

Федеральное агентство по образованию  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО–ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В. Л. Величанский, В. К. Егоров

Лабораторный практикум  
«ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ  
ЛИНИЯ СВЯЗИ»

*Рекомендовано УМО «Ядерная физика и технологии»  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2008

УДК 681.068(075)  
ББК 32.889я7  
В27

Величанский В.Л., Егоров В.К. **Лабораторный практикум «Волоконно-оптическая линия связи»** – М.: МИФИ, 2008. – 80 с.

Пособие содержит описание учебной лабораторной работы по измерению важнейших характеристик оптоволоконной линии связи на основе многомодовых оптических волокон, применяемых в локальных сетях. Описанию работы предшествует развернутое теоретическое введение, нужное для первоначального ознакомления студентов с основами волоконной оптики и оптоволоконной связи. Приведен краткий обзор структур современных систем связи, описаны важнейшие свойства оптических волокон, основные методы измерения оптических параметров волокон, некоторые структурные элементы и устройства волоконной линии связи.

Пособие предназначено для студентов инженерно-физических специальностей старших курсов, в первую очередь для специальности «Лазерная физика». Работа входит в лабораторный практикум по курсу «Физическая оптика» для студентов 4-го курса специальности «Лазерная физика». Данное пособие может быть полезно как введение в курс «Оптоэлектроника» и дополнение к курсам информационной оптики и техники оптико-физического эксперимента.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент доцент В. Б. Ошурко

ISBN 978–5–7262–0865–7

© Московский инженерно–физический институт  
(государственный университет), 2008

Редактор *Е.Н. Кочубей*

---

Подписано в печать 01.09.2008.

Формат 60×84 1/16

Объем 5,0 п.л.

Уч.-изд. л. 5,0.

Тираж 120 экз.

Изд. № 3/12.

Заказ №

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет). 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

Типография издательства «Гронтант». г. Троицк Московской области

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

---

*Цель работы:* изучение физических механизмов, определяющих важнейшие характеристики линии связи: дальность и пропускную способность.

### ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

#### Достоинства оптической связи

Одним из наиболее весомых и практически важных достижений квантовой электроники стало развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и различных систем связи на их основе. Давно признаны важнейшие достоинства ВОЛС:

- исключительно высокая скорость передачи информации;
- непревзойденная информационная пропускная способность;
- большая длина единичного безретрансляционного звена (до 120 км);
- почти идеальная помехозащищенность;
- на порядок меньшие объем и вес оптических кабелей по сравнению с обычными при той же пропускной способности,
- отсутствие дефицитных цветных металлов (1 г стекла заменяет 10 кг меди).

На этот качественно новый уровень технику связи подняли успехи волоконной оптики, прежде всего, улучшение прозрачности материалов для оптических волокон, почти достигшее теоретического предела. С другой стороны, создание современных ВОЛС было бы немыслимо без создания полупроводниковых инжекционных лазеров (ИЛ), работающих в режиме непрерывного излучения при комнатной температуре. Достоинства оптического волокна как передающей среды удачно сочетаются с такими преимуществами ИЛ, как высокая эффективность преобразования электрической энергии в когерентное излучение, высокая достижимая частота модуляции, очень малые размеры, низковольтное питание, возможность перестройки частоты.

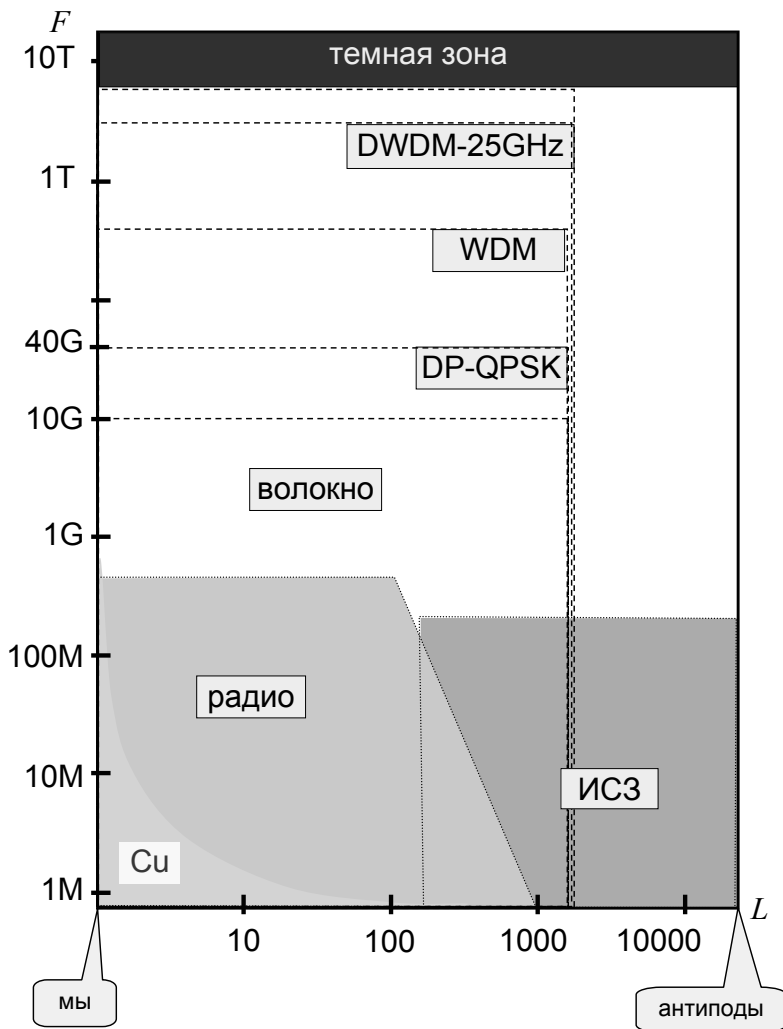


Рис. 1. Пропускная способность ( $F$ , бит/с) и дальность ( $L$ , км) систем связи в пересчете на одну физическую линию

Главное преимущество любых оптических линий связи – высокая несущая частота. Например, у инжекционных лазеров на основе GaAlAs несущая частота  $\nu \approx 350$  ТГц. Использование для передачи информации полосы частот в 0,1% от  $\nu$  ( $\approx 350$  ГГц) может

обеспечить огромную информационную пропускную способность канала связи. Для сравнения, в этот диапазон теоретически можно упаковать  $4 \cdot 10^5$  каналов телевидения (практически – на порядок меньше, но и эта цифра гораздо больше, чем количество национальных и континентальных ТВ каналов).

Существуют открытые и закрытые линии оптической связи. В наземных условиях связь на открытых линиях малоэффективна и неустойчива из-за рассеяния в атмосфере. Открытые линии можно применять для связи между космическими аппаратами.

Наибольшее практическое значение приобрели закрытые линии связи, у которых канал передачи излучения защищен от внешней среды, и прежде всего те, где передающей средой служат волокна с малыми потерями. Потери энергии в ВОЛС на порядки ниже, чем в любых иных линиях связи. В современных волокнах затухание не превышает:

- 2 дБ/км для длины волны 0,85 мкм;
- 0,5 дБ/км для 1,3 мкм;
- 0,2 дБ/км для 1,55 мкм.

Напомним, что отношение двух величин, выраженное в децибелах, равно разности их десятичных логарифмов, умноженной на 10 (для удобства); затухание 3 дБ равносильно уменьшению мощности в 2 раза, 10 дБ – в 10 раз. Кроме того, в децибелах выражают относительные уровни мощности, очень часто – по отношению к начальному уровню 1 мВт. В таком представлении 20 дБм означает 100 мВт, –6 дБм – это 0,25 мВт.

Для наглядности укажем, что при уровне потерь 0,2 дБ/км интенсивность излучения уменьшится в 10 раз после прохождения 50 км волокна. Для качественной трансляции телевидения на 100 км нужен передатчик мощностью в сотни ватт, а в волокне той же протяженности эти же сигналы несет излучение мощностью около 3 мВт. В существующих сетях Ethernet 10 GigE допустима длина проводной линии до 15 м, а в сетях нового поколения 10 GigE (10G BASE-T) она может вырасти до 100 м, но и это достаточно только для компактных локальных сетей и для небольших территорий. При этом медный кабель для 10G BASE-T дороже, чем волокно. Эффективность передачи энергии сигналов в широкой полосе частот, достигнутую в ВОЛС, невозможно получить иными техническими средствами.

Без преувеличения можно утверждать, что дальнейшее расширение возможностей наземной связи на всех уровнях полностью зависит от развития инфраструктур волоконной связи. Сегодня волоконные линии – техническая основа систем связи мегаполисов и регионов, и Москва служит рядовым примером инфраструктуры таких масштабов (MAN, Metropolitan Area Network). ВОЛС вытесняют проводные линии связи из инфраструктуры INTERNET выше локального уровня. Например, в МИФИ компьютеры в составе локальных сетей связаны коаксиальными кабелями и проводными линиями UTP между собой и с терминалами в отдельных корпусах, а терминалы связаны между собой и с глобальной сетью при помощи ВОЛС. Сети таких масштабов, интегрирующие локальные сети, относят к категории Campus Area Network (CAN).

Волоконная связь, вначале приняв на себя информационные потоки телефонии, кабельного телевидения и INTERNET, ныне передает и потоки цифрового телевидения. Промышленно развитые страны приступили к исполнению национальных программ «Волокно в дом», доводя развитие инфраструктур быстрой двухсторонней многоканальной связи до логического завершения.

### **Структуры систем оптоволоконной связи**

Основной структурный элемент системы оптоволоконной связи – одноканальная ВОЛС. Ее называют симплексной, если по ней передают один оптический сигнал в одном направлении (рис. 2, а). Волокно в составе симплексной ВОЛС может передавать два оптических сигнала во встречных направлениях. В ней на обеих сторонах должны быть оптические волоконные разветвители или направленные ответвители. Такую линию мы условно назовем полудуплексной. Полнодуплексной линией называют пару симплексных линий, работающих на встречных направлениях между одной парой корреспондентов.

Через один канал ВОЛС можно передавать один или несколько независимых информационных потоков, физически объединенных в общий групповой поток данных в передатчике и разделяемых на приемной стороне в соответствии с установленным протоколом связи, как и в проводных линиях связи Ethernet и др.

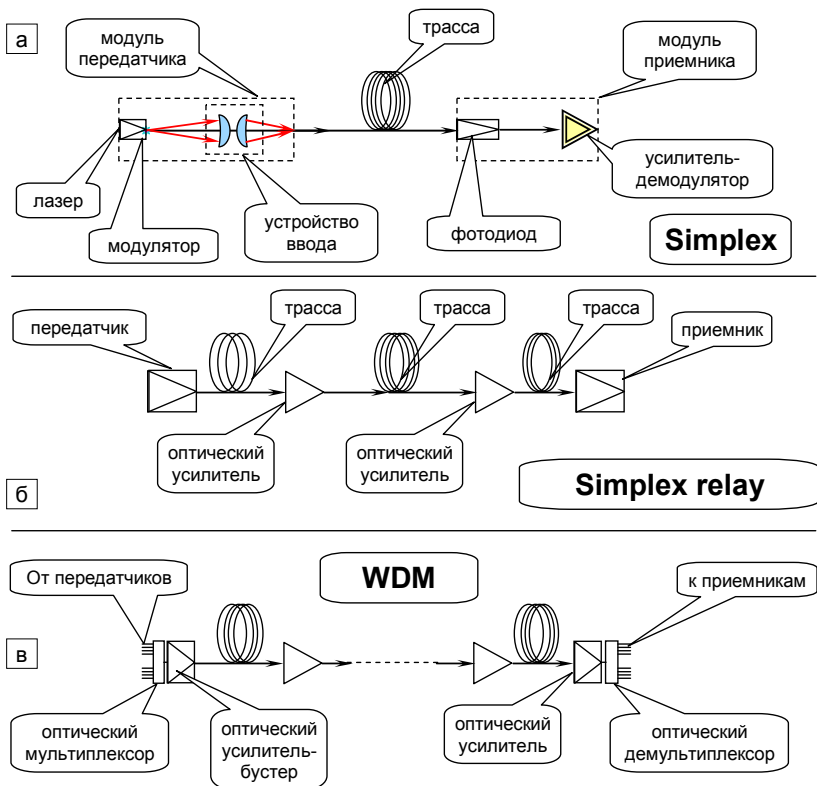


Рис. 2. Структуры типовых волоконно-оптических линий связи:  
*а* – симплексная однопролетная, развернутая схема;  
*б* – симплексная многопролетная, с промежуточными усилителями;  
*в* – мультиплексная многопролетная, WDM, с промежуточными оптическими усилителями. Протяженные трассы условно показаны в виде катушек

Одноканальная симплексная ВОЛС содержит:

- 1) излучатель оптического диапазона, по преимуществу лазер;
- 2) модулятор, изменяющий амплитуду, частоту или фазу колебаний в соответствии с передаваемой информацией;
- 3) устройство ввода излучения в оптическое волокно;
- 4) собственно волоконную линию;
- 5) приемник, чаще всего с быстродействующим фотодиодом.

Излучатель, устройство ввода и модулятор вместе образуют передатчик; в современных ВОЛС все три компонента обычно интег-

рированы в один модуль. Волоконная линия как компонент, соединяющий приемник и передатчик, служит каналом связи.

В состав приемной части ВОЛС явно или неявно входят электронные устройства, выделяющие из электрических сигналов фотодиода информацию в аналоговом или цифровом виде. Процедура выделения информации соответствует процедуре ее кодирования в модуляторе на передающей стороне. Изучение процедур кодирования и декодирования оптических сигналов – предмет курсов информационной и статистической оптики.

Особую роль в современной волоконной связи приобрели *мультиплексные* линии связи (рис. 2, в), где несколько логически независимых потоков информации объединены в одном волокне. Среди возможных вариантов важнейший – частотное мультиплексирование. Его же называют многоволновым уплотнением, спектральным уплотнением, уплотнением с разделением по длинам волн и т.п. Стандартами волоконной связи установлены основные протоколы мультиплексирования, перечисленные далее (рис. 3).

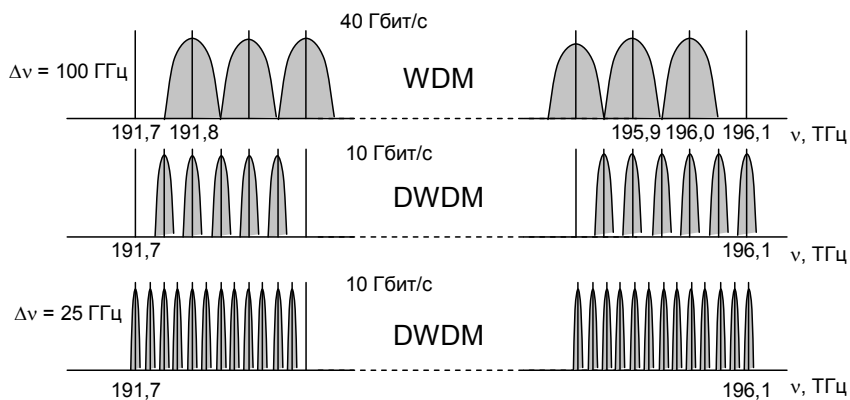


Рис. 3. Частотные каналы WDM, DWDM и допустимые спектры сигналов

WDM, Wavelength Division Multiplexing – 41 частотный канал с расстоянием между несущими частотами сигналов 100 ГГц, от 192,1 ТГц до 196,1 ТГц.

DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing – число каналов в том же диапазоне увеличено в 2 раза при сокращении расстояния



между несущими до 50 ГГц. В будущем возможно еще одно удвоение числа каналов при интервале между ними 25 ГГц.

CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing – расстояние между каналами не менее 10 нм, в рабочем диапазоне их не более 4...5. Протокол CWDM разработан для сильно разветвленных сетей городов, где возникают потребности в оперативных перенаправлениях потоков, реорганизации трафика в условиях, когда WDM – решения слишком дороги и функционально избыточны.

Системы WDM и DWDM выявляют свои преимущества на магистралах, где маршруты потоков зафиксированы, и каналы связи закреплены за постоянными корреспондентами.

### **Информационная пропускная способность линии связи**

Максимальную протяженность линии между передатчиком и приемником ограничивают потери энергии (*затухание* сигнала) и *дисперсия*, то есть расплывание, размывание, деградация светового импульса по мере его движения в среде (рис. 4). Упомянув дисперсию как наблюдаемое *явление*, позже мы приведем более точные определения и объяснения его физических причин.

Объем информации, передаваемый через однородный участок ВОЛС (информационная пропускная способность, ИПС), зависит от длины этого участка. При заданной длине линии ее ИПС ограничена потерями. Для сохранения заданного отношения сигнал/шум на выходе трассы с погонным затуханием  $\alpha$  и длиной  $L$  линейное затухание  $A = \exp(-\alpha L)$  нужно увеличить время усреднения сигнала в  $A$  раз, что сохранит его энергию на прежнем уровне. Тем самым будет ограничен минимальный интервал времени между импульсными сигналами и максимальная ширина спектра боковых частот модулированного сигнала. Поэтому максимально достижимая полоса пропускания линии экспоненциально убывает при увеличении длины трассы. Такой подход к определению максимальной полосы пропускания трассы можно назвать энергетическим, или шумовым. В соответствии с ним полоса пропускания линии связи  $\delta f$ , ограниченная заданным энергетическим соотношением

ем сигнал/шум на выходе  $SN_o$  при полосе пропускания приемника  $\delta F$ :

$$\delta f < (SN_i/SN_o) \exp(-\alpha L) \delta F,$$

где  $SN_i$  – отношение сигнал/шум на входе приемника при отсутствии потерь на линии. Повысить  $SN_i$ , то есть компенсировать потери увеличением мощности передатчика ВОЛС практически невозможно, так как превышение предельной мощности (3...6 дБм) приводит к искажениям сигналов, особенно пагубным в линиях WDM.

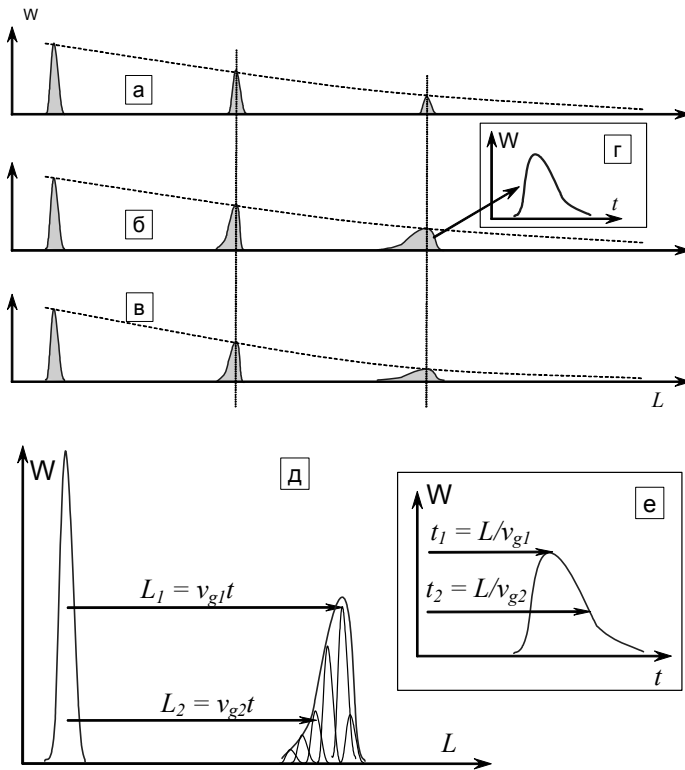


Рис. 4. Изменения формы импульсов при движении по волокну: *а* – затухание без дисперсии, *б* – дисперсия без затухания, *в* – дисперсия с затуханием, *г* – осциллограмма импульса, *д* – групповая дисперсия в пространственном представлении, *е* – групповая дисперсия во временном представлении;  $W$  – мощность,  $L$  – расстояние от начала линии,  $t$  – время

Не менее важен и другой фактор ограничения ИПС ВОЛС – *дисперсия*, расплывание импульсного сигнала при его распространении по трассе. Импульс по мере его перемещения удлиняется во времени, теряет отчетливо выраженный максимум, его пиковая мощность падает. При этом потери энергии за счет рассеяния и поглощения могут быть ничтожными; энергия лишь рассредоточивается по все большему интервалу времени (и по более протяженному участку линии).

Дисперсия совместно с истинным затуханием (потерями энергии) накладывают *энергетическое* ограничение на длину ВОЛС; оно проявляется как снижение пиковой мощности импульса на выходе при удлинении трассы. Практически, при этом падает энергия в ограниченном интервале времени, которая представляет собой полезный импульсный сигнал. Удлинив этот интервал времени в приемном устройстве, можно увеличить и энергию электрического сигнала на выходе ВОЛС, но темп передачи информации при этом придется уменьшить. Дисперсия уменьшает полосу пропускания тракта  $\delta f$  при заданном отношении  $SN_0$ , а при фиксированной полосе пропускания  $\delta F$  – снижает отношение  $SN_0$ . Для учета влияния дисперсии на фоне потерь применяют показатель «*энергетический штраф*», т.е. дополнительное ухудшение отношения сигнал/шум, принесенное дисперсией групповой задержки. Энергетический штраф выражают в логарифмических единицах – децибелах (дБ), и в таком представлении он пропорционален логарифму длины линии. Напомним, что логарифм затухания пропорционален длине линии. На практике приемлемыми считают энергетические штрафы до 1 дБ.

Для передачи информации необходима модуляция световой волны. Чем выше частота модуляции, чем короче передаваемые импульсы, тем шире спектр сигнала. Если в передатчике работает одночастотный лазер, и несущая частота сигнала жестко задана, то для передачи импульса длительностью  $\tau$  необходима спектральная полоса не менее  $\delta\omega \approx 1/\tau$ . Если сигнал сформирован модуляцией монохроматического излучения, то ширину его спектра  $\delta\omega$  задают вид и параметры модуляции.

В современных магистральных ВОЛС скорость передачи информации 10 Гбит/с, и поэтому в каждом канале WDM занята полоса частот не менее 10 ГГц (см. рис. 3). Такая «спектрально согласованная» модуляция, при которой для передачи импульса заданной длительности нужна минимальная полоса частот, необходима при частотном мультиплексировании для наиболее эффективного использования пропускной способности линии связи.

Длительность импульса сама по себе не задает ширину спектра сигнала, как и ширина спектра не задает длительности импульса. Если передатчиком служит светодиод, то спектральная ширина импульса немодулированного излучения может достигать 10 нм и более. Если импульс сформирован многомодовым лазером, то ширина огибающей спектра генерации может быть от 1 до 5 нм. Модулированное излучение таких источников представляет собой множество подобных по форме сигналов в широком диапазоне спектра на множестве несущих частот, дискретном (многомодовый лазер) или непрерывном (светодиод). На этом фоне уширение спектра, вызванное импульсной модуляцией, практически неощутимо. Поэтому светодиоды и многомодовые лазеры непригодны для мультиплексных линий, и работают только в симплексных линиях протяженностью не более километра. Длина симплексной линии, как и применимость широкополосных излучателей, ограничены дисперсией.

Во всякой материальной среде существует зависимость фазовой скорости волны от ее частоты. Ее называют временной, или хроматической дисперсией. Хроматическая дисперсия влечет за собой дисперсию групповой скорости и групповой задержки (приложение 3). Чем шире спектр сигнала, тем больше разность групповых задержек между крайними спектральными компонентами, формирующими импульс, тем заметнее дисперсия.

Оценивать влияние дисперсии на ширину полосы пропускания нужно иначе, чем влияние чистого затухания. Дисперсия групповой задержки пропорциональна длине линии; следовательно, максимально допустимый интервал между импульсными сигналами обратно пропорционален длине линии. С этой точки зрения, увели-

чение длины трассы в  $M$  раз сужает максимальную полосу пропускания в  $M$  раз даже без учета потерь энергии.

Из сказанного выше следует, что затухание может ограничивать пропускную способность ВОЛС сильнее, чем дисперсия. Компенсация затухания при помощи промежуточных усилителей мощности осложнена собственными шумами усилителей. Ухудшение отношения сигнал/шум при полностью некоррелированном шуме необратимо. Дисперсия, напротив, протекает как детерминированное поведение электромагнитной волны в стационарной среде, и поэтому в принципе обратима. Разработка технических методов компенсации дисперсии ВОЛС позволила отказаться от стремления к нулевой дисперсии, сосредоточив усилия на снижении потерь.

В волоконные системы дальней связи для снижения дисперсионных искажений можно вводить ретрансляторы, состоящие из приемника, формирователя стандартного сигнального импульса и передатчика. Ретрансляторы, включенные в разрывы между участками магистральной линии, компенсируют затухание и искажение импульса, пришедшего на приемник, и посылают на следующий отрезок магистрали сигнал почти того же качества, каким он был в пункте отправления. Такое техническое решение, иногда неизбежное, ныне признано нежелательным, прежде всего потому, что оптоэлектронные ретрансляторы не могут работать в линиях с частотным мультиплексированием. Поэтому разработчики систем ВОЛС стремятся заменять ретрансляторы полностью оптическими широкополосными усилителями бегущей волны и компенсаторами дисперсии, пригодными для мультиплексных линий.

При современном низком уровне потерь действующий стандарт связи и современное оборудование позволяют построить магистраль протяженностью до 640 км, состоящую из восьми участков по 80 км с затуханием до 22 дБ на каждом. В разрывах магистрали для компенсации потерь ставят оптические волоконные усилители бегущей волны, которые могут работать в системах с частотным мультиплексированием. При такой структуре магистраль в целом лучше всего защищена от внешних помех и требует наименьших затрат на аппаратуру и ее техническое обслуживание. В системы более дальней связи вводят пассивные волоконные компенсаторы

искажений; эти средства позволяют удлинить магистраль без ретрансляторов до 1500 км.

Исследования и разработки современных ВОЛС подчинены решению нескольких взаимосвязанных задач:

- увеличение допустимой длины оптической части при заданной пропускной способности одного частотного канала (минимум 10 Гбит/с, желательно 40 Гбит/с);

- увеличение скорости передачи данных до 160 Гбит/с и выше;

- увеличение пропускной способности одного волокна до 10 Тбит/с при длине порядка 100 км и преодоление барьера 1 Пбит·км/с в ВОЛС с частотным мультиплексированием;

- улучшение характеристик существующих линий за счет применения прогрессивных методов формирования, фильтрации и обработки оптических сигналов.

К нынешнему времени практически по всем показателям опытные образцы ВОЛС подошли к теоретическим границам возможного, и настала очередь интенсивного исследования новых физических принципов устройства ВОЛС.

### **Волоконный световод**

В основе работы неметаллического световода лежит полное внутреннее отражение на границе между световедущей сердцевиной и окружающей его средой. Простейший световод – прозрачный стержень из стекла или полимера, окруженный воздухом. В таких световодах свет рассеивается на загрязненной поверхности, поэтому применяемые в технике простые световоды обычно коротки (до 10...20 см).

Более совершенны волоконные световоды, где свет распространяется внутри сердцевины, окруженной материалом с меньшим, чем у сердцевины, показателем преломления. Сердцевина оптического волокна служит волноводом, в котором сосредоточена мощность переносимой им волны. Рассеяние света на отражающей границе очень мало, и при радиусе изгиба более 30 мм в тонких волокнах практически незаметно.

Особенно малые потери достигнуты в плавленом кварце высокой чистоты. На рис. 5 показан спектр поглощения в кварцевом световоде. Достоверные измерения столь малого затухания возможны только на волокнах длиной порядка десяти километров.

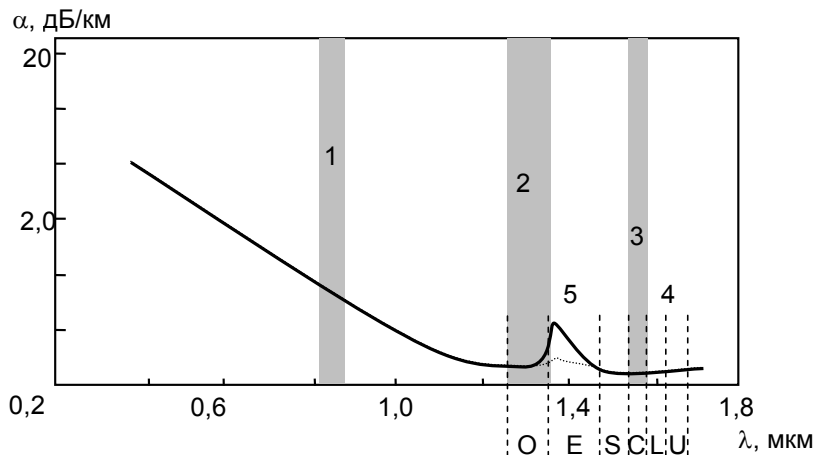


Рис. 5. Зависимость затухания излучения в кварцевом волоконном световоде от длины волны:

1, 2, 3 – основные окна прозрачности; 4 – дополнительное окно; 5 – дополнительное окно в волокне «AllWave» с подавленным пиком поглощения на ионах OH (1,4 мкм). Спектр поглощения волокна «AllWave» изображен тонким пунктиром. Границы диапазонов O...U указаны в табл. 1

Таблица 1

#### Диапазоны длин волн для дальней волоконной связи

Обозначение	Название	$\lambda$ , нм
O	Original	1260 - 1360
E	Extended	1360 - 1460
S	Short	1460 - 1530
C	Conventional	1530 - 1565
L	Long	1565 - 1625
U	Ultra-long	1625 - 1675

Чаще всего используют диапазоны длин волн 1,6...1,5; 1,3...1,2; 0,9...0,8 мкм. В так называемом первом окне прозрачности, 0,9...0,8 мкм, работают самые дешевые лазеры из GaAlAs, но здесь велики и потери, и дисперсия. Гораздо больше выгод для связи предоставляет область 1,2...1,7 мкм (см. рис. 5), где различают четыре *окна прозрачности* (в устаревших терминах), или шесть рабочих диапазонов (в современной терминологии, см. табл.1). В третьем окне, 1,6...1,5 мкм, достигнут абсолютный минимум потерь при небольшой дисперсии. Во втором окне, 1,3...1,2 мкм, возможен минимум дисперсии при достаточно малом поглощении. Развитие технологии очистки кварца позволило устранить досадный пик поглощения на примеси гидроксила (ОН<sup>-</sup>) около 1,4 мкм, добавив к названному пятое окно. В результате появились новые (безводные, «сухие») волокна «AllWave» и LEAF, где затухание одинаково мало во всех шести рабочих диапазонах (см. рис. 5, табл. 1). Возможность работать в четвертом окне (L, U-диапазоны) появилась после создания подходящих лазеров и фотоприемников, но в нем еще не назначены стандартизованные частотные каналы.

Диапазон 0,85 мкм был освоен первым; здесь работают лазеры на основе гетероструктур AlGaAs и фотоприемники из кремния (аппаратура наименьшей стоимости), длина линии не превышает километра, а скорость передачи 1...2 Гбит/с. Такие показатели приемлемы для симплексных и полудуплексных линий связи, когда важна защищенность линии связи от электромагнитных помех извне и от соседних каналов связи. Эти системы связи применяют в компьютерных сетях промышленных предприятий, университетов, бизнес-центров, прочих крупных учреждений. На объектах, насыщенных средствами связи, сбора данных, телеметрии и телеуправления – таких, как командные пункты, узлы связи, боевые корабли и специальные суда ВМС, самолеты разведки, аэробусы, – суммарная протяженность волокон превышает десятки километров. Сети подобных или меньших масштабов относят к категории Local Area Network (LAN).

Для диапазонов 1,3 и 1,55 мкм созданы лазеры на основе GaInPAs и фотоприемники на основе InAs. Ранее перспективным для дальней связи считали O-диапазон (1,3 мкм) из-за малой дис-



персии. Ныне аппаратуру О-диапазона применяют, прежде всего, в линиях самого нижнего уровня инфраструктуры ФТТН (Fiber-To-The-Home – «волокно в дом») для передачи от абонента к узлу связи. Передача данных от узла к абоненту идет по двум частотным каналам, в S- и C-диапазонах. Таким образом, одно волокно ФТТН поддерживает связь по трем частотным каналам.

В С-диапазоне (1,55 мкм) достигнуто наименьшее затухание сигнала на единицу длины линии. Он стал основным диапазоном дальней (long-haul) связи и получил название «conventional» (обычный). В нем стандартами связи выделены фиксированные частотные каналы WDM и DWDM (см. рис.3). Повышенную (в сравнении с О-диапазоном) дисперсию при большой протяженности «прозрачного» участка (ВОЛС и оптические усилители) приходится компенсировать включением участков с дисперсией противоположного знака.

### **Структуры оптических волокон**

Световоды, применяемые в линиях связи, состоят обычно из собственно оптического волокна и защитного покрытия из полимера. Волокно по действующим стандартам для линий связи представляет собой кварцевую нить с внешним диаметром 125 мкм. Центральная часть волокна, "сердцевина", имеет диаметр 50 или 62,5 мкм в многомодовых волокнах и 8...10 мкм в одномодовых. Показатель преломления сердцевинки больше показателя преломления оболочки примерно на 1%. Допуски на отклонение диаметра и несоосность сердцевинки не превышают 1 мкм.

Обычно изготовление оптического волокна начинают с трубчатой заготовки диаметром 10...20 мм и длиной 200...400 мм. Внутреннюю поверхность легируют, обычно из газовой фазы ( $\text{GeCl}_4$ ,  $\text{BCl}_3$  и пр.). Показатель преломления легированного слоя увеличивается. Фторирование материала волокна (при пиролизе фреона) снижает показатель преломления. Далее заготовку (preform – «предволокно») разогревают и растягивают так, что наружный диаметр уменьшается до 125 мкм. Трубка при этом «схлопывается», и внутренний слой становится сердцевинкой. Возможны иные

варианты технологии, дающие более сложные структуры (профили показателя преломления): заготовку собирают из нескольких соосных трубок, у которых легированными могут быть и внутренние, и наружные поверхности.

Различают волокна со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления (ППП) (см. рис. 4). Некоторые важные характеристики оптических волокон можно получить методами геометрической оптики. На рис. 6, *з* показано сечение волновода и меридиональный (проходящий через ось волокна) луч, входящий в сердцевину. Прочие лучи называют "косыми". При углах  $\alpha$  менее критического луч, падающий на границу раздела сердцевины и оболочки, испытывает полное внутреннее отражение и поэтому распространяется вдоль сердцевины, пока не затухнет из-за поглощения и рассеяния.

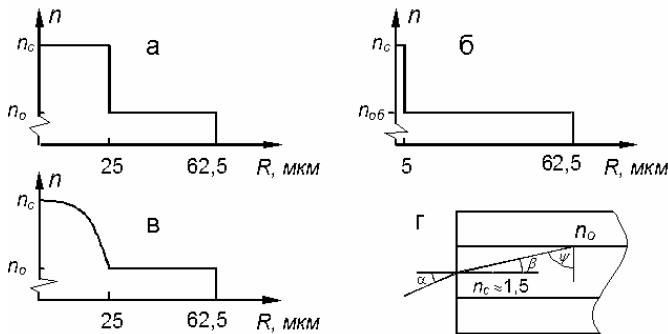


Рис. 6. Зависимость показателя преломления от расстояния до оси световода : *а* – многомодовое волокно, резкий ППП; *б* – одномодовое волокно, резкий ППП; *в* – многомодовое градиентное волокно; *з* – ввод луча в сердцевину световода

Оценим числовую апертуру волокна, т.е. величину  $NA \equiv \sin \alpha_0$ , где  $\alpha_0$  – максимальный угол, при котором луч еще захватывается сердцевинной. Из рис. 4, *з* следует

$$\sin \alpha_0 = n_c \sin \beta = n_c \sin(90^\circ - \psi_{\text{пво}}) = n_c \cos \psi_{\text{пво}}$$

где  $\psi_{\text{пво}}$  – угол полного внутреннего отражения.

Учитывая равенство  $n_c \sin \psi_{\text{пво}} = n_o$ , получим

$$\sin \alpha_0 = n_c \sqrt{1 - \frac{n_o^2}{n_c^2}} = n_c \sqrt{\frac{(n_c + n_o)(n_c - n_o)}{n_c^2}} \cong$$

$$\cong n_c \sqrt{\frac{2(n_c - n_0)}{n_c}} \equiv n_c \sqrt{2\Delta},$$

где учтено, что  $(n_c + n_0)/n_c \cong 2$ . Величину  $(n_c - n_0)/n_c \equiv \Delta$  называют скачком показателя преломления. В типовых волокнах скачок  $\Delta = 0,003...0,01$ .

При скачке показателя преломления  $\Delta = 10^{-2}$  числовая апертура  $NA = 0,2$ . Если конец волокна расположен в воздухе, то угол при вершине конуса захваченных лучей  $2\alpha \approx 24^\circ$ , что значительно меньше, чем расходимость излучения обычных инжекционных лазеров. Поэтому при непосредственной стыковке лазера и волокна неизбежны существенные потери энергии. На первый взгляд, для уменьшения потерь ввода можно просто увеличить числовую апертуру, увеличив скачок показателя преломления  $\Delta$ , но тогда в переносе энергии будут участвовать более «наклонные» лучи с большей протяженностью их пути в одном и том же отрезке волокна. Покажем, почему это невыгодно.

Оптическая длина пути луча  $L_{\text{эфф}}$  зависит от угла, под которым луч входит в волокно

$$L_{\text{эфф}} = n_c L / \cos \beta = n_c^2 L / \sqrt{n_c^2 - \sin^2 \alpha}.$$

Угол  $\alpha$  ограничен сверху числовой апертурой, и чем она больше, тем больше на выходе из волокна разница задержек лучей, вошедших в волокно одновременно, но под разными углами. В реальных световых пучках углы  $\beta$  распределены в некотором диапазоне, и чем шире этот диапазон, тем шире диапазон задержек между лучами в волноводе. Этот факт порождает дисперсию, расплывание сигнала на выходе длинного волокна. С ростом числовой апертуры усиливается и влияние дисперсии. Лучи, параллельные оси, идут быстрее прочих, и не подвержены дисперсии (но лучи лишь умозрительны); сопоставив их протяженность с длиной самого наклонного из лучей, можно получить оценку дисперсии сверху:

$$D = n_c^2 \Delta / (n_0 c) \approx n_c \Delta / c = (NA)^2 / (2cn_c).$$

Последнее выражение удобнее для инженера, так как оно явно связывает дисперсию с измеримой числовой апертурой. Приведенная здесь оценка дисперсии груба и примитивна; она дает показателю

тель дисперсии, завышенный в сравнении с наблюдаемым. Более строго дисперсию в волноводах описывает волновая теория, основные положения и важнейшие выводы которой изложены далее.

Волноводы всех типов при неизменной форме их сечения имеют одно общее свойство – среди распространяющихся в них монохроматических волн можно выделить такие, которые сохраняют распределение поля в пространстве на всем протяжении волновода. Если в двух поперечных сечениях волновода выбрать точку с одинаковыми поперечными координатами, то в них будут отличаться только фазы напряженности поля такой самовоспроизводящейся волны; их называют модами, или собственными волнами волновода. Фазу моды  $\varphi$  задают частота  $\omega$ , время  $t$ , координата  $x$  и постоянная распространения  $\beta$ :  $\varphi = \varphi_0 + \omega t - \beta x$ .

Не всякая волна в волноводе имеет такие свойства, но любую волну в волноводе можно представить как суперпозицию некоторого количества мод. Моды с математической точки зрения представляют собой полную систему собственных функций краевой задачи, поставленной для уравнения электромагнитной волны. При постановке задачи для волновода, кроме самого уравнения, учитывают следующие условия:

- тип симметрии волновода,
- граничные условия,
- однозначность решения,
- ограниченность решения,
- ограниченность некоторых интегралов решения.

Последнее условие обычно следует из физических законов сохранения, в частности, энергии. В задаче о волноводе его выполнение обеспечит достаточно быстрое затухание решения при удалении от середины сечения волновода, обеспечивающее сходимость таких интегралов, как полный поток энергии.

Отложив до поры сложные выкладки, укажем основные характеристики мод цилиндрического диэлектрического волновода.

Во всех диэлектрических волноводах распределение поля волны не ограничено сердцевинной; часть энергии движется в оболочке, вблизи от границы. Важнейший признак для классификации мод – скорость затухания поля при удалении от сердцевины. Если поле

стремится к нулю быстрее, чем  $1/r$ , то волну (моду) называют ведомой, или «направляемой». В противоположном случае моду называют «излучаемой»; для нее световод не выполняет свое основное назначение – не устраняет полностью дифракционную расходимость. Даже при полном отсутствии поглощения в материалах сердцевины и оболочки мощность излучаемой моды в направлении оси световода экспоненциально затухает, так как энергия уходит в поперечном направлении. Существуют также «слабонаправляемые» моды. Их поле в оболочке спадает на ее периферии сравнительно медленно и достигает материала защитного покрытия, где энергия гораздо сильнее рассеивается и поглощается. Переход от направляемой к слабонаправляемой, а далее – к излучаемой моде – происходит по мере уменьшения частоты и приближения ее к определенной критической частоте. Потери распространения слабонаправляемой волны гораздо больше, чем для направляемых мод.

«Вытекающие» моды распространяются в волноводах с сердцевиной, имеющей показатель преломления меньший, чем у оболочки. Здесь нет полного внутреннего отражения, хотя для скользящих лучей коэффициент отражения может быть очень близким к единице. Такие волноводы применяют в лазерах, где усиление излучения компенсирует потери распространения.

Направляемые моды классифицируют по виду поля, продольная компонента напряженности которого отлична от нуля –  $E$  или  $H$ , или обе вместе. Различают моды  $H_{vm}$ , поперечно-электрические, с  $E_z = 0$ , моды  $E_{vm}$ , поперечно-магнитные, с  $H_z = 0$ , и гибридные, у которых и  $E_z \neq 0$ , и  $H_z \neq 0$ . Их обозначают  $HE_{vm}$  или  $EH_{vm}$ , в зависимости от того, какая из амплитуд,  $H_z$  или  $E_z$ , больше (в системе единиц Гаусса). Индексы  $v$  и  $m$  в этих обозначениях – азимутальное и радиальное модовые числа, они соответствуют количеству узлов (нулей) поля по азимуту ( $v$ ) и количеству пучностей по радиусу ( $m$ ). Из-за требования пространственной локализации поля чисто поперечные незатухающие волны (ТЕМ) в цилиндрическом волноводе не распространяются.

Аксиально-симметричные моды могут существовать и как ТЕ-моды ( $H_{vm}$ ), и как ТМ-моды ( $E_{vm}$ ). Аксиально несимметричные

моды могут быть только гибридными. Среди всех мод только  $HE_{11}$  может распространяться при любых частотах; ее называют основной, или низшей. Именно эту моду используют в *одномодовых* волокнах, сердцевина которых настолько тонка, что все другие моды в рабочем диапазоне частот быстро затухают (этот эффект называют отсечкой высших мод, или просто отсечкой).

Постоянная распространения  $\beta$  волны с частотой  $\omega$  в волноводе – волновое число; оно отличается от волнового числа  $k_0$  волны с той же частотой  $\omega$  в вакууме,  $k_0 = 2\pi/\lambda = \omega/c$ . На рис. 7 показана зависимость отношения волновых чисел  $\beta/k_0$  (нормированной постоянной распространения, или эффективного показателя преломления  $n_{эфф}$ ) от приведенного диаметра волновода

$$V \equiv (2\pi a / \lambda) \sqrt{n_c^2 - n_0^2} = \frac{2\pi a n}{\lambda} \sqrt{2\Delta}.$$

Величину  $V$  называют также характеристическим параметром волновода или нормированной частотой для основной моды  $HE_{11}$ .

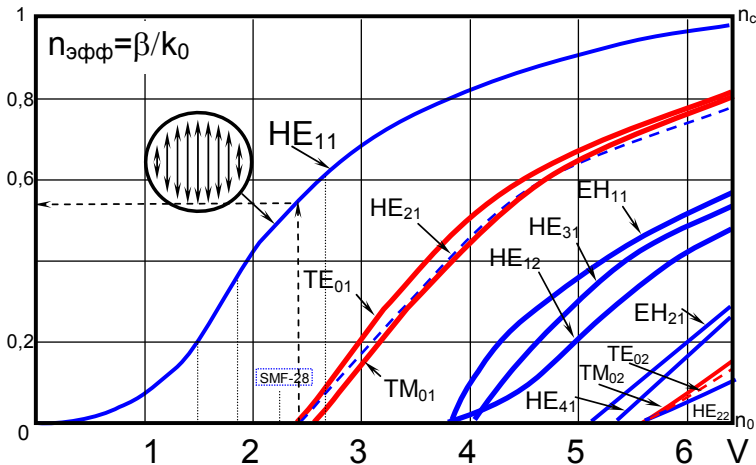


Рис. 7. Зависимость нормированной постоянной распространения от приведенного диаметра диэлектрического волновода для основной моды  $HE_{11}$  и для низших мод, структура поля  $E$  моды  $HE_{11}$ ;  $\Delta = (n_c - n_0)/n_c$  (R.D.Mauger, 1974)

Безразмерная величина  $V$  очень похожа на число Френеля, так как пропорциональна отношению малого угла геометрической рас-

ходимости излучения  $NA$  и угла дифракционной расходимости  $\phi$ , ограниченного апертурой  $2a$ :

$$\phi \approx 1,22\lambda/2a; \quad V = \pi NA/\phi.$$

С этой точки зрения, величина  $V$  указывает приближенное максимальное значение индекса направляемой моды. Поэтому можно оценить и количество направляемых мод; оно должно быть близким к  $V^2/2$ . Для оценки можно использовать справочные данные волокна – диаметр сердцевины и числовую апертуру. Для типового волокна 50 мкм с  $NA = 0,2$  при длине волны 0,85 мкм параметр  $V \approx 30$ . Следовательно, в волокне примерно  $5 \cdot 10^2$  мод.

Волна  $HE_{11}$  существует при любом сколь угодно малом диаметре сердцевины. По мере уменьшения диаметра все большая часть волны переносится оболочкой и поэтому  $n_{эфф} \rightarrow n_{об}$ . Напротив, при увеличении диаметра растет степень локализации поля в сердцевине, все меньшая часть потока энергии приходится на оболочку, и  $n_{эфф} \rightarrow n_c$ . Длину волны отсечки  $\lambda_0$  для одномодового световода дает выражение

$$V_0 = (2\pi a / \lambda_0) \sqrt{n_c^2 - n_0^2} = 2,405.$$

При заданных параметрах волоконного световода ниже частоты отсечки может распространяться как направляемая мода только основная волна  $HE_{11}$ . Этот режим работы волновода называют одномодовым, и само волокно тоже называют одномодовым, имея в виду наименьшую длину волны рабочего диапазона, в котором возможен одномодовый режим. Моды более высоких порядков в одномодовом волокне ниже частоты отсечки будут излучаемыми. Они экспоненциально затухают (даже без поглощения и рассеяния) на расстоянии порядка сантиметров. Энергия излучаемых мод уходит из сердцевины и далее расходится в оболочке.

Одномодовым волокнам противопоставлены волокна многомодовые, работающие выше частоты отсечки (для заданных параметров). В них энергию переносят два или более типа колебаний (много мод). В многомодовых световодах моды высших порядков соответствуют наклонным лучам, а основная мода – прямолинейному лучу (что не вполне верно с точки зрения волновой оптики). Описание распространения волны в одномодовом световоде методами

лучевой оптики принципиально некорректно; оно непригодно для оценок дисперсии и иных важных характеристик световода с той точностью, которая нужна для практики.

Сопоставим дисперсию в одномодовых и многомодовых волокнах. Для волноводов существенна дисперсия групповой задержки, то есть величина, обратная дисперсии групповой скорости.

В многомодовом волокне преобладает *межмодовая* дисперсия, которую порождает зависимость фазовой скорости монохроматической волны от конфигурации поля направляемой моды (ее отображают тип и индексы моды). Здесь дисперсию вообще неверно представлять как зависимость фазовой (или групповой) скорости от частоты. Межмодовую дисперсию можно выражать как увеличение групповой задержки высших мод по отношению к основной при прохождении короткого импульса через единицу длины волновода, чаще в пикосекундах на километр. Такое отображение межмодовой дисперсии для практики дает лишь грубую оценку сверху, так как наблюдаемое искажение импульса зависит от конкретного распределения мощности излучения по модам волновода. Рассчитанное по теории значение межмодовой дисперсии может сильно и в любую сторону отличаться от оценки, полученной из опытных данных.

Ранее существовало представление о перемешивании мод, в соответствии с которым малые локальные неоднородности волокна приводят к переходам излучения из моды в моду, и в результате на выходе длинного волокна распределение по модам отличается от исходного. В таком случае перемешивание быстрых и медленных мод должно заметно влиять на межмодовую дисперсию. В частности, если на входе возбуждены только низшие (быстрые) моды, то на выходе заметная доля мощности должна перейти в высшие (медленные) моды. Тогда к межмодовой дисперсии внутри первоначально возбужденной группы мод должна быть прибавка, вызванная медленными модами, возбужденными уже на трассе за счет перемешивания. Если длина волокна на порядок превышает некоторый характерный критический размер, то в нем должно установиться определенное наивероятнейшее распределение задержек, слабо зависящее от первоначального распределения мощности



по модам. Следовательно, в рамках такой модели форма импульса на выходе волокна должна слабо зависеть от условий ввода излучения. Кроме того, по законам статистики, при этом дисперсионное уширение импульса должно быть пропорциональным квадратному корню длины волокна, а не его длине. Возможно, такие эффекты действительно наблюдали на старых волокнах низкого качества, где критическая длина перемешивания могла быть порядка десятка метров и менее. В настоящей работе опытная проверка модели с перемешиванием мод предусмотрена как факультативное задание. Его цель – сравнение полной длины волокна с опытной оценкой длины перемешивания мод.

Удобнее и практичнее выражать наблюдаемую дисперсию многомодового волокна фиксированной длины шириной полосы пропускания модулированного сигнала, а погонную дисперсию – произведением ширины полосы пропускания и длины волокна.

В одномодовых волокнах межмодовая дисперсия отсутствует; здесь существует только одна волна, а искажения светового импульса вызваны иными факторами, связанными со спектром передаваемого сигнала и структурой волокна. Позже мы покажем, что в одномодовом волокне дисперсия проявляется как дисперсия *хроматическая*, групповая задержка зависит от несущей частоты сигнала, а дисперсионное искажение импульса тем сильнее, чем шире его спектр и чем больше количественный показатель *групповой* дисперсии среды, пропорциональный величине  $d^2n/d\lambda^2$ .

### Градиентное волокно

В градиентных волокнах, где показатель преломления материала сердцевинки при переходе к оболочке изменяется плавно (рис. 4, *в*, и рис. 9, *а*), можно существенно ослабить межмодовую дисперсию, сохранить большой диаметр сердцевинки и упростить ввод излучения лазера в волновод.

Преимущества градиентного световода перед световодом со ступенчатым ППП можно понять качественно, пользуясь приближением геометрической оптики. Для ступенчатого профиля меридиональный луч с большим углом наклона к оси волновода прохо-

дит больший геометрический путь. Поскольку  $n_c(r) = \text{const}$  в пределах сердцевины, то и задержка такого луча больше. В градиентном световоде удаление меридионального луча от оси может вообще не увеличивать его задержку, так как показатель преломления на периферии меньше.

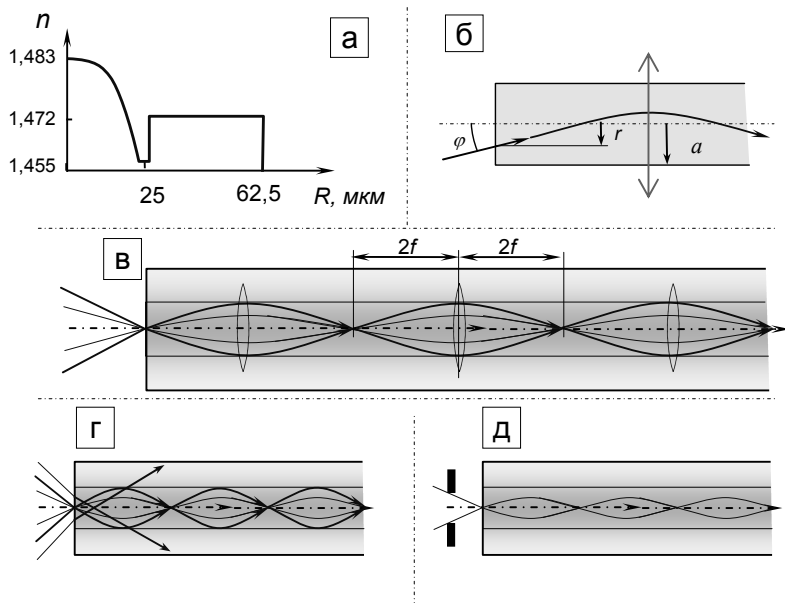


Рис. 9. Профиль показателя преломления в градиентном волокне (а), параметры луча ( $\varphi$ ,  $r$ ) в меридиональном сечении (б), ход лучей (в), переполнение сердцевины (г), ввод с частичным заполнением сердцевины (д)

В оптимизированном градиентном волокне задержка высшей моды по отношению к основной в  $(1/\Delta)$  раз меньше, чем в ступенчатом волокне, а количество направляемых мод – вдвое меньше, примерно  $V^2/4$ . Соответственно, межмодовая дисперсия в градиентном волокне на два порядка ниже (в удобном для инженера представлении  $D = (NA)^4/(8cn_c^3)$ ). Поэтому многомодовые ступенчатые волокна ныне практически вытеснены градиентными. В производстве градиентных волокон высокого качества основная трудность возникает из-за необходимости очень точно выдерживать ППП

как можно ближе к оптимальному. Расчетный выигрыш в дисперсии мог бы достигнуть трех порядков, но зависимость дисперсионного удлинения импульса, например, от параметра  $\alpha$  имеет настолько резкий минимум, что на практике трудно воспроизводить оптимальный ППП с требуемой точностью (рис. 10).

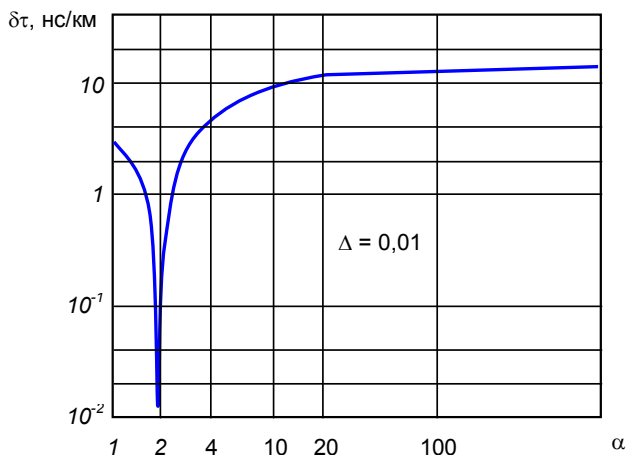


Рис. 10. Зависимость показателя межмодовой дисперсии градиентного волокна от параметра профиля  $\alpha$ , без учета перемешивания мод (R.Olshansky, D.Keck, 1976)

Ранее упомянутое перемешивание мод в принципе может происходить и в градиентном волокне. Как и в случае многомодового волокна со ступенчатым ППП, для практики важно, насколько велика критическая длина перемешивания («взаимодиффузии») мод. Судя по опубликованным данным, в современных градиентных волокнах эта длина может превышать сотни метров. Кроме того, эффекты перемешивания очень вероятны при сильных изгибах волокна, и тем заметнее, чем ниже его числовая апертура. Следовательно, существует оптимальный режим ввода излучения в градиентное волокно (рис. 9,  $\delta$ ), при котором энергию сигнала несет группа волн с минимальным разбросом скоростей и межмодовая дисперсия минимальна. Простые соображения показывают, что этот режим – промежуточный между острой фокусировкой в центре среза и вводом параллельного пучка во все сечение сердцевины; в обоих случаях эффективно возбуждаются все высшие моды,

так как внутри волокна создаются тождественные распределения поля, соответствующие «переполнению» сердцевины (рис. 9, з).

При оптимальном согласовании с лазером лучшие градиентные волокна (Corning InfiniCor®eSX+) имеют полосу пропускания до 4 ГГц·км, затухание в них не более 1 дБ/км на  $\lambda = 1,3$  мкм и не более 3 дБ/км на  $\lambda = 0,85$  мкм. Основная область их применения – локальные сети с умеренной нагрузкой, сопоставимой с Gigabit Ethernet. В этой области современные градиентные волокна выгоднее одномодовых (хоть и в 4 раза дороже), так как стоимость аппаратуры и арматуры многомодовых ВОЛС (70...80% всех затрат) вдвое ниже. В результате общая стоимость передачи бита на метр в LAN и SAN с многомодовыми волокнами ниже на 40...50%, чем с одномодовыми.

### **Свойства одномодовых волокон**

Одномодовые волокна, несмотря на все технические сложности, заняли исключительное положение в магистральных линиях связи большой протяженности. Их параметры нормированы и оптимизированы в первую очередь для С-диапазона.

Диаметр сердцевины и скачок показателя преломления для рабочей длины волны выбирают как компромисс между удобством применения и малыми потерями. Увеличение диаметра сердцевины облегчает стыковку волокон, позволяет передавать через волокно большую световую мощность, но для сохранения одномодового режима приходится уменьшать скачок показателя преломления (и, как следствие, числовую апертуру). При этом ухудшается эффективность ввода излучения из лазера в волокно. Кроме того, приходится точнее выдерживать параметры исходной заготовки и процесса вытягивания волокна. Наконец, изменения показателя преломления при внешних механических воздействиях могут достигнуть уровня самого скачка, и волокно оказывается слишком чувствительным к изгибу и сжатию.

Чувствительность волокна к изгибу выражают как дополнительное затухание в децибелах, которое вносит нормированный изгиб волокна при испытаниях. Приняты следующие типовые условия

испытаний и ориентировочные показатели дополнительного затухания:

один виток диаметром 32 мм      0,05 дБ,  
 100 витков диаметром 75 мм      0,05 дБ.

В одномодовых волокнах при  $D = 10...12$  мкм скачок  $\Delta \approx 0,001$ , а при скачке  $\Delta = 0,01$  диаметр  $D$  должен быть в пределах 4...5 мкм. Наиболее типичны современные одномодовые волокна для магистральных кабелей с  $D = 8...10$  мкм, при  $\Delta = 0,005...0,003$ .

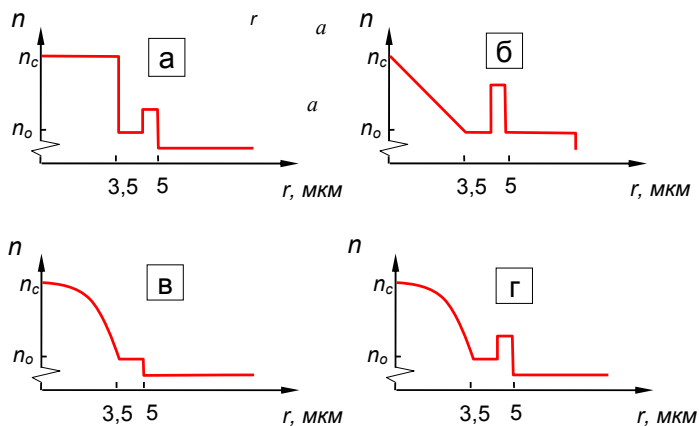


Рис. 11. Модификации ППП одномодовых волокон: волокно «depressed-cladding», устойчивое к изгибам (а); разновидности волокон со смещенной дисперсией (б, в, г)

Для снижения чувствительности к изгибу в улучшенные одномодовые волокна вводят дополнительные тонкие оболочки, окружающие сердцевину (рис. 11). При указанном профиле показателя преломления затухание основной моды мало и определяется увеличенным скачком  $n_c - n_a$ , а затухание высших мод – уменьшенным скачком  $n_a - n_0$ . В результате вариации  $(n_c - n_a)$  при изгибах волокон на слабее влияют на основную моду.

Время распространения импульса  $L/v_g$  зависит от частоты, и различные спектральные компоненты импульса распространяются по волокну с разными скоростями. Эту дисперсию называют хроматической (в общем смысле). Влияние ее тем сильнее, чем шире спектр передаваемого сигнала. В одномодовом волокне нет меж-

модовой дисперсии, поэтому на его работу влияет в первую очередь хроматическая дисперсия. Она влияет на качество связи гораздо слабее, чем межмодовая дисперсия, но постоянно растущие требования к скорости передачи информации заставляют инженеров учитывать ее все более аккуратно.

Хроматической дисперсией одномодового волокна ( $D$ ) называют *разность групповых задержек* двух групп волн с несущими частотами, различающимися на *единицу длины волны*, отнесенную к *единице длины линии*. В технической документации дисперсию одномодового волокна выражают в пикосекундах на километр длины волновода и на нанометр ширины спектра; в стандартных одномодовых волокнах дисперсия групповой задержки  $D \approx 18...20$  пс/км/нм в С-диапазоне и  $2...4$  пс/км/нм в О-диапазоне.

К сожалению, определения показателей дисперсии и выбор аргументов функций, описывающих дисперсию, не до конца последовательны. Покажем, где нас ждут неудобства. Хроматическую дисперсию групповой задержки в теории удобнее отображать величиной  $\beta_2 \equiv d(1/v_g)/d\omega$ . На практике применяют иное представление, через измеримую величину  $\lambda$ :

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{v_g} \right) = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{dk}{d\omega} \right).$$

В соответствии с определением  $D$ , увеличение длительности импульса на выходе  $\Delta t$  пропорционально ширине спектра  $\delta\lambda$ , выраженной в единицах длины волны, и длине линии  $L$ ,

$$\Delta t = |DL\delta\lambda|.$$

Величину  $D$  применяют как общепринятую для представления дисперсии волокон в технической литературе. Сразу отметим, что величины  $\beta_2$  и  $D$  для одного и того же волокна имеют противоположные знаки и разные размерности. Этот факт нужно иметь в виду при физических расчетах. Знак  $D$  во многих случаях существен, так как разные участки линии могут иметь разные показатели дисперсии  $D$ , и положительные, и отрицательные, а групповые задержки нужно суммировать со знаками.

Хроматическая дисперсия одномодового волокна складывается из двух наиболее существенных компонент – дисперсии самого

материала волокна (*материальной дисперсии*) и специфической для диэлектрических волноводов *волноводной дисперсии*.

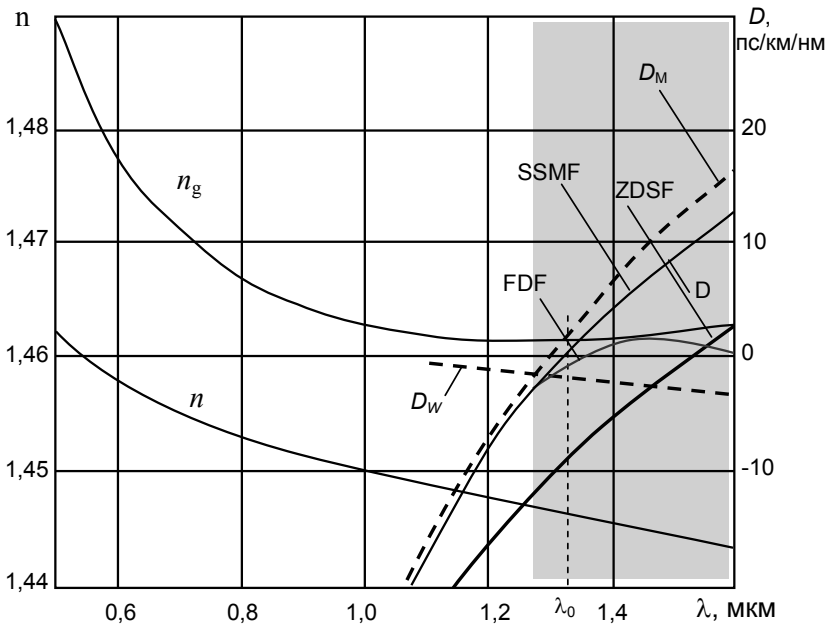


Рис. 12. Хроматическая дисперсия кварца ( $n$ ,  $n_g$ ) и дисперсия групповой задержки кварцевых оптических одномодовых волокон:

$D_W$  – волноводная дисперсия стандартного волокна;  $D_M$  – материальная дисперсия групповой задержки; SSMF – стандартное одномодовое волокно; ZDSF – волокно со смещенной нулевой дисперсией; FDF – волокно со сглаженной дисперсией (вариант волокна со смещенной ненулевой дисперсией)

При увеличении длины волны поле низшей моды сильнее проникает из сердцевинки в оболочку, где показатель преломления меньше. Чем тоньше сердцевина, тем большая доля энергии направляемой моды распространяется в тонком слое оболочки вблизи от поверхности сердцевинки. Чем ниже частота возбуждаемой моды, тем больше объем, занятый полем моды в оболочке. Следовательно, при уменьшении частоты эффективный показатель преломления волокна снижается за счет меньшего показателя преломления оболочки, и фазовая скорость основной моды растет. Так возникает дополнительная хроматическая дисперсия фазовой скорости

( $dn/d\omega > 0$ ). Она влечет за собой и дисперсию групповой задержки (см. приложение 3). Этот специфический, общий для диэлектрических одномодовых волноводов тип хроматической дисперсии называют *волноводной дисперсией*. Показатель волноводной дисперсии  $D_W$  зависит от диаметра сердцевинки, поэтому при выборе диаметра сердцевинки учитывают и требования к дисперсионным характеристикам волокна.

Суммарную хроматическую дисперсию волокна создает сочетание материальной и волноводной дисперсии; вблизи  $\lambda \approx 1,31$  мкм хроматическая дисперсия стандартного одномодового волокна близка к нулю; небольшая отрицательная волноводная дисперсия  $D_W$  компенсирует небольшую положительную материальную дисперсию  $D_M$  (см. рис. 12).

Для современных магистральных линий выпускают стандартные одномодовые волокна с дисперсией 2 пс/нм/км на 1,31 мкм, 20 пс/нм/км на 1,55 мкм.

Для модификации волноводной дисперсии в современных волокнах вводят дополнительные тонкие слои, у которых показатель преломления иной, нежели у сердцевинки и оболочки (см. рис. 11, а), а также изменяют профиль показателя преломления самой сердцевинки (рис. 11, б–г). Этот метод первоначально был применен для уменьшения дисперсии одномодовых волокон в С-диапазоне. Модификация волноводной дисперсии при введении дополнительного слоя или неравномерного легирования самой сердцевинки компенсирует материальную дисперсию. Кроме того, как сказано ранее, рациональный выбор параметров дополнительных оболочек делает волокно менее чувствительным к изгибам. Волокна подобной структуры назвали *волоконными со смещенной нулевой дисперсией*; в них совмещены слабое затухание (0,2 дБ/км) и минимальная хроматическая дисперсия в С-диапазоне (2 пс/нм/км).

Промышленность освоила производство волокон со смещенной нулевой дисперсией но, несмотря на сочетание минимального затухания и минимальной дисперсии, они не стали основой ВОЛС последних поколений и даже не потеснили стандартные одномодовые волокна.



Опыт развития систем WDM изменил взгляды инженеров на истинную роль хроматической дисперсии в искажениях импульсных сигналов. Были обнаружены эффекты взаимного влияния импульсных сигналов на разных несущих частотах, тем более сильного, чем дольше импульсы перекрываются в пространстве. В линии с очень слабой групповой дисперсией такое перекрытие существует длительно, а в линии с заметной групповой дисперсией волновые пакеты с разными несущими частотами быстро расходятся, не успев заметно повлиять друг на друга. Сам эффект взаимного влияния возникает из-за *нелинейности* среды, которая проявляется как зависимость ее диэлектрической восприимчивости (и показателя преломления) от напряженности поля излучения. Нелинейности среды и их применения исследует нелинейная оптика, куда мы сейчас не можем углубиться. Укажем только, что взаимное влияние импульсов проявляется как так называемое *четырёхволновое взаимодействие*, при котором часть мощности излучения из одних каналов WDM перекачивается в соседние. В современной линии WDM сосуществуют десятки частотных каналов, поэтому общий мультиплексный поток оптических сигналов за счет сильного четырёхволнового взаимодействия может быть необратимо искажен. Хроматическая дисперсия, нарушая перекрытие сигналов в пространстве, ослабляет эти искажения до приемлемого уровня.

С другой стороны, хроматическая дисперсия искажает сигнал в каждом частотном канале. По этой причине сильная хроматическая дисперсия тоже вредна. Существует компромиссное значение дисперсии (ныне его оценивают как 5...8 пс/км/нм), при которой общие искажения сигналов остаются допустимыми. С учетом этих соображений перспективными ныне признаны диапазоны C, L, U, где минимально затухание, а диапазон O для WDM не используют. Производство волокон с нулевой дисперсией ныне прекращено.

Хроматическая дисперсия групповой задержки принципиально *обратима*. Если составить линию из отрезков с противоположной по знаку дисперсией, то при надлежащем выборе длин этих отрезков дисперсию групповой задержки можно довести до нуля. Именно этот подход применяют в современных системах дальней оптоволоконной связи с WDM. При этом дисперсия групповой задерж-

ки компенсируется, а четырехволновое взаимодействие остается слабым.

Схемы компенсации хроматической дисперсии ВОЛС разнообразны, и пока нет однозначно предпочтительной. Исследования показали, что даже стандартные одномодовые волокна в сочетании с компенсаторами дают очень хорошие результаты. Тем не менее, для таких длинных линий, как трансокеанские, выгоднее применять волокна с уменьшенной, нормированной дисперсией. В результате освоен выпуск волокон со *смещенной ненулевой* дисперсией. В таких волокнах групповая дисперсия слабее, чем в стандартном одномодовом волокне, примерно в три раза, и существуют волокна с примерно такой же, но отрицательной групповой дисперсией. Применение волокон типа Corning LEAF R1000, по данным производителя, снижает общие затраты примерно на 30% в сравнении с типовыми.

Для компенсации остаточной дисперсии разработаны регулируемые компенсаторы на основе дифракционных решеток, встроенных в волокно, позволяющие добиться минимальной дисперсии ВОЛС в групповом потоке WDM и подстраивать режим линии на оптимум при вариациях ее параметров.

Укажем еще один источник дисперсии в одномодовых волокнах. Ранее мы заявили, что в одномодовом волокне нет межмодовой дисперсии, но это было лишь временным упрощением. На самом деле основная мода  $HE_{11}$  двукратно вырождена по направлению вектора поляризации  $E$ . При распространении по волокну, как показывает опыт, излучение в этой моде остается поляризованным, но состояние поляризации (эллипс) изменяется (рис. 13). По отношению к поляризованному излучению волокно оказывается средой с двойным лучепреломлением, но не регулярным, как в кристаллах, а слабым и стохастически распределенным по длине трассы. Локальные флуктуации двулучепреломления вызваны малыми нарушениями симметрии сечения сердцевинки и локальными напряжениями (деформациями при изгибах, сжатиях и т.п.). В результате фазовая скорость одной линейно-поляризованной компоненты волны испытывает локальные вариации по отношению к другой, ей ортогональной. Импульс расщепляется на два, между ними появля-

ется некоторая задержка, и суммарный импульс удлиняется на величину этой задержки. Дисперсию такого рода называют поляризационной модовой дисперсией; по сути это особого рода межмодовая дисперсия, с участием только двух почти вырожденных мод.

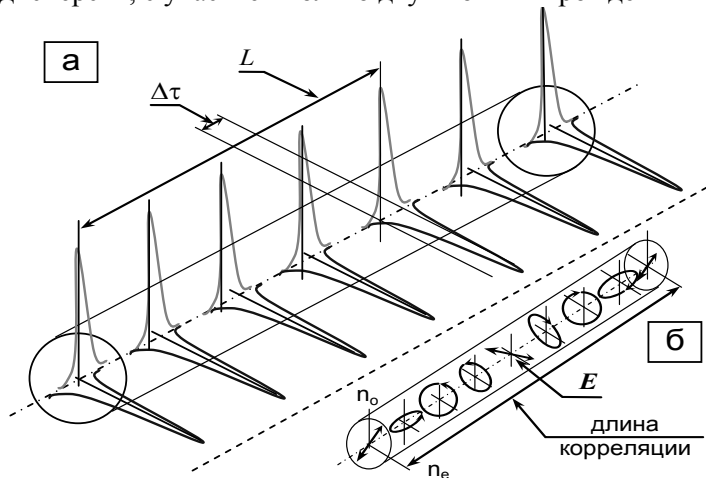


Рис.13. Схема образования поляризационной межмодовой дисперсии: *а* – дисперсия на длинном отрезке линии, *б* – изменения состояния поляризации в пределах длины корреляции

Все эти вариации случайны, и поэтому к ним применяют статистические модели. Обычно считают, что вариации скоростей коррелированы на участках трассы длиной порядка 10 м (рис. 13, б), поэтому статистику применяют только к многокилометровым линиям. Плотность вероятности относительной задержки двух поляризованных компонент в таком случае описывает функция распределения Максвелла,

$$P((\Delta\tau)^2) \propto (\Delta\tau)^2 \exp\{-(\Delta\tau)^2/2\sigma^2\},$$

где у функции распределения только один параметр  $\sigma$ . Отсюда следует, что среднее удлинение импульса  $\langle\Delta\tau\rangle \propto \sqrt{L}$ , и вызванный им энергетический штраф при увеличении длины линии растет медленнее, чем затухание.

Показатель PMD в стандартном одномодовом волокне редко превышает  $1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ , а в лучших волокнах он менее  $0,05 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ .

При всем этом подчеркнем, что показатель PMD – только статистическая оценка наивероятнейшего удлинения импульса, а его вероятность формально описывают распределением Максвелла. Поэтому расчет линии с учетом PMD требует задать допустимую вероятность выхода реальной PMD за границу диапазона, в котором вероятность приема ошибочного бита информации не превышает установленный лимит. При современных нормативах связи PMD можно не учитывать в ВОЛС длиной до 1000 км при потоке до 10 Гбит/с (а при 40 Гбит/с – до 100 км).

Закручивание волокна вокруг продольной оси в процессе вытягивания ослабляет PMD на порядок. Номинальный шаг закручивания обычно равен 3 мм. Известны несколько разновидностей подобных волокон (spun fiber), с круглыми и эллиптическими сердцевинами. В отличие от прочих волокон, в закрученном волокне сохраняется вид начальной поляризации введенного излучения.

В принципе PMD можно исключить, выделив на выходе волну одной, в общем случае эллиптической поляризации, которая на фотоприемнике дает импульс наименьшей длительности. За такое решение платят штраф не менее 3 дБ. К сожалению, компенсация PMD всегда привязана и к конкретным условиям работы линии, и к определенной длине волны, так что она не подходит для коррекции группового потока WDM, хотя ее и применяли для коррекции в отдельных частотных каналах. При иных подходах к компенсации PMD используют более хитроумные виды модуляции излучения. Тем не менее, проблема коррекции PMD в ВОЛС длиннее 1000 км при потоке свыше 10 Гбит/с остается предметом исследований на уровне «героических экспериментов».

## **ПАССИВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛОКОННОЙ ЛИНИИ**

### **Волоконные кабели, патч-корды и пигтейлы**

Волокна длинных линий связи входят в состав оптических кабелей, содержащих от 4 до 192 волокон. Множество производителей

разнотипных оптических кабелей используют волокна, выпускаемые ограниченным числом ведущих фирм – Corning, Lucent, Fujikura. Промышленность выпускает оптические кабели для различных способов прокладки – наружных, внутриобъектовых, подземных, для кабельной канализации, обычно длиной до 6 км. Для подводной прокладки выпускают оптические кабели длиной до 50 км.

В большинстве случаев волокна в составе кабеля сгруппированы в модули из 6...8 волокон; каждый модуль заключен в трубку из полимера, и все они вместе заключены в общую герметичную оболочку, заполненную гидрофобным гелем для надежной защиты от влаги. Трубки и сами волокна внутри каждой из них обычно имеют различную окраску, что облегчает разделку концов кабеля. Скрученные вместе модули образуют повив. Существуют кабели с ленточными модулями; в них волокна сгруппированы в плоские ленты, и сердечник набран из лент. Такие кабели при толщине в полдюйма содержат до 200 волокон, но очень жестки в сравнении с повивными, допускающими изгиб по радиусу, равному двадцати диаметрам оболочки кабеля.

Короткий гибкий отрезок волокна с разъемами на концах называют патч-кордом. Патч-корды служат для оперативных переменных соединений в волоконных системах, а также для сопряжения аппаратуры с разнотипными разъемами. Они обычно заключены в легкую защитную полимерную оболочку диаметром 2...3 мм. Стандартные патч-корды имеют длину 1, 2 или 3 м, но по индивидуальным заказам делают патч-корды любой разумной длины.

Наряду с патч-кордами производство выпускает как стандартные изделия так называемые пигтейлы (*pigtail* – «пороссячий хвост») – отрезки волокна с разъемом на одном конце, обычно длиной до 1 м. Пигтейлы – это полуфабрикаты для волоконных систем, предназначенные для присоединения к нестандартизованным оптическим элементам, с разделкой свободного конца в нестандартный разъем или под неразъемное соединение с другим волокном. Пигтейлом также называют короткий неразделанный отрезок волокна, на одном конце сопряженный с лазером, фотоприемником или иным оптико-электронным элементом.

## Соединители волоконных линий

Все разъемные соединения волокон – соединения встык, при допустимой несоосности волокон не более 1 мкм. Переходное затухание, вносимое таким стыком, фактически редко превышает 0,1 дБ. Такое качество соединения возможно при соблюдении хорошо отработанной технологии разделки конца волокна. Полировка торца обеспечивает уровень отражения назад  $-(45...55)$  дБ.

Для оконцевания волокон применяют оптические наконечники нескольких стандартизованных типов, в частности:

FC – с резьбовым запором,

ST – с байонетным запором,

LC – с пружинящим язычковым запором, без вращающихся деталей, что позволяет быстро соединять и разъединять парные разъемы дуплексных линий.

Основная деталь каждого наконечника – калиброванная оправка из керамики (окись циркония)  $\varnothing 2,5$  мм с каналом  $\varnothing 125$  мкм для заделки в него конца волокна, освобожденного от защитной полимерной оболочки. Волокно в канале закрепляют эпоксидным клеем. После отверждения клея волокно у края оправки обламывают и шлифуют заподлицо с торцом керамического вкладыша. Для облегчения шлифовки и устранения возможных зазоров при стыковке торец оправки слегка закруглен. Оправки для многомодовых и одномодовых волокон отличаются в первую очередь допуском на отклонения от соосности наружной поверхности оправки и канала для волокна.

Для особых применений, где нежелательны даже очень слабые отражения от стыков волокон, существуют наконечники с косым срезом торцов оправок (ось волокна образует угол  $8^\circ$  с нормалью к плоскости среза) (рис. 14). Уровень рассеяния назад на таком разьеме достигает  $-65$  дБ.

Два наконечника соединяют при помощи муфты, в которой входящие в нее с разных сторон керамические вкладыши взаимно центрируются плавающей втулкой. В муфтах для многомодовых волокон втулка разрезная, пружинящая, штампованная из тонколистовой фосфористой бронзы. В муфтах для одномодовых волокон

штука керамическая, с калиброванным внутренним каналом. Эта конструкция обеспечивает более точную соосность соединения. Арматура для одномодовых волокон примерно в три раза дороже, чем арматура для многомодовых волокон.

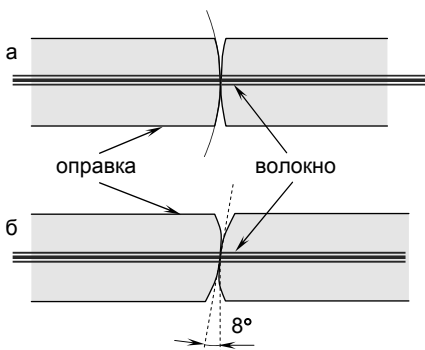


Рис.14. Разъемные соединения оптических волокон:

*а* – прямое стыковое (РС),

*б* – скошенное (АРС)

### Неразъемные соединения волоконных линий

Альтернативой разъемным соединениям волокон служат неразъемные соединения с использованием сварки или склейки встык. Неразъемные стыки применяют при сращивании отрезков линий большой протяженности, при устранении обрывов кабельных линий, при подсоединении линий к терминальному оборудованию. Для сварки разработано специализированное оборудование для точного скалывания волокон, фиксации их в сварочном аппарате с контролем соосности и локального проплавления стыка. Такое оборудование портативно и пригодно для работы в полевых условиях, в колодцах и кабельных коллекторах.

Стыковые сварные соединения волокон вносят в линию затухание настолько малое, что именно их применяют не только для соединения кабелей связи, но и для соединения волокон в мощных волоконных лазерах, где нужно устранять все возможные потери на поглощение и рассеяние излучения. Клеевые соединения волокон имеют большие габариты, нежели сварные, но более прочны механически. В обоих случаях для надежности оболочки соединяемых кабелей закрепляют в дополнительных соединительных коробках. В настоящее время стоимости сварного и разъемного соединений почти одинаковы.

## Разветвители и направленные ответвители

Для вспомогательных измерений параметров ВОЛС и для двухсторонней связи по одному волокну в состав оптической системы вводят разветвители Y-типа и направленные ответвители X-типа, устройство которых показано на рис. 15. Их формируют из отрезков волокон, соединенных сваркой.

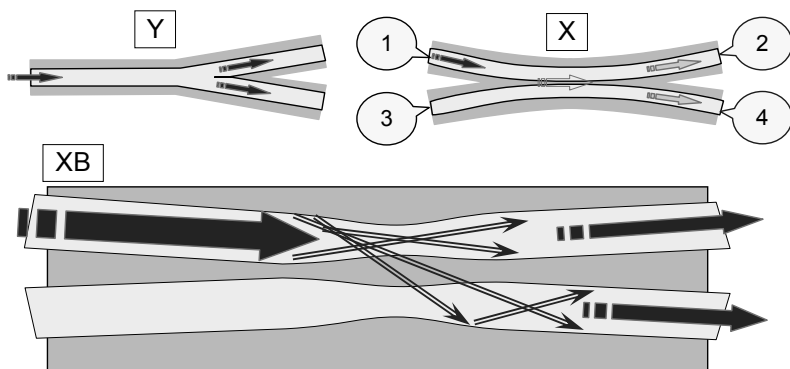


Рис. 15. Волоконный разветвитель (Y) и направленный ответвитель (X), биконический многомодовый ответвитель (XB)

Разветвители Y-типа применяют в интерферометрах и в составе многоканальных разветвителей как базовые элементы; в этих случаях мощность, поступающая во входное плечо, делится на выходах пополам.

Направленные ответвители X-типа применяют преимущественно для измерений; их особенность – большое переходное затухание между плечами 1 и 3, 2 и 4, при малом переходном затухании между остальными плечами. Обычно при вводе излучения в плечо 1 на выходах 2 и 3 мощность излучения одинакова. Для особых целей можно изготовить устройство с иным коэффициентом разветвления; он зависит от размера сближения сердцевин, длины волны и длины сопряженных участков волокон, и адекватно описывается моделью связанных волн. Для многомодовых ответвителей очень важно сильное перемешивание мод на участке сближения волокон,



чтобы в ответвлении возбуждались низшие моды, слабее связанные с основным волноводом. Для этого многомодовые ответвители обычно делают как биконические, с плавными сужениями сердцевин в области перехода (рис. 15).

Оптические схемы с разветвителями показаны в разделе «Описание лабораторной установки». Со свойствами и применением 50%-ных Y-разветвителей можно познакомиться в ходе лабораторной работы.

### **Фотоприемные устройства ВОЛС**

Основные технические требования, предъявляемые к фотоприемникам ВОЛС – высокая квантовая эффективность, высокое быстродействие, низкий уровень шумов, соответствие размеров чувствительной площадки и подходящей к ней сердцевины волокна.

Светочувствительная площадка типового фотодатчика для приемников ВОЛС обычно имеет диаметр от десятков до единиц микрон, и часто сопряжена с волокном-пигтейлом. Эти элементы чаще всего входят в состав гибридной интегральной схемы, содержащей усилитель мощности электрического сигнала и иные электронные цепи. Малая площадь чувствительной площадки датчика способствует малому уровню шума и высокому быстродействию, так как очень малыми становятся ток утечки, темновой ток и барьерная электрическая емкость фотодиода.

В качестве первичных преобразователей света в электрический сигнал в ВОЛС чаще всего применяют фотодиоды с лавинным (ударным) размножением подвижных носителей заряда в запиорном слое объемного заряда *p-n*-перехода. Каждый носитель, образованный в запиорном слое при поглощении фотона, ускоряется полем объемного заряда, и при достаточной его напряженности за счет столкновений образует новые носители. Они, в свою очередь, тоже могут давать новые носители, если при ускорении в электрическом поле на длине свободного пробега успевают набрать нужную энергию. Обычно один носитель успевает породить минимум одну–две пары новых, и этот эффект лавинообразного размножения носителей выглядит как усиление тока.

На практике в лавинных фотодиодах коэффициент размножения носителей при оптимальном запиорном напряжении (15...30 В) достигает примерно десяти и более. При увеличении напряжения выше оптимума начинается рост мощности шума, опережающий рост полезного сигнала. С точки зрения инженера фотоприемник с лавинным фотодиодом выглядит как твердотельный функциональный аналог вакуумного фотоэлектронного умножителя, с меньшим коэффициентом внутреннего усиления, но гораздо компактнее и стабильнее.

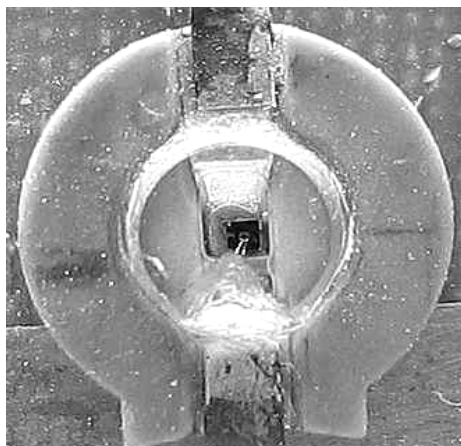


Рис. 16. Германиевый лавинный фотодиод ЛФД-2; габарит корпуса 9 мм, светочувствительная площадь  $\varnothing 100$  мкм, усиление по току 10

Для линий связи, работающих на длине волны 0,85 мкм, наиболее пригодны фотодиоды из кремния, квантовая эффективность которых достигает 90% и даже несколько более. У кремниевых фотодиодов очень низкий уровень собственных шумов, они работоспособны при температуре до 85°C, а технология кремниевых фотоприемных структур ныне доведена до совершенства. У германиевых фотодиодов уровень шума несколько выше, чем у кремниевых, и квантовая эффективность меньше, но большая подвижность носителей заряда в германии позволяет довести быстродействие до сотни пикосекунд.

Для линий связи, работающих на длине волны 1,3 мкм, пригодны фотодиоды из германия; их квантовая эффективность на 1,6 мкм падает до 50%. Для диапазона 1,5...1,6 мкм более эффективны фотоприемные структуры на основе сложных полупровод-

никовых соединений GaInAsP. С помощью новых полупроводниковых материалов этого класса удалось продвинуться в длинноволновый диапазон 1,6 мкм, расширив возможности существующих магистралей связи. Фотодиоды на основе GaInAsP существенно дороже, чем германиевые и тем более кремниевые фотодиоды, в первую очередь за счет более сложной технологии.

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОЙ ЛИНИИ

### Импульсный отклик волоконной линии и предельная скорость передачи информации

При анализе искажений сигналов, передаваемых по световоду и вызванных дисперсией волокна, используют как временное представление,  $\Phi(t)$ , так и спектральное представление сигнала,  $S(\omega)$ .

Каждому из этих представлений сигнала соответствует свой метод определения дисперсионных характеристик. Во временном представлении определяют «импульсный отклик» – зависимость сигнала на выходе волокна от времени,  $R(t)$ , при подаче на его вход бесконечно короткого импульса, описываемого  $\delta$ -функцией. Самую грубую численную оценку импульсного отклика дает измерение его длительности  $\tau$  на уровне 0,5 от максимума.

В первом приближении функцию отклика отображают центр тяжести («середина», математическое ожидание, или первый момент)  $t_0 = \int_{-\infty}^{\infty} tR(t)dt$  и среднеквадратичная ширина (стандарт, стандартное отклонение, второй центральный момент)

$$\sigma = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} (t - t_0)^2 R(t) dt \right]^{1/2} .$$

Функция отклика при этом подчинена условию нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} tR(t)dt = 1 .$$

Часто за длительность импульсного отклика принимают его удвоенный стандарт.

В частотном (спектральном) представлении дисперсию волокна описывают комплексной частотной характеристикой

$$K(\omega) = S_{\text{вых}}(\omega)/S_{\text{вх}}(\omega).$$

Мощность входного сигнала модулируют по гармоническому закону на частоте  $\omega$ . На высоких частотах амплитуда  $S_{\text{вых}}$  уменьшается из-за дисперсионного «расплывания горбов».

$K(\omega)$  и  $R(t)$  связаны между собой преобразованиями Фурье:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{-i\omega t} dt,$$

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega)e^{-i\omega t} d\omega.$$

Ширину полосы пропускания  $\Pi$  обычно определяют по уровню  $-3$  дБ, т.е.  $|K(\omega)| = 0,5$ .

Функцию отклика многих реальных систем можно аппроксимировать гауссовой кривой (рис. 17)

$$R(t) = \exp[\theta/4(\ln 2)t^2/\tau^2].$$

Ее фурье-образ – частотная характеристика – также имеет гауссовский вид

$$K(\omega) = \exp[-(\ln 2)\omega^2/4\pi^2\Pi^2].$$

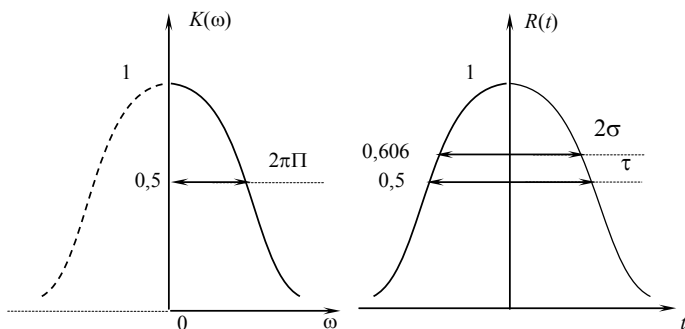


Рис. 17. Частотная характеристика  $K(\omega)$  и функция отклика  $R(t)$ :  $\Pi$  – ширина полосы пропускания;  $\tau$  – длительность импульсного отклика,  $\sigma$  – его стандарт

Значения  $\Pi\tau$  и  $\Pi\sigma$  слабо зависят от конкретного вида функции отклика. На практике принимают  $\Pi\tau = 0,44\dots 0,60$ ,  $\Pi\sigma = 0,34\dots 0,42$ .

Как видно, полосу пропускания корректнее определять по среднеквадратичной ширине функции отклика. При импульсно-кодовой модуляции скорость передачи информации (бит/с) численно равна тактовой частоте передачи двоичных сигналов в герцах. Допустимая тактовая частота примерно равна полосе пропускания. Таким образом, скорость передачи информации можно определить из соотношений

$$\Pi \approx \frac{0,32\dots 0,42}{2\sigma} = \frac{0,44\dots 0,60}{\tau}.$$

В данной работе исследуют импульсный отклик волоконной линии и измеряют время  $\tau$ . Реально на вход волокна поступает импульс конечной длительности, но оценка остается корректной, если длительность входного импульса  $\tau_{\text{вх}} \ll \tau$ .

### **Измерения затухания в ВОЛС**

В задание данной работы входят измерения затухания и оценки погонных потерь распространения света в волокнах. Измерение затухания на выделенном участке волоконной линии при ее известной длине не даст достаточных данных для достоверной оценки погонных потерь, если не выполнены следующие требования.

Во-первых, необходимо обеспечить тождественные условия ввода и вывода излучения при воспроизведении опытов с волокнами разной длины. Только в этом случае изменения затухания сигналов будут зависеть от изменения потерь распространения, и на них не повлияет эффективность согласования излучателя и приемника с волокном. Эта задача довольно трудна, если измерения проводят на волокнах, нестандартных по геометрии сечения. Для стандартных волокон со стандартными оптическими разъемами подобные измерения существенно проще, так как переходное затухание на стыках номинально одинаковых волокон обычно не превышает 0,1 дБ. Тем не менее, даже таким малым затуханием можно пренебрегать только при большой длине волокна, когда оно само вносит затухание порядка 3 дБ и более.

Во-вторых, для исключения влияния высших типов колебаний, затухающих относительно медленно, необходимо сопоставлять затухания в двух волокнах из одной и той же партии при длине одного образца не менее 100 м и длине другого образца на порядок большей. В противном случае оценка погонного затухания будет завышенной, так как до выхода длинного волокна не дойдут многие моды высшего порядка, затухающие сильнее, чем низшие моды. Отсюда следует, что измерения на многомодовых волокнах не дают достоверной оценки погонного затухания как характеристики материала.

В третьих, следует отличать уменьшение амплитуды светового импульса, вызванное дисперсией (энергетический штраф) и не связанное с потерями энергии, от истинных потерь энергии на рассеяние и поглощение. Например, если амплитуда импульса на конце линии уменьшается вдвое, а длительность вдвое увеличивается, то это означает, что потери энергии на линии пренебрежимо малы, и пиковая мощность светового сигнала уменьшилась только за счет дисперсии, а энергия светового импульса перераспределилась по более длинному интервалу времени.

Следовательно, корректное измерение погонного затухания как характеристики материала и структуры оптического волокна требует сознательного подхода к методике измерений и обработке данных. По крайней мере, нужно различать энергетические штрафы и истинное затухание с необратимой потерей энергии.

Существуют комплексные методики измерений характеристик волоконных линий, где измерение затухания выступает как неотъемлемая часть всей методики в целом. Примером может быть рефлектометрия с временным представлением, описанная далее.

### **Измерения продольной однородности ВОЛС. Рефлектометр с временным представлением**

Для анализа распространения сигналов по световоду удобно временное представление  $\Phi(t)$ . Этот подход технически реализован в измерительной аппаратуре OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer, оптический измеритель отражения с временным представле-

нием). Приборы OTDR существуют как в лабораторных, так и в мобильных исполнениях; они представляют собой лазерные локализаторы, посылающие в линию импульсный сигнал и принимающие рассеянное назад излучение.

В состав OTDR (рис. 18) входят: задающий генератор ( $\Gamma$ ) импульсов синхронизации передатчика ( $\Pi$ ), направленный ответвитель (НО), фотоприемник с волоконным входом (ФПУ) и цифровой стробоскопический осциллограф (см. приложение 4) с записью данных в буфер памяти. На рисунке стробоскопический осциллограф показан в виде развернутой схемы, состоящей из процессора сигнала и дисплея.

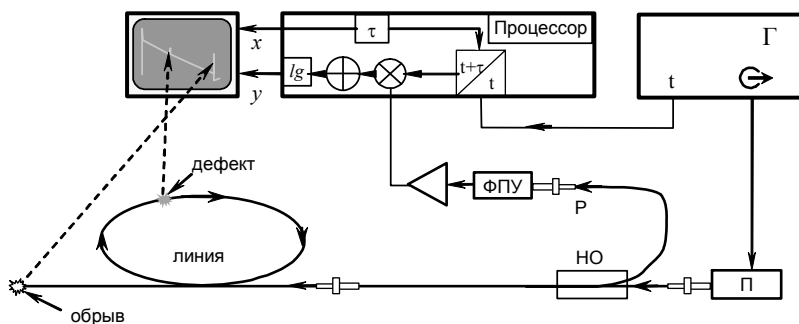


Рис.18. Упрощенная структурно-функциональная схема рефлектометра OTDR

OTDR предназначены для измерения характеристик протяженных линий и кабелей непосредственно на месте прокладки, где аппаратуру можно присоединить только к одному концу линии, а ее противоположный конец недоступен. OTDR применяют для измерения затухания и отражений от неоднородностей (плохих стыков, дефектов, обрывов и пр.). Принцип действия и процедуры обработки сигналов в OTDR мы поясним на примере рис. 19, где показан образец рефлектограммы.

Развертка стробоскопа осциллографа синхронизирована с импульсами передатчика. На выходе (Р) направленного ответвителя действует излучение, рассеянное в волоконной линии назад. В абсолютно однородной линии это рассеяние – релеевское, и его мощность экспоненциально затухает по мере удаления от начала

волокна. С учетом затухания отраженного излучения при его распространении назад от участка, удаленного на расстояние  $X$  от входа, мощность сигнала рассеяния от этого участка на фотоприемнике пропорциональна  $\exp\{-2X\alpha\}$ .

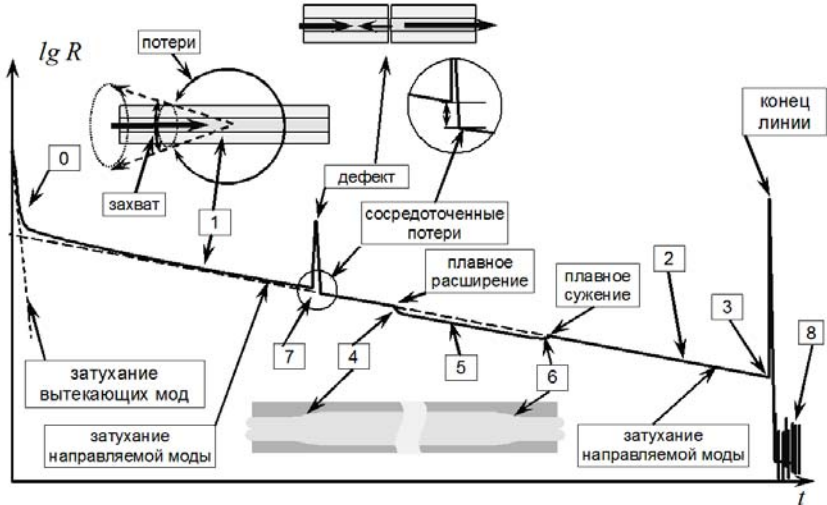


Рис. 19. Пример рефлектограммы линии с неоднородностями:

0 – отражение от начала линии, 1 – релейское рассеяние назад и конус захвата на однородном участке, 2 – рассеяние назад на однородном участке, 3 – отражение от конца линии, 4 – расширение сердцевинки и модового пятна в зоне сварки неодинаковых волокон, 5 – однородный участок, 6 – сужение сердцевинки и модового пятна в зоне сварки, 7 – плохой стык или трещина, 8 – шум логарифмического усилителя в отсутствие сигнала

Импульсный сигнал от точки  $X$  приходит к приемнику через интервал времени  $t = 2X/v_g$  после импульса передатчика. Форму сигнала на выходе приемника  $S(t) \propto \exp\{-t\alpha v_g\}$  отображает и записывает стробоскопический осциллограф. Наиболее удобная форма представления результатов измерений OTDR – зависимость логарифма мощности отраженного сигнала от времени; осциллограмма отраженной мощности выглядит как линейно убывающая функция  $\text{const} \cdot (1 - t\alpha v_g)$ , если линия однородна на всем ее протяжении. В координатном представлении осциллограмма имеет вид  $\text{const} \cdot (1 - 2\alpha X)$ , и из нее получают значение  $\alpha$ .



Длительность импульса передатчика и согласованную с ней длительность выборки сигнала в стробоскопическом осциллографе выбирают достаточно большой, от десятка наносекунд до микросекунды, чтобы улучшить отношение сигнал/шум, избежать энергетических штрафов за дисперсию, но при этом не снизить до неприемлемого уровня пространственное разрешение рефлектограммы. Каждый отсчет рефлектограммы формируется усреднением множества импульсов с фиксированной задержкой момента стробирования отраженного сигнала по отношению к началу входного импульса. Это улучшает отношение сигнал/шум. Во всяком случае, для получения рефлектограммы требуется значительное время, тем большее, чем больше длина линии и чем выше требования к пространственному разрешению. Возможны измерения при фиксированном отношении сигнал/шум; время усреднения сигнала уменьшаются при увеличении его текущей мощности. В таком режиме общее время измерения при заданной чувствительности будет минимальным.

Теперь прокомментируем рефлектограмму на рис. 19, где показаны примеры отображения неоднородностей и дефектов линии. В области больших времен (участок 2) показатель экспоненты почти постоянен и отображает погонное затухание в волокне. В области малых времен (участок 0) сигнал спадает очень быстро; этот сигнал вызван рассеянием быстро затухающих высших мод – вытекающих и оболочечных. Пик 7 вызван отражением от дефекта (наиболее вероятны трещина или сильная локальная деформация сердцевины). Так как за пиком 7 нет существенного спада сигнала, можно утверждать, что локальное затухание, связанное с выявленным дефектом, невелико в сравнении с общим затуханием, распределенным по длине линии. Пик 3 – отражение от конца линии. Отражение от обрыва линии (–15...20 дБ) на порядки сильнее, чем релейское рассеяние (–65...90 дБ), поэтому высота пика 3 на рефлектограмме относительно велика. Наиболее трудны для расшифровки фрагменты 4...6 (изменения диаметра сердцевины). Иногда помогает только сравнение рефлектограмм, снятых для двух встречных направлений, если это возможно.

Приведенный пример показывает, как можно, имея доступ только к одному концу волоконной линии, измерить в ней общее и погонное затухание, длину трассы, провести локацию неоднородностей и дефектов, оценить их влияние на распространение световых импульсов. OTDR довольно дороги, но незаменимы в метрологическом обеспечении производства, монтажа и технического обслуживания волоконных линий связи. Без сложных аппаратных комплексов с OTDR наивысшего качества был бы невозможен контроль прокладки и монтажа подводных трансокеанских ВОЛС.

### **Измерения хроматической дисперсии волокон**

Для измерения хроматической дисперсии при любом методе и в любом представлении необходим источник монохроматического излучения, перестраиваемый по длине волны в достаточно широком диапазоне. Такие источники обычно непригодны для генерирования наносекундных импульсов, поэтому в состав установки придется ввести и быстродействующий модулятор излучения.

Измерения зависимости групповой задержки от длины волны достоверны только на многокилометровых волокнах. Чем меньше ожидаемая дисперсия, тем длиннее должна быть трасса. Например, если точность измерения вариаций групповой задержки 10 пс, то для волокон с номинальной нулевой дисперсией (2 пс/нм/км) нужно иметь произведение длины трассы на изменение длины волны около 50 км·нм. При диапазоне перестройки источника 10 нм нужно взять волокно длиной 5 км. Легче (и важнее) измерять ненулевую дисперсию стандартных и улучшенных волокон для линий WDM; здесь при той же аппаратуре измерения можно выполнять на кабелях длиной порядка километра. При испытаниях уже проложенных трасс приходится проводить измерения на пролетах в десятки километров и более; здесь технические трудности возникают из-за взаимной отдаленности передающей и приемной частей. Так как в состав магистрального оптического кабеля входит множество волокон, то сигнал на передающую станцию можно после усиления вернуть по другому волокну к измерительному приемни-

ку, и тогда всю процедуру измерений может вести один оператор. Для подобных измерений созданы специализированные программируемые измерители; часто в состав одного прибора измеритель дисперсии и OTDR входят как сменные модули. Такое решение очень удобно для мобильных измерителей.

В некоторых случаях дисперсию длинных линий оценивают косвенно, по искажениям импульсов с известными спектрально-временными параметрами.

Хроматическую дисперсию можно измерять как зависимость сдвига фазы при распространении света по волокну от длины волны при помощи интерферометра. Далее рассчитывают дисперсию групповой задержки. В опорном плече интерферометра может быть либо воздушная линия, либо эталонное волокно с заранее измеренной дисперсией. Эта методика более пригодна для лабораторных и цеховых испытаний относительно коротких отрезков волокон (менее километра).

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка предназначена для исследования распространения световых импульсов в волокне методом прямого осциллографирования. Основные блоки установки: передатчик с импульсным инжекционным лазером, отрезки волокна, фотоприемник, задающий генератор импульсов и стробоскопический осциллограф (см. приложение 4). Для облегчения настройки установки к ней добавлен вспомогательный скоростной осциллограф реального времени. Оптико-электронная схема установки (составные части и цепи важнейших сигналов и синхроимпульсов) показана на рис. 20. Ниже даны краткие характеристики составных частей.

Отрезки волокон (0,5, 0,7 и 1 км) присоединяют к приемнику и излучателю при помощи стандартизованных разъемов для стыковки оптических волокон типа ST (с байонетным замком). Для сборки более длинных линий можно использовать вспомогательные отрезки волокон длиной 1 м (патч-корды).

В состав установки входят нетиповые модули: передающий излучатель П и фотоприемное устройство ФПУ.

Основу передающего излучателя составляет инжекционный лазер, возбуждаемый импульсами тока с амплитудой до 1 А и тактовыми частотами до сотен килоггерц. Такие импульсы формирует ждущий ключевой одновибратор с разрядной линией на лавинном транзисторе. Форма импульса мощности излучения лазера колоколообразная, времена нарастания и спада импульса между уровнями 0,1 и 0,9 составляют около 350 пс, длительность импульса по уровню 0,1 – не более 800 пс.

Подчеркнем, что приведенные здесь параметры импульса получены при помощи входящего в установку фотоприемного устройства ФПУ, и поэтому они фактически описывают сквозную передачу сигнала по линии очень малой длины. Фактическое быстродействие и излучателя, и приемника по отдельности в иных условиях может быть лучше.

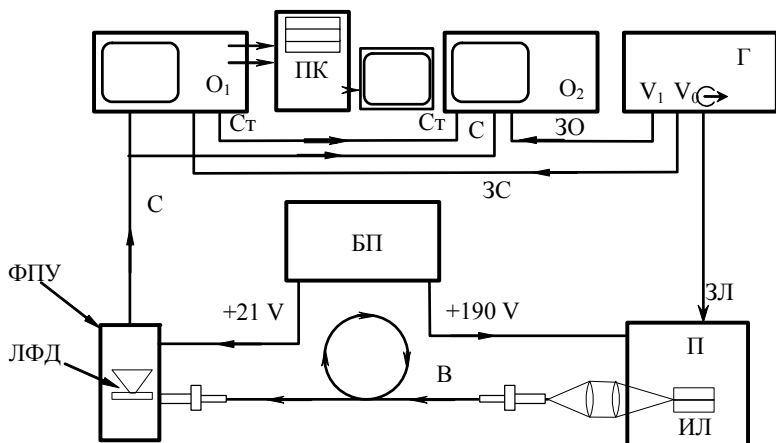
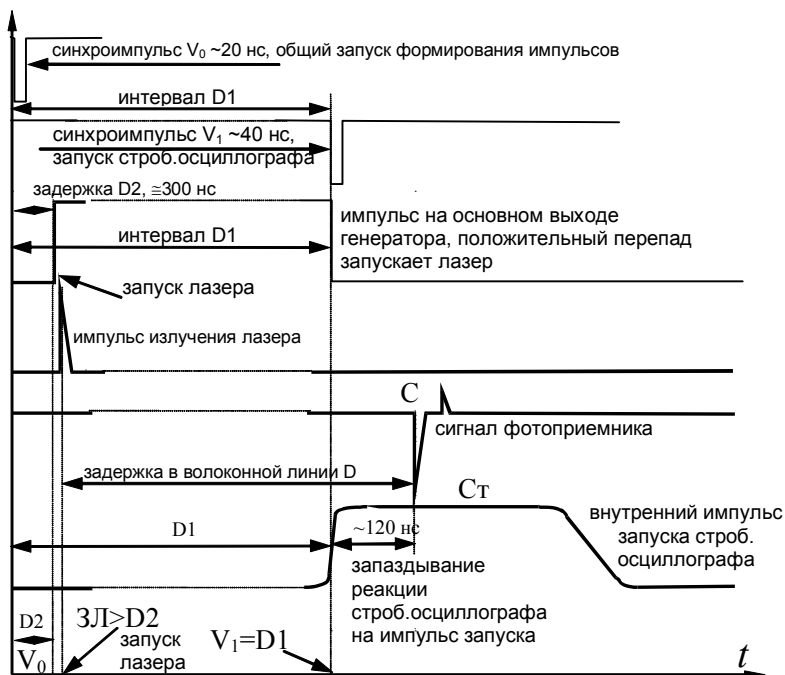


Рис. 20. Структурно-функциональная схема лабораторной установки:  
 Г – генератор импульсов Г5–60; О<sub>1</sub> – стробоскопический осциллограф (С1–74 с блоком развертки 1Р71 и предусилителем 1У71);  
 О<sub>2</sub> – осциллограф С1–75; П – передающий излучатель с инжекционным лазером ИЛ; ФПУ – фотоприемный модуль с лавинным фотодиодом ЛФД–1; ПК – компьютер с АЦП; В – волоконная линия; БП – блок питания; ЗЛ – цепь запуска лазера; ЗС – цепь запуска стробоскопа; ЗО – цепь запуска осциллографа реального времени; С – цепь сигнала фотоприемника; Ст – импульс внутренней синхронизации стробоскопа

Фотоприемное устройство собрано на основе германиевого фотодиода ЛФД-2, работающего в режиме лавинного размножения неравновесных носителей (быстродействие фотодиода около 0,4 нс) Оно предназначено для приема световых импульсов длительностью не более десятков наносекунд и по входу согласовано с кабелем 50 Ом. В области времен до 10 нс рассогласование, вызванное разветвлением сигнала на два осциллографа, еще не искажает форму импульса. Для более точного анализа формы импульса в области времен далее 10 нс следует после настройки отсоединять от тройника-разветвителя кабель, идущий ко входу осциллографа О<sub>1</sub>.

Рекомендуемая частота повторения импульсов излучения лазера 30 кГц. Тактовая диаграмма сигналов и синхроимпульсов показана на рис. 21. Последовательность запускающих импульсов, управ-

ляющих работой установки, формирует генератор импульсов Г5-60. Как видно из диаграммы, первым формируется импульс  $V_0$ , который запускает осциллограф реального времени. Затем с задержкой  $D2$  начинается формирование импульса на главном выходе генератора, фронт нарастания которого запускает лазер. После этого с задержкой  $D1$  от начала импульса  $V_0$  на выходе  $V_1$  появляется импульс  $V_1$ , который запускает стробоскопический осциллограф. В этот же момент  $V_1$  начинается фронт спада импульса на главном выходе генератора Г5-60.



Из диаграммы видно, что задержку распространения светового сигнала в волоконной линии можно рассчитать с помощью выражения  $D = D1 - D2 + 120$  нс

Рис. 21. Диаграмма временной последовательности сигналов и важнейших синхронизирующих импульсов

При такой тактовой диаграмме на обоих осциллографах сигнал фотоприемника виден в наилучших условиях. Если на осциллогра-

фе реального времени (С1-75, временное разрешение 2 нс) все импульсы наблюдать нетрудно, то для наблюдения сигнала на стробоскопическом осциллографе необходимо правильно настроить задержку синхроимпульса запуска по отношению к переднему фронту импульса запуска лазера ( $V_0 + D2$ ).

Стробоскоп нужно запускать примерно за 120 нс до прихода сигнала; это опережение не регулируемое, его следует только проверять по осциллограмме в реальном времени. Поэтому при работе с короткими волокнами необходимо вначале запускать стробоскоп, и только затем лазер. Для этого полезно вводить задержку  $D2$  – не менее 200 нс. Эта задержка не нужна, когда задержка светового импульса в волоконной линии превышает 200 нс, и разность задержек  $D1 - D2 > 200$  нс, но при  $D2 \cong 200$  нс для обеспечения нужной задержки при изменениях длины волоконной линии от нуля до десятков километров можно будет изменять только  $D1$ .

Для генератора Г5-60 в режиме формирования импульсов №3 время  $D1$  – задержка спада импульса,  $D2$  – задержка нарастания импульса по отношению к синхроимпульсу  $V_0$ . При  $D1 > D2$  главный выходной импульс положительный, при  $D1 < D2$  – отрицательный. Присутствие на главном выходе постоянной составляющей не имеет значения, так как передающий излучатель запускается через импульсный трансформатор.

Обозначения  $D1$ ,  $D2$ ,  $V_0$ ,  $V_1$  соответствуют обозначениям на лицевой панели генератора импульсов Г5-60. Опережение запуска стробоскопического осциллографа по отношению к моменту прихода на его вход сигнала устанавливают примерно равным 120 нс по осциллограмме на скоростном осциллографе в реальном времени. При выполнении этого условия форму импульса, прошедшего через волоконную линию, можно будет наблюдать на стробоскопическом осциллографе.

Реальные задержки могут на несколько процентов (а номинально нулевые – на несколько наносекунд) отличаться от указанных. Обратите внимание, что отрезок электрического коаксиального кабеля длиной 1 м вносит дополнительную задержку около 3,5 нс. Стабильность задержки срабатывания электронных устройств зависит от абсолютной скорости нарастания запускающих их син-

хроимпульсов  $dU/dt$  и установленного уровня срабатывания устройства запуска. На тактовой диаграмме небольшие неконтролируемые задержки показаны условно как задержки фронтов импульсов по отношению к номинальным фазам тактовой диаграммы, отмеченным пунктирными вертикальными линиями.

Для ввода излучения лазера в волокно применен двухлинзовый объектив (симметричный дублет) с числовой апертурой 0,3 и фокусным расстоянием 12 мм. Он формирует сходящийся пучок, который удовлетворительно согласован с сердцевиной многомодового волокна ( $N_a = 0,22$ , диаметр сердцевины 50 мкм, линейное увеличение объектива около  $-1^{\times}$ ).

Входные и выходные концы волокон закреплены на гребенке оптических разъемов. Установлены 3 образца длинных волокон:

- 1) 0,5 км, градиентное;
- 2) 0,7 км, со ступенчатым ППП;
- 3) 1 км, градиентное.

Конкретные параметры и характеристики установленных волокон указаны в инструкции на рабочем месте.

**Внимание!** На концах неиспользуемых световодов во избежание повреждений должны быть надеты защитные колпачки. Будьте аккуратны при всех манипуляциях с волокнами!

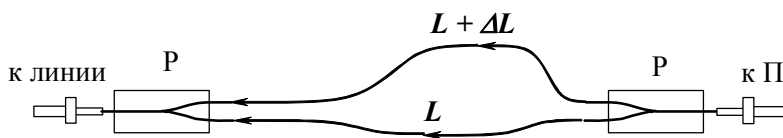


Рис. 22. Схема получения двойного светового импульса с вариацией запаздывания при изменениях разности длины трасс на  $\Delta L$ . Трассы, составленные из нескольких патч-кордов, условно показаны как непрерывные

Для записи осциллограмм со стробоскопического осциллографа в состав установки добавлен персональный компьютер (ПК) на платформе i486DX2 с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) сигнала. ПК совместно с АЦП образуют виртуальный запоминающий НЧ осциллограф (ВО), дублирующий на дисплее и записывающий на жесткий диск сигнал стробоскопического осциллографа



фа. На параллельный порт ПК (вход запуска ВО) приходит импульс запуска развертки стробоскопа, а на вход АЦП – напряжение с выхода стробоскопического преобразователя.

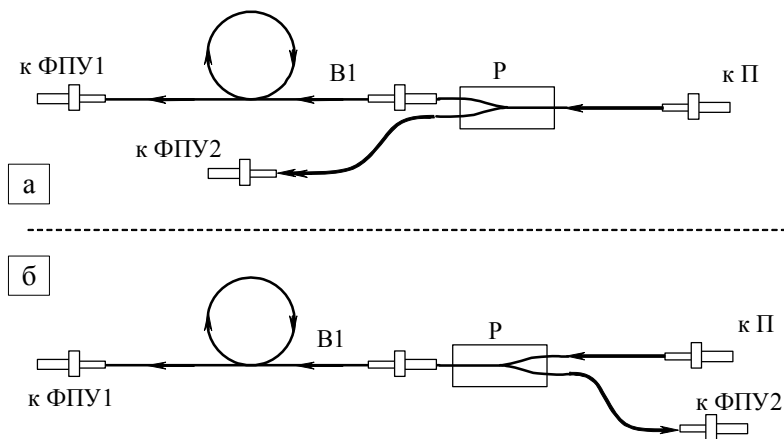


Рис. 23. Схемы для измерений коэффициента разветвления (а) и обратного рассеяния (б)

ВО работает в ждущем режиме; в режиме ожидания управляющая программа постоянно периодически опрашивает параллельные входные логические порты ПК и указатели буфера клавиатуры. При появлении на одном из разрядов входного порта логического нуля ТТЛ программа начинает прием с АЦП цифрового потока, на который отображается сигнал с выхода стробоскопа. При этом вход синхронизации логически блокируется до окончания приема сигнала, его обработки и отображения на дисплее ПК. Далее программа устанавливает входные регистры параллельных портов в состояние логической единицы и возобновляет опрос портов и клавиатуры. Если на порт приходит синхроимпульс, отображается следующий кадр, и так далее. Если по какой-либо причине ожидание синхроимпульса затягивается, то вывести программу из бесконечного цикла опроса можно с клавиатуры. В зависимости от того, какая клавиша была нажата, программа либо делает паузу в опросе, либо возвращается в цикл запроса синхроимпульса, либо заканчивает работу.

Программа делает паузу по команде с клавиатуры и тогда, когда синхроимпульсы регулярно приходят на порт синхронизации. Во время паузы на дисплее ПК отображена последняя осциллограмма на фоне вспомогательной координатной сетки. В этом режиме можно отправить массив цифровых данных этой осциллограммы в файл на жестком диске. Кроме того, можно запустить программный блок моделирования трех последовательных импульсов с заданным временным интервалом между соседними импульсами. Синтезированная программой осциллограмма отображается на дисплее ПК. По таким осциллограммам, варьируя интервалы между виртуальными импульсами, можно оценить наименьший временной интервал, при котором все импульсы уверенно различаются. Контекстные подсказки оператору для управления программой отображаются на дисплее по мере их надобности.

Управляющая программа работает в среде MS DOS 6.22. Разрешен ее запуск и в среде WINDOWS 3.11, автономно или из рабочей книги Excel (FIBERS.xls). В последнем случае при помощи локальной макропроцедуры LoadData удобно переносить данные осциллограмм из файла в рабочую таблицу, последовательно заполняя ее столбцы. После переноса данных в таблицу их можно обрабатывать и отображать средствами Excel.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. Установка режима работы задающего генератора Г5-60.

1.1. Проверить соединения частей установки по схеме рис. 7.

1.2. Установить:

- режим формирования импульса 3,
- *отрицательную* полярность импульса на главном выходе генератора Г5-60,
- время задержки  $D2 = 300$  нс,
- время задержки  $D1$  в соответствии с длиной волоконной линии,
- период повторения импульсов 30 мкс.

2. Ввод излучения лазера в волокно (только для ИТР учебной лаборатории).

2.1. Для ввода излучения в волокно нужно сфокусировать его на торцевом срезе, как можно точнее совместив пятно фокусировки с сердцевинной. При этих операциях для рассматривания входных торцев волокон пользуйтесь телевизионным микроскопом.

2.2. При правильном вводе излучения можно разглядеть свечение на выходном конце волокна, сопряженного с лазером-передатчиком. При слабой расстройке это свечение слабеет.

2.3. Для окончательной настройки рекомендуем использовать сигнал фотоприемника, присоединенного непосредственно к выходу лазера-передатчика.

***Внимание!** Глубина резкости объектива микроскопа гораздо меньше 1 мм. При рассматривании входных торцов волокон проявите некоторое терпение! Поворачивайте микрометрические юстировочные винты очень плавно. Эти операции требуют определенного навыка и тренировки.*

### **3. Предварительная настройка схемы регистрации (только для ИТР учебной лаборатории).**

3.1. Присоединить вспомогательный передатчик ко входу фотоприемника.

3.2. На осциллографе реального времени получить сигнал фотоприемника.

3.3. Плавным вращением настроечных винтов добейтесь наибольшей амплитуды сигнала на выходе.

3.4. Восстановить основную схему оптических соединений.

### **4. Настройка стробоскопа.**

4.1. По осциллограмме реального времени на С1-75 подстроить задержку D1 так, чтобы передний фронт импульса Ст опережал импульс С примерно на 100 нс.

4.2. Установить скорость развертки на блоке 1P71 равной 10 нс/дел.

4.3. Регулятором задержки на блоке 1P71 подстроить развертку стробоскопа так, чтобы видеть импульс сигнала фотоприемника в начале развертки.

4.5. Установить скорость развертки на блоке 1P71 равной 1 нс/дел и подстроить задержку развертки на блоке 1P71.

## 5. Общие методические замечания.

5.1. Описанные в п.4 действия проводят при повторении процедуры измерений на каждом образце волокна.

5.2. При проведении измерений следует записывать осциллограммы стробоскопического осциллографа при помощи программы FIBERS. Записывайте все условия наблюдений в электронную таблицу.

5.3. Приведенные ниже задания относятся к длинным образцам волокон. Измерения на коротких образцах проводят как контрольные.

## ЗАДАНИЯ

1. Определить время распространения светового импульса в волкне и длину волокна, считая  $n = 1,5$ .

2. \*По времени задержки «медленных» мод попытайтесь оценить параметры волокна, обуславливающие характеристики мод высших порядков.

3. Измерить длительность импульса на выходе волокна по уровню 0,5. По результату определить дисперсию волокна.

4. Определить пропускную способность для исследованного типа волокна в пересчете на протяженность линии 10 км. Сопоставьте результат с потоком информации, передаваемым по телефонной линии, по телевизионному каналу, по вещательным радиоканалам АМ и ЧМ.

5. По осциллограммам импульсов на входе и выходе каждого из образцов длинного волокна определить реальное общее и погонное затухание светового импульса по энергии. При расчетах следует сопоставлять не амплитуды импульсов на выходе фотоприемника, а их световые энергии, отображаемые площадью импульсного сигнала фотоприемника.

6. Ввести в разрыв линии у входа в длинное волокно разветвитель (рис. 23, а). Измеряя энергии импульсов на выходах разветвителя, определить коэффициент разветвления.

7. Переключив плечи разветвителя (рис. 23, б), измерить переходное затухание между выходными плечами для обратной волны; оценить коэффициент направленности разветвления.

8. В той же оптической схеме измерить коэффициент отражения от конца линии и от подключенных к нему рассогласованных и согласованных линий (патч-кордов разного типа).

9. Соединить волокна и разветвители по рис. 22. Изменяя задержку на участке трассы переменной длины при помощи вспомогательных патч-кордов (0,5...5 нс), моделировать передачу по длинной волоконной линии импульсов с различными интервалами.

10. По полученным осциллограммам оценить пропускную способность линии; для этого следует выбрать разумные критерии различения импульсов с учетом вариаций статистических характеристик. Полученные результаты сопоставить с результатами цифрового моделирования группы импульсов.

### **Факультативные задания**

Соединить выход передатчика со входом спектрометра длинным патч-кордом. Записать спектр излучения лазера-передатчика. По полученным результатам оценить ожидаемый вклад материальной дисперсии в общую дисперсию градиентного волокна с учетом реально измеренного спектра излучения передатчика. Волноводной составляющей дисперсии пренебречь.

Перемещая точку фокусировки излучения лазера на входе в волокно, наблюдать изменения формы импульса на выходе из длинного многомодового волокна. Сравнить результаты для разных образцов волокон. Сформулировать заключение о степени перемешивания мод в исследованных образцах.

Наблюдать изменения формы и мощности импульса на выходе из длинного многомодового волокна при замене в начале линии патч-корда 50 мкм на 62,5 мкм. Сформулировать заключение о степени перемешивания мод в исследованных образцах.

Наблюдать изменения формы и мощности импульса на выходе из длинного многомодового волокна при замене в начале линии патч-корда 50 мкм на одномодовый (9 мкм). Сопоставить наблюдения на ступенчатом и градиентных волокнах. Сформулировать заключение о степени перемешивания мод в исследованных образцах.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите преимущества ВОЛС в сравнении с электрическими, радиоволновыми и открытыми оптическими линиями связи.
2. \*\*\*Сопоставьте потери энергии при ее передаче по проводам на постоянном и переменном токе, по коаксиальным кабелям и волноводам на СВЧ, по полым металлическим и волоконным световодам в оптическом диапазоне.
3. \*\*\*Сопоставьте пропускную информационную способность линий связи, перечисленных в предыдущем пункте.
4. Что ограничивает полосу пропускания волоконного световода?
5. Назовите причины дисперсии оптического волокна.
6. Чем хроматическая дисперсия волоконного световода отличается от межмодовой дисперсии?
7. Какая безразмерная величина может служить параметром подобия световодов со ступенчатым ППП?
8. В чем основное преимущество градиентного волокна в сравнении с волокном со ступенчатым ППП?
9. Как связаны между собой длительность импульсного отклика и ширина полосы пропускания волновода?
- 10.\*\*Какие искажения сигнала в ВОЛС необратимы и не поддаются коррекции?
11. В чем преимущества лазера как передатчика оптических сигналов перед некогерентными излучателями?
- 12.\*Чем стробоскопический осциллограф отличается от осциллографа реального времени? Какие измерения выполняют при помощи стробоскопического осциллографа?
- 13.\*Как работает лавинный фотодиод?

---

\*Вопросы по технике эксперимента.

\*\*Вопросы повышенной трудности.

\*\*\*Вопросы особой трудности.

## 1. Распространение монохроматического излучения в круглом диэлектрическом волноводе

Исходными для строгого анализа служат уравнения Максвелла. Основные этапы решения задачи:

Составление волнового уравнения без учета потерь на поглощение, с учетом пространственной симметрии задачи; из-за пространственной локализации поля должны иметь ненулевые продольные компоненты.

Разделение переменных; подстановка решения в форме бегущей волны дает связь между продольной составляющей волнового вектора и его поперечными компонентами

Учет граничных условий; получение и решение характеристических уравнений, определяющих собственные функции задачи (моды волновода) и нахождение по этим решениям всех компонент поля в сердцевине и оболочке.

Расчет доли потока, распространяющейся в сердцевине волокна, для заданных мод, расчет дисперсии и прочих характеристик.

Пусть ось  $z$  направлена по оси волновода, и поле бегущей волны есть функция, пропорциональная  $\exp[i(\omega t - \beta z)]$ . Для однородного диэлектрика уравнения Максвелла имеют вид

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\mathbf{E} + \omega\mathbf{H}\mu_0 = 0, \\ \operatorname{rot}\mathbf{H} + i\omega n^2\varepsilon_0\mathbf{E} = 0, \\ \operatorname{div}(n^2\mathbf{E}) = 0, \\ \operatorname{div}\mathbf{H} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В реальных волноводах показатель преломления мало изменяется на расстоянии порядка длины волны, так что в волновых уравнениях можно пренебречь членами  $\sim |\operatorname{grad}(n^2)|/n^2$ . Это приводит к упрощенному волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + [k^2(r) - \beta^2] \psi = 0, \quad (5)$$

которое справедливо только для  $\psi = E_z, H_z$ . Здесь  $k$  – локальное волновое число, а  $\beta$  – волновое число для вакуума. Полагая  $\Psi = \Phi(\varphi) \cdot R(r)$ , получим для азимутальной и радиальной частей следующие уравнения:

$$\Phi'' + \nu^2 \Phi = 0, \quad (6)$$

$$R'' + \frac{1}{r} R' + \left[ k^2(r) - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right] R = 0, \quad (7)$$

где  $\nu$  – константа разделения переменных. Общее решение первого уравнения

$$\Phi(\varphi) = A_\varphi \cos \nu \varphi + B_\varphi \sin \nu \varphi \quad (8)$$

однозначно, если  $\nu$  целое. Чтобы найти  $R(r)$ , необходимо в (7) задать конкретно зависимость  $k(r)$ . Для ступенчатого ППП

$$k(r) = \begin{cases} k_c \equiv (2\pi/\lambda_0)n_c, & r \leq a; \\ k_0 \equiv (2\pi/\lambda_0)n_0, & r > a. \end{cases} \quad (9)$$

У направляемых мод поле в оболочке быстро затухает, и внешний радиус оболочки можно считать бесконечно большим. Условия на границе оболочки в этом случае нужно заменить условием быстрого затухания решения при  $r \rightarrow \infty$ . После подстановки  $\chi = \chi r = \sqrt{k^2 - \beta^2} r$  уравнение (7) сводится к уравнению Бесселя

$$\frac{d^2 R}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{dR}{d\xi} + \left( 1 - \frac{\nu^2}{\xi^2} \right) R = 0. \quad (10)$$

Решениями (10) для  $\rho < a$ , конечными при  $r = 0$ , будут функции Бесселя  $J_\nu(\xi)$ , а для области  $r > a$  – модифицированные функции Ханкеля,  $K_\nu(\xi)$ . Для продольных компонент поля тогда можно записать

$$\begin{pmatrix} E_z \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} J_\nu(\chi_c r), \quad r < a, \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} E_z \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} K_\nu(\chi_0 r), \quad r > a, \quad (12)$$



где  $A, B, C, D$  – постоянные, причем только одна из них независимая,  $\chi_c = \sqrt{k_c^2 - \beta^2}$ ;  $\chi_0 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2}$ .

При  $\chi_0 r \rightarrow \infty$  асимптотически  $K_\nu(\chi_0 r) \rightarrow \exp(-\chi_0 r)$ .

Из физических соображений  $\chi_0 > 0$ , то есть  $\beta \geq k_0$ . Это неравенство служит *формальным* условием отсечки. Неформально, выше частоты отсечки при возбуждении в сердцевине заданной моды на границе между сердцевиной и оболочкой образуется подобие фазированной излучающей решетки с шагом меньшим, чем длина волны в материале оболочки. В таких условиях подобная решетка не может излучать вторичную волну, не затухающую на бесконечности, ни в одном из наружных направлений, в оболочку. Здесь видна аналогия с дифракционной решеткой, у которой шаг меньше длины волны; она отражает свет только в направлении нулевого порядка. Напротив, внутри сердцевины, где длина волны меньше шага *когерентно* излучающей решетки, излучение возможно; в пределе геометрической оптики направление излучения просто совпадает с направлением волны, испытавшей полное внутреннее отражение. Отсюда и следует, что *выше частоты отсечки моды* перестает быть излучающей и *становится направляемой*, так как волновод перестает излучать наружу. Отсюда же видно, что отсечка – эффект *интерференционный*, не связанный прямо с полным внутренним отражением.

С другой стороны, для сердцевины  $\chi_c$  должно быть вещественным, следовательно,  $k_0 \leq \beta \leq k_c$ . После упрощения это дает  $n_0 \leq n_{\text{эфф}} \leq n_c$ . Это означает, что фазовая скорость волны, распространяющейся в двух смежных средах с различными показателями преломления, принимает промежуточное значение, определенное условием непрерывности тангенциальных компонент при  $r = a$ . Граничные условия дают четыре однородных уравнения для переменных  $A, B, C, D$ . Равенство определителя этой системы дает характеристическое уравнение для  $\beta$  (или  $n_{\text{эфф}}$ ). На этом этапе вводят безразмерные переменные (параметры подобия)  $V, \beta/k_0, a/\lambda, \Delta$ .

Приведенная схема решения позволяет для заданной частоты и параметров волновода рассчитать постоянную распространения.

Мы не станем доводить до конца решение, которое можно получить только численно. Нам важны качественные выводы, вытекающие из свойств решения.

В диэлектрическом волноводе фазовая скорость волны зависит от частоты. Дисперсия возникает из-за того, что по мере увеличения длины волны излучения оно проникает в оболочку волокна все глубже. Формально при этом уменьшаются параметры  $\chi_0$  и  $\chi_c$ , фазовая скорость волны растет,  $n_{эфф}$  падает (рис.7). Такая специфическая дисперсия названа *волноводной*. Вблизи от частоты отсечки ( $2 < V < 2,4$ ) заметная часть мощности излучения (более 10%) распространяется в оболочке.

Волноводная дисперсия – часть общей хроматической дисперсии, в состав которой входит и материальная дисперсия, то есть зависимость фазовой скорости от частоты в материале сердцевин. Во избежание ошибок напомним, что для ВОЛС важна не дисперсия фазовой скорости сама по себе, а ее влияние на дисперсию групповой задержки. Поэтому хроматической дисперсией волокна называют дисперсию *групповой задержки*, как материальную ( $D_M$ ), так и волноводную ( $D_W$ ). Более подробные разъяснения изложены в приложении 3.

В многомодовых волокнах, в том числе и в градиентных, роль хроматической дисперсии невелика в сравнении с межмодовой. Кроме того, в многомодовом волокне поток энергии в оболочке крайне мал в сравнении с потоком в относительно толстой сердцевине, так что здесь вклад оболочки в волноводную дисперсию незначителен. Поэтому есть смысл рассматривать хроматическую дисперсию только в одномодовых волокнах.

Расчеты (приложение 3) показывают, что *волноводная дисперсия групповой задержки*  $D_W$  стандартного одномодового волокна в С-диапазоне *отрицательная* (см. рис. 12); здесь при увеличении длины волны групповая скорость растет. Нулевую и даже положительную дисперсию в волокне со стандартной числовой апертурой можно получить, уменьшив диаметр сердцевин до 3...5 км ( $V \approx 1$ ). При  $V = 1$  в оболочке сосредоточено до 80 % мощности излучения, затухание увеличивается до 1 дБ/км. Столь тонкие волокна непригодны для магистралей, но их (в отрезках до 10 км) при-

меняют для компенсации хроматической дисперсии линий связи со стандартными волокнами.

Материальная групповая дисперсия  $D_M$  кварца меняет знак около  $\lambda = 1,27$  мкм; она отрицательна в коротковолновой части и положительна в длинноволновой (см. приложение 3). В  $O$ -диапазоне (1,3 мкм) в стандартных одномодовых волокнах материальная дисперсия, положительная по знаку, компенсирует отрицательную волноводную; суммарная хроматическая дисперсия получается близкой к нулю. В диапазоне 1,55 мкм в стандартных одномодовых волокнах преобладает положительная материальная дисперсия, и суммарная хроматическая дисперсия на порядок больше. Модифицировав ППП волокна, можно снизить хроматическую дисперсию и на 1,55 мкм за счет большей по модулю отрицательной волноводной части ( $D_W$ ) полной хроматической групповой дисперсии.

В диапазоне  $V = 1 \dots 2,5$  предложены практичные приближенные выражения для параметров основной моды, где склеенные на границе волновода куски функций Бесселя  $J_0, K_0$  аппроксимированы одной функцией Гаусса. В избранном приближении эффективный показатель преломления

$$n^* = n_0 + b(n_c - n_0) \approx n_0(1 + b\Delta),$$

где введен безразмерный параметр

$$b = \frac{n^* - n_0}{n_c - n_0}, \quad 0 < b < 1,$$

$$b(V) \approx (1,1428 - 0,9960/V)^2.$$

Приведенный диаметр модового пятна  $2w$

$$2w \approx 2a \cdot (0,65 + 1,619V^{3/2} + 2,879V^6).$$

Коэффициент заполнения сердцевин по мощности

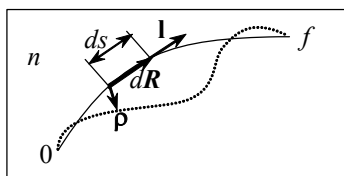
$$\Gamma = \frac{P_c}{P_{c+o}} = \frac{\int_0^a |E_x|^2 r dr}{\int_0^\infty |E_x|^2 r dr} = 1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{w^2}\right).$$

(Приведенные здесь формулы взяты из курса лекций Г.П. Агравала (Рочестерский ун-т, 2006–2007 гг.). Их можно применять для оценки волноводной дисперсии одномодового волокна со стандартным или уменьшенным диаметрами сердцевин.)

## 2. Распространение света в градиентном волокне

В приближении геометрической оптики траекторию луча в неоднородной среде  $n = n(r)$  описывают уравнением эйконала («огромной фазы»), но мы пойдем иным путем, так как нас интересует не траектория сама по себе, а время распространения луча по этой траектории.

Мы применим вариационный принцип Ферма, по которому световой луч между двумя точками распространяется за наименьшее время. Вариация интеграла  $(1/v)ds$  по траектории между точками старта  $0$  и финиша  $f$  должна быть равной нулю. Показатель преломления  $n$  мы считаем функцией координат  $n(x, y, z)$  или  $n(\mathbf{R})$ , но



для краткости записи аргументы будем опускать. Так как  $1/v = n/c$ , то

$$\delta \left( \int_0^f n ds \right) = 0.$$

Распишем полную вариацию

$$\delta \left( \int_0^f n ds \right) = \int_0^f (\delta n \cdot ds + n \cdot \delta ds) = \int_0^f \mathbf{p} \cdot \nabla n \cdot ds + \int_0^f n \mathbf{l} \cdot d\mathbf{p} = 0$$

Здесь  $\mathbf{p}$  – отклонение траектории при варьировании,  $\mathbf{l}$  – единичный вектор касательной к траектории,  $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}(f) = 0$ . Скалярное произведение во втором интеграле мы получили из определения касательной,  $d\mathbf{R} = \mathbf{l}ds$ , умножив обе стороны на  $\mathbf{l}$  с учетом  $\mathbf{l} \cdot \mathbf{l} = 1$ . Второй интеграл преобразуем по формуле «интегрирования по частям», учитывая условие  $\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}(f) = 0$  (вариация  $\mathbf{p}$  «прикреплена» к крайним точкам траектории).

$$\int_0^f n \mathbf{l} \cdot d\mathbf{p} = n \mathbf{l} \cdot \mathbf{p} \Big|_0^f - \int_0^f \mathbf{p} \cdot \frac{d(n\mathbf{l})}{ds} \cdot ds = - \int_0^f \mathbf{p} \cdot \frac{d(n\mathbf{l})}{ds} \cdot ds;$$

$$n \mathbf{l} \cdot \mathbf{p}(f) - n \mathbf{l} \cdot \mathbf{p}(0) = 0, \text{ так как } \mathbf{p}(f) = \mathbf{p}(0) = 0.$$

После всего этого, собрав слагаемые, получим

$$\int_0^f \mathbf{p} \cdot \nabla n \cdot ds + \int_0^f n \mathbf{l} \cdot d\mathbf{p} = \int_0^f \mathbf{p} \cdot \left( \nabla n - \frac{d(n\mathbf{l})}{ds} \right) \cdot ds = 0.$$

Отсюда из произвольности вариации  $\rho(s)$  следует

$$\nabla n - \frac{d(n\mathbf{l})}{ds} = 0,$$

но это дает только «уравнение касательной», а нам нужно уравнение траектории луча, и мы его получим после подстановки  $\mathbf{l} = d\mathbf{R}/ds$ .

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{d\mathbf{R}}{ds} \right) = \nabla n,$$

где  $\mathbf{R}$  – вектор точки на траектории луча,  $ds$  – приращение длины траектории. Полученное уравнение описывает траекторию светового луча, соединяющего две заданные точки; важно, что начальное направление луча заранее ничем не задано, так что все лучи, вышедшие из точки старта  $0$  и достигшие точки финиша  $f$ , проходят свои пути за одно и то же время, набирая на своих путях одинаковые приращения фаз (эйконолов).

До сих пор все выкладки были «строгими», но только в пределах геометрической оптики. Далее мы переходим к упрощениям, и все расчеты будут приближенными.

Рассмотрим распространение меридионального луча в волоконном световоде с осевой симметрией. Направим ось  $z$  вдоль оси волокна, обозначим  $r$  расстояние до оси:

$$\frac{dn}{dz} = 0, \quad n = n(r).$$

В параксиальном приближении заменим  $ds$  на  $dz$ . Тогда уравнение траектории  $r = r(z)$  в меридиональной плоскости сводится к

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{n(r)} \frac{dn}{dr}.$$

Зададим параболический профиль показателя преломления:

$$n(r) = \begin{cases} n_c \left( 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right), & r < a \text{ (сердцевина)}, \\ n_c (1 - \Delta) \equiv n_0, & r \geq a \text{ (оболочка)}, \end{cases}$$

где  $\Delta = (n_c - n_0)/n_c$ .

Внутри сердцевины  $\frac{dn}{dr} = -r \frac{2\Delta n_c}{a^2}$ , и уравнение примет вид

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = -r \frac{n_c}{n(r)} \frac{2\Delta}{a^2}.$$

Сделаем ещё одно упрощение: положим, что параметр  $\Delta$  мал, и отношение  $n_c/n(r)$  можно заменить единицей (в типовом волокне оно отличается от единицы не более чем на 1%). Получаем уравнение «гармонического осциллятора»:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = -r \frac{2\Delta}{a^2} \equiv -r\Omega^2$$

Общее решение такого уравнения можно записать в виде  $r(z) = A\cos(\Omega z) + B\sin(\Omega z)$ . Траектории всех лучей в этом приближении – синусоиды, и, по постановке задачи, каждый луч, соединяя точки 0 и  $f$ , имеет одно и то же экстремальное свойство, – у них у всех время распространения минимальное. Отсюда следует единственный вывод – у всех этих лучей время распространения одинаковое. Правда, произвольно выбранные точки в общем случае соединяет не весь набор таких лучей-синусоид. Это легко понять, выбрав в качестве начальной точку на оси световода: стартовавший из нее луч проходит через периодическую последовательность точек на оси, и только один, строго осевой, проходит через все точки оси. Кроме всего прочего, синусоида описывает траекторию луча только внутри сердцевины, а за ее пределами луч идет по прямой (и далее уходит от волновода). Поэтому среди всех формальных решений придется выбрать как физические только ограниченные,  $r(z) < a$ , что дает очевидное  $A^2 + B^2 < a^2$ .

Теперь обратимся к свойствам физических решений.

Если луч в сечении  $z = 0$  удалён от оси на расстояние  $r(z = 0) = r_0$  и наклонен так, что  $\frac{dr}{dz}(z = 0) = r'_0$ , то решением будет

$$r(z) = r_0 \cos\left(\frac{z\sqrt{2\Delta}}{a}\right) + r'_0 \sin\left(\frac{z\sqrt{2\Delta}}{a}\right).$$

С учетом ограниченности физического решения,  $r_0^2 + r'_0{}^2 < a^2$ , а это означает, что числовая апертура градиентного волокна уже не соответствует углу захвата так, как это было в волокне со ступен-

чатым ППП. Угол захвата  $r'/a \equiv \alpha_{\max}$  в приосевых точках среза сердцевины существенно больше, чем на краях;

$$\alpha_{\max}(r) = \sqrt{(a^2 - r_0^2)/a}. \text{ Отсюда следует, что наклонные лучи вво-}$$

дятся в градиентное волокно менее эффективно в сравнении со ступенчатым волокном. Этот вывод ставит перед инженером задачу эффективного согласования падающего излучения с градиентным волокном в передатчике ВОЛС, и наградой будет не только выигрыш в мощности, но и снижение межмодовой дисперсии.

В частном случае пучка, в котором в сечении  $z = 0$  все лучи параллельны оси ( $r'_0(z) = 0$ ), мы получаем

$$r(z) = r_0 \cos\left(\frac{z\sqrt{2\Delta}}{a}\right),$$

т.е. пучок фокусируется при  $z_f = \frac{\pi}{2}(a/\sqrt{2\Delta})$ . Очевидно, что по-

лупериод отклонения луча от оси  $z_\pi = \pi a/\sqrt{2\Delta}$ .

Оценим корректность параксиального приближения. Значение параметра  $\Delta$  в градиентном волокне порядка  $10^{-2}$ , так что максимальный угол расходимости параксиального меридионального пучка не превышает размера  $a/z_f \sim \sqrt{2\Delta} \sim 0,1$ . Эта оценка по порядку близка к «внутренней» числовой апертуре  $\sqrt{2\Delta}$ , в  $n$  раз меньшей, чем «наружная» числовая апертура  $NA = n\sqrt{2\Delta}$ .

Все приведенные здесь оценки, в сопоставлении с реальными размерами градиентных волокон ( $a = 25$  или  $31$  мкм) показывают, что описание градиентного волокна методами параксиальной оптики проходит вблизи от границ корректности. Поэтому все эти оценки нельзя положить в основу ответственного инженерного расчета, а с учетом производственных погрешностей фактического ППП точность оценок страдает еще более.

Для немеридиональных лучей нет такого закона  $n(r)$ , который бы обеспечил изохронность распространения лучей по различным траекториям. Результат для меридиональных лучей тоже получен после ряда приближений. Поэтому реально время распространения

у меридиональных лучей, пересекающих ось под разными углами, отличается, но это различие гораздо меньше, чем в световоде со ступенчатым ППП. На волновом «модовом» языке это означает, что в градиентном волокне меньше различие в скорости распространения разных мод (меньше межмодовая дисперсия).

Описывая распространение света в многомодовом волокне методами геометрической оптики, мы полностью пренебрегали дифракционной расходимостью лучей (узких пучков), но в волокне с сердцевиной 50 мкм влиянием дифракции нельзя пренебречь на длине порядка сантиметра и более.

Возвращаясь к более правильным, волновым представлениям, укажем, что в действительности в градиентном волокне нет строго меридиональных лучей, но существуют собственные моды с такими же качественными распределениями полей, как и в ступенчатых волноводах. Задача для градиентного световода приводит к собственным функциям типа Гаусса–Эрмита и более сложным расчетам. Общий характер решений сходен с теми, что получают для ступенчатого волновода, но у них есть одна примечательная особенность. В модах высших порядков значительная часть энергии сосредоточена у периферии волновода, где показатель преломления градиентной сердцевины меньше, чем у оси; этим и объясняют малые различия постоянных распространения низших и высших мод при оптимальном ППП. Возбуждение небольшого числа низших мод при вводе излучения в градиентное волокно позволяет уменьшить расплывание импульса за счет межмодовой дисперсии. С точки зрения лучевой оптики это же явление описывают как частичное заполнение градиентного волновода.

Ограничение количества возбуждаемых мод за счет пространственной фильтрации волнового фронта вводимого излучения в наилучшей мере выявляет достоинства градиентного волокна. Излучение лазера с его высокой пространственной когерентностью согласовать с градиентным волокном легче, нежели излучение светодиода. Линии со светодиодами применяют для связи на расстояниях порядка десятков метров, при скоростях передачи данных ниже 100 Мбит/с. Линии с лазерами и градиентными волокнами пригодны для связи на 2 км при 100 Мбит/с и до сотен метров при 1 Гбит/с (Gigabit Ethernet).



### 3. Дисперсия, групповая скорость, групповая задержка, дисперсия групповой задержки

Напряженность гармонической (монохроматической) одномерной волны описывает выражение

$$E(x, t) = E \exp\{i(kx - \omega t)\}.$$

Фаза гармонической волны  $\varphi = kx - \omega t$ , с точностью до несущественной постоянной.

Фазовая скорость волны  $v = \omega/k$ ; это выражение мы получаем из условия  $kx - \omega t = \text{const}$ ; дифференцирование даст  $kdx = \omega dt$ ; отсюда  $dx/dt = \omega/k$ .

Реальный световой сигнал, несущий энергию, есть группа волн в узкой области спектра  $\delta\omega \ll \omega$ ; в максимуме волнового пакета в любой точке трассы фазы всех спектральных компонент проходят через максимум. Это означает, что приращение  $d\omega$  и вызванное им приращение  $dk$  в максимуме огибающей не изменяют фазу ни одной из спектральных компонент, и тогда  $dk \cdot x - d\omega \cdot t = 0$ ; отсюда групповая скорость волнового пакета

$$\frac{x}{t} = \frac{d\omega}{dk} \equiv v_g.$$

При этом первоначальная протяженность волнового пакета в пространстве  $\Delta L > 1/(\delta k) = c/\delta\omega$ . Дисперсия групповой скорости  $dv_g/d\omega$  приводит к изменениям  $\Delta L$  по мере распространения волнового пакета в среде. Первоначально дисперсия может сжимать или растягивать волновой пакет, в зависимости от его исходной конфигурации и знака дисперсии. При  $L \rightarrow \infty$  волновой пакет расплывается ( $\Delta L \rightarrow \infty$ ) независимо от знака дисперсии групповой скорости.

Далее нам нужно связать групповую скорость с дисперсией среды, выраженной через дисперсию показателя преломления  $N(\omega)$ ;

$$v_g \equiv \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\left(\frac{dk}{d\omega}\right)} = \frac{1}{\frac{d}{d\omega}\left(\frac{N\omega}{c}\right)} = \frac{c}{\frac{d}{d\omega}(N\omega)};$$

развернем знаменатель:

$$v_g = \frac{c}{\frac{d}{d\omega}(N\omega)} = \frac{c}{N + \omega \frac{dN}{d\omega}}$$

и выразим  $v_g$  через измеримую длину волны в вакууме

$$v_g = \frac{c}{N + \omega \frac{dN}{d\omega}} = \frac{c}{N - \lambda \frac{dN}{d\lambda}}, \quad (*)$$

так как  $\omega\lambda = \text{const}$ .

Далее, получим условие слабой дисперсии групповой скорости. Результат можно получить быстрее, если искать экстремум групповой скорости как экстремумы в знаменателях выражений (\*); фактически мы найдем и экстремум групповой задержки, которая пропорциональна  $dk/d\omega \equiv 1/v_g$ . После дифференцирования получим равносильные выражения для условия экстремума

$$\frac{d^2 N}{d\lambda^2} = 0; \quad \frac{d^2(N\omega)}{d\omega^2} = 0; \quad \frac{d^2 N}{d\omega^2} = -\frac{2}{\omega} \frac{dN}{d\omega},$$

из них можно выбирать наиболее удобное для конкретной задачи. Применим эти выводы к оценкам дисперсии групповой задержки в одномодовом волокне.

Начнем с материальной дисперсии, которую описывает показатель преломления  $N(\lambda)$ . Здесь удобнее выражение дисперсии групповой задержки  $D = -\lambda N''(\lambda)$  (см. выше). Внутри окна прозрачности дисперсия  $N(\lambda)$  нормальная,  $N'(\lambda) < 0$ , зависимость  $N(\lambda)$  имеет точку перегиба  $\lambda_{0M}$ , где  $N''(\lambda) = 0$ . Знак  $N''(\lambda)$  отрицателен на коротких волнах и положителен на длинных. Следовательно, в точке перегиба расположен *минимум* групповой задержки и ноль дисперсии групповой задержки. В кварце точка нулевой групповой дисперсии  $\lambda_{0M} \approx 1,2$  мкм. В С-диапазоне, таким образом, групповая задержка в кварце (но не в волокне!) растет с ростом длины волны, и материальная дисперсия  $D_M$  положительная (рис. ПЗ.1, слева).

Теперь обратимся к волноводной дисперсии стандартного одномодового волокна (см. также рис. 7). Численные расчеты показывают, что точка перегиба зависимости  $\omega n_{\text{эфф}}(\omega)$  близка к частоте, соответствующей  $V > 3$ . Напомним, что  $V \propto \omega$ . В точке перегиба

$\omega_{0W}$  равна нулю вторая производная  $d^2[\omega n_{эфф}(\omega)]/d\omega^2$ , следовательно, здесь меняет знак волноводная дисперсия групповой задержки, групповая задержка *максимальна*, а групповая скорость основной моды  $HE_{11}$  *минимальна*. Ниже  $\omega_{0W}$  по частоте, при  $V < 3$ , дисперсия групповой задержки  $D_W$  отрицательная, так как с ростом длины волны групповая задержка уменьшается. Напомним, что по определению  $D = d(1/v_g)/d\lambda$ .

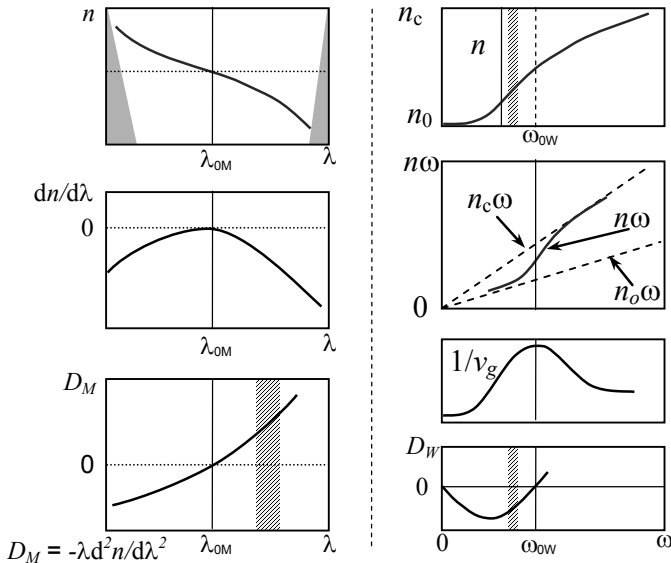


Рис. П3.1 Качественный вид хроматической дисперсии оптического волокна: слева – материальная дисперсия; серой окраской отмечены полосы поглощения; справа – волноводная дисперсия моды  $HE_{11}$ . Все масштабы по вертикали произвольные. Штриховкой отмечено положение С-диапазона

Полную хроматическую дисперсию  $D$  дают совместно ее материальная и волноводная части (но не просто их сумма!), так что точка нулевой суммарной групповой дисперсии (в документации ее обозначают как  $\lambda_0$ ), очевидно, расположена между нулями материальной и волноводной групповой дисперсии. В стандартном одномодовом волокне она попадает в О-диапазон, но модификация ППП позволяет передвигать ее до С-диапазона, изменяя одну только волноводную компоненту дисперсии.

В заключение отметим, что нулевую дисперсию групповой задержки в принципе можно получить только в ограниченном диапазоне спектра, и чем меньше допустимые отклонения дисперсии от нуля, тем уже будет этот диапазон. Это утверждение основано на фундаментальных дисперсионных соотношениях Крамерса–Кронига между спектрами затухания и преломления. Тем же обосновано и обязательное существование точки  $N''(\lambda) = 0$  в окне прозрачности любого вещества.

#### 4. Принцип работы стробоскопического осциллографа

Во многих случаях приходится анализировать форму периодически повторяющихся электрических сигналов очень малой длительности (короче наносекунды). Для этих целей пригодны *стробоскопические* осциллографы. Стробоскопический осциллограф принципиально пригоден для восстановления формы только повторяющихся сигналов, у которых изменения формы от импульса к импульсу за время наблюдения незначительны. Сам принцип стробоскопической обработки основан на периодической воспроизводимости сигнала.

Стробоскопическое наблюдение повторяющихся сигналов состоит в том, что из сигнала, поступающего на вход стробоскопического блока вертикального отклонения луча, быстродействующий электронный переключатель вырезает очень короткую часть (технически возможно вырезать выборку длительностью в единицы пикосекунд). Искажения формы вырезанного импульса не имеют существенного значения, так как далее сигнал выборки усредняют за микросекунды (или более). В результате на выходе устройства стробирования получают напряжение, пропорциональное напряжению исследуемого сигнала во время действия стробирующего импульса. Далее сигнал подвергают усилению и сглаживанию для уменьшения влияния шумов и подавления следов стробирующих импульсов. При этом в общее усиление сигнала наибольший вклад дает обыкновенный усилитель низкой частоты.

Сам момент стробирования устройство синхронизации привязывает по фазе к исследуемому сигналу. Если фаза привязки не меняется, то на выходе устройства стробирования получают напряжение, соответствующее амплитуде исследуемого повторяющегося сигнала в момент времени, сдвинутый по отношению к началу импульса. В общем случае, стробимпульс может и опережать сигнал, если запуском стробоскопа и формированием самих исследуемых импульсов управляет одно и то же устройство синхронизации, как, например, в данной работе.

До сих пор рассмотренная процедура обработки сигнала описывала действие устройства, называемого стробирующим детектором

или стробирующим вольтметром. В англоязычной литературе его обычно называют термином «boxcar integrator». В сочетании с устройством управления задержкой стробимпульса по отношению к управляющему синхроимпульсу такое устройство можно использовать как анализатор формы повторяющихся сигналов с пикосекундным временным разрешением. Чаще стробоскопический осциллограф используют в ином режиме – с автоматическим изменением задержки стробирующего импульса при помощи специализированного блока развертки. В этом случае на пластины горизонтального отклонения обычной осциллографической трубки подают линейное напряжение развертки НЧ (с частотой повторения от сотни герц и ниже), на пластины вертикального отклонения - сигнал с выхода стробоскопа, в котором задержкой стробимпульса управляет напряжение горизонтальной развертки. В результате на экране осциллографа получают восстановленную форму повторяющегося сигнала.

На рис. П4.1 упрощенно показана обработка последовательности импульсов, по длительности близких к длительности стробирующих импульсов. Это соотношение длительностей соответствует предельному разрешению стробоскопа, ограниченному быстродействием ключа.

На работу стробоскопического осциллографа, кроме обычных шумов электронных усилительных каскадов, сильно влияют временные нестабильности стробирующих импульсов и нерегулярность импульсов сигнала. Как результат всех этих нестабильностей, в осциллограмме появляется специфический мультипликативный шум (мощность шума пропорциональна мощности сигнала). Мультипликативные шумы в принципе фиктивны и не соответствуют каким-либо стохастическим процессам в усилительных каскадах, но они мешают правильному восстановлению формы сигнала, преувеличивая те истинные шумы, которые могут сопровождать реальный сигнал. В лабораторной установке для уменьшения мультипликативных шумов применено дополнительное сглаживание сигнала на стадии компьютерной обработки записанного сигнала. В результате кажущиеся шумы выглядят так, как будто временное разрешение стробоскопического осциллографа (20 пс)

ограничено на уровне около 100 пс, что соответствует адекватному воспроизведению импульсного сигнала с временем нарастания 300...400 пс.

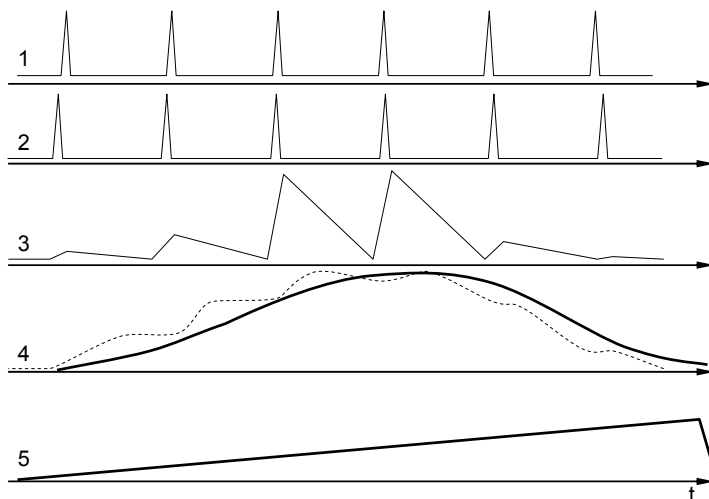


Рис. П4.1. Схема формирования сигнала в стробоскопическом осциллографе: 1 – сигнал; 2 – последовательность стробирующих импульсов; 3 – сигнал на выходе ключа после усиления НЧ; 4 – сигнал после сглаживания фильтром нижних частот (штриховая линия – предварительно, сплошная линия – окончательно); 5 – напряжение развертки, управляющее задержкой стробирующих импульсов

## Литература

Для углубленного и расширенного изучения современных достижений, перспектив развития и физической проблематики волоконной оптики рекомендуем книги:

1. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996.
2. Кившарь Ю. С. , Агравал Г.П. Оптические солитоны: от световодов к фотонным кристаллам. – М.: Физматлит, 2005.

При подготовке настоящего издания использованы материалы лекций проф. Говинда П. Агравала, прочитанных в Рочестерском университете (Нью-Йорк, США) в 2006–2007 г., и публикации фирмы «Corning».

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оптические системы связи .....	3
Достоинства оптической связи .....	3
Структуры систем оптоволоконной связи .....	6
Информационная пропускная способность линии связи .....	9
Волоконный световод .....	14
Структуры оптический волокон .....	17
Градиентное волокно .....	25
Свойства одномодовых волокон .....	28
Пассивные структурные компоненты волоконной линии .....	36
Волоконные кабели, патч-корды и пигтели .....	36
Соединители волоконных линий .....	38
Неразъемные соединения волоконных линий .....	39
Разветвители и направленные ответвители .....	40
Фотоприемные устройства ВОЛС .....	41
Методы измерения характеристик волоконной линии .....	43
Импульсный отклик волоконной линии и предельная скорость передачи информации .....	43
Измерения затухания в ВОЛС .....	45
Измерения продольной однородности ВОЛС. Рефлектометр с временным представлением .....	46
Измерения хроматической дисперсии волокон .....	50
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	
Описание лабораторной работы .....	52
Порядок выполнения работы .....	58
Задания .....	60
Факультативные задания .....	61
Контрольные вопросы .....	62
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
1. Распространение монохроматического излучения в круглом диэлектрическом волноводе .....	63
2. Распространение света в градиентном волокне .....	68
3. Дисперсия, групповая скорость, групповая задержка, дисперсия групповой задержки .....	73
4. Принцип работы стробоскопического осциллографа .....	77
ЛИТЕРАТУРА .....	79