МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. Ломоносова Физический факультет

А.Б. Васильев, В.Г. Воронин, В.А. Камынин, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний

МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ В ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Методическое и учебное пособие

Москва 2016 А.Б. Васильев, В.Г. Воронин, В.А. Камынин, С.Н. Лукиных, О.Е. Наний. Механизмы потерь в одномодовых волоконнооптических линиях связи. Методическое и учебное пособие. Москва,2016., 43с.

ISBN 978-5-600-01426-8

Работа посвящена изучению механизмов и методов измерения потерь в одномодовых волоконно-оптических линиях связи, а также приобретению навыков тестирования линий связи и их компонентов.

Рецензенты: профессор А.И.Слепков (физ. ф-т МГУ) д.ф.м.н. А.С.Курков (ИОФ РАН)

Одобрено Ученым Советом физического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова

Подписано в печать____

Формат А5. Объем 2,7 п.л. Тираж 30 экз.

Заказ № -____

Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова

119991 Москва ГПС-1, Ленинские Горы, д.1, стр.2

Отпечатано в отделе оперативной печати

физического факультета МГУ

ISBN 978-5-600-01426-8

© Авторский коллектив,2016 © Физический факультет МГУ,2016

Содержание

1. ТБ	4
2. Волоконно-оптические линии связи и	6
оптические волокна	
2.1. Волоконно-оптические линии связи	6
2.2. Виды и характеристики одномодовых оптических волокон	10
2.3. Связь линейных и логарифмических единиц	14
3. Прямые и обратные потери в одномодовых	16
линиях связи	
3.1. Потери в прямолинейном оптическом волокне	16
3.2. Изгибные потери	19
3.3. Потери в оптических разъемных и сварных	25
соединениях 3.4. Метолы измерения потерь	21
	31
4. Экспериментальная часть	33
4.1. Оборудование для измерения потерь в волоконно- оптических линиях связи	33
4.2. Оценка и измерение интегральных потерь в катушке	36
оптического волокна методом вносимых потерь	
4.3. Измерение потерь на сварных соединениях	36
4.4. Измерение потерь на разъемных соединениях	37
4.5. Измерение изгибных потерь	37
4.6. Оценка и измерение потерь в модели ВОЛС	37
5. Обработка результатов измерений и	38
контрольные вопросы	
6. Литература	40
7. Приложение	41

1. Техника безопасности

При выполнении данной работы существуют три потенциальных источника опасности: лазерное излучение, электрическое напряжение и острые края мелких отрезков волокна. В соответствии с типами потенциальных источников опасности ниже требования, необходимо описаны выполнение которых лля обеспечения Лазерной безопасности, Электрической безопасности и Защиты от механических повреждений.

Обеспечение лазерной безопасности

Не производить разъединений, соединений и переключений оптических разъемов при работающих источниках излучения.

! Не подносить оптические разъемы к глазу и не рассматривать качество поверхности разъемов при включенных источниках лазерного излучения!

При выполнении данной работы часто приходится разъединять волокна и тогда возникает опасность повредить глаза излучением. Обусловлено это следующими свойствами излучения:

Относительно высокая мощность: до 15 мВт

Когерентность лазера и, как следствие, большая интенсивность света.

Длина волны излучения лазера (1310/1550 нм) вне видимого диапазона.

Для лазерного излучения диаметр пятна на сетчатке не зависит от размеров источника и получается примерно таким, как и диаметр модового пятна в волокне w = $7\lambda \sim 10$ мкм (рис. 1). Из-за малого диаметра пятна на сетчатке интенсивность света может оказаться слишком большой.



Рис. 1. Схема фокусировки лазерного излучения глазом

Таким образом, смотреть на торец волокна, если нет уверенности, что в волокне нет излучения, нельзя. Необходимо убедиться в отсутствии излучения.

Обеспечение электрической безопасности

Используемая в данной работе измерительная аппаратура питается от стандартной сети с напряжением 220В, представляющим опасность для жизни. Приборы выполнены в корпусах с двойной изоляцией и защитным заземлением, выполненным с помощью штатного кабеля питания. Во избежание поражения электрическим током не следует нарушать целостность корпусов приборов и соединений. Категорически запрещается вынимать измерительные модули из корпуса (шасси) при включенном питании – опасность поражения электрическим током и повреждения оборудования. Если оборудование начинает работать некорректно _ немедленно сообщите преподавателю. Если это невозможно - отключите установку автоматом в щитке.

Защита от механических повреждений острыми краями волокна

Собственно оптическое волокно представляет собой тонкую (125 мкм) прозрачную кварцевую нить с острыми краями. Во избежание травм (уколов, порезов) не следует прикасаться к обломанным концам оптических волокон и шнуров. Особую опасность представляют собой мелкие осколки ОВ, возникающие при сварке ОВ. Категорически запрещается есть и пить в лаборатории – потенциальная опасность проглатывания осколков OB. В случае поломки OB – немедленно отключите источник излучения и сообщите преподавателю.

2. Волоконно—оптические линии связи и оптические волокна

2.1 Волоконно-оптические линии связи

В настоящее время волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) используются в сетях практически всех масштабов: корпоративных сетях и сетях доступа, городских и региональных сетях, междугородных и трансконтинентальных линиях связи. И чем больше протяженность, чем выше скорость передачи, тем более заметны преимущества технологии ВОЛС по сравнению с другими технологиями передачи информации.

Первую волоконно-оптическую коммуникационную систему компания Standard Telephones and Cables построила в сентябре 1975 г. В 1977 г. сразу несколько компаний сделали независимые заявления о том, что телефонный трафик был передан в реальном времени по оптическому волокну в их испытательных сетях. Это были компании AT&T, General Telephone and Electronics, British Post Office и другие. Системы с многомодовыми волокнами (MMF) составляли основу протяженных ВОЛС того времени. Наряду с градиентным многомодовым волокном (волокно G.651) в их состав входили светодиоды на основе арсенида галлия, излучающие на длине волны 850 нм. Поскольку потери в волокне на этой длине волны были более чем существенны (3 дБ/км), такие линии связи строились с большим числом близко расположенных друг к другу регенераторов. Эти оптические магистрали были наземными, а для межконтинентальной связи все еще использовались подводные коаксиальные кабели

С появлением одномодового волокна – стандартного одномодового волокна или волокна G.652, – стало ясно, что значительно перспективней вести передачу на длине волны 1300 нм – меньше потери и дисперсия. Использование одномодового волокна позволяет передавать оптические сигналы с большей скоростью и на большие расстояния.

Сначала сложно было реализовать на практике преимущество нового типа волокна. Однако развитие технологии улучшение технологии сварки производства и одномодового волокна, серийное производство лазеров на длине волны 1300 нм способствовали быстрому моральному старению протяженных систем связи на основе многомодового волокна. Коммерческие преимущества новой технологии продемонстрировала компания МСІ в 1982г. Система связи компании МСІ, функционирующая на длине волны 1300 нм, передавала данные на 50% быстрее, чем система АТ&Т, использовавшая градиентное многомодовое волокно и передачу на двух длинах волн, 850 и 1300 нм. При этом МСІ смогла увеличить расстояние между повторителями с 7 до 30 км! Это показало огромное превосходство одномодового волокна перед многомодовым градиентным для наземных протяженных линий связи. Другие компании, специализирующиеся на строительстве протяженных линий связи, быстро сделали выбор в пользу новой технологии на основе одномодового волокна.

Между тем трансатлантические кабельные операторы продолжали терять рынок – подводные коаксиальные кабельные системы не могли больше противостоять появляющимся системам спутниковой связи – и в поисках ресурсов для увеличения полосы пропускания вынуждены были рассмотреть возможность использовать волокно. Подводные оптические кабели (ОК) начали производить позднее, чем кабели для наземных волоконномагистралей. Это было обусловлено оптических сложностью ОК подводного нагрузки кабель изготовления _ на И. соответственно, на волокна при укладке кабеля в грунт значительно меньше. Тем не менее в 1988 г. после нескольких лет планирования и строительства консорциум компаний, ведомый АТ&Т, сдал в

эксплуатацию первую трансатлантическую волоконно-оптическую систему ТАТ_8, состоящую из 3 пар одномодовых волокон, работающую на длине волны 1300 нм с расстоянием между повторителями 60 км.

Минимальные значение потерь в стандартном одномодовом волокне 0,2–0,25 дБ/км достигается на длине волны, близкой к 1550 нм. Минимальная хроматическая дисперсия, в окрестности нуля, достигается на длине волны 1310 нм. Чтобы обеспечить высокую скорость передачи на большие расстояния, необходимо свести к минимуму потери и дисперсию, причем на одной и той же длине волны.

Прямолинейным решением было создание волокна со смещенной дисперсией (DSF, волокно G.653). Это волокно. имеющее нулевую дисперсию в окрестности длины волны 1550 нм, обещало быть очень привлекательным для одноканальной передачи. Однако две появившиеся впоследствии технологии - DWDM и EDFA – показали несостоятельность волокна DSF. В этом волокне информации при многоволновой передаче реализуется четырехволновое смешение – эффект, выражающийся в появлении дополнительных паразитных сигналов на частотах, являющихся комбинацией рабочих частот, которые также усиливаются, проходя через каскады усилителей EDFA. Этот эффект становится заметным при многоволновой передаче.

В 1994 г. создается волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF, волокно G.655), в котором длина волны нулевой дисперсии вынесена за пределы зоны усиления EDFA. И это волокно также оказалось не способным удовлетворить растущие потребности. Рост числа каналов, канальной скорости передачи, увеличение протяженности сегментов между усилителями – все эти факторы по отдельности и тем более вместе требуют увеличения мощности излучения, вводимого в волокно.

В 1998 г. разрабатываются еще более совершенные волокна NZDSF с увеличенной эффективной площадью поперечного сечения.

Поскольку проявление нелинейных эффектов зависит от плотности световой энергии в волокне, то увеличение эффективной площади приводит к ослаблению влияния нелинейных эффектов и увеличивает дальность и скорость передачи информации.

Дальнейшие этапы развития ВОЛС связаны с внедрением усилителей и технологии эрбиевых оптических спектрального мультиплексирования. В настояшее время идут работы по информации увеличению скорости передачи по каждому спектральному каналу. При этом рассматриваются возможности использования новых, многоуровневых форматов модуляции.

За последние 30 лет оптическая связь кардинально изменила информационную структуру мира. Спрос на емкость каналов связи, а IT-специалистов – терминологии на полосу пропускания в удваивается приблизительно за несколько лет. Елинственное способное удовлетворить средство. столь быстро растущие потребности в объемах передаваемой информации – волоконно-(BOCC). Внедрение оптические сети связи эффективных полупроводниковых лазеров, оптического волокна с малыми эрбиевых усилителей потерями. И технологии спектрального уплотнения (WDM) обеспечили возможность передачи десятков и даже сотен каналов с разными длинами волн по одному волокну с суммарной скоростью, превышающей 10 Тбит/с.

Земной шар сегодня окутан сетью оптических волокон, многократно пересекающих океаны и континенты и соединяющих города по всему миру. Грандиозная общественная сеть связи играет современном обществе, важнейшую роль В обеспечивая эффективную передачу всех видов цифровой информации: страниц Интернета, электронных формате писем, музыки В mp3 И изображений или традиционных разговоров и факсов. Кроме глобальной общественной сети связи существует множество частных и специализированных сетей.

2.2 Виды и характеристики одномодовых оптических волокон

В волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) большой дальности в настоящее время наиболее широко применяются одномодовые волокна (SM-волокна).

Одномодовыми называются волокна, в которых на рабочей длине волны поддерживается только одна мода распространения. Мода распространения характеризуется определенным пространственным распределением в поперечном сечении волокна, это распределение поля сохраняется при распространении сигнала вдоль волокна.

Структура поля одномодового волокна наиболее простая в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления (см. рис. 2).



Рис.2 Фундаментальная (основная) мода оптического волокна (а) и асимметричная мода более высокого порядка(b).

(b)

(a)

При уменьшении длины волны одномодовые волокна становятся многомодовыми – они поддерживают более одной моды распространения (см. рис. 2 б). Минимальная длина волны, при которой в ОВ поддерживается только фундаментальная мода,

называется длиной волны отсечки $\lambda_{\kappa p}$. С уменьшением длины световых волн до значений меньше критической длины волны ($\lambda < \lambda_{\kappa p}$) в ОВ появляются моды более высокого порядка и ОВ становятся многомодовыми. Главный недостаток многомодовых волокон – межмодовая дисперсия, существенно ограничивающая скорость и дальность передачи информации. При распространении сигнала в многомодовом волокне искажается поперечная структура светового сигнала и появляются избыточные шумы.

Одномодовые волокна применяются в ВОЛС различной протяженности: в магистральных линиях длиной от 500 до 10000 км, городских линиях (10 – 500 км) в сетях доступа (1 – 100 км).

Преимущество одномодовых волокон перед многомодовыми заключается в отсутствии межмодовой дисперсии. Межмодовая дисперсия многомодовых волокон вызвана различием групповых скоростей распространения разных мод и приводит к расширению световых импульсов. Если расширение импульсов становится сравнимым с периодом их следования, то качество работы системы связи резко ухудшается. Многомодовые волокна, поэтому, применяются только в коротких линиях связи с максимальной длиной несколько десятков километров.

Для всех типов телекоммуникационных волокон диаметр кварцевой оболочки имеет стандартный размер 125 мкм (рис. 3). Волокно покрыто акрилатным лаком с внешним диаметром 250 мкм.



Рис.3. Геометрические параметры одномодовых волокон.

Основные типы одномодовых волокон применяемых в линиях связи нормируются международными стандартами ITU-T Rec. G. 652...G. 655:

- G.652: волокна с несмещенной дисперсией (SM волокна) с длиной волны нулевой дисперсии и длиной волны отсечки в районе 1310 нм.

- G.653: волокна со смещенной дисперсией (DS волокна) с длиной волны нулевой дисперсии в районе 1550 нм и длиной волны отсечки в районе 1310 нм.

- G.654: волокна с несмещенной дисперсией (SM волокна) с длиной волны нулевой дисперсии в районе 1310 нм и длиной волны отсечки в районе 1550 нм.

- G.655: волокна с несмещенной дисперсией с длиной волны нулевой дисперсии и длиной волны отсечки в районе 1310 нм. За счет несколько меньшей площади модового пятна нелинейные эффекты проявляются сильнее.

Одномодовые телекоммуникационные волокна стандартов ITU G.652, (SSMF), G.653 (DSF) и G.655 (NZDSF) отличаются дисперсионными свойствами в спектральной области, соответствующей минимуму потерь (1550 нм). Управлять дисперсионными свойствами оптического волокна удается за счет выбора профиля распределения показателя преломления волокна.

Волокно G.652 имеет наиболее простой ступенчатый профиль показателя преломления, дисперсия такого волокна в основном определяется вкладом материальной дисперсии и на длине волны 1550 нм примерно равна 16 – 17 пс/(нм·км). Волокна G.653 (DSF) и G.655 (NZDSF) специально сконструированы так, чтобы дисперсия была снижена до нуля (DSF) или до 3-6 пс/(нм·км) этого используется более сложная (NZDSF). Для структура, вклада обеспечивающая увеличения волноводной дисперсии. Профили распределения показателя преломления некоторых волокон показаны на рис. 4.



Рис. 4. Профили показателя преломления DS и NZDS волокон: а)треугольник на пьедестале, б) трезубец (или W)

SM волокна имеют наиболее простую (ступенчатую) форму профиля показателя преломления, а длина волны нулевой дисперсии ($\lambda = 1310$ нм) в них попадает в один из локальных минимумов потерь. Поэтому при работе на $\lambda = 1310$ нм они обеспечивают не только высокую скорость передачи данных, но и малые потери. Кроме того, среди всех типов одномодовых волокон SM волокна обладают наиболее совершенными геометрическими параметрами и стабильным диаметром модового пятна, что позволяет достигать минимальных потерь в сростках таких волокон (типичное значение 0.02 дБ).

Потери для лучших образцов промышленных волокон в локальном минимуме на длине волны $\lambda = 1310$ нм составляют 0.31...32 дБ/км. В абсолютном минимуме потерь ($\lambda = 1550$ нм) потери меньше: 0.18...0.19 дБ/км, а коэффициент дисперсии достигает величины: 17...20 пс/(нм км).

В большинстве видов волокна SSMF для увеличения показателя преломления сердцевины кварцевое стекло легируется примесями германия (Ge). Минимальные потери в волокне с сердцевиной, содержащей германий примерно 0,175 – 0,18 дБ/км.

Уменьшить потери удается в волокнах с чисто кварцевой сердцевиной (PSCF, G.655). В таких волокнах оболочка легируется примесями, снижающими показатель преломления, например

фтором (F). В волокие PSCF минимальные потери составляют 0,155 – 0,16 дБ/км.

разработаны B последнее время новые типы телекоммуникационного ОВ с увеличенным размером сердцевины. Преимущество таких волокон – увеличенная площадь моды. Поскольку интенсивность светового излучения обратно пропорциональна площади моды, в таких волокнах уменьшаются нелинейные искажения и увеличивается допустимая мощность сигнала, что в конечном счете ведет к увеличению дальности безрегенерационной передачи сигналов в ВОЛС.

Кроме трех основных типов одномодовых волокон, существует еще несколько специальных типов одномодовых волокон применяемых в волоконно-оптических устройствах:

- Волокна для компенсации дисперсии (DC – Dispersion Compensating), применяемые в модулях компенсации дисперсии.

- Волокна с примесью редкоземельных элементов, применяемые в оптических усилителях, например, в EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.

- Волокна, сохраняющие состояние поляризации излучения (PM – Polarization Maintaining), применяемые в поляризационных делителях и смесителях.

2.3 Связь линейных и логарифмических единиц

Потери в волоконно-оптической линии связи характеризуются величиной затухания сигнала, которую принято измерять в децибелах (дБ). Децибел - важное понятие, которое используется не только в волоконной оптике, но и в целом в электронике для выражения усиления или затухания в системе или в ее компонентах. Выражение для затухания Z оптического сигнала в произвольной оптической системе по мощности в децибелах определяется следующим выражением:

$$Z = -10 \lg \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$$

где Pin - мощность светового излучения на входе в оптическую систему, Pout - на выходе из нее.

Затухание света или иначе потери, вносимые оптическим элементом, $A^{\pi u h}$ (в разах) и A (в дБ) рассчитываются по формулам (приближенные значения см. в таблице 1):

$$A^{\pi u \mu} = \frac{P_{ex}}{P_{gbix}} = 10^{(p_{ex} - p_{gbix})/10}$$
(1)

$$A = 101g\left(\frac{P_{ex}}{P_{ebx}}\right) = p_{ex} - p_{ebx} \quad (2)$$

где P_{ex} и P_{ebix} – мощности светового излучения в линейных единицах на входе и на выходе линии, $p_{ex} = 101g(P_{ex})_{H}$ $p_{ebix} = 101g(P_{ebix})$ – в единицах дБм. О самом элементе тогда говорят, что он вносит затухание A.

А ^{лин} (в разах)	1	2	2,5	3	4	8	10	20	30	40	80	100	200	300	400	1000
А _(дБ)	0	3	4	5	6	9	10	13	15	16	19	20	23	25	26	30
Таблица 1 Перевод линейных единиц в дБ (приближенные значения)																

Если известны входная мощность p_{ex} и потери в линии, то, как следует из (1-2), мощность на выходе линии p_{ebix} рассчитывается по формуле

$$p_{\rm BBIX} = p_{\rm ex} - A \qquad (3)$$

В (1-3) из дБм вычитаются дБ, в результате чего получаются дБм.

3. Прямые и обратные потери в одномодовых линиях связи

3.1. Потери в прямолинейном оптическом волокне

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 (SiO2), и примесное поглощение.

Вклад электронного поглощения кварцевого стекла В рабочем диапазоне волоконно-оптических систем связи (1,3 - 1,6 пренебрежимо поскольку спектр собственного мкм) мал. электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ($\lambda < 0,4$ мкм).

Примесное поглощение – это фотонов, поглощение 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 примесей настолько. концентрация вредных снижена 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 ОН. Центральная длина волны колебательной полосы поглощения группы ОН равна 2,73 мкм. Гармоники и комбинационные частоты с кварцевой матрицей вызывают поглощение на длинах волн 1,39, 1,24 и 0,95 мкм. Как правило, для того чтобы получить волокно с низкими потерями, концентрацию ионов ОН необходимо снизить до уровня 10-8.

Дополнительные потери вызываются И такими легирующими примесями, как GeO2, P2O5 и В2ОЗ, которые используются при изготовлении волокна для изменения показателя преломления кварцевого стекла. В наиболее распространенных типах волокон оболочка изготавливается из чистого кварца, а для увеличения показателя преломления сердцевины ее легируют примесью GeO2. В таких типах волокон минимальный уровень потерь примерно 0,18 – 0,17 дБ/км. В волокнах с сердцевиной из чистого кварца (PSCF) удается снизить потери до 0,16 – 0,15 дБ/км. Для обеспечения волноводных свойств в волокнах такого типа с помощью примесей уменьшают показатель преломления оболочки.

Колебательный спектр молекул материала (SiO2) лежит в инфракрасной области ($\lambda > 7$ мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую и ближнюю инфракрасную область спектра. В диапазоне длин волн 1,3-1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0,03 дБ/км и быстро возрастают при длине волны больше 1,6 мкм.

На рис. 5 приведены графики зависимости затухания двух видов телекоммуникационных волокон от длины волны. Из рис. 5 следует, что в кварцевом волокне минимальный уровень потерь достигается на длине волны 1,55 мкм.



Рис. 5 Спектр потерь в оптических волокнах.

В обычных одномодовых волокнах наблюдается заметный пик поглощения на длине волны примерно 1380 нм, связанный с колебаниями ионов ОН. В новых типах волокон (ZWPF) содержание ионов ОН удается существенно снизить. Аббревиатур ZWPF, используемая для обозначения таких волокон, происходит от их английского названия zero water pic fiber (волокно с нулевым водяным пиком).

На длинах волн меньше 1500 нм основной вклад в величину затухания волокна вносит рассеяние на неоднородностях показателя преломления, размеры которых меньше длины волны. Такой вид рассеяния называется рэлеевским рассеянием.

Потери за счет рэлеевского рассеяния один ИЗ Рассеивающие фундаментальных потерь. механизмов неоднородности возникают расплавленном кварце В из-за хаотического движения молекул в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в расплавленной фазе, застывают на своих местах, как бы «вмораживаясь» в структуру кварцевого стекла. Потери, обусловленные рэлеевским

рассеянием, пропорциональны $\sim \frac{1}{\lambda^4}$ и, следовательно, преобладают в области коротких длин волн. Поскольку эти потери принципиально неустранимы при использовании современной технологии, они определяют уровень минимальных потерь, который оценивается как

$$\alpha_{_R} \sim \frac{C}{\lambda^4}$$
 (дБ/км),

где постоянная С находится в пределах 0,7 - 0,9 $\frac{\partial E \cdot M \kappa M^4}{\kappa M}$ в зависимости от состава кварцевой сердцевины оптического волокна. На длине волны $\lambda = 1.55$ мкм $\alpha_R = 0.12 - 0.15$ дБ/км. Эта величина и определяет теоретический минимальный уровень потерь в кварцевых оптических волокнах.

3.2. Изгибные потери

В предыдущем разделе рассмотрены механизмы потерь в прямолинейном участке OB. На изогнутых участках волокна возникают принципиально неустранимые изгибные потери. Величину потерь можно охарактеризовать величиной затухания в [дБ] на один виток. Зависимость изгибных потерь от радиуса изгиба показана на рис.6.



Рис. 6. Зависимость изгибных потерь [дБ/виток] от радиуса изгиба для волокон разных типов и спецификаций (стандартов). Картинки. положение которых характеризует значения изгибных потерь, относятся к следующим видам волокон: ОВ с фотонной запрещенной зоной; «дырчатое волокно»; наноструктурированное; с пониженным показателем преломления кольцевого слоя; с уменьшенным диаметром сердцевины и стандартное ОВ (порядок расположения: снизу слева по часовой стрелке) [LWR]

Как видно из приведенного рисунка, величина потерь сильно зависит от типа волокна. Но для всех типов волокна зависимость потерь от радиуса кривизны экспоненциальная (она выглядит линейной, как на рис.6, если потери выражены в дБ, а радиус в линейных единицах). Более наглядно критически быстрые изменения величины потерь от радиуса кривизны иллюстрирует рис.7, на котором приведена в линейных единицах зависимость коэффициента пропускания от диаметра петельки (одиночной) в SM волокне, измеренная на длине волны 1300 нм. При больших значениях диаметров петельки изгибные потери малы, на графике практически не заметны и их вклад в суммарные потери мал. Однако когда диаметр петельки уменьшается до критического значения (10 – 20 мм), потери начинают быстро увеличиваться (по экспоненциальному закону), и становятся доминирующими. Так при намотке нескольких витков SM волокна на карандаш или шариковую ручку потери могут увеличиться на 20 – 40 дБ.



Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания участка волокна с петелькой от диаметра петельки

Потери при изгибании волокна возникают по двум причинам. Во-первых, из-за смещения модового пятна изогнутого участка волокна потери возникают в месте его соединения с прямым участком (потери из-за рассогласования модовых пятен). Вовторых, мощность теряется и непосредственно в изогнутом волокне из-за излучения в оболочку (излучательные изгибные потери).



Рис. 8. Механизм области возникновения потерь В соединения прямого И изогнутого волокна (потерь на рассогласование модовых пятен). а) В изогнутом волокне центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некую величину d. б) В месте соединения "прямого" и изогнутого волокна их модовые пятна смещены друг относительно друга на величину d.

Потери из-за рассогласования модовых пятен обусловлены тем, что в изогнутом волокие центр модового пятна смещен относительно оси волокна на некоторую величину d. пропорциональную кривизне (растет с уменьшением радиуса изгиба) волокна (рис. 8). В результате модовые пятна прямого и изогнутого волокна, в области их соединения, оказываются смещенными друг относительно друга также на величину d. Поэтому только часть мощности моды "прямого" волокна (диаметром w) передается моде изогнутого волокна, а остальная же мощность преобразуется в оболочечные моды и, в конечном счете, теряется. Величина потерь на стыковку двух участков волокна может быть уменьшена при плавном изменении кривизны, что эквивалентно адиабатическому согласованию.

Излучательные потери в изогнутом волокне связаны с тем, что для сохранения структуры моды ее периферийная часть в изогнутом волокне должна была бы распространяться со скоростью, больше скорости света в среде (в оболочке). Поскольку это невозможно, то эта часть моды излучается в оболочку волокна и, в конечном счете, теряется (рис. 9). Величина изгибных потерь тем больше, чем больше число витков волокна, и чем меньше радиус изгиба волокна.



Рис. 9. Механизм возникновения потерь в изогнутом волокне. Заштрихована область, где скорость распространения фазового фронта моды превышает скорость света в среде

С увеличением длины волны увеличивается диаметр моды и относительная доля мощности, распространяющаяся в оболочке

волокна. Вследствие увеличения размеров моды все большая часть мощности моды излучается в оболочку волокна и поэтому потери в изогнутом волокне увеличиваются. Этот факт используется в рефлектометрии для поиска мест изгиба волокон.

Диаметр моды и, соответственно, изгибные потери зависят не только от длины волны излучения (λ), но и от радиуса сердцевины (r) и разности показателей преломления между сердцевиной и кварцевой оболочкой ($n_1 - n_2$). Из этих параметров можно образовать безразмерную комбинацию, часто используемую при расчетах и называемую параметром волокна V:

 $V = krNA = (2\pi / \lambda)r(n_1^2 - n_2^2)^{1/2},$ где $k = (2\pi / \lambda)$ и – волновое число в вакууме, r – радиус сердцевины, $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ – числовая апертура.

V Параметр волокна однозначно характеризует относительные мощности, распространяющиеся в сердцевине и в ступенчатым профилем оболочке волокна co показателя преломления (рис. 10). Как видно из этого рисунка, при V < 1 практически вся мощность первой моды сосредоточена в оболочке и, соответственно, при изгибе волокон с таким малым параметром V потери излучения будут большими.



Рис. 10. Зависимости относительных долей мощностей первой и второй мод, распространяющихся в оболочке волокна

При $V \to 0$ основная часть мощности распространяется вне сердцевины волокна. Поэтому, хотя теоретически в волокне может распространяться излучение со сколь угодно большой длиной волны (т.е. основная мода волокна не имеет отсечки), однако потери на изгибах в таких волокнах очень велики, что препятствует их практическому применению.

Таким образом, в OB с прямоугольным профилем показателя преломления при V > 1 доля мощности основной моды, распространяющейся в оболочке, быстро уменьшается с ростом V, и при V = 2.4 она составляет величину порядка 0.1. Соответственно с увеличением параметра V уменьшаются и потери при изгибе волокна. Дальнейшее увеличение параметра V нецелесообразно, так как при V > 2.4 в волокне уже может распространяться вторая мода.



Рис. 11. Профиль показателя преломления изогнутого волокна и эквивалентный профиль показателя преломления прямолинейного волокна. Горизонтальная линия показывает эффективный показатель преломления $n_{eff} = \beta / k_0$ моды. Точка пересечения зависимости $n_{equ}(x)$ с горизонтальной прямой n_{eff} соответствует точке «отрыва» периферийной части моды.

Простую физически наглядную интерпретацию механизма изгибных потерь дает концепция эквивалентного показателя преломления прямолинейного волокна (рис. 11): в работе [8] показано, что изогнутый волновод с радиусом кривизны R эквивалентен в первом приближении прямолинейному волноводу с

измененным показателем преломления, зависящим от координаты х относительно центра волновода (для $x \ll R$) так

$$n_{equ}(x) = n(x)\sqrt{1 + \frac{2x}{R}}$$

3.3.Потери в оптических разъемных и сварных соединениях

Физический механизм потерь в соединениях одномодовых оптических волокон – различие пространственных распределений поля соединяемых волокон. Доля мощности световой волны первого волокна, попавшей во второе волокно (коэффициент пропускания по мощности $T_{connect}$), при их стыковке в разъемном соединении определяется интегралом перекрытия:

$$T_{connect} = \frac{\left(\int_{S_t} \phi_1 \phi_1 dA\right)^2}{\int_{S_t} \phi_1^2 dA \int_{S_t} \phi_2^2 dA}$$

где $\phi_{1,2}$ – распределения поля мод, интеграл берется по перечному сечению волокон. При использовании нормированных функций распределения амплитуды мод интегралы в знаменателе равны 1.

На сварном соединении волокон потери могут быть значительно меньше, чем на разъемном. Снизить потери можно, если обеспечивается плавное «адиабатическое» изменение распределения поля в области сварки.

Потери на разъемном соединении, выраженные в дБ, определяются следующей формулой

$$A_{connect} = -10\log_{10}(T_{connect}) = -10\log_{10}\left(\frac{\left(\int_{St} \phi_{1} \phi_{1} dA\right)^{2}}{\int_{St} \phi_{1}^{2} dA \int_{St} \phi_{2}^{2} dA}\right)$$

Общепринятый метод оценки потерь состоит в использовании приближенных гауссовых функций распределения поля. В этом приближении:

 $a(r) = A \exp(-r^2 / w^2)$, где $A = (2/\pi)^{1/2} / w$ из-за условия нормировки $2/\pi \int a^2(r) r dr = 1$.

Потери, вызванные несовпадением радиусов мод соединяемых волокон, определяются выражением

$$T_{connect} = 4\pi^2 (A_1 A_2)^2 \left(\int_0^\infty \exp(-r^2 / w_1^2) \exp(-r^2 / w_2^2) r dr \right)^2$$

В результате интегрирования получаем:

$$T_{connect} = 4/[(w_2/w_1) + (w_1/w_2)]^2$$
$$A_{connect} = -20\log_{10}\frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2}$$

Следует обратить внимание, что потери в прямом и обратном направлении одинаковы, т.е. не зависят от того, диаметр какого волокна больше.

Радиус моды *w* телекоммуникационного оптического волокна примерно 5 мкм. Если допустить различие диаметров мод в 0,5 мкм, т.е. $(w_1/w_2)=0,9$ и $T_{connect}=0,99$ ($A_{connect}=0,04$ дБ). Лучевое приближение дает значение 0,9, следовательно, оно совершенно непригодно для одномодового волокна!

Подобный расчет для радиального рассогласования x₀ двух одинаковых волокон с радиусом мод w дает следующее значение коэффициента пропускания

$$T_{connect} = \exp(-x_0^2/w^2)$$

Угловое рассогласование θ_0 приводит к следующему выражению для пропускания

$$T_{connect} = \exp(-\pi n w \theta_0 / \lambda)^2$$

где *n* – показатель преломления материала между торцами волокна.

Формула для зависимости пропускания от расстояния между волокнами вдоль оси сложна, но из нее следует, что в типичных разъемах влияние зазора незначительно [9].

Для приближенной оценки радиуса моды волокна со ступенчатым профилем широко используется следующая формула [8]

$$w = \frac{d}{2\sqrt{2}} [0,65 + 1,619 \cdot V^{-3/2} + 2,879 \cdot V^{-6}]$$

где d – диаметр сердцевины. Приближенное значение отличается от точного значения менее чем на 1% в диапазоне изменений параметра V от 1,20 до 3,06. Оценки радиуса моды стандартного волокна с Δ =0,27% и d=8,9 мкм дают значения 3,59 мкм на длине волны 1300 нм и 4,15 мкм на длине волны 1550 нм.

Механизм потерь	Потери в дБ
Различие диаметров мод	$-20\log_{10}\left(\frac{2w_f w_w}{w_f^2 + w_w^2}\right)$
Угловое рассогласование	$8,69 \left(\frac{\pi n_{cl} w \theta_0}{\lambda}\right)$
Поперечное смещение	$2,17\left(\frac{x_0}{w}\right)^2$

Таблица 2. Источники потерь при соединении волокон и формулы для расчета величины потерь

Наиболее существенными причинами потерь в разъемных соединениях одномодовых волокон являются: несовпадение размеров и форм сердцевин и поперечное смещение сердцевин (см. табл. 2). В современных оптических разъемах с физическим контактом потери, вызванные зазором между сколами, существенно меньше потерь, вызванных двумя первыми причинами. Однако нарушение физического контакта из-за дефекта при изготовлении разъема или попадания твердой частицы грязи на торец волокна могут привести к существенному увеличению потерь. К увеличению потерь приводят и любые другие дефекты поверхностей сколов. В дефектных разъемных соединениях потери могут быть вызваны также угловым рассогласованием осей соединяемых BC.

Конструктивно современный разъемный соединитель с физическим контактом (PC) представляет собой два коннектора и соединительную розетку (рис. 12). Волокна вклеены в керамические наконечники диаметром 2,5 мм. Наконечники центрируются в розетке с помощью плавающей разрезной втулки из керамики и прижимаются друг к другу пружинами с усилием ~ 10 Н. Таким образом, место соединения волокон механически развязано с корпусом розетки. Фиксация разъемов в розетке резьбовая (FC), байонетная (ST) и замковая (SC).



Рис. 12. Схема образования оптического контакта в разъемном соединении: а)UPC; б) АРС

Торцевые поверхности наконечников сферические, поэтому эластичная деформация в точке их соединения достаточна для создания оптического контакта между волокнами. Поэтому потерями из-за наличия зазора между волокнами можно пренебречь.

К потерям на соединение приводит также отклонение формы сечения сердцевины от круговой, т. е. ее эллиптичность. Даже при идентичных по форме эллипсах несовпадение их взаимной ориентации приводит к потерям на соединение.



Рис. 13. Положение сердцевины волокна: (а) в типовом разъеме; (б) в образцовом разъеме

Потери, в спецификации на разъем, измерены при соединении его с образцовым разъемом, в котором сердцевина волокна смещена относительно номинального центра примерно на половину радиуса зоны возможных отклонений сердцевины (рис.13). В ВОЛС типовой разъем стыкуется не с образцовым разъемом, а с таким же типовым разъемом (любой с любым). В таких соединениях смещения сердцевин получаются немного больше (табл.3).

Параметр	Калиброванные разъемы		
Потери при соединении с образцовым разъемом, дБ	Средние 95% 99%	0,14 < 0,30 < 0,40	
Потери при соединении «любой с любым», дБ	Средние 94% 98%	0,15 < 0,30 < 0,40	

Таблица 3. Потери, вносимые при соединении разъёмов

По величине потерь разъемы UPC и APC практически не отличаются, но они очень существенно отличаются по величине обратных потерь. Обратные потери показывают, на сколько дБ мощность, возвратившаяся к источнику излучения, меньше мощности, вводимой в волокно: $p_{obp} = p_{ex} - A_{obp}$.

Обратные потери (в дБ) равны коэффициенту отражения с обратным знаком.

Чем больше величина обратных потерь, тем меньше вернувшаяся к источнику оптическая мощность и, следовательно, лучше условия работы источника оптического излучения: снижается мощность шума и увеличивается отношение «сигнал/шум».

Величина обратных потерь APC разъемов более 60 дБ, а обратные потери UPC разъемов только порядка 35 дБ. Особенно важно то, что при разъединении APC разъемов обратные потери изменяются не значительно, а вот обратные потери UPC разъемов при разъединении или при некачественном соединении существенно уменьшаются, что может привести к деградации передатчика.

Потери на сварных соединениях

Для создания сварного соединения оптических волокон применяется электрическая дуга, позволяющая сварить два волокна между собой. Сварные соединения позволяют добиваться очень точного расположения волокон, устранять потери на френелевское отражение от торцов соединяемых волокон, т. к. соединение плавлением Bce сопровождается волокон. это обеспечивает чрезвычайно низкие потери на уровне 0.05 дБ в современных сварочных аппаратах и практически полное устранение обратных отражений. Основным недостатком сварных соединений является высокая стоимость оборудования для контролируемой компьютером сварки и необходимость высокой квалификации специалистов, производящих сварочные работы. Минимальный уровень потерь, указанный выше, достигается только в случае использования однотипного волокна одного производителя с контролируемым в процессе производства значением диаметра светового поля в ВС, диаметром оболочки и концентричностью волокна. Плавление и сварка кварцевых ВС осуществляется при температуре около 2000°С. Для этой цели в выпускаемых промышленно сварочных аппаратах используется дуговой разряд.

3.4. Методы измерения потерь

Самым простым в реализации методом измерения потерь в тестируемом компоненте ВОЛС является метод вносимых потерь. В этом методе вначале измеряется величина опорной мощности P_0 . Затем между измерителем оптической мощности и источником оптического излучения устанавливается тестируемый компонент и измеряется величина прошедшей мощности P_{out} . Величина потерь A_{ext} определяется по формуле:

$$A_{test} = -10 \lg P_{out} / P_0$$

Погрешность измерений этим методом связана с трудностью контроля потерь в местах подключения источника излучения и тестируемому приемника к устройству. Особенно большая погрешность 0.3 дБ) возникает (до при полключении с (коннекторов). соединений использованием разъемных Использование сварных соединений для подключения источника и приемника позволяет существенно (более чем на порядок) снизить погрешность измерений.

коэффициента При измерении затухания волокна наибольшую точность измерений дает метод среза. В этом методе тестируемый длинный отрезок волокна подключается к источнику излучения, а выходной конец волокна подключается к специальному входу приемника для неоконцованного волокна. Проводятся измерения мощности на приемнике, затем на небольшом расстоянии от передатчика осуществляется срез волокна, свободный конец короткого волокна подключается к приемнику и измеряется мощность. В этом случае условия ввода не изменяются. Кроме того, вся мощность, выходящая из свободного конца волокна, попадает на приемник. Это обеспечивает устранение погрешностей на ввод и вывод излучения. Недостатком метода среза является необходимость работы со свободным неоконцованным волокном, а также то, что нарушается целостность линии.

а – Начальная схема измерения мощности



б – Схема определения вводимой в волокно мощности



Рис.14. Модифицированный метод обрыва с использованием сварки

Избежать неудобств работы с неоконцованным волокном позволяет модифицированный метод обрыва, схема которого приведена на рис.14. В соответствии с модифицированным методом среза, измеряемое устройство соединяют с источником оптического излучения и измерителем мощности (см. рис.14 а). Измеряют мощность излучения p_1 . Затем осуществлют срез соединительных волокон на расстоянии порядка 1 м от источника оптического излучения и от измерителя оптической мощности. Свободные концы волокон от источника и измерителя сваривают между собой. Измеряют мощность излучения p_0 .

Величина потерь, вносимых тестируемым устройством, вычисляется по формуле:

$$z = p_1 - p_0$$

Как было описано выше, метод среза требует изменения длины волокна, поэтому используется в основном при измерении потерь в опытных образцах волокон и в случаях, где нарушение целостности линии допустимо.

В настоящей работе используется метод вносимых потерь. При измерении опорной мощности P_0 коротким отрезком оконцованного волокна с использованием двух розеток источник излучения соединяется с измерителем мощности. Затем на место короткого отрезка подключается тестируемое устройство и измеряется мощность P_{out} .

4. Экспериментальная часть.

4.1. Оборудование для измерения потерь в волоконнооптических линиях связи

В экспериментах используются:

Тестовая платформа EXFO IQ-203, с установленными модулями IQ-2100 (лазерный источник 1313/1546 нм) и IQ-1100 (измеритель мощности).

Переходной соединительный патчкорд FC/UPC – LC/APC для подключения к EXFO.

Две катушки волокна SMF-28 длинами L1 = 50 км и L2 = 50 км, оконцованные разъемами LC/APC. Эффективное среднее погонное затухание волокна 0,19 дБ/км.

Патчкорды LC/APC - LC/APC, намотанные на цилиндры известных диаметров (для измерения изгибных потерь).

Набор коротких патчкордов LC/UPC - LC/UPC, соединенных розетками (для измерения потерь на коннекторах).

Патчкорд LC/APC - LC/APC с некоторым количеством сварок (для измерения потерь на сварке).

Коммутационная панель, к которой подключены блоки п. 3, 4, 5, 6.



Рис. 15. Общий вид установки.



Рис. 16 Оптическая схема установки. Цифрами обозначены: 1 – тестовая платформа EXFO IQ-203, 2 – модуль лазерного источника EXFO IQ-2100, 3 – модуль измерителя мощности EXFO IQ-1100, 4 – переходной соединительный патчкорд FC/UPC – LC/APC, 5 – коммутационная панель, 6 – измеряемый элемент.

🕸 IQS-1102X Powermeter [1-7]		×
Channel 1	Auto Avg	EXFO
+	303 1	Instrument
		Settings
λ: 850 nm Ref.: +1.0000 mW Offset: 0.000 d8		Configuration
Control Center		â
Channel	Display Acquisition	A 1
Channel 1 Absolute	Refresh Rate (Hz):	About
λ (nm): 850 Reference		
Averaging Nulling		
Continuous Sampling		
Rate (Hz):		
Control Graph		
Ready	Local 200	2-08-13 12:28

Рис. 17. Интерфейс EXFO IQ-1100.



Рис. 18. Интерфейс EXFO IQ-2100.

4.2. Оценка и измерение интегральных потерь в катушке оптического волокна методом вносимых потерь

Измерьте потери в катушке ОВ методом вносимых потерь, для этого:

1) Включите ЕХГО, дождитесь загрузки ОС.

2) Убедившись в отсутствии излучения, соедините свободные концы переходного соединительного патчкорда FC/UPC – LC/APC между собой при помощи розетки. Включите лазерный источник. Измерьте мощность, пришедшую на фотоприемник измерителя мощности, для двух длин волн источника (1550/1310 нм) (калибровка оптического тестера). ВНИМАНИЕ: для получения достаточной точности измерений после опорного измерения не переключайте входной и выходной разъемы (не изменяйте условия ввода/вывода излучения).

3) Отключив лазер, подключите катушку в разрыв переходного соединительного патчкорда. Измерьте мощности на фотоприемнике на двух длинах волн. Оцените общее затухание в катушке.

4) Повторите п. 2-3 несколько раз для оценки погрешности измерений.

5) Повторите п. 2-4 для обеих катушек ОВ.

4.3. Измерение потерь на сварных соединениях

Измерьте потери на сварном соединении волокон, для этого:

1)Проведите калибровку оптического тестера согласно п. 2 упр. 4.2.

2)Отключив лазер, подключите патчкорд с несколькими сварными соединениями в разрыв переходного соединительного патчкорда.
3)Измерьте мощности на фотоприемнике на двух длинах волн.
4)Оцените потери на сварном соединении.

4.4. Измерение потерь на разъемных соединениях

Измерьте потери на разъемном соединении, для этого:

1)Проведите калибровку оптического тестера согласно п. 2 упр. 4.2.

2)Отключив лазер, подключите цепочку коротких патчкордов, соединенных розетками, в разрыв переходного соединительного патчкорда. Измерьте мощности на фотоприемнике на двух длинах волн. Оцените потери на разъемном соединении.

3)Повторите п. 2-3 несколько раз для оценки погрешности измерений.

4.5. Измерение изгибных потерь

Измерьте потери в изогнутом волокне, для этого:

1)Измерьте потери в намотках волокон методом вносимых потерь (см. упр. 4.2) на длине волны 1546 нм.

2)Повторите п. 1 для всех намоток.

3)Повторите п. 2 для длины волны 1313 нм.

4.6. Оценка и измерение потерь в модели ВОЛС

1)Соберите модель ВОЛС – две катушки, соединенные розеткой.

2)Измерьте общее затухание в модели ВОЛС по методике упр. 4.2.

5.Обработка результатов измерений и контрольные вопросы

Обработка результатов измерений.

Упражнение №1.

Оцените величину удельного (в дБ/км) затухания в катушках. Сравните с спецификацией на волокна.

Упражнение №2.

Оцените средние потери на сварке (на разных длинах волн). Сравните отношение потерь на сварке на разных длинах волн с теоретически ожидаемым.

Упражнение №3.

Оцените погрешность измерения затухания на разъемном соединении. Сравните отношение потерь на разъеме на разных длинах волн с теоретически ожидаемым.

Упражнение №4.

Оцените потери в данной модели ВОЛС на длинах волн 1550 нм и 1310 нм. Оцените относительные вклады в общий бюджет линии потерь на сварках, разъемах и в волокне. Оцените погрешность расчета и измерений. Сравните теоретическое значение затухания с результатом эксперимента.

Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. Типы одномодовых оптических волокон и их применение.

2. Структура фундаментальной моды ОВ.

3. Основные виды потерь в ВС.

4. Механизмы потерь в ОВ в фиолетовой и инфракрасной областях спектра.

5. Область наименьших потерь.

6. Причины волноводных потерь (при изгибе).

7. Выражение, определяющее потери в ВС.

8. Наименьшее значение потерь в кварцевых ОВ (фундаментальные потери) $\alpha_{\min} = 0,16$ дБ/км на $\lambda = 1,55$ мкм. Произвести пересчет этой величины: в потери на 1 км (выразить ответ в процентах %), в коэффициент потерь в см-1 (используя соотношение $P = P_0 \exp(-\alpha * Z)$)

б. Литература

1. А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков, Оптические волокна для линий связи, М.: ЛЕСАРарт, 2003.

2. О.Е. Наний, А.Н. Туркин " Оптические методы в информатике", М., Университетская книга, 2010.

3. В.Г. Воронин, О.Е. Наний "Основы нелинейной волоконной оптики", М., Университетская книга, 2011.

4. В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков, "DWDM – системы", М., Издательский дом «Наука», 2015.

5. G.P. Agrawal. "Nonlinear Fiber Optics", Fourth Edition, Amsterdam, Academic Press, 2007

6. Волоконная оптика, сборник статей. М., ВиКо, 2002.

7. Р.Хансперджер. "Интегральная оптика", М., Мир, 1985.

8. L.B. Jeunhomme. "Single-mode fiber optics: principles and applications", New York: Marcel Dekker, 1983.

9. М. Янг. "Оптика и лазеры", М., Мир, 2005.

7.Приложение

Структура мод в волокне с прямоугольным профилем показателя преломления

Более детальное рассмотрение распространения света в оптическом волокне основано на том, что свет – это электромагнитная волна и его распространение в волокнах подчиняется системе волновых уравнений.

$$\Delta \vec{E} - \left(\frac{kn_j}{\omega}\right)^2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta \vec{H} - \left(\frac{kn_j}{\omega}\right)^2 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$
(1)

следующих из уравнений Максвелла. Фактически в системе (1) содержится 6 уравнений для декартовых компонент полей \vec{E} и \vec{H} как для сердцевины с показателем преломления nj = nc, так и для оболочки – nj = no. Отметим, что в силу наклонного падения волн на границу сердцевина - оболочка, электрические и магнитные поля имеют отличные от нуля продольные компоненты E_z и H_z

Решением системы уравнений (1) являются бегущие вдоль оси Z электромагнитные волны с плоским фазовым фронтом и неоднородным распределением амплитуды в плоскости ху, не зависящим от Z. Это моды распространения оптического волокна или волоконные моды:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{n} E_0(x, y) e^{i(\omega t - \beta z)}, \qquad (2)$$

где β - постоянная распространения волны вдоль оси Z.

При подстановке выражения (2) в (1) для электрической продольной компоненты, которая одинакова как в декартовой, так и в цилиндрической системе координат, получаем

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_z + \frac{\partial^2}{\partial y^2} E_z + \left(k_j^2 - \beta^2\right)^2 E_z = 0$$
(3)
rge $k_j = \omega n_j / c$

Уравнение (3) аналогично уравнению Шредингера в квантовой механике. Следовательно, аналогично тому, как в квантовой механике отлична от нуля вероятность нахождения частицы за границей потенциального барьера, в волоконной оптике на границе сердцевины и оболочки поле не равно нулю. Оно проникает в оболочку и спадает по мере удаления от границы сердцевина - оболочка.

Поперечные компоненты поля моды круглого волокна Ех и Еу в цилиндрической системе координат выражаются следующем образом:

$$\left\{ \frac{E_x}{E_y} \right\} \approx J_{l\mp 1} \left(U_{lp} \frac{r}{a} \right) \left\{ \frac{\mp \cos(l \mp 1)\varphi}{\sin(l \mp 1)\varphi} \right\}, \quad 0 \le r \le a$$

$$\left\{ \frac{E_x}{E_y} \right\} \approx K_{l\mp 1} \left(W_{lp} \frac{r}{a} \right) \left\{ \frac{\mp \cos(l \mp 1)\varphi}{\sin(l \mp 1)\varphi} \right\}, \quad r > a$$
(4)

 $J_{I\mp 1}$ - функция Бесселя, определяющая осциллирующую по г радиальную зависимость поля в сердцевине.

 $K_{l\mp 1}$ - модифицированная цилиндрическая функция (Макдональда), определяющая поле в оболочке, быстро спадающее вдоль г.

При достаточно больших значениях аргумента функция К ведет себя как затухающая экспонента

$$K\left(W_{lp} \frac{r}{a}\right) \rightarrow \exp\left(-W_{lp} \frac{r}{a}\right) \prod_{\Pi \mathcal{P} \mathcal{U}} W_{lp} \frac{r}{a} >> 1$$

т. е. поле, проникающее в оболочку, экспоненциально спадает по мере удаления от границы.

Верхние знаки в формулах (4) соответствуют полям мод, обозначаемым HElp, нижние знаки - модам EHlp. Число l=0,1,2...азимутальный индекс. Величина $l\pm 1$ показывает количество радиальных направлений, вдоль которых любая из компонент Ex или Ey обращается в ноль. Число p = 1,2,... - радиальный индекс, показывающий количество экстремумов в радиальном направлении поля моды. Если $E_Z/E>H_Z/H$, то это мода HE, если $E_Z/E<H_Z/H$, то это мода EH.

Величины U_{lp} и W_{lp} - поперечные волновые числа сердцевины и оболочки. Из выражений (4) следует, что U_{lp} и W_{lp} - это значения аргументов функций Бесселя и Макдональда на границе сердцевины и оболочки, т.е. при r = а. Поперечные волновые числа сердцевины и оболочки связаны соотношением:

$$U^2 + W^2 = V^2, (5)$$

где V - нормализованная частота.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_o^2} = ak\sqrt{n_c^2 - n_o^2} = akNA$$
(6)

где NA - числовая апертура световода.

В случае V < 2,405 световод одномодовый, для V > 2,405 - световод многомодовый.