

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Учебное пособие

МОСКВА
МФТИ
2023

УДК 535(075)
ББК 22.34я73
О60

Авторы: А. Ю. Игуменов, Е. В. Боголюбова, М. А. Горбашова, И. П. Чебыкин

Рецензенты:

Кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем
физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Кандидат технических наук, руководитель группы оптических
подсистем ООО «Т8 НТЦ» *И. И. Шихалиев*

Кандидат физико-математических наук, ведущий инженер научной группы ООО «Т8 НТЦ»
Р. Р. Убайдуллаев

**О60 Оптические волокна: физические основы и практические
применения : учебное пособие / А. Ю. Игуменов, Е. В. Боголюбова,
М. А. Горбашова, И. П. Чебыкин. – Москва : МФТИ, 2023. – 76 с.
ISBN 978-5-7417-0829-3**

Рассмотрены физические явления при распространении электромагнитного излучения в оптическом волокне, методы производства волокон, их практические применения. Приведено описание оптических волокон разных типов, а также подробно изложены волоконно-оптические усилители мощности. Особое внимание уделено современным разработкам в области волоконно-оптических датчиков. Авторы учебного пособия, помимо МФТИ, работают в компании Т8 – передовой российской компании, специализирующейся на производстве волоконно-оптического телекоммуникационного оборудования и строительстве протяженных линий связи.

Предназначено для преподавателей и студентов физических специальностей для углубленного изучения оптики в курсе общей физики.

Учебное издание

**Игуменов Александр Юрьевич
Боголюбова Елена Владимировна
Горбашова Мария Андреевна
Чебыкин Иван Павлович**

**ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА:
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

Редактор *Н. Е. Кобзева*. Корректор *И. А. Волкова*. Компьютерная верстка *Н. Е. Кобзева*
Дизайн обложки *Е. А. Казёнова*

Подписано в печать 04.05.2023. Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 4,8.
Уч.-изд. л. 3,9. Тираж 30 экз. Заказ № 81.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Тел. (495) 408-58-22, e-mail: rio@mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Тел. (495) 408-84-30, e-mail: polygraph@mipt.ru

ISBN 978-5-7417-0829-3

- © Игуменов А. Ю., Боголюбова Е. В.,
Горбашова М. А., Чебыкин И. П., 2023
- © Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)», 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ..	6
1.1. Принцип работы оптического волокна	6
1.1.1. Распространение излучения в волокне	6
1.1.2. Понятие моды.....	7
1.1.3. Методы изготовления волокна	8
1.2. Типы оптических волокон	11
1.2.1. Многомодовые волокна.....	11
1.2.2. Одномодовые волокна	11
1.2.3. Фотонно-кристаллические волокна.....	13
1.3. Затухание сигнала в оптоволокне	15
1.3.1. Механизмы затухания.....	15
1.3.2. Потери оптической мощности на изгибах	18
1.3.3. Потери оптической мощности на соединениях	20
1.4. Дисперсия.....	22
1.4.1. Межмодовая дисперсия	22
1.4.2. Хроматическая дисперсия	23
1.4.3. Поляризационная модовая дисперсия	23
1.5. Нелинейные эффекты в волокне	24
1.6. Применение оптических волокон в телекоммуникациях	27
РАЗДЕЛ 2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ.....	29
2.1. Основные характеристики линии связи	30
2.1.1. Оптическое отношение сигнал–шум.....	30
2.1.2. Методика измерения OSNR	31
2.2. Эрбиевые волоконные усилители	32
2.2.1. Спонтанные и вынужденные переходы. Механизм усиления света в эрбиевом волокне	33
2.2.2. Простейший эрбиевый усилитель. Коэффициент усиления	34
2.2.3. Шумы и шум-фактор эрбиевого усилителя	37
2.2.4. Недостатки простейшей конфигурации эрбиевого усилителя.	39
2.2.5. Усилитель с постоянным коэффициентом усиления	40
2.2.6. Усилитель с переменным коэффициентом усиления	42

2.3. Рамановские волоконные усилители.....	42
2.3.1. Рассеяние излучения в веществе	43
2.3.2. Спектр рамановского усиления	44
2.3.3. Характеристики рамановского усилителя	45
2.4. Волоконные лазеры	45
2.4.1. Лазеры высокой мощности	47
2.4.2. Применение волоконных лазеров в медицине	47
РАЗДЕЛ 3. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ.....	48
3.1. Датчики на основе многомодовых волокон	49
3.1.1. Введение	49
3.1.2. Общий принцип волоконных ММІ устройств	52
3.1.3. Спектральные свойства волоконных ММІ устройств	53
3.1.4. Датчик показателя преломления, температуры, смещения, механического напряжения	54
3.1.5. Механические оптоволоконные датчики	56
3.1.6. Электромагнитные оптоволоконные датчики	59
3.1.7. Химические датчики	61
3.1.8. Новые тренды в датчиках на основе ММІ.....	63
3.2. Распределенные акустические датчики	65
3.2.1. Когерентный рефлектометр (Дунай Т8)	65
3.3. Оптические датчики на основе анализа спекл-картин	67
3.3.1. Введение	67
3.3.2. Голографический виброметр.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
Список литературы	74

ВВЕДЕНИЕ

Оптическое волокно представляет собой диэлектрическую нитевидную конструкцию, состоящую из сердцевины и оболочки с различными показателями преломления, покрытую защитным акрилатным слоем. Показатель преломления сердцевины больше, чем оболочки, что обеспечивает эффект полного внутреннего отражения и возможность передачи электромагнитного излучения по волокну.

Активное использование оптических волокон началось с 80-х годов XX века преимущественно для передачи информации. Разработка эрбиевых оптических усилителей и технологии плотного волнового мультиплексирования (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) привела к тому, что в настоящее время основная доля магистральных сетей передачи данных построена по технологии волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Скорость передачи данных в магистральных линиях связи достигает 800 Гбит/с, а в лабораторных экспериментах удастся получить сотни Тбит/с.

Помимо телекоммуникаций, оптические волокна широко применяются для разработки датчиков различных параметров. Датчики на основе комбинаций одномодовых и многомодовых волокон открывают возможности измерения *механических переменных*, таких как вибрация и давление; *электромагнитных переменных*, таких как напряжение, электрический ток и магнитное поле; *химических переменных*, таких как относительная влажность и концентрация газа; и *оптических переменных*, таких как длина волны. Распределенные датчики на основе фазово-чувствительного рефлектометра позволяют измерять температуру и вибрацию, используя стандартное одномодовое волокно.

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

1.1. Принцип работы оптического волокна

1.1.1. Распространение излучения в волокне

Оптическое волокно представляет собой тонкую диэлектрическую нить, диаметр которой сравним с толщиной человеческого волоса (порядка 100 мкм). Волокно состоит из двух основных частей: сердцевины и оболочки. Показатель преломления сердцевины всегда делают немного больше, чем оболочки. Другими словами, сердцевина является более оптически плотной средой для электромагнитного излучения. Добиваются такого эффекта при помощи легирования, то есть добавления примесей к основному веществу.

Как и все электромагнитные эффекты, распространение оптического излучения в волокне подчиняется уравнениям Максвелла [1]:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0,\end{aligned}\tag{1.1}$$

где $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного поля, а $\mathbf{D}$ и $\mathbf{B}$ – векторы электрической и магнитной индукции; $\mathbf{j}$ – плотность электрического тока (плотность тока проводимости), ρ – объемная плотность стороннего электрического заряда. Уравнения Максвелла могут быть использованы для получения волнового уравнения, которое описывает распространение света в оптических волокнах:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2},\tag{1.2}$$

где c – скорость света в вакууме, использовано соотношение $\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$.

Для решения этого уравнения необходимо знать соотношение между вектором поляризации и напряженности электрического поля. В общем случае определение вектора поляризации требует квантово-механического

подхода, особенно когда оптическая частота близка к частоте резонанса среды; в остальных случаях можно использовать феноменологическую формулу

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \left(\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \right), \quad (1.3)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\chi^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots$) – тензор ранга $j+1$, который описывает восприимчивость j -го порядка. В случае волоконной оптики и длин волн в диапазоне 0,5–2 мкм эта формула применима.

Упрощенное представление распространения излучения в оптоволокне дает геометрическая оптика: согласно закону Снеллиуса, лучи, попадающие в сердцевину, будут покидать ее под разными углами – в зависимости от угла падения. Так как показатель преломления сердцевины больше, чем оболочки, начиная с некоторого угла падения, свет вообще не будет преломляться и все падающее излучение будет отражаться от границы раздела среды сердцевина-оболочка – эффект полного внутреннего отражения. Именно этот эффект обеспечивает локализацию света в оптоволокне.

1.1.2. Понятие моды

В приближении геометрической оптики траектории распространения света в оптоволокне можно представить как различные ломаные линии. Лучевая трактовка дает только качественные представления о характере распространения света в волокне. Для количественного описания необходимо использовать волновой подход, учитывающий интерференцию и дифракцию света. В рамках волнового приближения показано, что в волокнах могут распространяться только волновые структуры с определенным распределением амплитуды в поперечном сечении волновода. Такие волновые структуры называются *модами распространения*. Распределения амплитуды вектора напряженности электрического поля в поперечном сечении волокна для различных мод волокна со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП) приведены на рис. 1.1.

Разные цвета обозначают разные знаки проекции напряженности электрического поля. Стоит отметить, что разные моды распространяются по оптоволокну с различными скоростями (межмодовая дисперсия будет рассмотрена дальше), кроме того, они могут оказывать воздействие друг на друга на пути распространения. Моды нулевого азимутального порядка обозначены LP_{0i} , моды первого азимутального порядка – LP_{1i} , в волокнах со ступенчатым PPP могут распространяться моды и с более высоким азимутальным порядком.

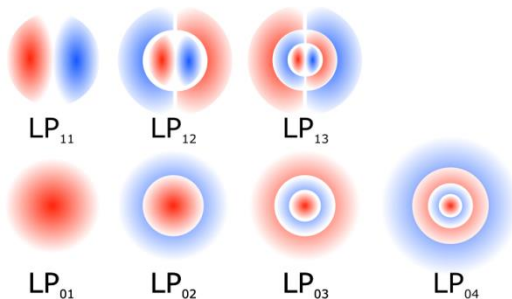


Рис. 1.1. Распределения амплитуды вектора напряженности электрического поля в поперечном сечении волокна для различных мод волокна со ступенчатым профилем показателя преломления

1.1.3. Методы изготовления волокна

На сегодняшний день существует большое количество методов изготовления оптических волокон. В первом приближении все их можно разделить на методы, использующие так называемую *волоконную заготовку*, и *методы прямого производства*. Методы, использующие заготовки, наиболее важны для производства стекловолокон (в основном волокна на кварцевой основе). Методы прямого изготовления распространены при производстве волокон на основе пластика и некоторых специфических стекловолокон. Далее, коротко будет описан процесс изготовления волокон из заготовок, способы производства самих заготовок, а также метод прямого изготовления оптоволокон.

Вытягивание волокон из заготовки

Чаще всего стекловолоконна изготавливаются путем вытягивания из заготовок в волоконно-вытяжной башне (рис. 1.2), которая представляет собой устройство высотой в несколько метров. В качестве заготовки используется стержень с диаметром 1–10 см и длиной порядка 1–2 м. Вдоль оси заготовка содержит область с повышенным показателем преломления, которая будет формировать сердцевину волокна.

Заготовка нагревается в печи в верхней части башни. В результате нагрева она становится мягче и появляется возможность протаскивать уже более тонкое волокно, которое затем затвердевает в охлаждающей камере. Далее полученное волокно наматывается на катушку при помощи специальной перемоточной машины. В процессе вытяжки диаметр волокна поддерживается постоянным путем автоматической подстройки скорости вытягивания (и в некоторых установках температуры печи) системой обратной связи. Это также приводит к сохранению постоянного диаметра сердцевины. Перед намоткой на волокно обычно наносят тонкое поли-

мерное покрытие для механической и химической защиты. Для этого волокно подается в аппарат для нанесения покрытия и затем в печь или ультрафиолетовый облучатель для затвердевания покрытия. При использовании нескольких таких систем на волокно будет нанесено несколько защитных слоев. Например, для защиты телекоммуникационных волокон чаще всего используют два или более покрытия. Типичными материалами, используемыми для покрытия, являются акрилат, кремний и полиимид. Для специальных применений наносят также углеродные и металлические покрытия. Одна заготовка может быть использована для вытягивания многих километров волокна. В частности, для телекоммуникаций необходимы волокна большой длины. Скорость вытягивания в промышленных башнях может превышать 20 м/с. Более простые установки, используемые для небольших объемов производства, могут использовать скорость порядка 1 м/с, что существенно сокращает его объемы. Вытягивание волокна из заготовки является эффективным методом производства волокон на основе кварца (диоксид кремния, SiO_2), поскольку кварц обладает широким диапазоном температур, при которых вязкость находится в подходящем диапазоне.

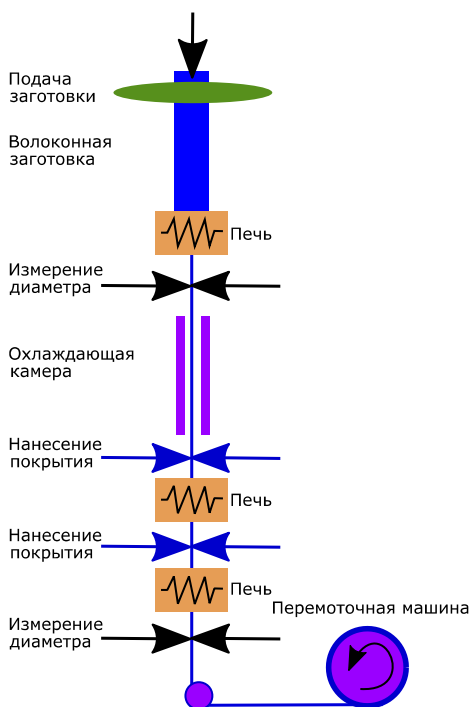


Рис. 1.2. Схема волоконно-вытяжной башни

Методы изготовления заготовок

Часто для производства волоконных заготовок используется метод, называемый *осаждением из газовой фазы* (Vapor-phase Deposition, VPD). Концепция метода заключается в следующем: подложка помещается в пары одного или нескольких веществ, которые, вступая в реакцию и/или разлагаясь, производят на поверхности подложки необходимое вещество. Для изготовления кварцевых волокон могут использоваться кислород, тетрахлорид кремния (SiCl_4), тетрахлорид германия (GeCl_4) и различные редкоземельные элементы. Химические реакции в газе приводят к осаждению мелкой «сажи». На практике стержни изготавливаются различными методами. Ниже описаны некоторые из них [1].

1. *Внутреннее осаждение из газовой фазы* (Inside Vapor Deposition, IVD). Осаждение материала происходит внутри вращающейся трубки из кварцевого стекла, которая снаружи нагревается медленно движущейся газовой горелкой до температуры 1600 °С. Горелка непрерывно перемещается вперед и назад по трубе. Ближе к окончанию процесса формирования стержня пополняются запасы газовой смеси для того, чтобы образовался слой с более высоким показателем преломления – предшественник сердцевины. При нагревании до 2000 °С трубка разрушается.

2. *Наружное осаждение из газовой фазы* (Outside Vapor Deposition, OVD). Осаждение происходит на поверхности некоторого стержня. Вместе с компонентами стержня, такими как SiCl_4 , в камеру, внутри которой происходит осаждение, помещаются водород, метан и/или другие газы. Горелка перемещается вдоль вращающегося стержня. В процессе осаждения диаметр образца увеличивается. Далее исходный стержень удаляется и полученный образец «уплотняется» при температуре 1800 °С в печи.

3. *Осевое осаждение из газовой фазы* (Vapor Phase Axial Deposition, VAD или AVD). Осаждение происходит на конце стержня. Стержень непрерывно удаляется от горелки (рост происходит в направлении оси стержня). Важным отличием от ранее описанных методов является то, что профиль показателя преломления будет определяться геометрией горелки, а не изменением газовой смеси с течением времени.

Довольно необычным способом изготовления заготовок является 3D-печать. Использование данного подхода к изготовлению заготовок было продемонстрировано на халькогенидном стекле.

Изготовление волокон без использования заготовок

Для изготовления волокон без использования заготовки может применяться метод осаждения из жидкости. В этом методе используется резервуар, разделенный на две части – внутреннюю и внешнюю. Во внутреннюю часть помещается расплавленный материал, который впоследствии будет использован для изготовления сердцевины, во внешнюю

часть – материал для оболочки. Проходя через отверстия нужного диаметра, на выходе из резервуара будет сформировано оптоволокно. Данный метод был разработан раньше, чем описанный метод осаждения из газовой фазы. Его легче адаптировать к различным материалам. Однако он не подходит для производства сверхчистых волокон с низкими потерями, так как достаточно сложно избежать загрязнения расплавленного материала.

1.2. Типы оптических волокон

1.2.1. Многомодовые волокна

Многомодовыми называют волокна, в которых может распространяться более одной моды. С самого начала было понятно, что в многомодовых (Multi Mode, MM) волокнах потери больше, а полоса пропускания меньше, чем в одномодовых (Single Mode, SM). Тем не менее в линиях связи первыми (1970 г.) начали применяться MM-волокна. Объясняется это тем, что они обладают большей апертурой и большим диаметром сердцевины, поэтому соединять их между собой и с источником излучения проще. По этой причине многомодовые волокна до сих пор используются при передаче сигнала на короткие расстояния до 2–3 км. В качестве источника излучения для MM-волокон сначала применялись светодиоды (промышленных лазеров на нужных длинах волн ~ 850 нм еще не было), в настоящее время используются диодные лазеры. Первые MM-волокна имели ступенчатый профиль показателя преломления и поэтому обладали большой межмодовой дисперсией. В дальнейшем стали применяться градиентные волокна (Gradient-index Fiber, GF) (рис. 1.11). Вначале использовались GF-волокна с диаметром сердцевины 50 мкм. Затем все больше стали применяться волокна с сердцевиной 62,5 мкм [1].

1.2.2. Одномодовые волокна

Одномодовыми называют волокна, изготовленные таким образом, чтобы в них могла распространяться только одна мода (LP_{01}). Одномодовые волокна (Single Mode Fiber, SMF) обычно имеют сердцевину относительно маленьких размеров (~ 10 мкм) и небольшую разницу в показателях преломления между сердцевиной и оболочкой. Радиус моды обычно составляет несколько микрон. Основным преимуществом одномодовых волокон перед многомодовыми является отсутствие межмодовой дисперсии. Ее отсутствие позволяет существенно увеличить дальность передачи сигнала. С 1980 г. в линиях дальней связи применяются исключительно одномодовые волокна. К тому времени появились промышленные полу-

проводниковые лазеры, работающие вблизи второго окна прозрачности (1300 нм), и была отработана технология соединения SM-волокон. Это привело к созданию стандарта G.652, описывающего стандартные одномодовые волокна (Standard SMF, SSMF), оптимизированные для передачи одного канала на длине волны 1310 нм. Волокна G.652 и на сегодняшний день остаются основным типом волокон в наземных линиях связи. Они обладают малыми потерями ($\sim 0,35$ дБ на длине волны 1310 нм), наиболее совершенными геометрическими характеристиками и стабильным диаметром модового пятна, что позволяет соединять их между собой с минимальными потерями. Хроматическая дисперсия на длине волны 1310 нм в этих волокнах равна нулю. Реализовано это за счет подбора геометрии волокна таким образом, чтобы волноводная дисперсия целиком компенсировала материальную. Развитие лазеров на длине волны 1550 нм способствовало переходу рабочего диапазона волоконных систем в третье окно прозрачности. Потери волокна G.652 в данной спектральной области составляют 0,2 дБ. На данной длине волны SSMF волокна обладают большой хроматической дисперсией ($D \sim 16\text{--}17$ пс/нм·км), что существенно ограничивает длину передачи без компенсации дисперсии. Поэтому был разработан новый тип одномодовых волокон со смещенной нулевой дисперсией G.653 (Dispersion Shifted Fiber, DSF). В них длина волны нулевой дисперсии смещена на 1550 нм. В этом случае основным ограничивающим фактором по дальности передачи сигнала остаются потери в волокне. Проблемы с использованием DSF-волокон начинаются при передаче сигналов на нескольких длинах волн по одному волокну (системы со спектральным уплотнением, наиболее распространенные DWDM-системы, DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing). Вблизи длины волны нулевой дисперсии возникают сильные перекрестные помехи из-за эффекта четырехволнового смешения (Four Wave Mixing, FWM). При исследовании эффекта FWM выяснилось, что для его подавления достаточно, чтобы волокно обладало небольшой ненулевой дисперсией. Дисперсия приводит к нарушению фазового синхронизма смешиваемых волн и уменьшает эффективную длину взаимодействия волн. Поэтому специально для систем со спектральным уплотнением были созданы волокна G.655, которые обладают дисперсией 2–6 пс/нм·км в C-диапазоне (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF). Появление большей части типов оптических волокон было спровоцировано потребностью в развитии телекоммуникационной индустрии. На определенном этапе использование сложных форматов модуляции и совершенствование алгоритмов постобработки сигнала стало позволять аппаратно компенсировать накапливаемую в волокне дисперсию. Дисперсия перестала быть ограничивающим фактором в линии передачи, в то время как нелинейные эффекты продолжают вносить весомый вклад в ухудшение качества сиг-

нала. Поэтому в линиях связи на данный момент чаще всего применяются волокна SSMF стандарта G.652, дисперсия в которых минимизирует влияние FWM в сравнении с волокнами NZDSF. Совершенствование одномодовых волокон продолжается и в настоящее время. Разработаны волокна, малочувствительные к изгибу (G.657), а также волокно с сердцевинной из чистого кварца (Pure Silica Core Fiber, PSCF), обладающие потерями, близкими к теоретическому пределу ($< 0,15$ дБ). Существуют также волокна, позволяющие сохранять состояние поляризации за счет наведенного двулучепреломления РМ-волокна (Polarization-maintaining), активные волокна, легированные ионами редкоземельных металлов, фотонно-кристаллические оптические волокна, волокна с центрами рассеяния и так далее [1].

1.2.3. Фотонно-кристаллические волокна

Свет в фотонно-кристаллических волокнах (ФКВ) распространяется в периодическом массиве микроскопических отверстий для воздуха, которые проходят по всей длине волокна. Во многом благодаря своей способности преодолевать ограничения обычной волоконной оптики, например, позволяя направлять свет с малыми потерями в полую сердцевину, эти волокна находят множество важных технологических и научных применений для разных дисциплин [2, 3].

Правильно спроектированная дырчатая фотонно-кристаллическая оболочка, проходящая по всей длине волокна, может предотвратить утечку света из сердцевины. Таким образом, становится возможным преодолеть ограничения эффекта полного внутреннего отражения и удерживать свет в полую волоконной сердцевине, окруженной стеклом. В начале 1970-х годов было предложено создать цилиндрический брэгговский волновод, в котором кольца с высоким и низким коэффициентом преломления расположены вокруг центральной сердцевины. Недавно сообщалось об успешной версии этой структуры с твердотельной сердцевинной, изготовленной с использованием модифицированного химического осаждения из паровой фазы (MCVD). В настоящее время созданы волокна с полую сердцевинной.

На рис. 1.3 приведен набор оптических (ОМ) и сканирующих электронных (СЭМ) микрофотографий структур ФКВ [2]:

(А) СЭМ-изображение бесконечно одномодового твердотельного сердечника ФКВ.

(В) Оптическая картина в дальней зоне, создаваемая (А) при возбуждении красным и зеленым лазерным светом.

(С) СЭМ-изображение ФКВ со слабым двулучепреломлением.

(D) СЭМ-изображение небольшой (800 нм) сердцевинки ФКВ со сверхвысокой нелинейностью и нулевой хроматической дисперсией на длине волны 560 нм.

(E) СЭМ-изображение первой фотонной запрещенной зоны ФКВ, ее сердцевина образована дополнительным воздушным отверстием в графитовой решетке воздушных отверстий.

(F) Ближнепольное ОМ-изображение синей моды с шестью лепестками, которая появляется, когда (E) возбуждается белым светом.

(G) СЭМ полого волокна с фотонной запрещенной зоной.

(H) Ближнепольное ОМ-изображение красной моды в полом ФКВ (белый свет запускается в сердцевину).

(I) ОМ-изображение полого ФКВ с решеткой оболочки кагомэ, направляющей белый свет.

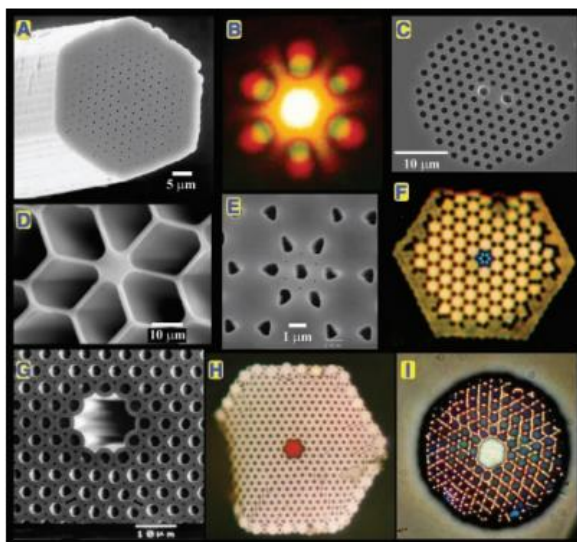


Рис. 1.3. Микрофотографии структур ФКВ, полученные на оптическом и электронном микроскопах [2]

Рассмотрим распространение излучения в ФКВ более подробно (рис. 1.4).

В представленном случае структура воздушных отверстий действует как «модальное сито». В (а) основная мода не может выйти, потому что не может поместиться в зазоры между воздушными отверстиями – ее эффективная длина волны в поперечной плоскости слишком велика. В (b) и (c) моды более высокого порядка могут высвечиваться перпендикулярно во-

локну, потому что их поперечная эффективная длина волны меньше. При увеличении диаметра воздушных отверстий зазоры между ними сокращаются, и в «сито» попадает все больше и больше мод высших порядков [2].

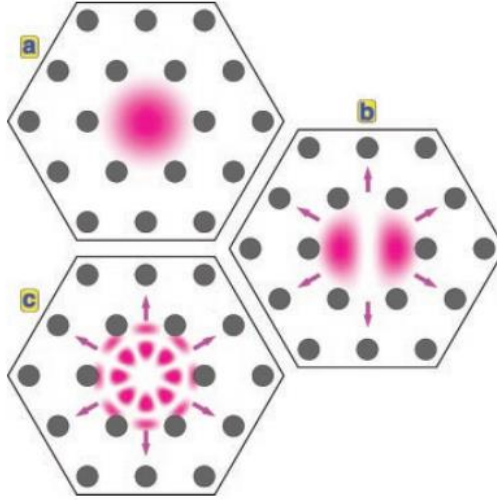


Рис. 1.4. Схема ФКВ с твердотельной сердцевинной [2]

1.3. Затухание сигнала в оптоволокне

Уменьшение средней мощности светового сигнала по мере распространения вдоль волновода называется *затуханием* (1.4) [1]:

$$dP/dz = -\alpha P \quad (1.4)$$

Инкремент затухания α [1/км] связан с коэффициентом затухания α [дБ/км] следующим выражением (1.5):

$$\alpha [\text{дБ/км}] = \frac{10}{L} \lg \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = 10\alpha [1/\text{км}] \lg(e) = 4,343\alpha [1/\text{км}]. \quad (1.5)$$

1.3.1. Механизмы затухания

Инкремент затухания α [дБ/км] может быть рассчитан как сумма инкрементов α_i [дБ/км], соответствующих различным эффектам (1.6) [1]:

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_{OH} + \alpha_{IR} + \alpha_{UV} + \alpha_m + \alpha_{IM}, \quad (1.6)$$

где α_R – потери из-за рэлеевского рассеяния света, α_{OH} – потери на поглощение ионами OH, α_{IR} – инфракрасное поглощение, α_{UV} – ультрафиолетовое поглощение кварца, α_m – потери на поглощение примесями (кроме OH), α_{IM} – потери на дефектах волокна (imperfection loss). В современных оптических волокнах основной вклад в затухание света вносят три механизма: рассеяние на неоднородностях волокна (рэлеевское рассеяние), инфракрасное поглощение, связанное с колебаниями молекул материала (SiO_2) и поглощение молекулами воды. *Примесное поглощение* – это поглощение фотонов, связанное с возбуждением электронных уровней частиц примеси. В первом поколении кварцевых волокон поглощение примесями ионов металлов переходной группы, таких как железо, медь, никель, марганец и хром, вызывало сильное поглощение на длинах волн в диапазоне 0,6–1,6 мкм. Однако в современных волокнах концентрация вредных примесей снижена настолько, что поглощением на них можно пренебречь. Основной поглощающей примесью в волокнах являются молекулы воды. При взаимодействии с матрицей кварца молекула воды диссоциирует с образованием ионов водорода и группы OH. Центральная длина волны колебательной полосы поглощения группы OH равна 2,73 мкм. Гармоники и комбинационные частоты с кварцевой матрицей вызывают поглощение на длинах волн 1,39, 1,24 и 0,95 мкм. Особенно сильным является пик поглощения на длине волны 1,39 мкм, разделяющий полосы прозрачности вблизи длин волн 1,3 мкм и 1,5 мкм. В настоящее время разработаны методы очистки, позволяющие практически избавиться от пика поглощения, связанного с примесью ионов OH, и получить монотонный спектр пропускания волокна. Как правило, для того чтобы получить волокно с низкими потерями, концентрацию ионов OH необходимо снизить до уровня 10^{-8} [1].

Спектр поглощения оптоволокна (рис. 1.5) принято разделять на несколько диапазонов (O, S, C, L).

В телекоммуникациях для распространения сигнала в настоящее время используется сигнал в C-диапазоне. Это связано с тем, что именно этот диапазон совпадает с рабочим диапазоном эрбиевых усилителей EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), использование которых позволяет существенно увеличивать дальность передачи оптического сигнала.

Существует также альтернативное деление оптического спектра на диапазоны – окна прозрачности. Деление на окна прозрачности обусловлено историей развития волоконно-оптических технологий в сфере телекоммуникаций. В 1970-х годах в качестве источника излучения использовались не лазеры, а обычные светодиоды с достаточно большим размером пучка. В качестве рабочих длин волн использовалась спектральная область вблизи 850 нм. Связано это было с широкой доступностью источников длин волн 800 нм и наличием локального минимума потерь на длине

волны 850 нм. Спектральный диапазон вблизи 850 нм принято называть первым окном прозрачности.

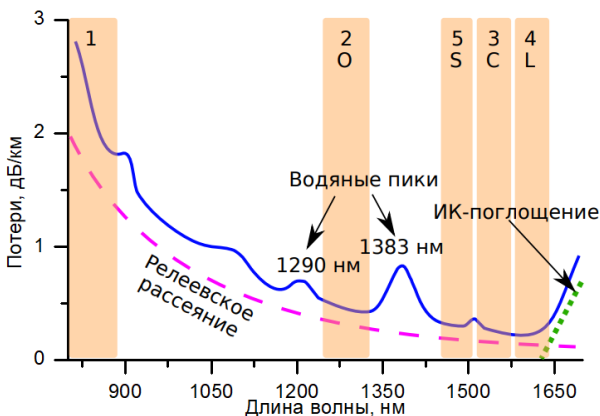


Рис. 1.5. Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых волокнах

Первыми в 1970 г. оптоволоконна удалось разработать американской компании Corning, их затухание составляло 20 дБ/км. Уже к 1972 г. затухание удалось уменьшить до 4 дБ/км. В 1976 г. японским ученым удалось разработать волокно с затуханием 0,5 дБ/км на длинах волн вблизи 1200 нм. С появлением промышленно доступных полупроводниковых лазеров на длине волны 1300 нм появилась потребность в создании волокна, приспособленного к передаче сигнала в спектральной области с более низкими потерями. Это привело к созданию волокна G.652 SSMF — оптимизированного для передачи одного канала на длине волны 1310 нм. При этом мы переходим к новому локальному минимуму погонных потерь — второму окну прозрачности. Показатель преломления сердцевинны в таких волокнах увеличивают, вводя примеси германия. На сегодняшний день волокно G.652 SSMF является самым распространенным и востребованным. С развитием лазеров на длине волны 1550 нм все системы перешли к работе вблизи следующего локального минимума потерь — третьего окна прозрачности, что позволило существенно увеличить дальность передачи сигнала. Потери стандартного одномодового волокна G.652 в данной спектральной области составляют 0,2 дБ. За последующие 30 лет удалось приблизиться вплотную к теоретическому пределу потерь (0,14 дБ/км) для кварцевого волокна и создать волокно с затуханием менее 0,15 дБ/км. Сердцевина в таких волокнах — это практически чистое кварцевое стекло, а показатель преломления оболочки уменьшают при помощи примесей.

1.3.2. Потери оптической мощности на изгибах

Еще одной причиной возникновения потерь в оптоволокне являются изгибы волокна. Величину потерь можно охарактеризовать величиной затухания на один виток. Потери на изгибе в линейных единицах прямо пропорциональны величине $\exp(-R/R_{Cr})$, R_{Cr} – критический радиус витка. Для одномодовых волокон $R_{Cr} = 0,2-0,4$ мм. Величина изгибных потерь сильно зависит от типа волокна [1].

Серьезной причиной потерь в волокне (особенно входящем в состав кабеля) является случайная осевая деформация, неизбежно возникающая при прокладке кабеля. Такие потери называются *потерями на микроизгибах* (рис. 1.6).

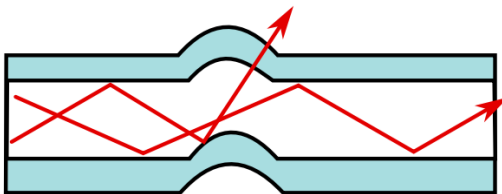


Рис. 1.6. Схема оптического волокна с микроизгибом

Микроизгибы приводят к увеличению потерь как в одномодовом, так и в многомодовом волокне, причем эти потери, если не принять мер по их уменьшению, могут быть исключительно велики (~ 100 дБ/км). Потери на микроизгибах в одномодовых волокнах можно свести к минимуму за счет особенностей изготовления. В этом случае большая часть мощности моды будет сосредоточена в сердцевине. Потери на макроизгибах (рис. 1.7) практически пренебрежимо малы в линиях дальней связи, но при прокладке в локальных сетях они могут стать значительными.

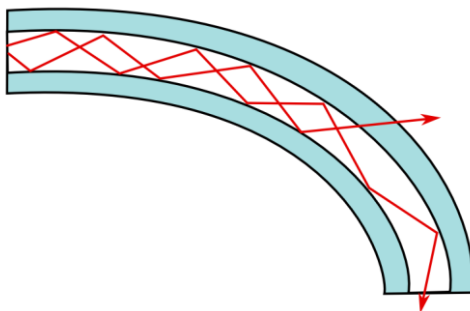


Рис. 1.7. Схема оптического волокна с макроизгибом

Наглядно критически быстрые изменения величины потерь от радиуса кривизны иллюстрирует рис. 1.8, на котором приведена зависимость коэффициента пропускания в линейных единицах от диаметра одиночной петельки в одномодовом волокне. При прокладке абонентских кабелей внутри помещений желательно иметь возможность изгибать волокно, практически не внося дополнительных потерь. Для этих применений были разработаны волокна с уменьшенной чувствительностью к изгибу (G.657), рис. 1.9.

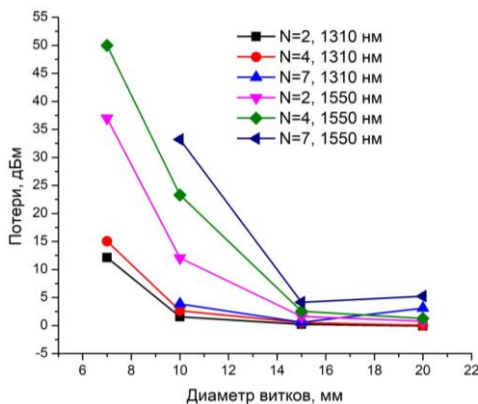


Рис. 1.8. Зависимость потерь мощности излучения, прошедшего через волокно, от диаметра изгиба и количества витков. Измерения проведены оптическим тестером при длинах волн 1310 и 1550 нм

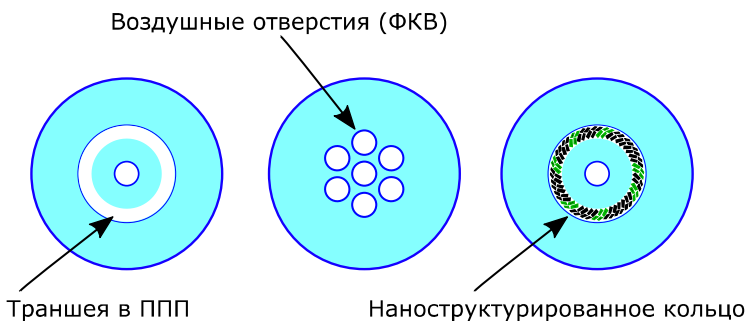


Рис. 1.9. Схематические сечения волокон с уменьшенной чувствительностью к изгибу

В этих типах волокон потери уменьшаются за счет уменьшения диаметра модового пятна и за счет ограничения поля кольцами с сильно

уменьшенным показателем преломления. На рис. 1.10 приведены изгибные потери в различных волокнах с малыми изгибными потерями.

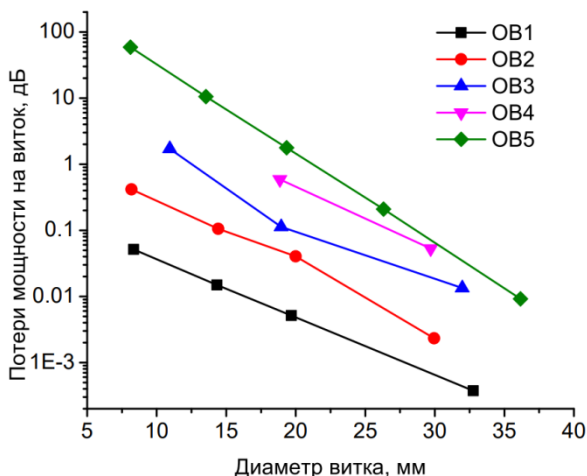


Рис. 1.10. Изгибные потери в волокнах с малыми изгибными потерями [1]

Обозначения на рис. 1.10:

OB1 – наноструктурированное волокно;

OB2 – траншея в профиле показателя преломления (ППП);

OB3 – малый диаметр модового пятна;

OB4 – депрессированная оболочка;

OB5 – SSMF.

Наноструктурированное волокно, как видно из рис. 1.10, более эффективно [1].

1.3.3. Потери оптической мощности на соединениях

Распределение интенсивности первой моды в поперечном сечении волокна хорошо описывается функцией Гаусса: $I(r) = I_0 \exp(-8r^2/w^2)$, где $w \sim 7\lambda$ – диаметр модового пятна. Таким образом, расчет потерь в месте соединения волокон сводится к задаче согласования гауссовых пучков. При соединении одномодовых волокон гауссовы пучки в первом приближении параллельны, и основной вклад в потери (A [дБ]) дает смещение сердцевин волокон и неравенство диаметров модовых пятен [1]:

$$A[\text{дБ}] \approx 4,34 \times \left(\left(\frac{2d}{w} \right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w} \right)^2 \right). \quad (1.7)$$

С помощью формулы (1.7) находим

а) потери из-за смещения сердцевин волокон: $\approx 0,17$ дБ ($d = 1$ мкм, $w = 10$ мкм);

б) потери из-за разности диаметров модовых пятен: $\approx 0,01$ дБ ($\Delta w = 0,5$ мкм, $w = 10$ мкм). Смещение сердцевин волокон (продольное и поперечное) применяется при создании аттенуаторов (ослабителей оптической мощности) с динамическим диапазоном 0–30 дБ и шагом 0.1–1 дБ [1].

Помимо механического соединения может также применяться сварка оптических волокон. Принцип сварки заключается в следующем: два оптических волокна без защитной оболочки сводятся вместе и сплавляются под воздействием нагрева. Для нагрева часто используется высоковольтный электрический разряд. Для того чтобы сварка прошла успешно должны выполняться следующие условия:

1. Волокна должны быть изготовлены на основе диоксида кремния (SiO_2). Технология сварки может оказаться неподходящей для всех остальных волокон.

2. Параметры сварки (в частности значение электрического тока, и время, в течение которого подается дуга) должны быть оптимизированы для данного типа волокна.

3. Волокна должны иметь одинаковые диаметры оболочки.

4. Защитное покрытие должно быть полностью удалено.

5. Концы волокон должны быть сколоты под углом 90° .

6. Сердцевины должны располагаться на одной оси.

7. Площади модового пятна в свариваемых волокнах должны совпадать.

Современные сварочные аппараты позволяют обеспечить выполнение всех условий, описанных выше, с высокой точностью. Это позволяет добиться высокого качества соединения с потерями менее 0,02 дБ на сварке. Обеспечивают такие низкие потери сварочные аппараты за счет ряда конструкторских особенностей:

1. Для фиксации волокон используются специально спроектированные зажимы.

2. Регулировка положения волокон производится при помощи микрометрических винтов.

3. Камеры, установленные внутри сварочного аппарата, позволяет выравнивать концы волокон и оценивать качество сварки.

4. Некоторые сварочные аппараты выполняют выравнивание автоматически на основе изображения с камеры и/или за счет контроля пропускной способности по оптической мощности (профиля показателя преломления).

5. Некоторые аппараты могут оценивать потери на сварке.

1.4. Дисперсия

Явление *дисперсии* заключается в уширении импульса конечной длительности вследствие того, что разные его компоненты распространяются с разной скоростью. При высокой частоте следования импульсов такое уширение на некотором расстоянии от передатчика приводит к перекрытию соседних импульсов во временном представлении. В данном разделе будут рассмотрены механизмы возникновения основных типов дисперсии: *межмодовой, хроматической и поляризационной модовой* [1].

Для описания распространения электромагнитной волны в среде используются групповая и фазовая скорости. Групповой скоростью называют скорость, с которой распространяется огибающая импульса. Она определяется как величина, обратная производной волнового числа по частоте (1.8):

$$V_g = \left(\frac{\partial k}{\partial \omega} \right)^{-1}. \quad (1.8)$$

Фазовая скорость – это скорость перемещения точки, обладающей постоянной фазой в среде вдоль заданного направления. Она связана с волновым числом и частотой следующим образом (1.9):

$$V_{ph} = \frac{\omega}{k}. \quad (1.9)$$

1.4.1. Межмодовая дисперсия

Межмодовая дисперсия возникает из-за различия групповых скоростей для различных мод. Степень межмодовой дисперсии оценивается при помощи параметра, называемого *дифференциальной модовой задержкой* DMD [пс/км] (Differential Mode Delay). DMD показывает временную задержку, возникающую между распространяющимися модами, при прохождении волокна длиной один километр. Данный параметр сильно зависит от профиля показателя преломления волокна. При ступенчатом профиле показателя преломления (рис. 1.11а, б) моды более высокого порядка имеют существенно меньшие групповые скорости, чем моды низкого порядка. Это приводит к возникновению групповых задержек ~10 нс/км. Уменьшить DMD позволяет использование волокон с параболическим профилем показателя преломления (рис. 1.11в).

Однако даже в этом случае DMD существенно ограничивает дальность передачи сигнала, поэтому чаще используются одномодовые волокна – волокна, в которых может распространяться только одна мода.

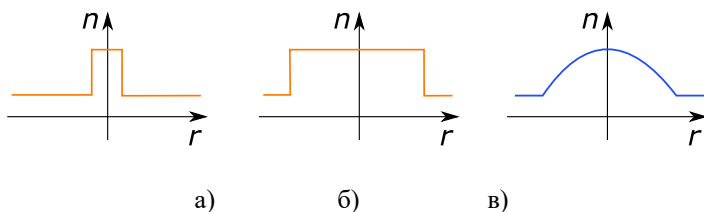


Рис. 1.11. Вариации профилей показателя преломления волокна: ступенчатый профиль для одномодового (а) и многомодового волокна; параболический профиль (б)

1.4.2. Хроматическая дисперсия

В многомодовом волокне преобладает межмодовая дисперсия, а в одномодовом волокне – хроматическая. *Хроматическая дисперсия* возникает из-за того, что фазовая скорость в волокне $c/n(\lambda)$ зависит от длины волны. Она включает в себя материальную и волноводную дисперсию. Материальная дисперсия обусловлена непосредственно зависимостью показателя преломления от длины волны света. Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью диаметра пучка от длины волны ($w \sim \lambda$). Из-за того, что значение показателя преломления изменяется вдоль поперечного сечения волокна в зависимости от диаметра пучка, эффективный показатель преломления для излучения на разных длинах волн будет различным. Стоит отметить, что волноводная дисперсия не всегда является вредным эффектом. Подбирая профиль показателя преломления, можно частично или полностью скомпенсировать материальную дисперсию волноводной. Для характеристики дисперсионных свойств волокна используется параметр D [пс/нм·км] – коэффициент дисперсии, показывающий накапливаемую за один километр временную задержку для сигналов, длины волн которых отличаются на один нанометр. Обычно этот параметр указывают производители оптоволокна в спецификации. Для компенсации хроматической дисперсии применяются модули компенсации дисперсии (DCM – Dispersion Compensation Module, или DCU – Dispersion Compensation Unit) [1].

1.4.3. Поляризационная модовая дисперсия

Поляризационная модовая дисперсия (ПМД, PMD – Polarization Mode Dispersion) возникает из-за того, что в волокне могут распространяться две ортогональные компоненты одной моды, которые соответствуют одному пути светового пучка. Свойства волокна, такие как диаметр волокна и показатель преломления вдоль этих направлений, в общем случае отличаются. Различия в номинально изотропном волокне возникают из-за не-

большой эллиптичности сердцевины и внутренних напряжений (рис. 1.12), а также изгибов волокна [1].



Рис. 1.12. Причины возникновения двулучепреломления в волокне

Короткий участок волокна можно рассматривать как однородную двулучепреломляющую среду со своими быстрой и медленной осями $\Delta n = n_M - n_B$. У телекоммуникационных волокон $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$. Поэтому если в волокне возбудить обе поляризационные моды, то за счет зависимости фазовой скорости от показателя преломления ($V = c/n$) состояние поляризации будет периодически изменяться. Групповые скорости поляризационных мод в первом приближении равны фазовым скоростям: $V_{гр,Б} \approx c/n_B$ и $V_{гр,М} \approx c/n_M$. Поэтому двулучепреломление приводит к появлению разности групповых запаздываний DGD (Differential Group Dispersion) на величину $\delta\tau = (\Delta n/c) \cdot L$ (рис. 1.13) [1]. Рассчитать DGD также можно, используя параметр D_p – коэффициент PMD: $\Delta\tau = D_p \cdot L^{1/2}$.

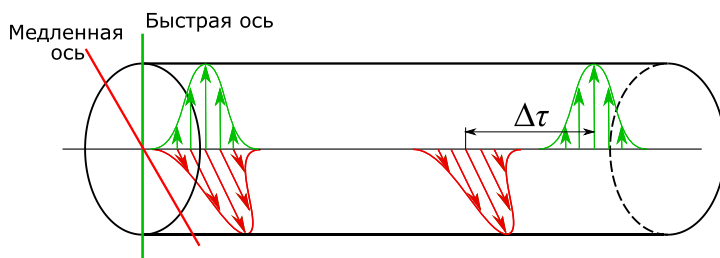


Рис. 1.13. Расщепление импульса при возбуждении двух поляризационных мод в волокне с постоянным двулучепреломлением

1.5. Нелинейные эффекты в волокне

В сильном электромагнитном поле отклик диэлектрика на световое воздействие становится нелинейным. Возникновение данного явления связано с ангармоническим движением связанных электронов при воздей-

ствии приложенного поля $\mathbf{E}$. Результирующая индуцированная поляризации $\mathbf{P}$ уже не является линейной, а удовлетворяет более общему выражению (1.3). Главный вклад в $\mathbf{P}$ вносит линейная восприимчивость (1). Она определяет показатель преломления n и константу затухания. Восприимчивость второго порядка (2) определяет такие нелинейные эффекты, как генерация суммарной частоты и генерация второй гармоники. Следует иметь в виду, что эта восприимчивость ненулевая только для сред, у которых отсутствует центр симметрии. Так как в волоконном световоде молекула кварца обладает центром симметрии, то восприимчивость второго порядка обращается в ноль. Отсюда следует, что в оптическом волокне не могут возникать нелинейные эффекты второго порядка, если не учитывать электрических квадрупольных и магнитных дипольных моментов. Нелинейная восприимчивость третьего порядка ответственна за генерацию третьей гармоники, четырехволновое смешение, нелинейное преломление, которое вызывает фазовую самомодуляцию и фазовую кросс-модуляцию [1].

Фазовая самомодуляция и фазовая кросс-модуляция

Сначала рассмотрим эффект нелинейного преломления. Когда в волоконном световоде распространяется электромагнитное излучение высокой интенсивности, то в области, где оно локализуется, показатель преломления становится нелинейным и описывается формулой:

$$n(\omega, |\mathbf{E}|^2) = n_0(\omega) + n_2 |\mathbf{E}|^2, \quad (1.10)$$

где $n_0(\omega)$ – линейная часть показателя преломления, которая описывается уравнением Sellmeiera, $|\mathbf{E}|^2$ – интенсивность электромагнитного поля внутри волоконного световода и n_2 – нелинейный показатель преломления, который связан с восприимчивостью третьего порядка следующим выражением:

$$n_2 = \frac{3}{8n_0(\omega)} \chi^{(3)}. \quad (1.11)$$

Фазовая самомодуляция (ФСМ) возникает благодаря самонаведенному набегу фазы, который электромагнитное поле приобретает при распространении в волоконном световоде. Величину, данного набегу, можно получить, заметив, что фаза электромагнитного поля изменяется как

$$\phi = nk_0 L = (n_0 + n_2 |\mathbf{E}|^2) k_0 L, \quad (1.12)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ и L – длина оптического волокна. Набег фазы $\phi_{NL} = n_2 k_0 L |\mathbf{E}|^2$ зависит от интенсивности излучения и возникает вследствие ФСМ. По-

мимо всего прочего, ФСМ приводит к спектральному уширению коротких импульсов. Рассмотрим изменение частоты, которое выражается формулой $\delta\omega(t) = -\delta\varphi NL/\delta t$. На рис. 1.15 изображен частотный сдвиг, вызванный ФСМ импульса гауссовой формы. Из него видно, что сдвиг частоты зависит от производной формы импульса по времени, поэтому передний край импульса будет всегда испытывать смещение в длинноволновую область спектра, а задний край – в коротковолновую (положительный чирп).

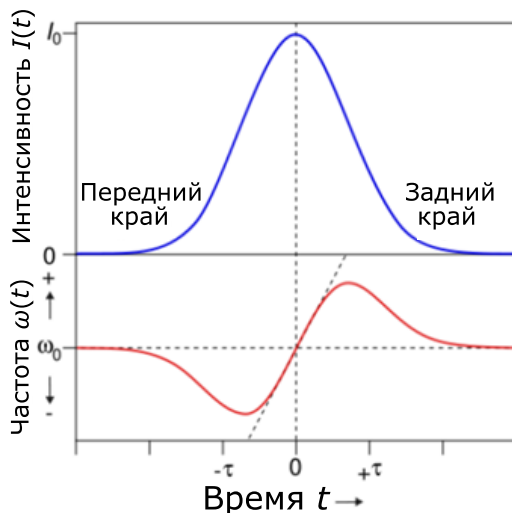


Рис. 1.15. Верхняя кривая – импульс излучения гауссовой формы, который испытывает ФСМ, нижняя кривая – частотный сдвиг

Величина сдвига зависит от интенсивности и формы импульса. ФКМ (*фазовая кросс-модуляция*) обусловлена нелинейным набегом фазы электромагнитного поля, который наведен другим полем на другой длине волны, распространяющимся совместно. Предположим для простоты, что поле $\Delta E(\omega_1, \omega_2)$, наведенное соседним распространяющимся по волокну световым импульсом, является слабым возмущением для поля $E(\omega_1)$ рассматриваемого импульса:

$$\Delta E(\omega_1, \omega_2) \ll E(\omega_1), \quad (1.13)$$

где ω_1, ω_2 – соответственно несущие частоты для рассматриваемого и соседнего импульсов. Тогда нелинейная часть показателя преломления запишется в виде

$$\begin{aligned}\Delta n(\omega_1, \omega_2) &= n_2[E(\omega_1) + \Delta E(\omega_1, \omega_2)]^2 \approx \\ &\approx n_2 E^2(\omega_1) + 2 E(\omega_1) \Delta E(\omega_1, \omega_2).\end{aligned}\quad (1.14)$$

Подставим это в формулу для фазы и получим

$$\Delta\phi(\omega_1, \omega_2) = n_2 k_0 L [E^2(\omega_1) + 2 E(\omega_1) \Delta E(\omega_1, \omega_2)]. \quad (1.15)$$

Два члена в правой части уравнения это ФСМ и ФКМ соответственно.

1.6. Применение оптических волокон в телекоммуникациях

Объем данных, передаваемых по сетям связи, растет на 20–30% ежегодно, что является следствием бурного развития интернет-технологий и разнообразных сетевых приложений. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к волоконно-оптическим сетям, является возможность быстрого увеличения их пропускной способности в соответствии с ростом объемов трафика. Наилучшим образом эта задача решается с помощью технологии мультиплексирования каналов по длинам волн (DWDM).

DWDM-система в самом общем виде состоит из приемопередатчиков (транспондеров) и волоконно-оптического тракта между ними, как показано на рис. 1.16.

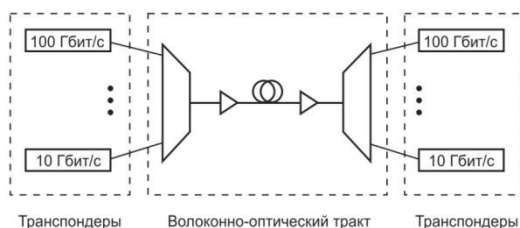


Рис. 1.16. Общий вид DWDM-системы

По одному волокну могут быть переданы несколько десятков каналов передачи данных на разных длинах волн. В зависимости от расстояния между несущими, различают системы грубого мультиплексирования (Coarse WDM, CWDM) и системы плотного мультиплексирования (Dense WDM, DWDM). Сегодня наиболее распространены DWDM-системы с числом каналов 40 или 80. Расстояние между несущими в DWDM-системах может составлять 25...200 ГГц, в современных сетях наиболее часто используется сетка каналов с шагом 50 ГГц. Для передачи используются, прежде всего, спектральные диапазоны C (1530...1565 нм),

S (1460...1530 нм) и L (1565...1625 нм). Поступают сигналы на длинах волн оборудования клиента, а передаются на длинах волн, соответствующих частотному плану Сектора по стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector). Преобразование длин волн осуществляется в транспондерах (transponder = transmitter + responder). Для формирования каналов со скоростью 10 Гбит/с и ниже используются классические транспондеры с модуляцией интенсивности излучения и прямым детектированием, а для формирования DWDM-каналов со скоростью 100 Гбит/с и выше – когерентные транспондеры с многоуровневой амплитудно-фазовой модуляцией. Объединение оптических сигналов происходит в мультиплексоре [1]. У каждой оптической несущей (оптического канала) имеется свой передатчик и приемник, и сигналы могут передаваться в разных форматах. Например, наиболее часто используемый на сегодняшний день формат модуляции DP-QPSK позволяет обеспечить скорость передачи 100 Гбит/с в сетке 50 ГГц или 200 Гбит/с в сетке 100 ГГц. Для увеличения дальности передачи в линиях дополнительно устанавливаются эрбиевые и рамановские усилители (EDFA и RAU).

Процесс оптимизации линии связи представляет собой довольно непростую задачу. Для того чтобы максимизировать дальность передачи конкретного сигнала (задан формат модуляции, сетка и ширина спектра одного канала) необходимо подобрать оптимальные длины пролетов (расстояние между соседними усилителями) и канальные мощности, учитывая всевозможные эффекты, возникающие в оптоволокне, и воздействие шумов спонтанного излучения ASE, наведенного усилителями.

РАЗДЕЛ 2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Первоначально основным применением волоконных усилителей были *волоконно-оптические линии связи* (ВОЛС). *Мощность* – важнейший параметр оптического сигнала, влияющий на качество работы ВОЛС, определяемое *коэффициентом ошибок* (BER). При уменьшении мощности сигнала быстро растет доля символов, распознанных ошибочно (BER). Это связано с наличием собственных шумов приемника (в основном тепловых шумов). Использование оптических усилителей позволяет периодически увеличивать мощность сигнала и тем самым многократно повысить дальность передачи по сравнению с дальностью передачи без использования усилителей. Для использования в телекоммуникациях оптические усилители должны удовлетворять следующим требованиям:

- Высокий коэффициент усиления во всем С-диапазоне (1530–1570 нм).
- Возможность изменения коэффициента усиления в некотором диапазоне значений для настройки конкретной линии.
- Малый уровень мощности вносимых шумов.

Физический механизм усиления в оптических усилителях – вынужденное излучение или вынужденное рассеяние света. Широко распространены *эрбиевые волоконные усилители* (EDFA). Спектральная полоса усиления эрбиевых усилителей составляет около 80 нм и расположена в основном коммуникационном диапазоне 1520–1600 нм, используемом в настоящее время для передачи данных [4]. В конце 1990-х гг. возрос интерес к *ВКР-усилителям* (также известным как *рамановские усилители*). Это было связано в первую очередь с потребностью в увеличении скорости передачи информации по линиям дальней и сверхдальней связи. Для этого нужны усилители, способные работать во всех спектральных областях. Рамановские усилители благодаря широкой полосе усиления и отсутствию привязки к длине волны удовлетворяют этим требованиям [5]. С развитием волоконных усилителей появлялись новые области их применения. При сохранении основных принципов усиления технические доработки позволили адаптировать их к совершенно иным требованиям. В частности, волоконные усилители используются в мощных лазерах, для усиления ультракоротких импульсов, в области промышленной обработки материалов (сварка, резка), для увеличения дальности работы волоконных датчиков. В данном разделе сначала будут введены основные характеристики линий связи, необходимые для описания усилителей. Далее, на

примере эрбиевых усилителей будут рассмотрены принципы работы усилителей, основанных на явлении вынужденного излучения. Другие усилители, использующие данный механизм, работают схожим образом. Также на примере рамановских волоконных усилителей будут представлены принципы работы усилителей, работающих за счет вынужденного рассеяния.

2.1. Основные характеристики линии связи

2.1.1. Оптическое отношение сигнал–шум

По определению *оптическое отношение сигнал–шум* (Optical Signal Noise Ratio, OSNR) – это отношение мощности сигнала к мощности шума на частоте сигнала в некоторой эталонной (референсной) спектральной полосе [1]:

$$OSNR = \frac{P_s \cdot B}{P_N \cdot B_R + h\nu \cdot B_R}, \quad (2.1)$$

где P_s [мВт] – мощность сигнала (считается, что мощность сигнала измеряется в полосе достаточной ширины, чтобы в нее попал весь спектр сигнала), P_N [мВт] – мощность шума, B [нм] – полоса измерительного прибора, B_R [нм] – референсная полоса, обычно принимаемая равной 0,1 нм, ν – частота сигнала, h – постоянная Планка. Произведение $h\nu \cdot B_R$ представляет собой мощность фундаментального квантового шума, который присутствует в любом сигнале.

В условиях реальных измерений на линиях связи $h\nu \ll P_N$. Поэтому распространенным является определение оптического отношения сигнал–шум в упрощенном виде:

$$OSNR = \frac{P_s \cdot B}{P_N \cdot B_R}. \quad (2.2)$$

Данное определение оптического отношения сигнал–шум соответствует стандарту ИЕС (International Electrotechnical Commission). Вычисления OSNR, выраженного в дБ (для обозначения используются строчные буквы), выполняются по следующей формуле:

$$osnr = p_s - p_N + 10 \lg \frac{B}{B_R}, \quad (2.3)$$

где p_s и p_N – мощности сигнала и шума соответственно, измеренные в дБм. Величина оптического отношения сигнал–шум (OSNR), определя-

емая для каждого канала из измерения оптического спектра сигнала, позволяет оценить качество работы спектральных каналов передачи информации без преобразования сигнала. Хотя OSNR не дает информации об искажениях формы сигнала, его величина дает важную информацию о значении шума в канале связи и поэтому входит в число нормируемых параметров для оптических интерфейсов согласно рекомендациям ITU-T G.692 и ITU-T G.959.1.

2.1.2. Методика измерения OSNR

Измерение OSNR производится с помощью оптического спектроанализатора. При использовании стандартной методики измерения OSNR подразумевается использование ширины оптического фильтра спектроанализатора (разрешения) большего, чем ширина спектра оптического сигнала. Это нужно для того, чтобы пиковый уровень мощности сигнала со спектроанализатора соответствовал полной мощности сигнала. В данном случае OSNR определяется по уровню пика сигнала и уровню его «подставки»-шума (рис. 2.1) [1].

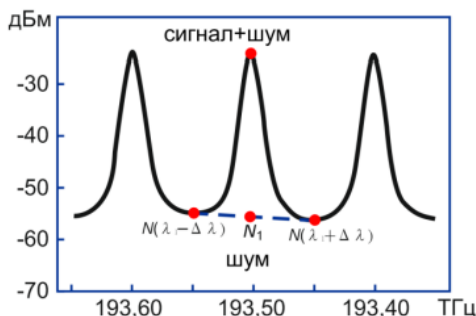


Рис. 2.1. Стандартная схема измерения OSNR в линии связи

Уровню пика сигнала соответствует сумма мощностей сигнала и шума, находящегося в полосе оптического фильтра спектроанализатора (полоса соответствует разрешению прибора):

$$P_{\text{изм}} = P_S + P_N, \quad (2.4)$$

где $P_{\text{изм}}$ [мВт] – мощность, измеренная спектральным прибором, P_S [мВт] и P_N [мВт] – мощности сигнала и шума соответственно. Значение интегральной мощности шума на частоте сигнала получают при линейной интерполяции значений шума, измеренных в точках, равноудаленных от центральной частоты сигнала (рис. 2.1). Таким образом, исходя из показа-

ний спектроанализатора, OSNR с шумом, измеренным в полосе разрешения спектроанализатора, может быть определено как

$$OSNR_{\Delta\lambda} = \frac{P_{\text{изм}} - P_N}{P_N}. \quad (2.5)$$

$\Delta\lambda$ – разрешение спектрального измерительного прибора. Пересчет в OSNR с шумом в полосе 0,1 нм осуществляется в соответствии с выражением

$$OSNR_{0,1} = \left(\frac{P_{\text{изм}}}{P_N} - 1 \right) \times \frac{\Delta\lambda}{0,1\text{нм}}. \quad (2.6)$$

В логарифмических единицах:

$$osnr_{0,1} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{изм}}}{P_N} - 1\right) + 10\lg\left(\frac{\Delta\lambda}{0,1\text{нм}}\right). \quad (2.7)$$

При достаточно больших OSNR ($p_{\text{изм}} - p_N > 15$ дБ) формулу можно свести к более простому виду:

$$osnr_{0,1} = p_{\text{изм}} - p_N + 10\lg\left(\frac{\Delta\lambda}{0,1\text{нм}}\right). \quad (2.8)$$

2.2. Эрбиевые волоконные усилители

Наибольшее распространение получили оптические усилители на волокне, легированном эрбием – EDFA. В основном это связано с развитием многоканальных оптических систем связи, а именно технологии плотного оптического мультиплексирования (DWDM). Благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств, как у EDFA, линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными. Действительно, обычные электронные регенераторы, чтобы восстановить уровень оптического сигнала, преобразуют входной оптический сигнал в электрический, с последующим усилением и коррекцией формы, и далее преобразуют его снова в оптический сигнал. Если учесть, что в технологии DWDM используются до нескольких десятков каналов на различных длинах волн, то регенератор становится наиболее сложной и дорогостоящей частью системы. В отличие от них усилители EDFA не распознают и не преобразовывают сигнал, а просто увеличивают его мощность сразу во всей рабочей полосе – в C-диапазоне (также возможно расширение в L-диапазоне) [1, 4, 5].

2.2.1. Спонтанные и вынужденные переходы. Механизм усиления света в эрбиевом волокне

Наиболее простое описание принципа работы оптических усилителей дает полуклассический подход. Для усиления света используются энергетические уровни среды, в которой происходит его распространение. Усиление света в активной среде обычно сравнивают с нарастанием лавины фотонов, так как при каждом акте вынужденного испускания происходит удвоение числа фотонов (рис. 2.2а).

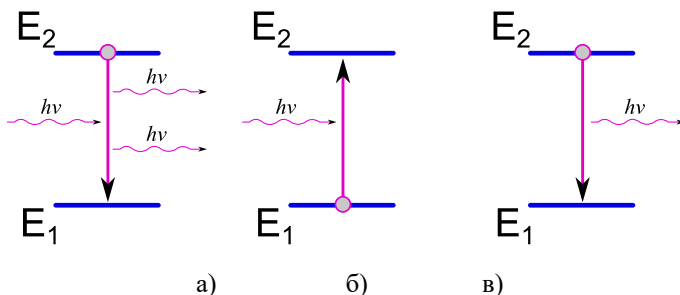


Рис. 2.2. Возможные переходы между состояниями в квантовой системе

Для нарастания лавины фотонов необходимо, чтобы число актов испускания фотонов превышало их естественную убыль вследствие эффекта вынужденного поглощения (рис. 2.2б). То есть необходимо инвертировать населенность двух уровней (создать условия для того, чтобы большая часть ионов находилась на верхнем энергетическом уровне). В твердотельных усилителях инверсия населенности создается при помощи внешнего излучения, которое называют *накачкой*. Ионы, находящиеся на верхнем энергетическом уровне, могут совершать не только вынужденные, но и самопроизвольные переходы на нижний уровень, в результате чего возникает спонтанное излучение (рис. 2.2в). Оно приводит к появлению дополнительных шумов в фотоприемнике и, кроме того, опустошает верхний энергетический уровень [1]. Энергетические уровни ионов эрбия Er^{3+} , внедренных в кварцевое волокно, отличаются от энергетических уровней свободных ионов, так как на них действует сильное электрическое поле ионов стекла. Электрическое поле ионов стекла вследствие эффекта Штарка вызывает расщепление и смещение энергетических уровней свободного иона эрбия. В результате вместо отдельных узких энергетических уровней образуются достаточно хорошо разнесенные мультиплеты (рис. 2.3). Полученная схема энергетических подуровней позволяет одновременно усиливать сигналы с различными длинами волн в С-диапазоне [1, 4, 5].

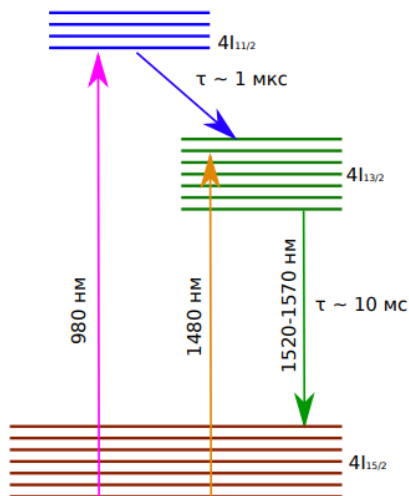


Рис. 2.3. Схема энергетических уровней ионов Er^{3+} в кварцевом стекле

Вынужденные переходы осуществляются между уровнями $4I_{13/2}$ (верхний уровень 2). Накачка эрбиевого волокна может осуществляться на двух длинах волн – 980 нм и 1480 нм:

- При использовании накачки на 980 нм могут быть созданы системы с низким уровнем шума. Поэтому их использование предпочтительнее в случае высоких требований к шумовым характеристикам сигнала.
- Выгодным с точки зрения потребления энергии и мощности излучения накачки является использование накачки на длине волны 1480 нм. В случаях, когда требования к шумам не столь критичны, коммерчески более выгодным будет использование лазеров накачки на длине волны 1480 нм.

Усилители работают в спектральном интервале от 1530 до 1570 нм. Спектры переходов между подуровнями перекрываются и образуют широкие полосы поглощения и усиления с максимумом на длине волны 1,54 мкм как в спектре поглощения, так и в спектре люминесценции.

2.2.2. Простейший эрбиевый усилитель. Коэффициент усиления

Простейший эрбиевый усилитель представляет собой активное волокно, в которое при помощи устройства (мультиплексора), объединяющего излучение на разных длинах волн в одно волокно (Wavelength Division Multiplexer, WDM), вводится излучения лазера накачки. Схема такой системы приведена на рис. 2.4.

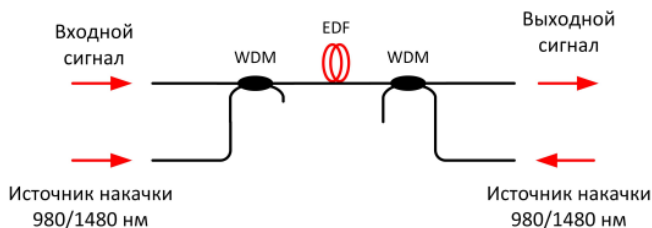


Рис. 2.4. Схема простейшего эрбиевого усилителя

Коэффициентом усиления называется отношение выходной мощности полезного сигнала $P_{S,OUT}$ к входной мощности $P_{S,IN}$:

$$G = P_{S,OUT}/P_{S,IN}. \quad (2.9)$$

В инженерных расчетах удобно выражать коэффициент усиления в децибелах:

$$g = 10 \lg G. \quad (2.10)$$

Также часто используют коэффициент усиления в единице длины (1 м) активного волокна G_0 . На схеме уровней (рис. 2.3) энергетические зазоры между подуровнями сравнимы по величине со средней тепловой энергией kT при комнатной температуре. Поэтому населенности верхних и нижних подуровней как для основного уровня ${}^4I_{15/2}$ (уровень 1), так и для возбужденного ${}^4I_{13/2}$ уровня (уровень 2) различаются весьма существенно. Это приводит к тому, что значение коэффициента усиления зависит от длины волны усиливаемого сигнала. Зависимости коэффициента усиления G_0 от длины волны при различных относительных населенностях верхнего рабочего уровня 2 (${}^4I_{13/2}$), определяемой уровнем мощности накачки и мощностью сигнала, для простейшего усилителя приведены на рис. 2.5. Нижняя кривая наблюдается в отсутствие накачки (все частицы находятся в основном состоянии) и соответствует «отрицательному усилению», то есть поглощению во всем рабочем спектральном диапазоне. По мере увеличения мощности накачки все большее число активных ионов переходит в возбужденное состояние. Это приводит, как видно из рис. 2.5, сначала к уменьшению коэффициента поглощения, так называемое *просветление*, а затем к усилению света.

Населенность верхнего уровня оптического усилителя EDFA зависит от мощности входного сигнала. Из-за взаимодействия с усиливаемым излучением населенность метастабильного энергетического уровня (${}^4I_{13/2}$) при определенном уровне мощности сигнала уменьшается, следовательно, с ростом мощности входного сигнала коэффициент усиления также

уменьшается. Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны 1550 нм приведена на рис. 2.6.

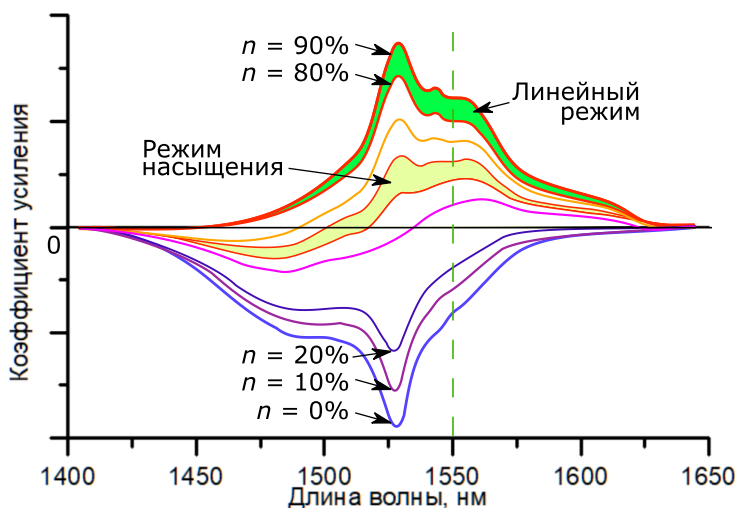


Рис. 2.5. Спектральная зависимость коэффициента усиления/поглощения эрбиевого волокна при разных значениях относительной населенности метастабильного уровня энергии (отношения населенности уровня $^4I_{13/2}$ к населенности уровня $^4I_{15/2}$ в отсутствие воздействия)

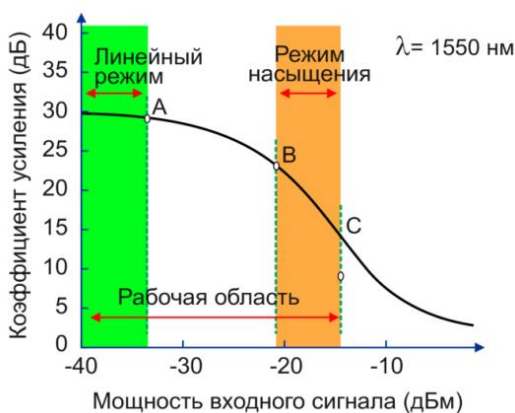


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны 1550 нм

Линейным называется режим, при котором зависимостью коэффициента усиления от мощности входного сигнала можно пренебречь, то есть населенность меняется слабо (область левее точки А на рис. 2.6, выделенная зеленым). Режим насыщения во всей области правее точки А.

Эрбиевые усилители обладают следующими особенностями:

- Наличие пороговой мощности накачки, при которой происходит «просветление» активного волоконного световода, т. е. достигаются нулевые потери. При превышении пороговой мощности накачки начинается усиление сигнала. В зависимости от структуры активного волоконного световода, концентрации легирующей примеси и длины волны накачки величина пороговой мощности составляет от долей до нескольких единиц мВт.

- Необходимость выбора оптимальной длины эрбиевого волокна. При длине волокна больше оптимальной в дальних участках волокна будет наблюдаться поглощение сигнала, а при использовании эрбиевого волокна недостаточной длины излучение накачки используется не полностью. Оптимальная длина эрбиевого волокна зависит от частоты усиливаемого сигнала. Чем меньше частота сигнала (больше длина волны), тем более длинный отрезок эрбиевого волокна обеспечивает максимальное усиление.

Ионы эрбия переходят в основное состояние из возбужденного не только в результате вынужденных переходов, но и самопроизвольно в результате спонтанных переходов. Как вынужденные, так и спонтанные переходы сопровождаются излучением фотонов с энергией, соответствующей данному переходу. Но если возникающие в результате вынужденного излучения фотоны идентичны порождающим их фотонам усиливаемого сигнала, то «спонтанные» фотоны никак с сигналом не связаны. В результате вынужденное излучение приводит к усилению сигнала, а спонтанное излучение является источником шума в оптических усилителях.

2.2.3. Шумы и шум-фактор эрбиевого усилителя

Как уже отмечалось выше, в активном волокне наряду с вынужденным излучением фотонов, которое приводит к усилению света, наблюдается также спонтанное излучение фотонов. Большая часть фотонов, возникших в результате спонтанных переходов, быстро покидают волокно. Некоторая часть фотонов, возникших в результате спонтанных переходов, принадлежит основной моде активного волокна, и такие фотоны при дальнейшем распространении усиливаются. В результате этого на выходе усилителя EDFA формируется усиленное спонтанное излучение, для обозначения которого используется аббревиатура ASE (Amplified Spontaneous

Emission). ASE – это случайное шумовое излучение, статистические свойства которого определяются спонтанным излучением активного волокна. Спектр ASE совпадает со спектром усиления EDFA и может быть зарегистрирован оптическим анализатором спектра (Optical Spectrum Analyzer, OSA). Пример спектра выходного излучения EDFA, состоящего из усиленного сигнала и ASE, приведен на рис. 2.7 [1].

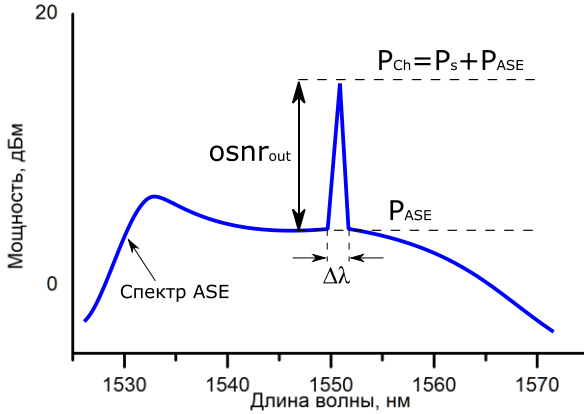


Рис. 2.7. Выходной спектр EDFA, снятый OSA. Полоса $\Delta\lambda = 0,1$ нм ($B_R = 12,5$ ГГц)

Величина шума ASE определяется шум-фактором усилителя. Шум-фактор оптического усилителя характеризует степень ухудшения $OSNR$ идеального оптического сигнала $OSNR_{IN}^Q$ после прохождения через оптический усилитель. Шум-фактор выражается в линейных единицах (величина F) или в логарифмических единицах (величина NF) и определяется соотношениями:

$$F = \frac{OSNR_{IN}^Q}{OSNR_{OUT}}, \quad (2.11)$$

$$NF = osnr_{IN}^Q - osnr_{OUT}. \quad (2.12)$$

Оптическое отношение сигнал-шум определяется в соответствии с выражением 2.1. *Идеальным оптическим сигналом* будем называть оптический сигнал без классических шумов ($P_N = 0$). С точки зрения квантовых представлений оптическое отношение сигнал-шум принимает максимально возможное, так называемое *квантово-ограниченное значение* отношения сигнал-шум:

$$OSNR_{IN}^Q = \frac{P_{S,IN}}{h\nu \cdot B_R}, \quad (2.13)$$

где $P_{S,IN}$ – входная мощность сигнала, ν – центральная частота сигнала, B_R – референсная полоса.

С учетом данного определения идеального оптического сигнала получим следующее выражение для отношения шум-фактора в линейных единицах:

$$F = \frac{P_{S,IN}}{h\nu \cdot B_R} \frac{1}{OSNR_{OUT}}. \quad (2.14)$$

В логарифмических единицах:

$$NF = p_{S,IN} - osnr_{OUT} - 10 \lg(h\nu \cdot B_R). \quad (2.15)$$

На длине волны 1550 нм и в полосе 0,1 нм $10 \lg(h\nu \cdot B_R) = -58$ дБм формула 2.15 приобретает вид

$$NF = 58 + p_{S,IN} - osnr_{OUT}. \quad (2.16)$$

При использовании для накачки оптического волокна излучения с длиной волны 980 нм шум-фактор составляет 3–7 дБ. Накачка 1480 нм обеспечивает значения величины шум-фактора в интервале 5–14 дБ.

При расчете шум-фактора системы из нескольких оптических усилителей используется формула Фрииса [1]:

$$F = F_1 - \frac{F_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{F_N - 1}{G_1 \dots G_{N-1}}, \quad (2.17)$$

где F_i и G_i – шум-фактор и коэффициент усиления i -го усилителя, выраженные в размах [1].

2.2.4. Недостатки простейшей конфигурации эрбиевого усилителя

При использовании эрбиевого усилителя в простейшей конфигурации рис. 7.4 возникает несколько очевидных проблем:

1. Неравномерность спектра усиления

Неравномерностью спектра усиления называют разность между максимальным и минимальным коэффициентами усиления в спектре многоканального сигнала. Коэффициент усиления эрбиевого волокна при заданном значении населенности уровня в значительной степени зависит от длины волны входного сигнала (рис. 2.5). Разница в коэффициентах уси-

ления между крайними каналами С-диапазона может достигать до величины 0,5 дБ при коэффициенте усиления 1,5 дБ. Увеличение числа пролетов приводит к росту разницы в мощностях между используемыми каналами. В результате возникают трудности с оптимизацией мощности сигнала. Максимальная мощность на выходе из усилителя ограничена порогом возникновения нелинейных эффектов. При этом мощность канала с наименьшим коэффициентом усиления может быть слишком мала для оптимального приема.

2. Паразитные отражения

Паразитные отражения (например, на разъемах) вблизи усилителя очень опасны, так как отраженное излучение может попасть в усилитель как через вход, так и через выход усилительного блока. Двойное отражение – источник дополнительных шумов. В усилителе мощность сигнала двойного рассеяния быстро увеличивается с ростом усиления, а при критическом усилении возникает паразитная генерация. Также вредное воздействие оказывает отраженный шум ASE. При попадании на лазер-передатчик достаточно высокая мощность шума может повредить его.

В простейшем виде усилитель применяется, например, в качестве эрбиевого усилителя с удаленной накачкой ROPA (Remote Optically Pumped Amplifier, ROPA), который представляет собой кусок активного эрбиевого волокна, расположенного в линии связи. Доставка излучения накачки осуществляется либо по телекоммуникационному волокну совместно с оптическим сигналом, либо по дополнительному волокну

2.2.5. Усилитель с постоянным коэффициентом усиления

Для многих применений требуется постоянство усиления в заданном спектральном диапазоне. Усилитель с постоянным коэффициентом усиления (Fixed Gain Amplifier, FGA) – это усилитель, обеспечивающий относительно ровный спектр усиления для одного значения коэффициента усиления при различных входных мощностях сигнала. Данная вариация эрбиевого усилителя является улучшенной версией простейшего эрбиевого усилителя, описанного ранее, и обладает следующими преимуществами:

1. Равномерность спектра усиления. Для того чтобы обеспечить равномерность спектра усиления в рабочей полосе коэффициента усиления EDFA в состав усилителя добавляется еще один элемент – GFF-фильтр (Gain Flattening Filter), который выравнивает коэффициент усиления. GFF-фильтр практически на всех длинах волн вносит потери $A_{GFF}(\lambda)$. Эти потери больше в тех областях, в которых есть завышение коэффициента

усиления эрбиевого волокна. Итоговый коэффициент усиления EDFA записывается в виде:

$$g(\lambda) = g_{EF}(\lambda) - A_{GFF}(\lambda), \quad (2.18)$$

где $g(\lambda)$ и $g_{EF}(\lambda)$ – коэффициент усиления эрбиевого волокна до и после GFF-фильтра. Выравнивание спектра для различных кривых населенности (рис. 2.5) происходит при разных величинах вносимых потерь, поэтому для каждой из них требуется свой GFF-фильтр. Усилитель с GFF-фильтром обеспечивает ровный спектр только для одного значения населенности и, следовательно, только для одного коэффициента усиления (поэтому данная конфигурация названа *усилителем с постоянным коэффициентом усиления*). Технически, за счет изменения населенности, могут быть получены другие коэффициенты усиления. Однако спектр усиления будет неравномерным. Без GFF-фильтра плоский участок спектра EDFA составляет 10–15 нм, а с GFF-фильтром он увеличивается до 30–40 нм.

2. Устранение отражений. Для того, чтобы устранить отраженное излучение, требуется установить изоляторы на входе и выходе усилителя.

Простейший усилитель, дополненный GFF-фильтром и изоляторами, представляет собой усилитель FGA, обеспечивающий равномерный спектр только при одном значении коэффициента усиления (рис. 2.8).

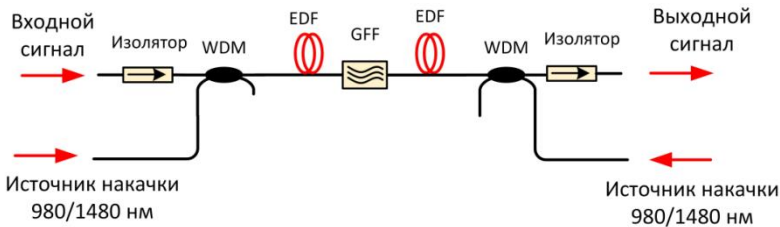


Рис. 2.8. Схема усилителя с постоянным коэффициентом усиления (FGA)

GFF-фильтр устанавливается после усилительного каскада. В противном случае существенно увеличивается шум-фактор усилителя. Из-за потерь, вносимых GFF-фильтром, максимальный уровень выходной мощности существенно уменьшается. В случаях, когда требуется получить высокий уровень выходной мощности для компенсации потерь после фильтра, устанавливается еще один усилительный каскад. GFF-фильтр в этом случае выравнивает спектр комбинации двух каскадов. Альтернатива – использование первого каскада с большим уровнем максимальной выходной мощности – оказывается менее экономичной.

2.2.6. Усилитель с переменным коэффициентом усиления

Использование FGA не всегда является оптимальным решением. Например, в процессе длительного использования усилителя на различных участках линии связи могут произойти изменения, приводящие к изменению уровня потерь (деградация оптоволокна, дополнительные сварки, добавление или удаление спектральных каналов). В связи с этим возможность изменения коэффициента усиления делает систему более гибкой. При попытке использовать FGA-усилитель в режиме переменного усиления спектр усиления будет «перекошен».

Усилитель с переменным коэффициентом усиления (Variable Gain Amplifier, VGA) представляет собой усилитель с постоянным коэффициентом усиления (FGA) с аттенуатором с переменным ослаблением (Variable Optical Attenuator, VOA), установленным после GFF-фильтра (рис. 2.9).

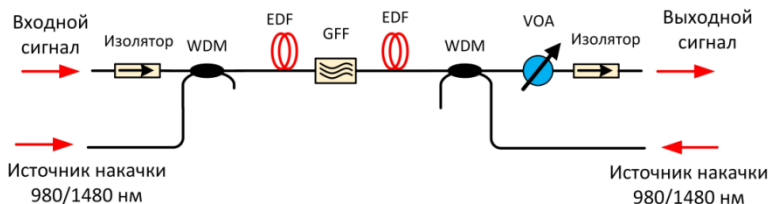


Рис. 2.9. Схема усилителя с переменным коэффициентом усиления (VGA)

Максимальный коэффициент усиления VGA определяется коэффициентом усиления соответствующего FGA-усилителя и минимальными потерями аттенуатора. Диапазон изменения коэффициента усиления задается возможностью изменения потерь на аттенуаторе.

2.3. Рамановские волоконные усилители

Основным принципом работы рамановских волоконных усилителей (Raman Amplification Unit, RAU) является вынужденное комбинационное рассеяние. RAU обладают следующими отличительными свойствами [1]:

- Рамановские усилители могут быть использованы во всех рабочих диапазонах от 1420 нм до 1620 нм (EDFA в основном усиливает сигнал в C-диапазоне).
- Форма спектра усиления регулируема (может быть изменена за счет подбора длин волн и мощностей лазеров накачки).

- Используются мощные лазеры накачки (обычно четыре диода накачки, мощность каждого до 500 мВт). Поэтому требуется обеспечить повышенные меры безопасности.
- Усиление происходит по мере распространения сигнала по основному волокну (на расстоянии 20 км). Никакое дополнительное волокно не используется.
- Рамановские усилители обладают низким шум-фактором (шум-фактор < 0 дБ, типичный – 3 дБ).

2.3.1. Рассеяние излучения в веществе

Рассеянием света называют явление, при котором распространяющийся в среде световой пучок отклоняется. Чаще всего направление рассеяния случайно, но не всегда.

Большая часть света, распространяющегося в среде, пропускается или поглощается в соответствии с законами отражения или поглощения. Очень малая часть света рассеивается неоднородностями среды. Эти неоднородности могут быть статическими, например дислокации в кристалле, и рассеивать свет упруго, без изменения его частоты. При неупругом рассеянии света поглощается квант падающего излучения и рождается квант рассеянного излучения, при этом происходит рождение или уничтожение кванта (или квантов) возбуждений кристалла, например, возбуждаются колебания кристаллической решетки (фононы).

В зависимости от типа колебаний, который возбуждает фотон в кристаллической решетке, можно выделить множество различных типов рассеяния. Далее описаны некоторые из них:

1. *Релеевское рассеяние* – рассеяние излучения на неоднородностях среды (без изменения частоты падающих фотонов, упругое).

2. *Рассеяние Мандельштама–Бриллюэна* – неупругое рассеяние излучения на гиперзвуковых волнах (акустических фононах) с возбуждением и поглощением акустических фононов (тип колебаний, при котором при больших длинах волн частота колебаний обратно пропорциональна длине волны). Обычно наблюдается в направлении, противоположном направлению распространения сигнала.

3. *Рамановское рассеяние* – неупругое рассеяние излучения на колеблющихся молекулах с возбуждением и поглощением оптических фононов.

Неупругое рассеяние может быть спонтанным и вынужденным. Вынужденное рассеяние, так же как и вынужденное излучение, может быть использовано для усиления оптического сигнала. Спектр вынужденного рамановского рассеяния (ВКР) существенно шире, чем спектр рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ), поэтому именно ВКР используется для усиления сигналов в телекоммуникациях.

2.3.2. Спектр рамановского усиления

На рис. 2.10 приведены спектры рамановского усиления для различных типов волокон, используемых в телекоммуникациях.

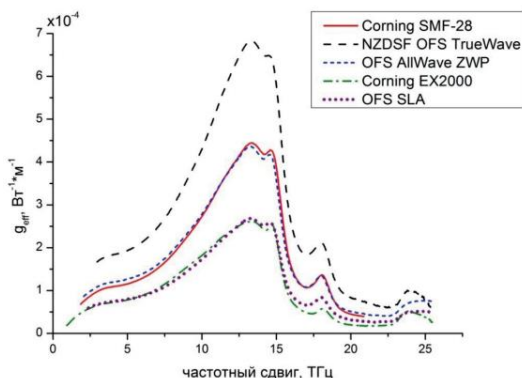


Рис. 2.10. Зависимость коэффициента рамановского усиления от разности частот накачки и сигнала для различных типов телекоммуникационных волокон

В основном это волокна с германосиликатной сердцевинной и ступенчатым профилем показателя преломления: Corning SMF-28 и OFS AllWave ZWP стандарта ITU-T G.652.D с эффективной площадью моды (ЭПМ) 85 мкм^2 , волокно со смещенной ненулевой дисперсией (NZDSF, стандарт ITU-T G.655) OFS TrueWave с ЭПМ порядка 52 мкм^2 , а также волокна с увеличенной площадью моды (ITU-T G.654) — OFS SLA (130 мкм^2) и Corning Vascade EX2000 (112 мкм^2). Последний тип волокна представляет собой световод с сердцевинной из чистого кварца (PSCF) [6]. Ширина спектра при накачке узкополосным излучением меньше С-диапазона. В EDFA спектр значительно шире, необходимо только его выровнять. В рамановских усилителях необходимо использовать полихроматическую накачку. Для выравнивания спектра для накачки рамановских усилителей могут быть использованы одновременно четыре лазера с разными длинами волн (например, 1425 нм, 1435 нм, 1455 нм, 1465 нм). При выборе соотношения между мощностями лазеров накачки необходимо также учитывать ВКР-взаимодействие между компонентами накачки (коротковолновые компоненты будут усиливать длинноволновые при распространении вдоль всего волокна). При использовании четырех лазеров накачки появляется возможность выровнять спектр усиления с точностью до 1,2 дБ в С-диапазоне.

2.3.3. Характеристики рамановского усилителя

Простейший рамановский усилитель представляет собой несколько диодов накачки (обычно четыре диода накачки на длинах волн 1425 нм, 1435 нм, 1455 нм и 1465 нм, мощность каждого может достигать 500 мВт). При распространении излучения накачки вдоль линии за счет эффекта рамановского рассеяния часть мощности излучения накачки переходит в мощность сигнала. За счет этого эффекта происходит усиление сигнала. В случае, если направления распространения накачки и сигнала совпадают, рамановский усилитель называется *попутным* (Forward Raman или FRaman). Рамановский усилитель, подающий излучение накачки со стороны приемника в направлении, противоположном направлению распространения сигнала, называют *встречным* (Backward Raman или BRaman) [1].

2.4. Волоконные лазеры

Одними из самых распространенных и перспективных видов твердотельных лазеров в настоящее время являются волоконные лазеры. Принцип передачи света в волноводе, основанный на эффекте полного внутреннего отражения, был давно известен, но впервые волоконный лазер с активной сердцевиной, легированной неодимом, появился в 1961.

Развитие технологий позволяло получать все более чистые кварцевые стекла, а также использовать все более мощные источники оптической накачки. Непрерывный волоконный лазер с накачкой полупроводниковым диодом в торец волокна впервые был продемонстрирован в 1974 г. Вскоре использование более мощных полупроводниковых диодов на GaAlAs и волокон с меньшими оптическими потерями позволило создать волоконный лазер милливатного, а позже и ваттного диапазонов. Схема устройства современного волоконного лазера представлена на рис. 2.11.

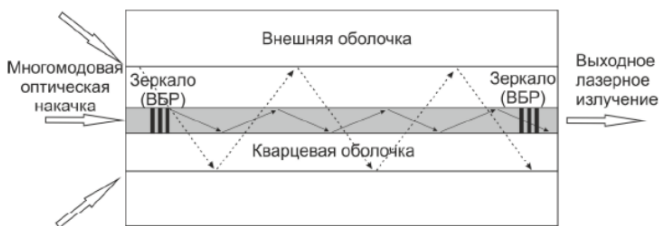


Рис. 2.11. Схема работы волоконного лазера

Основой волоконного лазера является многослойное оптическое волокно с активной кварцевой сердцевиной, легированной ионами редкоземельных элементов, оболочкой из кварцевого стекла и защитной полимерной оболочкой. Для создания активной среды в сердцевине волоконного лазера используется легирование плавленого кварца редкоземельными элементами. В настоящее время наибольшее распространение среди мощных непрерывных и импульсных лазеров и усилителей получили волоконные лазеры с активной средой из кварцевого стекла, легированного ионами редкоземельных элементов, таких как иттербий, эрбий, тулий, неодим. Накачка осуществляется многомодовым излучением полупроводниковых диодов на двойной полупроводниковой гетероструктуре InGaAs/GaAs. Существует несколько способов ввода оптической накачки в активную среду: непосредственно в сердцевину, в оболочку, но наиболее эффективно накачка осуществляется в волокне с двойной оболочкой. В этом случае многомодовое излучение накачки, многократно отражаясь, постепенно поглощается в сердцевине. Резонатор в волоконном лазере осуществляется при помощи волоконных брэгговских решеток (ВБР). Брэгговские решетки формируются при облучении светочувствительной сердцевины волокна двумя интерферирующими ультрафиолетовыми пучками, которые изменяют показатель преломления в сердцевине, образуя продольную решетку показателя преломления. Одна из отражающих решеток лазера имеет высокий коэффициент отражения, а вторая, находящаяся у выхода, является полупрозрачной. Современный волоконный лазер имеет ряд преимуществ относительно других типов лазеров:

1. Протяженная структура активной среды и эффективное пересечение области накачки и генерации волоконного лазера позволяет создать очень высокий коэффициент поглощения излучения накачки, приближая эффективность волоконного лазера к физическому пределу, связанному с потерями на размен энергий квантов накачки и генерации.

2. Активная среда на основе легированного кварцевого стекла обладает высокой чистотой, однородностью, оптической прозрачностью и стойкостью к оптическому разрушению.

3. Большое соотношение площади поверхности активного волокна к его объему обеспечивает хороший теплообмен с окружающей средой и способствует лучшему охлаждению, что крайне важно для мощных лазеров.

4. Полностью волоконная структура лазера позволяет обойтись без сложных механических юстировок, а также дает гибкость выбора конструкции.

5. Волоконный ввод накачки при помощи интегрально-оптических компонентов позволяет осуществить оптическую накачку от множества лазерных диодов в одну активную сердцевину.

2.4.1. Лазеры высокой мощности

Лазеры высокой мощности применяют как для накачки импульсных лазеров высокой мощности, так и в качестве самостоятельных приборов в тяжелой промышленности. Их применяют для обработки неметаллических материалов, в основном пластиков, которые прозрачны для излучения с длиной волны 1 мкм, для сварки металлов и гравировки. В лазерной отрасли выходная мощность лазеров зачастую является решающим фактором, поэтому ее повышение является одной из важнейших задач при развитии лазеров.

Стекло, легированное редкоземельными элементами, очень хорошо подходит для получения высоких мощностей. Волокно позволяет получать большое усиление за один проход, что открывает возможность использования схемы с дополнительным усилителем. Развитие мощных полупроводниковых лазеров, оптических волокон и компонентов, появление новых схем накачки позволило волоконным лазерам стать одними из самых применимых среди мощных лазеров за последние 20 лет. Согласно анализу [7], максимальная мощность для одномодового лазера составляет порядка 37 кВт. В [8] моделирование показало, что использование идеальных волокон позволит получить 70 кВт выходной мощности.

2.4.2. Применение волоконных лазеров в медицине

В настоящее время активно развивается применение лазеров в медицине. Одним из направлений применения лазерных технологий в медицине является урология, где лазеры используются для удаления тканей простаты, для лечения хлоазмы и дробления камней в почках. Так как коэффициент поглощения для 2 мкм излучения в воде на несколько порядков выше, чем для 1 мкм излучения, то используют лазеры на основе волокна, легированного гольмием или туллием.

В урологии наиболее широко на данный момент используются гольмиевые твердотельные лазеры, которые являются «золотым стандартом» в лазерной хирургии. Однако в лазерную хирургию активно внедряются тулиевые волоконные лазеры. Их основным преимуществом по сравнению с гольмиевыми лазерами является в 5,5 раза большее поглощение в воде, что делает их более эффективными и безопасными по сравнению с гольмиевыми лазерами. Помимо этого, их отличает компактность, малый вес и надежность.

РАЗДЕЛ 3. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Волоконно-оптические сенсорные системы (ВОСС) широко применяются в таких областях, как сейсмометрия нефтяных скважин, мониторинг состояния и контроль утечек в трубопроводах, регистрация деформаций сооружений и зданий.

ВОСС способны регистрировать различные параметры, такие как температура, растяжение, изгибы оптического волокна, прикладываемое давление, акустическое воздействие и многое другое. Принцип действия таких устройств заключается в следующем: излучение лазера, заведенное в оптоволокно, испытывает незначительные изменения при распространении в волокне, затем достигает детектора, который измеряет эти изменения. Используя различные методики анализа измеряемого сигнала, появляется возможность получать информацию об изменении параметров произвольного участка волокна [9].

Существует несколько способов классификации волоконно-оптических датчиков (ВОД). Одним из способов является классификация по регистрируемому параметру:

1. *Фазовые* – датчики, в которых используется высококогерентный источник излучения и производится измерение фазы световой волны, изменяющейся под влиянием внешнего параметра.

2. *Со спектральным кодированием* – датчики, где, в отличие от фазовых, используется источник излучения с широким спектром и возможностью анализа всего спектра.

3. *Амплитудные* – датчики, в которых измеряемый параметр модулирует интенсивность проходящей или отраженной световой волны.

4. *Поляризационные* – датчики, использующие информацию о поляризации световой волны.

ВОД также можно классифицировать по количеству точек, где происходит измерение: точечные (одна точка измерения в одном волокне на один блок обработки), квазираспределенные (ограниченное множество точек, обычно до 30 в одном канале, в одном волокне на один блок обработки), распределенные (измерения ведутся вдоль всего волокна с определенным разрешением на один блок обработки). Классификация датчиков по критерию протяженности чувствительного участка представлена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Классификация ВОД по критерию протяженности чувствительного участка [9]

К точечным ВОД можно отнести датчики на основе интерферометров Маха–Цендера, Майкельсона, Саньяка, Фабри–Перо. Из-за своей природы и принципа построения, такие датчики нецелесообразно использовать в задачах контроля протяженных участков: для получения множества контролируемых точек понадобится большое количество волокон (как говорилось выше, для точечных датчиков: одна точка измерения в одном волокне на один блок обработки) и, как следствие, значительное увеличение массогабаритных характеристик кабеля. К квазираспределенным датчикам относятся датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), а к распределенным, – использующие рассеяния излучения в волокне: Рэлея, Мандельштама–Бриллюэна или Рамана [9].

3.1. Датчики на основе многомодовых волокон

3.1.1. Введение

В конце второй половины XX века было открыто, что в многомодовых волноводах наблюдается явление самовоспроизведения светового поля (эффект Тальбота). Данное открытие дало толчок для развития большого спектра оптоволоконных устройств на основе многомодовой интерференции (Multimode interference, MMI). На принципе MMI основа-

на работа таких устройств как оптоволоконные объединители, сплиттеры, биополимерные волноводы.

В настоящее время на явлении MMI работают не только устройства для управления излучением, но и различные типы датчиков: механические (вибрации, давления), электромагнитные (магнитного поля, электрического поля, тока), химические (концентрации газа, относительной влажности), оптические (длины волны) (рис. 3.2). Наблюдаются также новые направления разработки на базе данного эффекта, такие как полимерные волокна, устройства подстройки длины волны, устройства получения термооптического коэффициента жидкостей, устройства для измерения динамики многокомпонентных жидкостей [10].

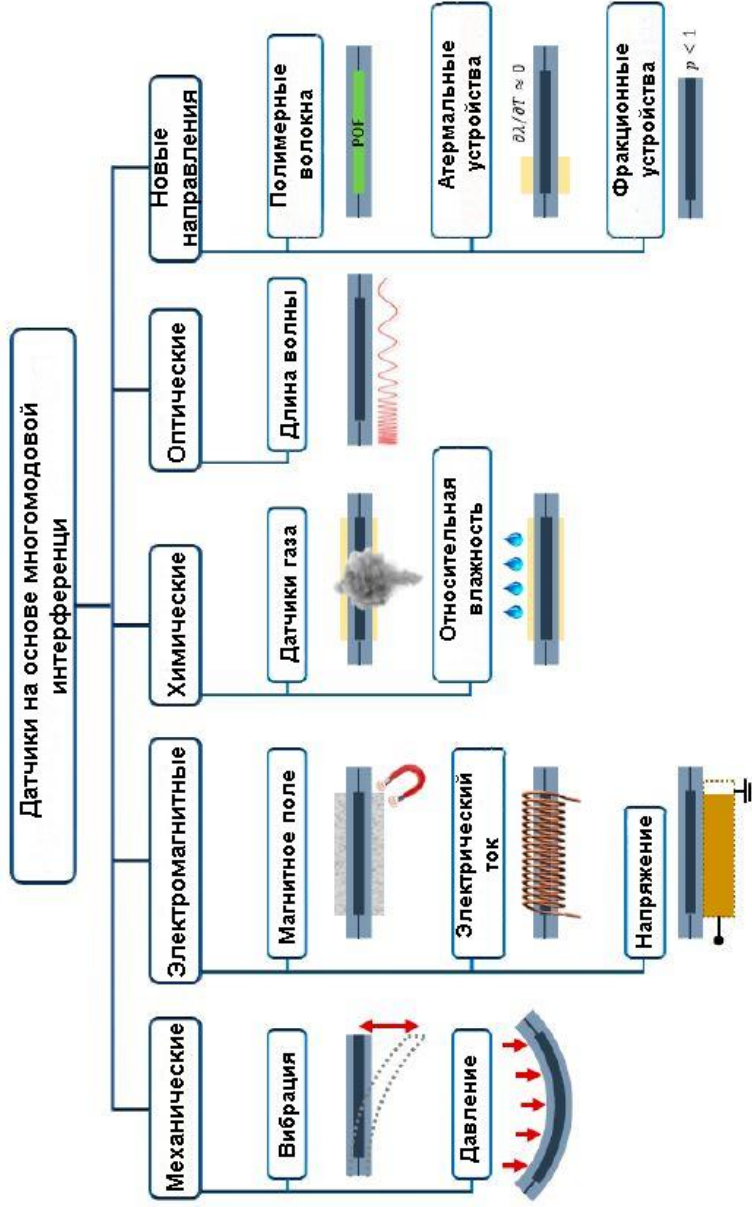


Рис. 3.2. Схематический обзор типов датчиков, работающих на явлении ММИ, рассмотренных в данном разделе [10]

3.1.2. Общий принцип волоконных MMI-устройств

В общем случае устройство на базе MMI представляет собой соединение одномодового волокна (single mode fiber или SMF) с отрезком многомодового волокна (Multimode fiber, MMF) или отрезок MMF, расположенный между двумя SMF (рис. 3.3, 3.4). Предполагается, что волокна располагаются соосно без какого-либо смещения между центрами. Принцип работы основан на расчете энергии, передаваемой из SMF в каждую из мод, поддерживаемых MMF. Для расчёта принимается следующая модель: все моды распространяются по MMF, каждая со своей константой распространения. В каждой точке распространения результирующее поле рассчитывается как когерентная суперпозиция, т.е. на основе поля, создаваемого всеми модами.



Рис. 3.3. Структура одномодовое волокно–многомодовое волокно (SMF–MMF-структура или SM-структура) в MMI-устройствах [10]



Рис. 3.4. Структура одномодовое волокно–многомодовое волокно–одномодовое волокно (SMF–MMF–SMF-структура или SMS-структура) в MMI-устройствах [10]

В общем случае на вход в многомодовое волокно ($z = 0$) приходит суперпозиция всех мод. Пространственное распределение поля для m -моды в радиально симметричной среде:

$$E(r, z) = \sum_m c_m F_m(r) \exp(-i\beta_m z), \quad (3.1)$$

где коэффициент возбуждения m -й моды:

$$c_m = \begin{cases} c_m^{(1)} = \sqrt{\eta_m} \\ c_m^{(2)} = \left[\frac{J_0(u_m)}{K_0(u_m)} \right] c_m^{(1)}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Коэффициент связи мощности:

$$\eta_m = \frac{2 \left(\frac{w}{a} \right)^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{w^2}{a} \right) (u_m)^2 \right]}{J_0^2(u_m) + J_1^2(u_m) + \left[\frac{K_1^2(w_m)}{K_0^2(w_m)} - 1 \right] J_0^2(u_m)}, \quad (3.3)$$

где u_m , w_m – поперечные волновые числа, a – радиус сердцевины волокна, J_0 и K_0 – функция Бесселя первого типа и модифицированная функция Бесселя второго типа.

$$u_m = \left(2m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{2}, \quad (3.4)$$

$$w_m = \sqrt{V^2 - u_m^2}, \quad (3.5)$$

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) a \sqrt{n_r^2 - n_c^2}, \quad (3.6)$$

где n_r , n_c – показатели преломления сердцевины и оболочки волокна. Для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления константа распространения рассчитывается следующим образом:

$$\beta_m \approx k_0 n_r - \left(2m - \frac{1}{2} \right)^2 \frac{\pi^2}{8k_0 n_c a^2}, \quad (3.7)$$

$$\beta_m = k_0 n_{eff,m}, \quad (3.8)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновой вектор свободного пространства.

3.1.3. Спектральные свойства волоконных MMI устройств

Длина многомодового волокна в MMI-устройствах является ключевым параметром, влияющим на выходные характеристики устройства. Изображения входного поля формируются на эффективных расстояниях $L = p(3L_\pi/4)$, где $p = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер изображения, по-

рожденного эффектом самовоспроизведения, $L_\pi = 4n_{eff}W_{eff}^2/(3\lambda_0)$ – длина биений между двумя модами низшего порядка, а n_{eff} и W_{eff} – эффективные показатель преломления и диаметр волокна (рис. 3.5а).

Устройства, работающие на эффекте ММИ, имеют свойство фильтра (рис. 3.5б). Пиковая длина волны для изображения p рассчитывается по формуле

$$\lambda_{peak} = p \frac{n_{eff}W_{eff}^2}{L}, \quad (3.9)$$

где L – длина ММФ.

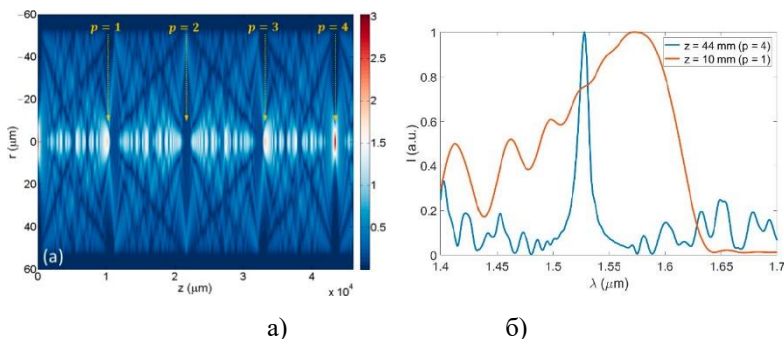


Рис. 3.5. Распределение интенсивности поля и спектральный отклик в SMF–MMF-структуре: **а)** распределение интенсивности поля в SMF–MMF-структуре. Моделирование проводилось на длине волны 1550 нм для SMF/MMF с диаметром сердцевинки $a = 8,6/105$ мкм и числовой апертурой $NA = 0,12/0,22$. Расстояние z соответствует расстоянию распространения излучения в ММФ, т.е. при $z = 0$ место соединения SMF и ММФ; **б)** нормированный спектральный отклик от SMF–MMF-структуры с диаметрами сердцевинки $a = 8,6/105$ мкм и числовой апертурой $NA = 0,12/0,22$. Две кривые демонстрируют зависимость интенсивности выходного сигнала от длины волны излучения при различных длинах ММФ, соответствующих изображениям $p = 1$ и $p = 4$ [10]

3.1.4. Датчик показателя преломления, температуры, смещения, механического напряжения

Благодаря выражению 3.9 могут детектироваться такие параметры как показатель преломления, температура, смещение, механическое напряжение [11]. Приемная часть устройств ММИ может быть как спектральной, так и амплитудной.

Датчик показателя преломления

Например, при изменении показателя преломления сердцевины или оболочки MMF, при условии, что геометрические параметры волокна остаются неизменными, изменения λ_{peak} будут связаны с изменением n_{eff} . Эффективный показатель преломления зависит от показателей преломления сердцевины и оболочки. Используя данную функциональную зависимость, можно определять показатель преломления исследуемой жидкости.

Для проведения таких экспериментов в качестве MMF применяется оптическое волокно без сердцевины (No-core fiber, NCF). Волокно погружается в жидкость, показатель преломления, которой исследуется таким образом, NCF выполняет роль сердцевины MMF, а исследуемая жидкость – роль оболочки (рис. 3.6).

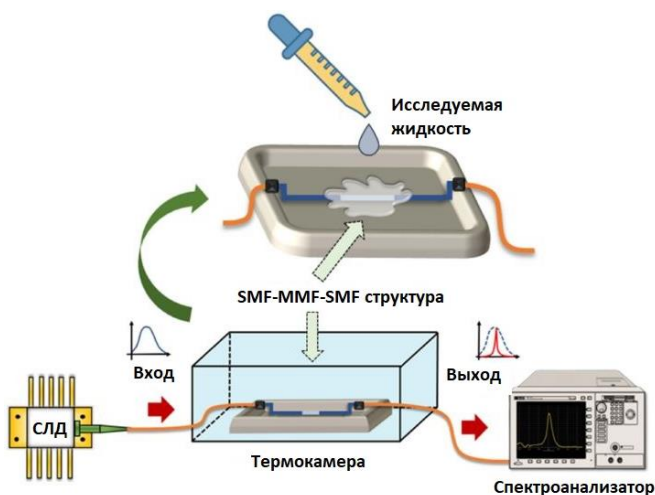


Рис. 3.6. Схема установки для измерения показателя преломления жидкости [12]. В качестве источника излучения использован суперлюминесцентный диод (СЛД)

В табл. 3.1 приведены характеристики датчиков показателя преломления, единицы показателя преломления обозначены как RIU (Refractive Index Unit).

Таблица 3.1

Характеристики датчиков показателя преломления

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2014	1,333–1,381	259,85 нм/RIU	[13]
2015	1,334–1,434	1923 нм/RIU	[14]

Датчик смещения

В датчиках смещения, работающих на MMI, используется зависимость между λ_{peak} и L . Например, при изменении положения SMF относительно MMF будут наблюдаться изменения в λ_{peak} .

Датчик механического напряжения

В датчиках механического напряжения используется зависимость λ_{peak} от W_{eff} . Благодаря тому, что данная зависимость квадратичная, даже малые изменения в диаметре MMF будут заметно влиять на величину λ_{peak} . Однако кварцевые оптические волокна имеют низкий коэффициент теплового расширения и фотоупругости, что накладывает ограничения на применение таких датчиков.

3.1.5. Механические оптоволоконные датчики

Датчик вибрации

В большинстве датчиков вибрации используется какой-либо проводник (мембрана или балка) акустических волн, присоединенный к волокну. Первая схема датчика вибрации на основе MMI представляла собой SMF–MMF–SMF-структуру, присоединенную к алюминиевой мембране, которая передавала акустические волны оптическому волокну. Уровень акустических вибраций в такой схеме измеряется по оптическим потерям в SMF–MMF–SMF-структуре. Человеческий голос в таких структурах улавливается на расстоянии 2-х метров. В таких датчиках применяются различные расположения MMF, такие как планарное или U-форма (рис. 3.7).

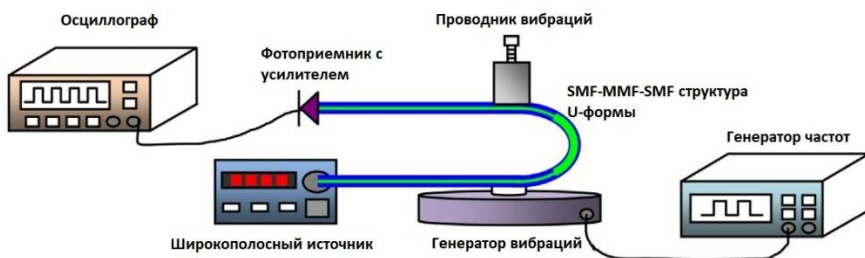


Рисунок 3.7. Схема датчика вибраций [15]

В настоящий момент известна только одна схема на основе MMI, в которой акустические вибрации улавливаются непосредственно в самом волокне. Такой схемой является SMF–MMF-структура с напылением высокоотражающего материала на торец MMF, например золота [16]. Стоит отметить, что датчики данного типа применяются не только в лабораториях, но и на практике.

Датчик давления

За период с 1999 по 2016 год были предложены различные схемы датчиков давления основанных на явлении MMI (табл. 3.2). Общий принцип для всех схем заключается в передачи деформации тонкой мембраны (акрил, полимер) волноводу или объединителю, работающему на MMI. При давлении на мембрану связанный с ней волновод претерпевает растяжение или изменение эффективного показателя преломления (эффект фотоупругости), вследствие чего наблюдается спектральный сдвиг или изменение интенсивности излучения, проходящего через волновод или объединитель (рис. 3.8).

Таблица 3.2

Характеристики датчиков давления

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2010	0–140 psi (0–965,27 кПа)	4 мВ/psi	[16]
2011	0–60 psi (0–413,68 кПа)	3 мкВ/psi	[17]
2013	0–7 бар (700 кПа, 101 psi)	56 мВ/бар (3,86 мВ/psi) (0–2,5 бар; 0–37 psi) 22 мВ/бар (1,52 мВ/psi) (2,5–7 бар; 37–100 psi)	[18]
2016	0–140 psi (0–960 кПа)	$-0,145 \times 10^{-3}$ мВт/кПа	[19]

Стоит отметить, что рабочий диапазон по давлению и чувствительность у датчиков такого типа имеют ограничения в связи с хрупкостью и низким коэффициентом фотоупругости оптического волокна. Возможным решением для снятия данных ограничений может быть применение пластикового оптического волокна.

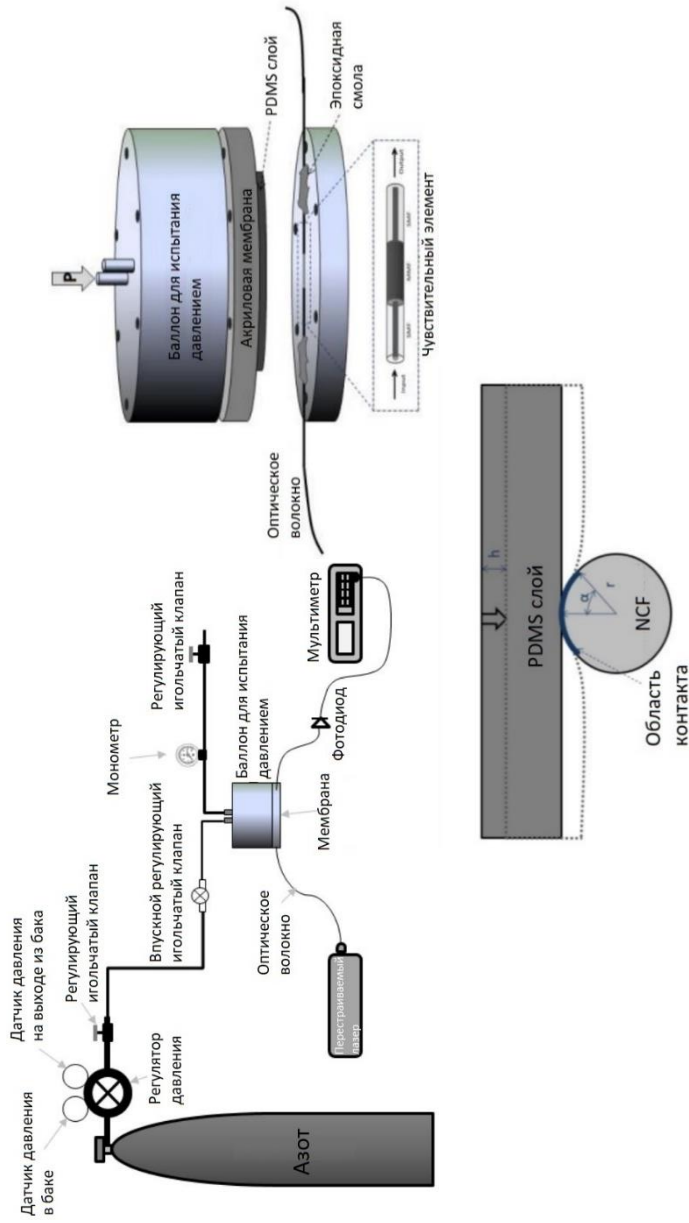


Рис. 3.8. Схема датчика давления [20]

3.1.6. Электромагнитные оптоволоконные датчики

Датчик магнитного поля

Большинство датчиков магнитного поля представляет собой SMF–MMF–SMF-структуру, в роли MMF выступает NCF, погруженный в ферромагнитную жидкость. Ферромагнитная жидкость представляет собой суспензию наночастиц, чувствительных к воздействию внешнего магнитного поля. При изменении внешнего магнитного поля меняется ориентация наночастиц, что приводит к изменению эффективного показателя преломления суспензии.

Существуют различия в схемах:

- По типу NCF (цилиндрическое и квадратное сечения).
- По режиму работы (на просвет/отражение и по интенсивности / спектральному сдвигу).
- По механизму улучшения чувствительности (травление, сужение, нанопокрывтие).

Для датчиков магнитного поля на базе MMF характерны следующие ограничения:

- Низкая чувствительность (исключение – сенсор U-формы (42)).
- Небольшая область линейной зависимости между показателем преломления и величиной магнитного поля.
- Медленный отклик на изменение магнитного поля.

В табл. 3.3 приведены характеристики датчиков магнитного поля.

Таблица 3.3

Характеристики датчиков магнитного поля

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2013	0–500 Э (0–50 мТл)	–0,01939 дБ/Э (–0,1939 дБ/мТл)	[21]
2013	0–450 Э (0–45 мТл)	–16,86 пм/Э (–168,6 пм/мТл)	[22]
2013	0–220 Э (0–22 мТл)	90,5 пм/Э (905 пм/мТл) 0,748 дБ/мТл	[23]

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2014	0–100 Э (0–10 мТл)	275,7 пм/мТл (прямой; 0–5 мТл) 742,9 пм/мТл (прямой; 5–10 мТл) 3185,2 пм/мТл (U-форма; 2–10 мТл)	[24]
2015	0–330 мТл	1,45 дБ/Тл 6 нм/Тл	[25]

Датчик электрического тока

Датчики электрического тока на основе MMI устроены схоже с датчиками магнитного поля и представляют собой SMS-структуру, в которой роль MMF играет NCF, погруженный в магнитную жидкость (табл. 3.4). Отличие от датчиков магнитного поля состоит в том, что датчик чувствителен к связи магнитного поля с электрическим током, и может быть измерено значение тока. Конструкция датчика тока может быть реализована как на просвет SMS-структуры, так и на отражение.

Таблица 3.4

Характеристики датчиков электрического тока

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2014	0–10 А	1,08 В/А	[26]
2014	0–10 А	2,18 В/А	[27]

Датчик электрического напряжения

Данный тип датчиков мало изучен. Для регистрации электрического напряжения SMS-структуру было предложено приклеить к пьезоэлектрическому кристаллу и регистрировать изменения электрического напряжения по растяжению волоконной структуры. Применение пластиковых волоконных структур, способных выдерживать большие деформации, способно улучшить чувствительность датчика.

3.1.7. Химические датчики

Датчик относительной влажности

В большинстве работ, посвященных датчикам относительной влажности (Relative humidity, RH) на основе MMI, явление MMI наблюдается в SMS-структуре, где роль MMF выполняет NCF (табл. 3.5). Чувствительность к изменению влажности окружающей среды достигается посредством нанесения покрытий различных химических составов на NCF. Нанесенное покрытие выступает в качестве оболочки для NCF, показатель преломления которой меняется в зависимости от относительной влажности окружающей среды.

Химические составы, применяющиеся в датчиках RH:

- Поливиниловый спирт (polyvinyl alcohol или PVA).
- Комбинация гидроксэтилцеллюлозы (hydroxyethyl cellulose или HEC) и поливинилиденфторида (polyvinylidene fluoride или PVDF).
- Суспензия наночастиц диоксида кремния SiO₂.
- Агарозный гель (agarose gel film или AGF).
- Желатин.

Таблица 3.5

Характеристики датчиков относительной влажности

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2011	80–89%RH	0,18 нм/%RH	[28]
2013	40–90%RH	0,015768 дБ/%RH (0,5 см NCF) 0,1359 дБ/%RH (1,0 см NCF) 0,196 дБ/%RH (2,0 см NCF)	[29]
2013	30–80%RH	0,09 нм/%RH 0,3 дБ/%RH	[30]
2014	35–85%RH	0,139 нм/%RH (dip A) 0,223 нм/%RH (dip B)	[31]
2016	43,6–98,6%RH 83–96,6%RH	456,21 пм/%RH (dip A) 584,2 пм/%RH (dip B)	[32]
2017	30–75%RH	–149 пм/%RH –0,075 дБ/%RH	[33]
2017	40–90%RH	0,14 дБ/%RH	[34]

Газовые датчики

Газовые датчики на основе MMI устроены схоже с датчиками влажности: в SM- или SMS-структуре в качестве MMF используется участок NCF, который покрывается химическим веществом, показатель преломления которого изменяется при наличии газового соединения определенного состава в окружающей среде. При изменении эффективного показателя преломления, вследствие наличия газа в окружающей среде, регистрируется спектральный сдвиг излучения, прошедшего через SM- или SMS-структуру. Оптические схемы используются как на просвет, так и на отражение (табл. 3.6).

Химические составы, применяющиеся в газовых датчиках:

- Композит криптофан А/полисилоксан (cryptophane A/polysiloxane) для регистрации метана.
- Композит TiO_2/ZnO для регистрации H_2S .
- Бромкрезоловый пурпурный (bromocresol purple) для регистрации аммиака.

Таблица 3.6

Характеристики газовых датчиков

Год	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
2016	0–15%	0,85 нм/%	[35]
	1,5–3,5%	0,24 нм/%	
2021	0–50 ppm	21,26 пм/ppm	[36]

Здесь ppm – одна миллионная доля процента (Parts per million).

Датчики длины волны

На данный момент была предложена только одна схема датчика длины волны на основе MMI. Принцип работы датчика основан на работе SMS-структуры как краевого фильтра при условии $p = 1$. Используют две совмещенные между собой структуры, которые настроены так, что длинноволновый край одного фильтра перекрывается с коротковолновым краем другого. Предложенный датчик имеет разрешение менее 10 пм и рабочий диапазон 1530–1560 нм.

3.1.8. Новые тренды в датчиках на основе МММ

Применение полимерных волокон

Ранее уже упоминалось, что применение кварца в качестве материала для изготовления волновода для датчика на основе МММ накладывает некоторые ограничения:

- Малый коэффициент теплового расширения.
- Низкая фотоупругость.
- Хрупкость.

От перечисленных выше ограничений можно уйти, используя вместо кварцевых волокон пластиковые (Plastic optical fiber, POF). Такое решение особенно часто применяется в датчиках натяжения и температуры. В большинстве схем МММ датчиков, где применяются POF, используется стандартная SMF–MMF–SMF-структура, в которой кварцевое SMF-волокно приклеивается к пластиковому MMF при помощи оптического клея.

При изготовлении POF используются различные полимеры:

- Полиметилметакрилат (Polymethylmethacrylate или PMMA).
- Перфторированный (Perfluorinated или PFGI).
- Хлорированный (Chlorinated или PCGI).
- Сэндвич структура из POF с чередованием термически обработанных (карбонизированных) участков.

В табл. 3.7 представлены характеристики датчиков на базе полимерных волокон.

Таблица 3.7

Характеристики разных типов датчиков на базе полимерных волокон

Измеряемый параметр	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
Деформация	0–20 000 мк	–1,73 пм / мк	[37]
Деформация	100–500 мк	–112 пм / мк	[38]
Температура	26–27 °C	–49,8 нм/°C	
Деформация	0–1000 мк	–4,47 пм / мк	[39]
Температура	27–28 °C	–6,76 нм/°C	
Температура	10–70 °C	+7,7 нм /°C (комнатная температура) +202 нм /°C (около 70 °C)	[40]

Измеряемый параметр	Рабочий диапазон	Чувствительность	Ссылка
Деформация Температура	50–300 мє 36–37,5 °С	–121,8 пм / мє (просвет) –122,2 пм / мє (отражение) +9,63 нм / °С (просвет) +10,1 нм / °С (отражение)	[41]
Температура	24–30 °С	+2,17 нм / °С (термически обработан- ный) +0,75 нм / °С (без термической обра- ботки)	[42]
Деформация	0–540 мє	–48 пм / мє	[43]
Магнитное поле	0–240 мТл	113,5 пм / мТл	[44]

В таблице использованы единицы микродеформации – microstrain (мє); 100 единиц микродеформации соответствуют 0,1% растяжению или укорочению объекта.

Атермальные датчики

В большинстве ситуаций в кварцевых SMS-структурах на характеристики ММИ-устройства оказывают влияние термооптический эффект и эффект теплового расширения. Для того чтобы уйти от температурной зависимости, применяют схему, в которой каскадируют ММФ-секции таким образом, чтобы температурные эффекты компенсировали друг друга. В таком случае пиковая длина волны:

$$\lambda_{peak} = p \sum_{i=1}^N \left(\frac{n_{eff,i} W_{eff,i}^2}{L} \right) \left(\frac{L_i}{L} \right), \quad (3.10)$$

где N – количество ММФ-секций, $\frac{1}{L} \sum_{i=1}^N L_i = 1$, $W_{eff,i}$ – эффективный оптический диаметр каждой ММФ-секции.

Чувствительность к изменению температуры всей структуры:

$$\frac{\partial \lambda_{peak}}{\partial T} = p \frac{\partial}{\partial T} \left[\left(\frac{n_{eff,i} W_{eff,i}^2}{L} \right) \left(\frac{L_i}{L} \right) \right]. \quad (3.11)$$

Для того чтобы получить независимость от температуры всей структуры, нужно, чтобы выполнялось условие $\frac{\partial \lambda_{peak}}{\partial T} = 0$.

Применение такой схемы позволило создать термостабилизированные устройства на основе MMI, например волоконный лазер с температурной зависимостью 1,0 пм/°С в температурном диапазоне 25–100 °С. Также термостабилизированность MMI-структуры избавляет от необходимости калибровать датчик по температурной шкале при детектировании различных параметров.

Динамическое рассеяние света на основе фракционных явлений MMI

В устройствах для рассеяния света секция MMF, где наблюдается явление MMI, помогает передаче информации и не действует как преобразователь. Например, наличие MMF в установках, применяющихся для низкокогерентного динамического рассеянного света (Low-coherence dynamic light scattering, LC-DLC), позволяет увеличить область исследования без потери качества сигнала. То есть MMF позволяет эффективнее собирать свет. Одной из областей применения таких установок является изучение динамики сложных жидкостей.

3.2. Распределенные акустические датчики

3.2.1. Когерентный рефлектометр (Дунай Т8)

Одним из вариантов контроля параметров на протяженном участке является применение распределенных волоконно-оптических датчиков (рис. 3.9). В данном типе датчиков в качестве чувствительного элемента используется само оптическое волокно, протяженность которого может достигать нескольких десятков, а иногда и сотен километров.

Одним из типов распределенных волоконно-оптических датчиков является когерентный рефлектометр. Принцип действия когерентного рефлектометра схож с принципом работы обычного рефлектометра (OTDR): короткий зондирующий импульс направляется в оптическое волокно и регистрируются рассеянное и отраженное обратное излучения. В когерентном рефлектометре отраженные сигналы складываются когерентно: суммарный сигнал при этом зависит от разности фаз отраженных сигналов и может меняться от нуля (когда разность фаз π) до максимального значения (когда разность фаз нулевая). Разность фаз очень чувствительна к изменению длины волокна. С помощью когерентного рефлектометра можно отследить такие воздействия на волокно, как тепловое, виброакустическое, механическое растяжение.

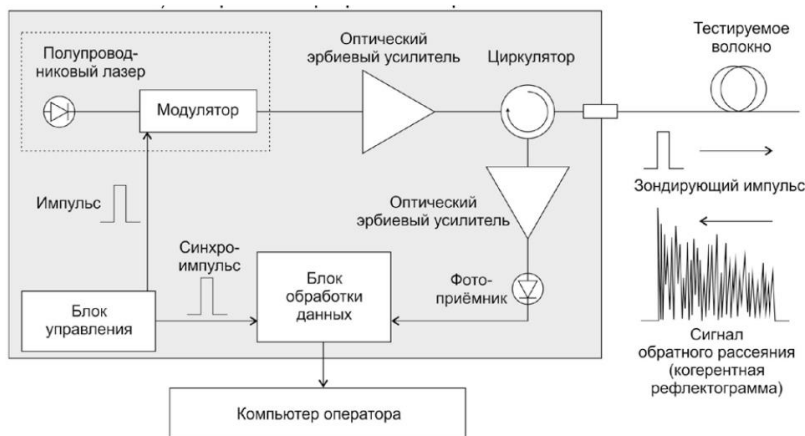


Рис. 3.9. Схема когерентного рефлектометра [45]

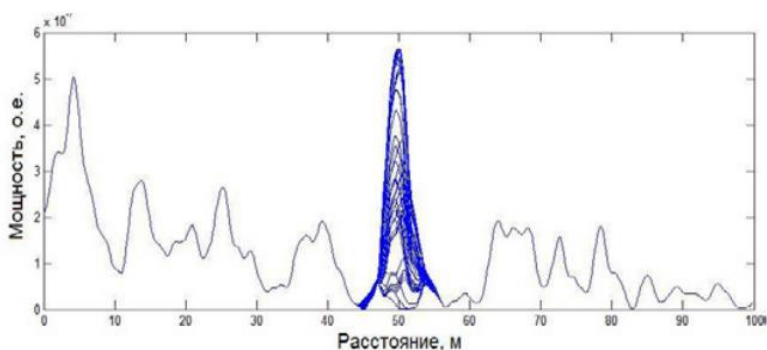


Рис. 3.10. Множество последовательных когерентных рефлектограмм, наложенных друг на друга при наличии воздействия на 50-м метре (численное моделирование) [45]

В основе работы ПАК Дунай (Т8 Сенсор) лежит принцип когерентной рефлектометрии. На основе снятой последовательности рефлектограмм можно локализовать места воздействий, таких как

- Перемещение людей (10 м от кабеля).
- Разработка грунта ручным способом (20 м от кабеля).
- Перемещение техники (100 м от кабеля).
- Разработка грунта механизированным способом (300 м от кабеля).

Также система может применяться для

- Мониторинга обстановки вдоль волоконно-оптических кабелей связи.
- Охраны государственной границы и протяженных объектов критической инфраструктуры.
- Мониторинга состояния автомобильных и железных дорог, а также анализа аварийных ситуаций, средней скорости потока и интервального регулирования.
- Мониторинга линий электропередач и силовых кабелей на предмет локализации короткого замыкания, удара молнии, локального перегрева, гололедообразования и повышенных вибраций вследствие ветра.

Система надёжно распознаёт более 10 типов событий, включая перемещение пешехода, ручную копку, проезд грузового автомобиля, работу тяжёлой техники, подкоп, утечки, короткое замыкание на линиях электропередач, а также позволяет с лёгкостью добавлять специфичные для заказчика новые классы событий благодаря распознаванию сигналов на основе дообучаемых нейронных сетей [46].

3.3. Оптические датчики на основе анализа спекл-картин

3.3.1. Введение

Если осветить рассеивающую поверхность, например листа бумаги, когерентным излучением, то на поверхности будут наблюдаться пятна (рис. 3.11а). Причина появления этих пятнистых структур заключается в том, что от всех точек исследуемого объекта отражаются световые волны, способные к интерференции. Далее, на сетчатке глаза формируются дифракционные картины, которые интерферируют между собой, и мы видим пятна или спеклы (рис. 3.11б, в). Спекл-структуры можно наблюдать не только глазом, но и при помощи камеры. Также спеклы можно наблюдать не только в области изображения объекта. Спекл-структуры можно обнаружить в пространстве вокруг освещенного объекта, например при помощи фотопластины, находящейся на расстоянии от объекта, которое отлично от области изображения. Спеклы, регистрируемые в области изображения объекта, называют *спеклами Фраунгофера*, а регистрируемые на некотором расстоянии от объекта – спеклами Френеля. С одной стороны, наличие спекл структур в изображении объекта ухудшает качество изображения, с другой – спеклы могут быть использованы в метрологических целях [47].

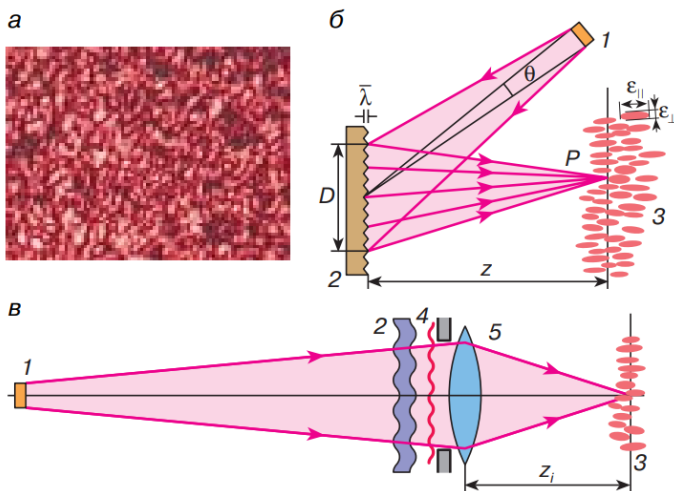


Рис. 3.11. Спекл-картина на шероховатой поверхности (а); оптические схемы наблюдения спекл-картин (б, в): 1 – источник света, 2 – неоднородный объект, 3 – схематичный вид продольного сечения слоя спекл-структуры, 4 – хаотически искаженный волновой фронт, 5 – изображающая оптическая система [48]

Применяются схемы, в которых к рассеянному свету добавляют опорное излучение (рис. 3.12). Результирующее изображение, полученное в такой схеме, включает в себя и спекл-структуру, и результирующее интерференционное поле, полученное при взаимодействии опорного излучения с излучением, рассеянным на объекте. Методы, в которых применяются такие схемы, получили названия *корреляционная спекл-интерферометрия* и *голографическая интерферометрия*.

Для того чтобы иметь представление о том, как формируется изображение при исследовании шероховатой поверхности когерентным излучением с опорным излучением, рассмотрим результаты моделирования (рис. 3.13). В методах исследования, где спеклы не используются в качестве носителей полезной информации, должны выполняться условия декоррелированности получаемых спекл-полей, для того чтобы снизить спекл-контраст, т. е. шум. В таких методах, как спекл-интерферометрия, где спеклы несут полезную информацию, должно выполняться условие коррелированности спекл-полей.

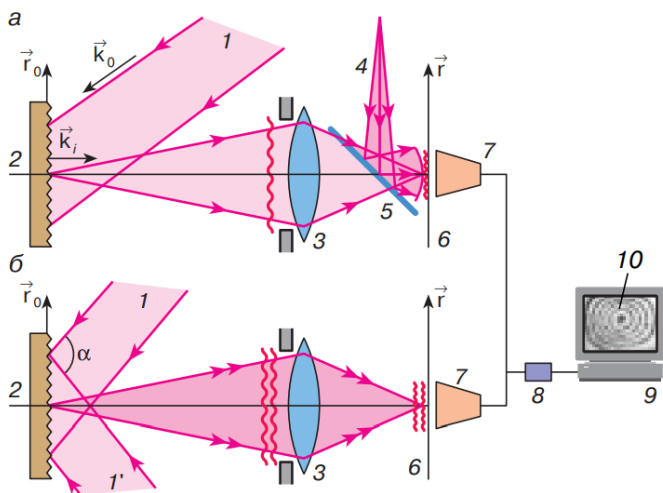


Рис. 3.12. Схемы корреляционных спекл-интерферометров для измерения нормальных (а) и тангенциальных (б) смещений точек шероховатой поверхности объекта: 1 и 1' – освещающие лазерные пучки, 2 – объект, 3 – линза, 4 – опорный пучок, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – плоскость регистрации, 7 – видеокамера, 8 – плата ввода изображений, 9 – ПК, 10 – образец картины полос корреляции деформации изгиба [48]

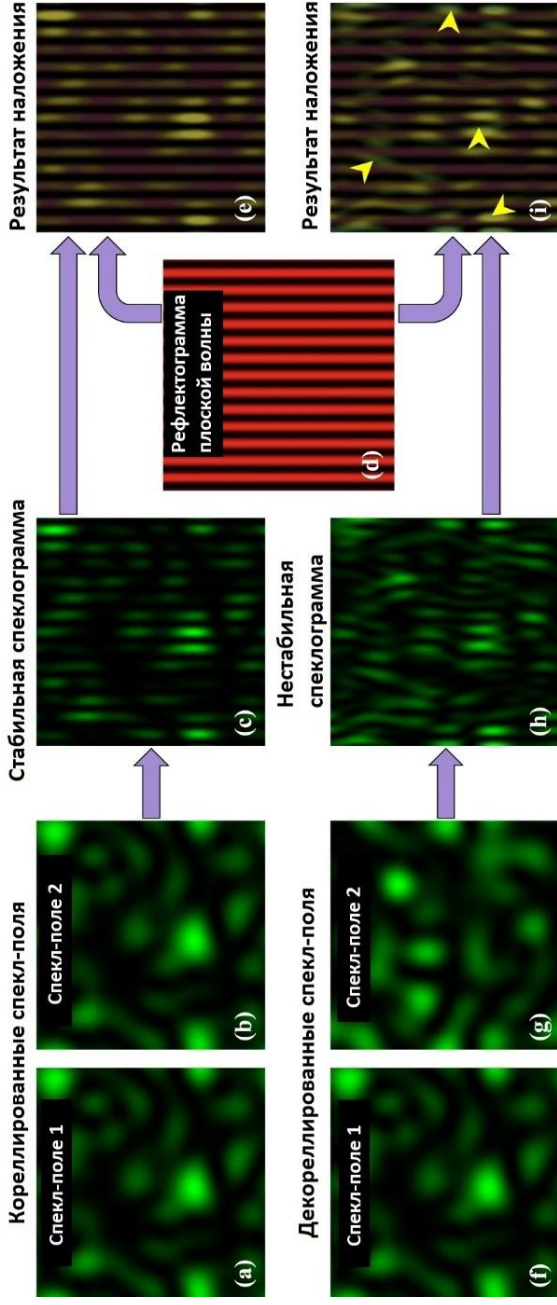


Рис. 3.13. Результат наложения коррелированных и декоррелированных спекл-полей: **a, b** – одинаковые спекл-поля; **c, h** – суперпозиция спекл-полей **a, b**; **d** – суперпозиция двух плоских волновых фронтов; **e** – наложение интерферограммы коррелированных спекл-полей и интерферограммы плоских волновых фронтов. **f–h** – неидентичные спекл-поля и их суперпозиция; **i** – наложение интерферограммы некоррелированных спекл-полей и интерферограммы плоских волновых фронтов [49]

3.3.2. Голографический виброметр

Принцип работы *голографического виброметра* основан на регистрации изменения интерференционной картины во времени. Голографический виброметр состоит из лазера, работающего в непрерывном режиме, высокоскоростной камеры, делителей излучения и вибрирующего элемента (рис. 3.14).

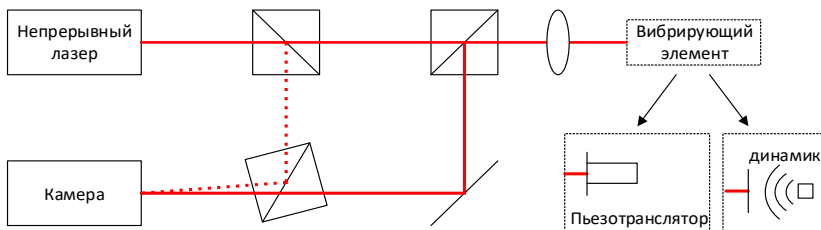


Рис. 3.14. Схема экспериментальной установки голографического виброметра [50]

Как и двулучевые интерферометры, виброметр имеет *опорное плечо* и *предметное*. В предметном плече излучение отражается от вибрирующего элемента (пьезотранслятора или акустического динамика). На рис. 3.15 приведены результаты эксперимента, проведенного со светоотражающей пленкой и шероховатой бумагой (визитка).

В процессе эксперимента к полученным изображениям применялось двумерное преобразование Фурье для получения пространственных частот (Spatial Frequency). Далее, для восстановления амплитуды (Recovered Amplitude) и фазы (Recovered Phase) проводилась операция взвешивания с использованием окна Ханна (область окна Ханна выделена красным на Spatial Frequency) и применялось обратное двумерное преобразование Фурье.

Применение высокоскоростной камеры в схеме виброметра даёт возможность снизить спекл-шум, возникающий при исследовании шероховатых поверхностей по сравнению с коммерческими виброметрами на основе одиночного фотодетектора. Также предлагаемая схема даёт выигрыш в чувствительности приемника к сдвигу объекта при исследовании рассеивающих поверхностей (рис. 3.16).

Чувствительность к сдвигу у голографического виброметра в обоих случаях (отражающая, рассеивающая поверхности) составляет $< 100 \text{ фм}/\sqrt{\text{Гц}}$. Чувствительность коммерческого виброметра составляет $\sim 220 \text{ фм}/\sqrt{\text{Гц}}$ в случае отражающей поверхности и только $4 \text{ пм}/\sqrt{\text{Гц}}$ для рассеивающей поверхности.

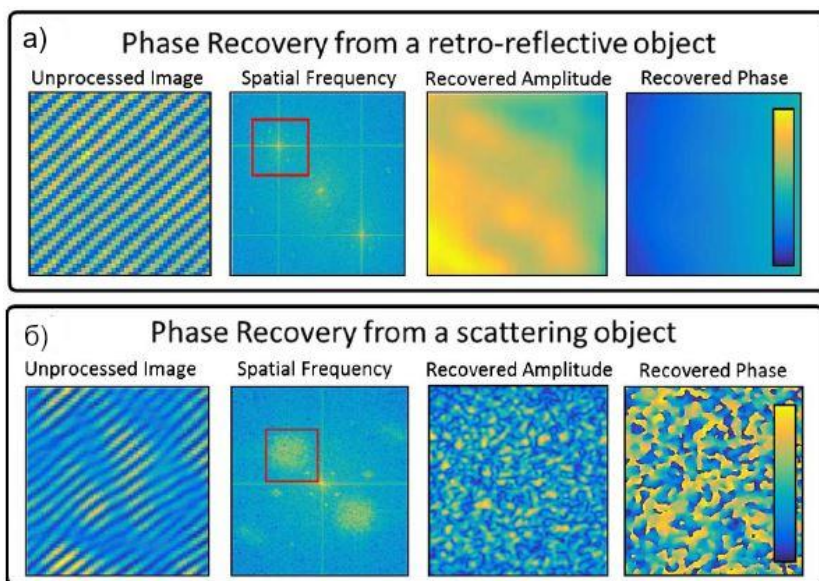


Рис. 3.15. Исходное изображение, результат пространственного преобразования Фурье исходных изображений, восстановленная амплитуда, восстановленная фаза для светоотражающей пленки (а) и для шероховатой бумаги (б). Изменение цвета на результате восстановления фаз соответствует изменениям фазы от $-\pi$ до π радиан [50]

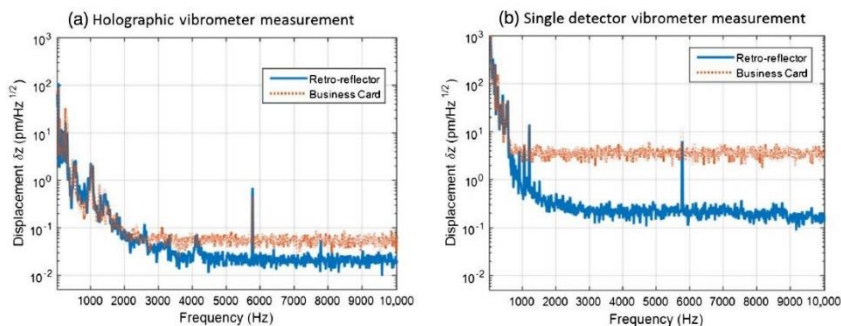


Рис. 3.16. Сравнение чувствительности к сдвигу голографического виброметра и коммерческого виброметра с одиночным фотодетектором [50]

Заключение

В учебном пособии представлены наиболее важные вопросы волоконной оптики. Рассмотрены многомодовые, одномодовые, фотонно-кристаллические волокна и способы их изготовления. Описаны такие явления, как затухание мощности сигнала в оптоволокне, дисперсия, нелинейные эффекты. Представлено подробное описание волоконно-оптических усилителей мощности. Особое внимание уделено практическим применениям оптоволокна: телекоммуникации, волоконные лазеры, медицина, современные разработки в области волоконно-оптических датчиков.

Список литературы

1. *Трещиков В.Н., Листвин В.Н.* DWDM-системы. Москва : Техносфера, 2021. 420 с.
2. Philip Russell, et al. Photonic Crystal Fibers // SCIENCE 17 Jan 2003. V. 299, I. 5605, P. 358–362. DOI: 10.1126/science.1079280.
3. <https://www.newport.com/t/photonic-crystal-fibers>
4. *Курков А.С., Наний О.Е.* Эрбиевые волоконнооптические усилители // Lightwave, Russian Edition. 2003. № 1. С. 14.
5. *Наний О.Е.*, ВКР усилители в оптических системах // Lightwave, Russian Edition. 2008. № 4. С. 48.
6. *Шихалиев И.И.* Увеличение производительности однопролетных когерентных линий связи с рамановскими усилителями : дис. на соиск. уч. степ. кандидата техн. наук; Москва, 2019.
7. Dawson J.W., Messerly M.J., Beach R.J., Shverdin M.Y., Stappaerts E.A., Sridharan A.K., Barty C.P.J. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power // Optics Express. 2008. 16(17). P. 13240-66.
8. Zhu J., Zhou P., Ma Y., Xu X., Liu Z. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers // Optics Express. 2011. 19(19). P. 18645-54.
9. *Степанов К.В.* Волоконно-оптическая сенсорная система с повышенной акустической чувствительностью на основе фазочувствительного рефлектометра : дис. на соиск. уч. степ. кандидата техн. наук. Москва, 2021.
10. Guzmán-Sepúlveda J.R., Guzmán-Cabrera R., Castillo-Guzmán A.A. Optical sensing using fiber-optic multimode interference devices: a review of nonconventional sensing schemes // Sensors 2021. 21(5). P. 1862.
11. Wang K., Dong X., Köhler M.H., Kienle P., Bian Q., Jacobi M., Koch A.W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): a review // IEEE Sensors journal 2021. 21(1). P. 132–142.
12. Fuentes-Rubio Y.A., Zúñiga-Avalos Y.A., Guzmán-Sepúlveda J.R., Domínguez-Cruz R.F. Refractometric detection of adulterated milk based on multimode interference effects // Foods 2022. 11(8). P. 1075.
13. Chen Y., Han Q., Liu T., Xiao H. Wavelength dependence of the sensitivity of all-fiber refractometers based on the singlemode–multimode–singlemode structure // IEEE Photonics Journal 2014. 6(4). P. 1–7.
14. Bai X., Wang H., Wang S., Pu S., Zeng X. Refractive index sensing characteristic of single-mode-multimode-single-mode fiber structure based on self-imaging effect // Optical Engineering. 2015. 54(10). P. 1–6.
15. Wu Q., Yang M., Yuan J., Chan H.P., Ma Y., Semenova Y., Wang P., Yu C., Farrell G. The use of a bend singlemode–multimode–singlemode (SMS) fibre structure for vibration sensing // Optics & Laser Technology. 2014. 63. P. 29–33.
16. Ruiz-Pérez V.I., Basurto-Pensado M.A., Urquiza-Beltrán G., May-Arrioja D.A., Gasca-Herrera E., Mondragón J.J.S., LiKamWa P.L. Optical fiber sensor for pressure based on multimode interference as sensitive element // Proceedings of the Latin America Optics and Photonics Conference, Recife, Brazil, 27–30 September 2010.

17. Ruiz-Pérez V.I., Basurto-Pensado M.A., LiKamWa P., Sánchez-Mondragón J.J., May-Arrijoja D.A. Fiber optic pressure sensor using multimode interference // Journal of Physics-Conference Series. Bristol, UK : IOP Publishing, 2011.
18. Mejía-Aranda A.R., Ruiz-Perez V.I., Basurto-Pensado M.A., Antúnez-Cerón E.E., May-Arrijoja D.A., LiKamWa P., Sanchez-Mondragon J.J. Design of a pressure sensor of 0–7 Bar in fiber optic using MMI methodology // Optik 2013. 124. P. 5927–5929.
19. May-Arrijoja D.A., Ruiz-Perez V.I., Bustos-Terrones Y., Basurto-Pensado M.A. Fiber optic pressure sensor using a conformal polymer on multimode interference device // IEEE Sens. J. 2015. 16. P. 1956–1961.
20. Ruiz-Pérez V.I.; Basurto-Pensado M.A.; LiKamWa P.; Sánchez-Mondragón J.J.; May-Arrijoja, D.A. Fiber optic pressure sensor using multimode interference // Journal of Physics: Conference Series 2011. 274(1). 012025.
21. Lin W., Miao Y., Zhang H., Liu B., Liu Y., Song B. Fiber-optic in-line magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference effects // Appl. Phys. Lett. 2013. 103. P. 151101.
22. Wang H., Pu S., Wang N., Dong S., Huang J. Magnetic field sensing based on singlemode–multimode–singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding // Opt. Lett. 2013. 38. P. 3765–3768.
23. Chen Y., Han Q., Liu T., Lan X., Xiao H. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode–multimode–single-mode structure and magnetic fluid // Opt. Lett. 2013. 38. P. 3999–4001.
24. Zhang R., Liu T., Han Q., Chen Y., Li L. U-bent single-mode–multimode–single-mode fiber optic magnetic field sensor based on magnetic fluid // Appl. Phys. Express 2014. 7. P. 072501.
25. Ascorbe J., Corres J.M., Arregui F.J., Matias I.R. Magnetic field sensor based on a single mode-multimode-single mode optical fiber structure // 2015 IEEE SENSORS, IEEE: Greenville SC USA 2015, P. 1–4.
26. Li L., Han Q., Chen Y., Liu T., Zhang R. An all-fiber optic current sensor based on ferrofluids and multimode interference // IEEE Sens. J. 2014. 14. P. 1749–1753.
27. Li L., Han Q., Liu T., Chen Y., Zhang R. Reflective all-fiber current sensor based on magnetic fluids // Rev. Sci. Instrum. 2014. 85. P. 83107.
28. Zhao Y., Jin Y., Liang H., Dong X., Wang J. All-fiber-optic sensor for relative humidity measurement // Proceedings of the Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, Dalian, China, 29–31 July 2011.
29. Xia L., Li L., Li W., Kou T., Liu D. Novel optical fiber humidity sensor based on a no-core fiber structure // Sens. Actuators A Phys. 2013. 190. P. 1–5.
30. An J., Zhao Y., Jin Y., Shen C. Relative humidity sensor based on SMS fiber structure with polyvinyl alcohol coating // Optik. 2013. 124. P. 6178–6181.
31. An J., Jin Y., Sun M., Dong X. Relative humidity sensor based on SMS fiber structure with two waist-enlarged tapers // IEEE Sens. J. 2014. 14. P. 2683–2686.
32. Miao Y., Ma X., He Y., Zhang H., Zhang H., Song B., Liu B., Yao J. Low-temperature-sensitive relative humidity sensor based on tapered square no-core fiber coated with SiO₂ nanoparticles // Opt. Fiber Technol. 2016. 29. P. 59–64.
33. Xu W., Shi J., Yang X., Xu D., Rong F., Zhao J., Yao J. Relative humidity sensor based on no-core fiber coated by Agarose-gel film // Sensors 2017. 17. P. 2353.

34. Wang X., Farrell G., Lewis E., Tian K., Yuan L., Wang P. A humidity sensor based on a singlemode-side polished multimode–singlemode optical fibre structure coated with gelatin // J. Light. Technol. 2017. 35. P. 4087–4094.
35. Li S., Li X., Yang J., Zhou L., Che X., Binbin L. Novel reflection-type optical fiber Methane sensor based on a no-core fiber structure // Mater. Today Proc. 2016. 3. P. 439–442.
36. Feng W.-L., Yang X.-Z., He Z., Liu M. Hydrogen sulfide gas sensor based on TiO₂–ZnO composite sensing membrane-coated no-core fiber // J. Phys. D Appl. Phys. 2021. 54. P. 135105.
37. Huang J., Lan X., Wang H., Yuan L., Wei T., Gao Z., Xiao H. Polymer optical fiber for large strain measurement based on multimode interference // Opt. Lett. 2012. 37. P. 4308–4310.
38. Numata G., Hayashi N., Tabaru M., Mizuno Y., Nakamura K. Ultra-sensitive strain and temperature sensing based on modal interference in Perfluorinated polymer optical fibers // IEEE Photon. J. 2014. 6. P. 1–7.
39. Numata G., Hayashi N., Tabaru M., Mizuno Y., Nakamura K. Strain and temperature sensing based on multimode interference in partially chlorinated polymer optical fibers // IEICE Electron. Express 2015. 12. P. 20141173.
40. Numata G., Hayashi N., Tabaru M., Mizuno Y., Nakamura K. Drastic sensitivity enhancement of temperature sensing based on multimodal interference in polymer optical fibers // Appl. Phys. Express. 2015. 8. P. 72502.
41. Kawa T., Numata G., Lee H., Hayashi N., Mizuno Y., Nakamura K. Single-end-access strain and temperature sensing based on multimodal interference in polymer optical fibers // IEICE Electron. Express. 2017. 14. P. 20161239.
42. Kawa T., Numata G., Lee H., Hayashi N., Mizuno Y., Nakamura K. Temperature sensing based on multimodal interference in polymer optical fibers: Room-temperature sensitivity enhancement by annealing // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. 56. P. 78002.
43. Mizuno Y., Hagiwara S., Kawa T., Lee H., Nakamura K. Displacement sensing based on modal interference in polymer optical fibers with partially applied strain // Jpn. J. Appl. Phys. 2018. 57. P. 058002.
44. Leal-Junior A., Díaz C., Frizera A., Lee H., Nakamura K., Mizuno Y., Marques C. Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing // Adv. Photon. Res. 2021. 2. P. 2000078.
45. Горбуленко В.В. Леонов А.В. Марченко К.В. Трещиков В.Н. Волоконно-оптическая система мониторинга «Дунай» // Фотон-экспресс 2014. 5(117). С. 12–15.
46. Бухарин М.А. Горбуленко В.В. Наний О.Е. Никитин С.П. Трещиков В.Н. Фомиряков Э.А. Харасов Д.Р. Когерентный Рэлеевский рефлектометр. Теперь и измерение температуры // Фотон-экспресс. 2019. 2(154). С. 14–19.
47. Франсон М. Оптика спеклов. Москва : Мир, 1980. 171 с.
48. Рябухо В.П. Спекл-интерферометрия // Соровский образовательный журнал 2001. 7(5). С. 102–109.
49. Ahmad A. Jayakumar N. Ahluwalia B.S. Demystifying speckle field interference microscopy // Scientific Reports. 2022. 12. P. 10869.
50. Redding B. Davis A. Kikendall C. Damdridge A. Measuring vibrational motion in the presence of speckle using off-axis holography // Applied Optics 2016. 55(6). P. 1406–1411.