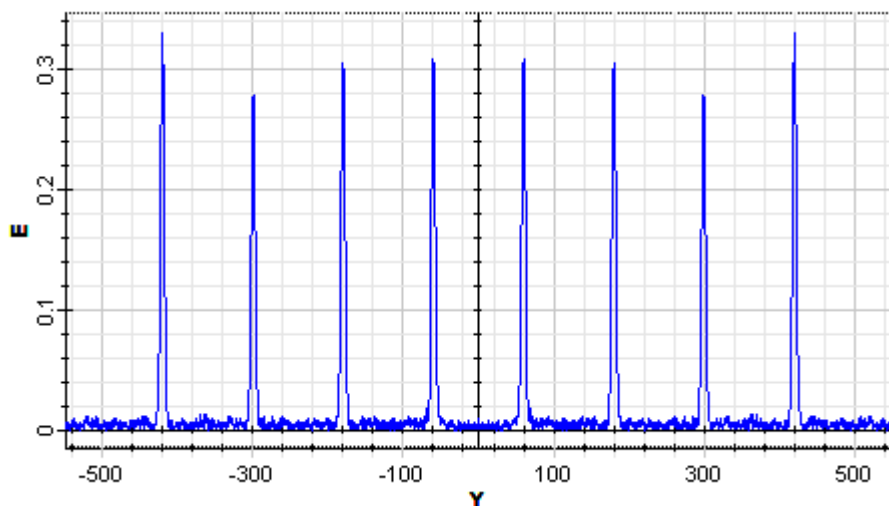


Рисунок 2 – Результаты распределения напряженности поля на выходных портах сплиттера 1×8 на длине волны 1550 нм с размером световодов 6×6 мкм²

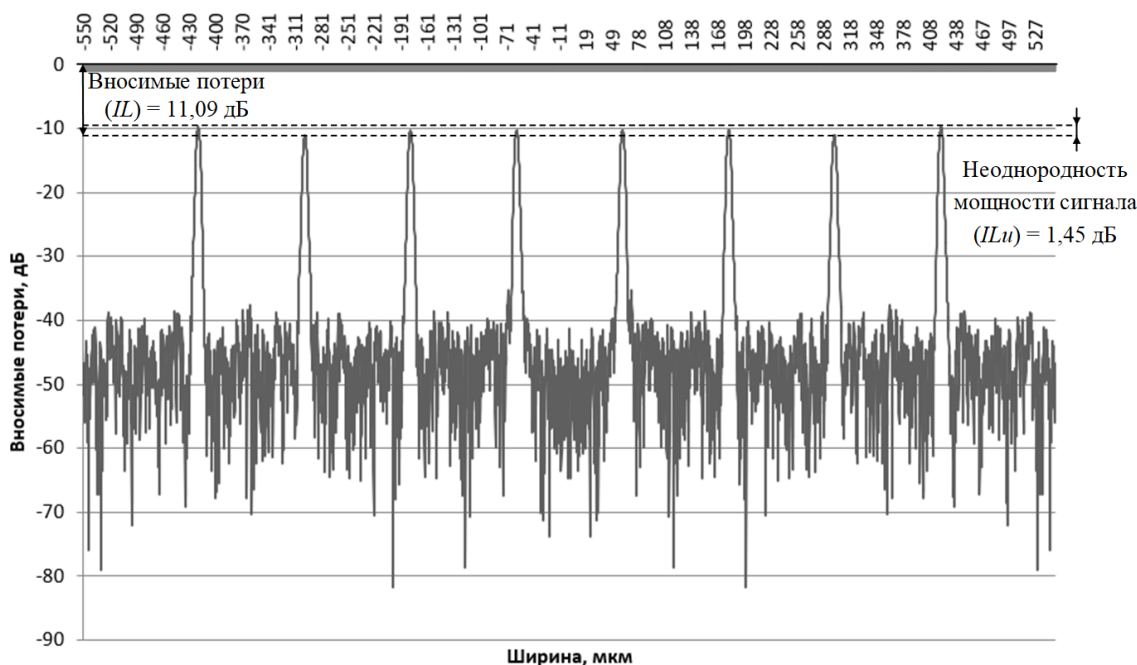


Рисунок 3 – Распределение вносимых потерь на выходных портах сплиттера 1×8 на длине волны 1550 нм с размером световодов 6×6 мкм²

Как видно из рисунка 3, дисбаланс мощности сигнала $ILu=1,45$ дБ и наибольшие вносимые потери $IL=11,09$ дБ. Отношение сигнал-шум составило $SNR=34,84$ дБ.

На рисунках 4, 5 представлены графики распределения вносимых потерь на выходных портах сплиттера при длине волны излучения 1310 и 850 нм.

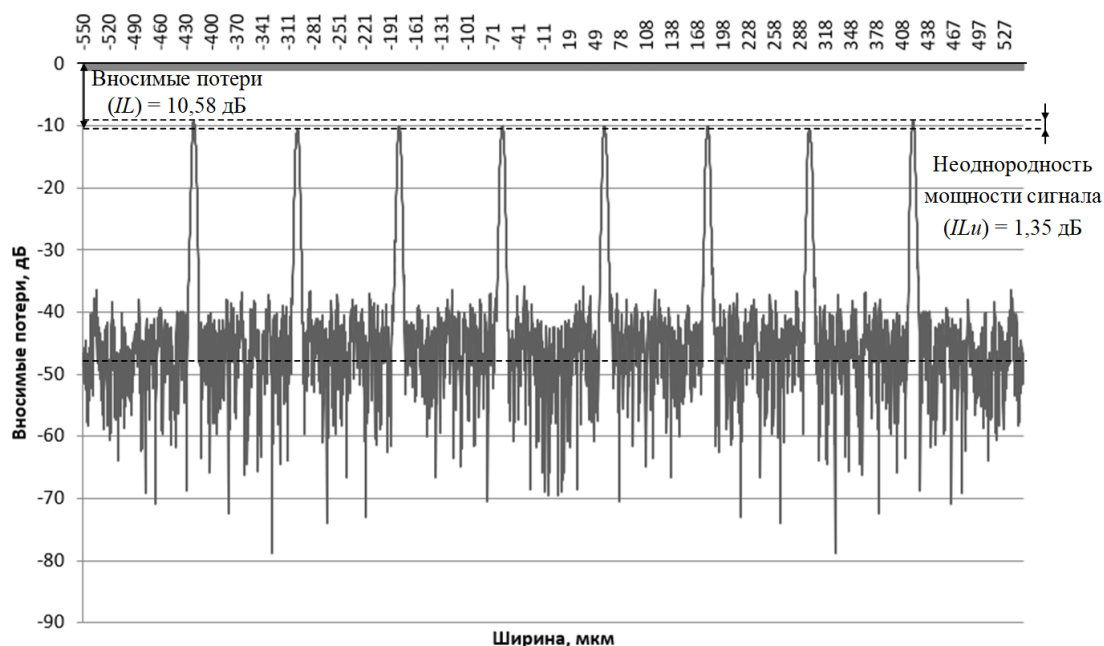


Рисунок 4 – Распределение вносимых потерь на выходных портах планарного сплиттера 1×8 на длине волны 1310 нм с размером световодов 6×6 мкм²

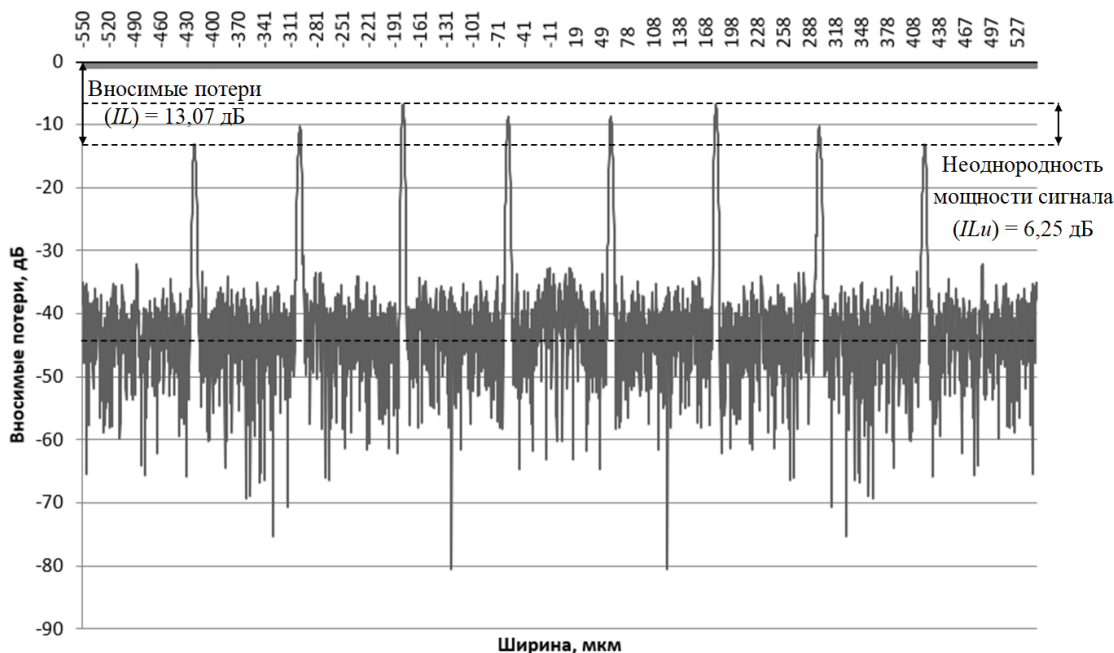


Рисунок 5 – Распределение вносимых потерь на выходных портах планарного сплиттера 1×8 на длине волны 850 нм с размером световодов 6×6 мкм²

Для исследования зависимости характеристик сплиттера на разных длинах волн на рисунках 6-14 представлены графики зависимости $SNR = f(\lambda)$,

$ILu = f(\lambda)$ $IL = f(\lambda)$ сплиттера с размером сердцевины световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² при различных значениях его длины.

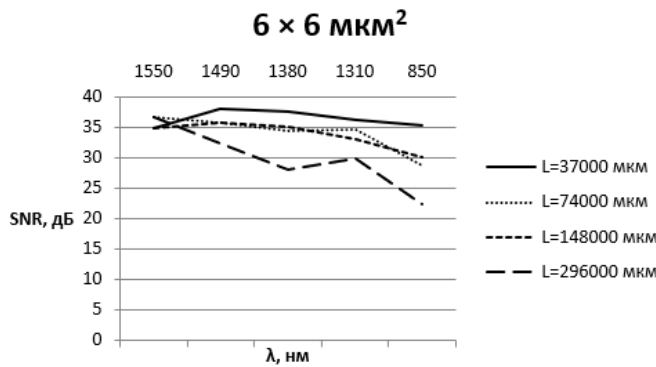


Рисунок 6 – $SNR = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов 6×6 мкм²

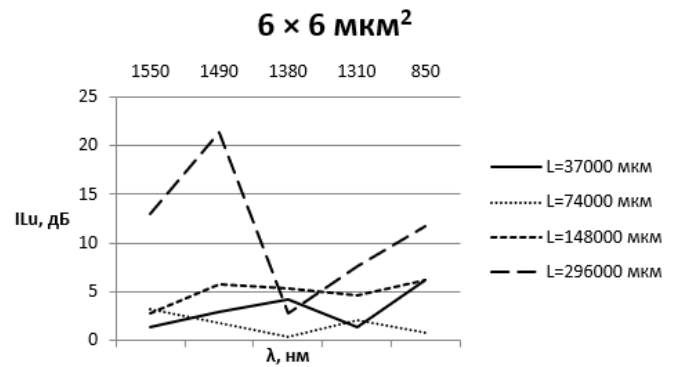


Рисунок 7 – $ILu = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов 6×6 мкм²

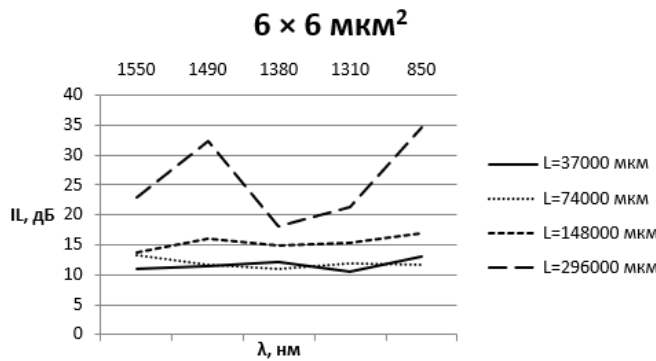


Рисунок 8 – $IL = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов 6×6 мкм²

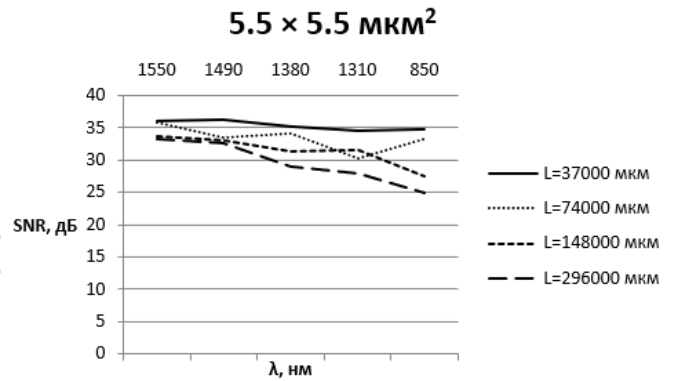


Рисунок 9 – $SNR = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов $5,5 \times 5,5$ мкм²

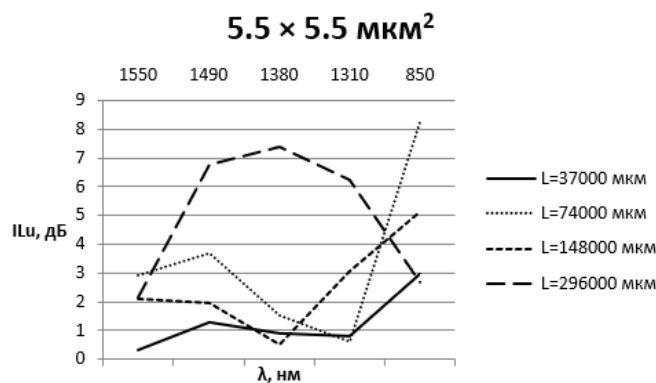


Рисунок 10 – Зависимость $ILu = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов $5,5 \times 5,5$ мкм²

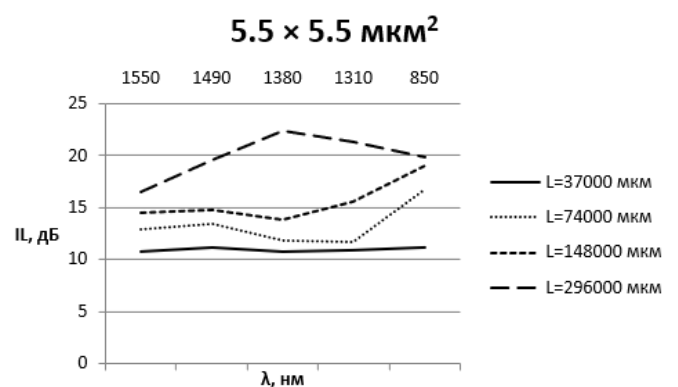


Рисунок 11 – Зависимость $IL = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов $5,5 \times 5,5$ мкм²

Как видно из рисунков 6-8, наибольшие значения отношения сигнал/шум и наименьшее значение вносимых потерь планарного сплиттера с сердцевинами световодов 6×6 мкм² оказываются при длине 37000 мкм. Среднее значение

параметра SNR составляет 35,48 дБ, при последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 33,35 дБ, 32,71 дБ, 29,68 дБ соответственно, среднее значение параметра IL составило 11,58 дБ, при последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составила 12,28 дБ, 15,32 дБ и 26,29 дБ соответственно. Наименьшее значение параметра ILu оказывается при длине сплиттера 74000 мкм, среднее значение составляет 11,58 дБ. Как видно из рисунков 9-11, при уменьшении размеров световодов до $5,5 \times 5,5$ мкм² наибольшее значение SNR так же оказалось при длине сплиттера 37000 мкм и в среднем составляет 33,15 дБ. Наименьшее значение IL и наименьшие вносимые потери оказываются при длине сплиттера 37000 мкм с средним результатом $IL=1,37$ дБ, $ILu=10,91$ дБ.

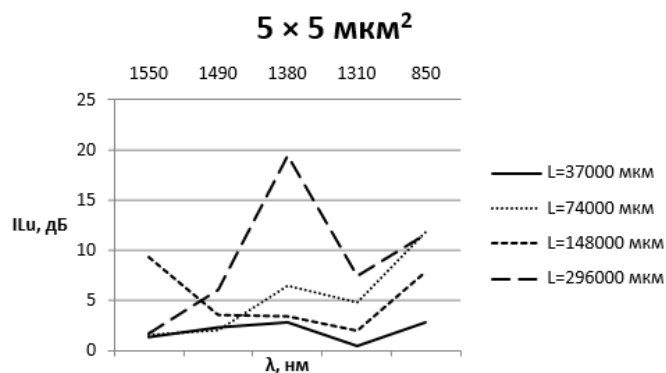
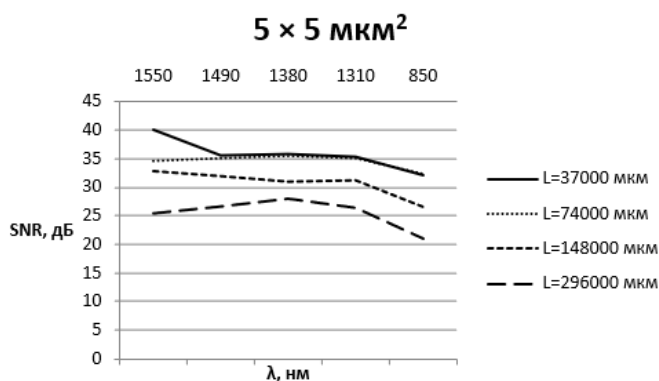


Рисунок 12 – Зависимость $SNR = f(\lambda)$, Рисунок 13 – Зависимость $ILu = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов 5×5 мкм²

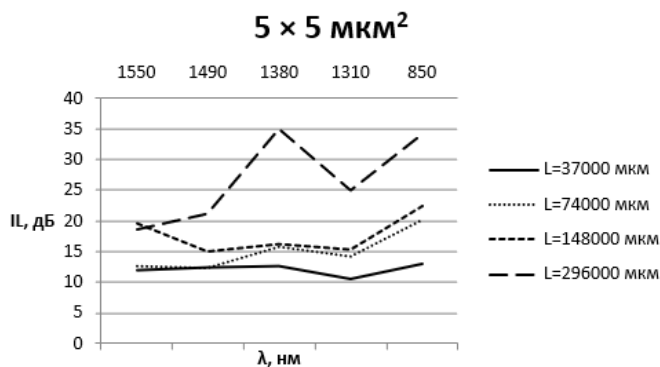


Рисунок 14 – Зависимость $IL = f(\lambda)$, размер сердцевины световодов 5×5 мкм²

Как видно из рисунков 12-14, наименьшие значения дисбаланса мощности сигнала и вносимых потерь планарного сплиттера с световодами 5×5 мкм² оказываются при длине 37000 мкм. При этом разница значений оказывается существенной. При длине 37000 мкм среднее значение параметра $ILu=1,54$ дБ, при последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 6,03 дБ, 6,36 дБ, 6,68 дБ соответственно. При длине 37000 мкм среднее значение параметра $IL=11,84$ дБ, при последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 15,67 дБ, 19,16 дБ и 25,95 дБ соответственно. Наибольшее значение отношения сигнал/шум наблюдается при

длине 37000 мкм и составляет в среднем 33,99 дБ, при других длинах сплиттера это значение отличается более чем на 2 дБ.

Точные значения всех параметров при других геометрических характеристиках рассматриваемого разветвителя представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Средние значения фонового шума, дисбаланса мощности сигнала и вносимые потери на измеряемых длинах волн при размерах световодов планарного сплиттера 6×6 мкм², 5,5×5,5 мкм² и 5×5 мкм² при изменении его геометрических параметров

Длина сплиттера, мкм	Ширина сплиттера, мкм	Ширина подложки, мкм	Размер световодов, мкм ²	Среднее значение отношения сигнал-шум (SNR), дБ	Среднее значение неравномерности вносимых потерь (ILu), дБ	Среднее значение вносимых потерь (IL), дБ
37000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
74000	840	1100	6×6	33,35	2,06	12,28
148000	840	1100	6×6	32,71	4,5	15,32
296000	840	1100	6×6	29,68	10,8	26,29
37000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
74000	840	1100	5,5×5,5	33,15	3,94	13,78
148000	840	1100	5,5×5,5	30,96	3,44	16,38
296000	840	1100	5,5×5,5	28,65	3,68	19,24
37000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
74000	840	1100	5×5	33,99	6,03	15,67
148000	840	1100	5×5	31,14	6,36	19,16
296000	840	1100	5×5	24,25	6,86	25,95
37000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
18500	840	1100	6×6	36,8	6,17	13,63
9250	840	1100	6×6	32,28	6,3	14,43
4625	840	1100	6×6	20,79	6,61	16,17
37000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
18500	840	1100	5,5×5,5	37,08	4,26	12,29
9250	840	1100	5,5×5,5	30,48	5,88	14,27
4625	840	1100	5,5×5,5	19,14	5,94	16,25
37000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
18500	840	1100	5×5	34,53	3,54	11,63
9250	840	1100	5×5	28,48	3,01	12,14
4625	840	1100	5×5	29,37	3,45	13,32
37000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
37000	1680	2200	6×6	28,82	4,99	15,54
37000	3360	4400	6×6	-	-	-
37000	6720	8800	6×6	-	-	-
37000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
37000	1680	2200	5,5×5,5	28,99	3,08	14,26
37000	3360	4400	5,5×5,5	-	-	-
37000	6720	8800	5,5×5,5	-	-	-
37000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
37000	1680	2200	5×5	28,87	5,3	16,53
37000	3360	4400	5×5	-	-	-
37000	6720	8800	5×5	-	-	-
37000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
37000	420	550	6×6	40,88	2,68	11,21
37000	210	275	6×6	44,83	1,39	10,27
37000	105	137,5	6×6	36,44	1,17	10,17
37000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
37000	420	550	5,5×5,5	40,09	1,44	10,73
37000	210	275	5,5×5,5	42,84	0,95	10,24
37000	105	137,5	5,5×5,5	37,35	1,04	10,24

Продолжение таблицы 1

Длина сплиттера, мкм	Ширина сплиттера, мкм	Ширина подложки, мкм	Размер световодов, мкм ²	Среднее значение отношения сигнал-шум (SNR), дБ	Среднее значение неравномерности вносимых потерь (I_{Lu}), дБ	Среднее значение вносимых потерь (I_L), дБ
37000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
37000	420	550	5×5	40,27	2,59	11,58
37000	210	275	5×5	41,67	0,52	10,16
37000	105	137,5	5×5	36,14	0,56	9,87
37000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
74000	1680	2200	6×6	26,45	6,91	19,81
148000	3360	4400	6×6	-	-	-
296000	6720	8800	6×6	-	-	-
37000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
74000	1680	2200	5,5×5,5	27,77	8,53	22,19
148000	3360	4400	5,5×5,5	-	-	-
296000	6720	8800	5,5×5,5	-	-	-
37000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
74000	1680	2200	5×5	25,91	4,51	20,22
148000	3360	4400	5×5	-	-	-
296000	6720	8800	5×5	-	-	-
37000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
18500	420	550	6×6	40,02	1,98	10,82
9250	210	275	6×6	39,82	5,1	12,55
4625	105	137,5	6×6	25,66	4,72	12,11
37000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
18500	420	550	5,5×5,5	34,92	2,64	11,02
9250	210	275	5,5×5,5	32,11	2,07	10,38
4625	105	137,5	5,5×5,5	25,94	3,4	11,18
37000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
18500	420	550	5×5	37,8	2,74	11,51
9250	210	275	5×5	32,87	2,62	11,45
4625	105	137,5	5×5	24,03	4,18	12,65

В некоторых ячейках таблицы отсутствуют значения по причине того, что сигнал при измененных значениях геометрических параметров сплиттера выходит за пределы световодов и не регистрируется на его выходных портах.

Как видно из таблицы 1 по результатам проделанной работы можно заключить, что увеличение ширины и одновременное увеличение длины и ширины планарного сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм², 5,5×5,5 мкм² и 5×5 мкм² нецелесообразно, так как сигнал выходит за пределы световодов и распространяется по подложке сплиттера и на выходе его невозможно оценить. Увеличивать и уменьшать длину сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм², 5,5×5,5 мкм² и 5×5 мкм² также не имеет смысла, так как количество наилучших значений при сравнении показало стандартное значение длины 37000 мкм.

Уменьшение ширины планарного сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм² оказало положительные результаты на значение неравномерности вносимых потерь (I_{Lu}) и вносимых потерь (I_L), так, лучшие результаты показал сплиттер с шириной 137,5 мкм, при размерах световодов 5,5×5,5 мкм² и 5×5 мкм² лучшие результаты показал сплиттер с шириной 275 мкм.

Положительное влияние оказало совокупное уменьшение длины и ширины планарного сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм², так, сравнивая эффективность рассчитанных значений, лучшие геометрические параметры

оказались: длина 18500 мкм и ширина 550 мкм, уменьшая размер световодов до $5,5 \times 5,5$ мкм² и 5×5 мкм² лучшие выходные параметры показал стандартный сплиттер при длине 37000 и ширине 1100 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской диссертации получен результат исследования зависимости выходных параметров планарного сплиттера при изменении его геометрических параметров и размеров его световодов, получена сравнительная оценка эффективности принятых изменений.

Целью диссертации являлось исследование степени изменения параметров оптических планарных сплиттеров 1×8 с размерами световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² при изменении их геометрических размеров и размеров световодов путем имитационного моделирования с помощью специализированного программного обеспечения.

В ходе диссертационного исследования были выполнены поставленные задачи. Проведенный анализ публикаций по теме исследования позволил определить степень проработанности вопроса достижений в области параметров современных оптических сплиттеров, сложности их улучшения и анализ возможных путей для улучшения их эффективности работы. Изученные материалы отражают популярные направления развития исследований в данной области. Представленные достижения являются основополагающими в формировании выбора, в качестве объекта исследования, оптических разветвителей.

Для решения поставленных задач моделирования, расчета и оценки результатов использовалось программное обеспечение OptiBPM от компании Optiwave. Данный инструмент обеспечивает все необходимые требования при проектировании и симуляции работы различных оптических систем, построенных пользователем. Так же он позволяет тонко настраивать необходимые параметры световодной структуры применяя пользовательские значения к каждому элементу устройства. OptiBPM позволяет оценить уровень сигнала и наглядно продемонстрировать как распространяется свет в любой точке световодной системы. В мануале к данному программному обеспечению приводятся все формулы ко всем алгоритмам распространения света, каждый из которых пользователь может настроить самостоятельно. Описан математический аппарат расчета методов распространения света по световодным структурам в программном обеспечении OptiBPM.

В ходе проведения исследования в программном пакете OptiBPM была собрана экспериментальная модель пассивного планарного сплиттера с древовидной Y-структурой 1×8 . Его структура состоит из двух основных компонентов: кварцевой подложки, представляющей из себя отражающий слой-оболочку из кварцевого стекла и отражающий слой, представляющий из себя систему световодов – «дорожек». Система световодов представляла из себя линейный входной порт, установленный на 1000 мкм, 8 линейных выходов и 7 ветвей, которые были распределены на 3 слоя. Особое внимание было уделено показателям преломления этих слоев. Впоследствии были установлены

показатели преломления сердцевины световодов $n_c=1,456$ и оболочки, $n_o=1,445$ со стандартным показателем преломления $\Delta n=0,75\%$. Размеры сердцевины световодов устанавливались на 6×6 мкм², $5,5\times 5,5$ мкм² и 5×5 мкм². Структуры моделировались при длине волны $\lambda=1550$ нм, 1310 нм, 850 нм. Общая длина разделителя достигла 37000 мкм и ширина 840 мкм.

В ходе выполнения диссертационной работы был проведен анализ отечественных и зарубежных публикаций на глубину проработанности проблемы темы диссертационного исследования. Получены результаты, что данное направление является актуальным, исследований в данной области в отечественных публикациях недостаточно.

В анализе литературы не было уделено должного внимания исследованию характеристик сплиттера в случае комплексного изменения его геометрических размеров и размеров световодов, что являлось основной темой исследования в диссертации.

Для проведения моделирования и симуляции работы оптических планарных сплиттеров была выбрана программа OptiBPM от компании Optiwave.

Данная программа была выбрана благодаря ее преимуществам:

- наблюдение распространения луча в реальном времени по всей световодной структуре;
- множество параметров настройки подаваемого излучения;
- зарубежные исследования на тему планарных сплиттеров проводилось именно в этом программном обеспечении;
- возможность оценить световой сигнал в любой точке световодной структуры;
- построение графиков различных параметров, необходимых для исследования в данной диссертационной работе;
- построение графиков в двухмерном и трехмерном пространстве;
- задание сетки поля при симуляции, что дает более точные измерения светового потока;
- понятная документация программы с приведением и выводом формул для каждого способа распространения луча света;
- бесплатная лицензия с полным функционалом программы на 30 дней, без нужды регистрироваться на официальном сайте.

Анализ и выводы данной диссертационной работы возможно использовать для последующих научных исследований в данной области и для изготовления современных пассивных оптических планарных разделителей с древовидной Y-структурой. И применять их для построения пассивных оптических сетей, что очень будет полезно при построении сетей с ограниченным бюджетом по мощности излучения.

Научная новизна работы заключается в оценке эффективности выходных параметров при изменении геометрических размеров планарных делителей с древовидной Y-структурой и при изменении размеров их световодов.

Практическая значимость заключается в анализе возможности улучшения параметров планарного сплиттера: вносимых потерь (IL), неравномерности (ILu), отношения сигнал/шум (SNR) при изменении его геометрических размеров и при изменении размера диаметра световодов с 6×6 мкм² до $5,5\times 5,5$ мкм² и 5×5 мкм².

Улучшение параметров разветвителей имеет практическую значимость в рамках построения эффективных волоконно-оптических пассивных сетей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня РИНЦ

1 Насибулин Е.А. Анализ параметров современных оптических сплиттеров пассивных оптических сетей / Е.А. Насибулин, Д.В. Кусайкин // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Часть I. – Ростов-на-Дону, 2019. – С.213-217.

Научные статьи, опубликованные в изданиях УрТИСИ СибГУТИ

1 Насибулин Е.А. Сравнение оптических свойств 1×8 разветвителей на основе Y-ветви и MMI // Формирование профессиональных компетенций выпускников инфокоммуникационного вуза в соответствии с требованиями отраслевых стандартов и ФГОС 3++. – I этап – Екатеринбург, 2018.

2 Насибулин Е.А. Анализ параметров современных оптических сплиттеров пассивных оптических сетей / Е.А. Насибулин, Д.В. Кусайкин // Информационные технологии и когнитивная электросвязь. – Екатеринбург, 2019.

3 Насибулин Е.А. Исследование параметров современных оптических разделителей / Е.А. Насибулин, Р.Г. Новокшенова // Цифровая экономика: взгляд студенчества. – I этап – Екатеринбург, 2019.

Научные статьи на этапе рецензирования в журнале

1) Е.А. Насибулин Исследование параметров оптического планарного сплиттера 1×8 с древовидной структурой с размером световодов 6×6, 5,5×5,5 и 5×5 мкм² / Е.А. Насибулин, Д.В. Кусайкин // журнал «Прикладная фотоника», г. Пермь, 2020 г.;