

Федеральное агентство связи

**Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА**

Самара

**Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«Поволжский государственный университет телекоммуникаций и
информатики»**

ФАКУЛЬТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ и РАДИОТЕХНИКИ

КАФЕДРА СИСТЕМ СВЯЗИ

Сборник методических разработок
к лабораторным работам для студентов специальности
220201 – Управление и информатика в технических системах по
дисциплине

«Цифровые системы связи и управления»

Часть 1

Рекомендовано методическим советом ПГУТИ

Составил: к.т.н., доц. Иванов В.И.

Редактор: д.т.н., проф. Васин Н.Н.

Рецензент: к.т.н., доц. Кузнецов М.В.

САМАРА 2012

Содержание

1. Общая характеристика установки.....	3
2. Описание функциональной схемы лабораторной макета (установки).....	3
3. Теоретические сведения.....	13
4. Лабораторная работа №1. «Исследование характеристики лазерного диода и фотоприемника».....	36
5. Лабораторная работа №2. «Измерение коэффициентов затухания волоконных световодов».....	41
6. Лабораторная работа №3. «Исследование процессов импульсной модуляции лазерного диода».....	44
7. Лабораторная работа №4. «Моделирование формы сигнала на приемном конце реальной оптической линии связи».....	50
8. Лабораторная работа №5. «Исследование процессов аналоговой модуляции лазерного диода».....	55

Лабораторные работы выполняются на универсальном макете (установке) «Модель оптического линейного тракта».

1. Общая характеристика установки

На базе данной установки могут быть выполнены следующие лабораторные работы.

1. Исследование характеристики лазерного диода и фотоприемника.
2. Исследование процессов импульсной модуляции лазерного диода.
3. Моделирование формы сигнала на приемном конце реальной оптической линии связи.
4. Исследование процессов аналоговой модуляции лазерного диода.
5. Измерение коэффициента затухания волоконного световода.

Выполнение перечисленных выше лабораторных работ *позволяет*:

-осуществить измерение ватт-амперной характеристики лазерного диода, по которой в дальнейшем производится выбор положения рабочей точки при осуществлении импульсной и аналоговой модуляции оптического излучения;

-исследовать зависимость фототока, вырабатываемого фотодиодом, от уровня оптической мощности на его чувствительной площадке для определения его спектральной чувствительности в выбранном диапазоне длин волн излучения;

-исследовать зависимость глубины модуляции от положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике лазерного диода для импульсного и аналогового модулирующих сигналов;

-осуществить моделирование процессов в реальной оптической линии путем введения затухания (с помощью переменного аттенюатора), дисперсионных искажений (с помощью предискажения формы модулирующего импульса) и регулируемого уровня шума в оптический сигнал, передаваемый по оптической линии связи.

2. Описание функциональной схемы лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки изображена на рис.2.1. В ее состав входят следующие элементы.

1. Универсальная кассета (сплайс-пластина), которая служит для фиксации мест термического соединения (сварки) волоконных световодов.
2. Два отрезка четырехволоконного одномодового кабеля (желтый цвет защитной оболочки), оконцованный с одной стороны коннекторами типа SC/SPC (четыреволоконная полувилка SC/SPC-4, SC/SPC-4, DST/4/SM 9/125). Неоконцованные стороны трех (из четырех) световодов этих отрезков попарно соединены между собой с помощью

сварки. Термоусадочные трубки, защищающие места сварки зафиксированы в кассете 1.

3. Два отрезка четырехволоконного многомодового кабеля (оранжевый цвет защитной оболочки), оконцованный с одной стороны коннекторами типа SC/PC (четырёхволоконная полувилка SC/PC-4, SC/PC-4, DST/4/ММ 50/125). Неоконцованные стороны трех (из четырех) световодов этих отрезков попарно соединены между собой с помощью сварки. Термоусадочные трубки, защищающие места сварки зафиксированы в кассете 1.

4. Две коммутационные коробки серии W902 (настенный кросс), рассчитанные на 8 розеточных портов. В коробках установлены:

-четыре соединительных розетки типа SC-SC/UPC в верхнем ряду (для соединения одномодовых световодов, оконцованных коннекторами типа FC) ;

-четыре соединительных розетки типа SC-SC/PC в нижнем ряду (для соединения многомодовых световодов, оконцованных коннекторами типа FC).

Оконцованные стороны четырехволоконных кабелей закреплены в коробках и коннекторы их световодов соединены с соответствующими розетками с внутренней стороны коробок.

5. Плата с оптическими элементами, на которой установлены:

-две соединительных одномодовых розетки FC-D/UPC с керамическим центратором;

-нормализующая катушка, представляющая собой отрезок одномодового световода длиной 1000м оконцованный коннекторами FC/UPC (FC/UPC-SM 1000-FC/UPC).

6. Плата с оптическими элементами, на которой установлены:

-фиксированный аттенюатор-розетка для одномодового волокна FC/SM. Вносимое затухание – 20 дБ;

-фиксированный аттенюатор-розетка для многомодового волокна FC/ММ. Вносимое затухание – 20 дБ;

-переменный аттенюатор – розетка для одномодового и многомодового волокна FC/SM. Вносимое затухание 0 – 20 дБ.

7. Плата с оптическими элементами, на которой установлены:

-две соединительных многомодовых розетки FC-D/PC с бронзовыми центраторами;

-нормализующая катушка, представляющая собой отрезок многомодового световода длиной 200м оконцованный коннекторами FC/UPC (FC/PC-ММ 200-FC/PC).

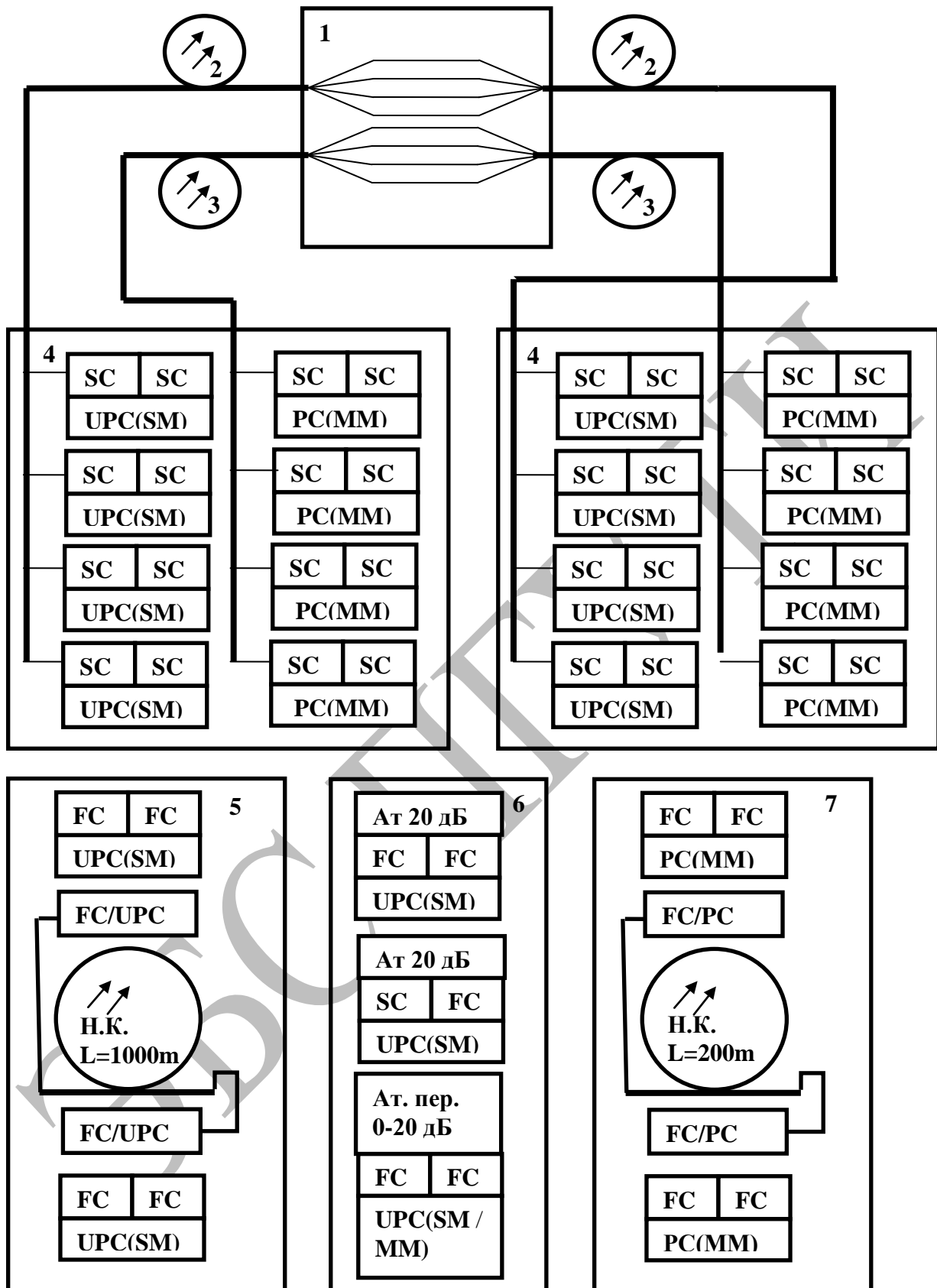


Рис. 2.1.

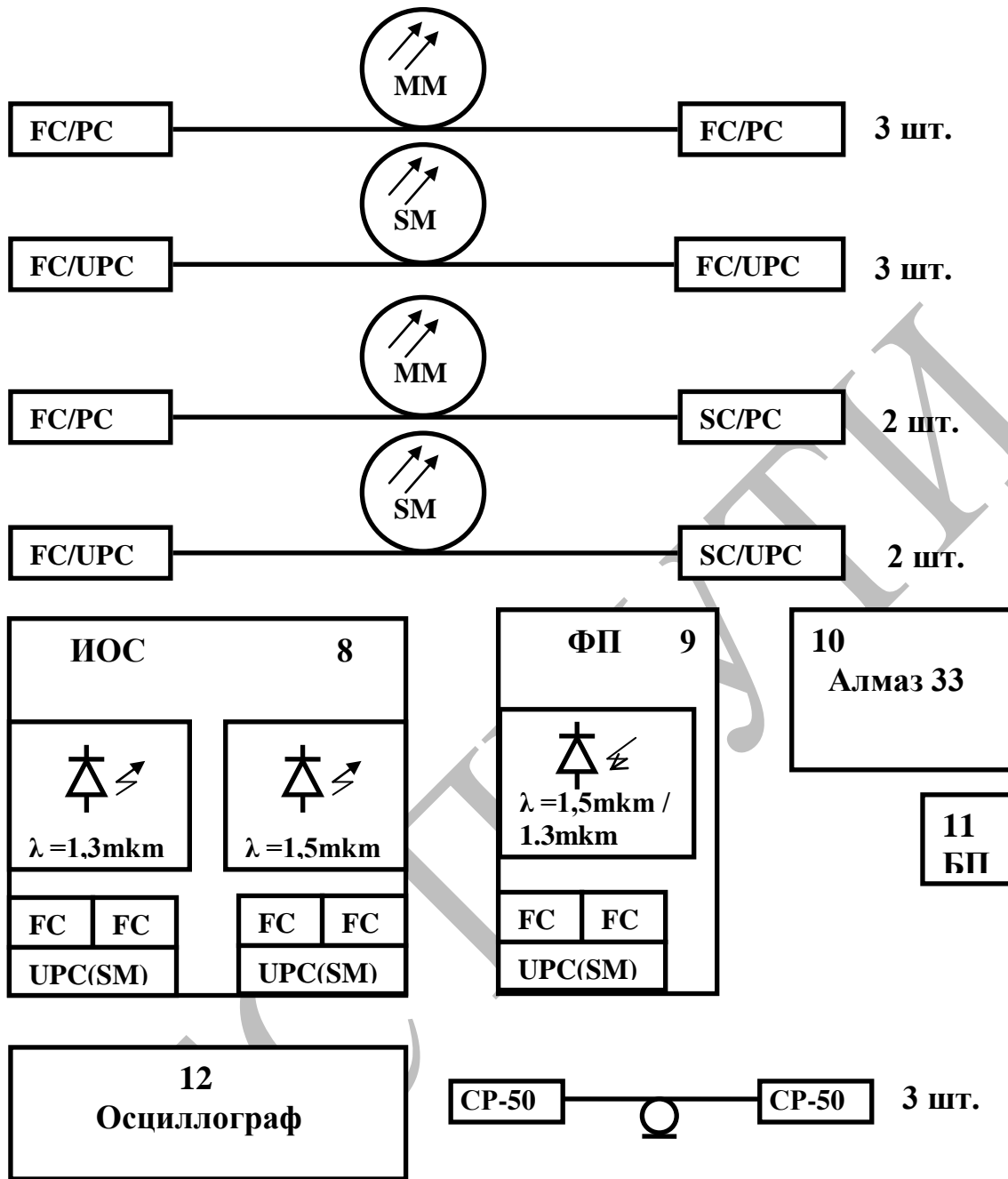


Рис. 2.1. (продолжение)

8. Электронный блок «Источник оптического сигнала» (ИОС). Его лицевая панель изображена на рис. 2.2.

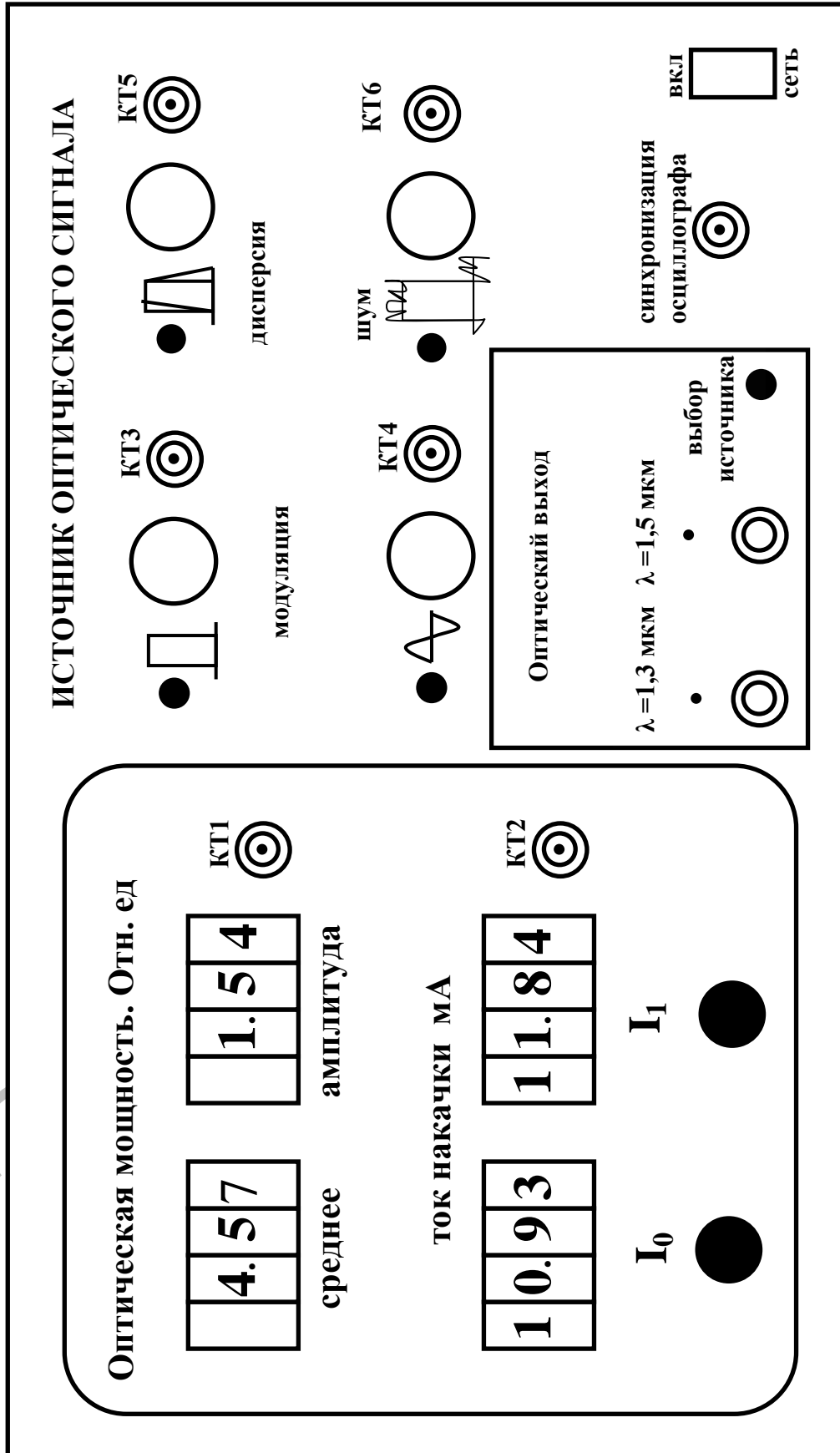


Рис. 2.2.

Он обеспечивает генерацию оптического излучения в диапазоне длин волн $\lambda=1,3$ мкм и 1,5 мкм с помощью двух лазерных диодов (полупроводниковых лазеров) LFO-14-ip ($\lambda=1,3$ мкм) и LFO-17-ip ($\lambda=1,5$ мкм) с выходной мощностью 1 мВт. Диоды состыкованы с отрезками одномодового волокна, которое оконцовано коннекторами типа FC/SPC. Подключение их к внешним оптическим цепям осуществляется с помощью оптических розеток типа FC/UPC «ОПТИЧЕСКИЙ ВЫХОД», выведенных на лицевую панель (рис.2).

Включение одного из двух источников « $\lambda=1,3$ мкм» или « $\lambda=1,5$ мкм» осуществляется с помощью кнопочного переключателя «ВЫБОР ИСТОЧНИКА». Для контроля над оптическими розетками встроены светодиоды, которые светятся при включении соответствующего источника.

Регулировка режима работы включенного источника осуществляется с помощью двух ключей, задающих токи I_0 , I_1 , протекающие через *pn* переход лазерного диода.

На лицевую панель выведены ручки потенциометров « I_0 », « I_1 », с помощью которых изменяется соответствующее значение тока.

Для контроля токов I_0 , I_1 на лицевой панели БПИ имеются два цифровых индикатора «ТОК НАКАЧКИ, мА». Рядом расположено гнездо «КТ2» для подключения кабеля с разъемами CP-50 к осциллографу и контролю тока, протекающего через *p-n* переход лазерного диода.

Контроль работоспособности включенного лазерного диода производится по наличию мощности на его выходе. Измерение мощности производится с помощью встроенного в корпус лазеров фотодиодов, ток которых отображается двумя цифровыми индикаторами «ОПТИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ, ОТН. ЕД. ». Следует помнить, что показания индикатора имеют относительный характер.

Поскольку предусмотрена возможность модуляции оптического излучения, для контроля мощности используются два индикатора. Первый - «СРЕДНЕЕ» - отображает средний уровень оптической мощности, излучаемой включенным лазерным диодом. Второй – «АМПЛИТУДА» - амплитудные значения. Его показания отличны от нуля только при включенной модуляции оптического излучения.

Контроль тока встроенного в корпус лазера фотодиода может осуществляться с помощью осциллографа. Для этого рядом с индикаторами расположено гнездо «КТ1» для подключения кабеля с разъемами CP-50.

В электронном блоке предусмотрена возможность импульсной или аналоговой модуляции оптического излучения. Включение этого режима осуществляется путем нажатия соответствующей кнопки переключателя «МОДУЛЯЦИЯ». Амплитуда модулирующего сигнала регулируется соответствующим потенциометром, ручки которых также выведены на лицевую панель. Рядом с ручками потенциометров расположены гнезда «КТ3», «КТ4» для подключения кабеля с разъемами CP-50 и контроля формы модулирующего сигнала по экрану осциллографа.

В электронном блоке предусмотрена возможность введения искажений формы модулирующего импульса для моделирования явления дисперсионных искажений, возникающих в реальной оптической линии связи. Включение этого режима осуществляется путем нажатия кнопки **«ДИСПЕРСИЯ»**. Величина дисперсионного уширения импульса регулируется с помощью соответствующего потенциометра, ручка которого выведена на лицевую панель. Рядом расположено гнездо **«КТ5»** для подключения кабеля с разъемами СР-50 и контроля формы модулирующего сигнала по экрану осциллографа.

В электронном блоке предусмотрена возможность введения аддитивной шумовой составляющей в модулирующий сигнал для моделирования процессов, возникающих в реальной оптической линии связи. Включение этого режима осуществляется путем нажатия кнопки **«ШУМ»**. Уровень шума регулируется с помощью соответствующего потенциометра, ручка которого выведена на лицевую панель. Рядом расположено гнездо **«КТ6»** для подключения кабеля с разъемами СР-50 и контроля формы модулирующего сигнала по экрану осциллографа.

На лицевой панели предусмотрено гнездо **«СИНХРОНИЗАЦИЯ ОСЦИЛЛОГРАФА»** для подключения кабеля с разъемами СР-50 ко входу синхронизации используемого осциллографа.

Питание электронного блока осуществляется от сети 220v / 50Hz. Включение блока осуществляется тумблером с подсветкой **«СЕТЬ»** на лицевой панели.

9. Фотоприемник ФП. Его лицевая панель изображена на рис.2.3.

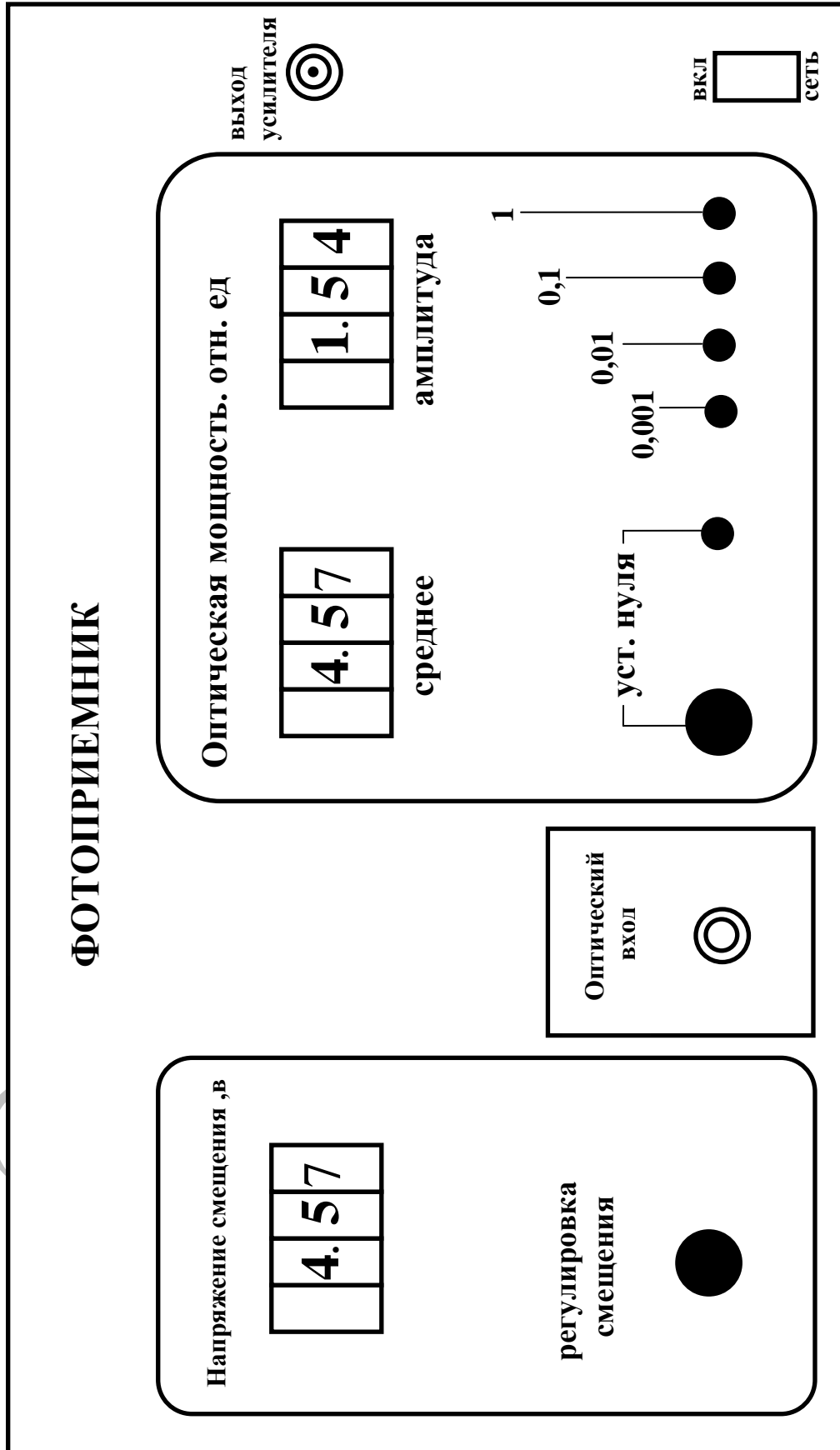


Рис. 2.3.

Он обеспечивает измерение мощности оптического излучения в диапазоне длин волн $\lambda=(1,3-1,5)$ мкм с помощью фотодиода типа PD-1375-ip. Диод состыкован с отрезком одномодового волокна, которое оконцовано коннектором типа FC/SPC. Подключение его к внешним оптическим цепям осуществляется с помощью оптической розетки типа FC **«ОПТИЧЕСКИЙ ВХОД»**, выведенной на лицевую панель (рис.2.3).

Для контроля принимаемого оптического сигнала на лицевой панели ФП имеется два цифровых индикатора **«ОПТИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ, ОТН. ЕД.»**. Первый - **«СРЕДНЕЕ»** - отображает средний уровень принимаемой оптической мощности, а второй – **«АМПЛИТУДА»** - амплитудные значения. Его показания отличны от нуля только при включенной модуляции оптического излучения.

Оптическое излучение, попадающее на чувствительную площадку фотодиода, вызывает изменение тока (фототока), протекающего через его *pn* переход. Переключение пределов измерения производится кнопочным переключателем **«ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ»**. Нажатие кнопок **«0,001; 0,01; 0,1; 1»** на лицевой панели приводит к изменению коэффициента усиления фототока.

Фототок прямо пропорционален значению оптической мощности на чувствительной площадке фотодиода. Поэтому показания цифрового индикатора пропорциональны этой мощности, но не равны ей. Измерение с помощью фотоприемника осуществляется в относительных единицах.

На лицевую панель фотоприемника выведен кнопочный переключатель и ручка потенциометра **«УСТАНОВКА НУЛЯ»**. При переключении пределов необходимо нажать эту кнопку и с помощью потенциометра установить нулевые показания индикатора **«СРЕДНЕЕ»**.

На лицевую панель выведена ручка потенциометра **«РЕГУЛИРОВКА СМЕЩЕНИЯ, В»**. С ее помощью изменяется напряжение смещения, подаваемого на фотодиод. Контроль этого напряжения осуществляется по цифровому индикатору **«НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ, В»**.

На лицевую панель выведено гнездо **«ВЫХОД УСИЛИТЕЛЯ»** для подключения кабеля с разъемами CP-50 и контроля формы принимаемого оптического сигнала по экрану осциллографа.

Питание электронного блока осуществляется от сети 220v / 50Hz. Включение блока осуществляется тумблером с подсветкой **«СЕТЬ»** на лицевой панели.

10. Измеритель оптической мощности «Алмаз 33», который используется в качестве эталонного измерителя оптической мощности. Оптическая мощность подается на его вход с помощью волоконного шнура. Прибор имеет автономный источник питания и сетевой адаптер (11). Работа с прибором производится на основании его технического описания, входящего в комплектацию лабораторной установки.

11. Двухканальный осциллограф.

Кроме того, в состав лабораторной установки входят волоконные соединительные и переходные шнуры (BC), служащие для соединения элементов установки между собой. В комплект установки входят:

-3 соединительных многомодовых шнура (оранжевый или синий цвет защитной оболочки) с коннекторами FC/PC;

-3 соединительных одномодовых (желтый цвет защитной оболочки) шнура с коннекторами FC/SPC;

-2 соединительных многомодовых шнура (оранжевый цвет защитной оболочки) с коннекторами SC/PC;

-2 соединительных одномодовых шнура (желтый цвет защитной оболочки) с коннекторами SC/SPC;

-2 переходных многомодовых шнура (оранжевый цвет защитной оболочки) с коннекторами FC/ PC-SC/PC;

-2 переходных одномодовых шнура (оранжевый цвет защитной оболочки) с коннекторами FC/ SPC-SC/SPC.

В состав лабораторной установки входят три коаксиальных кабеля с разъемами CP-50 для подключения осциллографа к контрольным точкам электронных блоков и подачи сигнала синхронизации.

3. Теоретические сведения

В современных оптических системах связи для передачи информации используются в основном когерентные источники – полупроводниковые лазеры, обеспечивающие генерацию в диапазоне длин волн $\lambda = 1,3$ мкм и $\lambda = 1,5$ мкм. Обычно мощность их излучения в непрерывном режиме работы не превышает 1 мВт. К ее стабильности предъявляются жесткие требования, что обусловлено высокой помехоустойчивостью таких систем связи. Типичным параметром, позволяющим количественно оценить помехоустойчивость при передаче цифрового сигнала, является вероятность ошибки p . Ее типичное значение при длине линии 10 км составляет величину $p = 10^{-9}$.

В аналоговых линиях, которые на сегодняшний день используются в основном для передачи телевизионных сигналов и телеметрической информации параметру помехоустойчивости соответствует отношение сигнал/шум, типичное значение которого при длине линии 10 км составляет величину $c/\text{ш} = 55$ дБ.

Как в случае передачи цифрового, так и аналогового сигнала, нестабильность мощности оптической несущей приводит к появлению в линии дополнительных шумов, что, в конечном итоге, ухудшает ее помехозащищенность.

В современных полупроводниковых лазерах имеется встроенный фотодиод, на который попадает часть излучаемой мощности. Ток фотодиода повторяет форму оптического сигнала и является параметром, по которому производится стабилизация режима работы излучателя. На рис.3.1 приведена функциональная схема устройства, обеспечивающего модуляцию оптической несущей импульсным сигналом и стабилизацию уровня минимальной и максимальной излучаемой мощности.

Режим работы лазерного диода определяется двумя токовыми ключами ТК1 и ТК2, которые задают два значения тока I_0 и I_1 . Их сумма определяет ток накачки I_n , протекающий через лазерный диод ЛД и обеспечивающий генерацию оптической мощности P :

$$I_n = I_0 + I_1 \quad (1).$$

На рис.3.2 приведена ватт-амперная характеристика ЛД – зависимость излучаемой оптической мощности от тока накачки. При осуществлении импульсной модуляции ток I_0 , определяемый ключом ТК1, задает значение излучаемой оптической мощности, соответствующее передаче нуля по линии связи. На рис. 3.2. отмечено значение порогового тока I_n , соответствующее началу генерации когерентного излучения оптическим источником. Если выбрать $I_0 > I_n$, то это приведет к существенному возрастанию оптической мощности P_0 , соответствующей уровню нуля при передаче цифрового сигнала по линии связи. Значительное уменьшение тока I_0 по сравнению с пороговым значением приводит к снижению быстродействия за счет инерционности процесса создания инверсной населенности в активной области лазера, то есть

ведет к снижению скорости передачи. Поэтому значение I_0 выбирается близким к пороговому (рис. 3.3.).

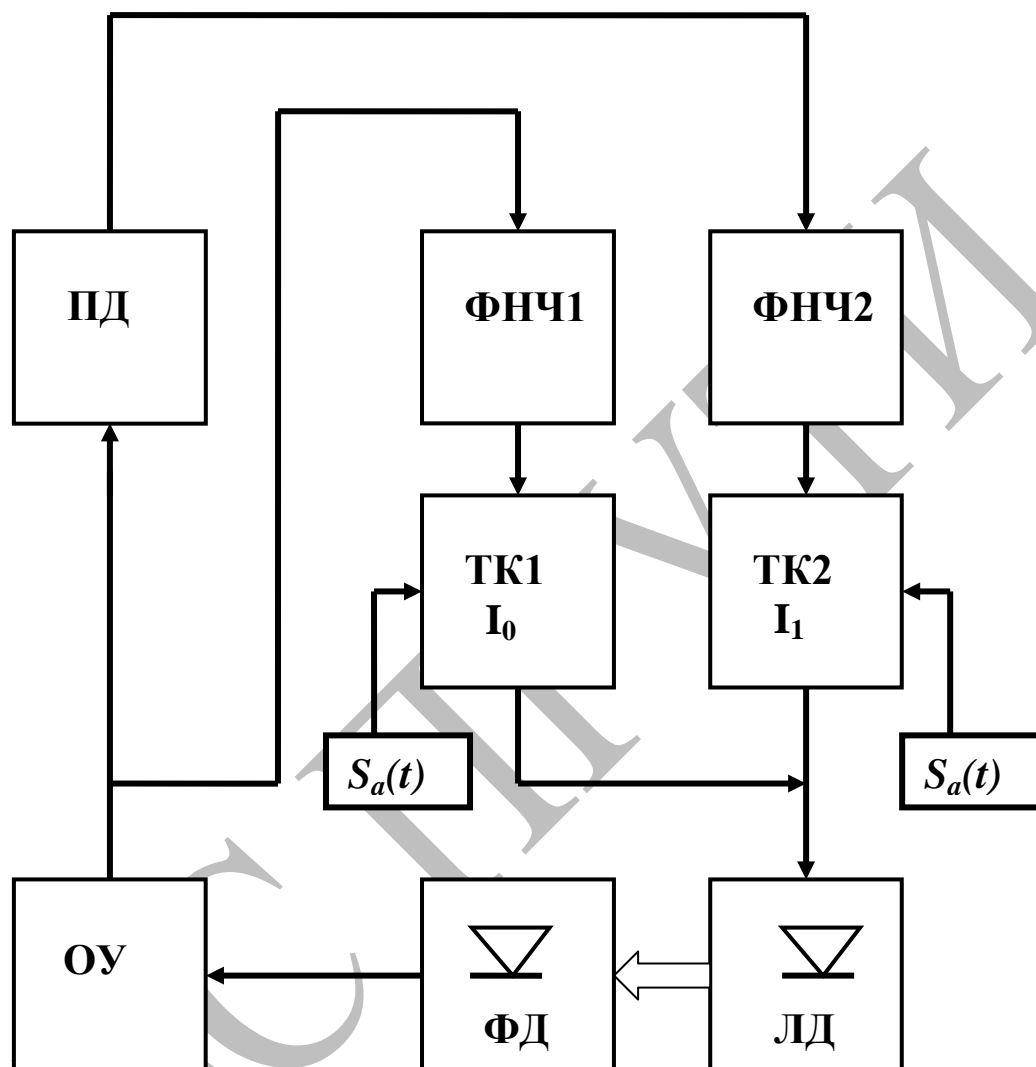


Рис.3.1.

Величина тока $I_0 + I_1$ определяет значение излучаемой оптической мощности, соответствующее передаче единицы по цифровой линии связи. Она определяется типом используемого ЛД и обычно приводится в паспортных характеристиках.

Модулирующий сигнал подается на управляющий вход токового ключа ТК2. При осуществлении цифровой модуляции положительные импульсы, соответствующие передаче единицы по линии связи, открывают токовый ключ, а нулевой уровень оставляет его закрытым.

Реально, для осуществления аналоговой модуляции используются иные схемные решения. В данном случае, аналоговый модулирующий сигнал

подается на управляющий вход ТК1, который выбором рабочей точки преобразуется в обычный эмиттерный повторитель.

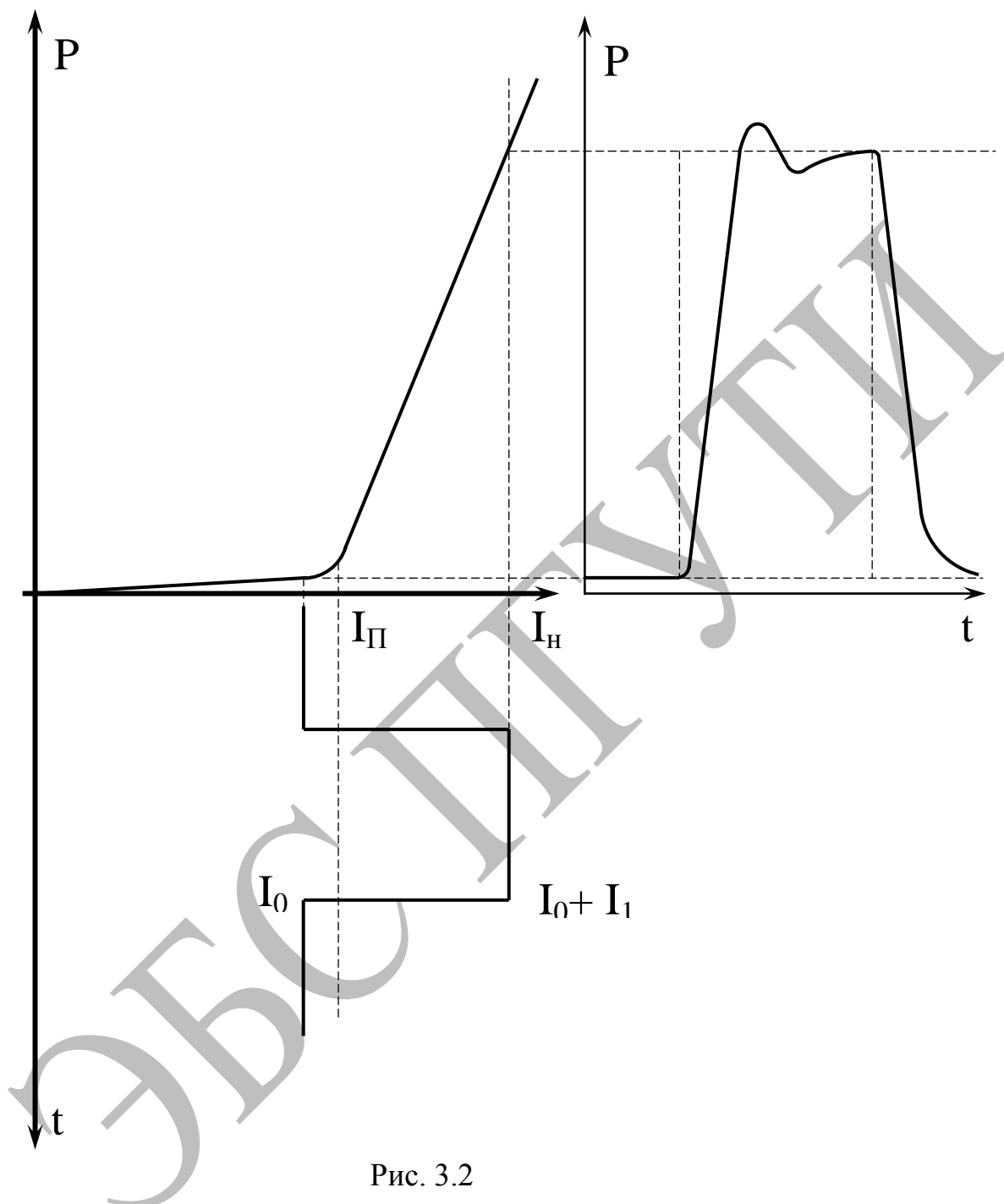


Рис. 3.2

Регулировка значений токов I_0 и I_1 осуществляется с помощью потенциометров, выведенных на лицевую панель блока излучателя.

Незначительная часть оптического излучения попадает на вход встроенного фотодиода ФД (рис. 3.1), фототок которого усиливается операционным усилителем ОУ. С его выхода сигнал попадает на фильтр нижних частот ФНЧ1 и пиковый детектор ПД. Таким образом происходит разделение «быстрых» и «медленных» изменений в оптическом сигнале.

Медленные изменения обусловлены в основном дрейфом значения порогового тока $I_{\text{п}}$ и компенсируются соответствующим изменением величины тока I_0 . Оно осуществляется за счет подачи на управляющий вход токового ключа ТК1 напряжения с выхода ФНЧ1 (рис. 3.1).

Быстрые изменения в основном обусловлены изменением формы модулирующего сигнала и отслеживаются пиковым детектором. Напряжение на его выходе сглаживается фильтром нижних частот ФНЧ2 и поступает на управляющий вход токового ключа ТК2 (рис.3.1).

Выше указаны только основные причины, вызывающие изменение формы оптического сигнала. В действительности их может быть существенно больше, что определяется спецификой используемых в каждом конкретном случае элементов и схемных решений.

Следует отметить, что в современных устройствах, осуществляющих управление режимом работы ЛД и его модуляцию, динамика медленных изменений порогового значения тока используется в качестве телеметрической информации, которая передается по служебному каналу связи и используется для оценки процессов старения (деградации) ЛД. Анализ динамики изменения порогового тока позволяет проводить оценку срока службы данного источника.

Излучающая площадка лазерного диода состыкована с торцом одномодового или многомодового световода длиной до нескольких метров. Потери на ввод излучения в световод обычно составляют величину порядка 0,1 дБ. Противоположный торец световода снабжен одним из стандартных коннекторов, с помощью которого излучатель подключается к внешним элементам оптической схемы. Соединение между отдельными элементами схемы осуществляется с помощью розеток, адаптеров и оптических шнуров. Каждый шнур оканчивается с обоих концов оптическим коннектором (разъемом), который подключается либо к розетке, либо к адаптеру аппаратуры.

Волоконный световод является основным элементом оптической системы связи. Именно он обеспечивает передачу оптической волны промодулированной информационным сигналом от передатчика к приемнику. Основными эксплуатационными параметрами световода являются:

- коэффициент затухания α , определяющий величину потерь оптической мощности при распространении волны по световоду;
- полоса пропускания Δf или уширение оптического импульса τ , определяющие объем информации, который может быть передан по волоконно-оптической линии связи.

Физический смысл этих параметров и их размерность будут пояснены ниже. Следует отметить, что именно эти величины определяют взаимозависимые основные характеристики линии связи: максимальное расстояние, на которое можно передать оптический сигнал в световоде без использования ретранслятора L_p (км) и скорость передачи V (МБит/сек). Величина V , как известно, определяет объем информации, передаваемый по линии.

В свою очередь, параметры α , Δf и τ связаны с размерами поперечного сечения световода и законом изменения коэффициента преломления n . В общем случае для описания процессов распространения оптической волны в волокне используется цилиндрическая система координат. Ее продольная ось z совмещена с осью световода (рис.3.3.а). Положение точки в этой системе координат определяется тремя величинами: длиной радиус-вектора ρ , азимутальным углом φ и продольной координатой z . Обычно, коэффициент преломления зависит только от одной поперечной координаты ρ . Эта зависимость описывается функцией профиля $R(\rho)$.

На рис.3.3.а отмечены диаметры сердечника (сердцевины) - W и оболочки - D . В общем случае закон изменения коэффициента преломления можно описать аналитическим выражением, имеющим следующий вид:

$$n(\rho) = n_1 + \Delta n R(\rho).$$

Здесь n_1 - коэффициент преломления оболочки световода, $\Delta n > 0$ - величина максимального превышения коэффициента преломления в сердцевине относительно оболочки. Функция профиля в рассматриваемом случае нормирована - диапазон ее допустимых значений:

$$0 < R(\rho) < 1.$$

Ясно, что коэффициент преломления в любой точке сердечника, больше, чем в оболочке. Этим обеспечивается возможность распространения оптических волн в нем за счет выполнения условий полного внутреннего отражения на границе раздела 1 (рис.3.3.а).

В простейшем случае коэффициент преломления остается постоянным внутри сердечника и оболочки. Его изменение происходит скачком на границе между двумя этими областями. Функция профиля $R(\rho)$ для такого световода показана на рис.3.3.б. Благодаря своему характеру, она получила название ступенчатой.

На рис.3.3.в приведена функция профиля, соответствующая градиентному световоду. В этом случае коэффициент преломления не остается постоянным в поперечном сечении. Обычно максимальное значение n приходится на центр световода, но на практике встречаются и несимметричные законы его изменения. Подбирая на стадии изготовления различные варианты профилей, можно получать градиентные световоды с определенными свойствами.

В настоящее время размеры сердечников и оболочек стандартизованы. В справочных данных на световод, приводимых в литературе, используются следующие обозначения:

SMMF W/D - многомодовое волокно со ступенчатым профилем коэффициента преломления (step index multi mode fiber), диаметром сердечника W мкм и диаметром оболочки D мкм;

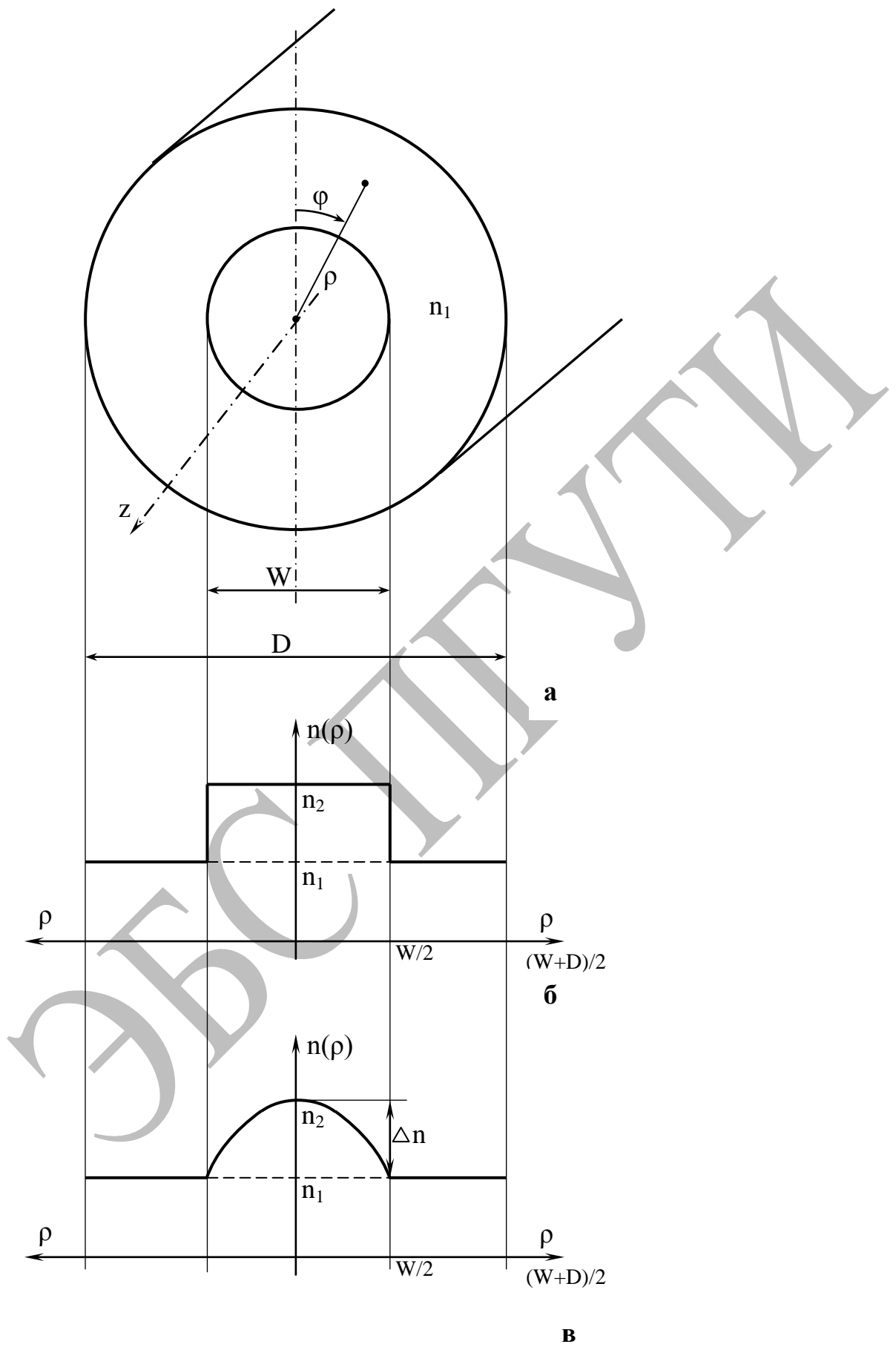


Рис. 3.3.

GMMF W/D - многомодовое волокно с градиентным профилем коэффициента преломления (graded index multi mode fiber), диаметром сердечника W мкм и диаметром оболочки D мкм;

SF W/D (NDSF W/D)- стандартное волокно (standart fiber) или одномодовое волокно со ступенчатым профилем коэффициента преломления (step index single mode fiber), диаметром сердечника W мкм и диаметром оболочки D мкм;

DSF W/D - одномодовое волокно со смещенной дисперсией и ступенчатым профилем коэффициента преломления (dispersion-shifted single mode fiber), диаметром сердечника W мкм и диаметром оболочки D мкм;

NZDSF W/D - одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией и ступенчатым профилем коэффициента преломления (non-zero dispersion-shifted single mode fiber), диаметром сердечника W мкм и диаметром оболочки D мкм.

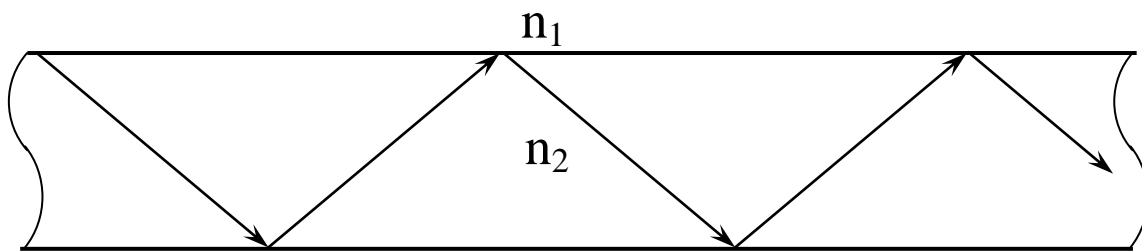
Стандартное значение W/D для многомодовых волокон - 50/125 и 62.5/125. Для одномодовых волокон размер сердечника обычно колеблется в пределах (8 - 10) мкм, а оболочка имеет диаметр, такой же как у многомодовых световодов (W/D = 8 - 10/125). Такие размеры поперечного сечения позволяют использовать волокна в диапазонах 0.8мкм, 1.3мкм, 1.5мкм.

В первом приближении можно рассматривать процессы в световоде с позиций геометрической оптики. Тогда оптическое излучение, введенное в световод одним из известных способов, распространяется вдоль него в виде пучка лучей, переотражаясь между границей раздела 1 сердечник - оболочка (рис.3.3.a). На рис.3.4.a показана траектория одного из лучей для световода со ступенчатым профилем коэффициента преломления, которую в литературе принято называть зигзагообразной волной. В многомодовых световодах распространение осуществляется по нескольким зигзагам, отличным друг от друга. Каждому из них соответствует одна из его мод.

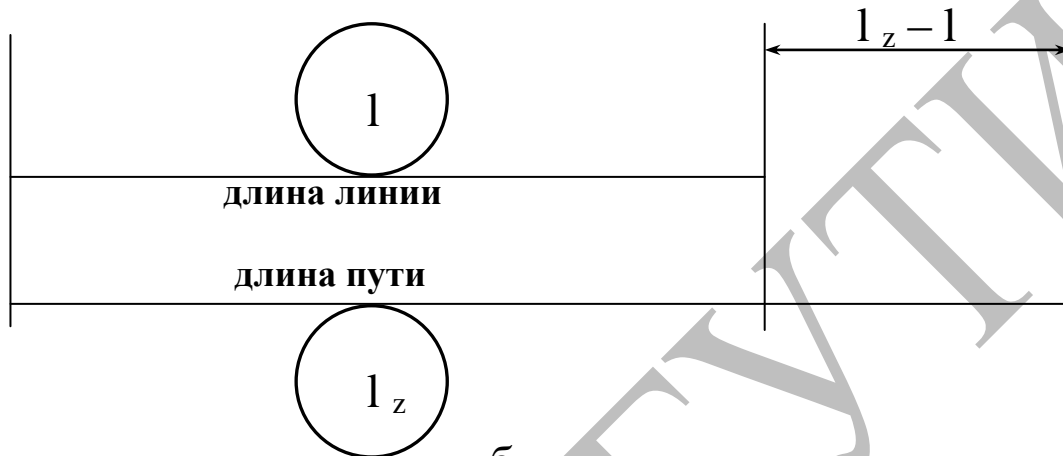
Показанная на рис. 3.4.a зигзагообразная волна образована меридианными лучами, проходящими через центр световода. Известно, что могут существовать и другие траектории, не проходящие через центр световода. В данном случае физическую картину анализируемых явлений можно пояснить, используя только меридианные лучи, образующие наиболее простые "зигзаги".

Процесс распространения оптической волны по световоду характеризуется скоростью переноса энергии v . Физический смысл этой величины можно пояснить следующим образом. Энергия переносится вдоль зигзагообразного пути с неизменной скоростью c , которая определяется параметрами среды - диэлектрической и магнитной проницаемостью. В частности, для световода, выполненного из немагнитного материала (относительная магнитная проницаемость равна единице), в котором зигзагообразная волна полностью сосредоточена в сердечнике с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon=(n_1 + \Delta n)^2$:

$$c = 3 \cdot 10^8 / (n_1 + \Delta n) \text{ м/сек.}$$



а



б

Рис. 3.4.

Поскольку энергия волны переносится вдоль зигзага, путь l_z , проходимый ею от начала до конца отрезка световода, оказывается большим, чем длина этого отрезка l (рис.3.4.б). Если сравнить время, которое затратит энергия оптической волны на прохождение участка пути длиной l в среде без границ раздела с коэффициентом преломления $n_1 + \Delta n$ - t , со временем t_c прохождения участка световода той же длины, то:

$$t_c / t = c / v = n_{\text{эф}}$$

Параметр $n_{\text{эф}}$ носит название "эффективный коэффициент преломления" и, как будет ясно из дальнейшего, характеризует каждую моду световода.

В приведенном выше анализе полагалось, что моды световода формируются оптическим источником, обеспечивающим излучение монохроматических волн. У них пространственный период - длина волны λ - фиксирован.

На практике это предположение никогда не выполняется. В современных ВОЛС используются полупроводниковые источники света, излучение которых представляет собой суперпозицию монохроматических волн - спектр шириной $\Delta\lambda$.

Детальный анализ процессов распространения лучей в световодах показывает, что форма их траекторий зависит от λ . Поэтому каждой составляющей из спектра источника будет соответствовать отдельный,

отличный от остальных, "зигзаг" с длиной пути l_z и скоростью v (рис.3.4.а). Этот процесс называется волноводной дисперсией - он определяет одну из причин, по которой скорость переноса энергии зависит от длины волны (или частоты) источника.

Кроме описанных выше явлений, происходящих в световодах и приводящих к дисперсии скорости переноса энергии, при анализе характеристик реальной линии связи необходимо учитывать и обычную материальную дисперсию. Она обусловлена тем, что коэффициент преломления материала световода зависит от λ . Поэтому от λ зависит скорость c , определенная ранее.

Для передачи информации в оптической линии связи осуществляется модуляция оптического излучения информационным сигналом, занимающим конечную полосу частот. В идеальном случае не только каждая составляющая этой полосы должна быть передана без искажения, но должны быть сохранены и все фазовые соотношения между ними.

Реально каждая информационная составляющая за счет нелинейного характера процесса модуляции возбуждает весь спектр длин волн источника излучения. В процессе передачи информации по световоду вследствие этого возникают искажения. Они обусловлены тем, что из-за различной скорости распространения, изменяются прежде всего фазовые соотношения между информационными составляющими передаваемого сигнала. Эти искажения связаны с шириной спектра излучения источника $\Delta\lambda$. Они будут присутствовать даже в линии связи, использующей одномодовые световоды.

В настоящее время в оптических линиях связи в основном используются цифровые способы передачи информации, для которых характерна импульсная модуляция источника света. Главным "переносчиком" информации в таких системах является оптический импульс длительностью t_1 . За счет дисперсии (в любой ее форме) происходит прежде всего его уширение на величину Δt (рис. 3.5). Поэтому принято оценивать возможные искажения информации, возникающие за счет дисперсии, по величине этого уширения.

Ясно, что величина Δt связана с длиной пути, который проходит оптический сигнал в световоде. За счет различий в "зигзагах", соответствующих разным составляющим спектра источника излучения, по мере увеличения этого пути накапливаются дополнительные фазовые сдвиги между информационными составляющими сигнала и, как следствие, растет уширение импульса (рис.3.5).

Принято оценивать качество оптической линии связи величиной τ , определяющей уширение импульса, возникающее при прохождении им по участку световода длиной 1 километр. Для удобства проведения расчетов размерность этой величины выбрана следующим образом $[\tau] = \text{псек/км}$.

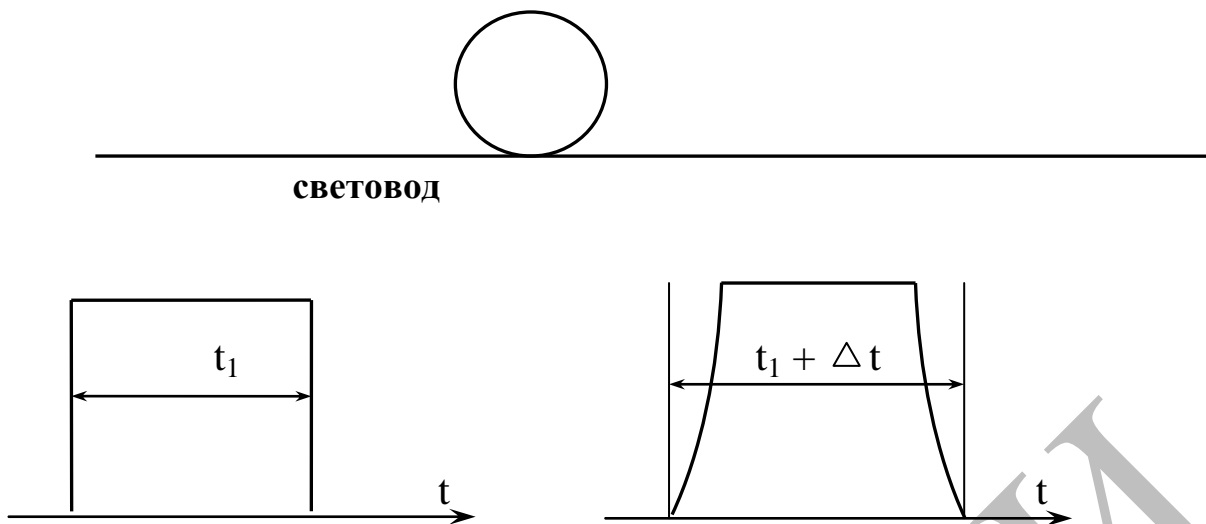


Рис. 3.5.

Таким образом, рассмотренные выше причины искажения информации, определенные материальной и волноводной дисперсией, проявляются тем сильнее, чем шире спектр источника света $\Delta\lambda$. Их принято в литературе объединять под общим названием "хроматическая дисперсия". Как будет ясно из дальнейшего изложения, влияние ее необходимо учитывать в линиях связи, использующих одномодовые световоды, для которых хроматическая дисперсия является практически единственным источником возникающих искажений формы оптического импульса.

Поскольку на величину уширения импульса в данном случае влияет не только длина отрезка световода, но и ширина спектра источника излучения $\Delta\lambda$, для оценки возникающих искажений принято использовать величину, называемую удельной хроматической дисперсией. Она определяет уширение оптического импульса в линии связи, которое возникает при прохождении участка световода длиной 1 километр при возбуждении его источником с шириной спектра 1 нанометр. В литературе используется для обозначения этой величины тот же символ, но размерность величины уже другая: $[\tau] = \text{псек}/(\text{км нм})$.

В оптической линии, использующей многомодовые световоды, появляется еще одна причина возникновения искажений информации - межмодовая дисперсия. Она связана с тем, что каждой моде будет соответствовать своя зигзагообразная волна (рис. 3.6) даже в случае возбуждения его монохроматическим источником света ($\Delta\lambda = 0$). При возбуждении световода всегда обеспечиваются условия одновременного появления всех мод, количество которых может достигать нескольких тысяч. Поскольку каждой из них соответствует своя скорость переноса энергии, оптический импульс начнет уширяться по мере распространения по линии передачи.

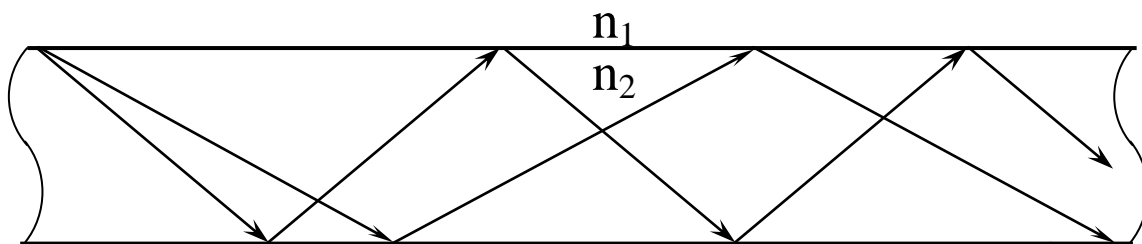


Рис. 3.6.

В этом случае уширением импульса за счет хроматической дисперсии пренебрегают. Различия в скоростях переноса энергии каждой отдельной модой обуславливают величину Δt на несколько порядков большую, чем в одномодовом световоде. Поскольку значение τ никак не связано с шириной спектра источника, его измеряют в величине уширения, приходящегося на каждый километр многомодового световода [τ] = нсек/км.

Рассмотренные выше дисперсионные искажения оптического сигнала не устранимы полностью. Их причина находится в самом принципе работы источника оптического излучения и световода. Но эти искажения можно минимизировать, выбрав соответствующий вид профиля коэффициента преломления.

Подробный анализ процессов распространения оптических волн в волоконных световодах показывает, что уширение импульса за счет волноводной дисперсии всегда увеличивается при увеличении длины волны. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента преломления световода от λ и связана с его молекулярной структурой. Для некоторых сред может происходить не уширение, а сужение оптического импульса. Это явление, взятое в отдельности, также вызывает искажение информации. Но совместное действие волноводной и материальной дисперсии может, при определенных условиях, скомпенсировать друг друга. В результате на определенной длине волны источника λ_k уширения оптического импульса не происходит. Незначительно это уширение оказывается и в относительно широком диапазоне длин волн, который сосредоточен в окрестности этой точки полной компенсации.

Подбирая параметры профиля коэффициента преломления - Δn и W - можно добиться полной компенсации дисперсии в требуемой точке диапазона длин волн. Именно таким образом изготавливаются одномодовые световоды типа DSF и NZDSF.

При использовании многомодовых световодов такой способ уменьшения дисперсионных искажений хоть и возможен, но малоэффективен, поскольку основной вклад в них вносит межмодовая дисперсия. В световодах со

ступенчатым профилем коэффициента преломления возможности борьбы с ней практически отсутствуют. Для минимизации ее влияния на форму импульса применяют градиентные световоды, у которых коэффициент преломления в поперечном сечении меняется плавно (рис. 3.3.в).

На рис.3.7 изображены оптические лучи, соответствующие двум различным модам световода с плавным изменением коэффициента преломления вдоль поперечной координаты ρ . Траектория 1 соответствует моде, порядок которой ниже, чем у моды с траекторией 2. Анализ показывает, что с увеличением номера моды кривизна траектории уменьшается и она все более отклоняется от оси (рис. 3.7).

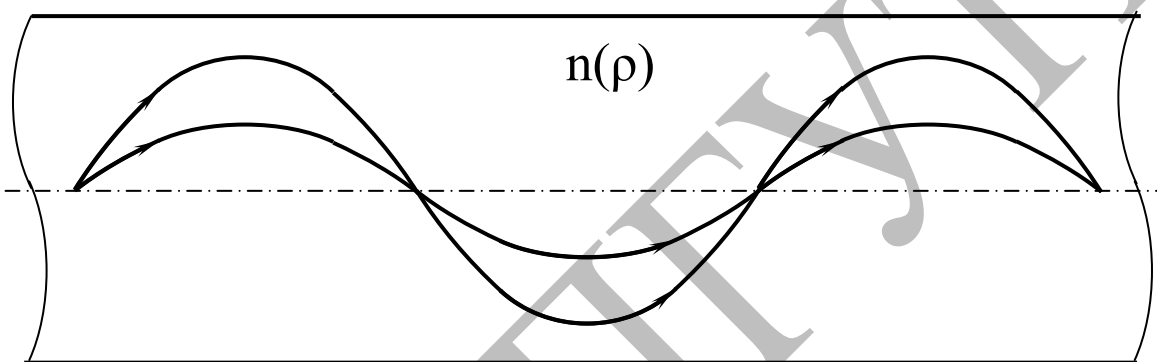


Рис. 3.7.

Дисперсионные искажения, как уже упоминалось ранее, определяются прежде всего изменением фазовых сдвигов между информационными составляющими. Они возникают из-за разности путей, проходимых разными модами по отрезку световода. Но фазовые сдвиги определены не только геометрической длиной пути, но и величиной коэффициента преломления той среды, в которой происходит распространение.

В случае световода со ступенчатым профилем все моды распространяются внутри сердцевины и значение коэффициента преломления среды для них неизменно. В градиентном световоде это не так. Здесь моды более высокого порядка за счет большего отклонения от оси световода проходят часть своего зигзага в области с меньшим значением коэффициента преломления.

Таким образом, модам более высокого порядка в градиентном световоде соответствует больший геометрический путь, но проходит он в среде с меньшим коэффициентом преломления. В результате фазовый сдвиг между различными модами меняется существенно меньше, чем в световоде со ступенчатым профилем коэффициента преломления. Более того, подбирая вид профиля $R(\rho)$, можно добиться компенсации разности фаз, возникающей между

модами за счет прохождения участка световода. Именно эта цель и ставится при изготовлении градиентных счетоводов. Уширение импульса в них на несколько порядков ниже, чем в ступенчатом.

Важную роль в ВОЛС играет и фотодиод (ФД) - прибор осуществляющий площадку ФД.

На практике используются два типа таких элементов: *pin* ФД и лавинный фотодиод (ЛФД). Принцип их работы будет пояснен ниже. Основными характеристиками любого преобразование оптической мощности в электрический сигнал - фототок, текущий через него или фотонапряжение, которое этот ток создает на нагрузке ФД. Важной особенностью оптического диапазона является то, что величина этих электрических сигналов пропорциональна оптической мощности, попадающей на чувствительную часть ФД, являются:

- диапазон спектральной чувствительности, определенный максимальной и минимальной длинами волн оптического диапазона λ_{\max} и λ_{\min} , регистрируемыми ФД;

- чувствительность (крутизна ватт-амперной характеристики) S А/Вт;

- величина темнового тока I_T текущего в нагрузке ФД при отсутствии на его фоточувствительной площадке оптического излучения;

- величина обратного смещения $U_{\text{см}}$ на ФД, соответствующая максимальной чувствительности;

- емкость *pn* перехода ФД.

Физический смысл этих характеристик будет пояснен ниже.

В основе работы ФД лежит эффект поглощения фотонов в полупроводниковом (ПП) материале и рождение за счет этого электрон-дырочной (*e-p*) пары носителей тока. Это происходит благодаря переходу электрона из валентной зоны на более высокий энергетический уровень в зону проводимости (рис.3.8.а). Образованные за счет этого носители - электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне - и образуют фототок, текущий во внешней цепи.

Для регистрации потока фотонов необходимо создать условия, при которых *e-p* пары не рекомбинируют за счет перехода электрона обратно в валентную зону. Эти условия в ФД создаются при поглощении фотонов в области образованного *p-n* перехода. Известно, что в области перехода концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне меньше, чем в ПП *n* и *p* типа соответственно. Поэтому область в окрестности перехода называется обедненным слоем. Именно здесь вероятность поглощения фотона велика, а постоянная времени рекомбинации (среднее время, за которое созданная *e-p* пара рекомбинируют) может быть сделано большим за счет технологии выращивания перехода.

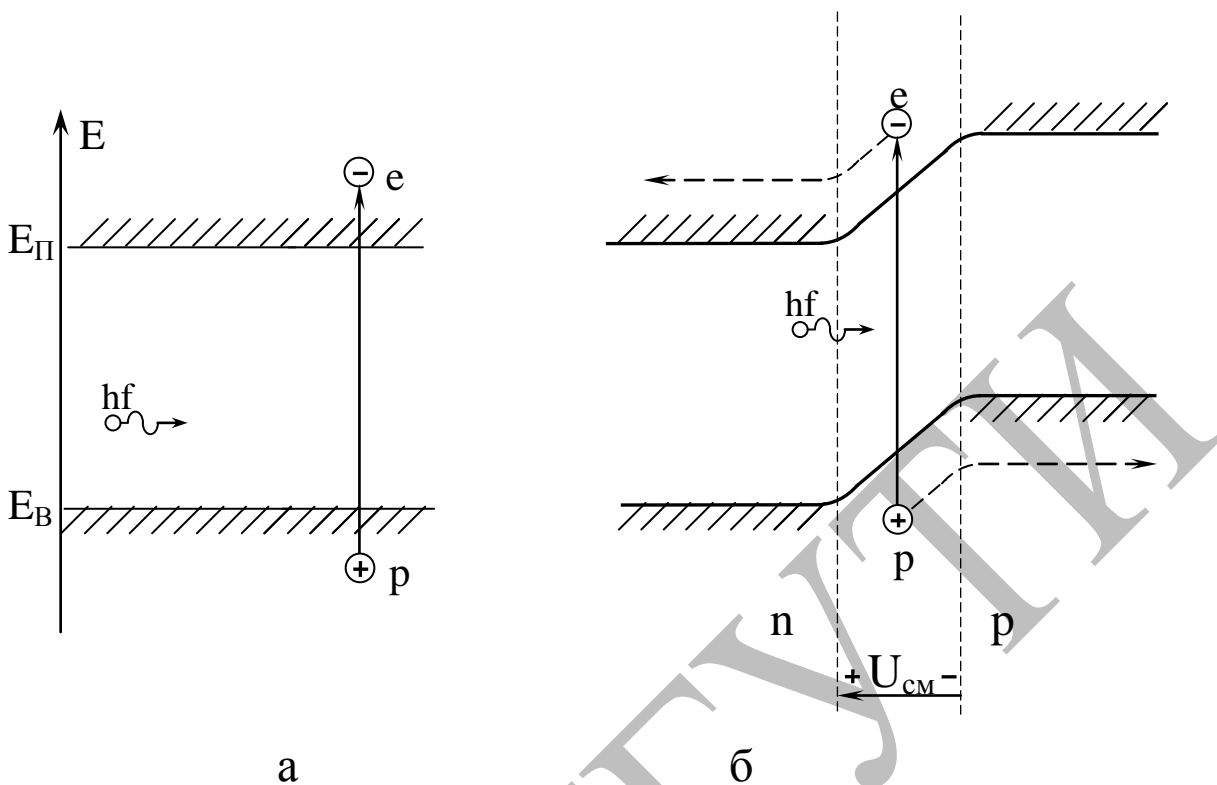


Рис. 3.8.

На рис. 3.8.б показана энергетическая диаграмма отрицательно смещенного pn перехода. За счет приложенного к нему напряжения смещения $U_{см}$ возникает ускоряющее электрическое поле, которое действует на электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне и "растаскивает" носители, появившиеся при поглощении фотона. В результате электроны попадают в область ПП n типа, дырки - в область ПП p -типа, где вероятность их рекомбинации мала. Величина приложенного напряжения напрямую связана с напряженностью электрического поля, а, следовательно, и с кулоновской силой, действующей на заряженные частицы. В конечном итоге $U_{см}$ определяет скорость их движения через обедненную область. Эта скорость должна быть выбрана так, чтобы время пролета частиц до внешних контактов ФД было бы существенно меньше, чем среднее время рекомбинации. Тогда практически все e - p пары, появившиеся вследствие поглощения фотонов, участвуют в формировании фототока.

На рис 3.9.а показаны вольт - амперные характеристики ФД в области отрицательного смещения pn перехода. Здесь изображены три ветви характеристики, соответствующие различным значениям оптической мощности на фоточувствительной площадке. Следует отметить, что даже при

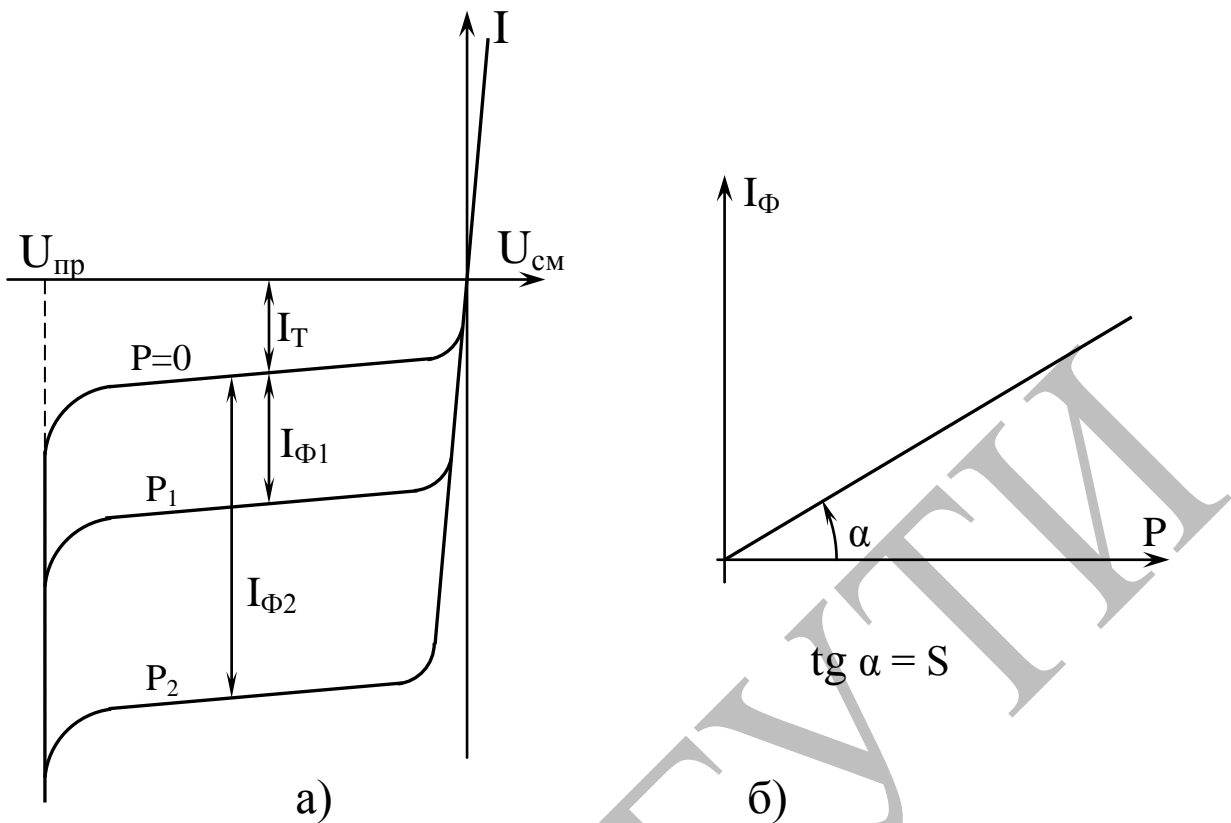


Рис. 3.9.

отсутствии оптической мощности ($P = 0$ на рис. 3.9.а), ток через ФД не исчезает полностью. Этот ток называется темновым и обычно имеет значение $I_T = (10^{-9} - 10^{-7})$ А. Величина его является важным параметром ФД, поскольку, как это будет ясно из дальнейшего изложения, I_T определяет значительную долю шумов оптического тракта.

При увеличении оптической мощности P фототок I_Φ через ФД увеличивается за счет рождающихся $e-p$ пар. При этом, как правило, величина фототока оказывается прямопропорциональной величине оптической мощности (рис. 3.9.б). Коэффициент пропорциональности между P и I_Φ называется токовой чувствительностью (чувствительностью) ФД (S). Его численное значение соответствует угловому коэффициенту прямой на рис.3.9.б и может быть определено следующим образом:

$$S = P / I_\Phi \text{ (А / Вт)}.$$

Значение чувствительности может быть определено и исходя из анализа простейшей физической модели ФД. Оптической мощности P (Вт), попадающей на фоточувствительную площадку, соответствует N_Φ (1 / сек) фотонов. Поскольку энергия одного фотона $W = h f$ ($h = 6.62 \cdot 10^{-24}$ Дж сек - постоянная Планка, f - частота фотона), то :

$$N_\Phi = P / W.$$

Число N_e появившихся $e-p$ пар в единицу времени:

$$N_e = \eta N_\Phi ,$$

где η - коэффициент, учитывающий, что не все фотоны вызывают появление электрона и дырки. Он называется квантовой эффективностью ФД.

Величина фототока I_ϕ определяется зарядом, перемещающимся через площадь pn перехода в единицу времени. Она определится следующим образом:

$$I_\phi = e N_e = (e / h f) \eta P.$$

В этой формуле $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кул - заряд электрона. Тогда выражение, определяющее чувствительность имеет вид:

$$S = (e / h f) \eta = (e / h c) \lambda \eta; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$$

Теперь можно определить основные особенности, обусловленные структурой оптического сигнала и которые необходимо учитывать при разработке и анализе аппаратуры оптического диапазона волн.

Во-первых, следует отметить, что ток в нагрузке ФД (I_ϕ) прямо пропорционален оптической мощности (P). При разработке линий связи, использующих аналоговую модуляцию оптической несущей, необходимо обеспечить линейную связь между модулирующим сигналом $S(t)$ (t - время) и оптической мощностью $P(t)$:

$P(t) = A S(t)$ (A - коэффициент пропорциональности, учитывающий размерности величин). Такой вид модуляции наиболее часто используется на практике. Он носит название модуляции интенсивности (МИ).

Наиболее просто осуществить ее меняя по закону модулирующего сигнала ток накачки I_n ЛД или СИД. Но, как правило, оптическая мощность нелинейно связана с I_n . Поэтому при МИ обычно возникают значительные нелинейные искажения, борьба с которыми требует применения специальных методов коррекции модуляционной характеристики.

Сложность и, зачастую, неэффективность такой коррекции обуславливает тот факт, что в оптическом диапазоне получили широкое распространение системы, использующие импульсные методы модуляции. В этом случае к линейности модуляционной характеристики предъявляются существенно менее жесткие требования.

Во-первых, следует отметить, что при выборе ФД для ВОЛС необходимо учитывать зависимость его спектральной чувствительности от длины волны λ источника света. Выбранный ФД сохраняет способность реагировать на оптическое излучение до тех пор, пока энергия фотонов, составляющих это излучение, достаточна для "перевода" электрона из валентной зоны в зону проводимости. В соответствии с рис. 3.8.a:

$$h f > E_n - E_v \Rightarrow \lambda < h c / (E_n - E_v).$$

Здесь E_n и E_v - энергетические уровни, соответствующие нижнему краю зоны проводимости и верхнему - валентной зоны. Данное неравенство определяет "красную границу" $\lambda_{кр}$ для ФД, выполненного из ПП материала. При $\lambda > \lambda_{кр}$ он не реагирует на оптическое излучение.

Для изготовления ФД используют кремний (Si), германий (Ge) и комбинированные соединения типа InGaAs. Кремниевые ФД имеют "красную" границу в области $\lambda = 1 \text{ мкм}$ и поэтому редко используются в ВОЛС, в которых

наиболее часто применяют источники света с длиной волны $\lambda = 1.3$ мкм и $\lambda = 1.5$ мкм. В этом спектральном диапазоне используют германиевые ФД. В последнее время, благодаря новейшим достижениям в области технологии, получили широкое распространение приборы на основе комбинированных соединений. Их характеристики оптимизируются специально для использования совместно с определенным типом волоконного световода и источником.

На практике используют два типа ФД. Первый из них - *pin* - фотодиод - получил свое название благодаря структуре слоев ПП материалов, из которых он образован. На рис.3.10.а приведена примерная топологическая схема такого устройства. Она включает в себя:

- тонкий слой 1 ПП *p*-типа с концентрацией основных носителей (дырок) p_p^+ на несколько порядков выше, чем у обычного материала;

- слой 2 ПП *n*-типа с концентрацией основных носителей (электронов) n_n^- на несколько порядков ниже, чем у обычного материала (обедненный слой). По своим свойствам он близок к собственному ПП *i*-типа;

- слой 3 ПП *p*-типа с концентрацией основных носителей (дырок) n_n^+ на несколько порядков выше, чем у обычного материала;

- изолирующий слой 4 и отрицательный контакт 5, обеспечивающий подачу отрицательного потенциала на ПП слоя 1;

- просветляющее покрытие 6, нанесенное на внешнюю поверхность слоя 1;

- положительный контакт 7, нанесенный на внешнюю поверхность слоя 3.

Из-за существенной разницы в концентрациях носителей проводимость слоя 2 оказывается значительно ниже, чем у первого и третьего. С точки зрения теории цепей это означает, что напряжение $U_{см}$ на контактах 5 и 7 оказывается практически полностью приложенным к границам области 2. В результате вектор напряженности электрического поля, возникающий за счет напряжения смещения, направлен поперек слоев в направлении x на рис.3.10.б и имеет всего одну проекцию E_x .

Поглощение фотонов и раждение *ep*-пар происходит в слое 2. За счет напряженности электрического поля на появившиеся носители тока действует кулоновская сила, выводящая их из этой области к внешним контактам 5 и 7.

Оптическое излучение проникает внутрь ФД через просветляющее покрытие 6 и область 1. Здесь поглощения фотонов практически не происходит, поскольку за счет высокой концентрации основных носителей (дырок) в слое 1 все верхние энергетические уровни валентной зоны лишены электронов - фотон не может перевести электрон в зону проводимости и создать *ep*- пару.

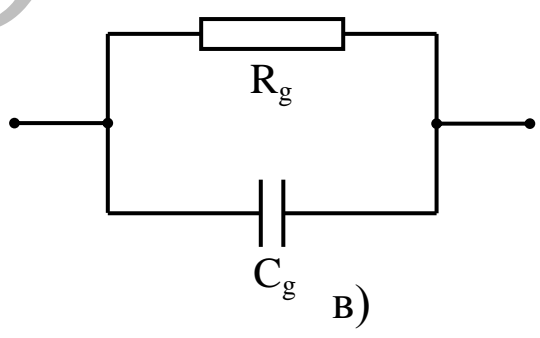
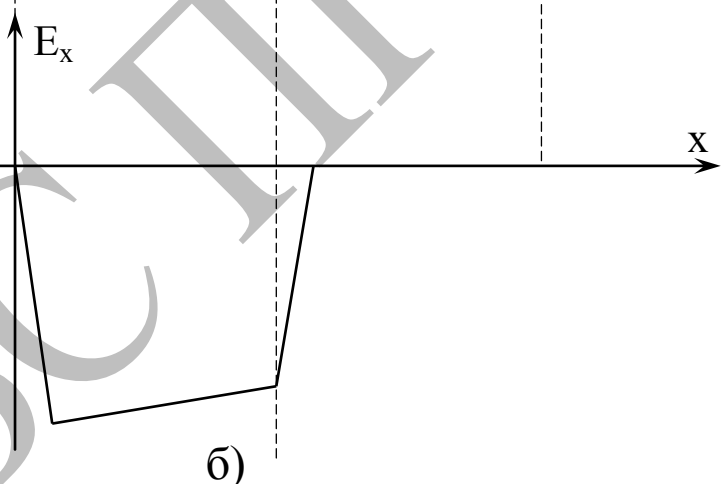
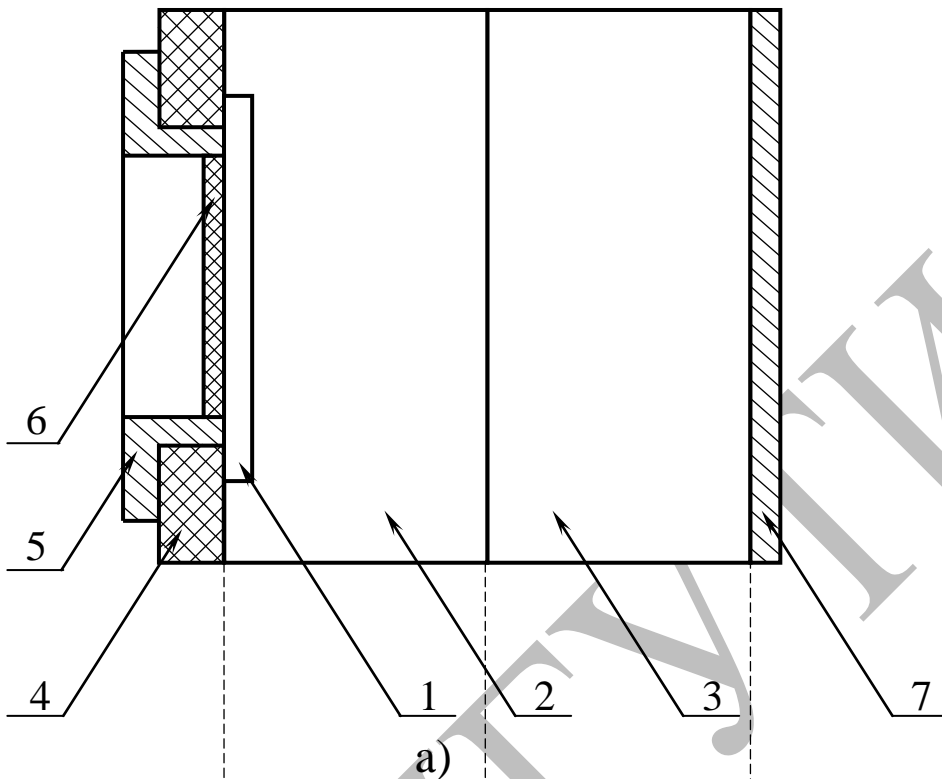


Рис. 3.10

В области 2 фотоны эффективно поглощаются за счет того, что верхние энергетические уровни валентной зоны практически полностью заселены электронами. Это обусловлено малым значением концентрации основных носителей. Ширина слоя 2 выбирается, исходя из следующих соображений:

-все влетевшие в нее фотоны должны быть поглощены, что обеспечивает максимально возможное значение фототока - для этого ширину слоя необходимо увеличивать;

-созданные ep -пары за возможно более короткий интервал времени должны достигнуть внешних контактов 5 и 7, что обеспечивает максимальное быстродействие ФД - для этого ширину слоя 2 необходимо уменьшать. Видно, что эти два требования альтернативны. На практике при разработке ФД всегда выбирают компромиссный вариант.

Как правило, ФД подключается ко входу усилителя фототока. Быстродействие всего фотоприемника в целом определяется электрическими параметрами ФД. Созданные за счет поглощения фотонов носители тока, двигаясь к внешним контактам 5 и 7, накапливаются на краях области 2, поскольку за ее пределами ускоряющее поле практически отсутствует (рис.3.10.б). С точки зрения теории цепей ФД может быть представлен эквивалентной схемой, в которой этот процесс учитывается введением емкости перехода C_d . Она шунтирует активное сопротивление перехода R_d (рис.3.10.в) и, в конечном итоге, определяет быстродействие фотоприемника.

Рассмотренный pin - фотодиод работает при напряжениях смещения:

$$0 \leq U_{см} \leq U_{пр} .$$

Величина $U_{пр}$ определяет значение напряжения смещения на ФД, при котором начинается пробой pn - перехода (рис.3.9.а). В лавинном фотодиоде (ЛФД) величина $U_{см} \geq U_{пр}$ так, что переход работает в режиме лавинного пробоя. Структура материалов, образующих ЛФД, его топологическая схема и технология изготовления обеспечивают работоспособность устройства в таком режиме.

В отличие от pin - фотодиода у ЛФД поглощение фотона приводит к появлению не одной, а M ep пар. Это происходит за счет того, что созданные за счет поглощения фотона первичные электроны и дырки разгоняются ускоряющим полем до скорости, достаточной для возбуждения соседних атомов в кристаллической решетке. Можно сказать, что первичные электроны и дырки порождают лавинообразный процесс. Величина M имеет порядок 10 - 100 и называется коэффициентом электронного размножения.

Конструктивно ЛФД существенно сложнее pin - ФД. Кроме того, для создания условий лавинообразного размножения носителей требуется существенно увеличивать размеры обедненной области. Это приводит к снижению быстродействия ЛФД по сравнению с pin - фотодиодом. Проигрывает ЛФД и по шумовым характеристикам. Это объясняется тем, что процесс образования лавины носит случайный характер и является дополнительным источником шума.

На рис.3.11 показана обобщенная схема фотоприемника, включающая и усилитель оптического сигнала. С точки зрения теории цепей ФД может быть

представлен эквивалентной схемой, состоящей из генератора фототока $I_{\phi}(t) = P(t) S$, который шунтируется сопротивлением перехода R_d и емкостью перехода C_d входным сопротивлением и входной емкостью усилителя. Все эти пассивные элементы учтены в элементах R_1 и C_1 . Выбор значений R_1 и C_1 производится из соображений оптимизации фотоприемника по быстродействию и отношению сигнал/шум на его выходе.

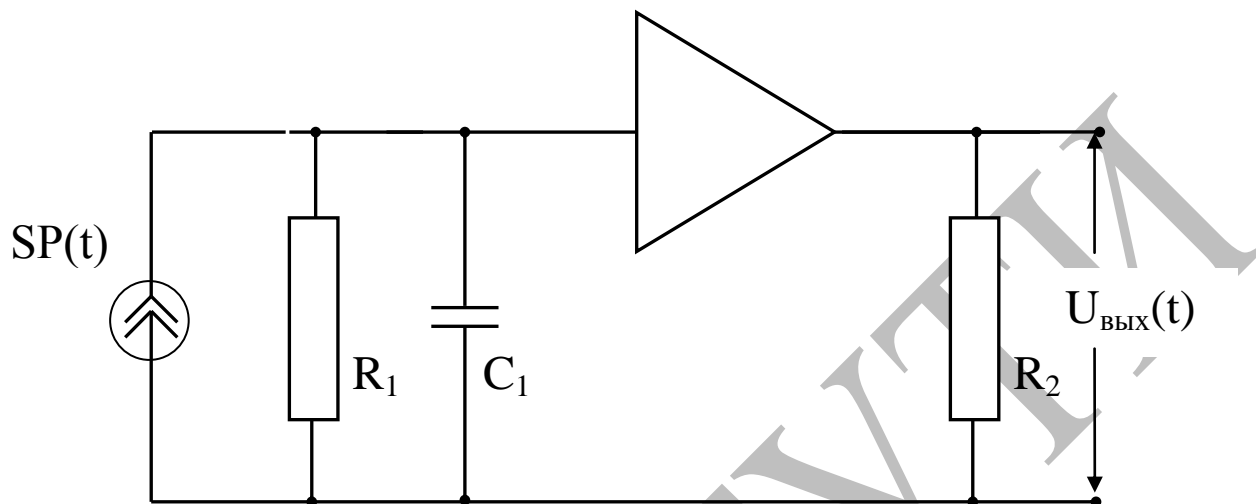


Рис. 3.11.

Для оценки быстродействия необходимо учитывать запаздывание сигнала на выходе усилителя $U_{\text{вых}}(t)$ относительно оптического - $P(t)$. Оно определяется, во первых, процессами преобразования оптической мощности в фототок $I_{\phi}(t)$ происходящими в ФД и определяется временем, за которое появившиеся за счет поглощения фотона носители тока достигают внешних контактов. Уменьшить запаздывание можно за счет увеличения напряжения смещения $U_{\text{см}}$. При этом увеличивается скорость носителей и они скорее достигают внешней цепи ФД. Как показывают более детальные исследования процессов в ФД, существует оптимальная величина $U_{\text{см}}$, при котором запаздывание минимально. Увеличение напряжения смещения сверх этого оптимального значения не приводит к улучшению характеристик ФД ни по быстродействию, ни по чувствительности.

Во вторых, запаздывание сигнала на выходе усилителя относительно оптического связано с внешними по отношению к ФД элементами R_1 и C_1 . Постоянная времени $\tau = R_1 C_1$ определяет на сегодняшний день быстродействие всего фотоприемника в целом. Ясно, что для уменьшения запаздывания величины R_1 и C_1 следует уменьшать. Но снижение емкости ограничено технологическими трудностями. На сегодняшний день ее типичное значение составляет единицы пикофарад.

Величина активного сопротивления R_1 определяет не только быстродействие фотоприемника, но и его шумовые характеристики. В отличие от радиодиапазона, в оптическом необходимо учитывать несколько

дополнительных специфических источников шумов. Особенности обработки оптического сигнала накладывают свои требования на величину R_1 .

Основной особенностью оптического сигнала является его квантовая структура. Процесс формирования фототока представляет собой последовательность единичных актов поглощения фотонов и образования *ер*-пар. Даже если источник излучения и все остальные элементы оптического тракта являются идеальными и не вносят шумов в сигнал на входе ФД, в фототоке будет присутствовать шумовая составляющая. Это происходит благодаря случайному характеру поглощения фотонов, подчиняющемуся законам квантовой статистики.

Такой шум называется квантовым и его необходимо учитывать при оценке отношения С/Ш на выходе усилителя. Поскольку он определен самой природой оптического сигнала, его уровень растет вместе с ростом оптической мощности на входе ФД. Уровень квантовых шумов дополнительно увеличивается и из-за случайного характера формирования *ер*-пар. Это происходит, в основном, благодаря различиям во времени дрейфа носителей тока от места их появления до внешних контактов ФД.

По своему проявлению рассмотренные шумы подобны дробовым. Их спектральное распределение равномерно в полосе частот Δf , которая регистрируется фотоприемником. Среднеквадратичное значение шумовой составляющей фототока определяется выражением:

$$(I_{шф})^2 = 2e I_{ф ср} \Delta f = 2e P_{ср} S \Delta f.$$

Здесь $I_{ф ср}$ - среднее значение (постоянная составляющая) фототока, соответствующее среднему значению оптической мощности $P_{ср}$ на входе ФД, которое при любом способе модуляции отлично от нуля.

Ранее было отмечено, что даже при $P = 0$ через ФД протекает темновой ток. Его характер также случаен и он является дополнительным источником шума, который подобен квантовому. Величина среднеквадратичного значения шумовой составляющей темнового тока $I_{шт}$ определяется его средним значением I_T следующим образом:

$$(I_{шт})^2 = 2e I_T \Delta f.$$

Свой вклад в общий шум оптического тракта вносит и фоновая засветка - оптическое излучение, попадающее на чувствительную площадку ФД от различных источников, играющих роль помех. Если такой источник создает мощность P_3 на чувствительной площадке ФД, то соответствующая ему шумовая составляющая определяется выражением:

$$(I_{шз})^2 = 2e P_3 S \Delta f.$$

Кроме рассмотренных выше, для ВОЛС характерны также модовые шумы, возникающие за счет случайных флуктуаций интенсивности в пределах чувствительной площадки ФД. Они проявляются, когда когерентный источник излучения (ЛД) используется совместно с многомодовым световодом. В этом случае на выходном торце световода возникает "спектр-картина", являющаяся результатом интерференции различных мод. Эта картина постоянно меняется под воздействием многих факторов: изменения температуры окружающей

среды, микродеформации световода при различных механических воздействиях. Любое из приведенных внешних воздействий меняет случайным образом величину геометрического пути, который проходят лучи, соответствующие различным модам световода. Несмотря на то, что это изменение невелико и составляет доли микрон на километр световода, оно оказывается соизмеримым с длиной волны и существенным образом меняет фазовый набег между различными модами. Этим и определяется изменение распределения интенсивности на выходном торце световода, которое приводит к появлению модового шума.

Подобный по проявлению на выходе усилителя ФД шум возникает и при совместном использовании некогерентного источника излучения (СИД) и одномодового волокна. Отличие проявляется лишь в том, что случайный характер имеет не пространственная, временная структура распределения интенсивности на выходном торце световода.

Дополнительные шумы создает и источник излучения. Они проявляются в флуктуации оптической мощности и случайном характере распределения интенсивности на его излучающей площадке.

Систему связи можно оптимизировать, исключив причину появления ряда шумов, характерных для оптического диапазона. Используя когерентные источники только совместно с одномодовыми световодами, а некогерентные - с многомодовыми, можно исключить модовые шумы. Применение усовершенствованных технологий при изготовлении ЛД и СИД и разработка схемных решений для источников тока накачки, в которых предусматривается контроль и автоматическая регулировка режима его работы, позволяет свести к минимуму шумы источника излучения.

Исключить квантовые шумы сигнала и темнового тока нельзя никакими методами. Они всегда сопутствуют оптическому сигналу и наличие этих шумовых факторов необходимо учитывать при разработке схемных решений для усилителя фототока.

На рис.3.12 показана обобщенная эквивалентная схема фотоприемника, в которой учтены все главные шумовые источники. Наряду с рассмотренными выше, введен генератор тока $I_{шт}$, учитывающий тепловой шум активного сопротивления нагрузки ФД R_1 . Его величина определяется известным соотношением:

$$(I_{шт})^2 = 4 k t \Delta f / R_1.$$

Здесь $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, t - температура в градусах Кельвина (К).

Двумя источниками $I_{шy}$ и $U_{шy}$ учтены шумы активного элемента усилителя. Если усилитель строится на основе полевых транзисторов, то

$$(U_{шy})^2 = \xi 4 k t \Delta f / g, \quad I_{шy} = 0.$$

Здесь g - крутизна входной характеристики транзистора, имеющая смысл входной проводимости. Коэффициент $\xi = (0.7 - 1.1)$ зависит от типа

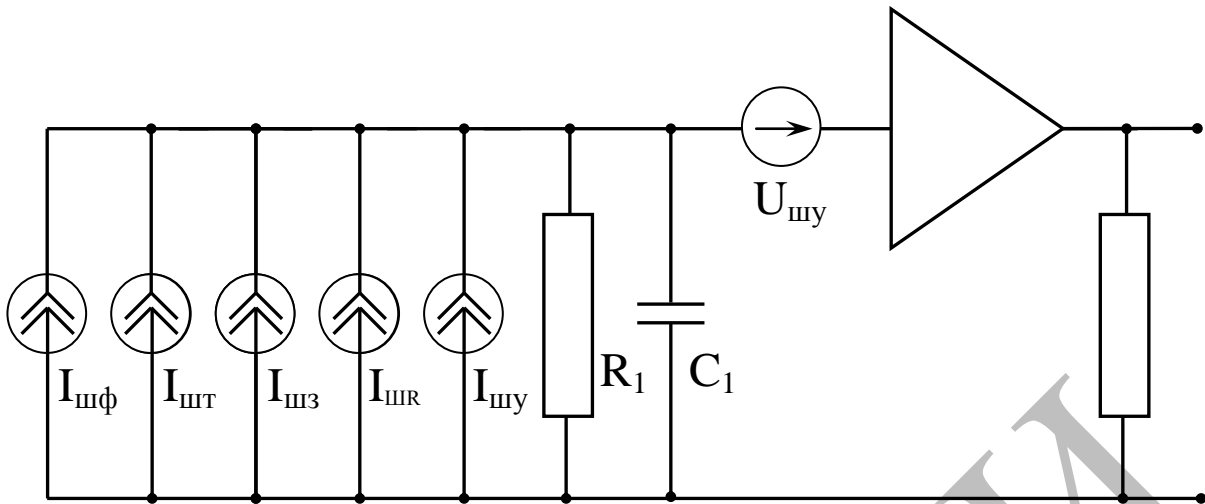


Рис. 3.12.

полевого транзистора. Для усилителя, построенного на базе биполярных транзисторов

$$(U_{\text{шy}})^2 = 4(k t)^2 \Delta f / (e I_{\text{к}}), \quad (I_{\text{шy}})^2 = 2e I_{\text{б}} \Delta f .$$

Здесь $I_{\text{б}}$ и $I_{\text{к}}$ - постоянные токи базы и коллектора транзистора.

Все рассмотренные выше шумовые источники в первом приближении считаются независимыми. Поэтому результирующая мощность шума на выходе усилительного каскада может быть определена в результате суммирования вкладов, вносимых отдельными источниками. Используя приведенные выше соотношения, можно получить аналитическое выражение для отношения СШ на выходе усилительного каскада. Детальный анализ такого соотношения позволяет сделать следующие выводы:

- отношение СШ зависит от мощности принимаемого оптического сигнала P и не может быть увеличено за счет ее роста;

- если шумы оптического тракта сравнимы с шумами электронной части фотоприемника, то рост отношения СШ можно обеспечить за счет увеличения эквивалентного сопротивления нагрузки ФД R_1 .

Но при росте R_1 уменьшается полоса пропускания фотоприемника в целом. Поэтому одновременное увеличение СШ и сохранение прежней полосы пропускания невозможно без существенного усложнения электронной схемы первого каскада усилителя. Она требует введения высокочастотной коррекции его амплитудно-частотной характеристики.

Лабораторная работа №1. «Исследование характеристик лазерного диода и фотоприемника»

Цель работы:

- получение навыков практического использования измерителя оптической мощности;
- измерение ватт-амперной характеристики лазерного диода с помощью измерителя оптической мощности;
- исследование зависимости тока фотодиода от уровня оптической мощности на его чувствительной площадке;
- исследование зависимости тока фотодиода от напряжения смещения $U_{см}$;
- исследование зависимость спектральной чувствительности фотодиода от напряжения смещения $U_{см}$.

Порядок выполнения работы.

Внимание! Перед каждым использованием в измерениях волоконных шнуров необходимо снять защитные колпачки с их торцов. После окончания работы с волоконным шнуром обязательно установить на его торцы снятые защитные колпачки. Перед каждым использованием в измерениях оптического тестера «Алмаз 33» необходимо отвернуть защитный колпачок с торца его коннектора и немедленно соединить его с коннектором волоконного шнура. После окончания измерения обязательно установить защитный колпачок на прежнее место.

1. Измерение ватт-амперной характеристики лазерного диода с помощью измерителя оптической мощности.

1.1. Установите органы управления электронного блока «Источник оптического сигнала» в исходное положение:

- ручки потенциометров « I_0 », « I_1 » регулировки токов – в крайнее положение против часовой стрелки;
- кнопочные переключатели «модуляция», «дисперсия», «шум» – отжаты;
- включить тумблер «сеть». При этом загорается его подсветка;
- кнопочный переключатель «выбор источника» - в положении, соответствующем включению лазера, излучающего на выбранной длине волны 1,3 или 1,5 мкм. При этом над соответствующей оптической розеткой загорается контрольный световод;

При данном положении органов управления электронный блок обеспечивает непрерывное немодулированное оптическое излучение на выбранном оптическом выходе. Его мощность регулируется потенциометром « I_0 ».

1.2. С помощью одномодового (желтый цвет защитной оболочки) оптического шнура с коннекторами типа FC соедините оптический выход

электронного блока «Источник оптического излучения» со входом оптического тестера «Алмаз 33» (рис.Л1.1).



Рис. Л1.1.

1.3.Используя описание прибора «Алмаз 33», включить его в режим измерения абсолютного значения оптической мощности (в мВт) на выбранной длине волны.

1.4.Изменяя величину тока I_0 с помощью потенциометра на лицевой панели блока «Источник оптического излучения», произвести измерение ватт-амперной характеристики лазерного диода. Значение мощности $P_{аб}$ определять с помощью прибора «Алмаз 33» в абсолютных единицах. Величину тока I_0 определять с помощью цифрового индикатора на лицевой панели электронного блока «Источник оптического излучения». Измерения проводить изменяя I_0 в диапазоне значений $0 < I_0 < 25$ мА с шагом изменения, который определяется преподавателем. Данные измерений занести в строки 1 и 2 таблицы 1. После окончания измерений выключить «Алмаз 33».

Таблица 1. Результаты исследования ватт-амперной характеристики лазерного диода.

I_0 (мА)	0			
$P_{аб}$ (мВт)				

1.5.По экспериментальным данным построить ватт - амперную характеристику лазерного диода – зависимость $P_{аб}$ (мВт) от I_0 (мА). На характеристике отметить величину порогового тока $I_{п}$ (мА), значение которого необходимо для выполнения последующих исследований.

2. Исследование зависимости тока фотодиода от уровня оптической мощности на его чувствительной площадке.

2.1. Установите органы управления электронного блока «Фотоприемник» в исходное положение:

- ручку потенциометра «Регулировка смещения» регулировки напряжения смещения– в крайнее положение против часовой стрелки;
- кнопочный переключатель «Уст. нуля» - отжать;
- кнопочный переключатель «Чувствительность» – в положение 1;
- включить тумблер «сеть». При этом загорается его подсветка.

2.2. Установите ручку потенциометра регулировки тока « I_0 » на лицевой панели электронного блока «Источник оптического излучения» в крайнее положение против часовой стрелки. При этом излучение лазерного диода отсутствует.

2.3.Отсоедините коннектор оптического шнура от входа прибора «Алмаз 33» (рис. Л1.1) и соедините его с оптическим входом электронного блока «Фотоприемник» (рис.Л1.2).

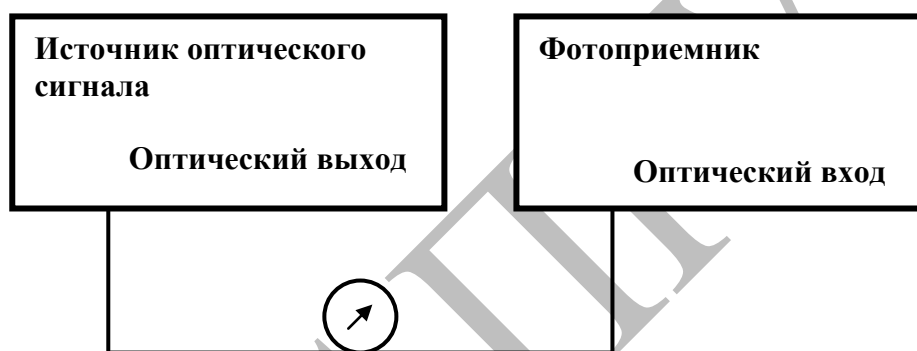


Рис. Л1.2.

2.4. Ручками потенциометров «грубо», «точно» регулировки напряжения смещения на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» установите по указанию преподавателя требуемую величину $U_{см}$.

2.5. Произведите калибровку фотоприемника. Для этого выполните следующие операции:

- нажмите кнопочный переключатель «Уст. нуля» включения калибровки на лицевой панели фотоприемника;
- ручкой потенциометра «Уст. нуля» установите нулевые показания прибора измеряющего оптическую мощность в относительных единицах;
- отожмите кнопочный переключатель калибровки на лицевой панели фотоприемника.

2.6. Произведите измерение ватт-амперной характеристики лазерного диода, используя в качестве регистрирующего устройства прибор на лицевой панели фотоприемника, фиксирующий оптическую мощность в относительных единицах. Она соответствует зависимости показаний стрелочного прибора P (относительные единицы) на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» от величины тока накачки I_0 . Значения тока I_0 следует выбирать в соответствии с таблицей 1 так, чтобы была возможность установить

соответствие между абсолютным значением оптической мощности, измеренным в пункте 1 и относительным, измеряемым в данном пункте. Данные измерений занесите в строки 1 и 2 таблицы 2. Для удобства обработки полученных результатов занесите в строку 3 таблицы 2 величину оптической мощности в абсолютных единицах $P_{аб}$ (мВт) из таблицы 1.

Таблица 2. Результаты измерения ватт-амперной характеристики лазерного диода с помощью электронного блока «Фотоприемник» при напряжении смещения $U_{см} =$.

I_0 (мА)	0			
P (от. ед.)				
$P_{аб}$ (мВт)				

2.7. Повторите измерения ватт-амперной характеристики лазерного диода, используя в качестве регистрирующего устройства прибор на лицевой панели фотоприемника, фиксирующий оптическую мощность в относительных единицах, изменив величину напряжения смещения $U_{см}$. Значения $U_{см}$ выбирать в соответствии с указаниями преподавателя.

2.8. По результатам измерений, отраженным в таблице 2, постройте зависимости измеренного значения оптической мощности в относительных единицах от ее абсолютного значения – P ($P_{аб}$) для выбранных величин $U_{см}$. Эти зависимости представляют собой градуировочные кривые измерительного прибора фотоприемника для соответствующего напряжения смещения $U_{см}$. По зависимости P ($P_{аб}$) следует сделать вывод о соответствии оптической мощности, фиксируемой фотодиодом, и его фототоком. В идеальном случае должна наблюдаться прямая пропорциональность между этими величинами.

2.9. Показания измерительного прибора электронного блока «Фотоприемник», фиксирующего P (от.ед.), пропорциональны сумме фототока $I_{ф}$, обусловленного оптической мощностью на его чувствительной площадке ($P_{аб}$) и темнового тока $I_{т}$:

$$(I_{ф} + I_{т}) (A) = K (A) P (от.ед.).$$

Коэффициент пропорциональности $K (A)$ следует определить по значению $P(от.ед.) |_{I_0 = 0 (мА)}$, соответствующему $I_0 = 0 (мА)$. При этом лазерный диод не излучает и $I_{ф} = 0$. Величина темнового тока, соответствующая используемому в макете диоду, составляет $I_{т} = 10^{-9} A$. Значение коэффициента $K (A)$ определить из соотношения:

$$K (A) = I_{т}(A) / P (от.ед.) |_{I_0 = 0 (мА)}.$$

2.10. Вычислите значение спектральной чувствительности фотодиода для каждого значения напряжения смещения $U_{см}$. Для этого выполните следующие действия:

- для каждой зависимости измеренного значения оптической мощности в относительных единицах от ее абсолютного значения – P ($P_{аб}$), соответствующей выбранному значению $U_{см}$, определите линейный участок;

-отметьте границы линейного участка и соответствующие им значения ($P_{(от.ед.)_{max}} ; (P_{аб})_{max}(Вт)$) и ($P_{(от.ед.)_{min}} ; (P_{аб})_{min}(Вт)$). Значения абсолютных величин мощности должны быть выражены в ваттах;

- вычислите значение спектральной чувствительности фотодиода по формуле:

$$S(A/Вт)=K(A) (P_{(от.ед.)_{max}}-P_{(от.ед.)_{min}})/((P_{аб})_{max}(Вт)-(P_{аб})_{min}(Вт));$$

-вычисленное значение S и соответствующее ему значение напряжения смещения $U_{см}$ занести в таблицу 3.

Таблица 3. Зависимость спектральной чувствительности фотодиода от напряжения смещения $U_{см}$.

$U_{см} (В)$				
$S(A/Вт)$				

2.11. По данным таблицы 3 построить зависимость спектральной чувствительности фотодиода для каждого от напряжения смещения $U_{см}$.

2.12. После проведения измерений:

-ручки потенциометров «Регулировка смещения» регулировки напряжения смещения на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» установить в крайнее положение против часовой стрелки;

-ручку потенциометра регулировки тока « I_0 » установить в крайнее положение против часовой стрелки;

-выключить тумблеры «сеть» на обоих электронных блоках.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы лазерного диода. Требования.
2. Определение ватт - амперной характеристики лазерного диода.
3. С какой целью измеряется ватт-амперная характеристика лазерного диода?
4. Принцип работы фотодиодов. Требования. Основные характеристики.
5. Объясните зависимость спектральной чувствительности фотодиода от напряжения смещения $U_{см}$.
6. Как зависит ток фотодиода от уровня оптической мощности на его чувствительной площадке?

Лабораторная работа №2. «Измерение коэффициентов затухания волоконных световодов»

Цель работы:

-измерение коэффициента затухания многомодового и одномодового волоконного световода на двух длинах волн 1,3 и 1,5 мкм.

Порядок выполнения работы.

Внимание! Перед каждым использованием в измерениях волоконных шнуров необходимо снять защитные колпачки с их торцов. После окончания работы с волоконным шнуром обязательно установить на его торцы снятые защитные колпачки. Перед каждым использованием в измерениях оптического тестера «Алмаз 33» необходимо отвернуть защитный колпачок с торца его коннектора и немедленно соединить его с коннектором волоконного шнура. После окончания измерения обязательно установить защитный колпачок на прежнее место.

1. Установите органы управления электронного блока «Источник оптического сигнала» в исходное положение:

- ручки потенциометров « I_0 », « I_1 » регулировки токов – в крайнее положение против часовой стрелки;
- кнопочные переключатели «модуляция», «дисперсия», «шум» – отжаты;
- включить тумблер «сеть». При этом загорается его подсветка;
- кнопочный переключатель «выбор источника» - в положении, соответствующем включению лазера, излучающего на выбранной длине волны 1,3 или 1,5 мкм. При этом над соответствующей оптической розеткой загорается контрольный световод;

При данном положении органов управления электронный блок обеспечивает непрерывное немодулированное оптическое излучение на выбранном оптическом выходе. Его мощность регулируется потенциометром « I_0 ».

2. С помощью одномодового шнура FC/UPC-FC/UPC (желтый цвет защитной оболочки) соедините «оптический выход» электронного блока «Источник оптического сигнала» с входом оптического тестера «Алмаз 33».

3. Включите оптический тестер «Алмаз 33» и переведите его в режим измерения абсолютных значений мощности нажимая кнопку *mvt*, *dbm*, *db* на его лицевой панели. Установите тестер в режим измерений на выбранной длине волны, нажимая кнопку λ на его лицевой панели. При необходимости используйте описание прибора «Алмаз 33».

4. Установите режим работы оптического тестера, соответствующий измерению мощности в относительных единицах (измерение затухания), нажав необходимое количество раз кнопку *mvt*, *dbm*, *db*. После этого нажмите кнопку «установка нуля» на пульте тестера. При этом уровень оптической мощности,

поступающий на вход прибора, принимается за нулевой. На его дисплее появляется значение 0 дБ.

5. Установите с помощью потенциометра «регулировка» электронного блока «Блок питания излучателя» величину оптической мощности в районе 0,5 мВт по прибору «Алмаз 33». Зафиксируйте это значение в соответствующей графе таблицы 1. При дальнейших измерениях это значение не должно изменяться.

6. Откройте крышку, закрывающую световод нормализующей одномодовой катушки. Она расположена на плате 5 (рис.2.1). Извлеките коннекторы световода катушки и соедините их с оптическими розетками, расположенными на той же плате.

7. Отсоедините одномодовый шнур FC/UPC-FC/UPC (желтый цвет защитной оболочки) от входа оптического тестера и с его помощью соедините «оптический выход» электронного блока «Источник оптического сигнала» с одной из розеток на плате 5 (присоедините коннектор шнура с противоположной стороны относительно коннектора нормализующей катушки).

8. С помощью одномодового шнура FC/UPC-FC/UPC (желтый цвет защитной оболочки) соедините оптический тестер «Алмаз 33» со второй розеткой на плате 5. На его дисплее появляется значение q затухания в линии, образованной участком одномодового световода длиной $L = 1000$ метров. Значение q занесите в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерения коэффициента затухания. Световодмодовый. Длина $L =$

λ	Q	α
1,3 мкм		
1.5 мкм		

9. Повторите измерения на второй длине волны. Данные измерений занести в таблицу 1.

10 По описанной выше методике проведите измерение коэффициента затухания многомодового световода. Для этого используйте нормализующую катушку и оптические розетки, расположенные на плате 7. Соединения в этом случае следует выполнять с помощью многомодовых волоконных шнуров (оранжевый цвет защитной оболочки).

Контрольные вопросы.

1. Что такое коэффициент затухания волоконных световодов?
2. В чем различие одномодовых оптических волокон от многомодовых?
3. Что такое хроматическая дисперсия оптического волокна?
4. На какие параметры оптического линейного тракта влияет коэффициент затухания оптического волокна?
5. Как измеряется коэффициент затухания оптического волокна?

Лабораторная работа №3. «Исследование процессов импульсной модуляции лазерного диода»

Цель работы:

- исследование процесса модуляции интенсивности лазерного диода и влияния на форму оптического сигнала положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике;
- исследование зависимости коэффициента модуляции интенсивности лазерного диода от положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике;
- исследование зависимости коэффициента модуляции интенсивности лазерного диода от напряжения смещения фотодиода.

Порядок выполнения работы.

Внимание! Перед каждым использованием в измерениях волоконных шнуров необходимо снять защитные колпачки с их торцов. После окончания работы с волоконным шнуром обязательно установить на его торцы снятые защитные колпачки. Перед каждым использованием в измерениях оптического тестера «Алмаз 33» необходимо отвернуть защитный колпачок с торца его коннектора и немедленно соединить его с коннектором волоконного шнура. После окончания измерения обязательно установить защитный колпачок на прежнее место.

1. Установите в исходное положение органы управления электронного блока «Источник оптического сигнала»:

- ручки потенциометров « I_0 », « I_1 » регулировки токов– в крайнее положение против часовой стрелки;
- кнопочные переключатели «Дисперсия», «Шум» – отжаты;
- кнопочный переключатель включения импульсной модуляции «Модуляция» - нажат;
- кнопочный переключатель включения аналоговой модуляции «Модуляция» - отжат;
- ручки потенциометров «Модуляция», «Дисперсия», «Шум» - в крайнее положение против часовой стрелки;
- включить тумблер «Сеть». При этом загорается его подсветка;
- кнопочный переключатель «выбор источника» - в положении, соответствующем включению лазера, излучающего на выбранной длине волны 1,3 или 1,5 мкм. При этом над соответствующей оптической розеткой загорается контрольный световод.

2. Установите органы управления электронного блока «Фотоприемник» в исходное положение:

- ручку потенциометра «Регулировка смещения» регулировки напряжения смещения– в крайнее положение против часовой стрелки;
- кнопочный переключатель «Уст. нуля» - отжать;
- кнопочный переключатель «Чувствительность» – в положение 1;

-включить тумблер «сеть». При этом загорается его подсветка.

-ручкой потенциометра «Регулировка смещения» установить заданное преподавателем его значение по прибору на лицевой панели.

3. Соедините рабочий оптический выход электронного блока «Источник оптического сигнала» с оптическим входом электронного блока «Фотоприемник» с помощью одномодового волоконного шнура (желтый цвет защитной оболочки).

4. С помощью коаксиальных кабелей, входящих в состав лабораторного макета выполните следующие соединения:

-гнездо «синхронизация осциллографа» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» соедините со входом канала синхронизации осциллографа;

-гнездо «кт 3» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» соедините со входом первого канала осциллографа;

-гнездо «вых» на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» соедините со входом второго канала осциллографа.

5. Включите питание осциллографа. Установите переключатели входов обоих каналов в положение (=) – открытый вход для обеспечения наблюдения сигналов с постоянной составляющей. После прогрева на экране осциллографа появляются две горизонтальных линии развертки, соответствующие двум его каналам. При необходимости откорректируйте изображение линий с помощью изменения яркости, фокусировки и центровки изображения по вертикали и горизонтали.

6. Используя результаты исследования ватт - амперной характеристики, полученные в предыдущей лабораторной работе, установить с помощью потенциометра « I_0 » на лицевой панели блока «Источник оптического сигнала» значение тока I_0 , равное пороговому значению ($I_0 = I_{п}$).

7. Установите верхнюю ручку потенциометра «Модуляция» (с индексом импульсная модуляция) в среднее положение. Плавно увеличивайте значение I_1 с помощью вращения по часовой стрелке ручки потенциометра « I_1 » на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала». При этом ток накачки лазерного диода и излучаемая им оптическая мощность модулированы импульсным сигналом. Величина I_1 определяет амплитуду этого сигнала. Используя органы управления разверткой осциллографа (период развертки, усиление, центровка изображения по горизонтали и вертикали), получить устойчивое изображение сигнала модуляции на первом канале осциллографа.

8. Установить переключатель «В/дел» второго канала в положение 0,5. С помощью потенциометров « I_1 », регулирующих величину тока (вращая их по часовой стрелке и увеличивая тем самым его величину) установить значение тока I_1 , обеспечивающее появление сигнала на выходе фотоприемника. Затем, увеличивая значение тока I_1 и амплитуды модулирующего сигнала (для этого вращайте потенциометр модуляция по часовой стрелке), доведите значение амплитуды принимаемого оптического сигнала до максимально возможного значения. При необходимости менять положение переключателя «В/дел» второго канала. Примерный вид осциллограммы показан на рис. ЛЗ.1.

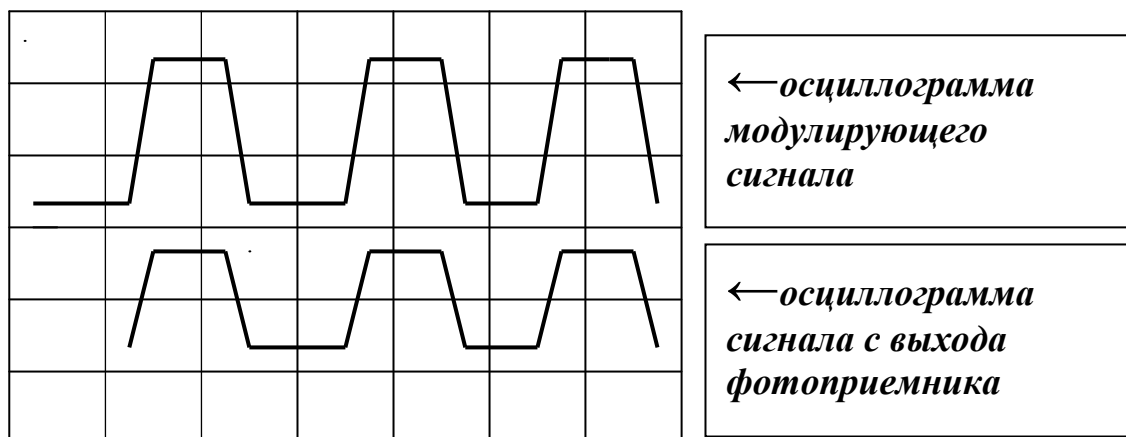


Рис. Л3.1 Примерный вид осциллограмм на экране

9. Для удобства дальнейших измерений с помощью регулировки вертикального положения сигнала 1 канала (\updownarrow) переместить его за пределы экрана. На экране наблюдается сигнал 2 канала, поступающий с выхода электронного блока «Фотоприемник».

10. Установить на экране осциллографа нулевую отсчетную линию, соответствующую нулевому току фотодиода. Для этого выполнить следующие операции:

- установить ручку потенциометра « I_1 » регулировки тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» в крайнее положение против часовой стрелки. При этом амплитуда модулирующего сигнала равна нулю – модуляция отсутствует;

- на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» кнопочный переключатель «Установка нуля»– нажать. При этом вход усилителя фототока соединяется с землей, что соответствует нулевому значению тока фотодиода;

- на экране осциллографа наблюдается прямая линия. С помощью регулировки вертикального положения сигнала 2 канала (\updownarrow) переместить ее в положение, совпадающее с нижней линией градуировочной сетки, нанесенной на экране осциллографа (сплошная линия на рис.4);

- отжать кнопочный переключатель «Установка нуля» – при этом линия, соответствующая сигналу на втором канале осциллографа переместиться вверх (рис. Л3.2). В данном случае положение отсчетной линии определяется темновым током фотодиода I_T (сигнал модуляции отсутствует и значение тока I_0 выбрано равным пороговому значению)

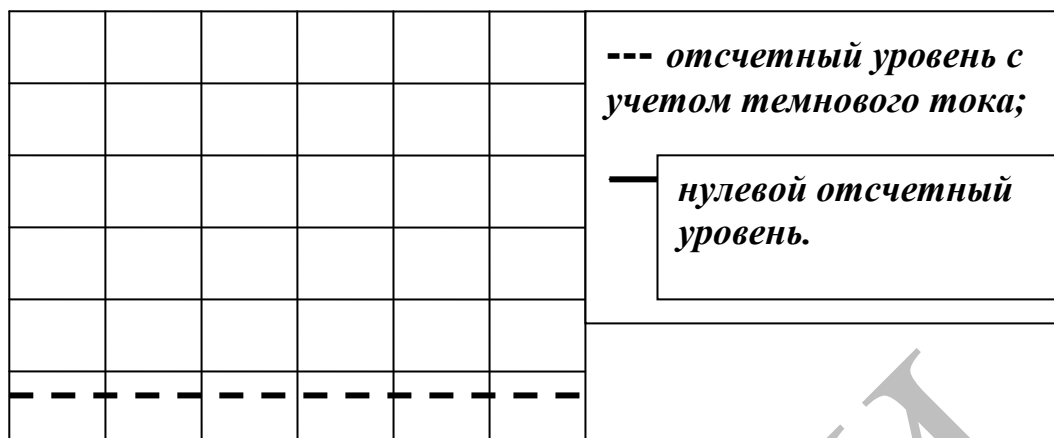


Рис . Л3.2. Установка нулевого отсчетного уровня

11. Плавно увеличить значение I_1 с помощью вращения по часовой стрелке ручек потенциометров « I_1 » на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» до получения максимальной амплитуды сигнала. Контроль производится по экрану осциллографа.

12. Исследовать зависимость глубины модуляции лазерного излучения импульсным сигналом от величины тока I_0 . Для этого выполнить следующие операции:

- с помощью потенциометра « I_1 » регулировки амплитуды модулирующего тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» установить ее значение $I_1 = 20$ мА;

- с помощью потенциометров « I_0 » регулировки тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» установить текущее его значение;

- по наблюдаемой на экране осциллограмме произвести отсчет величин P_{\min} и P_{\max} (рис.Л3.3), которые соответствуют минимальному и максимальному уровням фиксируемого фотодиодом сигнала;

- данные измерений занести в таблицу 4;

- повторить измерения для всех значений I_0 , указанных преподавателем.

Таблица 4. Зависимость коэффициента модуляции от тока I_0

I_0 (мА)				
P_{\min} (мм)				
P_{\max} (мм)				
M				

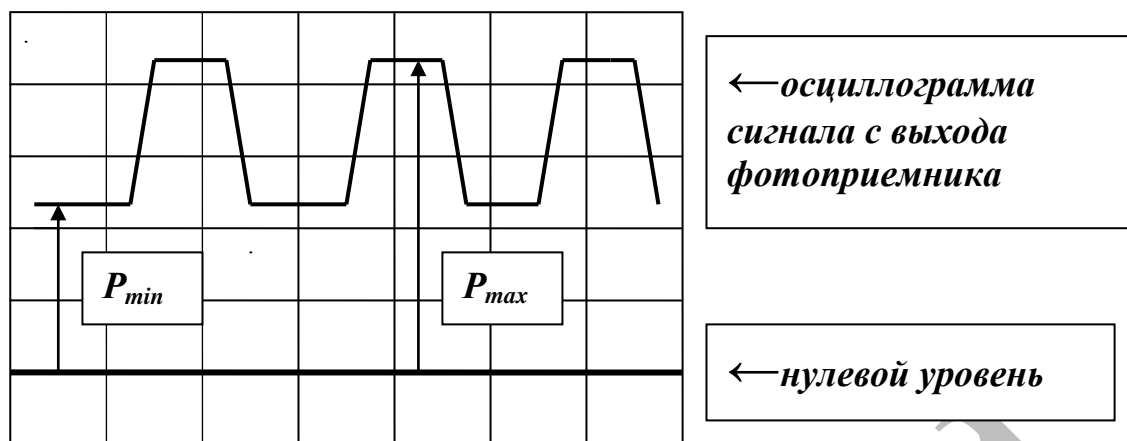


Рис. ЛЗ.3 Измерение коэффициента модуляции по осциллограмме

13. По экспериментальным данным таблицы 5 вычислить значение коэффициента модуляции по формуле:

$$m = (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min}).$$

14. По данным таблицы 4 построить зависимость коэффициента модуляции m от тока I_0 .

15. Исследовать зависимость глубины модуляции лазерного излучения импульсным сигналом от напряжения смещения на фотодиоде $U_{\text{см}}$. Для этого выполнить следующие операции:

-установить значение тока I_0 , равное пороговому с помощью потенциометра « I_0 » на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала»;

-установить значение амплитуды модулирующего тока $I_1 = 20\text{мА}$ с помощью потенциометра « I_1 » регулировки амплитуды модулирующего тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала»;

-установить ручку потенциометра «Регулировка смещения» на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» в крайнее положение против часовой стрелки;

-по наблюдаемой на экране осциллограмме произвести отсчет величин P_{\min} и P_{\max} (рис.ЛЗ.3), которые соответствуют минимальному и максимальному уровням фиксируемого фотодиодом сигнала;

-данные измерений занести в таблицу 5;

-изменяя $U_{\text{см}}$ от минимально возможного (соответствующего повороту ручек потенциометров «грубо», «точно» в крайнее положение против часовой стрелки) до 5 V с шагом, указанным преподавателем, произвести измерение величин P_{\min} и P_{\max} (рис.5) для всех значений $U_{\text{см}}$. Данные измерений занести в таблицу 5.

Таблица 5. Зависимость коэффициента модуляции от напряжения смещения $U_{\text{см}}$

$U_{см}$ (V)				
P_{min} (ММ)				
P_{max} (ММ)				
M				

13. По экспериментальным данным таблицы 5 вычислить значение коэффициента модуляции по формуле, приведенной в пункте 13.

14. По данным таблицы 5 построить зависимость коэффициента модуляции m от напряжения смещения на фотодиоде $U_{см}$.

15. Установить значение величин I_0 и I_1 заданных преподавателем. С помощью регулировки вертикального положения сигнала 1 канала (\updownarrow) вывести сигнал модуляции на экран. Органы регулировки положения сигнала на втором канале должны при этом оставаться в исходном положении, чтобы не изменилось положение нулевого отсчетного уровня. Зарисуйте осциллограммы модулирующего сигнала, наблюдаемого по первому каналу, и принимаемого фотоприемником сигнала наблюдаемого по второму каналу. На осциллограмме отметить положение нулевого уровня.

16. Переключите коаксиальный кабель от гнезда «КТ3» к гнезду «КТ2». При этом на экране наблюдается осциллограмма тока накачки, протекающего через лазерный диод. Зарисуйте осциллограмму тока накачки, наблюдаемую по первому каналу,

17. После проведения измерений:

-ручки всех потенциометров на лицевых панелях обоих электронных блоков установить в крайнее положение против часовой стрелки;

-выключить тумблеры «сеть» на обоих электронных блоках.

Контрольные вопросы

1. Что такое интенсивность оптического излучения?
2. Какой вид модуляции применяется в ЦСС и почему?
3. По какому закону осуществляется модуляция интенсивности оптического излучения?
4. Достоинства и недостатки модуляции интенсивности оптического излучения?
5. Объясните зависимости коэффициента модуляции интенсивности лазерного диода от положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике и коэффициента модуляции интенсивности лазерного диода от напряжения смещения фотодиода.

Лабораторная работа №4. «Моделирование формы сигнала на приемном конце реальной оптической линии связи»

Цель работы:

- расчет реальных параметров оптического сигнала по заданным характеристикам линии связи;
- моделирование на лабораторной установке формы реального сигнала в линии на основании проведенных расчетов.

Порядок выполнения работы.

Внимание! Перед каждым использованием в измерениях волоконных шнуров необходимо снять защитные колпачки с их торцов. После окончания работы с волоконным шнуром обязательно установить на его торцы снятые защитные колпачки. Перед каждым использованием в измерениях оптического тестера «Алмаз 33» необходимо отвернуть защитный колпачок с торца его коннектора и немедленно соединить его с коннектором волоконного шнура. После окончания измерения обязательно установить защитный колпачок на прежнее место.

1. Исходными данными для моделирования сигнала являются задаваемые преподавателем параметрам оптической линии связи:

- длине линии L (км);
- типу световода (ММ или SM);
- коэффициенту затухания световода α (дБ/км);
- коэффициенту дисперсии τ (псек/км) для многомодового световода или τ (псек/км·нм) для одномодового световода;
- ширине спектральной линии лазерного диода $\Delta\lambda$ (нм) для одномодового световода;
- скорости передачи V (мБит/сек).

Значения этих параметров следует выбирать с учетом типа моделируемой линии и используемых для соединений световодов.

2. Рассчитать дисперсионное уширение оптического импульса Δt на приемном конце линии связи. Для многомодовой линии связи величина Δt определяется соотношением:

$$\Delta t(\text{псек}) = \tau(\text{псек/км}) L(\text{км}),$$

а для одномодовой – соотношением:

$$\Delta t(\text{псек}) = \tau(\text{псек/км нм}) \Delta\lambda (\text{нм}) L(\text{км}).$$

3. Рассчитать затухание в моделируемой линии, используя соотношение:

$$A (\text{дБ}) = \alpha (\text{дБ/км}) L (\text{км}).$$

4. Рассчитать величину шумовой составляющей напряжения на нагрузке усилителя фототока. Моделирование сигнала осуществляется в предположении, что шумы на приемной стороне определяются среднеквадратичным значением шумовой составляющей фототока $I_{\text{шф}}$:

$$(I_{\text{шф}})^2 = 2e P_{\text{ср}} S \Delta f$$

и среднеквадратичным значением шумовой составляющей темнового тока $I_{шт}$

$$(I_{шт})^2 = 2e I_T \Delta f.$$

Здесь:

- P_{cp} - среднее значение (постоянная составляющая) оптической мощности на входе ФД, которое при любом способе модуляции отлично от нуля;

- S - значение спектральной чувствительности фотодиода, вычисленное в пункте 10 предыдущего раздела;

- I_T – паспортное значение темнового тока фотодиода соответствующее напряжению смещения на фотодиоде $U_{см} = 5V$: $I_T = 10^{-9} A$;

- e – заряд электрона: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кул;

- Δf – полоса частот, занимаемая передаваемым по линии сигналом $\Delta f = 2B$.

Амплитуда шумовой составляющей напряжения на нагрузке усилителя, определяется соотношением:

$$U_{ш} = K_T (\sqrt{(I_{шф})^2 + (I_{шт})^2})$$

Величина K_T коэффициент пропорциональности между током на входе усилителя и напряжением на его нагрузке: $K_T \approx 2000$.

5. Установите в исходное положение органы управления электронного блока «Источник оптического сигнала»:

- ручки потенциометров « I_0 », « I_1 » регулировки токов – в крайнее положение против часовой стрелки;

- кнопочные переключатели «Дисперсия», «Шум» – отжаты;

- кнопочный переключатель включения импульсной модуляции «Модуляция» - нажат;

- кнопочный переключатель включения аналоговой модуляции «Модуляция» - отжат;

- ручки потенциометров «Модуляция», «Дисперсия», «Шум» - в крайнее положение против часовой стрелки;

- включить тумблер «Сеть». При этом загорается его подсветка;

- кнопочный переключатель «выбор источника» - в положении, соответствующем включению лазера, излучающего на выбранной длине волны 1,3 или 1,5 мкм. При этом над соответствующей оптической розеткой загорается контрольный световод.

6. Установите органы управления электронного блока «Фотоприемник» в исходное положение:

- ручку потенциометра «Регулировка смещения» регулировки напряжения смещения – в крайнее положение против часовой стрелки;

- кнопочный переключатель «Уст. нуля» - отжать;

- кнопочный переключатель «Чувствительность» – в положение 1;

- включить тумблер «сеть». При этом загорается его подсветка.

- ручкой потенциометра «Регулировка смещения» установить заданное преподавателем его значение по прибору на лицевой панели.

7. Соединить с помощью волоконного шнура (одномодового или многомодового в зависимости от типа моделируемой линии) оптический выход

электронного блока «Источник оптического сигнала» со входом измерителя оптической мощности «Алмаз 33» (рис.Л4.1). Включить его в режим измерения абсолютного значения мощности (W). В данном разделе на вход измерителя будет поступать модулированный сигнал. Поэтому показания измерителя соответствуют среднему значению мощности оптического сигнала.

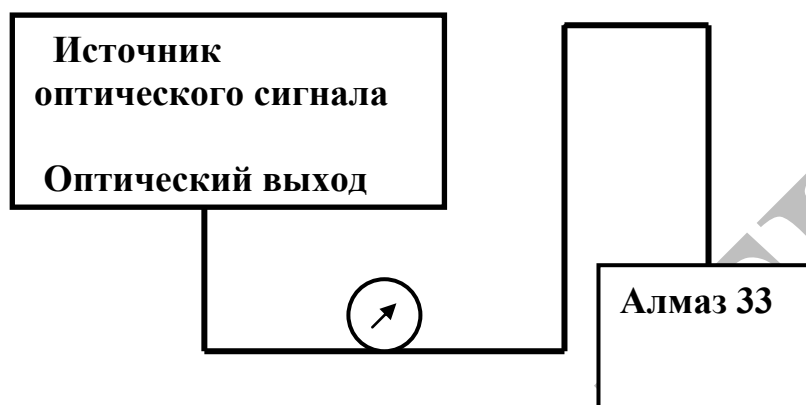


Рис. Л4.1

8. Установить значение тока I_0 , равное пороговому с помощью потенциометра « I_0 » на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала».

9. Плавно увеличивая значение амплитуды модулирующего тока I_1 с помощью потенциометров « I_1 » на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» добиться максимально возможного значения средней мощности излучаемого лазерным диодом сигнала. Контроль среднего значения мощности осуществляется с помощью измерителя оптической мощности «Алмаз 33». Зафиксировать полученное значение мощности.

10. Переключить измеритель в режим измерения затухания (дБ). Установить нулевой отсчет на экране его дисплея, нажав кнопку ($\rightarrow 0 \leftarrow$) на лицевой панели.

11. Отсоединить волоконный шнур от измерителя оптической мощности «Алмаз 33» и соединить его со входом переменного аттенюатора 15 дБ. Он расположен на плате 6 (рис.2.1). Выход аттенюатора с помощью волоконного шнура соединить со входной розеткой нормализующей катушки (одномодовой или многомодовой в зависимости от типа моделируемой линии). измерителя оптической мощности. Нормализующая катушка расположена на плате 5 (одномодовая) или 7 (многомодовая) (рис.2.1).

12. Выходную розетку нормализующей катушки с помощью переходного волоконного шнура (одномодового или многомодового в зависимости от типа моделируемой линии) соединить с одной из розеток коммутационной коробки (верхний ряд розеток – для одномодовых световодов, нижний – для многомодовых).

13. С помощью переходного волоконного шнура (одномодового или многомодового в зависимости от типа моделируемой линии) попеременно соединять выходные розетки коммутационной коробки, расположенной с противоположной стороны макета со входом измерителя оптической мощности «Алмаз 33». Соединения производить до тех пор, пока не будет зафиксировано наличие оптической мощности на одной из розеток. Следует учесть, что из четырех световодов оптического кабеля с помощью сварки соединены только три. Поэтому в одном случае из четырех ни на одной из выходных розеток оптическая мощность не фиксируется. В этом случае следует соединить выходную розетку нормализующей катушки с любой другой розеткой нормализующей катушки из того же ряда.

14. Вращая регулировочную гайку аттенюатора установить по дисплею измерителя оптической мощности затухание аттенюатора, соответствующее вычисленному в пункте 3. При необходимости следует включить в оптическую схему фиксированный аттенюатор 20дБ (одномодовый или многомодовый в соответствии с моделируемой линией). Он расположен на плате 6.

15. Отсоединить переходной волоконный шнур от измерителя оптической мощности «Алмаз 33» и соединить его с оптическим входом фотоприемника.

16. С помощью коаксиальных кабелей, входящих в состав лабораторного макета выполнить следующие соединения:

-гнездо «кт 3» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» соединить со входом первого канала осциллографа;

-гнездо «синхронизация осциллографа» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» соединить со входом канала синхронизации осциллографа;

-гнездо «выход усилителя» на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» соединить со входом второго канала осциллографа.

17. Включить питание осциллографа. Установить переключатели входов обоих каналов в положение (=) – открытый вход для обеспечения наблюдения сигналов с постоянной составляющей. После прогрева на экране осциллографа появляются осциллограммы модулирующего (первый канал) и принимаемого фотоприемником (второй канал) сигналов. С помощью органов управления осциллографа добиться их устойчивого изображения. При необходимости откорректировать изображение линий с помощью изменения яркости, фокусировки и центровки изображения по вертикали и горизонтали.

18. Установить определенное в пункте 2 дисперсионное уширение импульса Δt . Для этого выполните следующие операции:

-измерить длительность импульса T (мм) по линейной шкале на экране осциллографа;

-вычислить уширение импульса ΔT (мм) из соотношения:

$$\Delta T(\text{мм}) = T(\text{мм}) (\Delta t \cdot 2 \text{ В});$$

-нажать кнопочный переключатель «Дисперсия» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала»;

-вращая ручку потенциометра «Дисперсия» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» установить требуемое

уширение импульса ΔT (мм) по экрану осциллографа. Для этого может быть использован любой из наблюдаемых сигналов.

19. Установить амплитудное значение шумовой составляющей напряжения на нагрузке усилителя, определенное в пункте 4. Для этого выполнить следующие операции:

- зафиксировать по экрану осциллографа амплитудное значение сигнала наблюдаемого на первом канале осциллографа (сигнал с выхода фотоприемника);

- повернуть ручку потенциометра «Модуляция» с индексом импульсная модуляция против часовой стрелки до упора. При этом на экране осциллографа будет наблюдаться прямая линия по обоим каналам;

- включить генератор шума, нажав кнопочный переключатель «Шум» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала»;

- вращая ручку потенциометра «Шум» установить по сигналу наблюдаемому на первом канале осциллографа требуемый уровень шума;

- повернуть ручку потенциометра «Модуляция» с индексом импульсная модуляция по часовой стрелке и восстановить исходную амплитуду сигнала на выходе фотоприемника.

20. Сигнал наблюдаемый на первом канале соответствует смоделированному. Зарисовать его осциллограмму.

21. После проведения измерений:

- ручки всех потенциометров на лицевых панелях обоих электронных блоков установить в крайнее положение против часовой стрелки;

- выключить тумблеры «сеть» на обоих электронных блоках.

Контрольные вопросы

1. Что такое хроматическая дисперсия оптического волокна?

2. Как влияет хроматическая дисперсия на распространение оптического сигнала по ОВ?

3. В чем отличие влияния хроматической дисперсии на распространение оптического сигнала в ООВ и МОВ?

Лабораторная работа №5. «Исследование процессов аналоговой модуляции лазерного диода»

Цель работы:

- исследование процесса модуляции интенсивности лазерного диода и влияния на форму оптического сигнала положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике;

- исследование зависимости коэффициента модуляции интенсивности лазерного диода от положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике.

Внимание! Перед каждым использованием в измерениях волоконных шнуров необходимо снять защитные колпачки с их торцов. После

окончания работы с волоконным шнуром обязательно установить на его торцы снятые защитные колпачки. Перед каждым использованием в измерениях оптического тестера «Алмаз 33» необходимо отвернуть защитный колпачок с торца его коннектора и немедленно соединить его с коннектором волоконного шнура. После окончания измерения обязательно установить защитный колпачок на прежнее место.

Порядок выполнения работы.

1. По указанию преподавателя соедините оптический выход электронного блока «Источник оптического сигнала» с оптическим входом электронного блока «Фотоприемник» с помощью одномодового (желтый цвет защитной оболочки) или многомодового (оранжевый цвет защитной оболочки) волоконного шнура.

2. Установите в исходное положение органы управления электронного блока «Источник оптического сигнала»:

-ручки потенциометров « I_0 », « I_1 » регулировки токов– в крайнее положение против часовой стрелки;

-кнопочные переключатели «Дисперсия», «Шум» – отжаты;

-кнопочный переключатель включения импульсной модуляции «Модуляция» - отжат;

-кнопочный переключатель включения аналоговой модуляции «Модуляция» - нажат;

-ручки потенциометров «Модуляция», «Дисперсия», «Шум» - в крайнее положение против часовой стрелки;

-включить тумблер «Сеть». При этом загорается его подсветка;

-кнопочный переключатель «выбор источника» - в положении, соответствующем включению лазера, излучающего на выбранной длине волны 1,3 или 1,5 мкм. При этом над соответствующей оптической розеткой загорается контрольный световод.

3. Установите органы управления электронного блока «Фотоприемник» в исходное положение:

-ручку потенциометра «Регулировка смещения» регулировки напряжения смещения– в крайнее положение против часовой стрелки;

-кнопочный переключатель «Уст. нуля» - отжать;

-кнопочный переключатель «Чувствительность» – в положение 1;

-включить тумблер «сеть». При этом загорается его подсветка.

-ручкой потенциометра «Регулировка смещения» установить заданное преподавателем его значение по прибору на лицевой панели.

4. С помощью коаксиальных кабелей, входящих в состав лабораторного макета выполните следующие соединения:

-гнездо «кт 3» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» соедините со входом первого канала осциллографа;

-гнездо «синхронизация осциллографа» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» соедините со входом канала синхронизации осциллографа;

-гнездо «Выход усилителя» на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» соедините со входом второго канала осциллографа.

5. Включите питание осциллографа. Установите переключатели входов обоих каналов в положение (=) – открытый вход для обеспечения наблюдения сигналов с постоянной составляющей. После прогрева на экране осциллографа появляются две горизонтальные линии развертки, соответствующие двум его каналам. При необходимости откорректируйте изображение линий с помощью изменения яркости, фокусировки и центровки изображения по вертикали и горизонтали.

6. С помощью потенциометра « I_0 » регулировки тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» установить текущее его значение $I_0 = 10\text{mA}$.

7. Установить на экране осциллографа нулевую отсчетную линию для сигнала на втором канале осциллографа. Она соответствует нулевому току фотодиода. Для этого выполнить следующие операции:

-проверить установку ручки потенциометра «Модуляция», на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» в крайнее положение против часовой стрелки. При этом амплитуда модулирующего сигнала равна нулю – модуляция отсутствует;

-на лицевой панели электронного блока «Фотоприемник» кнопочный переключатель «Уст. нуля» включения калибровки фотоприемника – нажать. При этом вход усилителя фототока соединяется с землей, что соответствует нулевому значению тока фотодиода.

-на экране осциллографа наблюдается прямая линия. С помощью регулировки вертикального положения сигнала 2 канала (\updownarrow) переместить ее в положение, совпадающее с нижней линией градуировочной сетки, нанесенной на экране осциллографа. Следует запомнить положение отсчетной линии на экране;

-нажать кнопочный переключатель «Уст. нуля» включения калибровки фотоприемника – при этом линия, соответствующая сигналу на втором канале осциллографа переместиться вверх. В данном случае положение отсчетной линии определяется темновым током фотодиода I_T и постоянным уровнем излучения лазерного диода, который определяется током $I_0 = 10\text{mA}$.

8. Вращая по часовой стрелке ручку потенциометра «Модуляция» (с индексом аналоговая модуляция, расположенный во втором ряду) на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» добиться появления синусоидальных сигналов на первом и втором каналах осциллографа. Установить максимальную амплитуду аналогового сигнала, повернув ручку потенциометра до упора. По первому каналу наблюдается модулирующий сигнал, по второму – сигнал с выхода фотоприемника. Зарисовать осциллограммы сигналов. Для сигнала с выхода фотоприемника (второй канал) обязательно отметить нулевой уровень.

9. Уменьшая с помощью потенциометра « I_0 » регулировки тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» его значение, добиться появления искажений сигнала на выходе фотоприемника.

Зарисовать осциллограммы сигналов с отметкой нулевого уровня для сигнала с выхода фотоприемника.

10. Для удобства дальнейших измерений с помощью регулировки вертикального положения сигнала 1 канала (\updownarrow) переместить его за пределы экрана. На экране наблюдается сигнал 2 канала, поступающий с выхода электронного блока «Фотоприемник».

11. Исследовать зависимость глубины модуляции лазерного излучения аналоговым синусоидальным сигналом от величины тока I_0 . Для этого выполнить следующие операции:

- с помощью потенциометров « I_0 » регулировки тока на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» установить текущее его значение;

-откорректировать амплитуду модулирующего сигнала, вращая ручку потенциометра «Модуляция» на лицевой панели электронного блока «Источник оптического сигнала» так, чтобы не возникали искажения формы сигнала на выходе фотоприемника;

-по наблюдаемой на экране осциллограмме произвести отсчет величин P_{\min} и P_{\max} , которые соответствуют минимальному и максимальному уровням фиксируемого фотодиодом сигнала;

-данные измерений занести в таблицу 4;

-повторить измерения для всех значений I_0 , указанных преподавателем.

Таблица 5. Зависимость коэффициента модуляции от тока I_0

I_0 (мА)				
P_{\min} (мм)				
P_{\max} (мм)				
M				

12. По экспериментальным данным таблицы 5 вычислить значение коэффициента модуляции по формуле:

$$m = (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min}).$$

По данным таблицы 4 построить зависимость коэффициента модуляции m от тока I_0 .

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие модуляции интенсивности оптического излучения при передаче цифровых и аналоговых сигналов?
2. Как влияет на форму оптического сигнала положение рабочей точки на ватт - амперной характеристике лазерного диода?
3. Как зависит коэффициент модуляции интенсивности лазерного диода от положения рабочей точки на ватт-амперной характеристике.
4. Как зависит коэффициент модуляции интенсивности от тока накачки лазерного диода?