

СВЧ и КР



**Кафедра сверхвысокочастотной и
квантовой радиотехники**

В.И. Ефанов

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие
по практическим занятиям

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысоких частот и квантовой радиотехники (СВЧ и КР)

В.И. Ефанов

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ

Учебно-методическое пособие
по практическим занятиям

2012

Рецензент:
Зав. кафедрой СВЧиКР Шарангович С.Н.

Ефанов В.И.
Сборник задач по волоконно-оптическим линиям связи-Томск:
ТУСУР, 2012.– 50с.

Кратко изложены основные понятия и определения курса, даны основные расчетные соотношения. Рассмотрены примеры решения задач. Для самостоятельной работы предложено большое количество задач. Ряд задач может быть использован для контроля текущей самостоятельной работы студента в течение семестра, а также в качестве индивидуальных расчетных заданий.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения

© Томск. гос. ун-т систем
управления и радиоэлектроники

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ПЛАНАРНЫЙ ВОЛНОВОД	8
1.1 Структура волновода.....	8
1.2 Основные параметры волноводов.....	8
1.3 Примеры решения задач	11
1.4 Задачи для самостоятельного решения	11
2 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО	13
2.1 Основные элементы оптического волокна.....	13
2.2 Типы и характеристики оптического волокна.....	13
2.3 Основные параметры ОВ	14
2.4 Примеры решения задач к разделу «Основные параметры ОВ».....	21
2.5 Задачи к разделу «Основные параметры ОВ»	23
2.6 Основные характеристики МОВ	24
2.7 Примеры решения задач к разделу «Основные характеристики МОВ»	25
2.8 Задачи к разделу «Основные характеристики МОВ»	26
2.9 Основные характеристики ООВ.....	26
2.10 Примеры решения задач к разделу «Основные характеристики ООВ»	30
2.11 Задачи к разделу «Основные характеристики ООВ».....	31
2.12 Соединение оптических волокон	32
2.13 Примеры решения задач к разделу «Соединение оптических волокон».....	34
2.14 Задачи к разделу «Соединение оптических волокон»	34
3 РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА.....	35
3.1 Расчет длины регенерационного участка по затуханию	35
3.2 Расчет длины регенерационного участка по дисперсии.....	36
3.3 Примеры решения задач	36
3.4 Задачи для самостоятельной работы	37
4 КОМПЕНСАЦИЯ ДИСПЕРСИИ.....	39
4.1 Общие положения.....	39
4.2 Примеры решения задач	40
4.3 Задачи для самостоятельной работы	43
7 Индивидуальное расчетное задание	43
Приложение 1	46
Приложение 2	47
Приложение 3	48
Приложение 4.....	Error! Bookmark not defined.
Приложение 5.....	50

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВОК	- Волоконно-оптический кабель
ВОЛС	- Волоконно-оптические линии связи
ВОСП	- Волоконно-оптические системы передачи
МОВ	- Многомодовое оптическое волокно
ООВ	- Одномодовое оптическое волокно
ЛД	- Лазерный диод
ФД	- Фотодиод
ЛС	- Линия связи
ПрОМ	- Приемный оптический модуль
ПОМ	- Передающий оптический модуль
СД	- Светодиод
СИД	- Светоизлучающий диод
ОВ	- Оптическое волокно
ОК	- Оптический кабель
ПП	- Показатель преломления
ППП	- Профиль показателя преломления
DCF	- Dispersion Compensating Fiber (волокно, компенсирующее дисперсию)
DSF	- Dispersion Shifted Fiber (одномодовое волокно со смещенной дисперсией)
WDM	- Wavelength Division Multiplexing – (волновое мультиплексирование)
DWDM	- Density Wavelength Division Multiplexing (плотное волновое мультиплексирование)
FDDI	- Fiber Distributed Data Interface (интерфейс передачи данных по волокну)
FRP	- Fiber Reinforced Plastic (стеклопластик)
ITU-T	- International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Bureau – Международный союз электросвязи – сектор стандартизации телекоммуникаций МЭС-Т)
NA	- Numerical Aperture (числовая апертура)
NZDF	- Non-Zero Dispersion Fiber (одномодовое волокно с ненулевой дисперсией)
NZDSF	- Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией)
SSF	- Standard Single-Mode Fiber (стандартное одномодовое волокно)

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи» (ОНС и ПК ВОЛС) является базовым для изучения многих специальных дисциплин по специальности - **210401 «Физика и техника оптической связи»**.

Целью преподавания дисциплины является изучение студентами ВОЛС, являющимися в настоящее время самыми быстродействующими из всех известных систем связи, знакомство с оптическими кабелями и пассивными компонентами, используемых для: организации телефонной городской, междугородней и международных сетей связи и передачи данных; кабельного телевидения; локальных вычислительных сетей; структуры - рованных кабельных систем; волоконно-оптических датчиков.

Знание основных закономерностей процессов распространения сигналов в оптических волноводах требует знаний в области физики и электродинамики. Знание характеристик выпускаемых промышленностью оптических волокон необходимо будущим специалистам при проектировании и эксплуатации волоконно-оптических линий связи.

Сборник задач задуман с целью реализации формулы «не только знать, но и уметь».

Решение задач и выполнение лабораторных работ способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний, а также позволяет глубже понять физическую сущность процессов и явлений в оптических волокнах, закрепить в памяти основные формулы, значения и порядок величин важнейших параметров ОВ. Данное пособие преследует выше названную цель.

Важную роль в развитии творческих способностей будущих специалистов, в приобретении ими практических навыков, играет самостоятельная работа студента. Данное учебное пособие предназначено, прежде всего, для самостоятельной работы и содержит большое число задач и вопросов.

В начале каждого раздела приводится краткое теоретическое введение со сводкой основных формул и указаний применяемых обозначений и их *размерности*. Затем приводятся примеры решения задач со ссылками на основные уравнения и формулы.

В книге содержатся задачи разной трудности и решения типовых задач. Это поможет усвоить материал курса при подготовке к зачетам и экзаменам.

Некоторые вопросы и задачи могут быть использованы для контроля текущей самостоятельной работы студента в течение семестра, а также в качестве индивидуальных расчетных заданий.

Несколько советов по решению задач. Приступая к решению задачи, хорошо вникните в ее смысл и постановку вопросов. Установите, все ли данные, необходимые для решения задачи, приведены. Недостающие данные можно найти в таблицах приложения.

Каждую задачу решайте, как правило, в общем виде, чтобы искомая величина была выражена через заданные величины.

Получив решение в общем виде, проверьте, правильную ли оно имеет размерность.

Получив числовой ответ, оцените его *правдоподобность*.

При составлении задачника использованы материалы справочников, книг и учебных пособий, рекомендуемых при изучении курса «ОНС и ПК ВОЛС» и приведенных в списке литературы.

В конце сборника дана сводка основных характеристик используемых в настоящее время оптических волокон в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Автор выражает благодарность своим ученикам Сурковой Г., Круглову Р. и Щербиной В. за помощь в подготовке пособия.

1 ПЛАНАРНЫЙ ВОЛНОВОД

1.1 Структура волновода

Планарные волноводы являются конструктивной основой всех типов элементов интегральной оптики. Волноводы этого класса состоят из диэлектрического световедущего слоя окруженного с двух сторон слоями с меньшим показателем преломления. В зависимости от распределения показателя преломления по поперечному сечению такой структуры различают пленочные (со ступенчатым профилем распределения показателя преломления) оптические волноводы и неоднородные (с градиентным профилем распределения показателя преломления) планарные волноводы.

Основные конструктивные элементы планарного волновода показаны на рисунке 1.1.

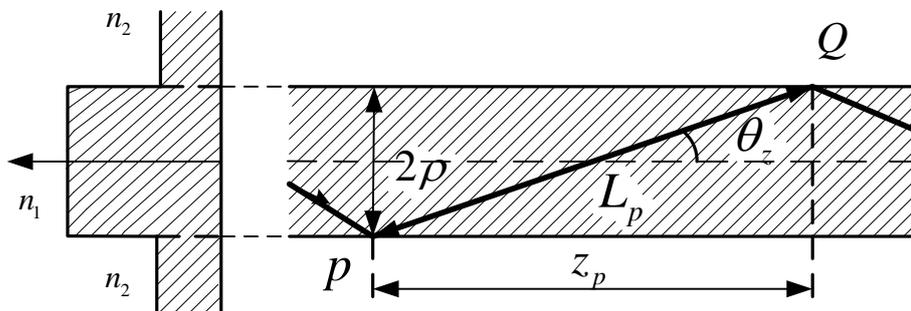


Рисунок 1.1 – Структура планарного волновода.

В волноводе со ступенчатым профилем свет распространяется в сердцевине при геометрической трактовке по прямым линиям. Луч выходит из точки P (рисунок 1.1) на одной границе раздела под углом θ_z к оси волновода и пересекает вторую границу в точке Q. Падающий луч испытывает полное внутреннее отражение, если $0 \leq \theta_z < \theta_c$, где θ_c – критический угол скольжения, который определяется по формуле:

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)^{1/2}. \quad (1.1)$$

1.2 Основные параметры волноводов

1.2.1 Относительная разность показателей преломления. Одним из важнейших параметров, который характеризует волновод, как передающую среду, является относительная разность показателей преломления сердцевин и оболочки Δ :

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1.2)$$

где n_1 – показатель преломления волноводного слоя;

n_2 - показатель преломления оболочки.

1.2.2 Числовая апертура. Важным параметром, характеризующим волновод, является числовая апертура NA . Она связана с максимальным углом θ_A (апертурный угол) ввода излучения из свободного пространства в волновод, при котором свет ещё испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волноводу

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (1.3)$$

1.2.3 Нормированная частота. Другим важным параметром, характеризующим волновод и распространяющийся по нему световое излучение с длиной волны λ [мкм], является нормированная частота V , которая зависит от толщины волноводного слоя $d = 2\rho$ [мкм] и определяется как:

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{\pi d}{\lambda} NA. \quad (1.4)$$

Одномодовый режим соблюдается при $V < 2.405$.

1.2.4 Профиль показателя преломления. Распределение показателя преломления по сечению волновода удобно описывать формулой

$$n^2(x) = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{|x|}{\rho} \right)^q \right], \quad x < \rho. \quad (1.5)$$

Показатель q определяет форму профиля в широком наборе различных распределений $n(x)$, начиная с треугольного (при $q=1$) и кончая ступенчатым (при $q=\infty$). При $q=2$ профиль называется параболическим.

1.2.5 Лучевой инвариант. При описании процессов распространения направляемых мод волновода вводится понятие лучевого инварианта (эффективного показателя преломления) распространяющейся моды волновода, который определяется так:

$$\bar{\beta} = n_1 \cos \theta_z. \quad (1.6)$$

1.2.6 Основные параметры геометрии распространяющихся лучей
Длина пути между последовательными отражениями луча:

$$L_p = \frac{2\rho}{\sin \theta_z} = \frac{2\rho n_1}{(n_1^2 - \bar{\beta}^2)^{1/2}}, \quad (1.7)$$

где ρ - радиус волноводного слоя в мкм.

Оптическая длина пути:

$$L_0 = L_p n_1 = \frac{2\rho \cdot n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - \bar{\beta}^2}}. \quad (1.8)$$

Полупериод траектории луча:

$$z_p = \frac{2\rho}{\operatorname{tg}\theta_z} = L_p \cos\theta_z = \frac{2\rho\bar{\beta}}{(n_1^2 - \bar{\beta}^2)^{1/2}}. \quad (1.9)$$

Количество отражений на единицу длины волновода:

$$N = \frac{1}{z_p} = \frac{\operatorname{tg}\theta_z}{2\rho}. \quad (1.10)$$

1.2.7 Время прохождения луча волновода длиной Z

Время прохождения луча в волноводе при различных ППП (т.е. для разных значений q) определяют из

$$t = \frac{z}{c} \frac{n_1}{q+2} \left(q \cdot \frac{n_1}{\bar{\beta}} + \frac{2\bar{\beta}}{n_1} \right), \quad (1.11)$$

где z – длина волновода, на которой ведется расчет.

Для планарного волновода со ступенчатым ППП данное выражение принимает вид

$$t = \frac{z}{c} \cdot \frac{n_1}{\cos\theta_z} = \frac{z}{c} \cdot \frac{n_1^2}{\bar{\beta}}. \quad (1.12)$$

1.2.8 Уширение импульса. Лучевая дисперсия τ_d или уширение импульса во времени есть разность максимального и минимального времени прохождения лучей, которая определяется соотношением:

$$\tau_d = t_{\max} - t_{\min} = \frac{z}{c} n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{z}{c} n_1 \left\{ \sqrt{\frac{1}{1-2\Delta}} - 1 \right\}. \quad (1.13)$$

Альтернативный путь рассмотрения дисперсии заключается в том, что ее характеризуют значением пространственного уширения z_d импульса по мере его распространения. Через время t уширение достигает величины:

$$z_d = \frac{c \cdot t}{n_1} \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) \approx \frac{c \cdot t}{n_1} \Delta \approx \frac{c \cdot t}{n_1} \frac{\theta_C^2}{2}. \quad (1.14)$$

1.3 Примеры решения задач

1.3.1 Рассмотрим ОВ со ступенчатым ППП, $n_1 = 1,475$; $n_2 = 1,460$; $\rho = 25$ мкм. Каково значение критического угла скольжения θ_c , при котором лучи являются направляемыми. Определите число отражений такого луча на однокилометровом участке ОВ.

Решение

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arccos\left(\frac{1,46}{1,475}\right) = 8,2^\circ.$$

Число отражений для луча, распространяющегося под углом $\theta = \theta_c$ в ОВ длиной L определим по следующей формуле:

$$N = \frac{tg\theta_c}{2\rho} = \frac{tg8,2}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^3 = 1,44 \cdot 10^6,$$

таким образом, около $1,44 \cdot 10^6$ отражений происходит в ОВ длиной 1 км.

1.3.2 Определить толщину волноводного слоя планарного волновода, имеющего числовую апертуру $NA = 0,154$, нормированную частоту $V = 20$, а длина волны распространяющегося в нем света $\lambda = 0,85$ мкм.

Решение

Из формулы $V = \pi d \cdot NA / \lambda$ необходимо выразить параметр d

$$d = \frac{V \cdot \lambda}{\pi \cdot NA} = \frac{20 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,154} = 35 \text{ мкм}.$$

1.3.3. Рассчитать лучевую дисперсию и пространственное уширение импульса для ПВ с параметрами: $n_2 = 1,58$, $\Delta = 0,003$, $z = 1$ м.

Решение:

$$n_1 = \frac{n_2}{1 - \Delta} = \frac{1,58}{1 - 0,003} \approx 1,58,$$

лучевую дисперсию рассчитаем по формуле (1.13):

$$\tau_\theta = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 1,58 \left(\sqrt{\frac{1}{1 - 2 \cdot 0,003}} - 1 \right) = 1,59 \cdot 10^{-11} \text{ с} = 15,9 \text{ пс}.$$

Пространственное уширение импульса за время 1нс рассчитаем по формуле (1.14):

$$Z_\theta = \frac{c \cdot t}{n_1} \Delta = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9}}{1,58} \cdot 0,003 \approx 570 \text{ мкм}.$$

1.4 Задачи для самостоятельного решения

1.4.1 Рассчитать критический угол падения излучения в планарном волноводе с параметрами $\Delta = 0,001$, $n_2 = 1,48$ (профиль ППП – ступенчатый). Определить минимальное численное значение лучевого инварианта .

1.4.2 Дан планарный волновод со ступенчатым ППП. Определить числовую апертуру, если известны параметры $\Delta = 0,002$, $n_2 = 1,49$.

1.4.3 Рассчитать нормированную частоту при следующих параметрах планарного волновода: $\lambda=0,85$, $d_{\text{ПВ}}=14\text{мкм}$, $\Delta=0,003$, $n_2=1,5$.

1.4.4 Найти длину пути между последовательными отражениями луча L_p , оптическую длину пути L_0 , полупериод траектории луча z_p при следующих параметрах планарного волновода: $\rho=30\text{мкм}$, $\Delta=0,004$, $n_2=1,57$.

1.4.5 Определить максимальное количество отражений на единицу длины волновода при заданных параметрах $\rho = 25\text{мкм}$, $\Delta=0,002$, $n_2=1,55$. Оценить потери световой энергии, возникающие при отражении на границе раздела сред, в планарном волноводе длиной 2 см, если потери при одном отражении составляют 0,003%. В ответе также указать погонный параметр, выраженный в дБ/км.

1.4.6 Оценить максимальное и минимальное времена прохождения луча планарного волновода длиной 2,5 см. При расчете полагать, что ППП волновода ступенчатый. Построить график зависимости $t = f(\beta)$ в интервале $n_2 < \beta < n_1$. Исходные данные для расчета: $\rho = 34\text{мкм}$, $\Delta=0,002$, $n_2=1,59$, $\lambda=1,34\text{мкм}$.

1.4.7 Построить график функции $n = f(x)$ для планарного волновода с усеченным степенным профилем при заданных параметрах: $\rho = 18\text{мкм}$, $\Delta=0,005$, $n_2=1,53$, $q=2.5$.

1.4.8 Оценить максимальное и минимальное времена прохождения луча планарного волновода длиной 2 см. При расчете полагать, что волновод обладает усеченным степенным профилем. Построить график зависимости $t = f(\beta)$ в интервале $n_2 < \beta < n_1$. Провести сравнительный анализ полученной характеристики с результатами задачи 6, исходные данные : $\rho = 34\text{мкм}$, $\Delta=0,002$, $n_2=1,59$, $\lambda=1,34\text{мкм}$, $q=2,2$.

1.4.9 Построить график зависимости времени прохождения луча в волноводе $t = f(q)$ в интервале $1.5 < q < 2.5$. Сделать выводы о влиянии ППП на время прохождения лучом волновода, $\Delta=0,005$, $n_2=1,53$.

1.4.10 Определить уширение импульса или лучевую дисперсию τ_d , пространственное уширение z_d импульса по мере его распространения в волноводе, используя ранее вычисленное время прохождения луча 2 см волновода. Расчет провести для планарного волновода со ступенчатым ППП. Исходные данные взять из задачи 6.

1.4.11 Определить, какой должна быть относительная разность показателей преломления планарного волновода со ступенчатым ППП, если диаметр волноводного слоя $d = 6 \text{ мкм}$, $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ вдоль оси. Нормированная частота равна 4.9, а $n_2 = 1,466$.

1.4.12 Определите длину планарного волновода со ступенчатым ППП, если максимальное время прохождения луча равно 10^{-8} с; $\Delta = 0,01$; $n_2 = 1,467$.

2 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

2.1 Основные элементы оптического волокна

Основные конструктивные элементы оптического волокна показаны на рис. 2.1.

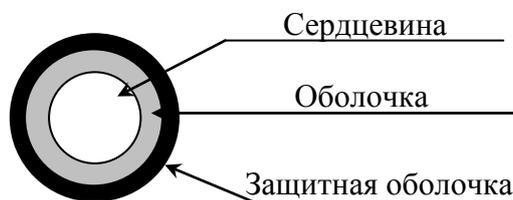


Рисунок 2.1 – Основные элементы оптического волокна

Каждое волокно состоит из ядра (сердцевины) и оболочки с различными показателями преломления. Ядро, по которому происходит распространение светового сигнала, изготавливается из оптически более плотного материала.

Ядро (сердцевина) - светопередающая часть волокна, изготавливается либо из стекла, либо из пластика. Чем больше диаметр ядра, тем больше количество света может быть передано по волокну. То есть ядро оптического волокна является оптическим каналом по которому распространяется световое излучение.

Оболочка - обеспечивает переотражение света в ядро (сердцевину) волокна таким образом, чтобы световые волны распространялись только по ядру волокна, то есть обеспечивает канализацию светового излучения по ядру (сердцевине) волокна.

Защитная оболочка - обеспечивают прочность волокна, поглощение ударов и дополнительную защиту волокна от воздействия окружающей среды. Такие буферные оболочки обычно бывают многослойными, изготавливаются из пластика и имеют толщину от 250 до 900 мкм.

Размер волокна в общем случае определяется внешними диаметрами его ядра (сердцевины), оболочки и защитной оболочки. Геометрические размеры ядра, оболочки и защитной оболочки волокна записываются через наклонную черточку. Например, запись геометрических параметров

волокна в виде 50/125/250 обозначает, что волокно имеет диаметр ядра - 50 мкм, диаметр оболочки-125 мкм и диаметр защитной оболочки 250 мкм. Защитная оболочка всегда удаляется при соединениях волокон.

2.2 Типы и характеристики оптического волокна

Тип оптического волокна идентифицируется по типу путей, или так называемых «мод», проходимых светом в ядре волокна. Существуют два основных типа волокна - *многомодовое MMF (multi mode fiber)* и *одномодовое SMF (single mode fiber)*. Волокна отличаются диаметром ядра и оболочки, а также профилем показателя преломления ядра.

Многомодовые волокна могут обладать *ступенчатым* или *градиентным* показателями преломления и подразделяются на *ступенчатые* (*step index multi mode fiber*) и *градиентные* (*graded index multi mode fiber*).

Одномодовые волокна подразделяются на *ступенчатые одномодовые волокна* (*step index single mode fiber*) или *стандартные волокна SF*, на *волокна со смещённой дисперсией DSF* (*dispersion - shifted single mode fiber*), и на *волокна с ненулевой смещённой дисперсией NZDSF* (*non-zero dispersion-shifted single mode fiber*), которые отличаются профилем показателя преломления.

Диапазоны длин волн, в которых работают современные ВОСП приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Диапазоны длин волн, используемых в ВОСП

Диапазон длин волн (нм)	Центральная длина волны λ , нм	Название диапазона	Расшифровка названия диапазона
780...860	820		Первый
1260...1360	1310	О	Основной
1360...1460	1410	Е	Расширенный
1460...1530	1495	S	Коротковолновый
1530...1565	1550	С	Стандартный
1565...1625	1595	L	Длинноволновый
1625...1675	1650	U	Сверхдлинный

2.3 Основные параметры ОВ

2.3.1 Расчет показателя преломления сердцевин и оболочки ОВ

Обычно требуемые изменения n достигается добавлением к кварцу примесей различных концентраций. Для изготовления сердцевин ОВ может применяться чистый кварц, при этом в диапазоне от 850 до 1600 мкм показатель преломления лежит в окрестности 1,45. Чтобы изготовить оболочку, необходимо изменить n , что достигается добавлением к кварцу примесей значительной концентрации, так, например, применяется кварц, легированный B_2O_3 или F. В ряде случаев необходимо увеличить ПП сердцевин, тогда чистый кварц легируют, например, GeO_2 или P_2O_5 . В зависимости от добавок, показатель преломления рассчитывается по формуле Селмейера:

$$n_1(\lambda) = \sqrt{1 + \lambda_{[мкм]}^2 \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{\lambda_{[мкм]}^2 - \mu_i^2}}, \quad (2.1)$$

где A_i, μ_i - значения коэффициентов Селмейера (Приложение 1).

Для определения ПП оболочки необходимо воспользоваться формулой (1.2).

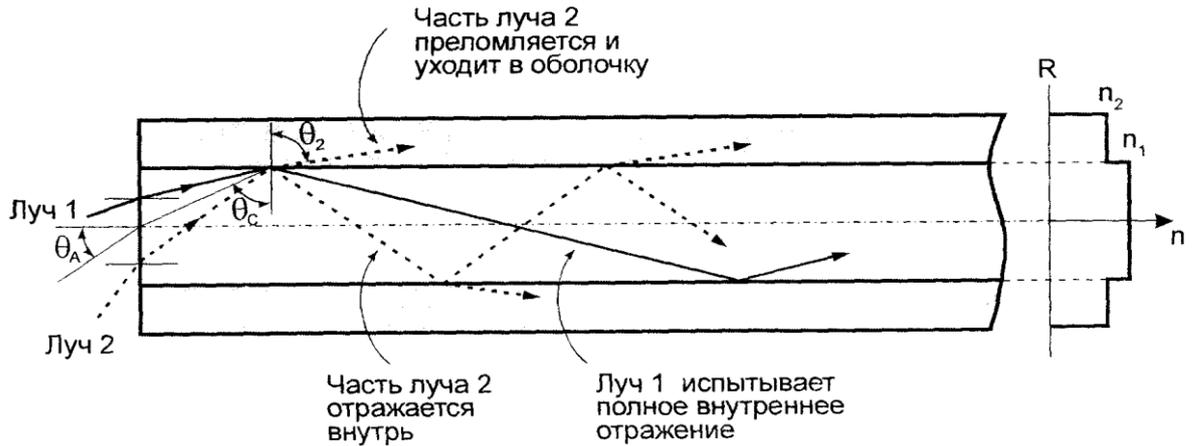


Рисунок 2.2 – Ход лучей в многомодовом ступенчатом оптическом волокне

2.3.2 Распространение света по волокну можно пояснить на основе принципа полного внутреннего отражения света на границе раздела двух сред, вытекающего из закона преломления света Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (2.2)$$

где n_1 – показатель преломления среды 1;
 θ_1 – угол падения света на границу раздела сред;
 n_2 – показатель преломления среды 2;
 θ_2 – угол преломления света в среде 2.

Обратите внимание, что в данном разделе, в отличие от предыдущего, углы отсчитываются от нормали.

Из закона Снеллиуса легко найти критический угол падения:

$$\theta_C = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right). \quad (2.3)$$

Если угол падения на границу раздела меньше критического угла падения (луч 2), то при каждом внутреннем отражении часть энергии рассеивается наружу в виде преломлённого луча, что приводит в конечном итоге к затуханию света. Лучи, вся энергия которых уже в самом начале волоконного световода излучается в окружающее пространство и не распространяется вдоль световода называются *излучаемыми*.

Если же угол падения больше критического угла (луч 1), то при каждом отражении от границы, благодаря полному внутреннему отражению вся энергия возвращается обратно в сердцевину. Лучи, траектории которых

полностью лежат в оптически более плотной среде, называются **направляемыми**. Поскольку энергия направляемых лучей не рассеивается наружу, такие лучи могут распространяться на большие расстояния и обеспечивают прохождение оптических сигналов по волокну.

2.3.3 Числовая апертура. Важнейшим параметром, характеризующим волокно, является числовая апертура NA . Она связана с максимальным углом θ_A (апертурный угол) ввода излучения из свободного пространства в волокно, при котором свет ещё испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну:

$$NA = \sin \theta_A. \quad (2.4)$$

Для волокна со ступенчатым профилем показателя преломления легко получить значение числовой апертуры, выраженное через показатели преломления:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (2.5)$$

Для градиентного волокна используется понятие локальной числовой апертуры:

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}. \quad (2.6)$$

значение которой максимально на оси и падает до 0 на границе сердцевинки и оболочки. В формуле (3.7) $n_1(r)$ - зависимость ПП от координаты вдоль радиуса сердцевинки ОВ определяется по формуле (2.5).

При этом параметр q для оптимального ППП рассчитывается по формуле:

$$q_{opt} = 2\sqrt{1 - 2\Delta}. \quad (2.7)$$

Для градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления, числовая апертура:

$$NA_{eff} = \frac{\sqrt{n_1^2(0) - n_2^2}}{\sqrt{2}}, \quad (2.8)$$

где $n_1(0)$ - максимальное значение показателя преломления на оси.

Числовая апертура ответственна за **эффективность ввода излучения** в ОВ:

$$\eta = NA^2 \quad (2.9)$$

Для градиентного МОВ:

$$\eta = \frac{NA^2}{1 + \frac{2}{q}} \quad (2.10)$$

Значения числовой апертуры, как правило, не превышает 0,5.

2.3.4 Нормированная частота. Другим важным параметром, характеризующим волокно и распространяющийся по нему свет, является нормированная частота V , которая определяется как:

$$V = \pi d \cdot NA / \lambda, \quad (2.11)$$

где d - диаметр сердцевины волокна [мкм];

λ – длина волны света [мкм].

При $V \leq 2,405$ в оптическом волокне распространяется только одна мода. Такой режим называют одномодовым. В противном случае ОВ будет многомодовым.

2.3.5 Затухание в ОВ

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого в волокне сигнала, тем больше может быть длина линии связи.

Затухание в оптическом волокне – это мера ослабления оптической мощности, распространяемой вдоль ОВ между двумя его поперечными сечениями на данной длине волны. Затухание в ОВ выражается в дБ. Коэффициент затухания в ОВ - это величина затухания на единице длины волокна и выражается в дБ/км. Коэффициент затухания в ОВ обуславливается следующими факторами:

- потери за счет Рэлеевского рассеяния;
- потери за счет поглощения в инфракрасной и ультрафиолетовой областях частотного диапазона;
- кабельные потери;
- потери на макро- и микроизгибах.

Собственные потери

Затухание с одной стороны, обусловлено наличием в оптическом волокне неоднородностей, расстояние между которыми меньше длины волны, а с другой – тепловыми флуктуациями показателя преломления. Свет,

попадая на неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке.

Составляющую коэффициента затухания ОВ, вызванную Рэлеевским рассеянием, можно определить из выражения

$$\alpha_{\text{расс}}(\lambda) = 4,34 \cdot \frac{8 \cdot \pi^3}{3 \cdot \lambda^4} \cdot (n_1^2 - 1) \cdot \beta \cdot k \cdot T \cdot 10^3, \quad (2.12)$$

где n_1 – ПП сердцевины и равен 1,48 – 1,50; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T = 1500$ К – температура затвердевания стекла при вытяжке; $\beta = 8,1 \cdot 10^{-11}$ м²/Н – коэффициент сжимаемости стекла (для кварца).

$$C' = \frac{4,34 \cdot k \cdot \beta \cdot T \cdot 10^3}{3} \cdot 8 \cdot \pi^3 = 0,6 \frac{\text{дБмкм}^4}{\text{км}}. \quad (2.13)$$

С учетом (3.16) получим итоговую формулу для расчета затухания в ОВ, вызванного Рэлеевским рассеянием:

$$\alpha_{\text{расс}}(\lambda) = C' \cdot \frac{(n_1^2 - 1)}{\lambda_{[\text{мкм}]}^4}. \quad (2.14)$$

Потери за счет поглощения в ультрафиолетовой области частотного диапазона [дБ/км] определяются по формуле:

$$\alpha_{\text{уф}} = \frac{10^{\frac{2}{\lambda_{[\text{мкм}]}^2}}}{2154}. \quad (2.15)$$

Потери в инфракрасной области спектра:

$$\alpha_{\text{ик}} = 10^{\left(\frac{-21,9}{\lambda_{[\text{мкм}]}^2} + 12,4\right)}. \quad (2.16)$$

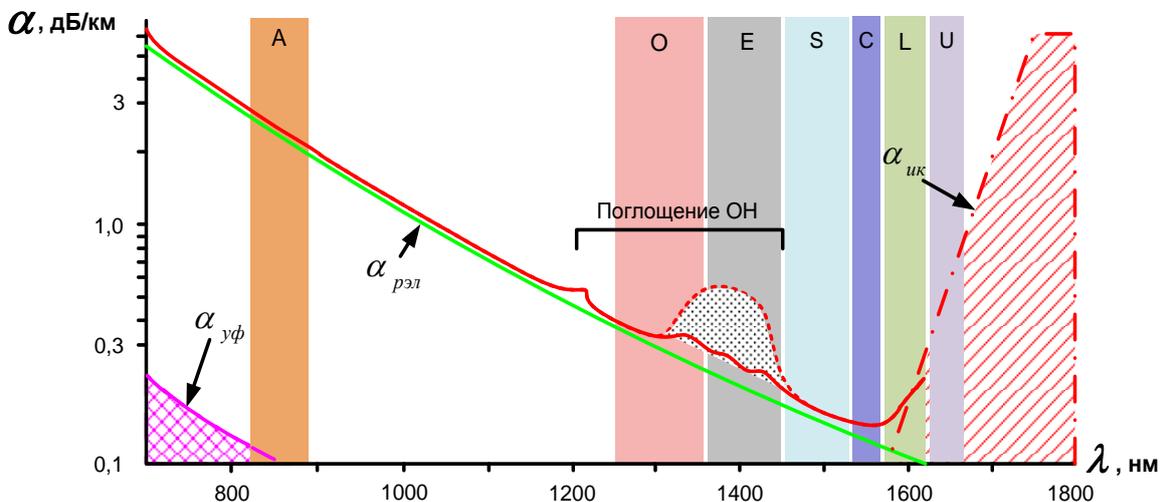


Рисунок 2.3 – Затухание в ОВ

Полное затухание в волокне, измеряемое в дБ/км, определяется в виде суммы собственных и кабельных потерь:

$$\alpha = \alpha_{\text{расс}} + \alpha_{\text{ик}} + \alpha_{\text{уф}} + \alpha_{\text{каб}}. \quad (2.17)$$

Величина кабельных потерь $\alpha_{\text{каб}}$ составляет 0,15-0,2 от собственных потерь. Они обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающих при наложении покрытий и защитных оболочек при производстве кабеля, а также в процессе его прокладки.

Потери на макро- и микроизгибах

В ОВ кроме затухания, обусловленного потерями на рассеяние и поглощение в материале сердцевины, существуют потери, вызванные отклонениями структуры ОВ от оптимальной. И главной причиной этих потерь являются искривления оси ОВ и границы раздела сердцевина-оболочка.

Различают макроизгибы, обусловленные конструкторско-технологическими или эксплуатационными факторами и случайные, хаотически расположенные по длине ОВ, – микроизгибы.

Микроизгибы представляют собой мелкие локальные нарушения прямолинейности волокна, характеризуемые смещениями его оси в поперечных направлениях на участке микроизгиба. Основными причинами появления микроизгибов являются локальные поперечные механические усилия различного происхождения, приложенные к очень малым участкам волокна и появляющимися в процессе вытяжки волокна, перемотки и его хранения.

Потери на микроизгибах:

$$\alpha_{\text{МИКР}} = N \cdot \frac{32h^2 \cdot d^4 \cdot n_1^2}{D^6 \cdot NA^6}, \quad (2.18)$$

где h – высота микроизгиба, [мкм]; ($h \approx (0,01 \div 0,1)d$);

N – число микроизгибов на 1 км ОВ;

d – диаметр сердцевины, [мкм];

D – диаметр ОВ, [мкм].

Потери на макроизгибах:

$$\alpha_{\text{МАКР}} = -10 \cdot \log \left(1 - \frac{d \cdot n_1^2}{R_{\text{изг}} \cdot NA^2} \right), \quad (2.19)$$

где $R_{\text{изг}}$ – радиус изгиба (рассчитывается при $R=1,2,5,10\text{см}$).

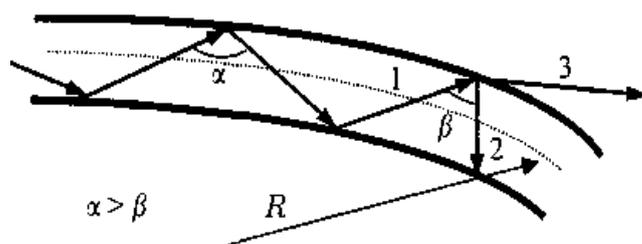


Рисунок 2.4 - Распространение волн в изогнутом оптическом волноводе(макроизгибы)

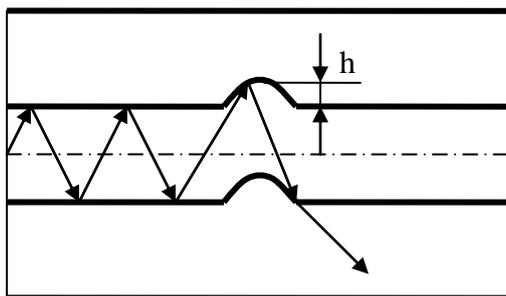


Рисунок 2.5 – Потери на микроизгибах

2.3.6 Полоса пропускания и дисперсия в ОВ

Рабочая полоса частот (полоса пропускания) ОВ определяет число передаваемых по нему каналов связи и зависит от дисперсии ОВ.

Полоса пропускания МОВ обратно пропорциональна величине уширения импульсов. Если импульсы на входе и выходе ОВ имеют гауссовскую форму, то полоса пропускания определяется по формуле :

$$\Delta f = \frac{0,44}{\tau}, \quad (2.20),$$

где τ - уширение импульсов на уровне 0,5 их амплитуды.

Коэффициент широкополосности есть полоса пропускания ОВ, выраженная в МГц·км, т.е:

$$\Delta f = \Delta F / L, \quad (2.21)$$

$$\Delta F = \frac{0,44}{\tau}, \quad (2.20a)$$

где τ - дисперсия на единицу длины.

Дисперсия - уширение импульсов - определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины L по формуле:

$$\tau(L) = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}, \quad (2.22)$$

где t_{in} - длительность импульса на входе кабеля;

t_{out} - длительность импульса на выходе кабеля;

Обычно дисперсия нормируется в расчёте на 1 км, и измеряется в пс/км.

Виды дисперсии представлены на рис. 2.6. Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну при заданной длине. Результирующая дисперсия τ определяется из выражения:

$$\tau^2 = \tau_{mod}^2 + \tau_{xp}^2 + \tau_{пмд}^2 = \tau_{mod}^2 + (\tau_{mat} + \tau_{волн})^2 + \tau_{пмд}^2, \quad (2.23)$$

где τ_{mod} - межмодовая дисперсия;

τ_{xp} - хроматическая дисперсия, которая состоит из материальной τ_{mat} и волноводной $\tau_{волн}$ составляющих;

$\tau_{пмд}$ - поляризационно-модовая дисперсия.

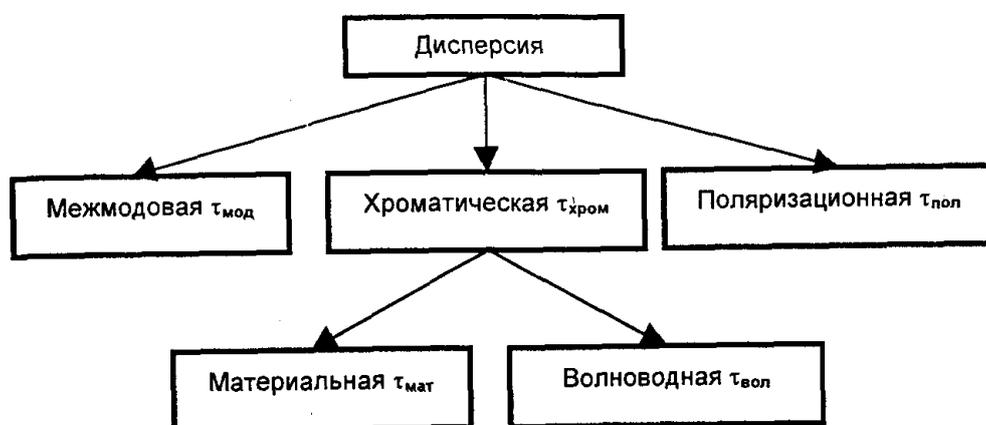


Рисунок 2.6 – Виды дисперсии

2.4 Примеры решения задач к разделу «Основные параметры ОВ»

2.4.1 Рассмотрим оптическое волокно оболочка которого выполнена из чистого кварца, а сердцевина из кварца, легированного германием: $\Delta = 0,003$; $\lambda = 1,3$ мкм. Определить значения показателей преломления оболочки и сердцевины. Коэффициенты Селмейера взять из приложения 1 (вариант 1).

Решение

Полагаем, что ОВ имеет ступенчатый ППП. Находим ПП кварцевого стекла для $\lambda = 1,30$ мкм по формуле Селмейера:

$$n_1(\lambda) = \sqrt{1 + \lambda^2 \cdot \left[\frac{A_1}{\lambda^2 - l_1^2} + \frac{A_2}{\lambda^2 - l_2^2} + \frac{A_3}{\lambda^2 - l_3^2} \right]} =$$

$$= \sqrt{1 + 1,3 \cdot \left[\frac{0,73454395}{1,3^2 - 0,08697693^2} + \frac{0,42710828}{1,3^2 - 0,11195191^2} + \frac{0,82103399}{1,3^2 - 10,846540^2} \right]} = 1,468,$$

По условию задачи оптическая оболочка выполнена из чистого кварца ($n_1 = 1,468$), а сердцевина – из кварца, легированного германием ($n_1 > n_2$). Определяем по заданным величинам Δ и n_1 величину n_2 :

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) = 1,468 \cdot (1 - 0,003) = 1,464.$$

2.4.2 Определить возможность работы ОВ в одномодовом режиме на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм, имеющего числовую апертуру $NA = 0.145$ и диаметр сердцевины $d = 9$ мкм.

Решение

$$V = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} NA = \frac{3,14 \cdot 9 [\text{мкм}]}{1,55 [\text{мкм}]} \cdot 0,145 = 2,64 > 2,405.$$

При заданном диаметре сердцевины режим работы ОВ будет многомодовым.

2.4.3 Определить выполняется ли условие одномодового режима для ОВ с $d_c = 6$ мкм; $\Delta = 0,005$; $n_2 = 1,447$ на длине волны $\lambda_p = 1,3$ мкм.

Решение

Определяем величину $n_1 = \frac{n_2}{1 - \Delta} = \frac{1,447}{1 - 0,005} = 1,454$.

$$\lambda_{\text{отс}} = \frac{d\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405} = \frac{d\pi n_1 \sqrt{2\Delta}}{2,405} = \frac{6\pi \cdot 1,454 \sqrt{2 \cdot 0,005}}{2,405} = 1,14 \text{ мкм}.$$

Полученная длина волны отсечки $\lambda_{\text{отс}} = 1,14 < \lambda_p = 1,3$, т.е. условие одномодового режима выполняется.

2.4.4 Рассчитать коэффициент затухания в ООВ для центральной длины волны стандартного диапазона при ПП сердцевины $n_1 = 1,46$. Потери в кабеле не учитывать.

Решение

Центральная длина волны С диапазона $\lambda = 1550$ нм, тогда потери на Релеевское рассеяние:

$$\alpha_{\text{расс}} = \frac{C_R(n_1^2 - 1)}{\lambda^4} = \frac{0,6}{1,55^4} (1,46^2 - 1) \approx 0,12 \text{ дБ/км};$$

потери за счет поглощения в УФ и ИК диапазонах:

$$\alpha_{\text{погл}} = \alpha_{\text{уф}} + \alpha_{\text{ик}} = \frac{10^{\frac{2}{\lambda}}}{2154} + 10^{\left(\frac{-21,9}{\lambda} + 12,4\right)} = \frac{10^{\frac{2}{1,55}}}{2154} + 10^{\left(\frac{-21,9}{1,55} + 12,4\right)} = 0,01 + 0,02 = 0,03 \text{ дБ/км}$$

Суммарные потери:

$$\alpha_{\text{собр}} = \alpha_{\text{расс}} + \alpha_{\text{погл}} = 0,12 + 0,03 = 0,15 \text{ дБ/км}.$$

Это теоретический предел затухания на данной длине волны. Типичное значение $\alpha=0,22$ дБ/км обусловлен наличием микроизгибов.

2.4.5 Многомодовое ОВ (рек G.651 МСЭ-Т), с числовой апертурой $NA = 0,3$, имеет диаметр сердцевины $d = 50$ мкм и ПП $n_1 = 1,47$. Рассчитать потери на макроизгибах при $R_{изг} = 5$ см.

Решение:

$$\alpha_{МАКР} = -10 \lg \left| 1 - \frac{d \cdot n_1^2}{R_{изг} (NA)^2} \right| = -10 \lg \left| 1 - \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47^2}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3^2} \right| \approx 0,11 \text{ дБ/км.}$$

2.4.6 Одномодовое ОВ (рек G.652 МСЭ-Т) имеет следующие параметры $n_1 = 1,46$; $NA = 0,12$; $d=8$ мкм, $D=125$ мкм. Рассчитать потери на микроизгибах, если высота микроизгибов $h=0,2$ мкм, а их число на 1 км $N=1$.

Решение:

Потери на микроизгибах:

$$\alpha_{МИКР} = N \cdot \frac{32h^2 \cdot d^4 \cdot n_1^2}{D^6 \cdot NA^6} = 1 \cdot \frac{32 \cdot 0,2^2 \cdot 8^4 \cdot 1,46^2}{125^6 \cdot 0,12^6} = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ дБ/км.}$$

2.4.7 Одномодовое ОВ (рек. G.652) с параметрами $n_1 = 1,46$; $NA = 0,12$; $d=8$ мкм, $D=125$ мкм, имеет собственные потери 0,15 дБ/км. Определить допустимое значение числа микроизгибов на длине 1 км, если $h=0,2$ мкм.

Решение:

В соответствии с рек. G.652 затухание в ОВ должно быть не более 0,22 дБ/км. Т.к. собственные потери составляют 0,15 дБ/км, то максимально допустимые потери на микроизгибах будут равны $0,22-0,15=0,07$ дБ/км. Из формулы (2.18) выразим N , получим:

$$N = \frac{\alpha_{МИКР} \cdot D^6 \cdot NA^6}{32 \cdot h^2 \cdot d^4 \cdot n_1^2} = \frac{0,07 \cdot 125^6 \cdot 0,12^6}{32 \cdot 0,2^2 \cdot 8^4 \cdot 1,46^2} \approx 70.$$

2.5 Задачи к разделу «Основные параметры ОВ»

2.5.1 Каков критический угол полного внутреннего отражения для МОВ если $NA = 0,2$, $n_1 = 1,47$.

2.5.2 Рассчитать числовую апертуру и оценить эффективность ввода излучения в ОВ при $n_1=1,45$, $n_2=1,445$

2.5.3 Рассчитать нормированную частоту, если $d = 9$ мкм, $\Delta = 0,003$, $n_1 = 1,45$, $\lambda = 1310$ нм.

2.5.4 Определить возможность работы ОВ при $NA = 0,2$ и $\lambda = 0,85$ мкм, $d = 8,5$ мкм в одномодовом режиме.

2.5.5 Каково должно быть отношение d/λ , чтобы в ОВ был одномодовый режим при $NA = 0,16$.

2.5.6 Определить диаметр модового поля SMF-волокна на $\lambda = 1260$ нм.

2.5.7 Определить диаметр модового поля ООВ на центральной длине волны О диапазона.

2.5.10 Определить затухание света в ОВ обусловленное рэлеевским рассеянием, в 3-ем окне прозрачности при $c' = 0,6 \frac{\Delta n^2}{\lambda^4}$. сравнить с затуханием для 1-го и 2-го окон прозрачности.

2.5.11 Рассчитать коэффициент затухания в ОВ на длине волны $\lambda = 1310 \text{ нм}$, $n_1 = 1,45$. Кабельные потери не учитывать.

2.5.12 Одномодовое ОВ (рек G.652 МСЭ-Т), с числовой апертурой $NA = 0,12$, имеет диаметр сердцевины $d = 8 \text{ мкм}$ и ПП $n_1 = 1,46$. Рассчитать потери на макроизгибах при $R_{изг} = 5 \text{ см}$. Построить график зависимости затухания от радиуса изгиба.

2.5.13 Одномодовое ОВ (рек. G.652 МСЭ-Т) с параметрами $n_1 = 1,46$; $NA = 0,12$; $d=8 \text{ мкм}$, $D=125 \text{ мкм}$, имеет собственные потери $0,15 \text{ дБ/км}$. Определить максимально допустимое значение h , если число микроизгибов на длине 1 км равно 50 .

2.6 Основные характеристики МОВ

Как было показано в п. 2.3.4 при $V > 2,405$ режим работы ОВ будет многомодовым. В этом случае **число распространяющихся мод в МОВ** можно определить по формуле:

Для ступенчатого ППП:

$$M_m = \frac{1}{2} V^2, \quad (2.24)$$

Для градиентного ППП:

$$M_m = \frac{V^2}{4}, \quad (2.25)$$

Для оптимального ППП:

$$M_m = \frac{V^2}{8}. \quad (2.26)$$

2.6.1 Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения мод в МОВ и зависит от длины линии передачи.

Для СППП:

$$\tau_{mod \ step}(L) = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, & L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c \end{cases}. \quad (2.27)$$

Для ГППП:

$$\tau_{mod \ grad}(L) = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, & L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad (2.28)$$

где L_c -длина межмодовой связи (для ступенчатого волокна порядка 5-7 км, для градиентного - порядка 10-11 км).

Как видно из (2.28) и (2.29), дисперсия для коротких линий ($L < L_c$) увеличивается по закону L , а для длинных линий ($L > L_c$) – по закону $\sqrt{L \cdot L_c}$.

Для оптимального ППП:

$$\tau_{mod\ opt}(L) = \frac{n_1 \Delta^2}{8c} L \quad (2.29)$$

В настоящее время, коэффициент широкополосности градиентных ОВ составляет 500-600 МГц*км на длине волны 0,85 мкм и 600-1200 МГц*км на длине волны 1,3 мкм.

2.7 Примеры решения задач к разделу «Основные характеристики МОВ»

2.7.1 Многомодовое ОВ (рек G.651) с диаметром сердцевины $d = 50$ мкм; $D = 125$ мкм; $NA = 0,2$, работает в двух диапазонах $\lambda = 0,85$ мкм и $\lambda = 1,3$ мкм; оболочка из чистого кварцевого стекла ($n_2 = 1,447$). Определить число мод для градиентного и ступенчатого ОВ.

Решение

а) рабочая длина волны 1,3 мкм.

Определяем нормированную частоту:

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{\pi d}{\lambda} NA = \frac{50\pi}{1,3} \cdot 0,2 = 24,16.$$

$$\text{Для ступенчатого ОВ: } M = V^2 / 2 = \frac{24,16^2}{2} = 292.$$

$$\text{Для градиентного ОВ: } M = V^2 / 4 = \frac{24,16^2}{4} = 146.$$

б) рабочая длина волны 0,85 мкм.

$$V = \frac{50\pi}{0,85} = 37.$$

$$\text{Для ступенчатого ОВ } M = V^2 / 2 = \frac{37^2}{2} = 684.$$

$$\text{Для градиентного ОВ } M = V^2 / 4 = \frac{37^2}{4} = 342.$$

2.7.2 Рассчитать величину межмодовой дисперсии для МОВ с ГППП, СППП и оптимальным ППП. Для каждого случая определить коэффициент широкополосности. Исходные данные для расчета: $n_1 = 1,464$, $\Delta = 0,013$.

Решение

Для ОВ со ступенчатым ППП:

$$\tau_{меж_ст} = \frac{n_1 \Delta}{c} = \frac{1,464 \cdot 0,013}{3 \cdot 10^5} = 63,4 \text{ нс/км}.$$

Для ОВ с градиентным ППП:

$$\tau_{\text{меж_град}} = \frac{n_1 \Delta^2}{2c} = \frac{1,464 \cdot 0,013^2}{2 \cdot 3 \cdot 10^5} = 0,412 \text{ нс / км} .$$

Для ОВ с оптимальным ППП:

$$\tau_{\text{меж_опт}} = \frac{n_1 \Delta^2}{8c} = \frac{1,464 \cdot 0,013^2}{8 \cdot 3 \cdot 10^5} = 0,1 \text{ нс / км} .$$

Определим коэффициент широкополосности:

Для ОВ со ступенчатым ППП:

$$\Delta F_{\text{ст}} = \frac{0,44}{\tau_{\text{меж_ст}}} = \frac{0,44}{63,4 \cdot 10^{-9}} = 6,94 \text{ МГц} \cdot \text{км}$$

Для ОВ с градиентным ППП:

$$\Delta F_{\text{град}} = \frac{0,44}{\tau_{\text{меж_град}}} = \frac{0,44}{0,412 \cdot 10^{-9}} = 1068 \text{ МГц} \cdot \text{км} .$$

Для ОВ с оптимальным ППП:

$$\Delta F_{\text{опт}} = \frac{0,44}{\tau_{\text{меж_опт}}} = \frac{0,44}{0,1 \cdot 10^{-9}} = 4400 \text{ МГц} \cdot \text{км} .$$

Как видно из полученных результатов, ОВ с ГППП значительно превосходит по техническим характеристикам ОВ со СППП.

2.8 Задачи к разделу «Основные характеристики МОВ»

2.8.1 Рассчитать число мод в ОВ(СППП и ГППП) при $NA = 0.15$, $\lambda = 1.5$ мкм, $d = 10$ мкм и определить, при каком d возможен одномодовый режим.

2.8.2 Определить числовую апертуру и коэффициент широкополосности градиентного ОВ при $n_1=1.47$; $\Delta=0.01$.

2.8.3 Рассчитать полосу пропускания ΔF для МОВ со ступенчатым ППП длиной 1 км при $\Delta = 0.044$; $n_1 = 1.465$ и сравнить с градиентным.

2.8.4 Рассчитать коэффициент широкополосности ΔF градиентного ОВ при $\Delta = 0.01$; $n_1 = 1.4654$ и сравнить с оптимальным.

2.9 Основные характеристики ООВ

2.9.1 Длина волны отсечки. Минимальная длина волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду, называется длиной волны отсечки. Этот параметр определяет одномодовый режим работы волокна.

$$\lambda_{\text{отс}} = \pi \cdot d \cdot \frac{NA}{2,405} . \quad (2.30)$$

2.9.2 Максимальный диаметр сердцевины, при котором соблюдается одномодовый режим, определяется по формуле:

$$d_{\text{max}} = \frac{\lambda \cdot 2,405}{\pi \cdot NA} . \quad (2.31)$$

Одномодовое ОВ, как правило, имеет $d = 6 - 10 \text{ мкм}$.

2.9.3 Одной из важнейших характеристик ООВ, описывающих распределение интенсивности световой волны по поперечному сечению ОВ, является **диаметр поля моды ООВ, который** рассчитывается следующим образом:

$$w_1 \approx d(0,65 + 1,62V^{-3/2} + 2,879 \cdot V^{-6}); \quad (2.32)$$

$$w_2 \approx d(0,65 + 1,62V^{-3/2}); \quad (2.33)$$

$$w_3 \approx 0,83 \cdot \frac{\lambda}{NA}; \quad (2.34)$$

$$w_4 \approx 2,6 \cdot \frac{d}{V}. \quad (2.35)$$

В расчете диаметра поля, необходимо пользоваться формулой (2.32). Формула (2.33) дает результат на 2,5% меньше.

Формулы (2.34) и (2.35) могут быть использованы *только* для оценки величины .

Формула (2.32) справедлива для $1,2 < V < 2,4$. Формула (2.35) справедлива для ООВ со ступенчатым ППП при $1,6 < V < 2,6$.

Распределение поля в поперечном сечении волокна подчиняется гауссовому закону:

$$E(r) = E_0 \exp \left[-\left(\frac{r}{w} \right)^2 \right]. \quad (2.36)$$

2.9.4 Эффективная площадь модового поля (мкм) ООВ рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\pi \cdot w^2}{4}. \quad (2.37)$$

Как правило, для ОВ по рек. G.652 $A_{\text{эфф}} = 0,55 \div 0,72 \text{ мкм}^2$ и зависит от длины волны.

2.9.5 Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении, как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако ее величина в МОВ крайне мала по сравнению с межмодовой дисперсией. **Материальная дисперсия** обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны, причём эта зависимость для одномодового волокна является дифференциальной.

Уширение импульсов за счет материальной дисперсии на 1 км (пс/км):

$$\tau_{mat}(\lambda) = \Delta\lambda \cdot M(\lambda), \quad (2.38)$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектральной линии источника излучения (нм), $M(\lambda)$ - коэффициент удельной материальной дисперсии (пс/(нм·км)).

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (2.39)$$

Для определения $\frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2}$ необходимо воспользоваться формулой Селмейера и вычислить ее в MathCad. Эмпирическая формула для расчета $M(\lambda)$:

$$M(\lambda) = 122 \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right), \quad (2.40)$$

Формула (2.40) справедлива для $\lambda_0 = 1,270 \div 1,290$ мкм и может быть использована только для сравнения с результатами расчета по (2.39).

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

Уширение импульсов за счет волноводной дисперсии на 1 км (пс/км):

$$\tau_{вол}(\lambda) = \Delta\lambda \cdot B(\lambda), \quad (2.41)$$

где $B(\lambda)$ - удельная волноводная дисперсия (пс/(нм·км)).

$$B(\lambda) = \frac{2n_1^2(\lambda)\Delta}{c\lambda} \quad (2.42)$$

Результирующее значение **коэффициента удельной хроматической дисперсии** (пс/(нм·км)) определяется как:

$$D(\lambda) = M(\lambda) + B(\lambda). \quad (2.43)$$

В зависимости от длины волны значение $M(\lambda)$ меняет знак (рис.2.7). Значение $B(\lambda)$ всегда положительно. Длина волны, на которой $D(\lambda)=0$ называется длиной волны нулевой дисперсии. Важным с практической точки зрения по ОВ всех типов является наклон кривой удельной хроматической дисперсии S_0 .

$$S_0 = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda}. \quad (2.44)$$

При заданной S_0 и λ_0 коэффициент удельной хроматической дисперсии для окон прозрачности ($\lambda = 1,280-1,620$ мкм) можно определить по формуле:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (2.45)$$

где S_0 - наклон в точке нулевой дисперсии, λ - рабочая длина волны, λ_0 - длина волны нулевой дисперсии.

Формула (2.45) справедлива только для SMF – волокон. Для ОВ со смещенной дисперсией DSF (G.653) $D(\lambda)$ определяется по формуле:

$$D(\lambda) = 2,3 \cdot S_0 \cdot \lambda_0 \cdot \lg \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right), \quad (2.46)$$

при этом $\lambda_0 = 1,535 \div 1,565$ мкм, а $S_0 \leq 0,085 \frac{пс}{нм^2 \cdot км}$.

Уширение импульсов за счет хроматической дисперсии на 1 км (пс/км) определяется по формуле:

$$\tau_{xp}(\lambda) = \Delta\lambda \cdot D(\lambda). \quad (2.47)$$

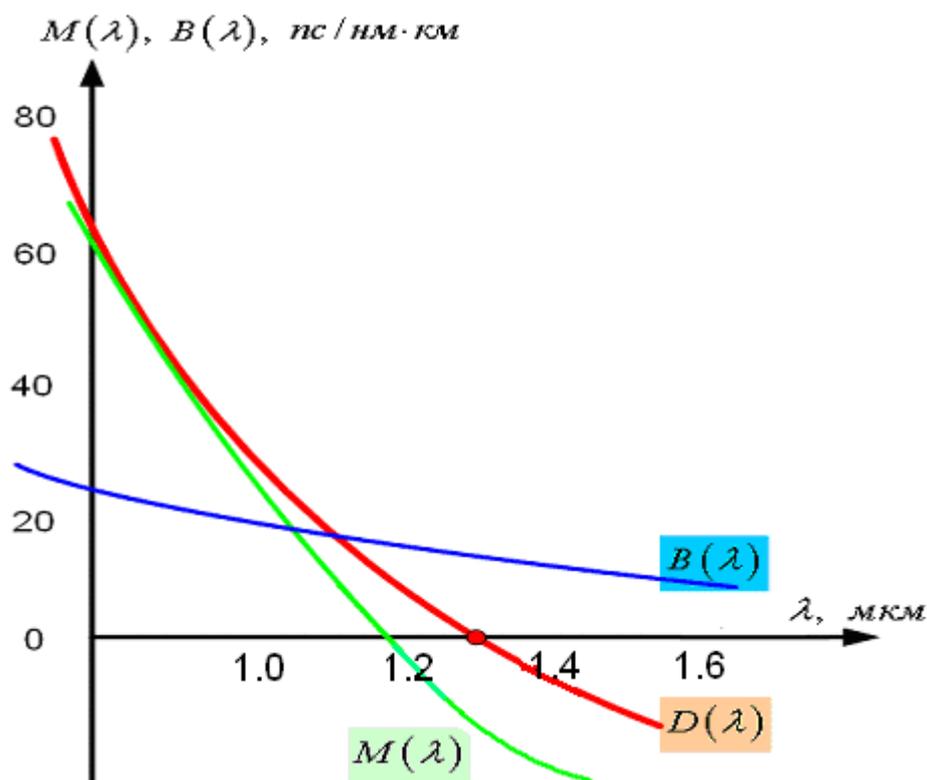


Рисунок 2.7 – Удельное значение дисперсии при различных длинах волн

2.9.6 Поляризационная модовая дисперсия $\tau_{пмд}$ – возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих основной моды HE_{11} ООВ и наблюдается при $V > 2.5$ Гбит/с и малых значениях $\Delta\lambda$.

$$\tau_{пмд} = T \cdot \sqrt{L}, \quad (2.48)$$

где T – коэффициент удельной дисперсии $\left[\frac{nc}{\sqrt{км}} \right]$ (типичное значение для кварцевого волокна $T = 0.08 - 0.2 \left[\frac{nc}{\sqrt{км}} \right]$).

Результирующая дисперсия ООВ: $\tau = \sqrt{\tau_{xp}^2 + \tau_{пмд}^2}$.

2.10 Примеры решения задач к разделу «Основные характеристики ООВ»

2.10.1 Оптическое волокно имеет числовую апертуру $NA = 0,145$. Рассчитать максимальный диаметр сердцевины, при котором соблюдается одномодовый режим, если ОВ работает на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм.

Решение

Значение максимального диаметра сердцевины ООВ вычислим, используя формулу (3.35):

$$d_{\max} = \frac{2,405 \cdot \lambda}{\pi \cdot NA} = \frac{2,405 \cdot 1,55 [\text{мкм}]}{\pi \cdot 0,145} = 8,2 \text{ мкм}.$$

2.10.2 Определить возможность работы ОВ с числовой апертурой $NA = 0,145$ и диаметром сердцевины $d = 8$ мкм, в одномодовом режиме, на средней длине волны С-диапазона, если погрешность изготовления диаметра сердцевины $\delta d = \pm 0,5$ мкм.

Решение

$$V = \frac{\pi(d + \delta d_1)}{\lambda} NA = \frac{3,14 \cdot (8 + 0,5) [\text{мкм}]}{1,55 [\text{мкм}]} \cdot 0,145 = 2,50 > 2,405.$$

При наличии заданной погрешности изготовления волокно выйдет из одномодового режима, следовательно диаметр сердцевины должен быть уменьшен.

2.10.3 Рассчитать диаметр поля моды для ООВ при $d = 9$ мкм; $NA = 0,12$; $V = 2,189$ на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм.

Решение

Рассчитаем диаметр поля моды по формулам (2.32)-(2.35):

$$w_1 \approx 9 \left(0,65 + 1,62 \cdot 2,189^{-3/2} + 2,879 \cdot 2,189^{-6} \right) = 10,6 \text{ мкм};$$

$$w_2 \approx 9 \left(0,65 + 1,62 \cdot 2,189^{-3/2} \right) = 10,335 \text{ мкм};$$

$$w_3 \approx 0,83 \cdot \frac{1,55}{0,12} = 10,7 \text{ мкм};$$

$$w_4 \approx 2,6 \cdot \frac{9}{2,189} = 10,68 \text{ мкм} .$$

2.10.4 Рассчитать коэффициент широкополосности ΔF ООВ при $B(\lambda) = 20 \text{ пс/нм} \cdot \text{км}$, $M(\lambda) = 10 \text{ пс/нм} \cdot \text{км}$, $\Delta\lambda = 0,1 \text{ нм}$ и $L = 1 \text{ км}$.

Решение

$$D(\lambda) = M(\lambda) + B(\lambda) = 20 + 10 = 30 \text{ пс/нм} \cdot \text{км} ,$$

$$\tau_{xp}(\lambda) = \Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L = 0,1 \cdot 30 \cdot 1 = 3 \text{ пс} ,$$

$$\Delta F = \frac{0,44}{\tau_{xp}} = \frac{0,44}{3 \cdot 10^{-12}} = 147 \text{ ГГц} .$$

2.10.5 Оценить максимально допустимое расстояние оптического сегмента, на которое можно передать одноканальный сигнал с частотой $\nu = 100 \text{ ГГц}$ без ретрансляции, исходя из ограничений, вносимых поляризационной модовой дисперсией, если $T = 1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$.

Решение

На основании (2.48) получим:

$$\tau_{пмд} = T \cdot \sqrt{L} < \frac{0,44}{B}, \text{ отсюда } L = (0,44/BT)^2 = \left(\frac{0,44}{100 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-12}} \right)^2 \approx 19 \text{ км} .$$

2.10.6 Вычислить наклон нулевой дисперсии, $\lambda_0 = 1320 \text{ нм}$, $\lambda = 1550 \text{ нм}$,

$$D(\lambda) = -16,5 \text{ пс/нм} \cdot \text{км} .$$

Решение

Из выражения для удельной хроматической дисперсии $D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right)$ следует, что наклон нулевой дисперсии (S_0) определяется как :

$$S_0 = \frac{4|D(\lambda)|}{\left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right)} = \frac{4 \cdot 20 \left[\frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right]}{\left(1550 - \frac{1320^4}{1550^3} \right)} = 0,09 \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}} .$$

2.11 Задачи к разделу «Основные характеристики ООВ»

2.11.1 Рассчитать критическую длину волны при $d = 8 \text{ мкм}$, $n_1 = 1,445$, $\Delta = 0,004$.

2.11.2 Рассчитать максимальный диаметр сердцевины, при котором соблюдается одномодовый режим, если $\lambda = 1,6 \text{ мкм}$; $NA = 0,12$.

2.11.3 Рассчитать τ_{xp} , при $M(\lambda) = -10 \text{ пс/км} \cdot \text{нм}$; $B(\lambda) = 20 \text{ пс/км} \cdot \text{нм}$, $\Delta\lambda = 0,1 \text{ нм}$; $L = 1 \text{ км}$ и определить реализуемую при этом максимальную скорость передачи.

2.11.4 Какой вид дисперсии $\tau_{пмд}$ или τ_{xp} преобладает в SMF на $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ если $L = 49 \text{ км}$, $T = 1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ и $\Delta\lambda = 0,1 \text{ нм}$.

2.11.5 Каково значение коэффициента хроматической дисперсии для Res. G.652 на рабочей длине волны $\lambda = 1620 \text{ нм}$.

2.11.6 Каково соотношение $\tau_{\text{ПМД}}$ и $\tau_{\text{ХР}}$ на длине $L = 25 \text{ км}$, если $D(\lambda) = 2nc / \text{км} \cdot \text{нм}$, $T = 0,5nc / \sqrt{\text{км}}$, $\Delta\lambda = 0,05 \text{ нм}$.

2.11.7 Определить $A_{\text{эфф}}$ ООВ на центральной длине волны λ диапазона ($n_1 = 1,45$, $n_2 = 1,445$).

2.11.8 Рассчитать $\tau_{\text{ПМД}}$ и максимальную скорость передачи при $T = 0,2nc / \sqrt{\text{км}}$ и $L = 4 \text{ км}$.

2.11.9 Какова должна быть величина удельной хроматической дисперсии, чтобы обеспечить при скорости 10 Гбит/с длину ЛС $L = 50 \text{ км}$ ($\Delta\lambda < 0,01$)?

2.12 Соединение оптических волокон

2.12.1 Потери в месте соединения ООВ хорошо описываются приближенной формулой:

$$\alpha_{\text{ном}} = 4,34 \cdot \left(\frac{\Delta w}{w} \right)^2, \quad (2.49)$$

где Δw – разность диаметров модовых пятен. Как правило, $\frac{\Delta w}{w} (0,08, 0,1, 0,12, 0,15) [\text{дБ}]$.

2.12.2 Разъемные соединители

К соединителям предъявляются следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, минимальное ухудшение характеристик после многократных повторных соединений.

При соединении различных типов волокон или при некачественном выполнении оконцевания неизбежно появляются дополнительные виды потерь.

Потери из-за вариации показателей преломления являются следствием чисто френелевского рассеяния и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как:

$$\alpha_F = -10 \lg \left[\frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \right], \quad (2.50)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления сердцевины волокон.

Потери при вариации апертур возникают в том случае, если апертура волокна NA_1 , передающего сигнал, больше апертуры волокна NA_2 , принимающего сигнал, и определяется как

$$\alpha_{NA} = -10 \lg \left[\left(\frac{NA_2}{NA_1} \right)^2 \right]. \quad (2.51)$$

Если $NA_1 < NA_2$ апертурные потери не возникают.

Потери при вариации диаметров возникают, когда диаметр D_1 передающего волокна больше диаметра D_2 принимающего, и определяется соотношением

$$\alpha_{NA} = -10 \lg \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right], \quad (2.52)$$

Потери, которые являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса сборки оптического шнура, называют *внешними*. Внешние потери зависят от таких факторов как: механическая нестыковка, шероховатости на торце сердцевины, загрязнение торцов, стыкуемых волокон.

Потери при угловом смещении двух стыкуемых одинаковых волокон определяются

$$\alpha_{\theta} = -10 \lg \left[1 - \frac{2}{\pi} \frac{\theta}{\arcsin NA} \right]. \quad (2.53)$$

Потери при радиальном смещении двух стыкуемых одинаковых волокон определяются

$$\alpha_L = -10 \lg \left[1 - \frac{4}{\pi} \frac{L}{D} \right]. \quad (2.54)$$

Потери при осевом смещении двух стыкуемых одинаковых волокон определяются

$$\alpha_S = -10 \lg \left[\frac{1}{1 + 2S/D} \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{NA}{n_0} \right) \right) \right]^2, \quad (2.55)$$

где n_0 – показатель преломления среды, заполняющей пространство стыка.

Приведенное соотношение для потерь при осевом смещении учитывает только фактор апертурной расходимости светового потока. При появлении зазора неизбежно появится и френелевское отражение, которое можно оценить как

$$\alpha_F = -10 \lg \left[\frac{4n_1^2 n_0^2}{4n_1^2 n_0^2 + (n_1^2 - n_0^2)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi n S}{\lambda} \right)} \right]. \quad (2.56)$$

2.13 Примеры решения задач к разделу «Соединение оптических волокон»

2.13.1 Рассчитать потери на стыках и разъемных соединениях. Исходные данные: $\theta = 2^\circ$, $NA = 0,29$, $S/D = 0,06$; $L/D = 0,08$.

Решение

Потери при угловом смещении :

$$\alpha_\theta = -10 \lg \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{2^\circ}{16,6^\circ} \right) = 0,341 \text{ дБ.}$$

Потери при радиальном смещении:

$$\alpha_L = -10 \lg \left(1 - \frac{4}{\pi} \frac{L}{D} \right) = -10 \lg \left(1 - \frac{4}{\pi} \cdot 0,08 \right) = 0,467 \text{ дБ.}$$

Потери при осевом смещении:

$$\alpha_s = -10 \lg \left(\frac{1}{1 + 2 \cdot 0,06 \cdot \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{0,29}{1} \right) \right]} \right) = 0,155 \text{ дБ.}$$

2.14 Задачи к разделу «Соединение оптических волокон»

2.14.1 На некотором участке сети, работающей в дуплексном режиме, произведена стыковка волокон 10/125 и 50/125. Определить потери передаваемого оптического сигнала в обоих направлениях.

2.14.2 Определить максимальные потери при стыковке волокон с разной числовой апертурой $NA_1 = 0,2$; $NA_2 = 0,2$.

2.14.3 Произведены стыковка одномодовых ОВ со ступенчатым ППП, показатели преломления сердцевин которых $n_1 = 1,46$; $n_2 = 1,49$. Определить потери световой энергии, вызванные френелевским рассеянием.

2.16.4 Рассчитайте потери, возникающие при некачественной стыковке двух одинаковых волокон. Полагать, что возникло осевое смещение на 1,2 мкм. При расчете учитывать лишь апертурную расходимость светового пучка.

2.14.5 Рассчитайте потери, возникающие при некачественной стыковке двух одинаковых волокон $d = 8$ мкм. Полагать, что возникло осевое смещение на 2 мкм.

2.14.6 Рассчитайте потери, возникающие при некачественной стыковке двух одинаковых волокон $d = 8$ мкм. Полагать, что возникло угловое смещение на 2° .

2.14.7 Определить потери $\alpha_{\text{пот}}$ в месте соединения ООВ при относительной разности модовых пятен $\Delta\omega/\omega = 0,08$.

3 РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА

3.1 Расчет длины регенерационного участка по затуханию

Общее затухание регенерационного участка:

$$\alpha_p = 10 \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = p_1 - p_2 = \alpha L_{\text{рег}} + \alpha_{\text{НС}} N_{\text{НС}} + \alpha_{\text{РС}} N_{\text{РС}}, \quad (3.1)$$

где P_1, p_1 - мощность и уровень мощности, вводимой в ОВ кабеля;
 P_2, p_2 - мощность и уровень мощности принимаемого сигнала; α - коэффициент затухания ОВ; $\alpha_{\text{НС}}, \alpha_{\text{РС}}$ - вносимые потери неразъемных и разъемных оптических соединителей.

Общее число неразъемных оптических соединителей на участке с учетом соединений станционного и линейного ОК:

$$N_{\text{НС}} = L_{\text{рег}} / l_{\text{сд}} + 1, \quad (3.2)$$

где $l_{\text{сд}}$ - средняя строительная длина ОК.

Оптический приемник будет принимать и обрабатывать сигнал при условии $p_2 \geq p_{\text{пр}}$, где $p_{\text{пр}}$ - пороговая чувствительность (минимально допустимый уровень мощности принимаемого сигнала). Однако в реальных условиях оптический приемник не может работать на максимальной пороговой чувствительности, т.к. постоянно меняется мощность принимаемого сигнала. Поэтому задают определенный диапазон изменения уровня принимаемого сигнала M (минимальная перегрузка оптического приемника или энергетический запас):

$$p_2 = p_{\text{пр}} + M. \quad (3.3)$$

Подставив (5.2) и (5.3) в (5.1), после несложных преобразований получим:

$$L_{\text{рег}\alpha} = \frac{\mathcal{E} - M - \alpha_{\text{РС}} N_{\text{РС}} - \alpha_{\text{НС}}}{\alpha + \alpha_{\text{НС}} / l_{\text{сд}}}. \quad (3.4)$$

Здесь $\mathcal{E} = p_1 - p_{\text{пр}}$ - энергетический потенциал системы передачи.[1]

Энергетический потенциал системы передачи определяет максимально допустимое затухание оптического сигнала в оптическом кабеле, в разъемных и неразъемных соединениях на участке регенерации, а также другие потери в узлах аппаратуры. Энергетический потенциал определяется как разность между уровнем мощности оптического сигнала, введенного в волокно, и уровнем мощности на входе приемного устройства, при котором коэффициент ошибок регенератора не превышает заданного значения, установленного для данной СПИ.

Энергетический запас системы обычно составляет 6 дБ.[2]

3.2 Расчет длины регенерационного участка по дисперсии

Предположим, что линейный код цифровой ВОСП имеет простейшую форму (например NRZ). В этом случае длительность импульса в начале регенерационного участка равна единичному интервалу: $t_{II} = T$. В конце регенерационного участка длительность импульса $t_{II} = T + \tau_0 L_{рег-д}$, где $\tau_0 = \tau / L$ - дисперсия на единицу длины.

Чтобы не было перекрытия между соседними импульсами на входе оптического приемника необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\tau_0 L_{рег-д} \leq T. \quad (3.5)$$

Если учесть $\Delta F = 0,44 / \tau_0$ и что скорость передачи информации в линейном тракте $B = 1/T$, то из (5.5) находим максимальную длину регенерационного участка по дисперсии:

$$L_{рег-д} = \frac{\Delta F}{0,44 B}. \quad (3.6)$$

Для одномодового ОВ:

$$L_{рег-д} = \frac{1}{4D(\lambda)\Delta\lambda B} \quad (3.7)$$

3.3 Примеры решения задач

3.3.1 Определить длину регенерационного участка ВОЛС, реализованной на основе стандартного ОВ (Рес. G. 652).

Исходные данные

Скорость передачи (STM-64).....	V=5Гбит/с
рабочая длина волны.....	$\lambda=1,55\mu\text{м}$
ширина спектра излучения на уровне 3 дБ.....	$\Delta\lambda \leq 0,1 \text{ нм}$
уровень мощности, вводимой в ОВ.....	$p_1=0 \text{ дБм}$
пороговая чувствительность.....	$p_{пр}=-30 \text{ дБм}$
энергетический запас.....	M=6 дБм

Параметры ОК

Коэффициент затухания.....	$\alpha=0,25 \text{ дБ/км}$
удельная хроматическая дисперсия.....	D=20 пс/км*нм
средняя строительная длина.....	$l_{сд}=2 \text{ км}$

Параметры линейного тракта: $N_{рс}=2$; $\alpha_{рс}=0,3 \text{ дБ}$; $\alpha_{нс}=0,1 \text{ дБ}$.

Решение:

1) Определим длину регенерационного участка по затуханию и дисперсии:

$$L_{\alpha} = \frac{\mathcal{E} - M - \alpha_{рс} N_{рс} - \alpha_{нс}}{\alpha + \alpha_{нс} / l_{сд}} = \frac{30[\text{дБ}] - 6[\text{дБ}] - 0,3[\text{дБ}] \cdot 2 - 0,1[\text{дБ}]}{0,25[\text{дБ/км}] + 0,1[\text{дБ}]/2[\text{км}]} = 80,5 \text{ км}$$

$$L_D = \frac{1}{4BD\Delta\lambda} = \frac{1}{4 \cdot 5 \cdot 10^9 [1/c] \cdot 20 \cdot 10^{-12} [пс/нм \cdot км] \cdot 0,1 [нм]} = 31 км$$

Таким образом, длина регенерационного участка ограничена дисперсией.

3.3.2 Многомодовое ОВ (рек.G.651) с показателем преломления сердцевины $n_1=1,47$ и числовой апертурой $NA=0,275$ используется в ЛВС (LAN) длиной 2000 м. Определить максимальную скорость передачи и требуемый энергетический потенциал линии.

Решение:

Определим величину межмодовой дисперсии для линии длиной 2 км:

$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} \cdot L$. Приблизительно величину Δ найдем из выражения для числовой апертуры:

$$NA = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}, \text{ откуда } \Delta = \frac{NA^2}{2n_1^2}. \text{ Тогда } \tau_{\text{мод}} = \frac{NA^2}{2n_1 c} = \frac{(0,275)^2}{2 \cdot 1,46 \cdot 3 \cdot 10^8} = 176,2 пс.$$

Определим полосу частот, равную по величине битовой скорости:

$$\Delta f = \frac{0,44}{\tau} = \frac{0,44}{176,2 \cdot 10^{-12}} = 2,5 ГГц, \text{ откуда } B=2,5 \text{ Гбит/с.}$$

Рассчитаем величину требуемого энергетического потенциала:

$$\mathcal{E} = \alpha + \alpha_{pc} \cdot N_{pc} + M = 3 + 0,3 \cdot 2 + 2 = 5,6 дБ.$$

3.4 Задачи для самостоятельной работы

3.4.1 Определить длину участка регенерации. Параметры ВОЛС представлены в таблице.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета участка регенерации ООВ

Типовые параметры ВОЛС	Единицы измерения	Значения			
		1	2	3	4
Тип ОВ		SSF	SMF	SSF	SMF
Рекомендация UTI.T		(G.652)	(G.652)	(G.652)	(G.652)
Диапазон длин волн	нм	1260 ...1320	1260 ...1320	1530... 1550	1530... 1550
Коэффициент затухания	дБ/км	0,35	0,35	0,2	0,2
Коэффициент удельной хроматической дисперсии	пс/нм·км	3,5	3,5	18	18
Скорость передачи цифрового потока	Мбит/с	622	622	140	155
Рабочая длина волны, λ	нм	1260	1320	1530	1550
Ширина спектра излучения,	нм	1	0,9	0,8	0,7
Мощность излучения оптического передатчика	дБм	0	2	1	3
Чувствительность оптического приемника	дБм	-28	-34	-35	-37
Энергетический запас	дБ	2	3	4	5
Средняя строительная длина	км	2,2	4,4	4,4	2,2
$N_{pc}=2, \alpha_{pc}=0,2 \text{ дБ}, \alpha_{nc}=0,05 \text{ дБ}$					

3.4.2 Определить длину элементарного кабельного участка реализованного на МОВ (рекомендация G.651) в первом (780...860 нм) и втором (1280...1320 нм) окнах прозрачности, при этом $n_1=1,46$ и $n_2=1,45$. Параметры ВОЛС представлены в таблице.

Таблица 3.2 – Исходные данные для расчета участка регенерации МОВ

Типовые параметры ВОЛС	Единицы измерения	Значения			
		1	5	7	3
Диаметр сердцевины / оболочки	мкм	50 / 125	62,5 / 125	100 / 140	50 / 125
Рабочая длина волны, λ	нм	820	840	850	1320
Профиль показателя преломления		Градиентное	Градиентное	Градиентное	Градиентное
Коэффициент затухания	дБ/км	2,5	3	4	0,8
Числовая апертура		0,23	0,28	0,29	0,23
Скорость передачи цифрового потока	Мбит/с	80	40	100	80
Энергетический потенциал	дБ	18	20	24	16
Энергетический запас	дБ	2	4	4	6
$N_{PC}=4, \alpha_{PC}=0,4$ дБ					

3.4.3 Выбрать и обосновать тип ОВ (в соответствии с рек. ITU-T), обеспечивающий максимальную скорость передачи для линии связи длиной 2 км, исходя из экономической эффективности (минимальных затрат). В расчете учесть потери при вводе излучения в ОВ.

3.4.4 Определить величину энергетического потенциала и наибольшую длину участка регенерации магистральной ВОЛС, использующей ОВ типа G.652 на длине волны $\lambda = 1340$ нм ($S_0 = 0.092$ пс/нм²*км и $\lambda_0 = 1300$ нм), при передаче потока STM – 16, линейный код передачи - NRZ. Источник излучения - LD со спектральной шириной $\Delta\lambda = 2$ нм. При расчете учесть: энергетический запас; потери на соединениях ОВ (разъемных, неразъемных), макроизгибах (кабельные потери). В ВОЛС использованы пассивные компоненты: 1 ответвитель с коэффициентом деления 10:90%, коммутатор резервного канала. Составить расчетную таблицу.

3.4.5 Выбрать и обосновать тип ОВ (в соответствии с рек. ITU-T), обеспечивающий минимальный энергетический потенциал на трассе длиной 60 км с максимально возможной скоростью передачи. В расчете учесть: число неразъемных соединений – 24, число разъемных соединений – 4, энергетический запас принять равным 4,2 дБ. Источник излучения имеет $\Delta\lambda = 1$ нм.

3.4.6 Многомодовое ОВ используется в ЛВС (LAN) в горизонтальной проводке длиной 2000 м. Определить максимальную скорость передачи, реализуемую МОВ (рек. G.651) с показателем преломления сердцевины $n_1=1,47$ и числовой апертурой $NA=0.2$. Оценить минимальный необходимый энергетический потенциал линии, исходя из экономической эффективности ЛВС (рассмотреть возможность применения СИД или ЛД).

3.4.7 Определить минимальное число регенерационных участков, необходимых для перекрытия трассы Омск-Новосибирск (900 км), считая их равнопролетными. Скорость передачи **622 Мбит/с**. Используется стандартное ОВ(SMF) на длине волны $\lambda = 1540$ нм при ширине спектра источника излучения ЛД (LD) $\Delta \lambda = 0,5$ нм. В линии связи использованы пассивные компоненты: 1 оптический переключатель и 1 ответвитель. Учесть: потери на стыках строительных длин, в коннекторах, а также кабельные потери. Энергетический бюджет линии составляет $\mathcal{E} = 28$ дБ

3.4.8 Определить максимальную длину участка регенерации магистральной линии связи, реализованной на основе ОВ марки Corning LEAF, использующей длину волны, $\lambda_2 = 1600$ нм при скорости передачи **10 Гбит/с**. В качестве источника излучения используется одномодовый ЛД (DFB-лазер). Рассчитать необходимый энергетический потенциал с учетом строительных длин, потерь в коннекторах и неразъемных соединениях.

4 КОМПЕНСАЦИЯ ДИСПЕРСИИ

4.1 Общие положения

Для компенсации дисперсии в одномодовых волокнах используют специальный тип ОВ– *DC* волокно (*DCF – Dispersion Compensating Fiber–* волокно для компенсации дисперсии).

Профиль показателя преломления в DC волокнах выполнен в виде узкого центрального пика, окруженного кольцом с меньшим скачком показателя преломления (рис. 6.1). На коротких длинах волн мода ведется в основном центральным пиком. С увеличением длины волны диаметр моды увеличивается, а модовый показатель преломления, соответственно, уменьшается. При этом изменяется коэффициент дисперсии волокна, величина которого пропорциональна (со знаком минус) второй производной по длине волны от эффективного показателя преломления волокна. Эта производная проходит через максимум, когда поле моды достигает кольца, окружающего центральный пик. Таким способом удастся создавать волокна, обладающие большим (по модулю) отрицательным коэффициентом дисперсии.

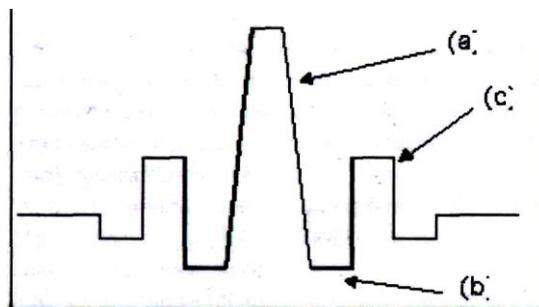


Рисунок 4.1 – Типичный профиль коэффициента преломления волокна DSCF компенсатора

Устройства компенсации дисперсии *DCD (Dispersion Compensation Devices)* придают сигналу равную по величине, но противоположную по знаку дисперсию и восстанавливают первоначальную форму импульсов.

Обычно DC волокно наматывается на катушку, образуя модуль – *модуль компенсации дисперсии (DCM – Dispersion Compensation Module)*, который включается в определенных точках магистрали, так что среднее значение дисперсии ЭКУ (элементарного кабельного участка)

$$\bar{D} = D_{xp1}l_1 - D_{xp2}l_2 = 0 \quad (6.1)$$

Возможности компенсации дисперсии волокон могут быть оценены с помощью *коэффициента относительной крутизны дисперсионной кривой RDS*, который определяется как отношение крутизны дисперсионной кривой к величине хроматической дисперсии :

$$RDS = S / D, \quad (6.2)$$

где D и S есть величина дисперсии и крутизна дисперсионной кривой на единицу длины соответственно. Если RDS волокна $DSCF$ (*Dispersion and its Slope Compensation Fiber – волокно со специально подобранной величиной дисперсии и наклона коэффициента дисперсии*) является таким же, как и передающего волокна, то становится возможной полная компенсация наклона дисперсионной кривой передающего волокна путем подбора длины $DSCF$, подобно тому, как осуществляется компенсация полной дисперсии волокна. *Степень компенсации наклона ($C_{кн}$)* может быть представлена следующим выражением :

$$C_{кн} = RDS_{DSCF} / RDS_{iF} \quad (6.3)$$

Если RDS волокна $DSCF$ компенсатора и волокна одинаковы, то степень компенсации наклона составляет 100% и результирующая дисперсия после компенсации становится близкой к нулевому значению.

Другой важной характеристикой $DSCF$ компенсаторов является *показатель качества, или эффективность (FOM)*. Он определяется как величина дисперсии на единицу потерь в волокне :

$$FOM = D_{DSCF} / \alpha_{DSCF} \quad (6.4)$$

4.2 Примеры решения задач

4.2.1 Выбрать тип модуля компенсации дисперсии, который необходимо включить в линейный тракт сети SDH, реализованной на основе стандартного ОВ (Rec. G. 652). Параметры аппаратуры приведены в задаче 3.3.1.

Решение:

1) Определим длину регенерационного участка по затуханию и дисперсии без учета компенсатора

$$L_{\alpha} = \frac{\mathcal{E} - M - \alpha_{pc} N_{pc} - \alpha_{nc}}{\alpha + \alpha_{nc} / l_{cd}} = \frac{30[\text{дБ}] - 6[\text{дБ}] - 0,3[\text{дБ}] \cdot 2 - 0,1[\text{дБ}]}{0,25[\text{дБ} / \text{км}] + 0,1[\text{дБ}] / 2[\text{км}]} = 80,5 \text{ км}$$

$$L_D = \frac{1}{4BD\Delta\lambda} = \frac{1}{4 \cdot 5 \cdot 10^9 [1/\text{с}] \cdot 20 \cdot 10^{-12} [\text{пс} / \text{нм} \cdot \text{км}] \cdot 0,1[\text{нм}]} = 31 \text{ км}$$

Необходимо увеличить длину регенерационного участка по дисперсии так, чтобы она была сравнима с длиной регенерационного участка по затуханию;

2) Ближайшее значение компенсируемой модулем длины линии L_{DC} равно 40 км; при этом общая длина компенсируемой линии L_D составит

$$L_D = \frac{1}{4BD\Delta\lambda} + L_{DC} = 31 + 40 = 71 \text{ км.}$$

Выберем в качестве компенсатора модуль DCM – 40. Такой модуль вносит дополнительные потери $\alpha_{DC} = 5$ дБ. При этом длина регенерационного участка по затуханию будет составлять

$$L_\alpha = \frac{\dot{A} - \dot{I} - \alpha_{\dot{\alpha}\dot{n}} N_{\dot{\alpha}\dot{n}} - \alpha_{i\dot{n}} - \alpha_{DC}}{\alpha + \alpha_{i\dot{n}}/l_{c\dot{\alpha}}} = \frac{30[\dot{A}\dot{A}] - 6[\dot{A}\dot{A}] - 0,3[\dot{A}\dot{A}] \cdot 2 - 0,1[\dot{A}\dot{A}] - 5[\dot{A}\dot{A}]}{0,25[\dot{A}\dot{A}/\dot{e}\dot{i}] + 0,1[\dot{A}\dot{A}]/2,2[\dot{e}\dot{i}]} = 63\dot{e}\dot{i}$$

Пусть в качестве источника излучения используется более мощный ЛД (например, с уровнем вводимой мощности $p_1 = 3$ дБм) и определим, как изменится длина регенерационного участка по затуханию:

$$L_\alpha = \frac{A - M - \alpha_{pc} N_{pc} - \alpha_{nc} - \alpha_k}{\alpha + \alpha_{nc}/l_{co}} = \frac{33 - 6 - 0,3 \cdot 2 - 0,1 - 8,6}{0,25 + 0,1/2,2} = 72 \text{ км}$$

Следовательно, для увеличения длины регенерационного участка по затуханию необходимо увеличить мощность ЛД в 2 раза либо увеличить чувствительность фотоприемника на 3 дБ.

Таблица 4.1 - Типичные параметры модулей для компенсации дисперсии

Тип модуля	Компенсируемая длина линии, км	Дисперсия волокна модуля, пс/(нм*км)	Наклон дисперсии S_{ps/nm^2*km}	Вносимое затухание, дБ	Эффективность модуля (FOM), пс/(нм*дБ)	Среднее значение PMD, пс
DCM-20	20	-330	н/д	3,2	103	0,8
DCM-40	40	-660	н/д	5,0	132	1,1
DCM-60	60	-990	н/д	6,8	145	1,4
DCM-80	80	-1320	н/д	8,6	153	1,5
DCM-95	95	-1560	н/д	10,0	156	1,6
DK-40	40	-680	-1,2	5,2	131	0,6
DK-60	60	-1020	-1,9	7,0	146	0,75
DK-80	80	-1360	-2,5	8,9	153	0,9

4.2.2 Оценить максимальную длину регенерационного участка в линии с SMF волокном (Res. G. 652) длиной 80 км и модулем DK – 80 (см. таблицу 4.1) для скорости передачи 10 Гбит/с (STM – 64).

Решение:

1) Определим полную дисперсию, накопившуюся в линии:

$$\Delta\tau = D \cdot L = 17[\text{пс}/\text{нм} \cdot \text{км}] \cdot 80[\text{км}] = 1360 \text{ пс/нм}$$

2) Используя формулу (4.8), определим, на сколько процентов не скомпенсирована полная дисперсия на краю рабочего диапазона (С – диапазон: 1530 ÷ 1565 нм):

$$\tilde{NR}(1530) = 1 + 16(1530 - 1550)/1000 = 0,321 = 32\%$$

$$\tilde{NR}(1565) = 1 + 16(1565 - 1550)/1000 = 0,241 = 24\%$$

Видно, что на краю диапазона полная дисперсия не скомпенсирована примерно на 25%, что при полной дисперсии линии 1360 пс/нм составляет величину около 340 пс/нм.

3) Так как при скорости передачи 10 Гбит/с полная дисперсия в линии должна быть меньше 1000 пс/нм (таблица 4.2), то получаем, что длина этого участка может достигать $3 \times 80 \text{ км} = 240 \text{ км}$.

Таблица 4.2 – Допустимая величина полной дисперсии в линии связи

Скорость передачи данных	Допустимая величина полной дисперсии в линии связи, пс/нм
2,5 Гбит/с (STM –16)	16000
10 Гбит/с (STM –64)	1000
40Гбит/с (STM –256)	60

Таблица 4.3 - Оптические характеристики некоторых DSCF компенсаторов

Позиция	Размерность	DSCF для DSF		
		№ 1	№ 2	№ 3
длина волны	нм	1,590		
дисперсия	пс/нм*км	-47	-60	-82
наклон дисперсионной кривой	пс/нм ² *км	-0,71	-1,08	-1,84
RDS	нм ⁻¹	0,015	0,018	0,022
ослабление	дБ/км	0,62	0,60	0,65
FOM	пс/нм*дБ	-76	-100	-127
MFD	мкм	4,1	4,1	4,1
A _{eff}	мкм ²	12,1	12,4	12,0
PMD	пс/км	0,05	0,09	0,09
изгибные потери	дБ/км 2R=20mm	0,2	2	9

4.2.3 Определить максимальную степень компенсации наклона дисперсионной кривой передающего ОВ типа DSF (Rec. G. 653), если в качестве компенсатора используется волокно DSCF (табл. 4.3).

Решение:

1) По формуле (6.2) определим коэффициент относительной крутизны дисперсионной кривой для ОВ типа DSF: на длине волны 1590 нм его дисперсия составляет 2,9 пс/нм*км, а наклон дисперсионной кривой- 0,07 пс/нм²*км

$$RDS_{DSF} = S_{DSF} / D_{DSF} = \frac{0,07[\text{пс} / \text{нм}^2 * \text{км}]}{2,9[\text{пс} / \text{нм} * \text{км}]} = 0,024 \text{ нм}^{-1};$$

Максимальную степень компенсации наклона обеспечивает DSCF компенсатор №3 из табл. 4.3

$$C_{кн} = RDS_{DSCF} / RDS_{iF} = \frac{0,022[\text{нм}^{-1}]}{0,024[\text{нм}^{-1}]} = 92\%$$

4.2.4 Оценить возникающие потери, возникающие при соединении DSF волокна и отрезка SMF волокна.

Решение:

$$\alpha = -10 \lg \left[\left(\frac{d_{\text{мн1}}}{d_{\text{мн2}}} \right)^2 \right] = -10 \lg \left[\left(\frac{4,1}{10,5} \right)^2 \right] = 8 \text{ дБ}$$

4.3 Задачи для самостоятельной работы

4.3.1 Используя данные таблицы 3.1 (вариант 2), определить тип модуля компенсации дисперсии, который необходимо использовать, если скорость передачи будет равна 10 Гбит/с.

4.3.2 Оценить максимальную длину регенерационного участка в линии с SMF волокном (Rec. G. 652) длиной 60 км и модулем DK – 60 (см. таблицу 4.2) для скорости передачи 10 Гбит/с (STM – 64).

7 Индивидуальное расчетное задание

Исходные данные для расчета приведены в Приложениях 1 и 4

1. Расчет характеристик планарного волновода

1. Расчет числовой апертуры
2. Расчет нормированной частоты
3. Расчет критического угла скольжения и лучевого инварианта
4. Расчет длины пути между последовательными отражениями луча, оптической длины пути, полупериода траектории луча
5. Расчет количества отражений на единицу длины волновода, времени прохождения лучом 1 м длины волновода
6. Расчет лучевой дисперсии, пространственного уширения импульса
7. Расчет максимальной толщины волноводного слоя, при которой соблюдается одномодовый режим
8. Изобразить графически профиль показателя преломления при заданном q
9. Изобразить (на одном графике) зависимость времени прохождения от лучевого инварианта для ступенчатого и градиентного волноводов

2. Расчет характеристик многомодового оптического волокна

1. Рассчитать показатели преломления сердцевины, оболочки для заданных λ_1 и λ_2 (используя формулу Селмейера). Построить график зависимости $n_1(\lambda)$
2. Изобразить (на одном графике) ППП для ГМОВ при заданном q , а так же при $q=2$; $q=\infty$; $q=q_{\text{opt}}$
3. Расчет числовой апертуры
4. Расчет нормированной частоты и числа мод
5. Расчет величины межмодовой дисперсии для ОВ со ступ. и град. ППП
6. Расчет коэффициента широкополосности для СтМОВ и ГМОВ
7. Расчет коэффициента затухания

8. Построить на одном графике зависимости различных составляющих затухания от длины волны
9. Провести расчет зависимости затухания на макро - и микроизгибах. Построить графики
10. Провести расчет потерь на стыках разъемных соединений. Построить графики.

3. Расчет характеристик одномодового оптического волокна

1. Рассчитать показатели преломления сердцевинки, оболочки для заданных λ_1 и λ_2
2. Расчет числовой апертуры
3. Расчет нормированной частоты и критической длины волны
4. Расчет максимального диаметра сердцевинки, при котором соблюдается одномодовый режим
5. Определить, выйдет ли ОВ из одномодового режима при наличии погрешности изготовления диаметра сердцевинки
6. Расчет эффективного диаметра поля моды и эффективной площади сечения
7. Построить график (нормированный) распределения энергии по сечению ОВ
8. Расчет коэффициента затухания на λ_1 и λ_2
9. Рассчитать коэффициенты материальной, волноводной и хроматической дисперсии
10. Определить длину волны нулевой дисперсии и вычислить наклон дисперсии в этой точке
11. Рассчитать минимальный уровень мощности, приводящий к нелинейным эффектам
12. Построить графики зависимости потерь от величины смещения на стыках разъемных соединений
13. Построить на одном графике зависимости коэффициентов дисперсии от длины волны

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных кабельных сетей и оптические кабельные линии связи: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 544с.: ил.
2. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи их монтаж и измерение. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-телеком, 2012. – 488 с.: ил.
3. Горлов Н.И., Микиденко А.В., Минина Е.А. Оптические линии связи и пассивные компоненты ВОСП. Учебное пособие. - Новосибирск: СибГУТИ, 2003. – 229 с.
4. Иоргачёв Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 282 с.
5. Воронцов А.С., Гурин О.И. и др. Оптические кабели связи российского производства. Справочник. - М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.: ил.
6. Р. Фриман Волоконоо-оптические системы связи 3-е дополнительное издание Москва: Техносфера, 2006. -496с.
7. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-телеком, 2004. – 268 с.: ил.
8. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов А.Б. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. -632с.+88 цв.ил.

Дополнительная литература

9. Р.Р. Убайдуллаев. Волоконно-оптические сети. М. ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000-277с..
10. Гауэр Дж. Оптические системы связи. Пер с англ. под ред. А.И. Ларкина. – М.: Радио и связь 1988 – 504с.
11. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие. 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 272 с.: ил.
12. Слепов Н.Н. Современный технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: радио и связь, 2000. – 468 с.: ил.
13. Прохоров Д.В. Атмосферные оптические линии связи// «Технологии и средства связи», 2004, №1, сс. 34-39.
14. Волоконно-оптические системы передачи: учебник для вузов / под редакцией В.А. Гомзина.-М.: Радио и связь, 1992- 416 с.
15. Самарский П.А. Основы структурированных кабельных систем / Самарский П.А.– М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2005. -216+12с.:ил.
16. Волоконно-оптические системы передачи: вопросы оценки работоспособности / А.Х. Султанов, Р.Г. Усманов, И.А. Шарифгалиев, И.Л. Виноградова. – М.: Радио и связь, 2005. 373с.
17. Иванов А.Б. Волоконная оптика: Компоненты, системы передачи измерения. М. компания Сайрус Системс 1999г. 657с.
18. А.В. Листвин, В.Н.Листвин, Д.В. Швырков Оптические волокна для линии связи – М.: ЛЕСАРарт, 2003. 288с. ил.
19. К. Е. Заславский. Волоконно – оптические системы передачи со спектральным уплотнением ВОСП – DWDM. – Н–ск: СИБГУТИ, 2002.
20. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 1 – Теория передачи и влияния / Под редакцией В.А. Андреева. – 7-е изд., перераб. И доп. – М.: Горячая линии – Телеком, 2009. – 424 с.: ил.
21. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / Под редакцией В.Н. Гордиенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 368 с.: ил.

Приложение 1

Коэффициенты Селмейера

№ варианта	Состав стекла	A_1	A_2	A_3	μ_1 , мкм	μ_2 , мкм	μ_3 , мкм
1	13,5% GeO ₂ 86,5% SiO ₂	0,73454395	0,42710828	0,82103399	0,08697693	0,11195191	10,846540
2	7,0% GeO ₂ 93,0% SiO ₂	0,68698290	0,44479505	0,79073512	0,078087582	0,11551840	10,436628
3	4,1% GeO ₂ 95,9% SiO ₂	0,68671749	0,43481505	0,89656582	0,072675189	0,11514351	10,002398
4	9,1% GeO ₂ 7,7% B ₂ O ₃ 83,2% SiO ₂	0,72393884	0,41129541	0,79292034	0,085826532	0,10705260	9,3772959
5	0,1% GeO ₂ 5,4% B ₂ O ₃ 94,5% SiO ₂	0,70420420	0,41289413	0,95238253	0,067974973	0,12147738	9,6436219
6	4,3% GeO ₂ 9,7% B ₂ O ₃ 86,0% SiO ₂	0,69681388	0,40865177	0,89374039	0,070555513	0,11765660	9,8754801
7	13,5% Be ₂ O ₃ 86,5% SiO ₂	0,707246220	0,39412616	0,63301929	0,080478054	0,10925792	7,8908063
8	3,1% GeO ₂ 96,9% SiO ₂	0,7028554	0,4146307	0,8974540	0,0727723	0,1143085	9,896161
9	3,5% GeO ₂ 96,5% SiO ₂	0,7042038	0,4160032	0,9074049	0,0514415	0,1291600	9,896156
10	5,8% GeO ₂ 94,2% SiO ₂	0,7088876	0,4206803	0,8956551	0,0609053	0,1254514	9,896162
11	7,9% GeO ₂ 92,1% SiO ₂	0,7136824	0,4254807	0,8964226	0,0617167	0,1270814	9,896161
12	3,0% B ₂ O ₃ 97,0% SiO ₂	0,6935408	0,4052977	0,9111432	0,0717021	0,1256396	9,896154
13	3,5% B ₂ O ₃ 96,5% SiO ₂	0,6929642	0,4047458	0,9154064	0,0604843	0,1239609	9,896152
14	3,3% GeO ₂ 9,2% B ₂ O ₃ 87,5% SiO ₂	0,6958807	0,4076588	0,940193	0,0665654	0,1211422	9,896140
15	2,2% GeO ₂ 3,3% B ₂ O ₃ 94,5% SiO ₂	0,6993390	0,4111269	0,9035275	0,0617482	0,1242404	9,896158
16	9,1% P ₂ O ₅ 90,9% SiO ₂	0,695790	0,452497	0,712513	0,061568	0,119921	8,656641
17	13,3% B ₂ O ₃ 86,7% SiO ₂	0,690618	0,401996	0,898817	0,061900	0,123662	9,098960
18	1,0% F 99,0% SiO ₂	0,691116	0,399166	0,890423	0,068227	0,116460	9,993707

Характеристики многомодовых ОВ в соответствии с Rec.G.651

Параметр	Единица измерения	50/125	62,5/125	100\140
Геометрические характеристики				
Диаметр сердцевины	мкм	50,0±3,0 50,0±2,5	62,5±3,0 62,5±2,5	100±4
Диаметр оболочки	мкм	125,0±3,0 125,0±2,0 125,0±1,0	125,0±3,0 125,0±2,0 125,0±1,0	140±3
Погрешность concentричности сердцевины	мкм	≤ 3,0 ≤ 3,0 ≤ 1,0	≤ 3,0 ≤ 1,5	≤ 3
Некруглость сердцевины	%	≤ 5 ≤ 6	≤ 5 ≤ 6	≤ 5
Некруглость оболочки	%	≤ 1 ≤ 2	≤ 1 ≤ 2	≤ 1
Диаметр покрытия	мкм	245±10 245±5 500±25	245±10 245±5 500±25	245±10 500±25
Погрешность concentричности покрытия	мкм	≤ 6 ≤ 12 ≤ 12,5 ≤ 19	≤ 6 ≤ 12 ≤ 12 ≤ 19	н/д
Передаточные характеристики				
Рабочий диапазон длин волн	нм	850 1300	850 1300	850 1300
Числовая апертура		0,200±0,015	0,275±0,015	0,290±0,015
Коэффициент затухания на длине волны: 850 нм 1310 нм	дБ/км	≤ 2,5 ≤ 0,8; ≤ 0,7	≤ 3,0 ≤ 0,8; ≤ 0,7	≤ 4,0 ≤ 1,5
Длина волны нулевой дисперсии	нм	1295...1320 1297...1316 1300...1320	1320...1365 1332...1354	1332...1358
Наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии	пс/нм ² ·км	≤ 0,101 ≤ 0,11	≤ 0,097 ≤ 0,11	≤ 0,097
Локальные неоднородности затухания в интервале рабочих длин волн 850 и 1310 нм	дБ	≤ 0,2 ≤ 0,08	≤ 0,2 ≤ 0,08	н/д
Прирост коэффициента затухания на длине волны гидроксильного пика 1383 нм относительно коэффициента затухания на длине волны 1310 нм	дБ/км	≤ 3,0 ≤ 1,5	≤ 1,0	н/д
Ширина полосы пропускания на длинах волн 850нм 1310 нм	МГц·км	300-600 400-600	160-200 200-800	100 100
Прирост коэффициента затухания из-за макроизгибов (100 витков диаметром 75 мм) на длинах волн 850 и 1310 нм	дБ/км	≤ 0,5	≤ 0,5	н/д
Прирост коэффициента затухания при воздействии факторов окружающей среды на длинах волн 850 нм и 1310 нм: -температуры от -60 до +85°C, -циклов от -10 до +85°C при влажности 98%, -погружения в воду при +23 °C, -ускоренного старения при +85°C	дБ/км	≤ 0,1; ≤ 0,2 ≤ 0,1; ≤ 0,2 ≤ 0,2 ≤ 0,2	≤ 0,2 ≤ 0,2 н/д н/д	н/д н/д н/д н/д
Рабочий интервал температур	°C	-60...+85	-60...+85	н/д
Эффективный групповой показатель преломления на длинах волн: 850 нм 1310 нм	отн. ед.	1,483; 1,490 1,479; 1,486	1,496 1,491	1,497 1,492
Механические характеристики				
Испытание при растяжении	Гн/м ²	0,7	0,7	0,7
Параметр динамической усталости		18 20	20	н/д
Усилие стягивания покрытия	Н	2,2-4,4 4,0-7,0	4,0-7,0	н/д

Характеристики одномодовых ОВ в соответствии с Rec.G.652

Параметр	Единица измерения	Corning	Alcatel
Геометрические характеристики			
Диаметр оболочки	мкм	125,0±0,7	125,0±1,0
Некруглость оболочки	%	≤ 0,7	≤ 1
Диаметр покрытия	мкм	245±5	242±5
Погрешность concentричности покрытия	мкм	≤ 12	≤ 12,4
Радиус собственной кривизны	м	≥ 4,0	н/д
Передаточные характеристики			
Рабочий диапазон длин волн	нм	1285...1625	1285...1530 1530...1565
Диаметр модового поля на длине волны: 1310 нм 1550 нм	мкм	9,2±0,4 10,4±0,5	9,1±0,3 10,2±0,8
Длина волны отсечки в кабеле	нм	≤ 1260	≤ 1260
Коэффициент затухания на опорной длине волны: 1310 нм 1550 нм 1625 нм	дБ/км	≤ 0,34 ≤ 0,20 ≤ 0,20	≤ 0,34 ≤ 0,20 н/д
Коэффициент затухания на длине волны гидроксильного пика 1383±3 нм	дБ/км	н/д	≤ 1,5
Коэффициент затухания на длине волны 1383 нм после водородного старения	дБ/км	≤ 0,34	н/д
Прирост коэффициента затухания в интервале рабочих длин волн относительно коэффициента затухания на опорной длине волны: 1285...1330 нм (1310 нм) 1530...1565 нм (1550 нм)	дБ	≤ 0,03 ≤ 0,02	≤ 0,03 ≤ 0,03
Длина волны нулевой дисперсии λ_0	нм	1302< λ_0 <1322	1300< λ_0 <1320
Наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии	пс/нм ² ·км	≤ 0,089	≤ 0,092
Локальные неоднородности затухания в интервале рабочих длин волн 1310 и 1550 нм	дБ	≤ 0,05	≤ 0,05
Коэффициент поляризационной модовой дисперсии: -индивидуальные волокна -протяженная линия	пс/ $\sqrt{\text{дБ}}$	≤ 0,2 ≤ 0,08	≤ 0,2 ≤ 0,08
Коэффициент рэлеевского рассеяния на длине волны: 1310 нм 1550 нм	дБ	-77 -82	н/д н/д
Прирост коэффициента затухания из-за макроизгибов (100 витков диаметром 32 мм) на длине волны 1550 нм	дБ	≤ 0,5	≤ 0,5
Прирост коэффициента затухания из-за макроизгибов (100 витков диаметром 75 мм) на длине волны: 1310 нм 1550 нм 1625 нм	дБ	≤ 0,05 (диаметр 50 мм) ≤ 0,05 (диаметр 50 мм) ≤ 0,05 (диаметр 60 мм) ≤ 0,10	≤ 0,05 ≤ 0,05 н/д
Прирост коэффициента затухания при воздействии факторов окружающей среды на длинах волн 850 нм и 1310 нм: -температуры от -60 до +85°C, -циклов от -10 до +85°C при влажности 98%, -погружения в воду при +23°C, -ускоренного старения при +85°C	дБ/км	≤ 0,05 ≤ 0,05 ≤ 0,05 ≤ 0,05	≤ 0,05 ≤ 0,05 ≤ 0,05 ≤ 0,05
Рабочий интервал температур	°C	-60...+85	-60...+85
Эффективный групповой показатель преломления на длинах волн: 1310 нм 1550 нм	отн. ед.	1,4677 1,4682	1,469 1,470
Механические характеристики			
Испытание при растяжении	Гн/м ²	0,7	0,7
Параметр динамической усталости	отн. ед.	≥ 20	≥ 20
Усилия стягивания покрытия	Н	1,3...8,9	1,3...8,9

Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Планарный волновод					Одномодовое ОВ							Многомодовое ОВ					Смещение		
	n_2	λ , мкм	d , мкм	Δ	q	λ_1 , нм	λ_2 , нм	d , мкм	D , мкм	Δ , %	погрешность изготовления δd , мкм	$\Delta\lambda_{LD}$, нм	λ_1 , нм	λ_2 , нм	d , мкм	D , мкм	Δ , %	θ , град	$\frac{S}{D}$	$\frac{L}{D}$
1	1,61	1,55	116	0,003	3,9	1275	1539	6	122	0,75	$\pm 0,7$	0,1	780	1330	50	125	1	0,2	0,03	0,50
2	1,57	1,32	60	0,004	2,9	1290	1547	7	123	0,36	$\pm 0,5$	0,2	784	1329	62,5	127	1,2	0,4	0,06	0,44
3	1,6	1,54	112	0,002	3,8	1305	1555	8	125	0,33	$\pm 0,6$	0,3	788	1327	50	123	1,5	0,7	0,08	0,42
4	1,56	1,31	52	0,003	2,8	1320	1563	9	127	0,75	$\pm 0,7$	0,4	792	1325	62,5	125	1,8	0,9	0,10	0,39
5	1,5	0,88	14	0,003	1,8	1335	1571	10	128	0,36	$\pm 0,5$	0,5	796	1322	50	127	2	1,1	0,11	0,36
6	1,59	1,53	110	0,002	3,7	1350	1579	8	122	0,33	$\pm 0,6$	0,6	800	1320	62,5	123	1	1,3	0,14	0,33
7	1,55	1,3	50	0,002	2,7	1365	1587	6	123	0,75	$\pm 0,7$	0,7	808	1316	50	125	1,2	1,6	0,17	0,31
8	1,49	0,84	10	0,002	1,7	1380	1595	7	125	0,36	$\pm 0,5$	0,8	812	1313	62,5	127	1,5	1,8	0,19	0,28
9	1,58	1,52	100	0,001	3,6	1395	1603	8	127	0,33	$\pm 0,6$	0,9	816	1303	50	123	1,8	2,0	0,22	0,25
10	1,54	1,29	44	0,001	2,6	1410	1611	6	125	0,75	$\pm 0,7$	1,0	850	1310	62,5	125	2	2,4	0,25	0,22
11	1,48	0,83	6	0,001	1,6	1425	1619	10	122	0,36	$\pm 0,5$	1,1	828	1303	50	127	1	2,7	0,28	0,19
12	1,57	1,51	90	0,001	3,5	1440	1627	6	123	0,33	$\pm 0,6$	1,2	830	1300	62,5	123	1,2	2,9	0,31	0,17
13	1,53	0,85	36	0,002	2,5	1455	1635	7	128	0,75	$\pm 0,7$	1,3	838	1296	50	125	1,5	3,0	0,33	0,14
14	1,61	1,5	86	0,002	3,4	1470	1643	8	127	0,36	$\pm 0,5$	1,5	840	1293	62,5	127	1,8	3,1	0,36	0,11
15	1,6	1,35	80	0,001	3,3	1485	1651	9	128	0,33	$\pm 0,6$	1,6	846	1290	50	123	2	3,3	0,39	0,10
16	1,59	1,34	68	0,005	3,2	1500	1659	10	122	0,75	$\pm 0,7$	1,7	820	1286	62,5	125	1	3,6	0,42	0,08
17	1,52	0,87	28	0,0045	2,2	1515	1667	6	123	0,36	$\pm 0,5$	1,8	856	1283	50	127	1,2	3,8	0,44	0,06
18	1,58	1,33	62	0,003	3,1	1530	1675	7	125	0,33	$\pm 0,6$	2,0	860	1280	62,5	123	1,5	4,0	0,50	0,03

Учебное издание

В.И. Ефанов

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие
по практическим занятиям по дисциплине «Оптические направляющие среды и
пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи» для студентов
направлений подготовки Радиотехника – 210300, Телекоммуникации - 210400

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. -----
Тираж 30 экз. Заказ -----.

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018