

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

**Кафедра Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

Метрология в оптических телекоммуникационных системах

**ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНОГО
УСТРОЙСТВА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе для бакалавров, направления 210700.62
"Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль
"Оптические системы и сети связи"

2014

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

(ТУСУР)

**Кафедра СВЧвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. СВЧиКР

_____ Шарангович С.Н.
“ _____ ” _____ 2014г.

Метрология в оптических телекоммуникационных системах

**ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНОГО
УСТРОЙСТВА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе для бакалавров, направления 210700.62
"Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль
"Оптические системы и сети связи"

Разработчики:

доцент кафедры СВЧиКР
_____ Г.Г. Куш

проф.кафедры СВЧиКР
_____ А.Е. Мандель

2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	4
2. Фотоприемные преобразователи.....	4
3. Основные параметры и характеристики ФПУ.....	9
4. Описание экспериментальной установки	15
5. Порядок выполнения работы	16
6. Содержание отчета	17
7. Контрольные вопросы	17
Список литературы	

Цель работы: Ознакомление студентов с основными методами измерений параметров и характеристик фотоприемных устройств, используемых в волоконно-оптических системах передачи.

1. Введение

Фотоприемное устройство (ФПУ) является составной частью линейного тракта ВОСП и входит в состав оконечных, промежуточных, обслуживаемых и необслуживаемых усилительных и генерационных пунктов. В ФПУ происходит преобразование оптического сигнала в электрический сигнал и его усиление. При необходимости в ФПУ могут быть включены схемы обработки сигнала, позволяющие получить параметры сигнала, при которых аппаратура, подключенная к выходу ФПУ, может нормально функционировать.

Лабораторная работа «Изучение характеристик фотоприемного устройства» поясняет и закрепляет теоретический материал об измеряемых параметрах и характеристиках фотоприемного устройства (ФПУ), используемого в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП).

2. Фотоприемные преобразователи

Преобразование оптического сигнала в электрический в ФПУ осуществляется фотоэлектрическим полупроводниковым приемником излучения. Усиление, необходимое для восстановления уровня сигнала и достижения максимально возможного при данных условиях отношения сигнала к шуму, обеспечивает усилитель, входящий в состав ФПУ.

Из множества фотоприемных преобразователей (ФП) излучения наибольшее распространение в ВОСП получили быстродействующие р-і-п-фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). Они хорошо стыкуются со световодом, имеют высокую квантовую эффективность, позволяют получать малое время фотоотклика. В основе работы фотопремников обоих типов лежит обратный смещенный р-п переход.

На рисунке 2.1 показаны простейшая структура фотодиода с р-п-переходом и соответствующая ей зонная диаграмма, построенная при отсутствии напряжения смещения на фотодиоде.

Предположим, что световое излучение проникает как в р-, так и в п-области. Под действием света в областях базы (р), коллектора(п), а также р-п-перехода появляются пары электрон-дырка. Носители заряда диффундируют к р-п-переходу и разделяются его электрическим полем. Электроны попадают в п-область, дырки - в р-область. При этом они несколько уменьшают нескомпенсированные заряды ионов акцепторов и доноров вблизи перехода. Уменьшается высота потенциального барьера

между р- и n-областями, возникает фотоЭДС. Режим работы фотодиода без внешнего источника напряжения называется фотогальваническим.

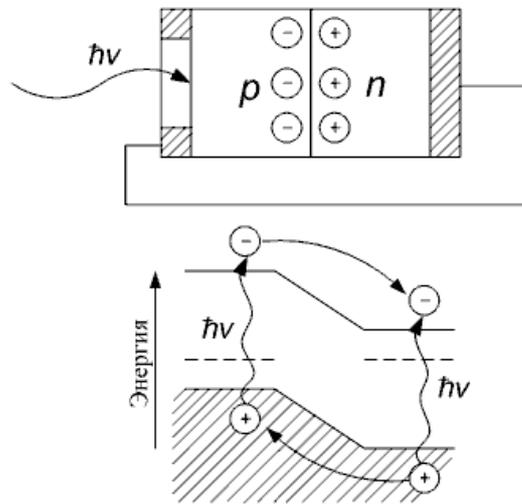


Рисунок 2.1 Структура р-n фотодиода

В фотодиодном режиме полярность питающего напряжения соответствует обратному включению р-n-перехода. При обратном напряжении смещения величина потенциального барьера увеличивается, возрастает напряженность электрического поля в переходе. Контактная разность потенциалов препятствует уходу основных носителей из «своей» области. В тоже время она способствует уходу в другую область неосновных носителей. Под действием света изменяется концентрация неосновных носителей слева и справа от перехода, Соответственно, изменяется и обратный ток диода.

В р-і-n-фотодиодах между областями с проводимостями р- и n- типов расположен слой і с собственной проводимостью. Структура р-і-n-фотодиода приведена на рис.2.2. Обозначения р⁺ и n⁺ на рис.2.2 соответствуют применению повышенной по сравнению р- и n- областями концентрации легирующих примесей. К диоду прикладывается напряжение обратного смещения. Световое излучение вводится через окно в контакте базы (Б). Электрод, противоположный базе называется коллектором (К). Напряженность электрического поля базы и коллектора, обладающих высокой электропроводностью, близка к нулю.

Буквой ν и π на рис.2.2 отмечен малолегируемый і-слой, где имеется остаточный фон донорной (ν) или акцепторной π примеси.

Электрическое поле сосредоточено в области пространственного заряда (ОПЗ), большая часть которой находится в полупроводнике с

меньшей концентрацией примеси, т.е. в i -слое. Большая часть светового излучения поглощается в i -слое. Образованные действием света носители заряда в этом слое разделяются электрическим полем, не успевая рекомбинировать, что приводит к появлению фототока.

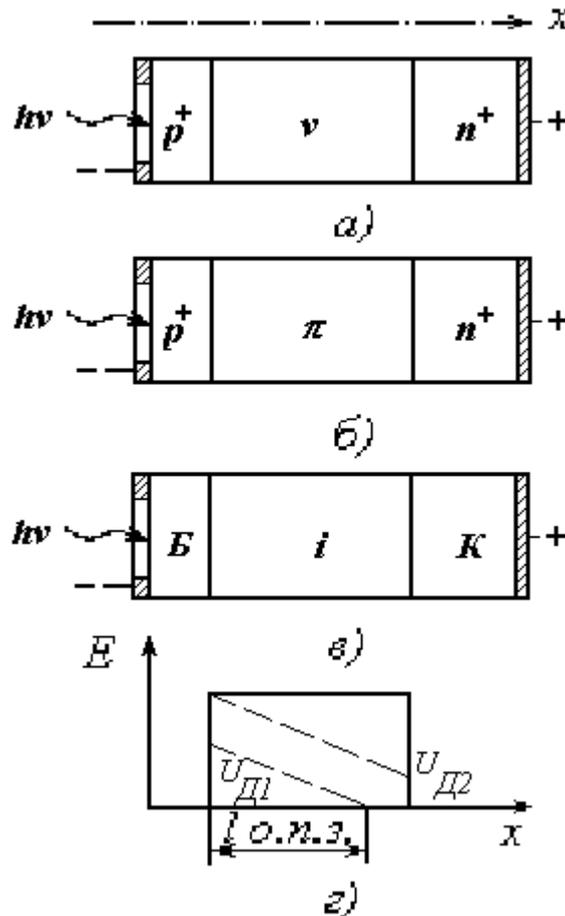


Рисунок 2.2 Структура p-i-n фотодиода

На быстродействие диода оказывают влияние процессы в базе, i -слое, коллекторе, а также параметры электрической эквивалентной схемы фотодиода.

Носители, генерированные светом в базе, диффундируют в сторону перехода, где они разделяются электрическим полем. Задержка появления импульса фототока, связанного с поглощением фотона в базе, определяется временем диффузии неосновного носителя от места его рождения до границы ОПЗ. Время диффузии зависит от расстояния между местом появления фотоносителя и переходом. С ростом расстояния происходит не только увеличение по ансамблю носителей времени задержки, но и дисперсии этого времени. Величина дисперсии непосредственно влияет на быстродействие прибора. С ростом дисперсии

времени задержки увеличивается время нарастания импульса фототока. Поскольку дисперсия и среднее время пролета в базе связаны друг с другом можно говорить о влиянии среднего времени диффузии на частотные свойства. Время диффузии в базе определяется формулой $\tau_b = L_b^2/2D_n$ где L_b – толщина базы, D_n – коэффициент диффузии неосновных носителей.

На быстродействие и частотные свойства влияет также поглощение света в коллекторе. Носители, генерированные светом, начинают диффундировать к ОПЗ, где и разделяются электрическим полем. Время диффузии в коллекторе определяется формулой $\tau_k = L_k^2/2D_n$ где L_k – толщина базы, D_n – коэффициент диффузии неосновных носителей. Это выражение справедливо для случая тонкого коллектора. Поглощение света в коллекторе, а также в i - области за пределами ОПЗ, приводит к появлению медленно изменяющейся составляющей фототока. Для увеличения быстродействия прибора надо исключить поглощение света в этих областях.

В лавинных фотодиодах (ЛФД) усиление первичного фототока достигается за счет лавинного умножения числа носителей заряда. Если носители электрических зарядов обладают достаточно большой кинетической энергией, то при неупругом соударении с нейтральными атомами кристаллической решетки происходит ионизация атомов, возникают новые пары электрон-дырка. Минимальная энергия, необходимая для ионизации, связана с шириной запрещенной зоны. Процесс умножения числа носителей характеризуется коэффициентами ионизации α_n и α_p . Первый относится к электронам, второй - к дыркам. Коэффициент ионизации показывает какое число пар электрон-дырка, в среднем, создает данный носитель на единице длины пути. Коэффициенты ионизации существенно зависят от напряженности электрического поля E . В первом приближении можно считать, что коэффициенты ионизации пропорциональны E в степени от 3 до 9 для разных материалов и направлений поля.

Простейшая структура ЛФД представляет собой резкий $p+$ – n -переход. Необходимая напряженность электрического поля достигается в узкой области перехода при относительно малых напряжениях смещения. Высокое быстродействие прибора будет достигнуто, если основная часть света поглощается в слое, где существует электрическое поле. В данной структуре, обладающей малой толщиной ОПЗ, поглощение света и умножение носителей пространственно совмещаются.

В ВОСП наряду с простейшими используются более сложные структуры с разделенными областями поглощения света и умножения, называемые ЛФД с проникновением поля.

На рисунке 2.3а и 2.3б показаны структуры ЛФД с проникновением поля. На рисунке 2.3в представлена обобщенная схема этих структур.

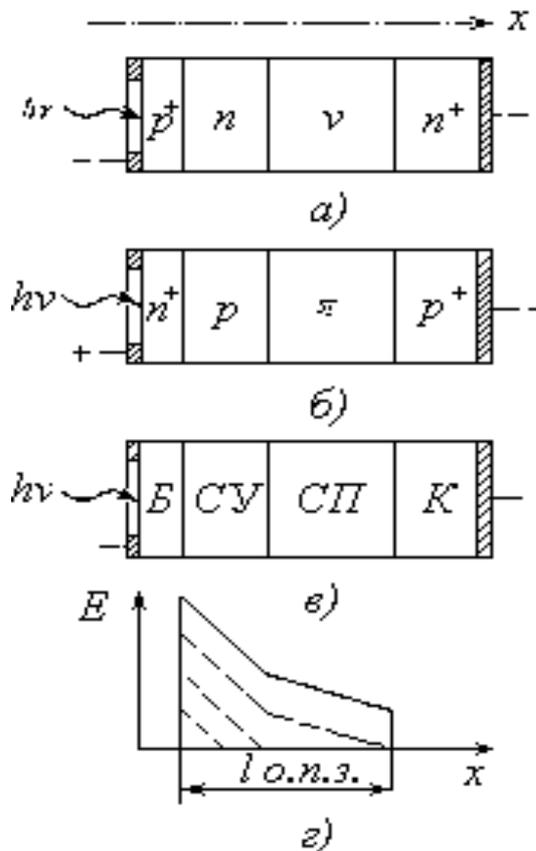


Рисунок 2.3 Структура ЛФД

Свет проходит через тонкую базу (Б), слой умножения (СУ) и попадает в слой поглощения (СП). Последний имеет большую толщину, здесь поглощается основная часть света. Максимум напряженности электрического поля находится на границе базы и слоя умножения (рис.2.3г). При изменении напряжения смещения на диоде изменяется характер распределения поля.

Рабочему режиму диода соответствует распределение поля, показанное сплошной линией. Напряженность поля в СУ превышает пороговое значение, необходимое для возникновения лавины. Электрическое поле проникает в i -й слой, обеспечивая высокие скорости дрейфа носителей. Область пространственного заряда занимает все пространство от базы (Б) до коллектора (К). Под действием света в СП происходит генерация носителей, которые разделяются электрическим полем. Неосновные носители (дырки на рис. 2.3а, электроны на рис. 2.3б) движутся в направлении, противоположном оси x , и инжектируют в СУ, где и происходит усиление первичного фототока.

Структура ЛФД совмещает в себе свойства pin и обычного лавинного фотодиода, позволяя получать значительное усиление фототока

при сохранении высокой квантовой эффективности и быстродействия. Основные ограничения быстродействия ЛФД остаются такими же, как и в p-i-n- фотодиодах. К ним добавляются ограничения, определяемые процессом внутреннего усиления.

Для изготовления фотодиодов p-i-n-структуры обычно используют Si, Ge, GaAs, InAs и InGaAs. ЛФД изготавливают из Si, InGaAs, InGaAsP. Можно также изготавливать из германия, но темновой ток в германии намного больше, чем в кремнии, что создает высокие избыточные шумы.

По сравнению с p-i-n фотодиодом, ЛФД позволяет выиграть в пороге чувствительности, работает в меньшем диапазоне температур но требует повышенного напряжения питания. Спектральный диапазон прибора в основном определяется материалом. При использовании ЛФД в качестве фотодетектора можно изменять подаваемое на него напряжение обратного смещения и таким путем регулировать коэффициент лавинного умножения (усиления) фотодиода. Это позволяет существенно расширить динамический диапазон ФПУ, но требует наличия блока автоматической регулировки усиления (АРУ).

3. Основные параметры и характеристики ФПУ

Основными метрологическими параметрами приемников излучения являются чувствительность, уровень собственных шумов, порог чувствительности, соотношение сигнал / шум,.

Чувствительность представляет собой отношение изменения уровня сигнала на выходе приемника, вызванного падающим на него излучением, к количественной характеристике этого излучения, представленной любой энергетической или фотометрической величиной. Интегральная чувствительность - это чувствительность к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава. В тех случаях, когда рассматривается реакция приемника на монохроматическое излучение, говорят о монохроматической чувствительности. Для приемников ВОСП обычно указывается монохроматическая чувствительность по току S (В / Вт).

Шумы являются неотъемлемой составляющей практически любого электронного устройства, в том числе и ФПУ. Шум обусловлен случайными флуктуациями тока, которые возникают в любой электронной схеме или ее элементе в силу самой природы электричества и над которыми разработчик схемы не имеет никакого контроля. Эти флуктуации накладываются на любые сигналы, проходящие через цепь, и, таким образом, маскируют их.

Основными видами шумов, имеющих место в ФПУ являются следующие: дробовой, тепловой, генерационно-рекомбинационный, токовый, радиационный.

Дробовой шум определяется тем, что электрический ток является потоком дискретных частиц и зависит от их числа, которое флуктуирует во времени. Дисперсия его в полосе частот Δf выражается формулой:

$$\overline{U}_D^2 = 2 e I_0 R_n^2 \Delta f ,$$

где e – заряд электрона, I_0 – среднее значение тока, R_n – сопротивление нагрузки.

Тепловой шум вызывается хаотическим тепловым движением свободных электронов. Дисперсия его в полосе частот Δf выражается формулой:

$$\overline{U}_T^2 = 4 k T R \Delta f ,$$

где k – постоянная Больцмана, R – сопротивление приемника, T – его температура.

Генерационно-рекомбинационный шум фотоносителей определяется флуктуацией концентрации и времени жизни носителей заряда. На высоких частотах дисперсия шумового тока описывается формулой:

$$\overline{I}_r^2 = 4eI_0\Delta f [1 + (2\pi f\tau)^2]^{-1} \tau / t ,$$

где τ - время жизни носителей, t - время пролета, e -заряд электрона, f - текущая частота.

На низких частотах генерационно-рекомбинационный шум является белым.

Радиационный шум обусловлен флуктуациями падающего потока излучения на чувствительный слой. Это могут быть флуктуации числа фотонов как от внешних излучателей (фон), так и от элементов самого приемника.

Усилительные электронные приборы, такие как транзистор, имеют много источников шума, более сложных по своей природе. Уровень шумов транзистора зависит от его материала и конструкции, а также от характера смещения р-п - перехода.

Все перечисленные шумы являются составляющими собственных шумов ФПУ. Уровень собственного шума можно оценить по уровню флуктуации сигнала на выходе ФПУ при отсутствии полезного оптического сигнала на входе ФПУ.

Отношение сигнал-шум есть отношение максимального значения неискаженного полезного сигнала к уровню собственных шумов

$$K = \left| \frac{V}{V_{ш}} \right|.$$

К рассмотрению этого соотношения нужно подходить индивидуально в зависимости от имеющегося входного сигнала, шумовых характеристик фотоприемника и схемы усилительного устройства. Величина K определяет качество канала связи.

На практике отношение сигнал-шум ограничивается максимальным уровнем полезного сигнала, пришедшего на ФПУ, а также уровнем шума, превышающим теоретический из-за влияния различных паразитных наводок, плохой экранировки элементов и т.д.

Порог чувствительности - минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе ФПУ, при которой обеспечивается номинальное соотношение сигнал-шум для аналоговых ФПУ или номинальное выходное напряжение логических состояний для цифровых ФПУ.

Порог чувствительности, соответствующий приему гармонического колебания определяется формулой:

$$\bar{P}_0 = 4 \left(\frac{C}{Ш} \right) h\nu\Delta f / (\eta m_\Omega^2),$$

где $(C/Ш)$ – соотношение сигнал/шум, h – постоянная Планка, η - квантовая эффективность фотодетектора, m_Ω - коэффициент модуляции.

Измеряется порог чувствительности в ваттах или децибеллах по отношению к 1 мВт.

Основными характеристиками ФПУ являются характеристика преобразования, спектральная, частотная и переходная характеристики. Эти характеристики соответствуют номинальному электрическому режиму и постоянной температуре.

Спектральная характеристика отражает зависимость монохроматической чувствительности от длины волны регистрируемого потока излучения. Она может быть абсолютной и относительной. В первом случае по оси ординат откладывается абсолютная величина чувствительности (например, в В/Вт), во втором – относительная величина, отнесенная к максимуму спектральной чувствительности.

Характеристика преобразования отражает зависимость фотоответа от интенсивности возбуждающего излучения. Характеристикой преобразования называют зависимость интегральной или спектральной чувствительности фотоприемника от интенсивности засветки. Абсолютная спектральная чувствительность (коэффициент преобразования) не остается строго постоянным в широком рабочем диапазоне изменения входных оптических сигналов, то есть оптическому приемнику свойственна некоторая нелинейность. Характеристика преобразования изображена на рисунке 2.4.

Отклонение от линейности преобразования в ФП наступает либо при больших уровнях входного оптического сигнала, что связано с ограничением тока фотодиода сопротивлением нагрузки и внутренним сопротивлением при определенном напряжении питания, либо при очень малых уровнях входного сигнала, когда выходной сигнал становится сравнимым с шумами.

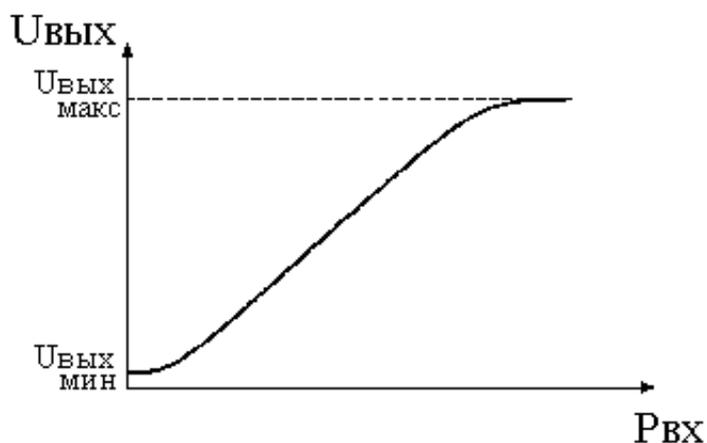


Рисунок 2.4 Характеристика преобразования

В реальных условиях электрический сигнал ФП оказывается малым для дальнейшей обработки или измерения. Поэтому в ВОСП применяются ФПУ, включающее в себя ФП и усилитель. В последнем случае верхний предел линейности может определяться как характеристиками усилителя, так и ФП, а нижний предел - характеристиками усилителя. У ФПУ может наблюдаться отклонение от линейности и внутри рабочего диапазона.

Нелинейность характеристики преобразования ФПУ может приводить к искажению сигналов в аналоговых ВОСП. Для цифровых систем эта характеристика существенного значения не имеет.

Другой не менее важной характеристикой ФПУ является частотная характеристика. Частотная характеристика представляет собой

зависимость интегральной чувствительности ФПУ от частоты гармонической модуляции потока излучения.

Для большинства практических приложений с достаточной точностью частотная (амплитудно-частотная) характеристика может быть описана характеристикой эквивалентного RC - звена:

$$U(f) = \frac{U_0}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}}},$$

где U_0 — напряжение фотосигнала на нулевой частоте, $\tau = 1/(2\pi f_0)$ — время фотоотклика, которое часто называют постоянной времени фотоприемника, f_0 — граничная частота (частота отсечки), определяемая из условия $U(f_0) = 0,707 U_0$.

Параметром τ иногда пользуются, чтобы описать реакцию фотоприемника на импульсное излучение. Если времена нарастания и спада оптических импульсов настолько малы, что импульсы можно представить как прямоугольные, то под τ понимают время, в течение которого фотосигнал успевает возрасти до 63%, т. е. в $(1 - 1/e)$ раз, от своего максимального значения.

При близкой к экспоненциальной переходной характеристике, f_0 и τ однозначно определяют инерционные свойства фотоприемника. Можно связать время нарастания τ от уровня 0.1 до уровня 0.9 выходного импульса с частотой отсечки f_0 выражением

$$\tau \cong \frac{0.35}{f_0},$$

где частоту отсечки f_0 часто принимают равной ширине полосы системы.

Для получения полной информации о частотной зависимости коэффициента преобразования ФПУ необходимо на вход ФП подавать сигналы в диапазоне частот от области, прилегающей к нулевой частоте до верхней граничной частоты ФПУ, которая может составлять единицы ГГц. При этом, для сохранения одного и того же уровня отсчета необходимо во всем диапазоне поддерживать постоянство глубины модуляции в оптическом сигнале и обеспечить постоянство амплитуды оптического сигнала в процессе измерений.

Типичная зависимость коэффициента преобразования фотоприемника от частоты приведена на рис.2.5.

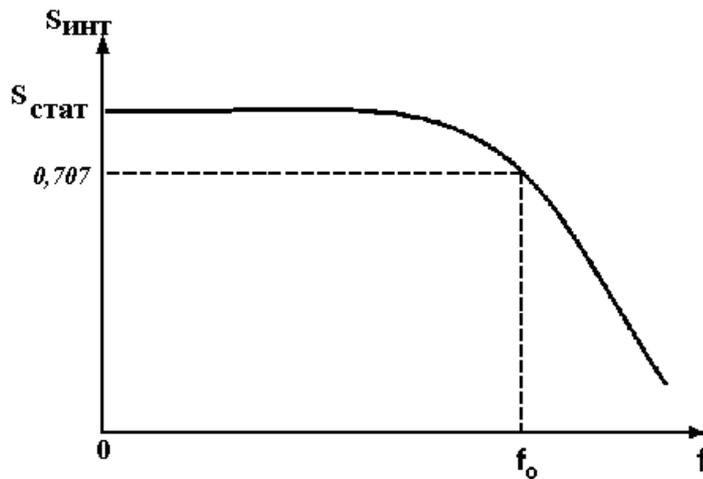


Рисунок 2.5 Частотная характеристика

Частота отсечки f_0 на рис.2.5 будет равна частоте, на которой интегральная чувствительность уменьшается в 0,707 раз по сравнению со своим статическим значением.

Частотная характеристика ФПУ определяется в основном верхней частотой отсечки ФП f_0 . Она может зависеть и от верхней граничной частоты усиления усилительной схемы, но, как правило, усилитель проектируется исходя из характеристик ФП таким образом, чтобы не оказывать влияния на частотную характеристику ФПУ.

4. Описание экспериментальной установки

Структурная схема экспериментальной установки изображена на рисунке 4.1.

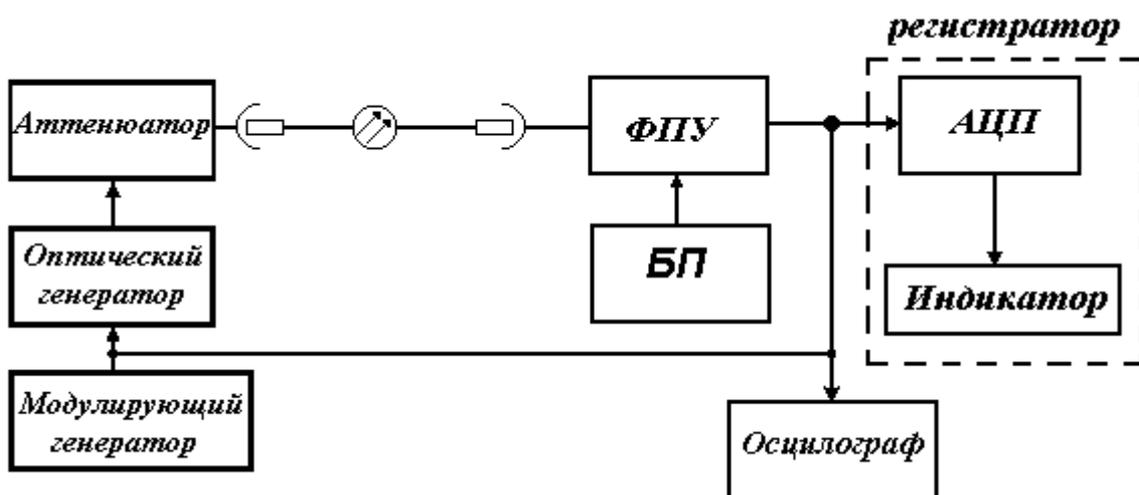


Рисунок 4.1 Структурная схема экспериментальной установки

Модулированный оптический сигнал с оптического генератора ОГ4-162 через перестраиваемый аттенюатор и волоконно-оптический кабель поступает в приемный оптический модуль, состоящий из фотодетектора и усилителя. Модуляция оптического сигнала осуществляется генератором высокочастотных сигналов Г4-102, сигнал с которого поступает непосредственно на светодиод оптического генератора. Электрический сигнал с выхода ФПУ поступает на один из входов двухлучевого осциллографа. На другой вход осциллографа поступает сигнал с ВЧ генератора. Осциллограф регистрирует амплитуду и форму выходного сигнала ФПУ. Одновременно позволяет визуальнo наблюдать за амплитудой и формой модулирующего ВЧ сигнала. Регистратор фиксирует изменения среднего уровня сигнала на выходе исследуемого ФПУ.

5. Порядок выполнения работы

5.1. Ознакомиться со схемой установки и устройством ФПУ. Ознакомиться с аппаратурой служащей для измерения характеристик ФПУ, а также другими элементами установки.

Включить источники питания и приборы в сеть ~220 В 50Гц. Время установления рабочего режима -10 минут.

5.2. Измерить характеристику преобразования ФПУ

Для измерения характеристики преобразования подать сигнал с оптического генератора через перестраиваемый аттенюатор и волоконно-оптический кабель на ФПУ. Ручкой настройки амплитуды выходного сигнала ВЧ генератора установить амплитуду модулирующего напряжения. Контроль амплитуды модулирующего напряжения осуществляется с помощью осциллографа. Частоту модулирующего напряжения на выходе генератора ВЧ установить в пределах 1 – 2 МГц.

Изменяя мощность выходного излучения оптического генератора аттенюатором снять зависимость мощности выходного сигнала ФПУ от мощности входного оптического сигнала. Измерения проводить при 8-10 значениях мощности входного оптического сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

	1	2	3	4	5	6	7	8
Лимб атт.								
Рвх								
Uвых								

Используя данные табл.5.1 построить график зависимости выходной мощности ФПУ $P_{\text{вых}}$ от входной мощности светового потока $P_{\text{вх}}$.

5.3. Измерить частотную характеристику ФПУ.

Подать на вход ФПУ модулируемый оптический сигнал. Изменяя частоту модуляции светового потока на входе ФПУ, регистрировать амплитуду выходного сигнала ФПУ на экране осциллографа. Для сохранения одного и того же уровня отсчета необходимо во всем диапазоне частот поддерживать постоянство глубины модуляции в оптическом сигнале и постоянство амплитуды оптического сигнала в процессе измерений.

Полученные данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2.

f, кГц								
U _{вых} , В								

По данным таблицы 5.2 построить частотную характеристику ФПУ и определить верхнюю граничную частоту по уровню 0,707 от статического значения характеристики.

5.4. Измерить уровень собственных шумов ФПУ.

Для измерения уровня собственных шумов ФПУ необходимо отключить оптическое волокно от входного разъема ФПУ и закрыть доступ светового потока в оптический вход ФП. Затем настроить осциллограф таким образом, чтобы шумовой сигнал на экране имел отчетливую форму. Измерить амплитуду шумового напряжения на экране осциллографа.

5.5. Измерить порог чувствительности ФПУ

Измерить минимальную среднюю мощность оптического сигнала на входе ФПУ, при которой обеспечивается соотношение сигнал-шум $C/\text{Ш} = 2$

Сравнить измеренное значение пороговой чувствительности с расчетной. Необходимое для расчета значение коэффициента амплитудной модуляции определить по индикатору оптического генератора.

6. Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

- цель работы;
- краткая теория;
- структурная схема экспериментальной установки;
- экспериментальные данные в соответствии с п. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5;
- выводы о проделанной работе.

7. Контрольные вопросы

1. Какие бывают типы фотоприемников, в чем их различия?
2. Какие основные характеристики ФПУ вы знаете?
3. Чем определяются нижний и верхний пределы характеристики преобразования?
4. Что такое верхняя частота отсечки, как она связана с полосой пропускания, чем определяется?
5. Чем определяется уровень собственных шумов ФПУ?
6. Чем определяется отношение сигнал-шум ФПУ?
7. Что такое порог чувствительности ФПУ, от чего он зависит?

Список литературы

1. Мандель А.Е. Методы и средства измерения в волоконно-оптических линиях связи [Электронный ресурс]: Уч. пособие. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2012. – 123 с. – Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/771>.
2. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи: научное издание.- М.: Эко-Трендз, 2006. - 268 с.
4. Ушаков В.Н и др. Оптические устройства в радиотехнике: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2005. -240 с.