

<p>Лукьянов А.С. Хохлов Н.С.</p> <p>НАПРАВЛЯЮЩИЕ СРЕДЫ В ИН- ФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИ- СТЕМАХ</p> <p>Методические рекомендации</p> <p>Издано в авторской редакции по решению методи- ческого совета института</p> <p>Воронежский институт МВД России 2016</p>	<p>Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком. Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.</p> <p>Авторы: Лукьянов Александр Сергеевич, 394065, Россия, Воронеж, пр. Патриотов, 53. Тел.: (473) 200-52-28.</p> <p>Хохлов Николай Степанович 394065, Россия, Воронеж, пр. Патриотов, 53. Тел.: (473) 200-52-28.</p> <p>E-mail: pyankovov@vimvd.ru</p> <p>© Воронежский институт МВД России</p>
---	---

Лукьянов А.С., Хохлов Н.С.

НАПРАВЛЯЮЩИЕ СРЕДЫ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Методические рекомендации

Воронеж 2016

ББК 32.884

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры инфокоммуникационных систем и технологий. Протокол № 22 от 10 мая 2016 г.

Рассмотрены и одобрены на заседании методического совета института. Протокол № 9 от 23 мая 2016 г.

Рецензенты:

Сизоненко А.Б. – начальник кафедры информационной безопасности Краснодарского университета МВД России к.т.н., доцент подполковник полиции;

Дунин В.С. – доцент кафедры информационного и технического обеспечения ОВД Дальневосточного юридического института МВД России к.т.н. подполковник полиции.

Лукьянов, Александр Сергеевич. Направляющие среды в инфокоммуникационных системах: методические рекомендации [Электронный ресурс] / А.С. Лукьянов, Н.С. Хохлов. – Электр. дан. и прогр. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2016. – 5 электр. опт. диск (CD-ROM): 12 см. – Систем. требования: процессор Intel с частотой не менее 1,3 ГГц; ОЗУ 512 Мб; операц. система семейства Windows; CD-ROM дисковод.

ISBN 978-5-88591-395-9

Методические рекомендации по учебной дисциплине «Направляющие среды в телекоммуникациях» предназначены для формирования у обучающихся целостного представления об инфокоммуникационных системах, необходимых для эффективного изучения радиотехнических дисциплин. В рекомендациях изложены исследование процессов распространения одиночных импульсов и прохождения световых импульсов по многомодовым волоконным световодам, исследованы первичные и вторичные параметров передачи симметричного кабеля. Предназначены для курсантов, слушателей очной и заочной формы обучения радиотехнических специальностей Воронежского института МВД России.

ББК 32.884

ISBN 978-5-88591-395-9

© Воронежский институт МВД России, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Лабораторная работа № 1. Исследование процессов распространения одиночных импульсов и кодовых последовательностей по кабельным цепям	6
1.1. Расчет напряжения на выходе кабельной цепи.....	6
1.2. Типы кодов для цифровых систем передачи.....	8
1.3. Исследование искажений формы одиночных импульсов при распространении по кабельным цепям.....	9
1.4. Исследование искажений формы кодовых последовательностей при распространении по кабельным цепям и по глаз-диаграмме.....	12
1.5. Расчет минимально допустимого отношения сигнала к шуму.....	14
2. Лабораторная работа № 2. Измерение вносимого затухания одномодовых оптических волокон	16
2.1. Затухание, единицы измерения затухания.....	16
2.2. Причины собственных потерь в кварцевых ОВ. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны.....	16
2.3. Рабочие диапазоны (окна прозрачности).....	19
2.4. Причины дополнительных потерь в кварцевых ОВ.....	19
2.5. Измерение вносимого затухания, метод сравнения уровней.....	25
3. Лабораторная работа № 3. Прохождение оптических импульсов по одномодовым волоконным световодам	28
3.1. Одномодовый режим передачи. Длина волны отсечки.....	28
3.2. Диаметр модового поля.....	29
3.3. Причины потерь в кварцевых ВС. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны.....	30
3.4. Хроматическая дисперсия в одномодовых ВС.....	32
3.5. Типы и параметры одномодовых ВС.....	35
3.6. Некоторые параметры источников и приемников излучения.....	37
4. Лабораторная работа № 4. Исследование прохождения световых импульсов по многомодовым волоконным световодам	44
4.1. Прохождение оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам.....	44
5. Лабораторная работа № 5. Исследование прохождения световых импульсов по волоконным световодам с усеченным степенным профилем	59
5.1. Исследование прохождения световых импульсов с усеченным степенным профилем.....	59
6. Лабораторная работа № 6. Исследование характеристик многомодовых волоконных световодов с усеченным степенным профилем	72
6.1. Волоконные световоды с усеченным степенным профилем показателя преломления.....	72
6.2. Анализ оптической схемы. Экспериментальное определение параметров ВС.....	81

6.3. Определение длины и затухания ВС.....	82
6.4. Определение уширения импульса и межмодовой дисперсии ВС.....	83
7. Практическое занятие №1. Расчет первичных и вторичных параметров передачи симметричного кабеля.....	91
8. Практическое занятие №2. Расчет параметров передачи коаксиальных кабелей	96
Список используемой литературы.....	100

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

«Исследование процессов распространения одиночных импульсов и кодовых последовательностей по кабельным цепям»

Цель работы:

Изучение процессов распространения одиночных импульсов напряжения и кодовых последовательностей импульсов по различным кабельным цепям. Приобретение навыков в получении и анализе глаз-диаграмм и определении по ним качества связи.

Подготовка к работе

При подготовке к работе изучить следующие вопросы:

- параметры кабельных цепей во временной области: удельная задержка, конструктивная постоянная и импульсная характеристика кабельной цепи,
- методы расчета формы сигнала на выходе кабельной цепи,
- коды, используемые для передачи сигналов в цифровых системах передачи (ЦСП),
- схему регистрации глаз-диаграммы и ее параметры,
- оценка качества связи по глаз-диаграмме.

1.1. Расчет напряжения на выходе кабельной цепи

Импульсы напряжения при распространении по двухпроводной цепи искажаются, они расширяются и уменьшаются по амплитуде. Для характеристики этих искажений вводятся переходная $h(t)$ и импульсная характеристики $g(t)$ цепи [1]. В общем случае для несогласованной, а тем более неоднородной цепи выражения для этих характеристик очень сложны.

Для простейшего случая однородной цепи, согласованной по входу и выходу, для переходной характеристики справедливо [1]:

$$h(t) = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau_0 \cdot l^2}{t - \tau_3 \cdot l}} \right), \quad (1)$$

где t – время, $\tau = \tau_0 \cdot l^2$ – постоянная времени цепи длиной l ,

$\tau_0 = \frac{\alpha^2(f_1)}{4\pi \cdot f_1 \cdot (8.68)^2}$ – удельная конструктивная постоянная цепи,

$\alpha^2(f_1)$ – коэффициент затухания кабельной цепи в дБ/км на некоторой частоте f_1 ,

τ_3 – удельное время задержки сигнала.

Для импульсной характеристики справедливо [1]:

$$g(t) = \frac{\exp\left(\frac{-\tau_0 \cdot l^2}{t - \tau_3 \cdot l}\right)}{\sqrt{\frac{(t - \tau_3 \cdot l)^3}{\pi \cdot \tau_0 \cdot l^2}}} \quad (2)$$

Для расчета удельной конструктивной постоянной цепи τ_0 должна выбираться достаточно высокая частота f_1 . Рекомендуется выбирать ее из частотного диапазона, в котором коэффициент затухания $a^2(f_1)$ пропорционален.

В табл. 1 приведены результаты расчетов удельных конструктивных постоянных и удельных времен задержек, а также значения этих величин из [1].

Таблица 1

Тип кабеля	Диаметр проводников, мм	τ_0 , нс/км ²	τ_3 , мкс/км
КМ	2.64/9.5	6.37	3.46
КМ	2.58/9.4	6.79	3.47
МКТ	1.2/4.6	31.5	3.73
РК-50-2-11	3.7/0.67	384.99	5.07
ВКПА	2.1/9.7	10.78	4.09
МКСБ	1.2	34.2	4.0
МКСА	1.2	29.58	4.0
ЗКПА	1.2	30.1	5.15
ЗКПБ	1.2	32.3	5.08
ТПШ	0.64	176	4.63
ТПШ	0.5	312	4.78
ТПШ	0.4	497	4.82
ТПШ	0.32	730	5.0
КСПШ	1.2	73.46	5.1
FTP	0.52	342.21	5.2
STP	0.64	237.65	5.2

Для определения формы сигнала на выходе цепи при воздействии на ее вход импульса произвольной формы необходимо найти свертку импульсной характеристики цепи $g(t)$ и входного импульса $u_1(t)$:

$$u_2(t) = \int_0^t u_1(t-t')g(t'-\tau_3 l)dt' \quad (3)$$

или воспользоваться переходной характеристикой и интегралом Дюамеля.

$$u_2(t) = \int_0^t u_1(t-t') \frac{dh(t'-\tau_3 \cdot l)}{dt'} dt' \quad (4)$$

1.2. Типы кодов для цифровых систем передачи

Существует большое количество линейных кодов для передачи цифровых сигналов. В данной работе рассмотрены 3 вида простейших бинарных кодов:

- Униполярный двоичный, в котором логические единицы кодируются положительными импульсами напряжения, а логические нули отсутствием импульса.
- Биполярный двоичный, в котором логические единицы кодируются положительными импульсами напряжения, а логические нули отрицательными импульсами напряжения.
- Квазитроичный код, в котором логические единицы кодируются положительными или отрицательными импульсами напряжения, а логические нули отсутствием импульса. Причем каждая последующая единица имеет другую полярность. Такой код называют кодом с чередованием полярности импульсов (ЧПИ).

Для оперативного контроля качества цифровой передачи сигналов используют наблюдение на экране осциллографа, так называемой *глаз-диаграммы*. Ее получают подачей случайного цифрового сигнала на вход Y осциллографа (рис. 1в) в режиме внешней синхронизации, когда на вход синхронизации C поступает последовательность тактовых импульсов. Изменяя цену деления по оси времени можно на экране осциллографа наблюдать стационарную картину, которая содержит несколько тактовых интервалов (рис. 2 и 3). Наблюдаемая осциллограмма одновременно содержит все возможные виды переходов из 1 в 0, 0 в 1, 0 в 0 и 1 в 1 с учетом всех возможных предыдущих состояний кодовых комбинаций.

Глаз-диаграмма наглядно иллюстрирует процесс принятия решения в регенераторе, когда в выбранный момент времени (момент стробирования) мгновенное значение сигнала, которое зависит от шумов и от предшествующей последовательности импульсов, сравнивается с некоторым пороговым значением. Это значение выбирается примерно посередине между минимальным напряжением, соответствующим логической 1 и максимальным напряжением, соответствующим логическому 0. Разность этих напряжений характеризует ширину раскрытия глаз-диаграммы. Отношение сигнала к шуму с увеличением ширины глаз-диаграммы растет, а вероятность ошибки падает. Существуют шаблоны глаз-диаграмм, в которые должна вписываться экспериментальная глаз-диаграмма для обеспечения требуемого качества связи.

Описание моделируемой лабораторной установки

В лабораторной работе моделируется установка (рис. 1), которая включает:

1. Генератор кодовых последовательностей импульсов.
2. Кабельные цепи.
3. Осциллограф.

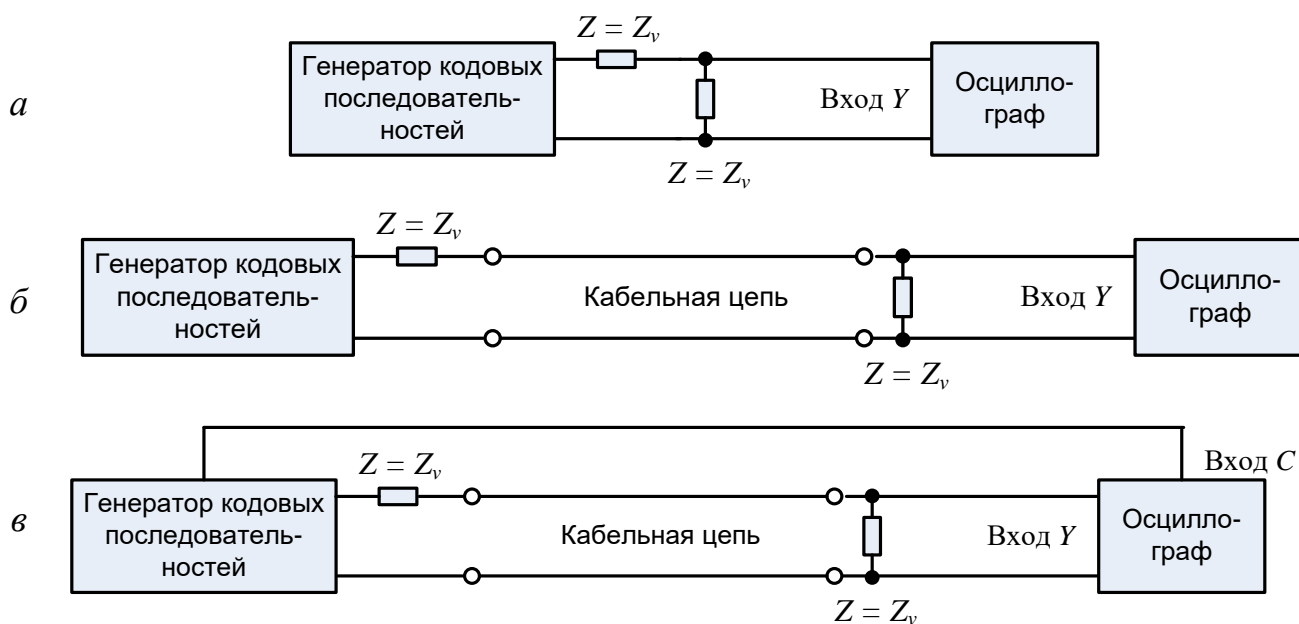


Рис. 1. Моделируемая лабораторная установка

Генератор позволяет формировать три вида кодов: униполярный двоичный, биполярный двоичный и биполярный троичный. Количество элементов кодовой последовательности можно изменять, выбирая число элементов кода N . Для исследования можно выбрать любую из возможных кодовых комбинаций с номерами от 1 до $2^N - 1$. Также имеется возможность задать длительность одного такта кодовой последовательности.

Импульсы, образующие кодовую последовательность, могут иметь различную амплитуду и форму (прямоугольную, гауссовскую и синусквадратную).

Набор кабельных цепей для исследования включает как коаксиальные, так и симметричные однородные цепи различной длины.

Осциллограф позволяет наблюдать форму входных (рис. 1а) и выходных (рис. 1б) кодовых последовательностей, а также форму глаз-диаграммы (рис. 1в).

1.3. Исследование искажений формы одиночных импульсов при распространении по кабельным цепям

1.1. Получить у преподавателя номер варианта. По таблице 2 определить типы двух исследуемых кабельных цепей, их длины, а также форму импульса и длительность такта последовательности.

Таблица 2

Вар.	Тип 1 кабельной цепи	Тип 2 кабельной цепи	Длина, км	Форма импульса	Длительность такта T_0 , нс	Вероятность ошибки
1.	МК-2.6/9.5	МКС	0.5	прямоуг.	50	$5 \cdot 10^{-10}$
2.	МК-2.6/9.5	МКС	0.75	гаусс.	100	10^{-9}
3.	МК-2.6/9.5	МКС	1.0	синускв.	150	$5 \cdot 10^{-9}$
4.	МК-2.6/9.5	МКС	1.25	синускв.	200	10^{-8}
5.	МК-2.6/9.5	МКС	1.5	гаусс.	250	$5 \cdot 10^{-8}$

6.	МКТ-1.2/4.5	ТПП-0.7	0.5	прямоуг.	150	$5 \cdot 10^{-10}$
7.	МКТ-1.2/4.5	ТПП-0.7	0.75	гаусс.	250	10^{-9}
8.	МКТ-1.2/4.5	ТПП-0.7	1.0	синускв.	300	$5 \cdot 10^{-9}$
9.	МКТ-1.2/4.5	ТПП-0.7	1.25	синускв.	350	10^{-8}
10.	МКТ-1.2/4.5	ТПП-0.7	1.5	гаусс.	400	$5 \cdot 10^{-8}$
11.	МКС	ТПП-0.5	0.5	прямоуг.	150	$5 \cdot 10^{-10}$
12.	МКС	ТПП-0.5	0.75	гаусс.	250	10^{-9}
13.	МКС	ТПП-0.5	1.0	синускв.	300	$5 \cdot 10^{-9}$
14.	МКС	ТПП-0.5	1.25	синускв.	350	10^{-8}
15.	МКС	ТПП-0.5	1.5	гаусс.	400	$5 \cdot 10^{-8}$
16.	УТР	RG-58	0.05	прямоуг.	5	$5 \cdot 10^{-10}$
17.	УТР	RG-58	0.075	гаусс.	10	10^{-9}
18.	УТР	RG-58	0.1	синускв.	15	$5 \cdot 10^{-9}$
19.	УТР	RG-58	0.125	синускв.	20	10^{-8}
20.	УТР	RG-58	0.15	гаусс.	25	$5 \cdot 10^{-8}$

1.2. Для получения одиночного входного импульса установите число элементов кода 3, выберите комбинацию 4 (в двоичной системе счисления это соответствует комбинации 100).

1.3. Выберите тип первого кабеля, его длину и форму импульса в соответствии со своим вариантом. Амплитуду импульса U_{in} для всех вариантов принять равной 5 В. Скважность q установить равной 2.

1.4. Рассчитайте для каждого столбца таблицы 3 длительности тактов, считая, что величина T_0 задана вариантом, и номинальную длительность входного импульса t_{nom} по выражению:

$$t_{nom} = \frac{T}{q} \quad (5)$$

1.5. Измерьте по экрану осциллографа с помощью курсора длительность входного импульса t_{in} на уровне половины амплитуды. Результаты измерений занесите в табл. 3.

Таблица 3

Тип кабельной цепи	Длина цепи						
	км						
T/T_0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
T , нс							
t_{nom} , нс							
t_{in} , нс							
U_{out} , В							
t_{out} , нс							
δt							
a , дБ							

1.6. Измерьте по экрану осциллографа с помощью курсора амплитуду U_{out} и длительность t_{out} на уровне половины амплитуды выходного импульса. Результаты измерений занесите в табл. 3.

1.7. По результатам измерений рассчитайте относительное уширение δt и затухание a импульса в кабельной цепи по выражениям:

$$\delta t = \frac{\sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}}{t_{in}} \quad (6)$$

$$a = 20 \cdot \lg \frac{U_{in}}{U_{out}} \quad (7)$$

1.8. Повторить п. 1.3-1.7 для второй заданной вариантом кабельной цепи. Занести результаты в таблицу аналогичную таблице 3.

1.9. Построить два графика. На первом графике показать зависимости $a(t_{in})$, а на втором - зависимости $\delta t(t_{in})$ для двух кабельных цепей. Сделать выводы по полученным результатам.

1.10. Выберите тип первого кабеля, длительность такта и форму импульса в соответствии со своим вариантом. Амплитуду импульса U_{in} для всех вариантов принять равной 5 В. Сквозность q установить равной 2.

1.11. Рассчитайте для каждого столбца таблицы 4 длины L кабельной цепи, считая, что величина L_0 задана вариантом, и номинальную длительность входного импульса t_{nom} по выражению (5) при $T = T_0$.

1.12. Измерьте по экрану осциллографа с помощью курсора амплитуду U_{out} и длительность t_{out} на уровне половины амплитуды выходного импульса. Результаты измерений занесите в табл. 4.

1.13. При проведении измерений по п. 1.12 с $L = L_0$ зарисуйте форму входного и выходного импульсов, соблюдая масштаб по осям напряжения и времени.

1.14. Установите другую форму импульса. Если по варианту вы проводили измерения для прямоугольной формы, установите синусквadratную. В противном случае установите прямоугольную форму. Повторите измерения по п. 1.12 и 1.13. Результаты измерений по п. 1.12 занесите в таблицу, аналогичную по форме табл. 4. При выполнении п. 1.13 для различных форм входных импульсов масштабы по осям напряжения и времени должны быть одинаковыми.

Таблица 4

$t_{nom} = \underline{\hspace{2cm}}$														
Форма импульса														
L/L_0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0
L , км														
U_{out} , В														
t_{out} , нс														
δt														
a , дБ														

1.15. Постройте два графика. На первом графике покажите зависимости $a(L)$, а на втором - зависимости $\delta t(L)$ для двух форм входных импульсов. Сделайте выводы по полученным результатам.

1.4. Исследование искажений формы кодовых последовательностей при распространении по кабельным цепям и по глаз-диаграмме

По кабельным цепям:

2.1. Выберите тип первого кабеля, его длину, длительность такта и форму импульса в соответствии со своим вариантом. Амплитуду импульса U_{in} для всех вариантов принять равной 5 В. Скважность q установить равной 2.

2.2. Установите число элементов кода 6, выберите комбинацию 45 (в двоичной системе счисления это соответствует комбинации 101101).

2.3. Зарисуйте форму входного и выходного напряжений для трех вариантов кода, используя одинаковые масштабы по осям напряжения и времени. Сделайте выводы по полученным результатам.

По глаз-диаграмме:

3.1. Выберите тип первого кабеля, его длину, длительность такта и форму импульса в соответствии со своим вариантом. Амплитуду импульса U_{in} для всех вариантов принять равной 5 В. Скважность q установить равной 2.

3.2. Установите униполярный двоичный код, число элементов кода 7. Получите глаздиаграмму. Это потребует существенно большего времени, чем для расчета выходного напряжения. В некоторых случаях для отображения глаздиаграммы может понадобиться нажатие какой-нибудь клавиши, например левой клавиши курсора.

3.3. Настройте осциллограф таким образом, чтобы видеть на экране предпоследний тактовый интервал кодовой последовательности, используя установки начала отсчета времени и цен деления по осям времени и напряжения. Измерьте время t_m , соответствующее максимальному значению напряжения U_{m_max} в предпоследнем тактовом интервале (рис. 2). Занесите результаты измерения U_{m_max} и t_m в табл. 5.

Установите начало отсчета $t_0 \approx t_m - T_0/2$, а цену деления по оси времени $\approx T_0/10$. Старайтесь, чтобы наблюдаемая осциллограмма занимала практически весь экран, как по горизонтали, так и по вертикали.

3.4. Используя приведенные в табл. 5 выражения, рассчитайте значения моментов времени t в нс, для которых нужно провести измерения параметров глаздиаграммы.

3.5. Используя вертикальный курсор, последовательно устанавливайте моменты времени t , указанные в табл. 5. Для каждого момента времени t , используя горизонтальный курсор, измерьте напряжения U_{1_min} и U_{0_max} (рис. 2). Результаты измерений занесите в табл. 5.

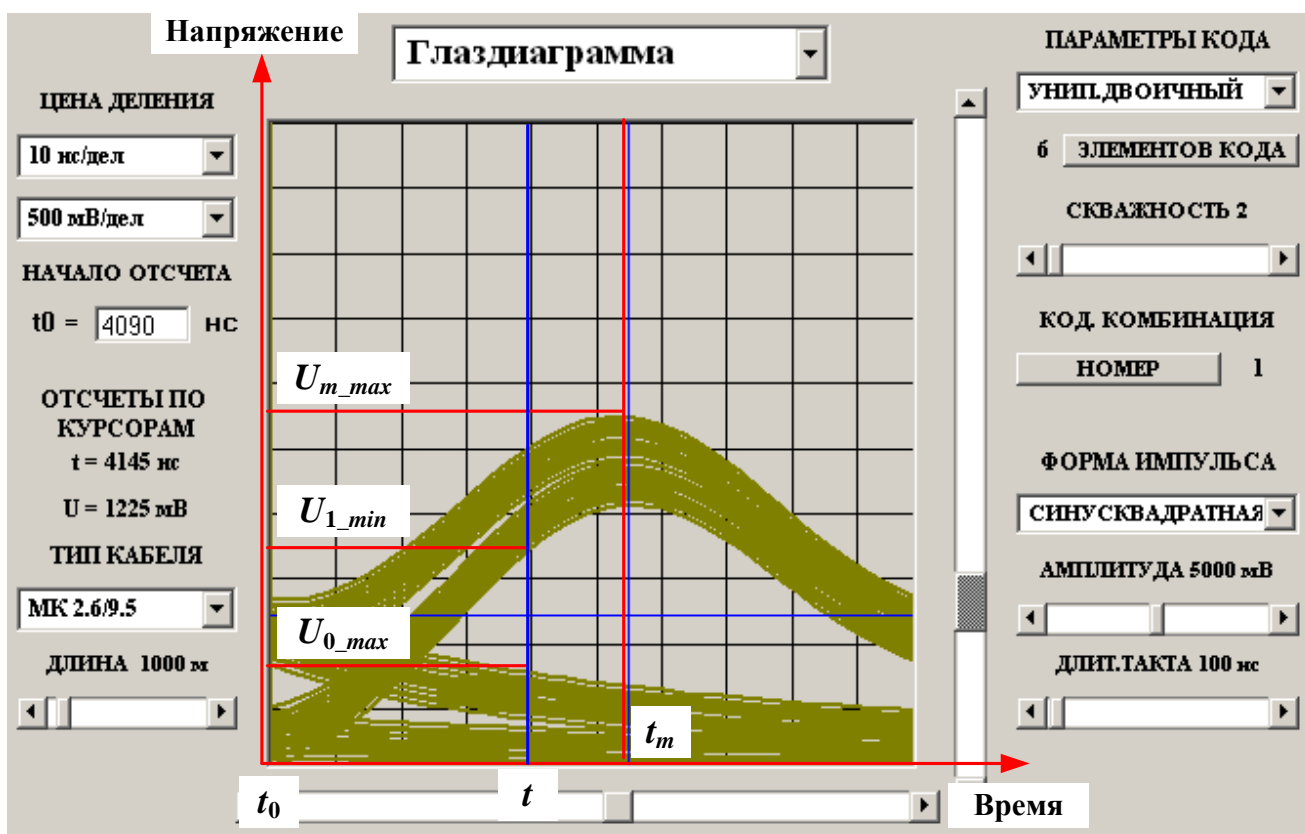


Рис. 2. Глаз-диаграмма при использовании униполярного кода

3.6. По результатам измерений рассчитайте относительные время, соответствующее моменту стробирования τ и ширину глаз-диаграммы H по выражениям:

$$\tau = \frac{t - t_m}{T_0}, \quad (8)$$

$$H = \frac{U_{1_min} - U_{0_max}}{U_{m_max}}. \quad (9)$$

Таблица 5

Тип кода										
$U_{m_max} =$	В				$t_m =$	нс				
$t, \text{нс}$	$t_m - 0.5T_0$	$t_m - 0.375T_0$	$t_m - 0.25T_0$	$t_m - 0.125T_0$	t_m	$t_m + 0.125T_0$	$t_m + 0.25T_0$	$t_m + 0.375T_0$	$t_m + 0.5T_0$	
$U_{1_min}, \text{В}$										
$U_{0_max}, \text{В}$										
τ										
H										

3.7. Повторите настройки, измерения и расчеты по п. 3.3-3.6 для квазитроичного кода (рис. 2). Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу, аналогичную табл. 5.

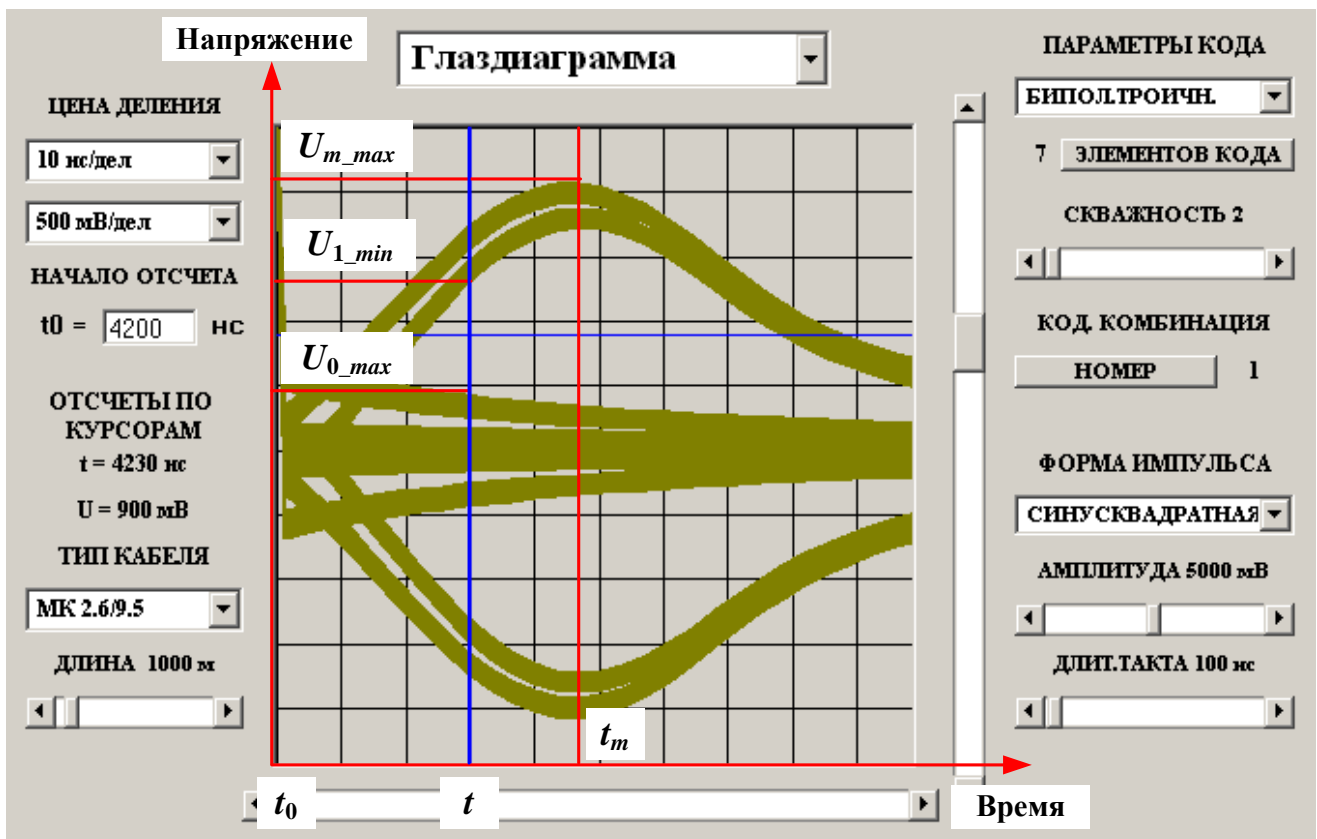


Рис. 3. Глаз-диаграмма при использовании квазитроичного кода

3.8. Постройте графики зависимости относительной ширины глаз-диаграммы H от относительного момента стробирования τ (принятия решения) для двух типов кодов. Определите максимально допустимые относительные сдвиги момента стробирования. Сделайте выводы по полученным результатам.

3.9. Зарисуйте форму глаз-диаграммы для 3-х типов кода, используя одинаковые масштабы по горизонтальной и вертикальной осям.

1.5. Расчет минимально допустимого отношения сигнала к шуму

4.1. Известно, что при принятии решения в регенераторе о том, что передавалось 1 или 0, возможны ошибки, вероятность p_e которых можно определить через интеграл вероятности $\Phi(x)$

$$p_e = \frac{1}{2} \cdot [1 - \Phi(x)], \quad (10)$$

$$\text{где } x = \frac{H(\tau) \cdot SN}{2}, \quad (11)$$

SN - отношение напряжения сигнала U_s к среднеквадратическому значению напряжения шума U_N .

Интеграл вероятности относится к специальным функциям, которые не выражаются через элементарные функции. Для расчета вероятности ошибки при $x > 5$ можно использовать выражение

$$p_e = \frac{1}{2} \cdot [1 - \Phi(x)] = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2x}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{x^2}\right) \quad (12)$$

4.2. По заданной в табл. 2 вероятности ошибки p_e найдите по (12) минимально допустимое значение аргумента x_{min} и занесите его в табл. 6.

4.3. Используя выражение (11) и данные из табл. 5 для униполярного кода, рассчитайте минимально допустимое отношение сигнала к шуму для различных моментов стробирования τ . Результаты занесите в табл. 6.

Таблица 6

Вероятность ошибки $p_e =$					$x_{min} =$				
τ									
H									
SN									

4.4. Повторите расчеты по п. 4.2-4.3 для квазитрочного кода. Результаты расчетов занесите в таблицу, аналогичную табл. 6.

4.5. Постройте графики зависимости минимального отношения сигнала к шуму SN от относительного момента стробирования τ для двух типов кода. Сделайте выводы по полученным результатам.

Содержание отчета

1. Таблицы по форме 3 для 2-х типов кабельных цепей, графики зависимости затухания и длительности одиночных импульсов на выходе кабельной цепи от длительности входного импульса. Выводы.

2. Таблицы по форме 4 для одной кабельной цепи для 2-х форм входных одиночных импульсов напряжения, графики зависимости затухания и длительности одиночных импульсов на выходе кабельной цепи от длины линии. Графические изображения входных и выходных импульсов. Выводы.

3. Таблицы по форме 5 для одной кабельной цепи для 2-х типов кодов, графики зависимости относительной ширины глаз-диаграммы от относительного смещения момента стробирования. Графические изображения глаз-диаграмм для 3-х типов кода. Выводы.

4. Таблицы по форме 6 для 2-х типов кодов, графики зависимости минимального отношения сигнала к шуму от относительного смещения момента стробирования. Выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

«Измерение вносимого затухания одномодовых оптических волокон»

2.1. Затухание, единицы измерения затухания

Затухание a характеризует ослабление сигнала (показывает во сколько раз ослабляется сигнал) и измеряется обычно в логарифмических единицах: децибелах или неперах. При оптических измерениях затухание измеряют в соответствии со следующими выражениями:

$$a(\text{дБ}) = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{P_1} \quad a(\text{Нп}) = \ln \frac{P_0}{P_1}, \quad (1)$$

где P_0, P_1 - мощности сигнала на входе и выходе ОВ, ОК или любого компонента волоконного тракта в Вт. Отметим, что соотношение между децибелами и неперами при оптических измерениях отличаются от принятых в электрических измерениях: $1 \text{ Нп} = 4.34 \text{ дБ}$ или $a(\text{дБ}) = 4.34 \cdot a(\text{Нп})$.

В оптической связи часто приводят не мощность излучения в мВт, а уровень мощности в децибелах мощности дБм. Децибел мощности – это логарифмическая единица измерения, определяющая во сколько раз отличается мощность сигнала от мощности 1 мВт, принятой за 0 дБм. Рассчитать уровень мощности в дБм по известной мощности в мВт и наоборот можно по выражениям:

$$p(\text{дБм}) = 10 \cdot \lg \frac{P(\text{мВт})}{1\text{мВт}} \quad P(\text{мВт}) = 1\text{мВт} \cdot 10^{p(\text{дБм})/10}$$

Если известны не мощности P_0 и P_1 в Вт, а уровни мощности p_0 и p_1 в дБм, то удобно пользоваться другой формой выражения (1):

$$a(\text{дБ}) = p_0(\text{дБм}) - p_1(\text{дБм}) \quad (1a)$$

2.2. Причины собственных потерь в кварцевых ОВ. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны

Общее или вносимые потери в ОВ можно разделить на собственные потери, характеризующиеся собственным затуханием, и дополнительные потери. Собственное затухание (рис. 4.1) обусловлено самим ОВ и возрастает с увеличением его длины. Для однородного ОВ можно рассчитать коэффициент затухания α - величину собственного затухания на единицу длины:

$$\alpha = \frac{a(\text{дБ})}{L}, \text{ дБ/км} \quad (2)$$

где L - длина ОВ, км.

Зависимость коэффициента затухания в кварцевых оптических волокнах от длины волны излучения представлена на рис. 1. Рисунок носит иллюстративный характер, так как для разных типов волокон и разных производителей величина потерь может различаться. (Особенно сильно могут различаться потери в «водяных» пиках на длинах волн 1290 и 1383 нм. Так, в новых моделях стандартных волокон AllWave (Lucent Technologies), SMF-28e (Corning), SMR (Pirelli) – отсут-

ствует пик на длине волны 1383 нм и снижена чувствительность к воздействию водорода).

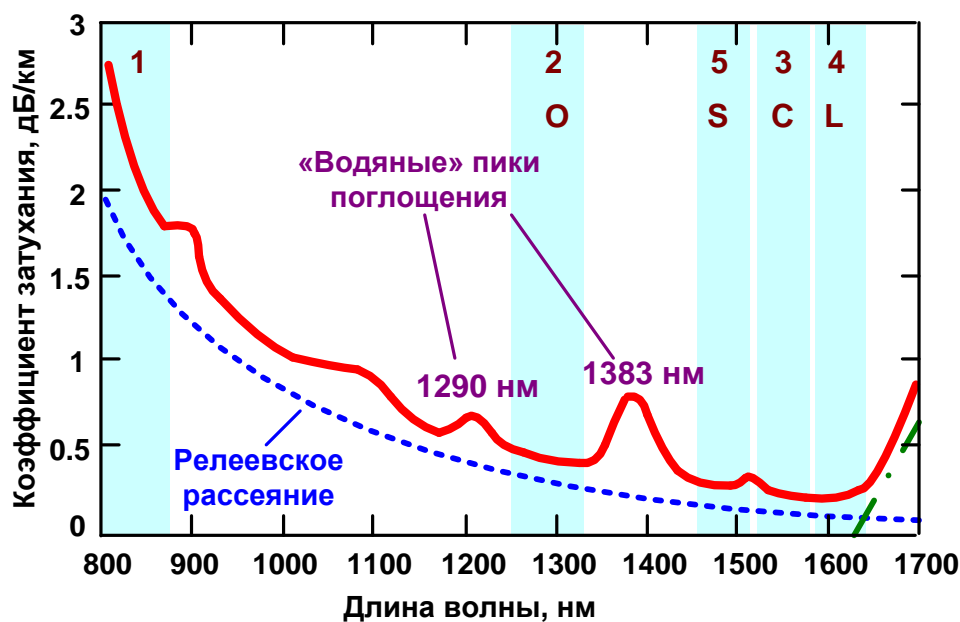


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания от длины волны и положение окон прозрачности в кварцевых ОВ

Собственные потери в ОВ в основном обусловлены двумя причинами: *рассеянием* и *поглощением*. Соответственно коэффициент затухания можно разделить на две составляющих – коэффициент затухания α_s , обусловленный рассеянием, и коэффициент затухания α_a , обусловленный поглощением:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_a \quad (3)$$

Из рис. 1 видно, что в диапазоне длин волн 800-1700 нм потери асимптотически уменьшаются с ростом длины волны. Это обусловлено рассеянием света в ОВ - фундаментальной (технологически неустранимой) причиной потерь в ОВ. При обычно используемых в связи мощностях излучения проявляется только один вид рассеяния – релеевское рассеяние.

Релеевское рассеяние света происходит на неоднородностях, которые имеются в аморфном кварцевом стекле. Под неоднородностью понимается локальное изменение показателя преломления вещества, размеры которого сравнимы с длиной волны.

Потери из-за релеевского рассеяния быстро уменьшаются с ростом длины волны. Известно, что коэффициент затухания α_s , обусловленный релеевским рассеянием, обратно пропорционален длине волны λ в четвертой степени:

$$\alpha_s = \chi_s \lambda^{-4}, \quad (4)$$

где χ_s - коэффициент пропорциональности, который для высококачественных кварцевых ОВ равен 0.7-0.9 дБ·мкм⁴/км. Этот коэффициент зависит от материала (вида и концентрации легирующих добавок и т.п.) и технологии изготовления ОВ.

Другим характерным видом потерь, оказывающим влияние на вид представленной характеристики, является поглощение. Поглощение – это потери энергии распространяющегося света, возникающие в результате взаимодействия его со средой. При поглощении в ОВ световая энергия преимущественно преобразуется во внутреннюю энергию вещества (энергия световой волны может расходоваться и на другие процессы – фотолюминисценцию (вторичное излучение в другом диапазоне частот), ионизацию атомов вещества и др), то есть расходуется на возбуждение колебаний частиц. Известно, что частица может обладать не любой энергией, а только энергией, соответствующей разрешенным энергетическим уровням. Для перехода на более высокий энергетический уровень частице необходима порция (квант) энергии, соответствующий расстоянию между уровнем, на котором она находилась, и уровнем, на который она переходит.

Энергия квантов распространяющегося света связана с его частотой ν (длиной волны λ):

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (5)$$

где $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, c – скорость света.

Если эта энергия совпадает (или близка) с порцией энергии, необходимой частицам для перехода на более высокий энергетический уровень, она будет поглощаться. В противном случае поглощения не будет.

Таким образом, существуют определенные – резонансные – длины волн, которые активно поглощаются веществом и на которых затухание, соответственно, будет выше. Поэтому говорят, что поглощение носит резонансный характер.

ОВ содержит различные частицы – кварца, основного материала, полезных (легирующих) примесей и вредных примесей, попадающих в ОВ из-за несовершенства технологии производства. Каждая частица имеет свой набор длин поглощаемых волн, которые могут попадать в используемый для связи спектральный диапазон 0.80-1.6 мкм. У кварца и используемых легирующих примесей всплески поглощения в используемом диапазоне отсутствуют. Кварц дает мощные пики поглощения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, которые немного захватывают используемый диапазон.

При современных технологиях изготовления ОВ наибольший вклад в поглощение вносят именно гидроксильные группы, которые при взаимодействии с атмосферным водородом образуют воду. Они дают мощные пики поглощения на длинах волн 1290 и 1383 нм. Также они определяют более слабые пики поглощения в области длин волн 1130, 950, 875, 825 и 725 нм.

Этот тип потерь существенно зависит от технологии изготовления ОВ и имеет тенденцию к снижению. Например, для специального волокна AllWave, потери в области водяного пика уменьшены до 0.31 дБ/км, что позволило сформировать практически гладкую кривую затухания в диапазоне 1300—1620 нм, близкую к кривой релеевского рассеяния.

Характер зависимости затухания от длины волны для разных типов ОВ мало отличается.

2.3. Рабочие диапазоны (окна прозрачности)

Из рис. 1 видно, что для передачи оптических сигналов может использоваться широкий участок спектра, где потери в ОВ достаточно малы. Его принято разбивать на более узкие участки – рабочие диапазоны или *окна прозрачности*.

Первоначально под окнами прозрачности понимались участки длин волн вблизи узких локальных минимумов в зависимости коэффициента затухания от длины волны: 850 нм (1-е), 1310 нм (2-е) и 1550 нм (3-е). Постепенно, с развитием технологии очистки кварцевого стекла стала доступна вся область малых потерь от 1260 до 1675 нм. Кривая потерь теперь выглядит достаточно гладко и локальные минимумы на ней слабо выражены.

Первое окно прозрачности использовалось в 70-х годах XX века в первых линиях связи на основе многомодовых волокон. В настоящее время этот диапазон из-за большой величины коэффициента затухания (2-2.5 дБ/км) используется в основном в локальных вычислительных сетях.

Второе окно прозрачности (*O – Original, основной диапазон*) стало использоваться в 80-х годах XX века в линиях дальней связи, когда были разработаны источники излучения на длину волны 1310 нм. В настоящее время второе окно прозрачности используется преимущественно в городских и зонавых линиях.

Третье окно прозрачности (*C – Conventional, стандартный диапазон*) было освоено в начале 90-х годов XX века. В него попадает абсолютный минимум поглощения в кварцевом волокне. Так как стандартные одномодовые волокна обладают в третьем окне прозрачности большой дисперсией, то было разработано DSF волокно с длиной волны нулевой дисперсии, смещенной в это окно. Третье окно прозрачности наиболее широко используется в магистральных линиях.

В последнее время в связи с развитием технологии спектрального мультиплексирования (DWDM) повысился интерес к третьему и прилегающим к нему четвертому и пятому окнам прозрачности. Специально для применения в системах DWDM были созданы несколько типов NZDSF волокон, обладающих в этих окнах ненулевой дисперсией.

Четвертое окно прозрачности (*L – Long wavelength, длинноволновый диапазон*) позволяет передвинуть правую границу DWDM систем на 1620 нм.

Пятое окно прозрачности (*S – Short wavelength, коротковолновый диапазон*) появилось после создания волокна AllWave. В этом волокне в результате тщательной очистки потери в «водяном» пике на длине волны 1383 нм были снижены до 0.31 дБ/км (меньше чем во втором окне прозрачности на длине волны 1310 нм, где потери составляют 0.35 дБ/км). Пятое окно прозрачности завершило освоение спектральной области малых потерь в волокне на длинах волн от 1280 до 1650 нм.

2.4. Причины дополнительных потерь в кварцевых ОВ

К дополнительным потерям относятся:

- потери на вводе и выводе излучения,
- потери в соединениях (стыках) строительных длин,

- изгибные потери,
- потери, связанные с нарушениями геометрической формы ОВ и случайно расположенными структурными дефектами.

Потери на вводе излучения от источника излучения в ОВ зависят от соотношения размеров излучающей площадки источника и сердцевины ОВ, соотношения числовых апертур источника излучения и ОВ, а также от коэффициента отражения торцевой поверхности ОВ.

Потери из-за *различия показателей преломления* n_1 и n_2 сердцевин ОВ (рис. 2) являются следствием френелевского отражения на границе двух сред. В простейшем случае при отсутствии воздушного зазора для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления эти потери составляют:

$$a_f = -10 \cdot \lg \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (6)$$

Потери при *различии числовых апертур* NA_1 и NA_2 соединяемых МОВ (рис. 3) возникают при переходе излучения из МОВ с большей апертурой NA_1 в МОВ с меньшей апертурой NA_2

$$a_{NA} = \begin{cases} -20 \cdot \lg \frac{NA_2}{NA_1} & \text{при } NA_1 > NA_2 \\ 0 & \text{при } NA_1 \leq NA_2 \end{cases} \quad (7)$$

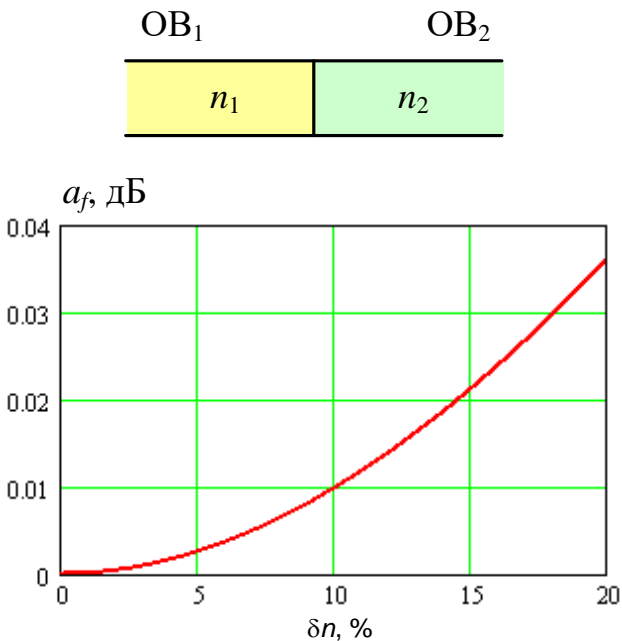


Рис. 2. Потери в соединении ОВ с разными показателями преломления сердцевин

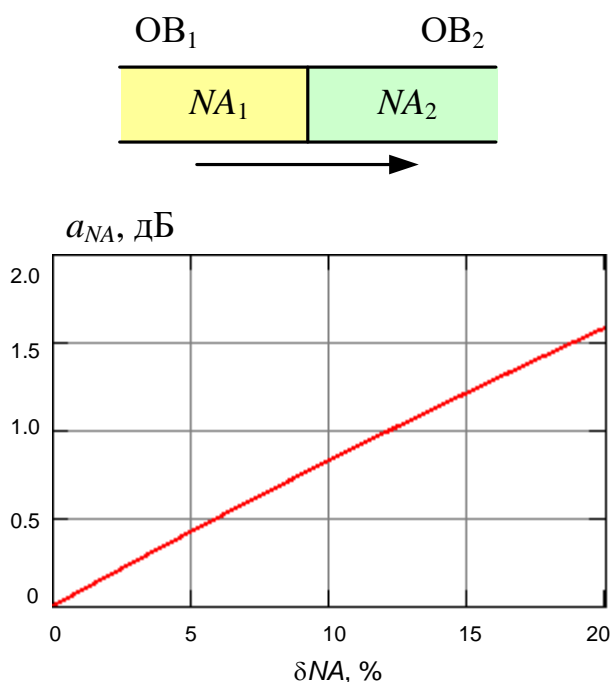


Рис. 3. Потери в соединении ОВ с различными числовыми апертурами

Потери в соединениях ОВ можно разделить на внутренние и внешние. Внутренние вносимые потери возникают из-за различия параметров соединяемых ОВ. Эти потери невозможно уменьшить совершенствованием технологии создания соединений, конструкции соединителей, сварочных аппаратов, повышением мастерства кабельщиков и т. п. К причинам внутренних вносимых потерь относятся:

- неодинаковость диаметров сердцевины соединяемых ОВ,
- неодинаковость показателей преломления соединяемых ОВ,
- неодинаковость числовых апертур соединяемых ОВ,
- наличие эксцентриситетов сердцевина/оболочка ОВ с разных сторон.

К внешним вносимым потерям относят потери, возникающие по причине несовершенства инструментов и оборудования, применяемых для сращивания ОВ, недостаточного мастерства кабельщиков и т. п. Такими причинами являются угловое, радиальное и осевое (только для разъемных соединений) смещения осей соединяемых ОВ, а также шероховатости и загрязнение их торцевых поверхностей.

Формальному расчету поддаются внутренние потери, возникающие из-за различия параметров, соединяемых ОВ, и внешние потери, возникающие из-за смещений.

Потери при *различии радиусов сердцевины* a_1 и a_2 соединяемых многомодовых ОВ (рис. 4) возникают при переходе излучения из ОВ с большим радиусом a_1 в ОВ с меньшим радиусом a_2 :

$$a_{rc} = \begin{cases} -20 \cdot \lg \frac{a_2}{a_1} & \text{при } a_1 > a_2 \\ 0 & \text{при } a_1 \leq a_2 \end{cases} \quad (8)$$

Потери при *различии радиусов модовых полей* w_1 и w_2 соединяемых одномодовых ОВ (рис. 5):

$$\dot{a}_{mf} = -20 \cdot \lg \frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \quad (9)$$

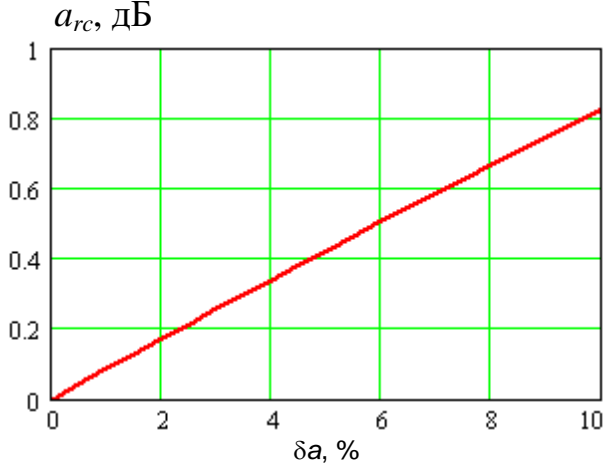
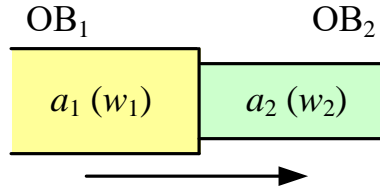


Рис. 4. Потери в соединении многомодовых ОВ с разными диаметрами сердцевин

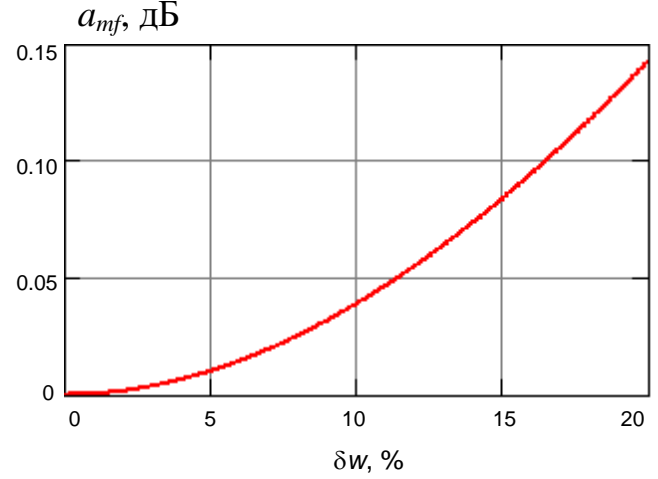


Рис. 5. Потери в соединении одномодовых ОВ с разными диаметрами модовых полей

При наличии эксцентриситета сердцевин/оболочки возникает радиальное смещение r центров сердцевин соединяемых ОВ (рис. 6), которое приводит к потерям:

для многомодовых ОВ:

$$a_{rad} = -10 \cdot \lg \left(1 - \frac{2r}{\pi a} \right) \quad (10)$$

для одномодовых ОВ:

$$a_{rad} = -10 \cdot \lg \left[\exp \left(- \frac{r}{2 \cdot w} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Внешние потери из-за радиального смещения r соединяемых ОВ также определяются выражениями (10-11). На рис. 6 показаны зависимости потерь от относительного радиального смещения x соединяемых ОВ, которое для многомодовых ОВ равно $x = r / a$, а для одномодовых ОВ $x = r / w$.

Внешние потери, возникающие из-за углового смещения θ соединяемых ОВ (рис. 7) составляют:

$$\text{для многомодовых ОВ: } a_{ang} = -10 \cdot \lg \left(1 - \frac{2\theta}{\pi \cdot \arcsin NA} \right) \quad (12)$$

$$\text{для одномодовых ОВ: } a_{ang} = -10 \cdot \lg \left[\exp \left(- \left(\frac{\pi \cdot n_2 w \cdot \theta}{\lambda} \right)^2 \right) \right] \quad (13)$$

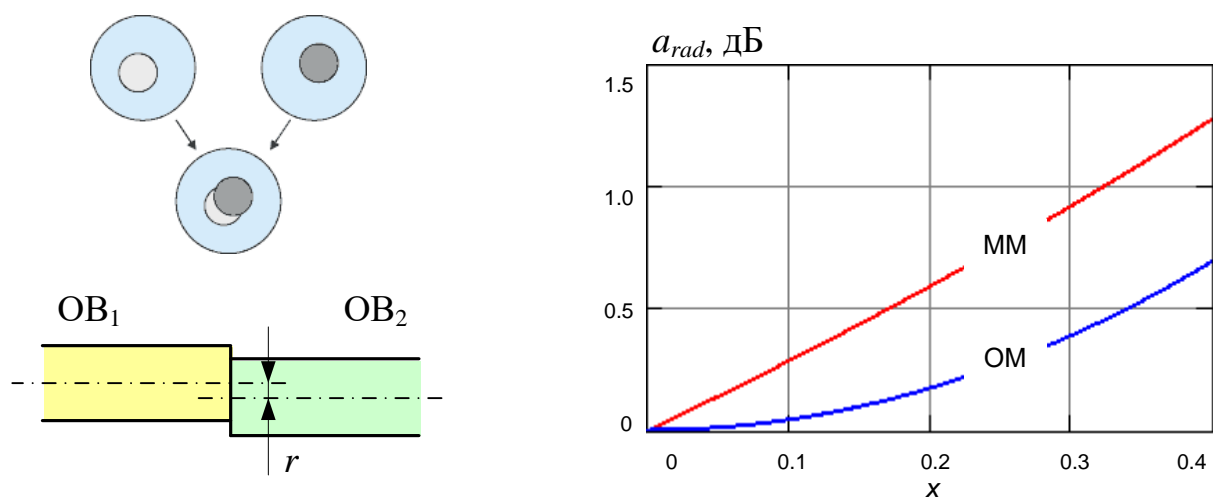


Рис. 6. Потери, обусловленные радиальным смещением сердцевин соединяемых ОВ

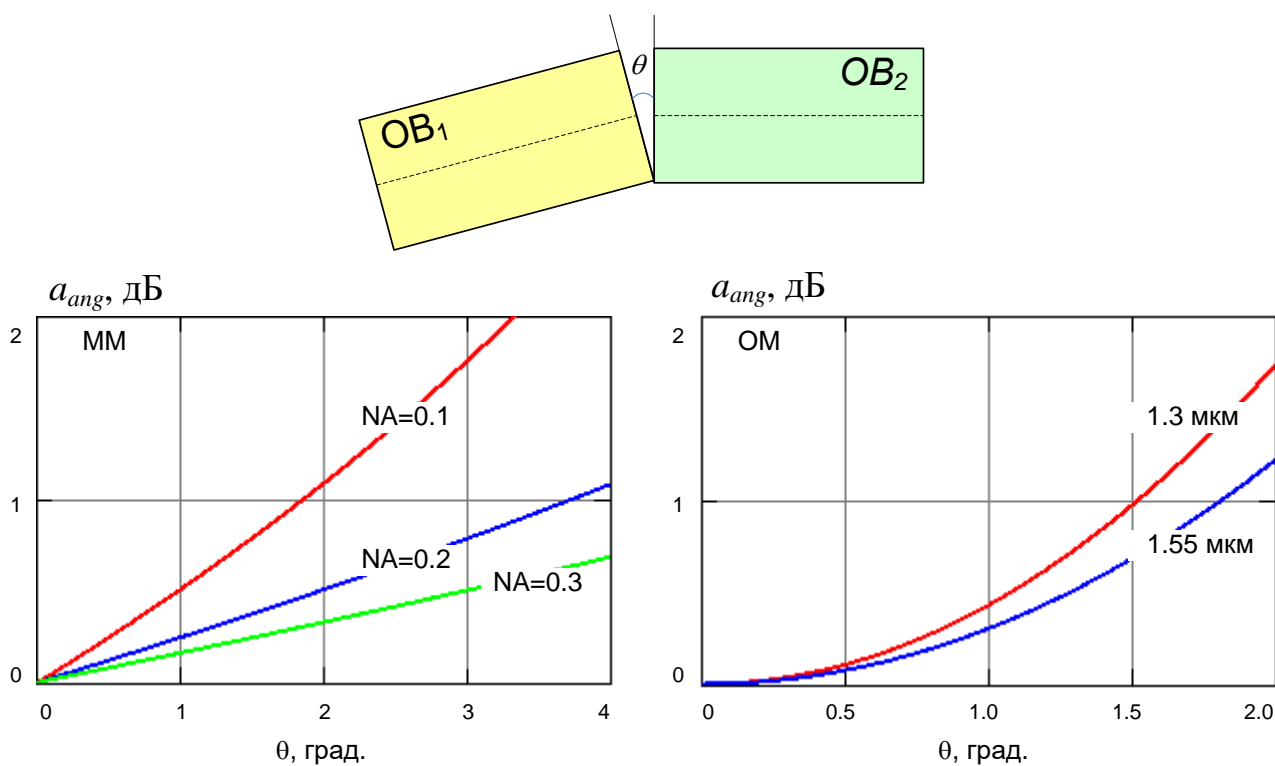


Рис. 7. Потери, обусловленные угловым смещением соединяемых ОВ

Внешние потери из-за осевого смещения s соединяемых ОВ (рис. 8) возникают по двум причинам:

1. Попадая в зазор между волокнами, световой пучок будет расходиться, так как среда в зазоре в отличие от волокна не способна направлять свет. Когда свет достигнет торца второго волокна, он уже будет частично «засвечивать» его оболочку, то есть даже при равенстве числовых апертур не полностью войдет в сердцевину второго волокна.

2. Если показатель преломления n среды, находящейся в зазоре, отличается от показателей преломления сердцевин ОВ n_1 , то в зазоре возникают многократные френелевские отражения, которые также приводят к потерям.

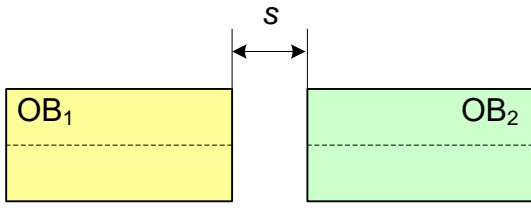


Рис. 8. Осевое смещение ОВ.

Полные потери из-за осевого смещения складываются из потерь, обусловленных этими двумя причинами:

$$a_{ax} = a_{asb} + a_{mref}. \quad (14)$$

Потери из-за расходимости светового пучка a_{asb} (рис. 9) составляют:

$$\text{для многомодовых ОВ: } a_{ax} = -10 \cdot \lg \left(1 - 0.8 \frac{s \cdot \sqrt{2\Delta}}{a} \right), \quad (15)$$

$$\text{для одномодовых ОВ: } a_{ax} = -10 \cdot \lg \frac{4w^4}{4w^4 + \lambda^2 s^2 / \pi^2}, \quad (16)$$

где $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$ - относительная разность показателей преломления ОВ.

Если показатель преломления n среды, находящейся в зазоре, отличается от n_1 , то в зазоре возникают многократные отражения. Средние френелевские потери (рис. 10) составляют:

$$\bar{a}_{mref} = -10 \cdot \lg \frac{2 \cdot n \cdot n_1}{n^2 + n_1^2}. \quad (17)$$

На рис. 11 показаны зависимости полных потерь из-за осевых смещений от относительной величины смещения для многомодовых ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления, рассчитанные по выражениям (15) и (17) для различных отклонений показателя преломления среды в зазоре от показателя преломления сердцевины ОВ. При расчете показатели преломления сердцевины ОВ полагались одинаковыми и равными 1.5. Видно, что для воздушного зазора потери очень велики. Уменьшить их можно, введя в зазор иммерсионное вещество.

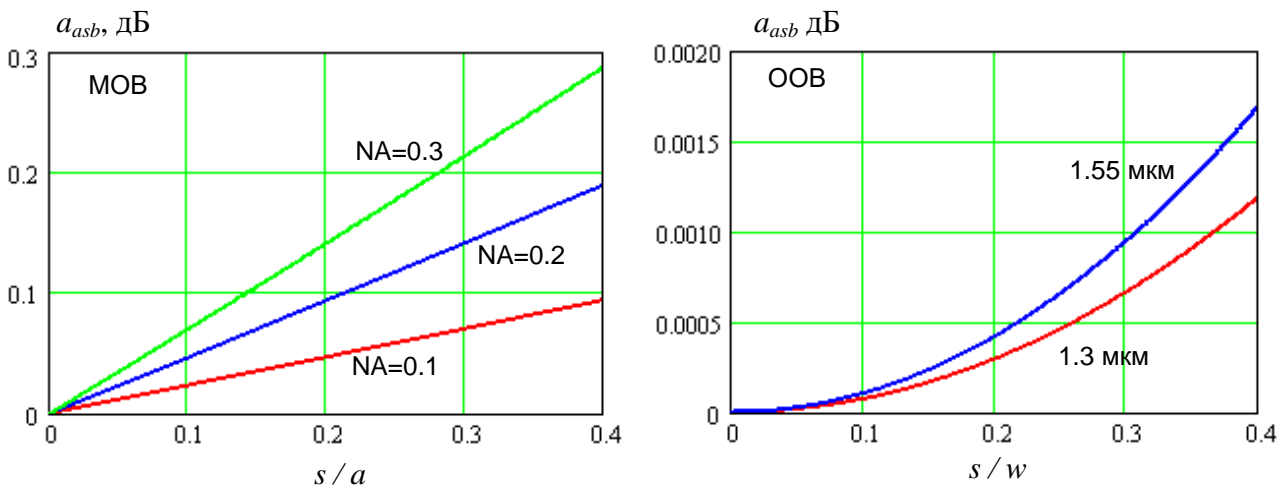


Рис. 9. Потери из-за расходимости светового пучка при осевом смещении соединяемых ОВ.

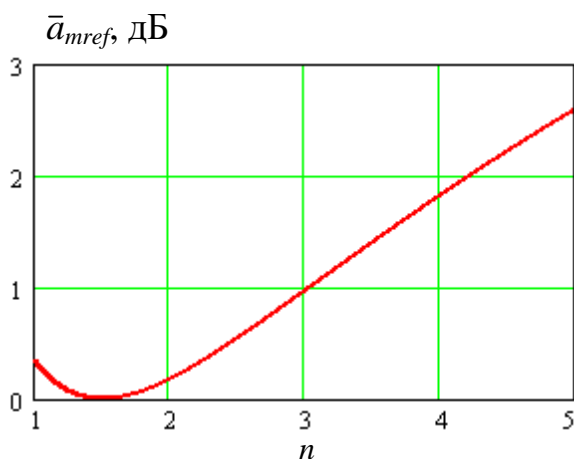


Рис. 10. Зависимость средних вносимых потерь от показателя преломления среды в зазоре.

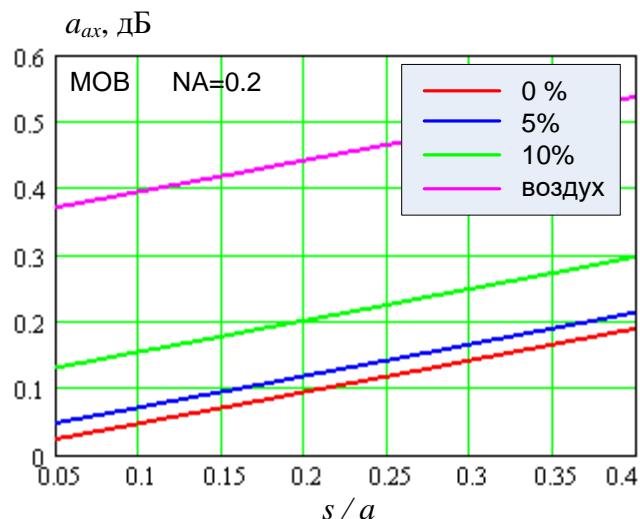


Рис. 11. Полные потери из-за осевого смещения соединяемых многомодовых ОВ.

Изгибные потери возникают из-за нарушения условий ПВО в месте изгиба (рис. 12). Их разделяют на потери из-за макроизгибов и микроизгибов ОВ.

К макроизгибам относят изгибы ОВ, радиус которых много больше радиуса сердцевины ОВ. Потери из-за макроизгибов зависят от радиуса изгиба. При больших радиусах изгиба (более 25-30 мм на длине волны 1310 нм) они пренебрежимо малы. При уменьшении радиуса изгиба потери начинают быстро возрастать. Так при намотке нескольких витков волокна на карандаш потери могут возрасти на 20-40 дБ.

Относительно недавно, однако, фирма Corning разработала новый тип ОВ – волокно ClearCurve, с очень малыми потерями на макроизгибах. В этом волокне сердцевина окружена кольцом отражающих наноструктур, не позволяющих свету выйти за пределы сердцевины.

Наиболее существенный вклад в увеличение затухания вносят микроизгибы, радиус которых соизмерим с радиусом сердцевины ОВ. Характер зависимости потерь от рассеяния на микроизгибах α_{mi} - имеет вид

$$\alpha_{mi} = \frac{C_{mi}}{NA^6}, \quad (18)$$

где C_{mi} - постоянная потеря на микроизгибах, NA – числовая апертура ОВ.

2.5. Измерение вносимого затухания, метод сравнения уровней

Метод основан на последовательном измерении мощности оптического излучения на выходе измеряемого ОВ и на выходе источника излучения, который присоединяется к приемнику излучения непосредственно или с помощью вспомо-

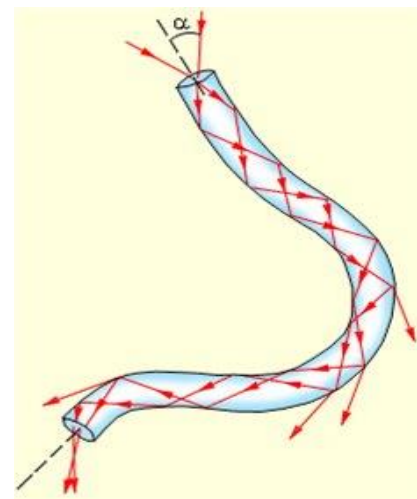


Рис. 12. Потери излучения на изгибах

гательного ОВ, который также как и измеряемый ОВ, армирован оптическим соединителем.

Оптические соединители, которыми армированы измеряемый ОВ и вспомогательный ОВ, должны иметь известный уровень потерь a_p при соединении. Для определения коэффициента затухания должна быть также известна длина ОВ L .

При подготовке к измерениям торцы всех сочленяемых соединителей необходимо протереть спиртом.

На практике используют две разновидности метода измерения вносимых потерь.

В первом варианте (рис. 13, Схема I) используется источник излучения с выходом в виде гибкого оптического поводка. Проводятся два измерения. При первом измерении измеряемое ОВ подключают между выходом источника и ФП и проводят измерение мощности P_1 или уровня p_1 . Для исключения грубых погрешностей измерение проводится несколько раз (не менее 3). Перед каждым измерением измеряемое волокно отключают и снова подключают к источнику излучения. Результаты измерений усредняют.

При втором измерении источник непосредственно подключается к приемнику. Проводится измерение мощности P_2 или уровня p_2 . Для исключения грубых погрешностей измерение проводится несколько раз (не менее 3). Перед каждым измерением источник излучения отключают и снова подключают к приемнику. Результаты измерений усредняют.

Для определения вносимого затухания вычисляют разность двух усредненных уровней

$$a = [\tilde{p}_1 - \tilde{p}_2] - a_p. \quad (19)$$

В результат входит среднее значение потерь в оптическом разъеме a_p , соединяющем два ОВ.

Во втором варианте (рис. 13, Схема II) используется источник излучения, выходной оптический разъем которого установлен на передней панели излучателя. Для измерений используется вспомогательный оптический поводок.

Проводятся два измерения. При первом источник излучения через оптический поводок подключается к приемнику и измеряется мощность P_1 или уровень мощности p_1 . При втором измерении вместо оптического поводка между источником и приемником излучения включается измеряемое ОВ. Оба измерения, как и в схеме I, проводятся несколько раз для исключения грубых погрешностей. Результаты измерений усредняются

Для определения вносимого затухания вычисляют разность двух усредненных уровней

$$a = [\tilde{p}_1 - \tilde{p}_2] - a_{pv} \quad (20)$$

В результат измерения входит затухание оптического поводка a_{pv} .

При известной длине ОВ можно рассчитать его коэффициент затухания по выражению (2).

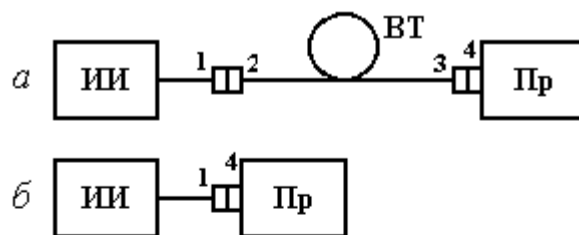


Схема I

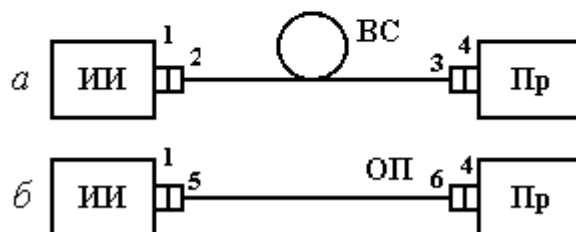


Схема II

Рис. 13. Схема установки для измерения вносимых потерь

Результаты измерений оформляются протоколом, в котором указывают:

- результаты измерения затухания и коэффициента затухания в каждом ОВ;
- длину волны и спектральную ширину источника излучения;
- марку и длину оптического кабеля;
- тип, заводские номера и дату поверки (аттестации) использованного оборудования;
- погрешность результата измерения при выбранной доверительной вероятности.

При измерении вносимых потерь обычно используют специальные приборы - оптические тестеры. Они предназначены для измерений в процессе строительства и эксплуатации ВОЛС. Поэтому для измерений необходимо использовать отдельные, разнесенные в пространстве приемник и источник излучения.

Повысить точность и расширить измерительные возможности можно, используя оптические тестеры, которые в одном корпусе содержат источник и приемник излучения (оптические мультиметры). Комплект из двух таких приборов позволяет проводить измерения затухания одновременно в двух ОВ, а в каждом из них во встречных направлениях, повысить точность измерения благодаря возможности калибровать источники излучения по собственным приемникам.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
«Прохождение оптических импульсов
по одномодовым волоконным световодам»

Цель работы:

Изучение процессов распространения оптических импульсов по одномодовым волоконным световодам (ВС) различных типов, методов измерения параметров ВС - затухания и дисперсии.

Подготовка к работе:

При подготовке к работе должны быть изучены следующие разделы:

1. Волоконные световоды и принцип их действия
2. Лучевая теория передачи по световодам
3. Волновая теория передачи по световодам
4. Затухание световодов
5. Дисперсия и пропускная способность световодов.

3.1. Одномодовый режим передачи. Длина волны отсечки

Радикальным способом уменьшения дисперсии является переход от многомодовой передачи к одномодовой. Число направляемых мод M в ступенчатом ВС можно рассчитать, зная нормированную частоту - безразмерный параметр, связанный с геометрическими (радиус сердцевины a) и оптическими (числовая апертура NA) характеристиками ВС, а также с длиной волны источника излучения в вакууме λ_0 :

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot NA}{\lambda_0}, \quad (1)$$

$$M = INT\left(\frac{v^2}{2}\right). \quad (2)$$

Из (2) следует, что число мод будет равно 1 при $v < 2$. При более точном подходе к анализу числа мод условие одномодовости для ВС со ступенчатым профилем показателя преломления будет выглядеть следующим образом:

$$v \leq 2.405 = \frac{2\pi \cdot a \cdot NA}{\lambda_0}. \quad (3)$$

Впервые одномодовый режим передачи в ВС со ступенчатым профилем показателя преломления был достигнут путем уменьшения радиуса сердцевины до 5 мкм. Такие ВС называют стандартными.

Обратите внимание, что в условие одномодовости входит длина волны источника излучения. Это означает, что один и тот же ВС может быть, как одномодовым так и многомодовым в зависимости от рабочей длины волны.

Для ВС можно рассчитать длину волны отсечки, которая разделяет режимы одномодовой и многомодовой передачи. Из (3) можно получить по-другому сформулированное условие одномодовости:

$$\lambda_0 \geq \lambda_{cut} = \frac{2\pi \cdot a \cdot NA}{2.405}. \quad (4)$$

3.2. Диаметр модового поля

В геометрической трактовке единственной направляемой моде одномодового ВС соответствует луч, распространяющийся вдоль его оси. С волновой точки зрения мода – это волна, поле которой не полностью сосредоточено в сердцевине. Для одномодового ВС распределение интенсивности поля моды можно аппроксимировать гауссовской кривой (рис. 1).

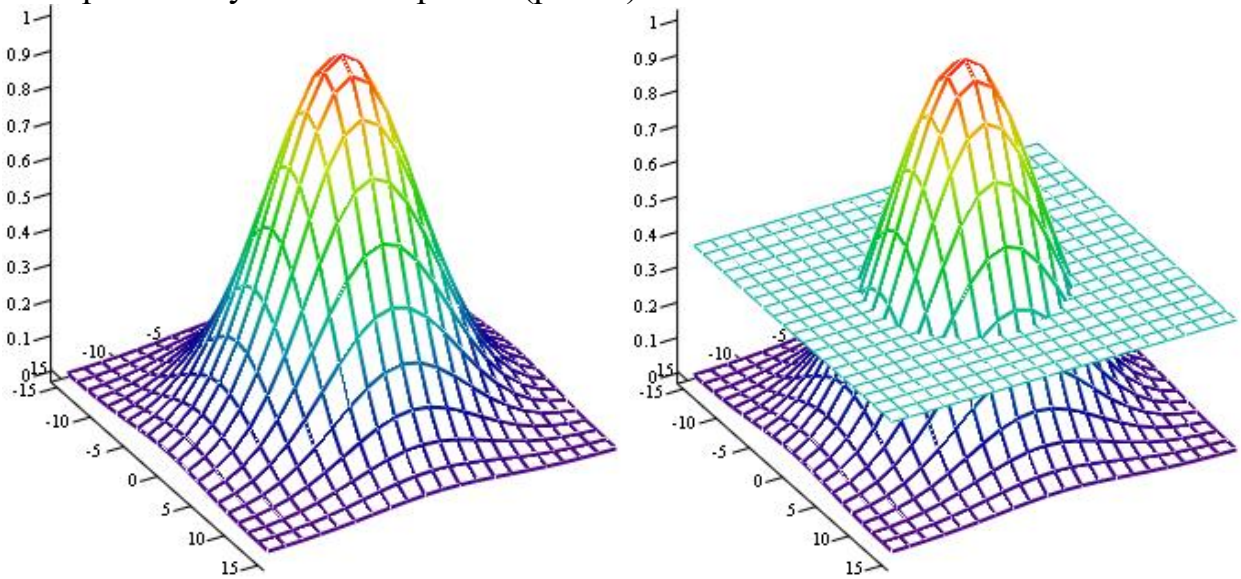


Рис. 1. Определение диаметра или радиуса модового поля

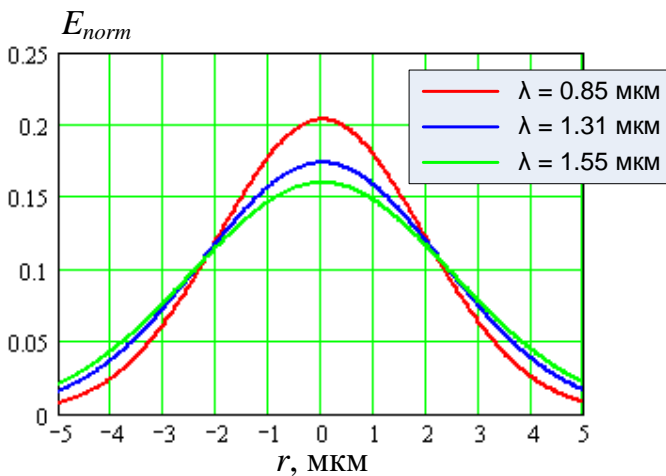


Рис. 2. Распределение модового поля основной моды в стандартном ВС.

распределения модового поля для стандартного ВС на длинах волн, которые обычно используются для связи.

На практике радиус r_{mf} или диаметр поля моды d_{mf} определяют по ширине кривой распределения поперечного поля моды на уровне $1/e = 0.369$ от максимума.

Для стандартного ВС диаметр модового поля можно рассчитать по выражению:

$$r_{mf} = \frac{2 \cdot a}{\sqrt{\ln\left(\frac{2\pi \cdot a \cdot NA}{\lambda}\right)}} \quad (5)$$

Таким образом, диаметр модового поля растет с увеличением длины волны. На рис. 2 показаны рас-

3.3. Причины потерь в кварцевых ВС. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны

Затухание a характеризует ослабление сигнала в ВС и измеряется обычно в логарифмических единицах - децибелах:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дБ} \quad (6)$$

где P_1, P_2 - мощности сигнала на входе и выходе ВС.

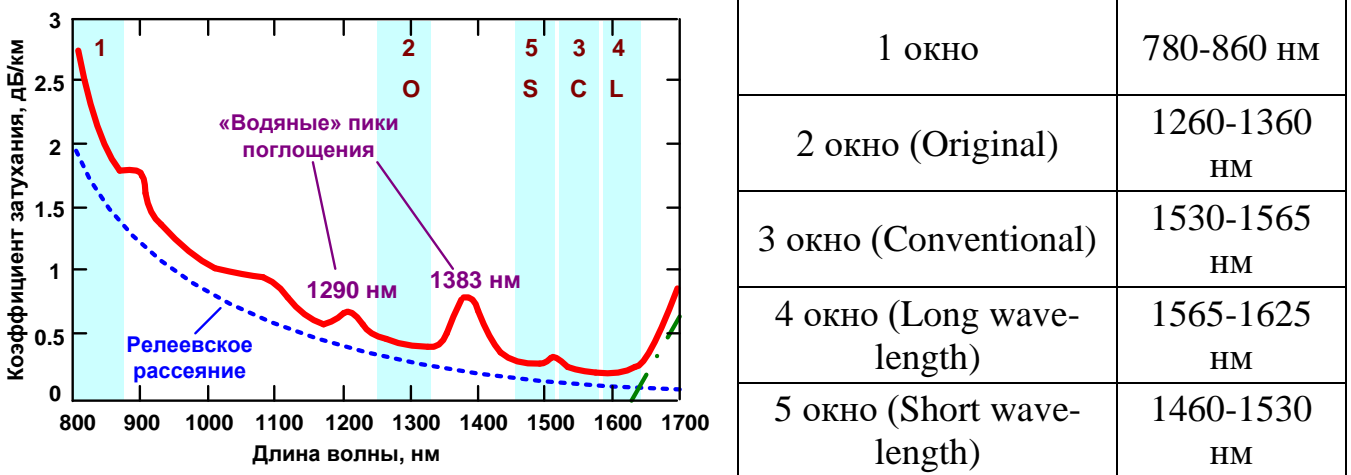


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания от длины волны и положение окон прозрачности в кварцевых ВС.

Общие или вносимые потери в ВС можно разделить на собственные потери, характеризующиеся собственным затуханием, и дополнительные потери. Собственное затухание (рис. 3) обусловлено самим ВС и возрастает с увеличением его длины. Для однородного ВС можно рассчитать коэффициент затухания α - величину собственного затухания на единицу длины:

$$\alpha = \frac{a}{L}, \text{ дБ/км} \quad (7)$$

где L - длина ВС, км.

Зависимость коэффициента затухания в кварцевых ВС от длины волны излучения представлена на рис. 3.

Собственные потери в ВС в основном обусловлены двумя причинами: *рассеянием* и *поглощением*. Соответственно коэффициент затухания можно разделить на две составляющих – коэффициент затухания α_s , обусловленный рассеянием, и коэффициент затухания α_a , обусловленный поглощением:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_a \quad (8)$$

Из рис. 3 видно, что в диапазоне длин волн 800-1700 нм потери асимптотически уменьшаются с ростом длины волны. Это обусловлено релеевским рассеянием света в ВС.

Релеевское рассеяние света происходит на неоднородностях, которые имеются в аморфном кварцевом стекле. Под неоднородностью понимается ло-

кальное изменение показателя преломления вещества, размеры которого сравнимы с длиной волны.

Потери из-за релеевского рассеяния быстро уменьшаются с ростом длины волны:

$$\alpha_s = \chi_s \lambda^{-4}, \quad (9)$$

где χ_s - коэффициент пропорциональности, который для высококачественных кварцевых ВС равен 0.7-0.9 дБ·мкм⁴/км. Этот коэффициент зависит от материала (вида и концентрации легирующих добавок и т.п.) и технологии изготовления ВС.

Другим характерным видом потерь, оказывающим влияние на вид представленной характеристики, является поглощение. Поглощение – это потери энергии распространяющегося света, возникающие в результате взаимодействия его со средой. При поглощении в ВС световая энергия преимущественно преобразуется во внутреннюю энергию вещества (в тепло), то есть расходуется на возбуждение колебаний частиц.

Известно, что частица может обладать не любой энергией, а только энергией, соответствующей разрешенным энергетическим уровням. Энергия квантов распространяющегося света связана с его частотой ν (длиной волны λ):

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{\tilde{\nu}}{\lambda}, \quad (10)$$

где $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 300\,000$ км/с – скорость света в вакууме. Если эта энергия совпадает (или близка) с порцией энергии, необходимой частице для перехода на более высокий энергетический уровень, она будет эффективно поглощаться частицами. В противном случае поглощения на этой длине волны не будет.

Таким образом, существуют определенные – резонансные – длины волн, которые активно поглощаются веществом. Поэтому говорят, что поглощение носит резонансный характер.

ВС содержит различные частицы – кварца, основного материала, полезных (легирующих) примесей и вредных примесей, попадающих в ВС из-за несовершенства технологии производства. У кварца и используемых легирующих примесей всплески поглощения в используемом диапазоне отсутствуют. Кварц дает мощные пики поглощения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, которые немного захватывают используемый диапазон.

К вредным примесям относят ионы переходных металлов (ванадия, железа, меди, кобальта, никеля, марганца), а также гидроксильные группы ОН⁻. При современных технологиях изготовления ВС наибольший вклад в поглощение вносят именно гидроксильные группы. Они дают мощные пики поглощения на длинах волн 1290 и 1.383 мкм. Также они определяют более слабые пики поглощения в области длин волн 1130, 950, 875, 825 и 725 нм.

Этот тип потерь существенно зависит от технологии изготовления ВС и имеет тенденцию к снижению.

Характер зависимости затухания от длины волны для разных типов ВС мало отличаются.

Из рис. 3 видно, что для передачи оптических сигналов может использоваться широкий участок спектра, где потери в ВС достаточно малы. Его принято разбивать на более узкие участки – рабочие диапазоны или *окна прозрачности*.

Первое окно прозрачности используется в основном в локальных вычислительных сетях.

Второе окно прозрачности (*O – Original, основной диапазон*) используется в городских и зонавых линиях, а также в локальных вычислительных сетях.

Третье окно прозрачности (*C – Conventional, стандартный диапазон*) наиболее широко используется в магистральных линиях.

В последнее время в связи с развитием технологии спектрального мультиплексирования (DWDM) повысился интерес к третьему и прилегающим к нему четвертому и пятому окнам прозрачности.

Четвертое окно прозрачности (*L – Long wavelength, длинноволновый диапазон*) позволяет расширить спектральный диапазон DWDM систем в сторону длинных волн до 1620 нм.

Пятое окно прозрачности (*S – Short wavelength, коротковолновый диапазон*) лает расширить спектральный диапазон DWDM систем в сторону коротких волн до 1460 нм.

3.4. Хроматическая дисперсия в одномодовых ВС

В одномодовых ВС отсутствует межмодовая дисперсия. Однако уширение проходящих по одномодовому ВС импульсов все же существует. Это обусловлено, так называемой, *хроматической дисперсией*, которая возникает из-за того, что по ВС распространяются немонахроматические сигналы:

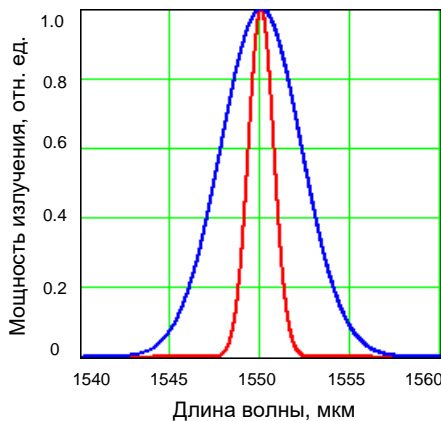


Рис. 4. Спектр излучения источника

1. Спектр цифрового оптического сигнала имеет конечную ширину, зависящую от скорости передачи;

2. Источники излучения имеют определенную ширину спектра излучения (рис. 4).

Поскольку скорость распространения света в ВС зависит от длины волны излучения λ , разные спектральные составляющие сигнала распространяются с разной скоростью.

Хроматическая дисперсия состоит из двух составляющих: материальной и волноводной

$$D_{hr} = D_{mat} + D_w. \quad (11)$$

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления кварца $n(\lambda)$ (как фазового, так и группового) от длины волны λ и пропорциональна второй производной показателя преломления по длине волны:

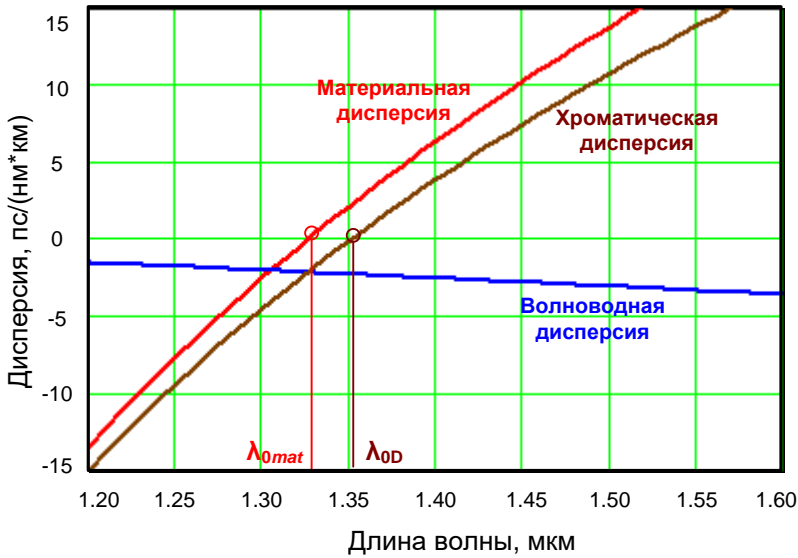


Рис. 5. Хроматическая дисперсия в стандартном ВС

размером одномодового ВС является диаметр поля моды. Конструкцией волновода можно считать профиль показателя преломления. Появление волноводной дисперсии связано с тем, что волна в ВС распространяется в двух средах – частично в сердцевине, частично в оболочке, и показатель преломления для нее принимает среднее значение между показателями преломления сердцевины и оболочки. При изменении длины волны глубина проникновения поля в кварцевую оболочку меняется (рис. 6) и, следовательно, меняется среднее значение показателя преломления.

Известно, что волноводная дисперсия отрицательна и с увеличением λ она уменьшается.

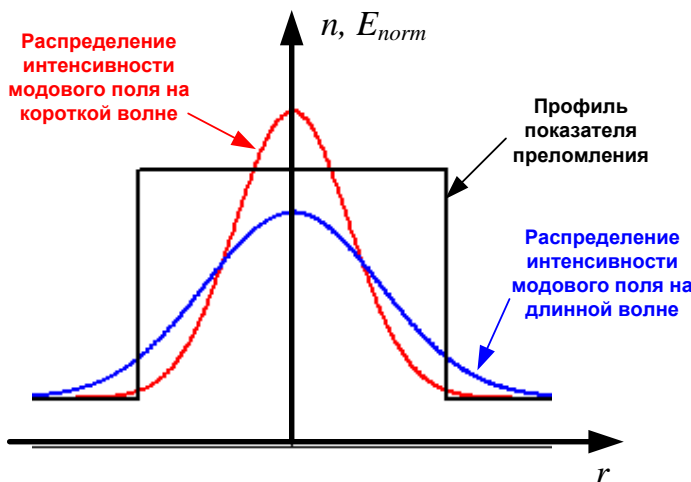


Рис. 6. Возникновение волноводной дисперсии

длины волны нулевой хроматической дисперсии или просто длиной волны нулевой дисперсии λ_{0D} .

$$D_{mat} = -\frac{\lambda}{\tilde{n}} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (12)$$

На рис. 5 показана зависимость материальной дисперсии от длины волны (красная кривая). Видно, что материальная дисперсия имеет знак и при некоторой длине волны $\lambda = \lambda_{0mat}$ материальная дисперсия проходит через 0.

Волноводная дисперсия D_w не связана со свойствами материала, но зависит от конструкции и размеров волновода. Основным

На рис. 5 показана зависимость волноводной дисперсии от длины волны для стандартного ВС (синяя кривая) и результирующей хроматической дисперсии (коричневая кривая). Из рисунка видно, что существует такая длина волны, при которой материальная и волноводная дисперсии равны по модулю и имеют противоположные знаки, то есть хроматическая дисперсия равна нулю. Эту длину волны называют

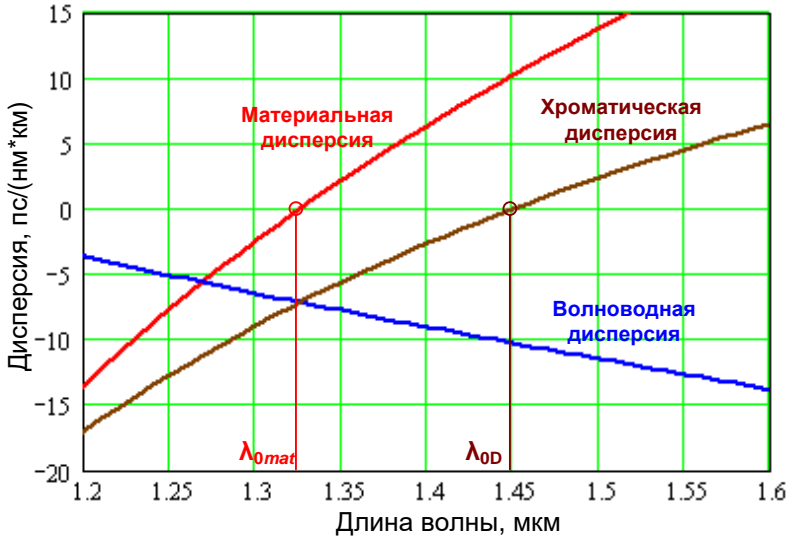


Рис. 7. Смещение длины волны нулевой хроматической дисперсии путем изменения волноводной дисперсии. спектра сигнала 1 нм (с учетом скорости передачи и ширины спектра источника излучения).

Под уширением импульса подразумевается величина:

$$\Delta t = \sqrt{t_2^2 - t_1^2}, \quad (13)$$

где t_1 и t_2 — длительности импульсов на входе и выходе ВС.

Для уширения оптического импульса Δt за счет хроматической дисперсии справедливо следующее соотношение:

$$\Delta t = |D_{hr}| \cdot \Delta\lambda \cdot L, \quad (14)$$

где t_1 и t_2 — длительности импульсов на входе и выходе ВС, $\Delta\lambda$ — полная ширина спектра сигнала, L — длина ВС.

Из (14) можно получить выражение для расчета хроматической дисперсии по результатам экспериментального определения уширения импульса:

$$|D_{hr}| = \frac{\Delta t}{\Delta\lambda \cdot L}. \quad (15)$$

Выше уже отмечалось, что по ВС передаются немонахроматические сигналы. Полную ширину спектра сигнала можно определить по выражению:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\Delta\lambda_{sign}^2 + \Delta\lambda_{sour}^2}, \quad (16)$$

где $\Delta\lambda_{sign}$ — ширина спектра оптического сигнала, обусловленная скоростью передачи, $\Delta\lambda_{sour}$ — ширина спектра излучения источника.

Зависимости уширения оптического импульса в ВС длиной 1 км от ширины спектра сигнала и от хроматической дисперсии показаны на рис. 8.

Обратите внимание, что на рис. 6.7 ширина спектра излучения источника выражена в ГГц. Переведем ее в нм. Под шириной спектра Δf понимают разность верхней и нижней частот в спектре:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda_1 \lambda_2} \approx \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2}, \text{ откуда } \Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot \Delta f}{c}. \quad (17)$$

Зависимость волноводной дисперсии от длины волны сильно зависит от размеров и конструкции ВС. Это позволяет в широких пределах управлять зависимостью результирующей хроматической дисперсии D_{hr} от длины волны, изменяя при этом длину волны нулевой дисперсии λ_{0D} (рис. 7).

Хроматическая дисперсия как физическая величина измеряется в пс / (нм·км) и означает уширение импульса в ВС длиной 1 км при ширине спектра сигнала 1 нм (с учетом скорости передачи и ширины спектра источника излучения).

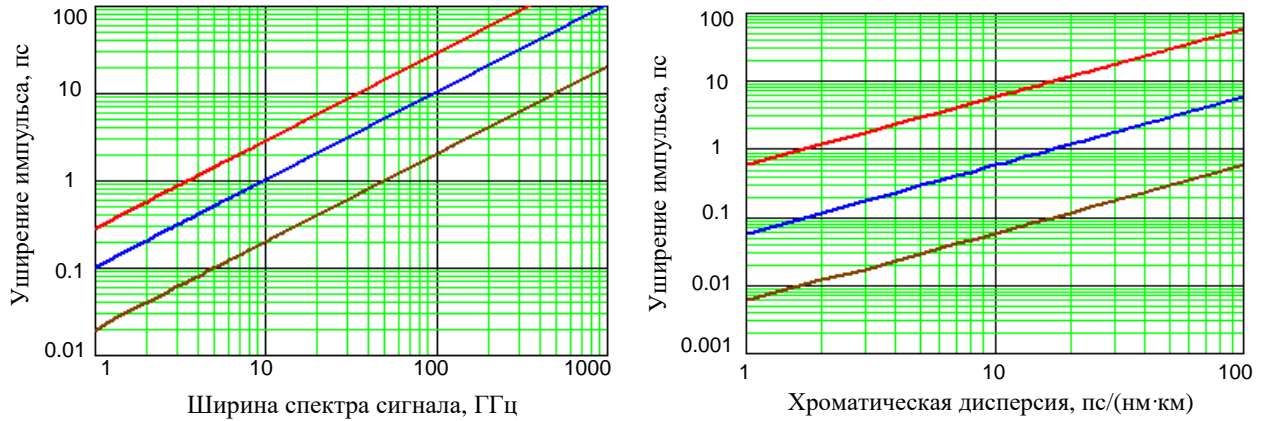


Рис. 8. Зависимость уширения импульса от ширины спектра сигнала (левый рисунок) при хроматической дисперсии 3.5 (кор.), 18 (син.) и 50 (кр.) пс/(нм·км) и от хроматической дисперсии (правый рисунок) при ширине спектра сигнала 1 (кор.), 10 (син.) и 100 (кр.) ГГц.

С учетом (17) и (15) для хроматической дисперсии можно записать:

$$|D_{hr}| = \frac{\Delta t \cdot \tilde{n}}{\Delta f \cdot \lambda^2 \cdot L} \quad (18)$$

3.5. Типы и параметры одномодовых ВС

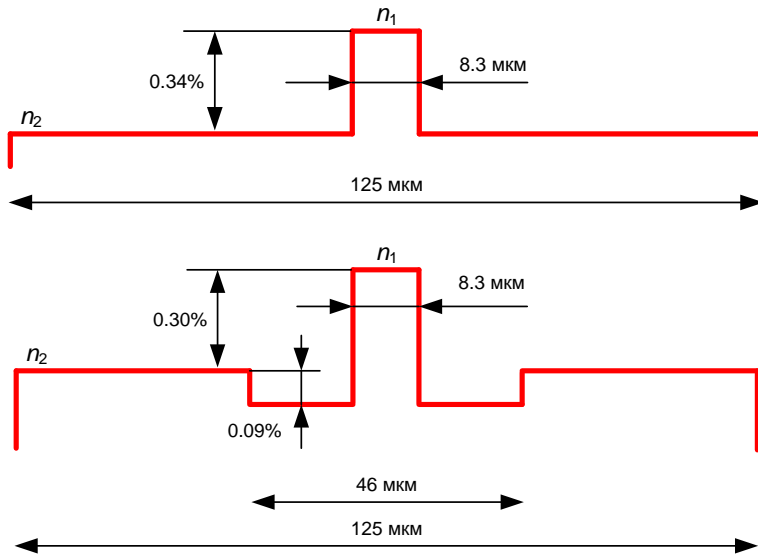


Рис. 9. Профили показателей преломления стандартных одномодовых ВС

Одномодовый ВС со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 9) называют стандартным Standard Fiber (SF). Этот ВС оптимизирован для второго окна прозрачности. Его длина волны нулевой дисперсии составляет $\lambda_{0D} \sim 1.35$ мкм. Стандартные ВС имеют дисперсию на $\lambda = 1310$ нм менее 3.5 пс/(нм·км), а на $\lambda = 1550$ нм их дисперсия возрастает до 18 пс/(нм·км), хотя затухание при этом уменьшается до 0.2 дБ/км и они могут с успехом использоваться на этой длине волны. При этом длина участка регенерации обычно ограничивается дисперсией.

Стандартным ВС посвящена рекомендация МСЭ G.652.

Одномодовый ВС со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 9) называют стандартным Standard Fiber (SF). Этот ВС оптимизирован для второго окна прозрачности. Его длина волны нулевой дисперсии составляет $\lambda_{0D} \sim 1.35$ мкм.

Стандартные ВС имеют дисперсию на $\lambda = 1310$ нм менее 3.5 пс/(нм·км), а на $\lambda = 1550$ нм их дисперсия возрастает до 18 пс/(нм·км), хотя затухание при этом уменьшается до 0.2 дБ/км и они могут с успехом использоваться на этой длине волны.

С целью оптимизации дисперсионных параметров ВС на длине волны 1.55 мкм, на которой кварцевые ВС имеют минимальное затухание, были разработаны градиентные одномодовые ВС. Усложняя профиль показателя преломления (рис. 10) и делая его форму близкой к треугольной, получили ВС, имеющие длину волны нулевой дисперсии вблизи 1550 нм. Такие ВС получили название ВС со смещенной дисперсией (Dispersion Shifted Fiber - DSF). Их параметры регламентируются рекомендацией МСЭ G.653.

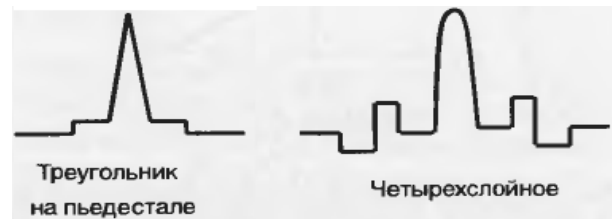
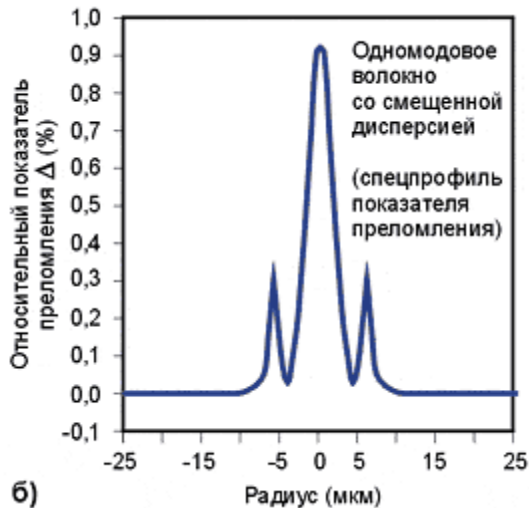


Рис. 10. Профили показателей преломления ВС со смещенной дисперсией

б)

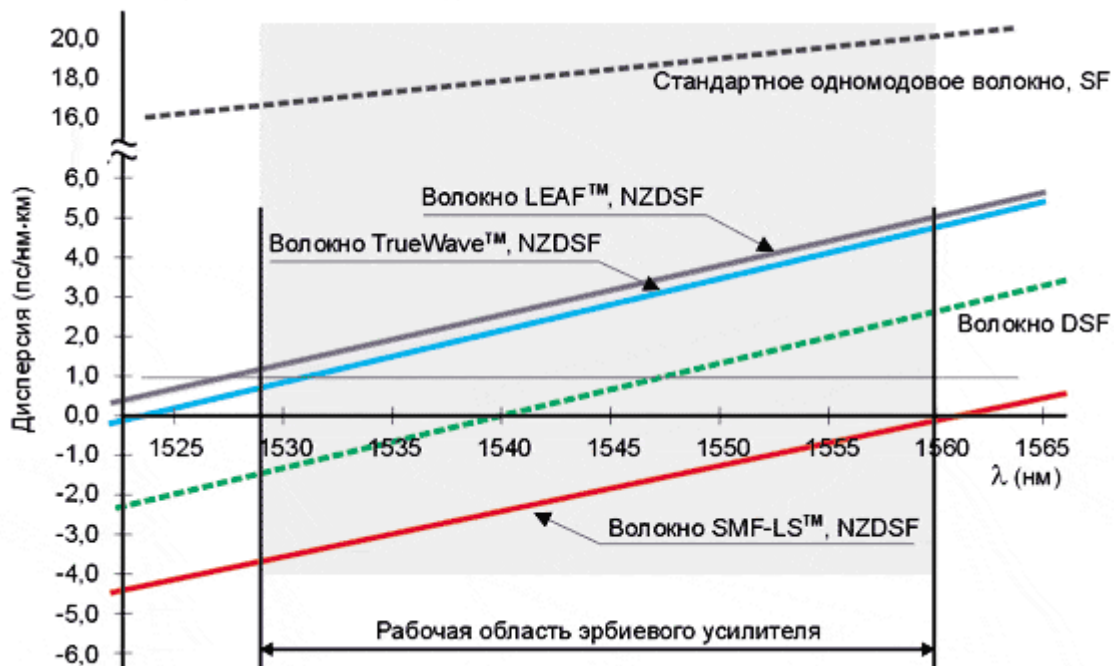


Рис. 11. Зависимость хроматической дисперсии в одномодовых ВС от длины волны

Эти ВС имеют дисперсию на $\lambda = 1550$ нм менее 3.5 пс/(нм км), а на $\lambda = 1310$ нм до 18 пс/(нм км).

Еще один вид одномодовых ВС - ВС с ненулевой смещенной дисперсией (Non Zero Dispersion Shifted Fiber - NZDSF). Эти ВС были разработаны специально для систем спектрального уплотнения.

NZDSF оптимизированы таким образом, что длина волны нулевой дисперсии у них вынесена за пределы полосы пропускания эрбиевого оптического усилителя (рис. 11).

3.6. Некоторые параметры источников и приемников излучения

При выполнении лабораторной работы необходимо помнить, что одномодовый полупроводниковый лазерный источник излучения характеризуется следующими параметрами:

- средняя длина волны излучения
- ширина спектра излучения
- мощность излучения
- паразитная частотная модуляция (чирпинг), обусловленная тем, что реальный импульсный источник излучения изменяет свою частоту (длину волны) из-за тепловых процессов в резонаторе при прохождении тока через р-п переход. В зависимости от того, уменьшается или увеличивается частота, чирпинг может быть как положительным, так и отрицательным.

Фотоприемные устройства для ВОЛС характеризуются чувствительностью, которая в общем случае зависит от длины волны.

Описание моделируемой лабораторной установки

В лабораторной работе моделируется установка, которая включает:

- Одномодовые лазерные источники излучения с перестраиваемыми в широких пределах (1250-1675 нм) длинами волн, с различными шириной спектра и паразитной частотной модуляцией (чирпингом), генерирующие оптические импульсы гауссовской формы.
 - Идеализированное фотоприемное устройство, чувствительность которого не зависит от длины волны.
 - Катушки с одномодовыми ВС различных типов и длин.
 - Осциллограф.

На экране осциллографа можно наблюдать форму оптического импульса на входе в ВС, а также форму оптического импульса на выходе из ВС. Для переключения наблюдаемых импульсов используется клавиша «РАСЧЕТ». Входные и выходные импульсы располагаются в центральной части экрана осциллографа.

Для удобства измерения длительностей входного и выходного импульсов с помощью вертикального курсора уровень половинной амплитуды (мощности) показан горизонтальным синим курсором. Для измерения половины длительности импульса вертикальный курсор совмещается с точкой пересечения горизонтального курсора и фронта импульса. Вертикальный курсор перемещается с помощью движка на горизонтальной линейке под экраном осциллографа.

Для измерения амплитуды импульсов вертикальный курсор совмещают с серединой импульса. Задержка выходного импульса по отношению к входному может быть определена как «НАЧАЛО ОТСЧЕТА» слева от экрана осциллографа.

Отсчеты по курсору располагаются слева от экрана осциллографа. Слева же располагаются переключатели цен деления по горизонтальной и вертикальной осям осциллографа.

С правой стороны от экрана осциллографа располагается переключатель типов ВС, который позволяет выбрать для исследования:

1. стандартный ВС (SF),
2. ВС со смещенной дисперсией (DSF),
3. ВС с ненулевой положительной смещенной дисперсией (+NZDSF),
4. ВС с ненулевой отрицательной смещенной дисперсией (-NZDSF),
5. стандартный ВС (SF) без водяного пика затухания.

Под переключателем типа ВС располагается регулятор, позволяющий изменять длину исследуемого ВС.

Остальные регуляторы и переключатели относятся к источнику излучения. В лабораторной установке можно плавно изменять длину волны источника в пределах 1250-1675 нм, длительность импульса от 1 пс до 10 нс, переключать ширину спектра излучения от 0.01 ГГц до 100 ГГц. Реальные источники излучения могут иметь паразитную частотную модуляцию, которую также можно задавать с помощью переключателя.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя номер варианта. По табл. 1 определить типы двух исследуемых ВС, их длины, а также длительности входных импульсов.

Таблица 1

Ва р.	Волоконный световод 1 (BC1)				Волоконный световод 2 (BC2)		
	Тип	Дли- на L_1 , км	Дли- тель- ность входно- го им- пульса t_{01} , пс	Дли- тель- ность входно- го им- пульса t_{02} , пс	Тип	Дли на L_2 , км	Дли- тель- ность входно- го им- пульса t_{03} , пс
1	SFобычное	25	10	2000	DSF	25	10
2	SFобычное	50	15	4000	SF без ОН	50	15
3	SFобычное	75	20	6000	+NZDSF	75	20
4	SFобычное	100	25	8000	-NZDSF	100	25
5	SF без ОН	30	25	1000	DSF	30	25
6	SF без ОН	60	20	1500	+NZDSF	60	20
7	SF без ОН	90	35	2000	-NZDSF	90	35
8	SF без ОН	120	30	2500	SFобыч- ное	120	30

2. С помощью переключателя типа ВС выберите тип BC1. Выберите ширину спектра излучения источника $\Delta f = 10$ ГГц. Для заданных длительностей вход-

ных оптических импульсов t_{01} и t_{02} . Проведите измерения амплитуды P_1 и ширины t_1 входного оптического импульса. Результаты измерений занесите табл. 2. Повторите измерения для ВС2 и t_{03} .

Таблица 2

Исследуемый ВС	Волоконный световод 1		Волоконный световод 2
	Заданная длительность входного импульса, пс	$t_{01} =$	$t_{02} =$
Измеренная длительность входного импульса t_1 , пс			

3. С помощью переключателя типа ВС выберите тип ВС1. Установите длительность входного оптического импульса t_{01} . Выберите ширину спектра излучения источника $\Delta f = 10$ ГГц. Проведите измерения амплитуды P_2 и ширины t_2 выходных импульсов при различных длинах волн λ источника излучения (от 1250 до 1675 нм не менее 20 точек). Результаты поместите в табл. 3.

Повторите измерения, установив длительность входного оптического импульса t_{02} . Результаты поместите в табл. 3.

Повторите измерения, выбрав тип ВС2 и установив длительность входного оптического импульса t_{03} . Результаты поместите в табл. 3.

Таблица 3

Тип ВС	Длина ВС, км										Длительность входного импульса, пс									
	Длина волны λ , нм																			
Мощность P_2 , мкВт																				
Длительность импульса t_2 , пс																				
Затухание a , дБ																				
Уширение импульса Δt , пс																				
Коэффициент затухания α , дБ/км																				
Хроматическая дисперсия D_{hr} , пс/(нм км)																				

4. По данным табл. 2 и 3 провести расчеты:

- затухания a по выражению (6)
- коэффициента затухания α по выражению (7)

- уширения оптического импульса Δt по выражению (13)
- и хроматической дисперсии D_{hr} по выражению (18), считая, что полная ширина спектра сигнала равна ширине спектра источника излучения.

5. Построить графики зависимости коэффициента затухания α и хроматической дисперсии D_{hr} от длины волны λ для заданных длительностей входных импульсов и типов ВС. Дать объяснения полученным результатам.

6. Для ОВ2 на двух длинах волн 1310 и 1550 нм провести измерения зависимости амплитуды P_2 и длительности t_2 выходных импульсов от ширины спектра излучения Δf источника для входного импульса длительностью t_{03} . Результаты измерений поместить в табл. 4.

Таблица 4

Тип ВС	Длина ВС, км					Длительность входного импульса, пс				
Длина волны, нм	1310					1550				
Ширина спектра, ГГц	0.01	0.1	1.0	10.0	100	0.01	0.1	1.0	10.0	100
Мощность, мкВт										
Длительность импульса, пс										
Затухание, дБ										
Уширение импульса, пс										
Коэффициент затухания, дБ/км										
Хроматическая дисперсия, пс/нм км										

7. По данным табл. 4 построить графики зависимостей коэффициента затухания α и хроматической дисперсии D_{hr} от ширины спектра источника излучения. Дать объяснения полученным результатам.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Таблица 2 с результатами измерений.
2. Три таблицы 3 с результатами измерений и расчетов.
3. Графики по п. 5 методических указаний
4. Таблица 4 с результатами измерений и расчетов.
5. Графики по п. 7 методических указаний.
6. Выводы.

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«Прохождение оптических импульсов
по одномодовым волоконным световодам»

Вариант № _____

1. Измерение длительностей входных оптических импульсов

Исследуемый ВС	Волоконный световод 1		Волоконный световод 2
Заданная длительность входного импульса, пс	$t_{01} =$	$t_{02} =$	$t_{03} =$
Измеренная длительность входного импульса t_1 , пс			

2. Исследование зависимостей коэффициента затухания и хроматической дисперсии от длины волны

Тип ВС1	Длина ВС1, км					Длительность входного импульса t_{01} , пс				
Длина волны λ , нм										
Мощность P_2 , мкВт										
Длительность импульса t_2 , пс										
Длина волны λ , нм										
Мощность P_2 , мкВт										
Длительность импульса t_2 , пс										

Тип ВС1	Длина ВС1, км					Длительность входного импульса t_{02} , пс				
Длина волны λ , нм										
Мощность P_2 , мкВт										
Длительность импульса t_2 , пс										
Длина волны λ , нм										
Мощность P_2 , мкВт										
Длительность импульса t_2 , пс										

Тип ВС2	Длина ВС2, км					Длительность входного импульса t_{03} , пс				
Длина волны λ , нм										
Мощность P_2 , мкВт										
Длительность импульса t_2 , пс										
Длина волны λ , нм										
Мощность P_2 , мкВт										
Длительность импульса t_2 , пс										

3. Исследование зависимостей коэффициента затухания и хроматической дисперсии от ширины спектра источника излучения

Тип ВС2	Длина ВС2, км					Длительность входного импульса t_{03} , пс				
Длина волны, нм	1310					1550				
Ширина спектра, ГГц	0.01	0.1	1.0	10.0	100	0.01	0.1	1.0	10.0	100
Мощность, мкВт										
Длительность импульса, пс										

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
«Исследование прохождения световых импульсов
по многомодовым волоконным световодам»

Цель работы:

Изучение процессов распространения оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам (ВС) с усеченным степенным профилем, методов измерения параметров ВС - затухания и дисперсии, источников погрешностей, включая инструментальные и методические погрешности, способов их компенсации.

Подготовка к работе:

При подготовке к работе должны быть изучены следующие разделы:

- Волоконные световоды и принцип их действия
- Лучевая теория передачи по световодам
- Волновая теория передачи по световодам
- Затухание световодов
- Дисперсия и пропускная способность световодов

4.1. Прохождение оптических импульсов
по многомодовым волоконным световодам

В лабораторной работе используются многомодовые волоконные световоды с усеченным степенным профилем, т. е. профилем, изменения которого описываются следующими выражениями:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2(r) = n_{10}^2 \left[1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^q \right] & \text{при } 0 < r < a \\ n_2^2 = n_{10}^2 (1 - 2 \cdot \Delta) & \text{при } r > a \end{cases} \quad (1.1)$$

где r - расстояние от оси ВС, мкм; a - радиус сердцевины ВС, мкм; n_{10} , n_2 - показатели преломления на оси ВС (при $r = 0$) и в оболочке (при $r > a$), соответственно; q - показатель степенного профиля, который обычно близок к величине 2; Δ - относительная разность показателей преломления ВС, которую можно рассчитать по выражению:

$$\Delta = \frac{n_{10}^2 - n_2^2}{2n_{10}^2} \quad (1.2)$$

В кабелях связи обычно используют так называемые слабо направляющие ВС, для которых $\Delta \ll 1$.

В лабораторной работе в качестве оболочки ВС используется чистый кварц SiO_2 . Требуемая величина n_1 достигается легированием материала сердечника. В качестве легирующих добавок используется GeO_2 .

Процессы распространения оптических импульсов по многомодовым ВС рассмотрим на основе геометрической оптики, в которой основным является понятие светового луча. В многомодовых ВС могут распространяться два типа лучей:

меридиональные, которые распространяются в плоскостях, проходящих через ось ВС z ;

косые, которые не лежат в этих плоскостях.

В общем случае лучи в градиентных многомодовых ВС распространяются по спиралевидным траекториям. Различные типы лучей (мод) можно характеризовать *лучевыми инвариантами* B и E , которые представляют собой постоянные для данного луча скалярные величины, однозначно определяющие его направление в любой точке траектории.

Лучевые инварианты определяются следующим образом:

$$B = n(r) \cdot \cos \theta_z(r) \quad (1.3)$$

$$E = n(r) \cdot \sin \theta_z(r) \cdot \cos \theta_f(r) \quad (1.4)$$

В этих формулах: $\theta_z(r)$ - угол наклона луча по отношению к оси z ВС; $\theta_f(r)$ - угол между направлением проекции траектории луча и азимутальным направлением. Для меридиональных лучей $\theta_f(r) = \pi / 2$ и $E = 0$.

Эффективность ввода излучения в ВС принято характеризовать *числовой апертурой* $NA = n_0 \sin \theta_0$, которая определяет максимальный угол θ_0 между осью z и направляемым лучом, падающим на торец ВС из среды с показателем преломления n_0 . У градиентных многомодовых ВС числовая апертура зависит от r . Ее называют *локальной числовой апертурой*:

$$NA(r) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}, \text{ при } 0 < r < a. \quad (1.5)$$

В соответствии с волновой оптикой в ВС может распространяться на большое расстояние только определенное конечное количество типов направляемых волн (мод). Для направляемых лучей величина инварианта B должна удовлетворять следующему условию:

$$n_2(\lambda) < B < n_{10}(\lambda). \quad (1.6)$$

Важным параметром ВС является нормированная частота:

$$V = 2\pi \cdot \frac{a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_{10}^2 - n_2^2} \quad (1.7)$$

где λ - длина волны используемого источника излучения в вакууме. Нормированная частота определяет общее количество направляемых мод (лучей) в градиентном многомодовом ВС:

$$M = INT \left(\frac{V^2}{2} \frac{q}{q+2} \right), \quad (1.8)$$

где $INT(x)$ - означает целую часть x .

Различные лучи (моды) распространяются вдоль оси z многомодового ВС с различными скоростями, что приводит к межмодовой дисперсии Δt_m , т. е. к уширению оптических импульсов при прохождении многомодового ВС единичной длины. Известно, что удельное время t распространения луча на единичное расстояние в ВС с усеченным степенным профилем зависит только от лучевого инварианта B и от параметра p внеосевой дисперсии материала сердцевины ВС:

$$t(B) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[(p+q) \frac{n_{10}}{B} + (2-p) \frac{B}{n_{10}} \right], \quad (1.9)$$

где $c = 3 \cdot 10^5$ км/с - скорость света в вакууме, p - параметр внеосевой дисперсии материала сердцевины ВС, который можно рассчитать по выражению:

$$p(\lambda) = \frac{n_{10}(\lambda)}{n_{10g}(\lambda)} \cdot \frac{\lambda}{\Delta(\lambda)} \cdot \frac{d\Delta(\lambda)}{d\lambda}, \quad (1.10)$$

n_{10g} - групповой показатель преломления на оси ВС:

$$n_{10g}(\lambda) = n_{10}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{10}(\lambda)}{d\lambda}. \quad (1.11)$$

Обратите внимание, что длина волны λ в (1.10) и (1.11) подставляется в мкм.

С параметром n_{10g} связано понятие групповой скорости:

$$V_g = c/n_{10g} \quad (1.12)$$

Минимальное удельное время распространения на единичное расстояние равно:

$$t(B_m) = \frac{1}{c} \cdot \frac{2n_{10g}}{q+2} \sqrt{(p+q)(2-p)} \quad (1.13)$$

для луча с инвариантом:

$$B_m = n_{10} \sqrt{\frac{q+p}{2-p}}. \quad (1.14)$$

Если рассчитанное значение B_m не удовлетворяет условию направляемых лучей (1.6), то и расчет минимального удельного времени распространения не имеет смысла. В зависимости от величин q и p максимальное удельное время распространения будет для лучей с инвариантами $B = n_{10}$ или n_2 .

В качестве оценки межмодовой дисперсии Δt_m принимается разность максимального и минимального удельных времен распространения из трех значений $t(n_{10})$, $t(n_2)$ и $t(B_m)$:

$$\Delta t_m = t_{\max} - t_{\min}. \quad (1.15)$$

Величина $t(B_m)$ учитывается, только если B_m лежит в диапазоне направляемых лучей.

Полученное значение Δt_m необходимо сравнить с величиной межмодовой дисперсии $\Delta t_{m \text{ опт}}$ для градиентного ВС с оптимальным показателем $q_{\text{опт}}$ степенного профиля

$$q_{\text{опт}} = 2 \cdot (1-p) - \Delta \cdot (2-p), \quad (1.16)$$

$$\Delta t_{m \text{ опт}} = \frac{n_{10g}}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{8}. \quad (1.17)$$

Хроматической дисперсией в градиентных многомодовых ВС можно пренебречь по сравнению с межмодовой дисперсией.

Коэффициент затухания α ВС складывается из собственного затухания α_c и дополнительного α_d , возникающего в процессе производства оптического волокна, при изготовлении оптического кабеля из оптического волокна, а также при

прокладке кабеля и монтаже регенерационных участков волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

Собственные потери α_c включают остаточные потери за счет резонансного поглощения кварца в инфракрасной $\alpha_{ик}$ и ультрафиолетовой $\alpha_{уф}$ областях спектра, потери на релеевское рассеяние $\alpha_{рр}$, а также потери за счет резонансного поглощения $\alpha_{рп}$ в различных примесях (OH^- , Fe^{2+} , Cu^{2+} , C_2^{3+}).

Потери на резонансное поглощение трудно поддаются расчету и могут быть приняты равными:

$$\begin{aligned} \alpha_{рп} &= 0.1 \text{ дБ/км} \quad \text{для } \lambda = 0.85 \text{ мкм;} \\ \alpha_{рп} &= 0.05 \text{ дБ/км} \quad \text{для } \lambda \square = 1.3 \text{ мкм.} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Для расчета $\alpha_{ик}$, $\alpha_{уф}$ и $\alpha_{рр}$ в кварцевых ВС на заданной длине волны λ можно использовать следующие выражения, дБ /км:

$$\alpha_{ик} = 7.81 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{48.5}{\lambda}\right), \quad (1.19)$$

$$\alpha_{уф} = 2.55 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{4.63}{\lambda}\right), \quad (1.20)$$

$$\alpha_{рр} = \frac{0.8}{\lambda^4}. \quad (1.21)$$

В выражениях (1.19-1.21) коэффициенты затухания получатся в дБ/км, если длина волны выражена в мкм.

Дополнительные потери α_d складываются из потерь на микроизгибы и макроизгибы, потерь в оболочке, потерь из-за термомеханических напряжений. Их точный учет затруднен, поэтому можно ориентировочно принять $\alpha_d = 0.1 - 0.3$ дБ/км.

Общий (суммарный) коэффициент затухания:

$$\alpha = \alpha_{ик} + \alpha_{уф} + \alpha_{рр} + \alpha_{рп} + \alpha_d. \quad (1.22)$$

Структурная схема лабораторной установки по исследованию процессов прохождения оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам (рис. 1.1а) включает:

- генератор импульсов (ГИ);
- источник излучения - полупроводниковый лазер (ИИ);
- два направленных ответвителя (НО1 и НО2);
- устройство временной задержки электрического импульса (УЗ);
- фотоприемное устройство (ФПУ);
- стробоскопический осциллограф (СО);
- три коротких оптических поводка (ОП1, ОП2, ОП3);
- исследуемый волоконный световод (ВС).

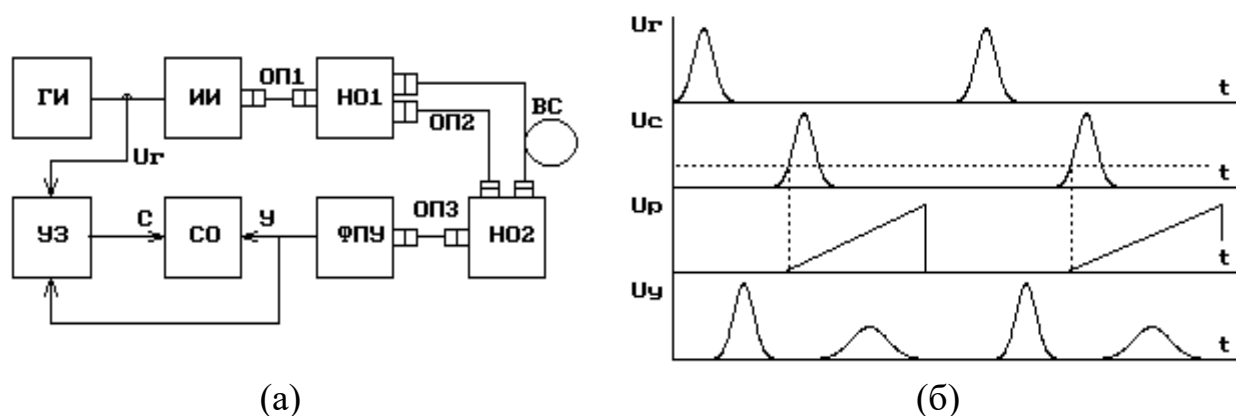


Рис. 1.1. Структурная схема лабораторной установки (а) и временные диаграммы ее работы (б)

Работа лабораторной установки иллюстрируется временными диаграммами (рис. 1.1б), которые показывают импульсы $U_{Г}$ на выходе ГИ, импульсы $U_{с}$, задержанные на время t_3 в УЗ, пилообразное напряжение развертки $U_{р}$ и напряжение $U_{у}$ с выхода ФПУ. Импульсы $U_{Г}$ поступают на ИИ, где преобразуются в оптические импульсы мощностью P , которые в НО1 разделяются по мощности на два примерно одинаковых импульса. Один из них, мощностью P_1 , проходит через ОП1, ОП2, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{31} и поступает на ФПУ. Второй, мощностью P_2 , проходит через ОП1, ВС, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{32} и ослабленный за счет затухания в ВС также поступает на ФПУ. ФПУ преобразует оптические импульсы в электрические, которые можно наблюдать на экране СО, если электрический импульс совпадает по времени с пилообразным напряжением развертки.

Момент запуска развертки определяется установленной в УЗ задержкой, которую можно изменять вручную или автоматически. В автоматическом режиме поиска выходного импульса задержка возрастает от 0 до максимального значения. Процесс останавливается при превышении сигналом определенного уровня (в данной лабораторной установке он выбран равным 2 мВ).

Лабораторная установка позволяет определять времена задержки t_{31} и t_{32} , амплитуды U_{m1} и U_{m2} и длительности t_1 и t_2 входного и выходного импульсов. По измеренным величинам можно рассчитать: длину ВС L , вносимое затухание $a_{вс}$ и средний коэффициент затухания α , дисперсионное уширение выходного импульса.

Анализ оптической схемы

В лабораторной работе предполагается проведение измерений для трех вариантов включения исследуемого ВС и оптических поводков в схему лабораторной установки (рис. 1.2). Это позволяет исключить погрешности, обусловленные временными задержками и затуханиями в оптических элементах лабораторной установки.

Полагаем, что для изготовления поводков и направленных ответвителей использовались идентичные ВС.

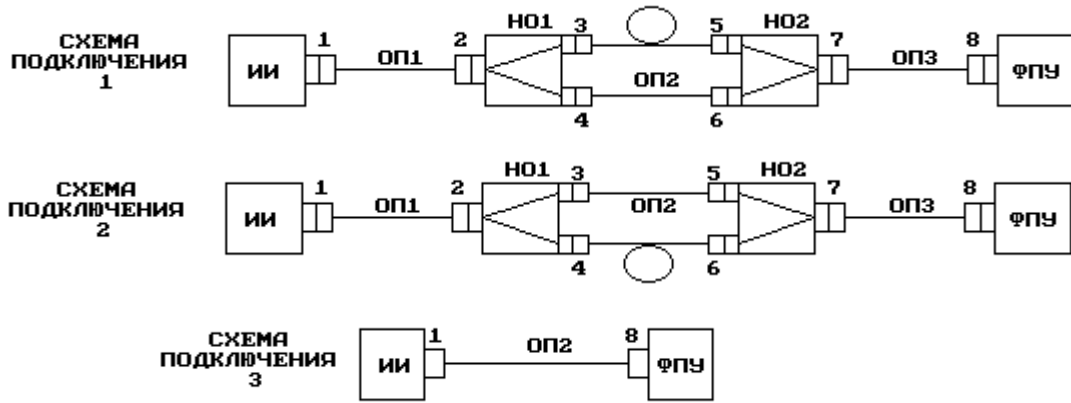


Рис. 1.2. Оптические схемы

Схема подключения 1.

Для времени задержки входного импульса t_{31} в схеме подключения 1 справедливо:

$$t_{311} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}}, \quad (1.23)$$

где L_1, L_2, L_3 - длины соответствующих поводков, км; L_{24}, L_{67} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км; V_{g1} - скорость распространения света в поводках и направленных ответвителях, км/с.

Для затухания входного импульса справедливо:

$$a_{11} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24} \quad (1.24)$$

где α_1 - коэффициент затухания для ВС, используемых в поводках ОП1, ОП2, ОП3 и направленных ответвителях НО1 и НО2, дБ/км; a_{pi} - потери в i -том разьеме, дБ; a_{24} - потери разделения в НО1, дБ.

Для времени задержки выходного импульса t_{32} в данной оптической схеме справедливо:

$$t_{321} = \frac{L_1 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}, \quad (1.25)$$

где L - длина исследуемого ВС, км; V_g - групповая скорость, км/с.

Для затухания выходного импульса справедливо:

$$a_{21} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23} + \alpha L, \quad (1.26)$$

где L_{23}, L_{57} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км; α - коэффициент затухания исследуемого ВС, дБ/км; a_{23} - потери разделения в НО1, дБ.

Схема подключения 2.

Для времени задержки входного импульса можно записать:

$$t_{312} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}}, \quad (1.27)$$

Затухание входного импульса в системе определяется формулой:

$$a_{21} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23} \quad (1.28)$$

Время задержки выходного импульса в данной схеме можно определить по формуле:

$$t_{322} = \frac{L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}, \quad (1.29)$$

Для затухания выходного импульса справедливо:

$$a_{22} = \alpha_1(L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24} + \alpha L. \quad (1.30)$$

Схема подключения 3.

Для времени задержки импульса в третьей схеме справедливо

$$t_{313} = \frac{L_2}{V_{g1}}. \quad (1.31)$$

Затухание импульса можно определить по формуле:

$$a_3 = \alpha_1 L_2 + a_{p1} + a_{p8}. \quad (1.32)$$

Определение параметров ВС

1. Определение длины ВС

Рассмотрим следующую разность: $t_{321} - t_{312} = \frac{L}{V_g} - \frac{L_2}{V_{g1}} = \frac{L}{V_g} - t_{313}$.

Отсюда путем очевидных преобразований получаем:

$$L = (t_{321} - t_{312} + t_{313}) \cdot V_g. \quad (1.33)$$

2. Определение затухания ВС

В лабораторной работе вы измеряете амплитуды входного и выходного импульсов, т. е. в первой схеме величины:

$$U_{m11} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{11}/10} \quad U_{m21} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{21}/10} \quad (1.34)$$

а во второй:

$$U_{m12} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{12}/10} \quad U_{m22} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{22}/10} \quad (1.35)$$

где U_{m0} - амплитуда импульса, формируемого на выходе источника излучения.

По измеренным значениям U_{m11} , U_{m21} , U_{m12} , U_{m22} можно рассчитать затухания в первой и второй схемах a_1 и a_2 :

$$a_1 = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_{m11}}{U_{m21}} \right) \quad a_2 = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_{m12}}{U_{m22}} \right). \quad (1.36)$$

С другой стороны из (1.24), (1.26), (1.28), (1.30) можно получить:

$$a_1 = a_{21} - a_{11} = (a_{p3} - a_{p4}) + (a_{p5} - a_{p6}) + \alpha_1(L_{23} - L_{24}) + \alpha_1(L_{57} - L_{67}) + (a_{23} - a_{24}) + (a_{57} - a_{67}) + \alpha L \quad (1.37)$$

$$a_2 = a_{22} - a_{12} = -(a_{p3} - a_{p4}) - (a_{p5} - a_{p6}) - \alpha_1(L_{23} - L_{24}) - \alpha_1(L_{57} - L_{67}) - (a_{23} - a_{24}) - (a_{57} - a_{67}) + \alpha L \quad (1.38)$$

Складывая полученные таким образом величины, получаем:

$$a_1 + a_2 = 2\alpha L = 2a_{BC}. \quad (1.39)$$

Из (1.35) следует, что затухание исследуемого ВС можно рассчитать по выражению:

$$a_{BC} = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (1.40)$$

ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Данная лабораторная работа является виртуальной.

После загрузки программы на экране появляется текст методических указаний.

Основное управление осуществляется функциональными клавишами:

- F1 – переход к разделу «Теоретические сведения»
- F2 – получение информации о параметрах исследуемого ВС
- F3 – переход к описанию моделируемой лабораторной установки
- F4 – переход к проведению измерений
- F8 – вызов калькулятора

На рис. 1.3 представлен экран с параметрами исследуемого ВС. Некоторые обозначения на экране отличаются от обозначений в данных методических указаниях, соответствие между ними установлено в табл. 1.1.

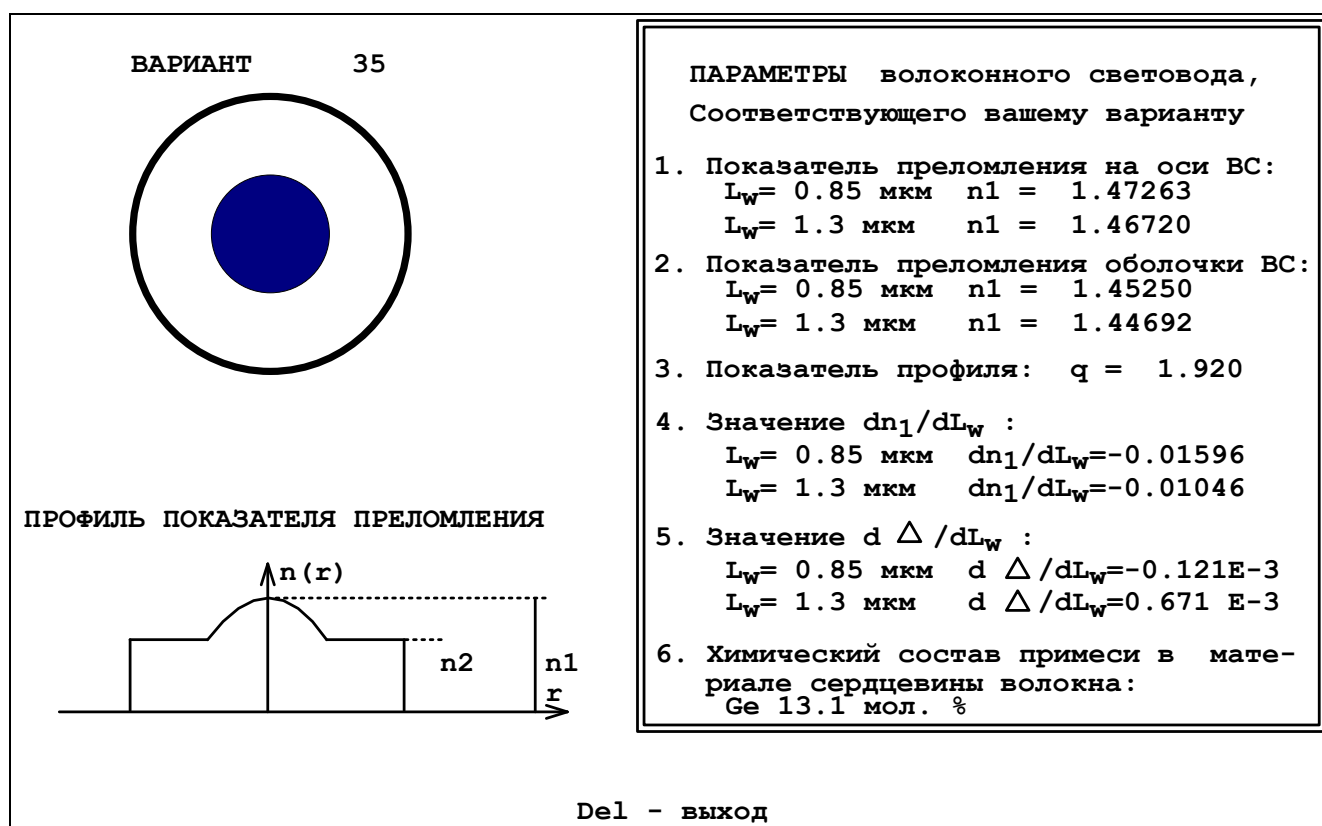


Рис. 1.3. Экран с параметрами исследуемого ВС.

На рис. 1.4 показан основной экран программы – экран стробоскопического осциллографа, на котором проводятся все измерения.

Управление моментом запуска развертки осциллографа осуществляется курсорными клавишами \rightarrow и \leftarrow и клавишей Enter. Однократное нажатие одной из курсорных клавиш вызывает уменьшение (\rightarrow) или увеличение (\leftarrow) времени задержки. Изменение времени задержки происходит с постепенно возрастающей скоростью. При этом изображение на экране осциллографа смещается влево или вправо. Остановить изображение в нужный момент можно, нажав клавишу Enter. Текущее значение времени задержки в мкс отображается в окошке под экраном осциллографа.

Таблица 1.1

Наименование величины	Обозначение на экране	Обозначение в методических указаниях
Длина волны	L_w	λ
Показатель преломления сердцевины ВС на оси	n_1	n_{10}
Значение производной показателя преломления сердцевины ВС по длине волны на оси	dn_1 / dL_w	$dn_{10} / d\lambda$
Значение производной относительной разности показателей преломления сердцевины и оболочки ВС по длине волны на оси	$d\Delta / dL_w$	$d\Delta / d\lambda$

Изображение на экране осциллографа можно также смещать вдоль вертикальной оси однократным нажатием курсорной клавиши \uparrow или \downarrow . При этом изображение начнет перемещаться вверх или вниз с равномерной скоростью. Остановить изображение в нужный момент можно, нажав клавишу Enter.

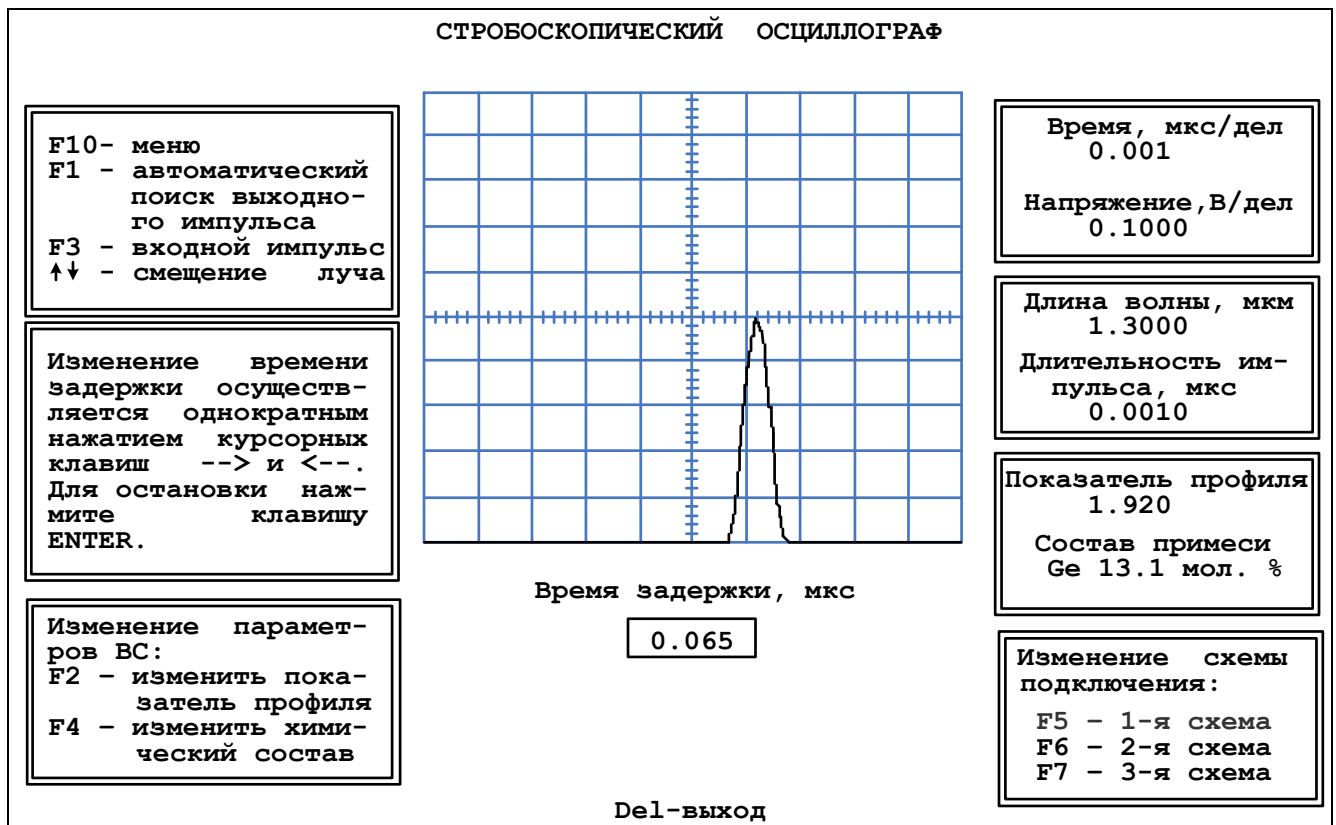


Рис. 1.4. Экран стробоскопического осциллографа.

Масштабировать изображение на экране осциллографа можно, изменяя цены деления его горизонтальной (время) и вертикальной (напряжение) шкал. Для этого необходимо воспользоваться режимом «Меню» (пункт меню *Изменение па-*

параметров осциллографа), вызвать который можно нажатием клавиши F10 (рис. 1.5).

В режиме «Меню» также можно изменять параметры генератора импульсов и источника излучения (пункт меню *Изменение параметров генератора импульсов*) – длительность импульса и длину волны.

Установленные параметры осциллографа, генератора импульсов и источника излучения отображаются справа от экрана осциллографа.

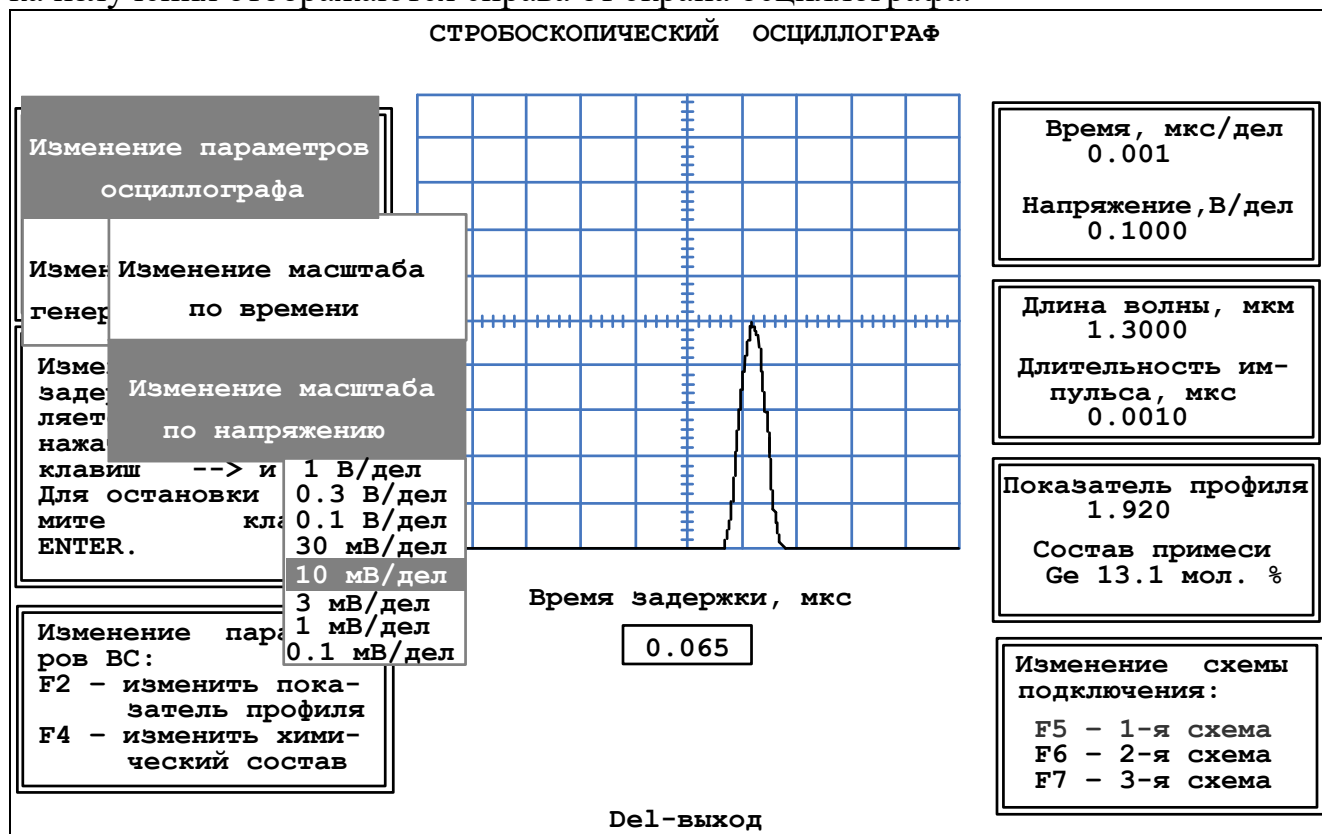


Рис. 1.5. Режим «Меню».

Переключение оптических схем для проведения измерений осуществляется нажатием функциональных клавиш: 1-я схема – F5, 2-я схема – F6, 3-я схема – F7. Выбранная в данный момент схема выделяется цветом в окошке *Изменение схемы подключения* внизу экрана справа.

В работе можно также изменять параметры исследуемого ВС – показатель степенного профиля и степень легирования сердцевины. Для изменения показателя степенного профиля нужно нажать клавишу F2. При этом на экране появится окошко с текущим значением показателя. Вам нужно набрать цифрами без точки новое значение показателя.

Для изменения степени легирования сердцевины нужно нажать клавишу F4 и в появившемся меню клавишами \uparrow и \downarrow выбрать нужное значение.

Установленные показатель степенного профиля и химический состав легирующей примеси отображаются справа от экрана осциллографа.

ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

1. Изучите материал раздела «Теоретические сведения».
2. В отчете должен быть указан номер вашего варианта и параметры исследуемого ВС, соответствующего этому номеру. Для получения сведений о параметрах, необходимых для проведения требуемых в работе расчетов, нажмите клавишу F2.
3. По заданным параметрам ВС рассчитайте:

- групповой показатель преломления на оси волокна n_{10g} по выражению (1.11),
- групповую скорость V_g по выражению (1.12),
- коэффициент затухания α по выражению (1.22).
- нормированную частоту V по выражению (1.7), считая радиус сердцевины волокна равным 25 мкм,
- число направляемых мод M по выражению (1.8),
- уширение импульса (дисперсию) Δt_m на 1 км по выражению (1.15),

Обратите внимание, что рассчитывать параметры необходимо с достаточной точностью, в случае необходимости проводя округление только окончательного результата. Особенно это касается расчетов n_{10g} и всех этапов расчета Δt_m . В связи с этим рекомендуется использовать для расчетов одну из специализированных математических программ – MathCAD, Math Lab и т.п. Результаты расчетов занесите в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Результаты теоретических расчетов

Исходные данные						Результаты расчета					
λ , мкм	n_{10}	n_2	$dn_{10} / d\lambda$	$d\Delta / d\lambda$	q	n_{10g}	V_g , км/с	α , дБ/км	V	M	Δt_m , нс/км
0.85											
1.30											

4. Изучите структурную схему и работу лабораторной установки, а также анализ 3-х возможных схем ее включения, в которых будут проводиться измерения. Обратите особое внимание на предлагаемый способ уменьшения погрешности результатов измерений. Для получения этой информации нажмите клавишу F3.

5. Для входного и выходного импульсов измерьте по экрану осциллографа
 - время задержки, для чего установите вершину импульса на середину горизонтальной оси экрана осциллографа;
 - амплитуду импульса по вертикальной шкале осциллографа;
 - длительность импульса.

Измерения проведите для двух источников излучения, работающих на длинах волн 1.3 и 0.85 мкм, и двух различных значений длительности входного импульса, задаваемых преподавателем. Результаты измерений занесите в таблицу 1.3. Для перехода к странице «Экран осциллографа» нажмите клавишу F4.

6. Рассчитайте по данным измерений для двух значений длины волны источника излучения:

- затухание в первой и второй оптических схемах по выражениям (1.36);
- затухание исследуемого ВС по выражению (1.40);
- уширение импульса в исследуемом ВС $\Delta t = t_2 - t_1$;
- длину исследуемого ВС L по выражению (1.33);
- межмодовую дисперсию исследуемого ВС $\Delta t_M = (\Delta t_1 + \Delta t_2)/2L$, где $\Delta t_1, \Delta t_2$ – уширения импульса в 1 и 2 схемах;
- коэффициент затухания исследуемого ВС: $\alpha_{BC} = a_{BC}/L$.

Результаты расчетов занесите в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений и расчетов

λ , мкм	Номер схемы	U_{m1} , В	U_{m2} , В	a , дБ	a_{BC} , дБ	t_{31} , мкс	t_{32} , мкс	t_1 , нс	t_2 , нс	Δt , нс	L , км	Δt_M , нс/км	α_{BC} , дБ/км
0.85	1												
	2												
	3		-	-			-		-	-			
1.30	1												
	2												
	3		-	-			-		-	-			

7. Определите зависимость формы, амплитуды U_{m2} и ширины t_2 выходного импульса в схеме 1 от показателя степенного профиля q . Вблизи минимального значения t_2 уменьшите шаг изменения q для повышения точности определения оптимального показателя профиля $q_{\text{опт}}$. Измерения проведите для двух источников излучения, работающих на длинах волн 1.3 и 0.85 мкм. Результаты измерений занесите в таблицу 1.4. В графу "форма" занесите упрощенное изображение выходного импульса.

Таблица 1.4

Оптимизация профиля показателя преломления

Показатель профиля q			1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	$q_{\text{опт}}$ т	$\alpha_{\text{опт}}$, дБ/км м	$q_{\text{опт}}$		Δt_M опт, нс/км	
											Эксп	Расч	Эксп	Расч
λ , мкм	0.85	t_2 , нс												
		U_{m2} , В												
		форма												
Показатель профиля q			1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	$q_{\text{опт}}$ т	$\alpha_{\text{опт}}$, дБ/км м	$q_{\text{опт}}$		Δt_M опт, нс/км	
											Эксп	Расч	Эксп	Расч
λ ,	1.3	t_2 , нс												

МК М	$U_{m2},$ В													
	фор ма													

8. По результатам измерения t_2 определите $q_{\text{опт}}$, которому соответствует минимальное t_2 , рассчитайте коэффициент затухания $\alpha_{\text{опт}}$ и дисперсию $\Delta t_{\text{м опт}}$ по формулам:

$$\alpha_{\text{опт}} = \frac{10}{L} \lg \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \quad t_{\text{м опт}} = \frac{t_{2\text{опт}} - t_1}{L} \quad (1.41)$$

Рассчитайте также теоретическое значение $q_{\text{опт}}$ и $\Delta t_{\text{м опт}}$ по выражениям (1.16) и (1.17). Результаты расчетов занесите в табл. 1.4.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Параметры, соответствующие номеру Вашего варианта
2. Теоретический расчет с указанием всех использованных формул и комментариями
3. Таблицу 1.2 с результатами теоретического расчета
4. Две таблицы 1.3 с результатами измерений и расчетов
5. Формулы и комментарии, относящиеся к обработке результатов измерений
6. Таблицу 1.4 с результатами измерений и расчетов
7. Графики зависимости $U_{m2}(q)$ и $t_2(q)$ для длин волн 0.85 и 1.3 мкм

ПРОТОКОЛ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «Исследование прохождения световых импульсов по многомодовым волоконным световодам» Вариант № _____

1. Теоретический расчет

Параметры для теоретического расчета:

Длина волны λ , мкм	$\lambda = 0.85$	$\lambda = 1.3$
Показатель преломления на оси ВС n_{10}		
Показатель преломления оболочки ВС n_2		
Значение производной $dn_{10}/d\lambda$		
Значение производной $d\Delta/d\lambda$		
Показатель степенного профиля q		

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
«Исследование прохождения световых импульсов
по волоконным световодам с усеченным степенным профилем»

Цель работы:

Изучение процессов распространения оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам (ВС) с усеченным степенным профилем, методов измерения параметров ВС - затухания и дисперсии, источников погрешностей, включая инструментальные и методические погрешности, способов их компенсации.

Подготовка к работе:

При подготовке к работе должны быть изучены следующие разделы:

- Волоконные световоды и принцип их действия
- Лучевая теория передачи по световодам
- Волновая теория передачи по световодам
- Затухание световодов
- Дисперсия и пропускная способность световодов

*5.1. Исследование прохождения световых импульсов
с усеченным степенным профилем*

В лабораторной работе используются многомодовые волоконные световоды с усеченным степенным профилем, т. е. профилем, изменения которого описываются следующими выражениями:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2(r) = n_{10}^2 \left[1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^q \right] & \text{при } 0 < r < a \\ n_2^2 = n_{10}^2 (1 - 2 \cdot \Delta) & \text{при } r > a \end{cases} \quad (1.1)$$

где r - расстояние от оси ВС, мкм; a - радиус сердцевины ВС, мкм; n_{10} , n_2 - показатели преломления на оси ВС (при $r = 0$) и в оболочке (при $r > a$), соответственно; q - показатель степенного профиля, который обычно близок к величине 2; Δ - относительная разность показателей преломления ВС, которую можно рассчитать по выражению:

$$\Delta = \frac{n_{10}^2 - n_2^2}{2n_{10}^2} \quad (1.2)$$

В кабелях связи обычно используют так называемые слабонаправляющие ВС, для которых $\Delta \ll 1$.

В лабораторной работе в качестве оболочки ВС используется чистый кварц SiO_2 . Требуемая величина n_1 достигается легированием материала сердечника. В качестве легирующих добавок используется GeO_2 .

Процессы распространения оптических импульсов по многомодовым ВС рассмотрим на основе геометрической оптики, в которой основным является поня-

тие светового луча. В многомодовых ВС могут распространяться два типа лучей:

меридиональные, которые распространяются в плоскостях, проходящих через ось ВС z ;

косые, которые не лежат в этих плоскостях.

В общем случае лучи в градиентных многомодовых ВС распространяются по спиралевидным траекториям. Различные типы лучей (мод) можно характеризовать **лучевыми инвариантами** B и E , которые представляют собой постоянные для данного луча скалярные величины, однозначно определяющие его направление в любой точке траектории.

Лучевые инварианты определяются следующим образом:

$$B = n(r) \cdot \cos \theta_z(r) \quad (1.3)$$

$$E = n(r) \cdot \sin \theta_z(r) \cdot \cos \theta_f(r) \quad (1.4)$$

В этих формулах: $\theta_z(r)$ - угол наклона луча по отношению к оси z ВС; $\theta_f(r)$ - угол между направлением проекции траектории луча и азимутальным направлением. Для меридиональных лучей $\theta_f(r) = \pi / 2$ и $E = 0$.

Эффективность ввода излучения в ВС принято характеризовать **числовой апертурой** $NA = n_0 \sin \theta_0$, которая определяет максимальный угол θ_0 между осью z и направляемым лучом, падающим на торец ВС из среды с показателем преломления n_0 . У градиентных многомодовых ВС числовая апертура зависит от r . Ее называют **локальной числовой апертурой**:

$$NA(r) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}, \text{ при } 0 < r < a. \quad (1.5)$$

В соответствии с волновой оптикой в ВС может распространяться на большее расстояние только определенное конечное количество типов направляемых волн (мод). Для направляемых лучей величина инварианта B должна удовлетворять следующему условию:

$$n_2(\lambda) < B < n_{10}(\lambda). \quad (1.6)$$

Важным параметром ВС является нормированная частота:

$$V = 2\pi \cdot \frac{a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_{10}^2 - n_2^2} \quad (1.7)$$

где λ - длина волны используемого источника излучения в вакууме. Нормированная частота определяет общее количество направляемых мод (лучей) в градиентном многомодовом ВС:

$$M = INT \left(\frac{V^2}{2} \frac{q}{q+2} \right), \quad (1.8)$$

где $INT(x)$ - означает целую часть x .

Различные лучи (моды) распространяются вдоль оси z многомодового ВС с различными скоростями, что приводит к межмодовой дисперсии Δt_m , т. е. к уширению оптических импульсов при прохождении многомодового ВС единичной длины. Известно, что удельное время t распространения луча на единичное рас-

стояние в ВС с усеченным степенным профилем зависит только от лучевого инварианта B и от параметра p внеосевой дисперсии материала сердцевины ВС:

$$t(B) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[(p+q) \frac{n_{10}}{B} + (2-p) \frac{B}{n_{10}} \right], \quad (1.9)$$

где

$c = 3 \cdot 10^5$ км/с - скорость света в вакууме, p - параметр внеосевой дисперсии материала сердцевины ВС, который можно рассчитать по выражению:

$$p(\lambda) = \frac{n_{10}(\lambda)}{n_{10g}(\lambda)} \cdot \frac{\lambda}{\Delta(\lambda)} \cdot \frac{d\Delta(\lambda)}{d\lambda}, \quad (1.10)$$

n_{10g} - групповой показатель преломления на оси ВС¹:

$$n_{10g}(\lambda) = n_{10}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{10}(\lambda)}{d\lambda}. \quad (1.11)$$

Обратите внимание, что длина волны λ в (1.10) и (1.11) подставляется в мкм.

С параметром n_{10g} связано понятие групповой скорости:

$$V_g = c/n_{10g} \quad (1.12)$$

Минимальное удельное время распространения на единичное расстояние равно:

$$t(B_m) = \frac{1}{c} \cdot \frac{2n_{10g}}{q+2} \sqrt{(p+q)(2-p)} \quad (1.13)$$

для луча с инвариантом:

$$B_m = n_{10} \sqrt{\frac{q+p}{2-p}}. \quad (1.14)$$

Если рассчитанное значение B_m не удовлетворяет условию направляемых лучей (1.6), то и расчет минимального удельного времени распространения не имеет смысла. В зависимости от величин q и p максимальное удельное время распространения будет для лучей с инвариантами $B = n_{10}$ или n_2 .

В качестве оценки межмодовой дисперсии Δt_m принимается разность максимального и минимального удельных времен распространения из трех значений $t(n_{10})$, $t(n_2)$ и $t(B_m)$:

$$\Delta t_m = t_{\max} - t_{\min}. \quad (1.15)$$

Величина $t(B_m)$ учитывается, только если B_m лежит в диапазоне направляемых лучей.

Полученное значение Δt_m необходимо сравнить с величиной межмодовой дисперсии $\Delta t_{m \text{ опт}}$ для градиентного ВС с оптимальным показателем $q_{\text{опт}}$ степенного профиля

$$q_{\text{опт}} = 2 \cdot (1-p) - \Delta \cdot (2-p), \quad (1.16)$$

$$\Delta t_{m \text{ опт}} = \frac{n_{10g}}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{8}. \quad (1.17)$$

¹ С этим параметром связано понятие групповой скорости.

Хроматической дисперсией в градиентных многомодовых ВС можно пренебречь по сравнению с межмодовой дисперсией.

Коэффициент затухания α ВС складывается из собственного затухания α_c и дополнительного α_d , возникающего в процессе производства оптического волокна, при изготовлении оптического кабеля из оптического волокна, а также при прокладке кабеля и монтаже регенерационных участков волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

Собственные потери α_c включают остаточные потери за счет резонансного поглощения кварца в инфракрасной $\alpha_{ик}$ и ультрафиолетовой $\alpha_{уф}$ областях спектра, потери на релеевское рассеяние $\alpha_{рр}$, а также потери за счет резонансного поглощения $\alpha_{рп}$ в различных примесях (OH^- , Fe^{2+} , Cu^{2+} , C_2^{3+}).

Потери на резонансное поглощение трудно поддаются расчету и могут быть приняты равными:

$$\begin{aligned} \alpha_{рп} &= 0.1 \text{ дБ/км} \quad \text{для } \lambda = 0.85 \text{ мкм;} \\ \alpha_{рп} &= 0.05 \text{ дБ/км} \quad \text{для } \lambda \approx 1.3 \text{ мкм.} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Для расчета $\alpha_{ик}$, $\alpha_{уф}$ и $\alpha_{рр}$ в кварцевых ВС на заданной длине волны λ можно использовать следующие выражения, дБ /км:

$$\alpha_{ик} = 7.81 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{48.5}{\lambda}\right), \quad (1.19)$$

$$\alpha_{уф} = 2.55 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{4.63}{\lambda}\right), \quad (1.20)$$

$$\alpha_{рр} = \frac{0.8}{\lambda^4}. \quad (1.21)$$

В выражениях (1.19-1.21) коэффициенты затухания получатся в дБ/км, если длина волны выражена в мкм.

Дополнительные потери α_d складываются из потерь на микроизгибы и макроизгибы, потерь в оболочке, потерь из-за термомеханических напряжений. Их точный учет затруднен, поэтому можно ориентировочно принять $\alpha_d = 0.1 - 0.3$ дБ/км.

Общий (суммарный) коэффициент затухания:

$$\alpha = \alpha_{ик} + \alpha_{уф} + \alpha_{рр} + \alpha_{рп} + \alpha_d. \quad (1.22)$$

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Структурная схема лабораторной установки по исследованию процессов прохождения оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам (рис. 1.1а) включает:

- генератор импульсов (ГИ);
- источник излучения - полупроводниковый лазер (ИИ);
- два направленных ответвителя (НО1 и НО2);
- устройство временной задержки электрического импульса (УЗ);
- фотоприемное устройство (ФПУ);
- стробоскопический осциллограф (СО);
- три коротких оптических поводка (ОП1, ОП2, ОП3);

- исследуемый волоконный световод (ВС).

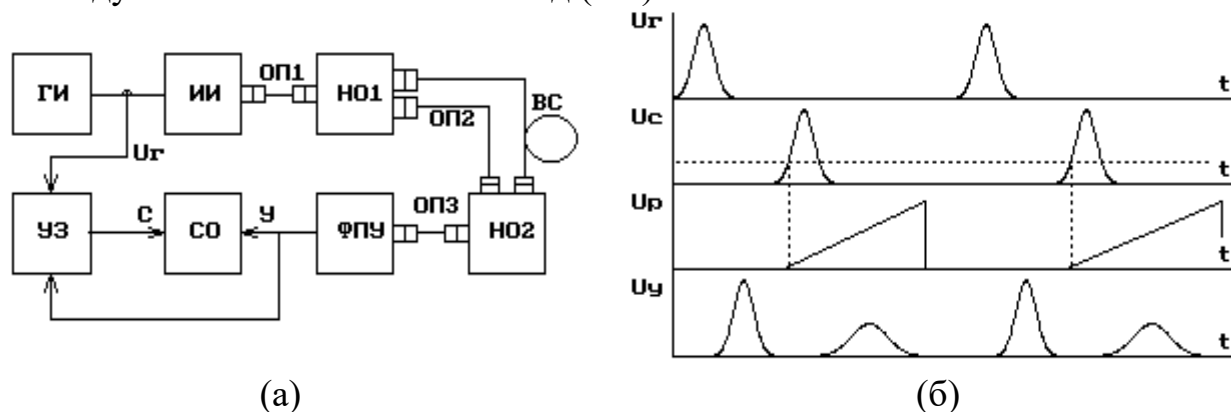


Рис. 1.1. Структурная схема лабораторной установки (а) и временные диаграммы ее работы (б)

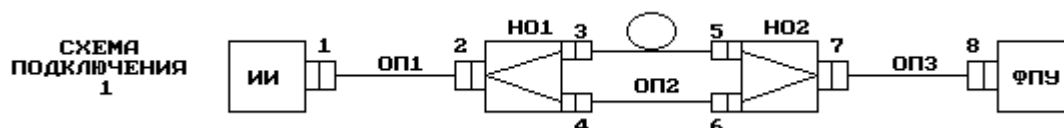
Работа лабораторной установки иллюстрируется временными диаграммами (рис. 1.1б), которые показывают импульсы U_T на выходе ГИ, импульсы U_c , задержанные на время t_3 в УЗ, пилообразное напряжение развертки U_p и напряжение U_y с выхода ФПУ. Импульсы U_T поступают на ИИ, где преобразуются в оптические импульсы мощностью P , которые в НО1 разделяются по мощности на два примерно одинаковых импульса. Один из них, мощностью P_1 , проходит через ОП1, ОП2, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{31} и поступает на ФПУ. Второй, мощностью P_2 , проходит через ОП1, ВС, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{32} и ослабленный за счет затухания в ВС также поступает на ФПУ. ФПУ преобразует оптические импульсы в электрические, которые можно наблюдать на экране СО, если электрический импульс совпадает по времени с пилообразным напряжением развертки. Момент запуска развертки определяется установленной в УЗ задержкой, которую можно изменять вручную или автоматически. В автоматическом режиме поиска выходного импульса задержка возрастает от 0 до максимального значения. Процесс останавливается при превышении сигналом определенного уровня (в данной лабораторной установке он выбран равным 2 мВ).

Лабораторная установка позволяет определять времена задержки t_{31} и t_{32} , амплитуды U_{m1} и U_{m2} и длительности t_1 и t_2 входного и выходного импульсов. По измеренным величинам можно рассчитать: длину ВС L , вносимое затухание a_{bc} и средний коэффициент затухания α , дисперсионное уширение выходного импульса.

Анализ оптической схемы

В лабораторной работе предполагается проведение измерений для трех вариантов включения исследуемого ВС и оптических поводов в схему лабораторной установки (рис. 1.2). Это позволяет исключить погрешности, обусловленные временными задержками и затуханиями в оптических элементах лабораторной установки.

Полагаем, что для изготовления поводов и направленных ответвителей использовались идентичные ВС.



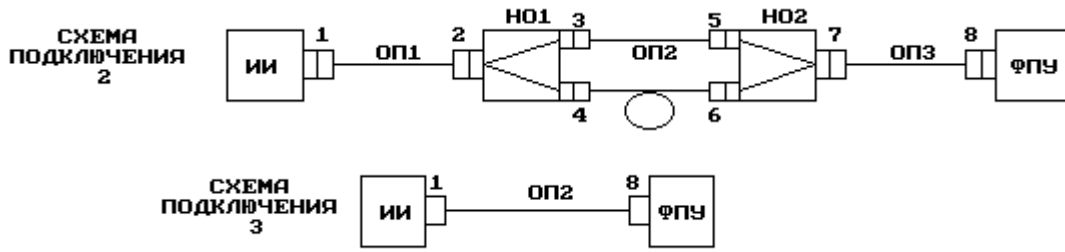


Рис. 1.2. Оптические схемы

Схема подключения 1.

Для времени задержки входного импульса t_{31} в схеме подключения 1 справедливо:

$$t_{311} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}}, \quad (1.23)$$

где L_1, L_2, L_3 - длины соответствующих поводков, км; L_{24}, L_{67} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км; V_{g1} - скорость распространения света в поводках и направленных ответвителях, км/с.

Для затухания входного импульса справедливо:

$$a_{11} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24} \quad (1.24)$$

где α_1 - коэффициент затухания для ВС, используемых в поводках ОП1, ОП2, ОП3 и направленных ответвителях НО1 и НО2, дБ/км; a_{pi} - потери в i -том разьеме, дБ; a_{24} - потери разделения в НО1, дБ.

Для времени задержки выходного импульса t_{32} в данной оптической схеме справедливо:

$$t_{321} = \frac{L_1 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}, \quad (1.25)$$

где L - длина исследуемого ВС, км; V_g - групповая скорость, км/с.

Для затухания выходного импульса справедливо:

$$a_{21} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23} + \alpha L, \quad (1.26)$$

где L_{23}, L_{57} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км; α - коэффициент затухания исследуемого ВС, дБ/км; a_{23} - потери разделения в НО1, дБ.

Схема подключения 2.

Для времени задержки входного импульса можно записать:

$$t_{312} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}}, \quad (1.27)$$

Затухание входного импульса в системе определяется формулой:

$$a_{21} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23} \quad (1.28)$$

Время задержки выходного импульса в данной схеме можно определить по формуле:

$$t_{322} = \frac{L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}, \quad (1.29)$$

Для затухания выходного импульса справедливо:

$$a_{22} = \alpha_1(L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24} + \alpha L. \quad (1.30)$$

Схема подключения 3.

Для времени задержки импульса в третьей схеме справедливо

$$t_{313} = \frac{L_2}{V_{g1}}. \quad (1.31)$$

Затухание импульса можно определить по формуле:

$$a_3 = \alpha_1 L_2 + a_{p1} + a_{p8}. \quad (1.32)$$

Определение параметров ВС

1. Определение длины ВС

Рассмотрим следующую разность: $t_{321} - t_{312} = \frac{L}{V_g} - \frac{L_2}{V_{g1}} = \frac{L}{V_g} - t_{313}$.

Отсюда путем очевидных преобразований получаем:

$$L = (t_{321} - t_{312} + t_{313}) \cdot V_g. \quad (1.33)$$

2. Определение затухания ВС

В лабораторной работе вы измеряете амплитуды входного и выходного импульсов, т. е. в первой схеме величины:

$$U_{m11} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{11}/10} \quad U_{m21} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{21}/10} \quad (1.34)$$

а во второй:

$$U_{m12} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{12}/10} \quad U_{m22} = U_{m0} \cdot 10^{-a_{22}/10} \quad (1.35)$$

где U_{m0} - амплитуда импульса, формируемого на выходе источника излучения.

По измеренным значениям U_{m11} , U_{m21} , U_{m12} , U_{m22} можно рассчитать затухания в первой и второй схемах a_1 и a_2 :

$$a_1 = 10 \cdot \lg\left(\frac{U_{m11}}{U_{m21}}\right) \quad a_2 = 10 \cdot \lg\left(\frac{U_{m12}}{U_{m22}}\right). \quad (1.36)$$

С другой стороны из (1.24), (1.26), (1.28), (1.30) можно получить:

$$a_1 = a_{21} - a_{11} = (a_{p3} - a_{p4}) + (a_{p5} - a_{p6}) + \alpha_1(L_{23} - L_{24}) + \alpha_1(L_{57} - L_{67}) + (a_{23} - a_{24}) + (a_{57} - a_{67}) + \alpha L \quad (1.37)$$

$$a_2 = a_{22} - a_{12} = -(a_{p3} - a_{p4}) - (a_{p5} - a_{p6}) - \alpha_1(L_{23} - L_{24}) - \alpha_1(L_{57} - L_{67}) - (a_{23} - a_{24}) - (a_{57} - a_{67}) + \alpha L \quad (1.38)$$

Складывая полученные таким образом величины, получаем:

$$a_1 + a_2 = 2\alpha L = 2a_{BC}. \quad (1.39)$$

Из (1.35) следует, что затухание исследуемого ВС можно рассчитать по выражению:

$$a_{BC} = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (1.40)$$

ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Данная лабораторная работа является виртуальной.

После загрузки программы на экране появляется текст методических указаний.

Основное управление осуществляется функциональными клавишами:

- F1 – переход к разделу «Теоретические сведения»

- F2 – получение информации о параметрах исследуемого ВС
- F3 – переход к описанию моделируемой лабораторной установки
- F4 – переход к проведению измерений
- F8 – вызов калькулятора

На рис. 1.3 представлен экран с параметрами исследуемого ВС. Некоторые обозначения на экране отличаются от обозначений в данных методических указаниях, соответствие между ними установлено в табл. 1.1.

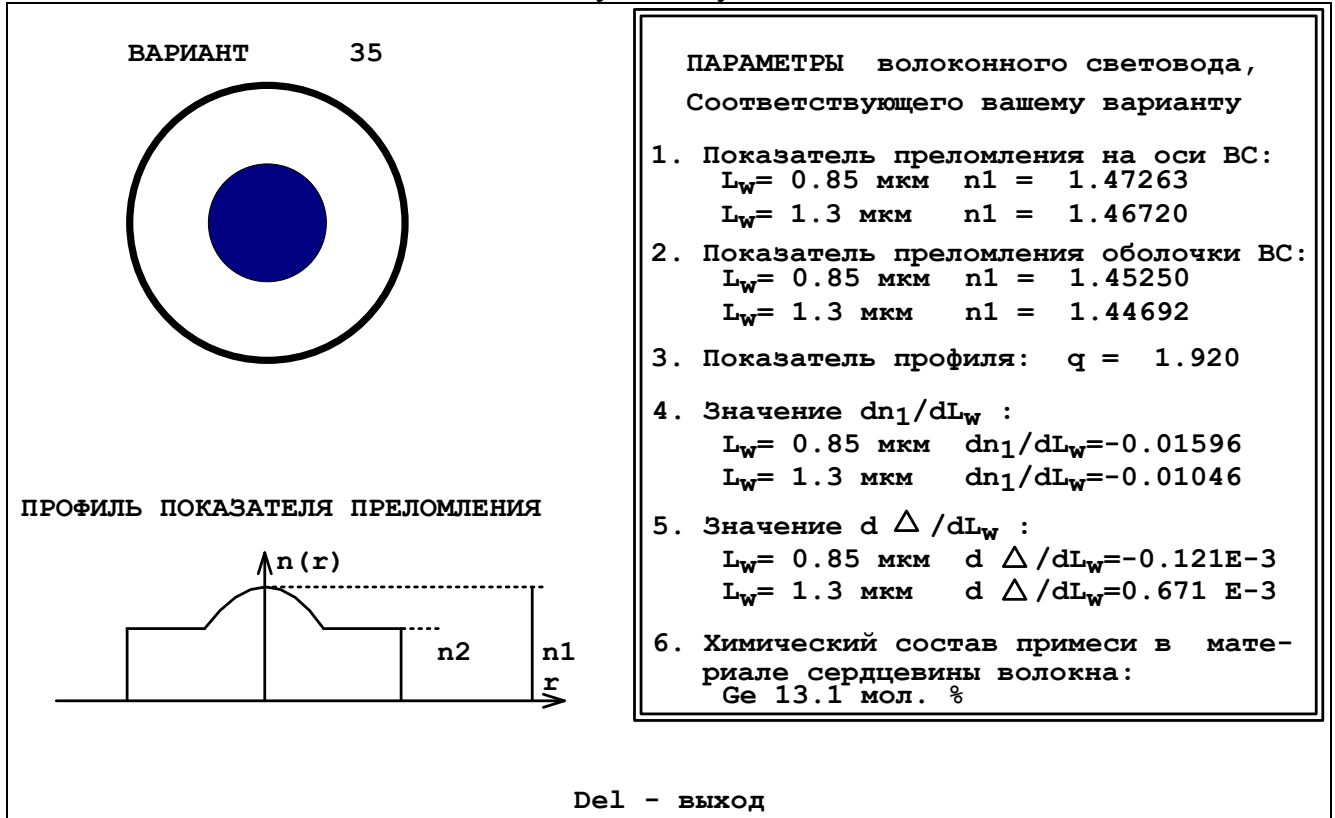


Рис. 1.3. Экран с параметрами исследуемого ВС.

На рис. 1.4 показан основной экран программы – экран стробоскопического осциллографа, на котором проводятся все измерения.

Управление моментом запуска развертки осциллографа осуществляется курсорными клавишами \rightarrow и \leftarrow и клавишей Enter. Однократное нажатие одной из курсорных клавиш вызывает уменьшение (\Rightarrow) или увеличение (\Leftarrow) времени задержки. Изменение времени задержки происходит с постепенно возрастающей скоростью. При этом изображение на экране осциллографа смещается влево или вправо. Остановить изображение в нужный момент можно, нажав клавишу Enter. Текущее значение времени задержки в мкс отображается в окошке под экраном осциллографа.

Таблица 1.1

Наименование величины	Обозначение на экране	Обозначение в методических указаниях
Длина волны	L_w	λ
Показатель преломления сердцевины ВС на оси	n_1	n_{10}

Значение производной показателя преломления сердцевины ВС по длине волны на оси	dn_1 / dL_w	$dn_{10} / d\lambda$
Значение производной относительной разности показателей преломления сердцевины и оболочки ВС по длине волны на оси	$d\Delta / dL_w$	$d\Delta / d\lambda$

Изображение на экране осциллографа можно также смещать вдоль вертикальной оси однократным нажатием курсорной клавиши \uparrow или \downarrow . При этом изображение начнет перемещаться вверх или вниз с равномерной скоростью. Остановить изображение в нужный момент можно, нажав клавишу Enter.

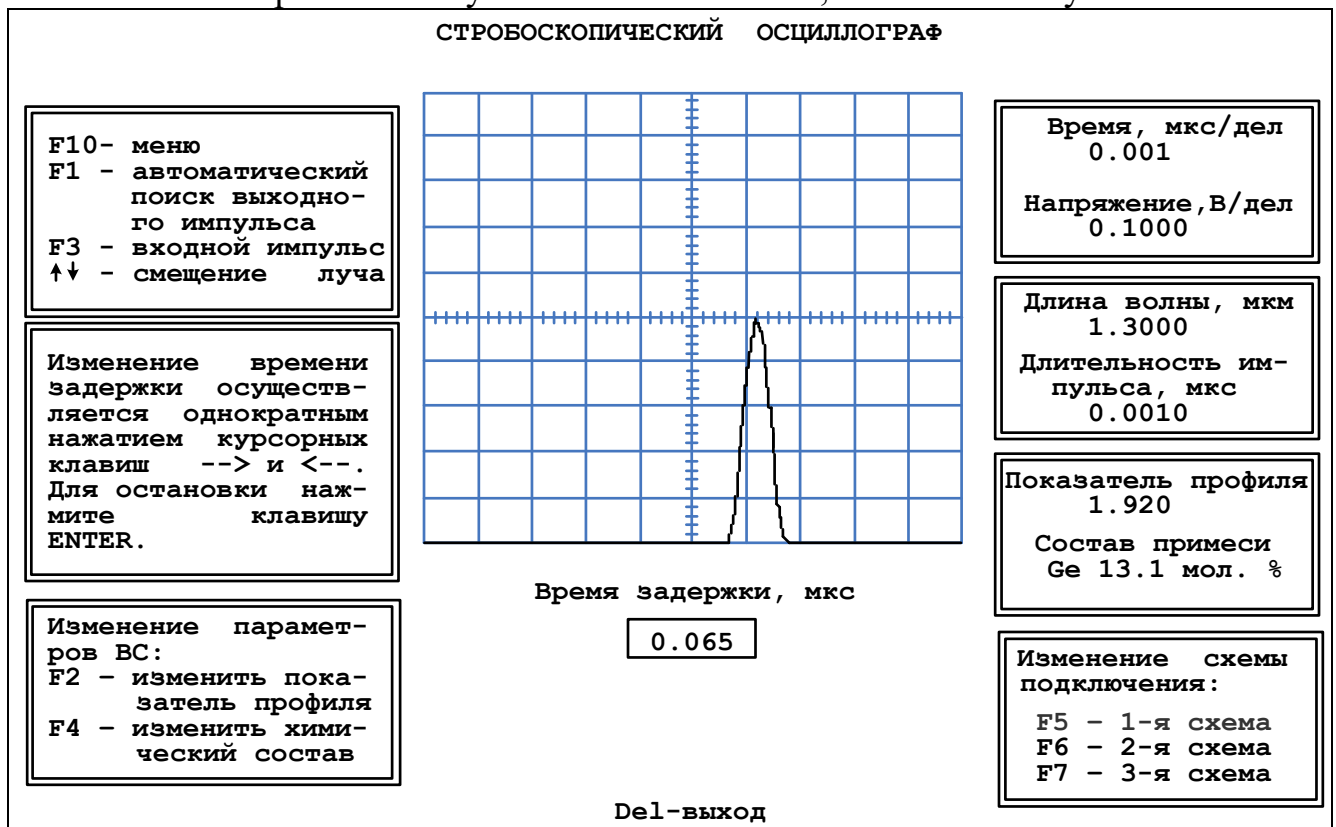


Рис. 1.4. Экран стробоскопического осциллографа.

Масштабировать изображение на экране осциллографа можно, изменяя цены деления его горизонтальной (время) и вертикальной (напряжение) шкал. Для этого необходимо воспользоваться режимом «Меню» (пункт меню *Изменение параметров осциллографа*), вызвать который можно нажатием клавиши F10 (рис. 1.5).

В режиме «Меню» также можно изменять параметры генератора импульсов и источника излучения (пункт меню *Изменение параметров генератора импульсов*) – длительность импульса и длину волны.

Установленные параметры осциллографа, генератора импульсов и источника излучения отображаются справа от экрана осциллографа.

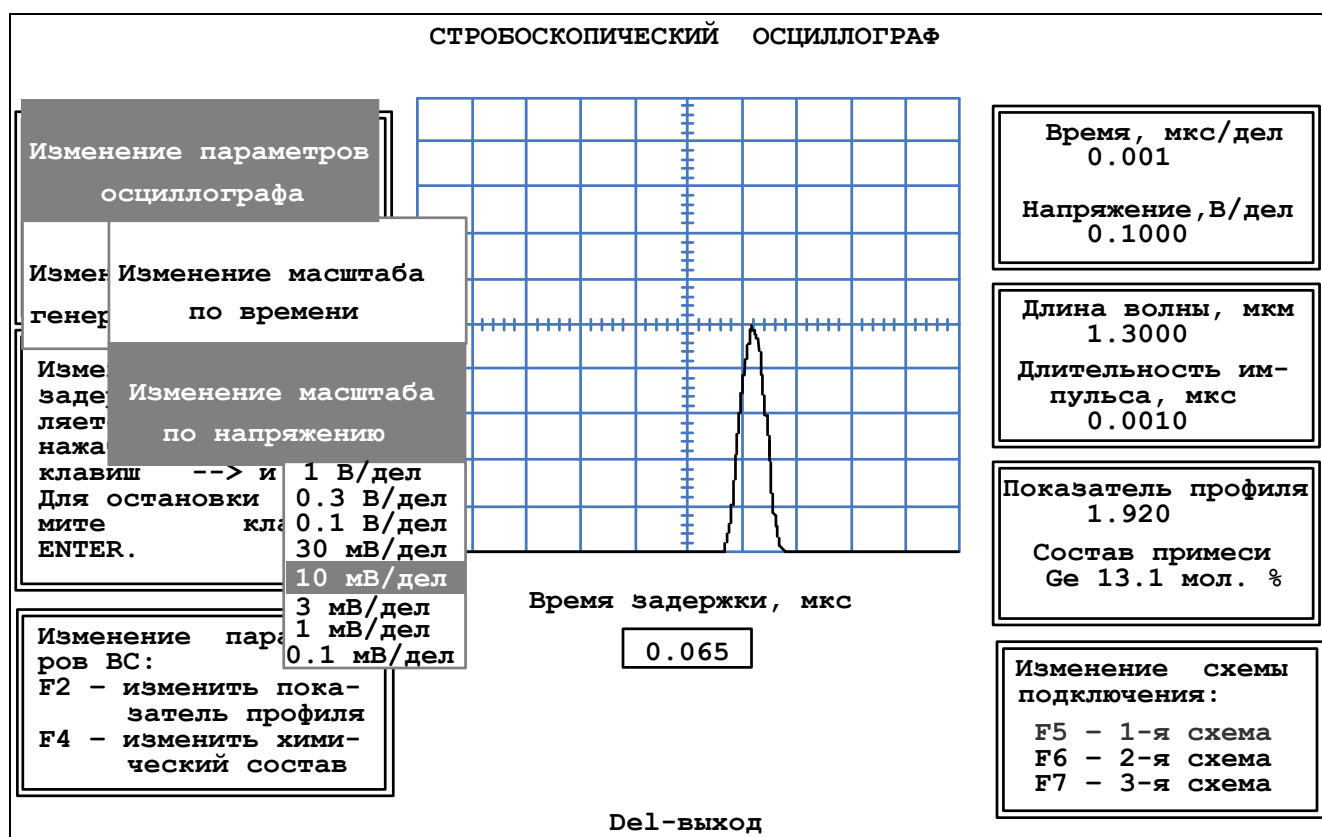


Рис. 1.5. Режим «Меню».

Переключение оптических схем для проведения измерений осуществляется нажатием функциональных клавиш: 1-я схема – F5, 2-я схема – F6, 3-я схема – F7. Выбранная в данный момент схема выделяется цветом в окошке *Изменение схемы подключения* внизу экрана справа.

В работе можно также изменять параметры исследуемого ВС – показатель степенного профиля и степень легирования сердцевины. Для изменения показателя степенного профиля нужно нажать клавишу F2. При этом на экране появится окошко с текущим значением показателя. Вам нужно набрать цифрами без точки новое значение показателя.

Для изменения степени легирования сердцевины нужно нажать клавишу F4 и в появившемся меню клавишами \uparrow и \downarrow выбрать нужное значение.

Установленные показатель степенного профиля и химический состав легирующей примеси отображаются справа от экрана осциллографа.

ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

1. Изучите материал раздела «Теоретические сведения».
2. В отчете должен быть указан номер вашего варианта и параметры исследуемого ВС, соответствующего этому номеру. Для получения сведений о параметрах, необходимых для проведения требуемых в работе расчетов, нажмите клавишу F2.
3. По заданным параметрам ВС рассчитайте:
 - групповой показатель преломления на оси волокна n_{10g} по выражению (1.11),
 - групповую скорость V_g по выражению (1.12),

- коэффициент затухания α по выражению (1.22).
 - нормированную частоту V по выражению (1.7), считая радиус сердцевины волокна равным 25 мкм,
 - число направляемых мод M по выражению (1.8),
 - уширение импульса (дисперсию) Δt_m на 1 км по выражению (1.15),
- Обратите внимание, что рассчитывать параметры необходимо с достаточной точностью, в случае необходимости проводя округление только окончательного результата. Особенно это касается расчетов n_{10g} и всех этапов расчета Δt_m . В связи с этим рекомендуется использовать для расчетов одну из специализированных математических программ – MathCAD, Math Lab и т.п. Результаты расчетов занесите в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Результаты теоретических расчетов

Исходные данные					Результаты расчета						
λ , мкм	n_{10}	n_2	$dn_{10} / d\lambda$	$d\Delta / d\lambda$	q	n_{10g}	V_g , км/с	α , дБ/км	V	M	Δt_m , нс/км
0.85											
1.30											

4. Изучите структурную схему и работу лабораторной установки, а также анализ 3-х возможных схем ее включения, в которых будут проводиться измерения. Обратите особое внимание на предлагаемый способ уменьшения погрешности результатов измерений. Для получения этой информации нажмите клавишу F3.

5. Для входного и выходного импульсов измерьте по экрану осциллографа

- время задержки, для чего установите вершину импульса на середину горизонтальной оси экрана осциллографа;
- амплитуду импульса по вертикальной шкале осциллографа;
- длительность импульса.

Измерения проведите для двух источников излучения, работающих на длинах волн 1.3 и 0.85 мкм, и двух различных значений длительности входного импульса, задаваемых преподавателем. Результаты измерений занесите в таблицу 1.3. Для перехода к странице «Экран осциллографа» нажмите клавишу F4.

6. Рассчитайте по данным измерений для двух значений длины волны источника излучения:

- затухание в первой и второй оптических схемах по выражениям (1.36);
- затухание исследуемого ВС по выражению (1.40);
- уширение импульса в исследуемом ВС $\Delta t = t_2 - t_1$;
- длину исследуемого ВС L по выражению (1.33);
- межмодовую дисперсию исследуемого ВС $\Delta t_m = (\Delta t_1 + \Delta t_2) / 2L$, где $\Delta t_1, \Delta t_2$ –

уширения импульса в 1 и 2 схемах;

- коэффициент затухания исследуемого ВС: $\alpha_{BC} = a_{BC} / L$.

Результаты расчетов занесите в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений и расчетов

λ , мкм	Но- мер схе- мы	U_{m1} , В	U_{m2} , В	a , дБ	a_{BC} , дБ	t_{31} , мкс	t_{32} , мкс	t_1 , нс	t_2 , нс	Δt , нс	L , км	Δt_M , нс/к м	α_{BC} , дБ/к м
0.85	1												
	2												
	3		-	-			-		-	-			
1.30	1												
	2												
	3		-	-			-		-	-			

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Параметры, соответствующие номеру Вашего варианта
2. Теоретический расчет с указанием всех использованных формул и комментариев
3. Таблицу 1.2 с результатами теоретического расчета
4. Две таблицы 1.3 с результатами измерений и расчетов
5. Формулы и комментарии, относящиеся к обработке результатов измерений

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«Исследование прохождения световых импульсов
по многомодовым волоконным световодам»
Вариант № _____

1. Теоретический расчет

Параметры для теоретического расчета:

Длина волны λ , мкм	$\lambda = 0.85$	$\lambda = 1.3$
Показатель преломления на оси ВС n_{10}		
Показатель преломления оболочки ВС n_2		
Значение производной $dn_{10}/d\lambda$		
Значение производной $d\Delta/d\lambda$		
Показатель степенного профиля q		

2. Проведение измерений дисперсии и затухания. Экспериментальное определение длины ВС.

Результаты измерений

Дли- тель- ность им- пуль- са, нс	λ , мкм	Но- мер схемы	U_{m1} , В	U_{m2} , В	t_{31} , мкс	t_{32} , мкс	t_1 , нс	t_2 , нс
	0.85	1						
		2						
		3		-		-		-
	0.85	1						
		2						
		3		-		-		-
	1.3	1						
		2						
		3		-		-		-
	1.3	1						
		2						
		3		-		-		-

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

«Исследование характеристик многомодовых волоконных световодов с усеченным степенным профилем»

6.1. Волоконные световоды с усеченным степенным профилем показателя преломления

Для уменьшения межмодовой дисперсии и увеличения широкополосности были разработаны многомодовые ВС с изменяющимся в пределах сердцевины показателем преломления, которые называют ВС с градиентным профилем показателя преломления.

Наибольшее распространение получили градиентные ВС с усеченным степенным профилем показателя преломления, в которых n_1 показатель преломления сердцевины ВС с радиусом a уменьшается с увеличением расстояния r от оси ВС по закону близкому к параболическому

$$n_1^2 = n_{10}^2 \cdot \left[1 - 2\Delta \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^q \right], \text{ при } 0 < r < a, \quad (1)$$

где n_{10} - показатель преломления на оси ВС,

$2\Delta = \frac{n_{10}^2 - n_2^2}{n_{10}^2}$ - относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки,

и

q - показатель степенного профиля.

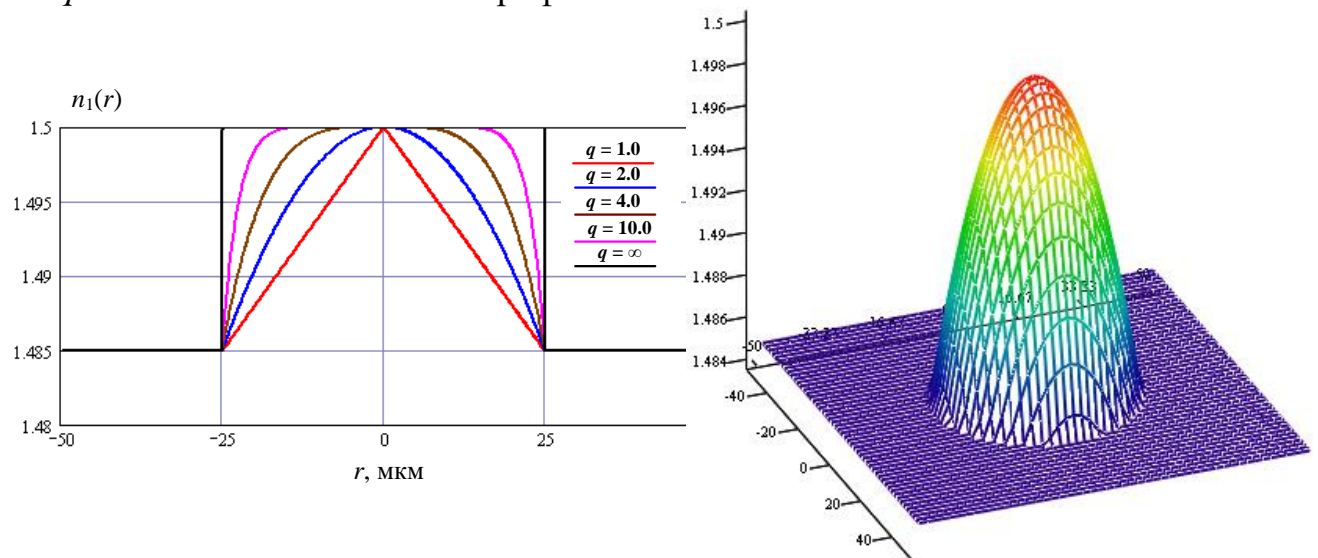


Рис. 1. Усеченные степенные профили показателя преломления для ВС с показателями

слева: $q=1$ (1кривая снизу), $q=2$, $q=4$, $q=10$, $q=\infty$; справа: $q=2$

Показатель преломления оболочки n_2 является постоянной величиной

$$n_2 = n_{10} \cdot \sqrt{1 - 2\Delta}. \quad (2)$$

На рис. 1 показаны профили показателей преломления с различными значениями показателя степенного профиля. Расчеты проводились для $n_{10}=1.5$, $\Delta=0.01$.

Усеченным профиль показателя преломления ВС называют потому, что зависимость (1) ограничена (усечена) сердцевинной.

Радиальные изменения показателя преломления в сердцевине ВС приводят к искривлениям траекторий лучей (рис. 2). На рис. 2а показаны траектории меридиональных, а на рис. 2б - косых лучей. Меридиональные лучи имеют определенный период и отличаются друг от друга радиусом внешней каустики r_{ce} (цилиндрической поверхности, на которой лежат все точки поворота луча). Моде низшего порядка, также как и в ступенчатых ВС соответствует траектория вдоль оси ВС, а моде самого высокого порядка соответствует траектория, касательная к поверхности раздела сердцевины и оболочки. Радиус внутренней каустики для меридиональных лучей равен $r_{ci}=0$.

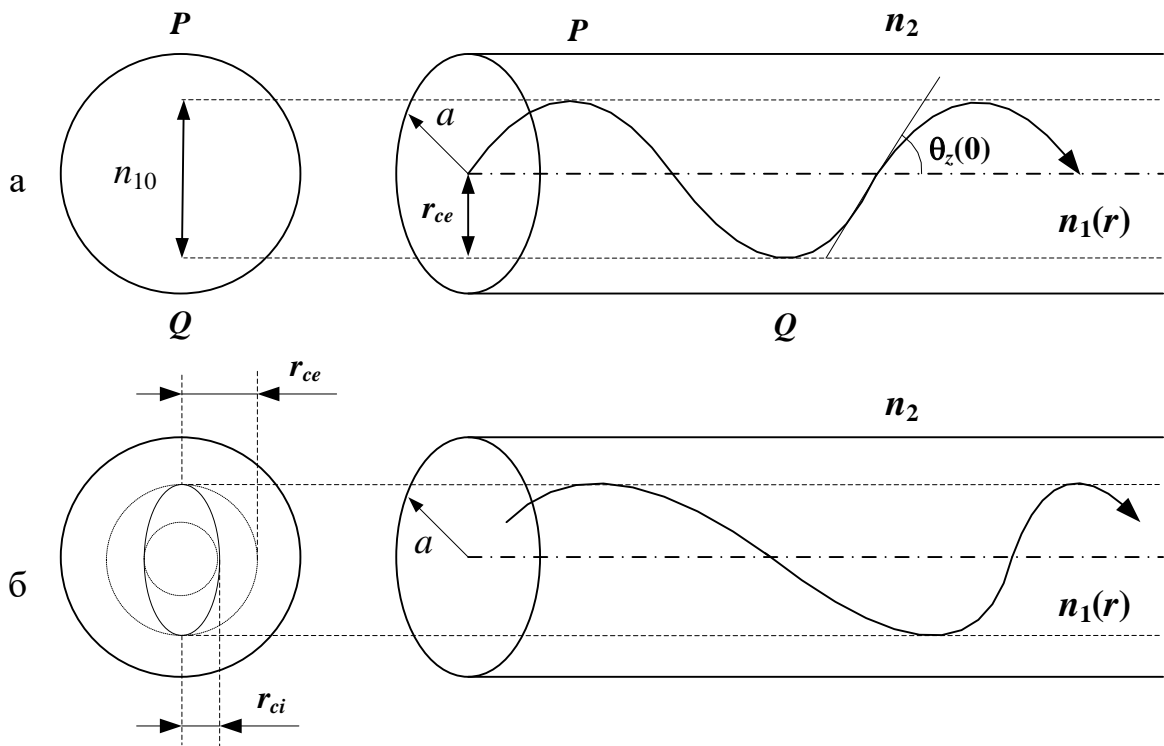


Рис. 2. Траектории лучей (а – меридиональных, б - косых) в многомодовых градиентных ВС с усеченным степенным профилем показателя преломления.

Косые лучи в градиентных многомодовых ВС распространяются по спиралевидным траекториям между двумя цилиндрическими поверхностями внешней и внутренней (цилиндрическая поверхность, которую косой луч никогда не пересекает) каустиками (рис. 2б).

Лучевые инварианты. Условие направляемости лучей.

Различные типы лучей (мод) можно характеризовать, так называемыми лучевыми инвариантами V и E , которые представляют собой постоянные для

любой точки данного луча скалярные величины, которые характеризуют его направление в любой точке поперечного сечения сердцевины.

$$B = n_1(r) \cdot \cos \theta_z(r)$$

$$E = \frac{r}{a} \cdot n_1(r) \cdot \sin \theta_z(r) \cdot \cos \theta_f(r) \quad (3)$$

В этих формулах: $\theta_z(r)$ - угол, образующийся между касательной к траектории луча и осью ВС; $\theta_f(r)$ - угол между направлением проекции траектории луча и азимутальным направлением. Углы показаны на рис. 3. Для меридиональных лучей $\theta_f(r) = \pi/2$ и $E = 0$.

Используя величину B , можно определить угол наклона $\theta_z(0)$ меридионального луча пересекающего ось ВС по отношению к этой оси (из 3) и радиус внешней каустики (из 3 и 1)

$$\cos \theta_z(0) = \frac{B}{n_{10}},$$

$$r_{ce} = a \cdot \left(\left(1 - \frac{B^2}{n_{10}^2} \right) / 2\Delta \right)^{\frac{1}{q}}. \quad (4)$$

Для направляемых лучей величина первого инварианта должна удовлетворять условию:

$$n_2(\lambda) < B \leq n_{10}(\lambda) \quad (5)$$

Следует отметить, что показатель преломления зависит от длины волны. На рис. 4 показаны зависимости $n(\lambda)$ для чистого кварца (черная кривая) и для кварца с различным содержанием легирующей добавки GeO_2 .

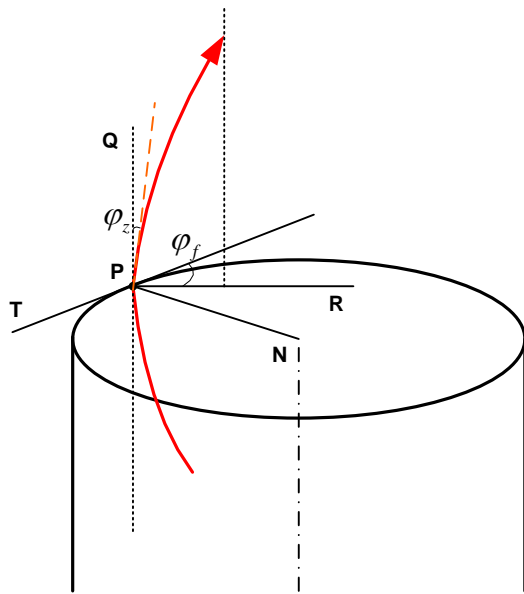


Рис. 3. Углы для описания отражения луча, падающего в точке Р на границу сердцевина-оболочка. Луч образует угол θ_z с осевым направлением PQ и угол θ_f (в сечении световода) между касательной PT и проекцией траектории луча PR.

Межмодовая дисперсия в ВС с усеченным степенным профилем.

Известно, что удельное время распространения луча на единичное

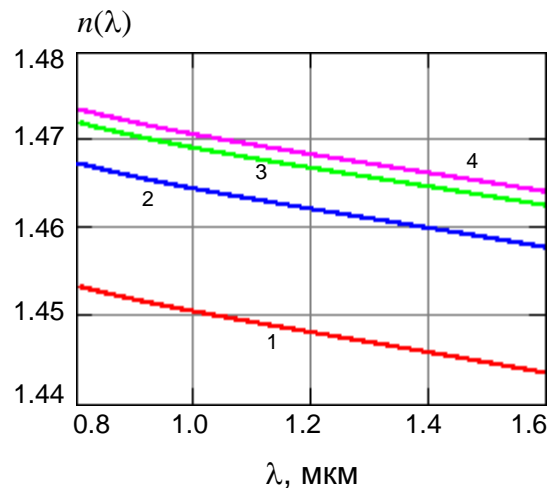


Рис. 4. Зависимости показателя преломления от длины волны (1 – чистый кварц, 2 – 8.1% GeO_2 , 3 – 11.0% GeO_2 , 4 – 13.1% GeO_2).

расстояние в ВС с усеченным степенным профилем зависит только от лучевого инварианта B и от параметра p внеосевой дисперсии материала сердцевины ВС:

$$t(B) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[(p+q) \cdot \frac{n_{10}}{B} + (2-p) \cdot \frac{B}{n_{10}} \right], \quad (6)$$

где $n_{10g} = n_{10}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{10}}{d\lambda}$ - групповой показатель преломления² на оси ВС;

$c = 3 \cdot 10^5$ км/с - скорость света в вакууме;

$p = \frac{n_{10}(\lambda)}{n_{10g}} \frac{\lambda}{\Delta(\lambda)} \frac{d\Delta}{d\lambda}$ - параметр внеосевой дисперсии материала сердцевины

ВС.

На рис. 5 показана зависимость удельного времени распространения для различных значений первого инварианта B для ВС с $n_{10}=1.5$, $n_2=1.485$, $p=0.1$ и $q=1.79$. Из рис. 5 видно, что для определенного значения первого инварианта удельное время распространения принимает минимальное значение. Можно найти значение первого инварианта B_m , которому соответствует минимальное удельное время распространения. Для этого надо взять первую производную от выражения (6) по B и приравнять ее к нулю.

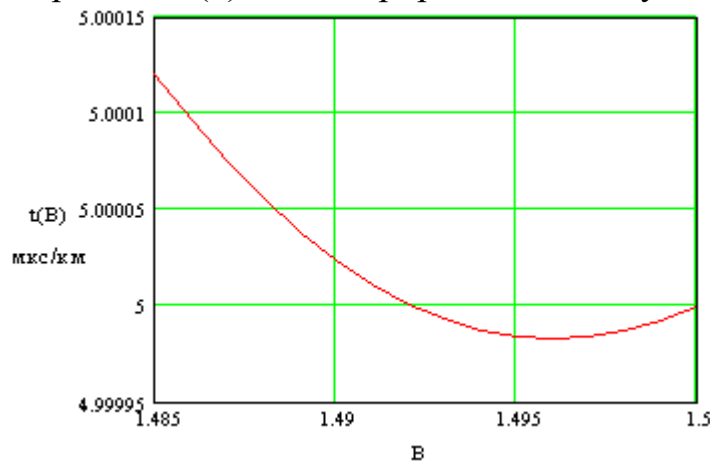


Рис. 5. Зависимость удельного времени задержки от величины первого инварианта.

Несложные расчеты позволяют получить величину B_m

$$B_m = n_{10} \cdot \sqrt{\frac{q+p}{2-p}}. \quad (7)$$

При этом минимальное удельное время распространения на единичное расстояние будет равно:

$$t(B_m) = \frac{1}{c} \cdot \frac{2n_{10g}}{q+2} \cdot \sqrt{(p+q) \cdot (2-p)} \quad (8)$$

Если рассчитанное значение B_m не удовлетворяет условию направляемых лучей (5), то и расчет минимального удельного времени распространения по этой формуле не имеет смысла. В этом случае минимальное t_{min} и мак-

² С этим параметром связано понятие групповой скорости $V_g = c/n_{10g}$.

симальное t_{max} удельное время распространения соответствуют минимальному и максимальному значениям инварианта B .

В качестве верхней оценки межмодовой дисперсии D_m принимается разность максимального t_{max} и минимального t_{min} удельных времен распространения из трех значений $t(n_{10})$, $t(n_2)$ и $t(B_m)$, если B_m удовлетворяет условию (5), или из двух значений $t(n_{10})$ и $t(n_2)$, если B_m не удовлетворяет условию (5):

$$D_m = t_{max} - t_{min} . \quad (9)$$

Можно также утверждать, что минимальной межмодовой дисперсии D_m соответствует равенство удельных времен распространения для минимального и максимального значения первых инвариантов

$$t(n_{10}) = t(n_2) = \frac{n_{10}g}{c} , \quad (10)$$

На рис. 6 для этого случая показана зависимость удельного времени распространения от значений первого инварианта B для ВС с теми же параметрами, что и на предыдущем рис. 6, но с другим значением $q=1.781$.

Решение уравнения (10) позволяет получить оптимальное значение параметра степенного профиля

$$q_{opt} = 2 \cdot \frac{n_2}{n_{10}} - p \cdot \frac{n_{10} + n_2}{n_{10}} . \quad (11)$$

Минимально достижимую межмодовую дисперсию при $q = q_{opt}$ можно рассчитать, преобразовав выражение (9) к следующему виду

$$D_{i \min} = t(n_{10}) - t(B_m) = \frac{n_{10}g}{c} \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{\sqrt{n_{10} \cdot n_2}}{n_{10} + n_2} \right] \quad (12)$$

Для приведенных выше параметров $B_m=1.492$, $q_{opt}=1.781$, $D_{min}=63$ пс/км.

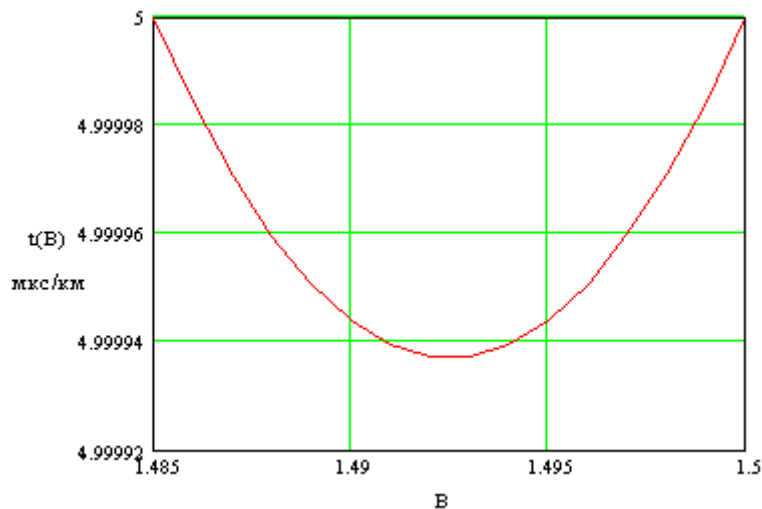


Рис. 6. Зависимость удельного времени задержки от величины первого инварианта для оптимального показателя степенного профиля

Зависимость межмодовой дисперсии от показателя профиля q имеет резкий минимум, который также зависит от длины волны (рис. 7).

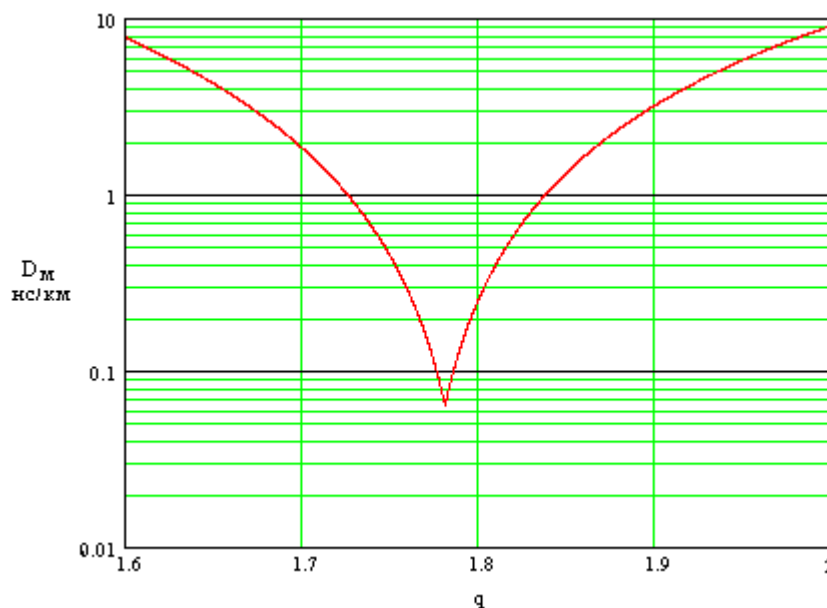


Рис. 7. Зависимость межмодовой дисперсии от показателя степенного профиля

Межмодовая дисперсия в реальных градиентных ВС с профилем близким к оптимальному значительно меньше, чем у ступенчатых ВС и составляет 0.2-2 нс/км.

Затухание в кварцевых ВС.

Затухание a характеризует ослабление сигнала и измеряется обычно в логарифмических единицах децибелах. При оптических измерениях затухание измеряют в соответствии со следующими выражением:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{P_1}, \quad (13)$$

где P_0 , P_1 - мощности сигнала на входе и выходе ВС. Для однородного ВС можно рассчитать коэффициент затухания α - величину затухания на единицу длины, дБ/км:

$$\alpha = \frac{a}{L}, \quad (14)$$

где a – затухание ВС, дБ; L - длина ВС, км.

Для коэффициента затухания кварцевого ВС характерна нелинейная зависимость от длины волны (рис. 9).

Коэффициент затухания α ВС складывается из собственного α_c и дополнительного α_d , возникающего в процессе производства оптического волокна, при изготовлении оптического кабеля из оптического волокна, а также при прокладке кабеля и монтаже регенерационных участков волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).



Рис. 8. Зависимость коэффициента затухания ВС от длины волны

Собственные потери в ВС в основном обусловлены двумя причинами:

- ◆ поглощением, которое определяется свойствами кварца, являющегося основным материалом для изготовления высококачественных ВС, легирующих (полезных) добавок и вредных примесей;
- ◆ рассеянием, которое сильно зависит от длины волны и технологии изготовления ВС.

Поглощение возникает в процессе распространения света в веществе. Оно обусловлено потерями в основном материале ВС - кварце и в примесях, как полезных, так и вредных. Поглощение носит резонансный характер и дает для кварца пики затухания в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. В используемом для связи диапазоне длин волн 0.80-1.6 мкм всплески поглощения у кварца отсутствуют, остаточные потери, обусловленные сильным поглощением в ультрафиолетовой и инфракрасной областях, могут быть рассчитаны по выражениям:

$$\alpha_{ик} = 7.81 \cdot 10^{11} \exp\left(\frac{-48.5}{\lambda}\right) \quad (15)$$

$$\alpha_{уф} = 2.55 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{4.63}{\lambda}\right) \quad (16)$$

В используемом для связи диапазоне длин волн возникают также всплески затухания за счет поглощения в различных примесях (OH^- , Fe^{2+} , Cu^{2+} , C_2^{3+}). При современных технологиях изготовления ВС наибольший вклад в поглощение вносят гидроксильные группы OH^- (вода). Они дают ряд всплесков поглощения, наиболее мощный из которых на длине волны 1.39 мкм, которая очень близка к длине волны нулевой материальной дисперсии кварца (≈ 1.27 мкм). Эти потери трудно поддаются расчету и могут быть приняты равными:

$$\alpha_{рп} = 0.10 \text{ дБ/км для } \lambda = 0.85 \text{ мкм;}$$

$$\alpha_{рп} = 0.05 \text{ дБ/км для } \lambda = 1.30 \text{ мкм.}$$

В ВС, изготовленных из плавленого кварца (SiO_2), происходит линейное рассеяние проходящего света. Оно является фундаментальной (технологически неустранимой) причиной затухания в ВС и носит название рэлеев-

ское рассеяние. Его особенностью является сильная зависимость коэффициента рассеяния α_{pp} от длины волны λ проходящего излучения.

$$\alpha_{pp} = \chi_{pp} \lambda^{-4}, \quad (17)$$

где χ_{pp} - коэффициент пропорциональности, который для высококачественных кварцевых ВС равен 0.7-0.9 дБ·мкм⁴/км.

Дополнительные потери α_d складываются из потерь на микроизгибы и макроизгибы, потерь в оболочке, потерь из-за термомеханических напряжений, из-за случайно расположенных структурных дефектов ВС. Их точный учет затруднен, поэтому можно ориентировочно принять $\alpha_d = 0.1 - 0.3$ дБ/км.

Общий (суммарный) коэффициент затухания α :

$$\alpha = \alpha_{ик} + \alpha_{уф} + \alpha_{pp} + \alpha_{pp} + \alpha_d. \quad (18)$$

С величиной межмодовой дисперсии связано понятие *широкополосности* волокна или *удельной полосы пропускания* B [МГц км]. Этот параметр может быть определен экспериментально по срезу амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на уровне 3 дБ (рис. 9). Источник излучения должен генерировать синусоидальное изменение мощности на пьедестале.

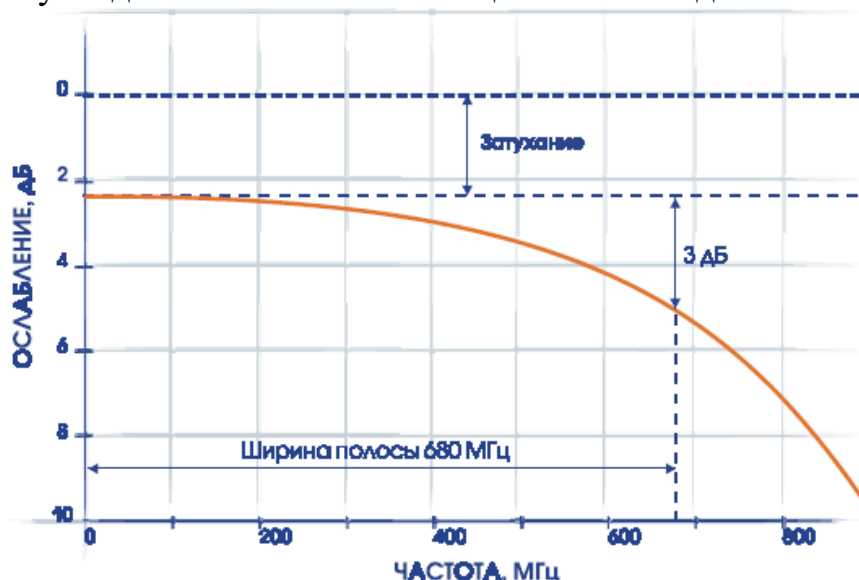


Рис. 9. Определение широкополосности.

Между величиной широкополосности и дисперсией D_m [нс/км] существует зависимость

$$B = 440/D_m. \quad (19)$$

Для градиентных многомодовых ВС широкополосность лежит в пределах 200 – 2000 МГц км.

С увеличением длины ВС L полоса пропускания ВС уменьшается

$$\Delta F = \frac{B}{L}. \quad (20)$$

Для градиентных ОВ вводится понятие *локальной числовой апертуры*, которая показывает, что максимальный угол ввода оптического излучения в этом случае определяется тем, в какой точке сердцевины волокна находится

вершина конуса, иными словами, захват волокном вводимого луча света зависит от того, в какой точке сердцевины он вводится в градиентное волокно. Для ВС с градиентным профилем показателя преломления числовая апертура зависит от расстояния r до оси ВС

$$NA(r) = \sin \varphi_{i0}(r) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} \quad (21)$$

Число мод в ВС с усеченным степенным профилем может быть рассчитано по выражению:

$$N = \frac{V^2}{2(1 + 2/q)}, \quad (22)$$

где $V = 2\pi \frac{a}{\lambda} \sqrt{n_{10}^2 - n_2^2}$ - нормированная частота.

Структурная схема лабораторной установки.

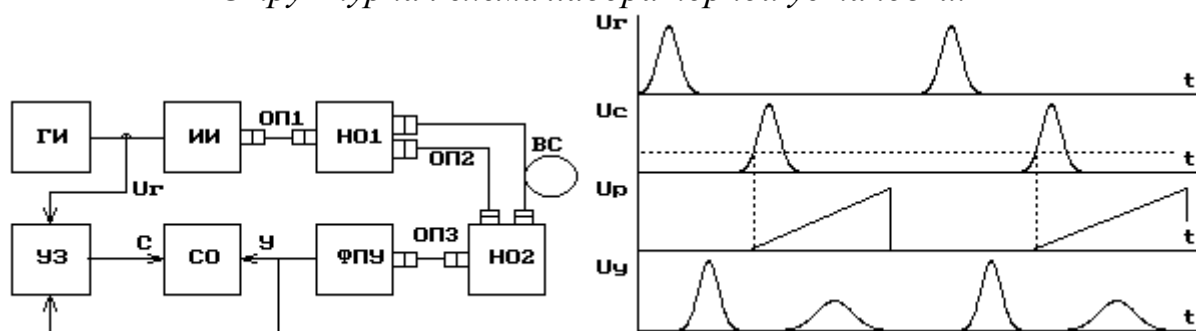


Рис. 10. Структурная схема лабораторной установки и временные диаграммы ее работы.

Структурная схема лабораторной установки (рис. 10) по исследованию процессов прохождения оптических импульсов по многомодовым волоконным световодам включает:

генератор импульсов (ГИ);

- источник излучения - полупроводниковый лазер (ИИ);
- два направленных ответвителя (НО1 и НО2);
- устройство временной задержки электрического импульса (УЗ);
- фотоприемное устройство (ФПУ);
- стробоскопический осциллограф (СО);
- три коротких оптических повода (ОП1, ОП2, ОП3);
- исследуемый волоконный световод (ВС).

Работа лабораторной установки иллюстрируется временными диаграммами, которые показывают импульсы $U_{Г}$ на выходе ГИ, импульсы $U_{с}$, задержанные на время t_3 в УЗ, пилообразное напряжение развертки $U_{р}$ и напряжение $U_{у}$ с выхода ФПУ. Импульсы $U_{Г}$ поступают на ИИ, где преобразуются в оптические импульсы мощностью P , которые в НО1 разделяются по мощности на два примерно одинаковых импульса. Один из них, мощностью P_1 , проходит через ОП1, ОП2, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{31} и поступает на ФПУ. Вторым, мощностью P_2 , проходит через ОП1, ВС, ОП3, НО1 и НО2, задерживается на время t_{32} и ослабленный за счет затухания в

ВС также поступает на ФПУ. ФПУ преобразует оптические импульсы в электрические, которые можно наблюдать на экране СО, если электрический импульс совпадает по времени с пилообразным напряжением развертки. Момент запуска развертки определяется установленной в УЗ задержкой, которую можно изменять вручную или автоматически. В автоматическом режиме поиска выходного импульса задержка возрастает от 0 до максимального значения. Процесс останавливается при превышении сигналом определенного уровня (в данной лабораторной установке он выбран равным 2 мВ).

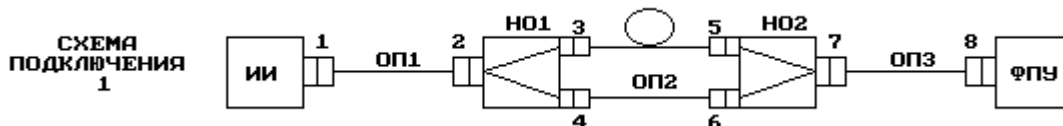
Лабораторная установка позволяет определять времена задержки t_{31} и t_{32} , амплитуды U_{m1} и U_{m2} и длительности t_1 и t_2 входного и выходного импульсов. По измеренным величинам можно рассчитать: длину ВС L , вносимое затухание a_{bc} и средний коэффициент затухания α , дисперсионное уширение выходного импульса.

6.2. Анализ оптической схемы. Экспериментальное определение параметров ВС

В лабораторной работе предполагается проведение измерений для трех вариантов включения исследуемого ВС и оптических поводов в схему лабораторной установки. Это позволяет исключить погрешности, обусловленные временными задержками и затуханиями в оптических элементах лабораторной установки.

Полагаем, что для изготовления поводов и направленных ответвителей использовались идентичные ВС.

Схема подключения 1.



Для времени задержки входного импульса в схеме подключения 1 справедливо:

$$t_{311} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}}, \quad (23)$$

где L_1, L_2, L_3 - длины соответствующих поводов, км; L_{24}, L_{67} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км; V_{g1} - скорость распространения света в поводах и направленных ответвителях.

Для затухания входного импульса справедливо:

$$a_{11} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24}, \quad (24)$$

где α_1 - коэффициент затухания для ВС, используемых в ОП1 - ОП3, НО1 и НО2, дБ; a_{pi} - потери в i -том разъеме, дБ; a_{24} - потери разделения в НО1.

Для времени задержки выходного импульса в данной оптической схеме справедливо:

$$t_{321} = \frac{L_1 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}, \quad (25)$$

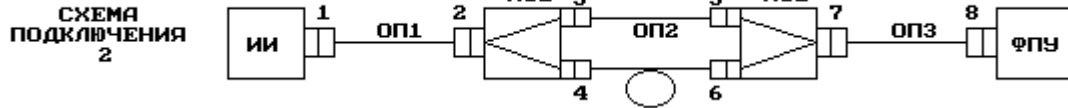
где L и V_g - длина исследуемого ВС (км) и скорость распространения света в нем (км/с), L_{23} , L_{57} - длины соответствующих плеч направленных ответвителей, км.

Для затухания выходного импульса справедливо:

$$a_{21} = \alpha_1(L_1 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23} + \alpha L, \quad (26)$$

где α - коэффициент затухания исследуемого ВС, дБ/км; α_{23} - потери разделения в НО1.

Схема подключения 2.



Для времени задержки входного импульса можно записать:

$$t_{312} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}}{V_{g1}}. \quad (27)$$

Затухание входного импульса в данной схеме определяется формулой:

$$a_{12} = \alpha_1(L_1 + L_2 + L_3 + L_{23} + L_{57}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p3} + a_{p5} + a_{p7} + a_{p8} + a_{23}. \quad (28)$$

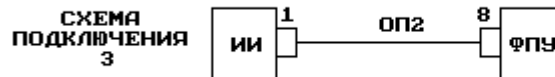
Время задержки выходного импульса в данной схеме можно определить по формуле:

$$t_{322} = \frac{L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}}{V_{g1}} + \frac{L}{V_g}. \quad (29)$$

Затухание выходного импульса в данной схеме определяется формулой:

$$a_{22} = \alpha_1(L_1 + L_3 + L_{24} + L_{67}) + a_{p1} + a_{p2} + a_{p4} + a_{p6} + a_{p7} + a_{p8} + a_{24} + \alpha L. \quad (30)$$

Схема подключения 3.



Для времени задержки импульса в третьей схеме справедливо

$$t_{313} = \frac{L_2}{V_{g1}}. \quad (31)$$

Затухание импульса можно определить по формуле:

$$a_{13} = \alpha_1 L_2 + a_{p1} + a_{p8}. \quad (32)$$

6.3. Определение длины и затухания ВС

Рассмотрим разность $t_{321} - t_{312}$. Из (18) и (20) с учетом (24) получим:

$$t_{321} - t_{312} = \frac{L}{V_g} - \frac{L_2}{V_{g1}} = \frac{L}{V_g} - t_{313} \quad (33)$$

Отсюда путем очевидных преобразований получаем:

$$L = (t_{321} - t_{312} + t_{313}) \cdot V_g \quad (34)$$

В лабораторной работе Вы измеряете амплитуды входного и выходного импульсов в двух оптических схемах, т. е. величины:

$$U_{m1}^{1cx} = U_{m0} 10^{-\frac{a_{11}}{10}} \quad U_{m2}^{1cx} = U_{m0} 10^{-\frac{a_{21}}{10}}$$

$$U_{m1}^{2cx} = U_{m0} 10^{-\frac{a_{12}}{10}} \quad U_{m2}^{2cx} = U_{m0} 10^{-\frac{a_{22}}{10}} \quad (35)$$

где U_{m0} - амплитуда импульса, формируемого на выходе источника излучения.

Эти величины следует пересчитать в затухание:

$$a_1 = 10 \lg \frac{U_{m1}^{1cx}}{U_{m2}^{1cx}} \quad a_2 = 10 \lg \frac{U_{m1}^{2cx}}{U_{m2}^{2cx}} \quad (36)$$

С учетом выражений (26), (28), (30), (32) получим:

$$a_1 = a_{21} - a_{11} = (a_{p3} - a_{p4}) + (a_{p5} - a_{p6}) + \alpha_1 L_2 + \alpha L + \alpha_1 (L_{23} - L_{24}) + \alpha_1 (L_{57} - L_{67}) + (a_{23} - a_{24}) + (a_{57} - a_{67})$$

$$a_2 = a_{22} - a_{12} = (a_{p4} - a_{p3}) + (a_{p6} - a_{p5}) - \alpha_1 L_2 + \alpha L + \alpha_1 (L_{24} - L_{23}) + \alpha_1 (L_{67} - L_{57}) + (a_{24} - a_{23}) + (a_{67} - a_{57})$$

Складывая полученные таким образом величины, получаем:

$$a_1 + a_2 = 2\alpha L = 2a_{BC} \quad (37)$$

или, что то же самое:

$$a_{BC} = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (38)$$

6.4. Определение уширения импульса и межмодовой дисперсии ВС

В лабораторной работе Вы измеряете длительности оптического импульса на входе t_1 и выходе t_2 ВС в двух оптических схемах. Уширение импульса можно определить по выражению:

$$\Delta t = \frac{(t_2 - t_1)_{1cx} + (t_2 - t_1)_{2cx}}{2} \quad (39)$$

Межмодовая дисперсия определяется как уширение импульса на 1 км ВС, то есть может быть рассчитана по выражению:

$$D_m = \frac{\Delta t}{L} \quad (40)$$

Выполнение работы.

1. Изучите материал разделов «Теоретические сведения», «Структурная схема лабораторной установки» и «Анализ оптической схемы. Экспериментальное определение длины ВС».

2. Заполните те ячейки таблицы 1 в столбце Исходные данные, которые соответствуют номеру Вашего варианта. Для получения этих данных нажмите клавишу F2. Остальные ячейки таблицы 1 будут заполнены позже в п. 5.

3. Вернитесь в методические указания (клавиша Del).

Таблица 1

Исходные данные							Результаты расчета				
Процент GeO ₂ в	λ , МКМ	n_{10}	n_2	$dn_{10} / d\lambda$	$d\Delta / d\lambda$	q	n_{10g}	V_g , КМ/С	p	$q_{опт}$	$D_{M \min}$,

сердце- вине ВС												ПС/КМ
8.1	0.85											
	1.3											
11.0	0.85											
	1.3											
13.1	0.85											
	1.3											

3. Перейдите в программе на страницу «Экран осциллографа» (клавиша F4). Для входного и выходного импульсов измерьте по экрану осциллографа время задержки. Для проведения этих измерений необходимо установить начало переднего фронта импульса на середину экрана осциллографа. Измерения провести на длинах волн 0.85 и 1.3 мкм в трех оптических схемах при длительности импульса $t_{и} = 1$ нс. Результаты занесите в таблицу 2.

Рассчитайте по данным измерений длину ВС L и занесите ее в соответствующую графу таблицы 2

Таблица 2

Дли- тель- ность им- пуль- са, нс	λ , мкм	Но- мер схемы	t_{31} , мкс	t_{32} , мкс	L , км
1	0.85	1	-		
		2		-	
		3		-	
	1.3	1	-		
		2		-	
		3		-	

4. Проведите экспериментальное исследование зависимости затухания и дисперсии ВС от длительности импульса. Для указанных в таблице 3 длительностей импульса измерьте по экрану осциллографа амплитуды и длительности (по «подошве») входного и выходного импульсов. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Рассчитайте по результатам измерений уширение импульса Δt , межмодовую дисперсию D_m , затухание a_{bc} и коэффициент затухания α_{bc} . Результаты расчета занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Длительность импульса, нс	λ , мкм	№ схемы	Эксперимент				Расчет			
			U_{m1} , В	U_{m2} , В	t_1 , нс	t_2 , нс	Δt , нс	D_m , нс/кМ	$a_{вс}$, дБ	$\alpha_{вс}$, дБ/кМ
1	0.85	1								
		2								
3	0.85	1								
		2								
10	0.85	1								
		2								
30	0.85	1								
		2								
1	1.3	1								
		2								
3	1.3	1								
		2								
10	1.3	1								
		2								
30	1.3	1								
		2								

5. Проведите экспериментальное исследование зависимости затухания и дисперсии ВС от показателя степенного профиля. Для указанных в таблице значений показателя профиля q измерьте по экрану осциллографа амплитуду U_{m2} и длительность t_2 выходного импульса. Занесите результаты измерений в таблицу 4. В графу «форма» таблицы 4 занесите упрощенное изображение выходного импульса.

Все измерения проводятся в схеме 1 при длительности импульса 1 нс для двух источников излучения, работающих на длинах волн 1.3 и 0.85 мкм и трех вариантов химического состава сердцевины ВС. При изменении химического состава необходимо вернуться на страницу исходных данных и заполнить соответствующие строки таблицы 1.

6. Для каждого из химических составов сердцевины ВС на двух длинах волн определите оптимальное значение показателя степенного профиля $q_{\text{опт}}$. Для этого проанализируйте полученные значения t_2 и U_{m2} . $q_{\text{опт}}$ следует искать вблизи тех значений показателя степенного профиля, при которых получена минимальная длительность выходного импульса t_2 . Экспериментально определенное значение $q_{\text{опт}}$ занесите в последнюю графу таблицы 4. Для этого значения показателя степенного профиля измерьте амплитуду U_{m2} и длительность t_2 выходного импульса. Результаты измерений занесите в графу $q_{\text{опт}}$ таблицы 4.

Поскольку зависимость межмодовой дисперсии от показателя степенного профиля имеет острый минимум при $q = q_{\text{опт}}$ (рис. 8), установите несколько значений q , вблизи оптимального, и проведите для них измерения амплитуды U_{m2} и длительности t_2 выходного импульса. Результаты занесите в пустые графы таблицы 4.

7. Для каждого значения показателя степенного профиля в таблице 4 по результатам измерений рассчитайте межмодовую дисперсию и коэффициент затухания ВС. Необходимую для расчета длительность входного импульса возьмите из таблицы 3. Результаты расчетов занесите в таблицу 4.

8. По исходным данным из таблицы 1 рассчитайте групповой показатель преломления n_{10g} , групповую скорость V_g , параметр внеосевой дисперсии p , оптимальный показатель степенного профиля $q_{\text{опт}}$ и минимально достижимую межмодовую дисперсию $D_{\text{м. min}}$. Сравните последние два параметра с экспериментально определенными в п. 6-7.

13.1	t_2 , нс											Q_{онт} =
	U_{m2} , В											
	форма											
	D_M , нс/км											
	$\alpha_{вс}$, дБ/км											

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Теоретический расчет по п. 8 раздела «Выполнение работы» с указанием всех использованных формул и комментариями.
2. Заполненную таблицу 1.
3. Таблицу 2 с результатами измерений и расчета длины ВС.
4. Таблицу 3 с результатами измерений и расчетов.
5. Графики зависимостей $D_M(t_{и})$ и $\alpha_{вс}(t_{и})$ для двух источников излучения с длинами волн 0.85 и 1.3 мкм, построенные по таблице 3.
6. Таблицу 4 с результатами измерений и расчетов.
7. Графики зависимостей $D_M(q)$ и $\alpha_{вс}(q)$ для двух источников излучения с длинами волн 0.85 и 1.3 мкм при трех вариантах химического состава сердцевины ВС, построенные по таблице 4.
8. Формулы и комментарии, относящиеся к обработке результатов измерений в таблицах 2-4.
9. Выводы.

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

«Исследование характеристик многомодовых волоконных световодов с усеченным степенным профилем». Вариант № _____

1. Параметры для теоретического расчета.

Процент GeO ₂ в сердцевине ВС	Длина волны λ , мкм	$\lambda = 0.85$	$\lambda = 1.30$
8.1	Показатель преломления n_{10}		
	Показатель преломления n_2		
	Значение производной $dn_{10} / d\lambda$		
	Значение производной $d\Delta / d\lambda$		
11.0	Показатель преломления n_{10}		
	Показатель преломления n_2		
	Значение производной $dn_{10} / d\lambda$		
	Значение производной $d\Delta / d\lambda$		
13.1	Показатель преломления n_{10}		
	Показатель преломления n_2		
	Значение производной $dn_{10} / d\lambda$		
	Значение производной $d\Delta / d\lambda$		
Показатель степенного профиля q			

2. Экспериментальное определение длины ВС.

Длительность импульса, нс	λ , мкм	Номер схемы	t_{31} , мкс	t_{32} , мкс
1	0.85	1	-	
		2		-
		3		-
	1.3	1	-	
		2		-
		3		-

3. Экспериментальное определение зависимости затухания и дисперсии от длительности оптического импульса

Длительность импульса, нс	λ , мкм	Схема	U_{m1} , В	U_{m2} , В	t_1 , нс	t_2 , нс
1	0.85	1				
		2				
3	0.85	1				
		2				
10	0.85	1				
		2				
30	0.85	1				
		2				

Дли- тель- ность им- пуль- са, нс	λ , мкм	Схема	U_{m1} , В	U_{m2} , В	t_1 , нс	t_2 , нс
	1.3	1				
		2				
3	1.3	1				
		2				
10	1.3	1				
		2				
30	1.3	1				
		2				

3. Экспериментальное определение зависимости затухания и дисперсии от показателя степенного профиля

Процент GeO ₂ в серд- цевине ВС	λ , мкм	Пока- за-тель про- филя q	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	Q_{opt}			
8.1	0.8 5	t_2 , нс							Q_{opt} =			
		U_{m2} , В										
		форма										
11.0		0.8 5	t_2 , нс							Q_{opt} =		
			U_{m2} , В									
			форма									
13.1			0.8 5	t_2 , нс							Q_{opt} =	
				U_{m2} , В								
				форма								
8.1	1.3			t_2 , нс							Q_{opt} =	
				U_{m2} , В								
				форма								
11.0		1.3		t_2 , нс							Q_{opt} =	
				U_{m2} , В								
				форма								
13.1			1.3	t_2 , нс							Q_{opt} =	
				U_{m2} , В								
				форма								

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

«Расчет первичных и вторичных параметров передачи симметричного кабеля»

Цель занятия:

- углубление знаний по расчету первичных параметров передачи симметричного кабеля и расчету вторичных параметров передачи симметричной кабельной цепи;
- выработка практических навыков по расчету первичных параметров передачи симметричного кабеля и расчету вторичных параметров передачи симметричной кабельной цепи;
- выработка навыков самостоятельного обобщения экспериментального материала, формулирования выводов.

Учебные вопросы:

1. Расчет первичных параметров передачи симметричного кабеля
2. Расчет вторичных параметров передачи симметричной кабельной цепи;

Расчет вторичных параметров передачи симметричной кабельной цепи

Коэффициент распространения цепи, 1/км, определяется по формуле:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (1)$$

где α - коэффициент затухания, Нп/км; β - коэффициент фазы, рад/км.

Расчет α и β по формуле (1) предусматривает операции с комплексными числами и весьма трудоемок, поэтому в области высоких частот ($f > 30$ кГц), когда $\omega L/R > 3,5$, расчет можно проводить по упрощенным формулам.

Коэффициент затухания, дБ/км, и *коэффициент фазы*, рад/км, рассчитываются по формулам:

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_A = \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \cdot 8,69, \quad (2)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}, \quad (3)$$

где α_M – составляющая затухания за счет потерь в металле; α_D – составляющая затухания за счет потерь в диэлектрике.

Волновое сопротивление цепи, Ом, определяется по формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_B| e^{-j\varphi_B}, \quad (4)$$

В области высоких частот, когда $\omega L/R > 3,5$, волновое сопротивление, Ом, определяется по формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

Скорость распространения электромагнитной волны, с/км, определяется по формуле:

$$V = \frac{\omega}{\beta}, \quad (6)$$

при $\omega L/R > 3,5$

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (7)$$

Время распространения электромагнитной волны t_p , с/км, - величина, обратная скорости распространения.

ПРИМЕР 1

Определить первичные и вторичные параметры симметричного кабеля МКС-4х4-1,2 с медными жилами и кордельно-полистирольной изоляцией на частоте 250 кГц.

Коэффициент укрутки $\chi = 1,02$; диаметр корделя $d_K = 0,8$ мм; толщина кордельной ленты $\Delta = 0,14$ мм; коэффициент $\psi = 0,64$, эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon = 1,25$; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta = 4 \cdot 10^{-4}$.

Дано:

МКС-4х4-1,2;

$d_0 = 1,2$ мм;

$f = 250$ кГц;

$\chi = 1,02$;

$d_K = 0,8$ мм;

$\Delta = 0,14$ мм;

$\Psi = 0,64$.

Определить:

R, L, C, G - ?

$\gamma = \alpha + j\beta$;

Z_B ; v_ϕ ; t_p - ?

Решение

Первичные параметры.

Сопротивление цепи постоянному току (1.2):

$$R_0 = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 0,01754 \cdot 1,02}{\pi \cdot 1,2^2} = 15,82 \text{ Ом/км};$$

потери в окружающих металлических массах (1.3), дополнительные потери в первом повиве четверок 7,5, внутри свинцовой оболочки – 14 (табл. 3):

$$R_M = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{250000}{2 \cdot 10^5}} = 24 \text{ Ом/км};$$

активное сопротивление симметричного кабеля (1.1):

$$R = 2 \cdot 15,82 \left[1 + 1,533 + \frac{5 \cdot 1,003 \cdot \left(\frac{1,2}{4,34} \right)^2}{1 - 0,59 \cdot \left(\frac{1,2}{4,34} \right)^2} \right] + 24 = 116,85 \text{ Ом/км},$$

где $p = 5$;

диаметр изолированной жилы:

$$d_1 = 1,2 + 2 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,14 = 3,08 \text{ мм};$$

расстояние между центрами жил при звездной скрутке:

$$a = 1,41 \cdot 3,08 = 4,34 \text{ мм};$$

коэффициент вихревых токов (табл. 1.1):

$$k = 21,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{250000} = 10,6 \text{ мм}^{-1};$$

$$kr = 10,6 \cdot 0,6 = 6,36;$$

функции $F(6,36) = 1,533$, $G(6,36) = 1,003$, $H(6,36) = 0,59$, $Q(6,36) = 0,436$;

индуктивность симметричного кабеля (1.4):

$$L = 1,02 \left[4 \cdot \ln \frac{4,34 - 0,6}{0,6} + 1 \cdot 0,436 \right] \cdot 10^{-4} = 0,79 \text{ мГн/км};$$

емкость симметричного кабеля (1.5):

$$C = \frac{1,02 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}{36 \cdot \ln \left(\frac{4,34}{0,6} - 0,64 \right)} = 23,9 \text{ нФ/км};$$

проводимость симметричного кабеля (1.7):

$$G = 6,28 \cdot 250000 \cdot 23,9 \cdot 10^{-9} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 15 \text{ мкСм/км}.$$

Вторичные параметры.

Коэффициент распространения, (1):

$$\gamma = (0,322 + j \cdot 6,77),$$

где коэффициент затухания и коэффициент фазы (2):

$$\alpha = \left(\frac{116,85}{2} \sqrt{\frac{23,9 \cdot 10^{-9}}{0,79 \cdot 10^{-3}}} + \frac{15 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{0,79 \cdot 10^{-3}}{23,9 \cdot 10^{-9}}} \right) \cdot 8,69 = 2,8 \text{ дБ/км};$$

$$\beta = 6,28 \cdot 250000 \cdot \sqrt{0,79 \cdot 10^{-3} \cdot 23,9 \cdot 10^{-9}} = 6,67 \text{ рад/км}$$

волновое сопротивление цепи (5):

$$Z_{\hat{A}} = \sqrt{\frac{0,79 \cdot 10^{-3}}{23,9 \cdot 10^{-9}}} = 181,8 \text{ Ом};$$

скорость распространения электромагнитной волны (7):

$$V = \frac{1}{\sqrt{0,79 \cdot 10^{-3} \cdot 23,9 \cdot 10^{-9}}} = 231000 \text{ км/с};$$

время распространения электромагнитной волны:

$$t_{\delta} = \frac{1}{231000} 4,32 \text{ мкс/км.}$$

Ответ: $R, L, C, G, Z_B, \gamma, V, t_p$.

Варианты задач:

Вариант 1

Определить первичные параметры симметричного кабеля МКС-4х4-1,4 с медными жилами и кордельно-полистирольной изоляцией на частоте 350 кГц.

Коэффициент укрутки χ - 1,02; диаметр корделя $d_K = 0,8$ мм; толщина кордельной ленты $\Delta = 0,14$ мм; коэффициент $\psi = 0,64$, эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon = 1,2$; тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-4}$.

Дано:

МКС-4х4-1,4;

$d_0 = 1,4$ мм;

$f = 350$ кГц;

$\chi = 1,02$;

$d_K = 0,5$ мм;

$\Delta = 0,11$ мм;

$\psi = 0,64$.

Определить: R, L, C, G - ?

$\Gamma = \alpha + j\beta$;

Z_B, V_{Φ}, t_p - ?

Вариант 2

Определить первичные параметры симметричного кабеля МКС-4х4-1,2 с медными жилами и кордельно-полистирольной изоляцией на частоте 200 кГц.

Коэффициент укрутки χ - 1,03; диаметр корделя $d_K = 0,7$ мм; толщина кордельной ленты $\Delta = 0,13$ мм; коэффициент $\psi = 0,6$, эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon = 1,25$; тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-4}$.

Дано:

МКС-4х4-1,2,;

$d_0 = 1,2$ мм;

$f = 200$ кГц;

$\chi = 1,03$;

$d_K = 0,7$ мм;

$\Delta = 0,13$ мм;

$\psi = 0,6$.

Определить: R, L, C, G - ?

$\Gamma = \alpha + j\beta$;

Z_B ; V_Φ ; t_p - ?

Вариант 3

Определить первичные параметры симметричного кабеля МКС-4х4-1,2 с медными жилами и кордельно-полистирольной изоляцией на частоте 300 кГц.

Коэффициент укрутки χ - 1,04; диаметр корделя $d_K = 0,6$ мм; толщина кордельной ленты $\Delta = 0,12$ мм; коэффициент $\psi = 0,55$, эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon = 1,25$; тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-4}$.

Дано:

МКС-4х4-1,2;

$d_0 = 1,2$ мм;

$f = 300$ кГц;

$\chi = 1,04$;

$d_K = 0,6$ мм;

$\Delta = 0,12$ мм;

$\psi = 0,55$.

Определить: R, L, C, G - ?

$\Gamma = \alpha + j\beta$;

Z_B ; V_Φ ; t_p - ?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

«Расчет параметров передачи коаксиальных кабелей»

Цель занятия:

- углубление знаний по расчету первичных и вторичных параметров передачи коаксиальных кабелей;
- выработка практических навыков по расчету первичных и вторичных параметров передачи коаксиальных кабелей;
- выработка навыков самостоятельного обобщения экспериментального материала, формулирования выводов.

Учебные вопросы:

2. Расчет первичных параметров передачи коаксиальных кабелей.
3. Расчет вторичных параметров передачи коаксиальных кабелей.

теоретические сведения

Активное сопротивление коаксиальной цепи, Ом/км, определяется по формуле:

$$R = R_A + R_B = \frac{k}{2\sqrt{2}\pi\sigma} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right), \quad (1)$$

где R_A, R_B — активное сопротивление, соответственно, внутреннего и внешнего проводников, Ом/км; r_a, r_b - диаметры, соответственно, внутреннего и внешнего проводников, мм; $k = \sqrt{\omega\mu_a\sigma}$ - коэффициент вихревых токов, 1/мм; f - частота, Гц.

Активное сопротивление кабеля с медными проводниками, Ом/км:

$$R = 4,18 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right).$$

Активное сопротивление кабеля с алюминиевыми проводниками, Ом/км:

$$R = 5,46 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right).$$

Индуктивность коаксиальной цепи, Гн/км, состоит из суммы внешней индуктивности между проводами $L_{внеш}$ и внутренней индуктивности проводников $L_A + L_B$.

Для медных проводников:

$$L = L_{\text{внеш}} + L_A + L_B = \left[2 \cdot \ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{66,6}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right) \right] \cdot 10^{-4}. \quad (2)$$

Для алюминиевых проводников

$$L = \left[2 \cdot \ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{86,44}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

Емкость коаксиальной цепи, Ф/км, определяется как емкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_{\dot{\gamma}} \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \ln \frac{r_b}{r_a}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\dot{\gamma}}$ - эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости комбинированной изоляции (табл. 1).

Проводимость изоляции коаксиальной цепи, См/км, определяется по формуле:

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta_{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

Таблица 1

Характеристики диэлектриков изоляции коаксиальных кабелей

Тип изоляции	$\varepsilon_{\dot{\gamma}}$	$\operatorname{tg} \delta_{\dot{\gamma}} \cdot 10^{-4}$ при частотах, кГц			
		1	5	10	60
Полиэтиленовая шайбовая	1,13	0,5	0,5	0,7	0,8
Полиэтиленовая спиральная	1,1	0,4	0,4	0,5	0,6
Баллонно-полиэтиленовая	1,22	1,2	1,3	1,5	-
Пористо-полиэтиленовая	1,5	2	3	3	-
Кордельно-полистирольная	1,19	0,7	0,8	1,0	1,2

Вторичные параметры передачи определяются по тем же формулам, что и для симметричного кабеля.

ПРИМЕР 1

Определить первичные и вторичные параметры коаксиальной пары кабеля ВКПАП-2,1/9,7 на частоте 500 кГц

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции из пористого полиэтилена равен $3,7 \cdot 10^{-4}$; эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости - 1,45.

Данный кабель имеет внутренний проводник из меди, а внешний - из алюминия.

Первичные параметры передачи определяются по формулам (1)-(5).

Активное сопротивление коаксиальной цепи, Ом/км, определяется по формуле (1.15).

Для внутреннего медного проводника:

$$R = 4,18 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} \left(\frac{1}{r_a} \right).$$

Для внешнего алюминиевого проводника:

$$R = 5,46 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} \left(\frac{1}{r_b} \right)$$

Полное активное сопротивление коаксиальной пары:

$$R = 4,18 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{500000} \cdot \frac{1}{1,05} + 5,46 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{500000} \cdot \frac{1}{4,85} = 36,12 \text{ Ом/км.}$$

Индуктивность коаксиальной цепи определяется по формулам (2)-(3):

$$L = \left[2 \cdot \ln \frac{4,85}{1,05} \frac{66,6}{\sqrt{500000}} \cdot \left(\frac{1}{1,05} \right) + \frac{86,44}{\sqrt{500000}} \cdot \left(\frac{1}{4,85} \right) \right] \cdot 10^{-4} = 0,317 \text{ мГн/км.}$$

Емкость коаксиальной цепи определяется по формуле (4):

$$C = \frac{1,45 \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \ln \frac{4,85}{1,05}} = 52,64 \text{ нФ/км.}$$

Проводимость изоляции коаксиальной цепи определяется по выражению (5):

$$G = 6,28 \cdot 500000 \cdot 52,64 \cdot 10^{-9} \cdot 3,7 \cdot 10^{-4} = 61,16 \text{ мкСм/км.}$$

Вторичные параметры передачи определяются по тем же формулам, что и для симметричного кабеля.

Коэффициент распространения определяется выражением (4):

$$\gamma = (0,236 + j \cdot 12,83),$$

где коэффициент затухания и коэффициент фазы (5) вычисляются по формулам:

$$\alpha = \left(\frac{36,12}{2} \sqrt{\frac{52,64 \cdot 10^{-9}}{0,317 \cdot 10^{-3}}} + \frac{61,16 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{0,317 \cdot 10^{-3}}{52,64 \cdot 10^{-9}}} \right) \cdot 8,69 =$$

$$= 2,05 \text{ дБ/км} = 0,236 \text{ Нп/км;}$$

$$\beta = 6,28 \cdot 500000 \cdot \sqrt{0,317 \cdot 10^{-3} \cdot 52,64 \cdot 10^{-9}} = 12,83 \text{ рад/км}$$

Волновое сопротивление цепи:

$$Z_{\hat{A}} = \sqrt{\frac{0,317 \cdot 10^{-3}}{52,64 \cdot 10^{-9}}} = 77,6 \text{ Ом};$$

Скорость распространения электромагнитной волны:

$$V = \frac{1}{\sqrt{0,317 \cdot 10^{-3} \cdot 52,64 \cdot 10^{-9}}} = 245000 \text{ км/с};$$

Время распространения электромагнитной волны:

$$t_{\delta} = \frac{1}{245000} = 4,084 \text{ мкс/км.}$$

Ответ: $R, L, C, G, Z_B, \gamma, V, t_p$.

Варианты задач:

Вариант 1

Определить первичные и вторичные параметры коаксиальной пары кабеля ВКПАП-2/9 на частоте 400 кГц.

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции из пористого полиэтилена равен $3 \cdot 10^{-4}$; эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости - 1,4.

Данный кабель имеет внутренний проводник из меди, а внешний - из алюминия.

Вариант 2

Определить первичные и вторичные параметры коаксиальной пары кабеля ВКПАП-1,9/8,3 на частоте 600 кГц.

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции из пористого полиэтилена равен $4,7 \cdot 10^{-4}$; эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости - 1,35.

Данный кабель имеет внутренний проводник из меди, а внешний - из алюминия.

Вариант 3

Определить первичные и вторичные параметры коаксиальной пары кабеля ВКПАП-2,5/9,5 на частоте 500 кГц.

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции из пористого полиэтилена равен $3,5 \cdot 10^{-4}$; эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости - 1,55.

Данный кабель имеет внутренний проводник из меди, а внешний - из алюминия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.А. Временные характеристики кабельных линий связи. – М.: Радио и связь, 1986. – 104 с., ил.
2. Бабкин А.Н. Защищенные системы связи ОВД: учебное пособие / А.Н. Бабкин, С.Н. Хаустов, В.С. Зарубин // Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2009. – 91 с.
3. Будылдина Н.В. Сетевые технологии высокоскоростной передачи данных. Учебное пособие для вузов / Н.В. Будылдина, В.П. Шувалов // – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 342 с.: ил.
4. Гордиенко В.Н. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия – Телеком. 2005 г. – 248 с.
5. Жайворонок Д.А. Системы и сети передачи информации: Учеб. пособие для вузов. // М.: Радио и связь, 2013. – 112 с.
6. Костров Б.В. Телекоммуникационные системы и вычислительные сети М.: ТЕХБУК, 2006. – 213 с.
7. Крухмалёв В.В. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: учебник для вузов / В.В. Крухмалёв, Н.В. Гордиенко, А.Д. Моченов и др.; под. ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалёва / – М.: Горячая линия – Телеком, 2004 г.
8. Ксенофонтов, С.Н. Направляющие системы электросвязи: учебное пособие для вузов / С.Н. Ксенофонтов, Э.Л. Портнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004, – 268 с.: ил.
9. Фриман Р.А. Волоконно-оптические системы связи. 3-е дополнительное издание. М.: Техносфера, 2006 – 496 с.