

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И. Кузевных, М.М. Славникова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДИОДОВ

*Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
211000 Конструирование и технология электронных средств*

2014

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	3
2 Основные сведения о фотодиодах.....	4
2.1 Общие сведения о фотодиодах.....	4
2.2 Принципы реализации и функционирования, конструктивные особенности и основные свойства фотодиодов.....	5
2.2.1 Фотодиоды р-п-типа.....	5
2.2.2 Кремниевые р-і-п-фотодиоды.....	5
2.2.3 Фотодиоды с барьером Шоттки	6
2.2.4 Гетерофотодиоды.....	7
2.2.5 Сравнительный анализ фотоприемников	9
2.3 Конструкции некоторых типов фотодиодов.....	10
3 Основные параметры и характеристики фотодиодов.....	13
3.1 Вольтамперные характеристики.....	13
3.2 Энергетическая характеристика ФД.....	13
3.3 Спектральная характеристика.....	13
3.4 Интегральная чувствительность.....	15
3.5 Квантовая эффективность.....	15
3.6 Порог чувствительности.....	16
4 Описание лабораторной установки.....	17
5 Задание на выполнение лабораторной работы.....	20
6 Методика проведения экспериментальных исследований ФД.....	21
6.1 Подготовка лабораторной установки.....	21
6.2 Измерение прямой и обратной ВАХ фотодиода.....	22
6.3 Измерение напряжения фото-ЭДС и напряжения шума ФД.....	23
7 Контрольные вопросы для самопроверки.....	23
Рекомендуемая литература.....	23

1 ВВЕДЕНИЕ

Фотодиоды (ФД) относятся к одному из типов фотоприемников. *Фотоприемники* – это оптоэлектронные функциональные устройства, у которых под воздействием светового излучения существенно изменяются электрические параметры. Фотоприемники являются неотъемлемыми элементами большинства оптоэлектронных функциональных устройств: элементарных оптронов и оптронных функциональных устройств, волоконно-оптических линий связи и др. оптоэлектронных устройств. Они детектируют оптические сигналы, т.е. преобразуют оптические излучения, в которых закодирована определенная информация, в электрические колебания. Далее эти электрические сигналы усиливаются и обрабатываются соответствующим образом.

Существует большое разнообразие фотоприемников различного назначения, конструкций и принципов функционирования. В оптоэлектронике наиболее широкое применение получили *полупроводниковые* фотоприемники: фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и фоторезисторы. *Принцип функционирования их основан на использовании внутреннего фотоэффекта в твердых телах.* Поглощаемые полупроводником кванты излучения освобождают носители заряда либо с атомов решетки основного материала, либо с атомов примеси, что приводит к существенному увеличению электропроводности полупроводника. *Фотодиоды* – вентильные фотоэлементы, у которых в качестве контактирующих веществ используются полупроводники с различным типом проводимости. В качестве полупроводникового материала преимущественное применение получил кремний. Конструктивно ФД представляет собой полупроводниковый кристалл с *p-n*- или др. типом перехода, снабженный двумя металлическими выводами и смонтированный в защитный корпус. В зависимости от конструктивного исполнения и принципа функционирования ФД разделяют на следующие типы: фотодиоды с *p-n* переходом, *p-i-n*-фотодиоды, фотодиоды с барьером Шоттки, гетерофотодиоды и др.

Свойства фотоприемников оцениваются рядом параметров и характеристик. *Параметр* – это количественное выражение какого-либо физического свойства фотоприемника. Параметр может быть измерен непосредственно, или вычислен по данным измерений других величин. Под *характеристикой* понимается зависимость определенного параметра от какого-либо внешнего фактора. Фотоэлектрические параметры и характеристики ФД регламентированы ГОСТ 21934-83. К основным характеристикам ФД относятся: вольтамперная, спектральная и энергетическая. Электрофизические свойства ФД оцениваются параметрами: интегральной чувствительностью, квантовой эффективностью, порогом чувствительности, быстродействием, уровнем шумов и т.д.

Целью данной работы является:

- изучение принципов реализации, функционирования и основных свойств различных типов фотодиодов;
- экспериментальное исследование параметров и характеристик конкретного типа ФД.

2 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ФОТОДИОДАХ

2.1 Общие сведения о фотодиодах

Фотодиодом (ФД) называется полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от воздействующего на него оптического излучения [1].

Фотодиоды могут работать в двух режимах – фотодиодном и вентильном.

1) **Фотодиодный** режим основан на эффекте *фотопроводимости*, когда во внешнюю цепь ФД включается источник постоянного напряжения, создающий на *p-n* переходе *обратное смещение*. Под действием излучения в *p-n* переходе и в прилегающих к нему областях образуются носители заряда (электроны и дырки), которые под действием электрического поля дрейфуют и проходят через *p-n*-переход. Таким образом, под действием излучения увеличивается обратный ток ФД на величину фототока. При этом величина фототока в широких пределах зависит почти линейно от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от напряжения смещения. Следовательно, в фотодиодном режиме ФД можно рассматривать как *управляемый элемент тока от светового потока*.

2) **Вентильный** режим основан на *фотовольтаическом эффекте*, когда внешний источник отсутствует, а ФД используется как *генератор фотоэдс*. Фотовольтаический эффект заключается в том, что встроенное поле *p-n*-перехода пространственно разделяет генерируемые светом электроны и дырки и создает тем самым фотоэдс между смежными областями кристалла. Если к электродам, нанесенным на *p* и *n* слои, подключить нагрузку, то по ней потечет фототок.

Свойства фотодиодов оцениваются следующими **параметрами**:

- **спектральной чувствительностью** S_0 – отношением фототока к потоку падающего монохроматического излучения, A/Wm ;
- **порогом чувствительности** Φ_{II} – это величина минимального сигнала, регистрируемого фотодиодом, отнесенная к полосе рабочих частот, $Вт/Гц^{1/2}$;
- **быстродействием** (*инерционностью*) – временем установления фототока;
- **уровнем шумов**, $мкВ/В$.

Основной **характеристикой** фотодиодов является **спектральная характеристика** $S_0(\lambda)$ – зависимость спектральной чувствительности S_0 от длины волны облучающего потока λ (область спектральной чувствительности);

Диодные структуры составляют основу большинства разновидностей фотоприемников, используемых в оптоэлектронных функциональных устройствах. ФД обладают *наилучшим сочетанием фотоэлектрических свойств*:

- 1) высокой чувствительностью;
- 2) высоким быстродействием;
- 3) высоким обратным напряжением;
- 4) линейной зависимостью фототока в широком диапазоне изменения мощности облучения;

5) малыми значениями паразитных параметров.

Основным недостатком фотодиодов считается *отсутствие усиления* (по сравнению с фототранзисторами и фототиристорами). Однако этот недостаток можно считать весьма условным, так как при современной технологии ИС усилитель может быть легко встроен в схему фотоприемника. Реализация же фотоприемников на фототранзисторах и фототиристорах приводит к понижению быстродействия на несколько порядков (см таблицу 2.1).

Наиболее перспективными для использования в оптоэлектронных функциональных устройствах считаются: кремниевая *p-i-n*-структура, контакт металл-полупроводник (барьер Шоттки) и гетеропереходы ($t_{БКЛ} \sim 10^{-10} \dots 10^{-8} \text{ с}$).

2.2 Принципы реализации и функционирования, конструктивные особенности и основные свойства фотодиодов

2.2.1 Фотодиоды *p-n*-типа

Фотодиоды *p-n*-типа представляют собой обычные полупроводниковые диоды с *p-n* переходом, смещенным в обратном направлении, у которых предусмотрена возможность облучения световым потоком. При поглощении квантов света в *p-n* переходе и в прилегающих к нему областях кристалла полупроводника образуются новые (неравновесные) носители заряда (пары электрон-дырка), которые под действием внешнего электрического поля дрейфуют к *p-n* переходу и проходят через него, увеличивая обратный ток фотодиода. Этот ток называют *фототоком*.

Фотодиоды *p-n*-типа наиболее просты в реализации, но имеют, по сравнению с другими типами ФД, более низкие быстродействие и чувствительность (см таблицу 2.1).

2.2.2 Кремниевые *p-i-n*-фотодиоды

Структура кристалла *p-i-n*-фотодиода представлена на рисунке 2.1. Стандартный способ изготовления *p-i-n*-фотодиода состоит из следующих операций. На пластине из высокоомного кремния проводят эпитаксиальное выращивание низкоомного n^+ -слоя толщиной 30...50 мкм. Затем противоположную сторону структуры сошлифовывают до такой степени, чтобы *i*-область составляла 40...50 мкм и на ней создают тонкий (2...4 мкм) эпитаксиальный p^+ -слой. После этого верхнюю поверхность окисляют (слой SiO_2) и методом фотолитографии создают в нем окна под контакты к p^+ -слою. Снизу и в окнах контактов осаждают металлические контакты (*Al*, *Au*), разрезают пластину на кристаллы, зачищают боковые грани и заключают в стандартные корпуса.

Принцип функционирования p-i-n-фото-диода заключается в следующем. Облучающий поток свободно проходит через просветляющее покрытие SiO_2 и тонкую p^+ -структуру в *i*-область кристалла, где и происходит его поглощение и генерация электронов и дырок, которые, в свою очередь, устремляются к n^+ - и p^+ -областям. Даже при небольшом обратном смещении в *i*-области возникает

сильное электрическое поле, которое способствует ускорению дрейфа и рассасыванию электронов и дырок, что существенно увеличивает быстродействие и уменьшает потери на рекомбинацию.

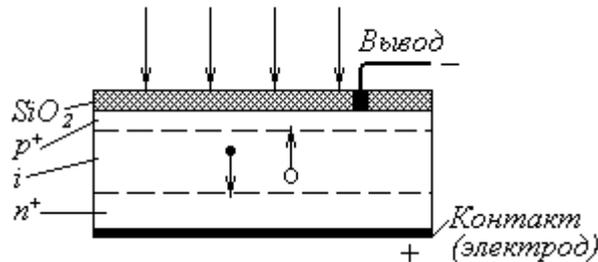


Рисунок 2.1 – Структура кристалла p-i-n-фотодиода

Достоинства p-i-n-фотодиодов:

- 1) сочетание высокой фоточувствительности и высокого быстродействия;
- 2) обеспечение высоких значений S_0 в длинноволновой области спектра, обусловленное возможностью использования широкой i -области;
- 3) малая барьерная емкость;
- 4) высокая эффективность при малых обратных напряжениях.

К недостаткам p-i-n-фотодиодов относятся:

- 1) низкий уровень фотоэдс в вентильном режиме ($U_{XX} \leq 0,35...0,45$ В), обусловленный малой высотой потенциального барьера;
- 2) низкая температурная и радиационная стойкость;
- 3) низкая воспроизводимость параметров фотодиодов;
- 4) несовместимость создания p-i-n-структур с технологией ИС.

2.2.3 Фотодиоды с барьером Шоттки

Барьер Шоттки – потенциальный барьер, образующийся в приконтактном слое полупроводника, граничащем с металлом, обусловленный разностью работы выхода электронов из металла и полупроводника.

Если на поверхность полупроводника нанести металлическую пленку, то вследствие *термоэмиссионного перехода* электронов в материал с большей работой выхода (металл) в приконтактной части полупроводника образуется *область объемного заряда*, обедненная подвижными носителями заряда. Приложенное извне *обратное напряжение* практически полностью приходится на эту область. Напряженность электрического поля в ней оказывается весьма значительной, в результате чего *генерируемые* под воздействием облучения *электроны и дырки* быстро вытягиваются из него этим полем, обеспечивая протекание во внешней цепи *фототока*.

На рисунке 2.2 представлена типовая Au-Si-структура фотодиода с барьером Шоттки с охранным p⁺-кольцом и с просветляющим ZnS-покрытием.

На подложке сильно легированного n⁺-кремния выращивается тонкая эпитаксиальная пленка высокоомного кремния (n). Затем методом диффузионно-планарной технологии в этой пленке создается "охранное" кольцо p⁺-типа.

Внутри кольца напыляется тонкая (0,01 мкм) полупрозрачная золотая пленка, а поверх нее – антиотражающее покрытие из сернистого цинка. Металлическая пленка дает значительно меньший вклад в величину последовательного сопротивления, чем это имело бы место в случае $p^+ - n$ -перехода в обычном диоде даже с очень тонкой p^+ -областью. В этом одно из достоинств фотодиодов с барьером Шоттки. Охранное кольцо устраняет краевые эффекты, резко снижая ток утечки и повышая пробивное напряжение. Принцип функционирования фотодиодов с барьером Шоттки аналогичен работе $p - i - n$ -фотодиода.

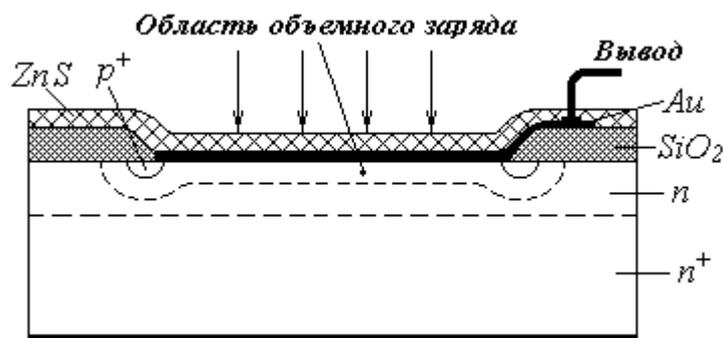


Рисунок 2.2 – Типовая Au-Si-структура фотодиода с барьером Шоттки с охранным p^+ -кольцом

Достоинства фотодиодов с барьером Шоттки:

- 1) простота создания выпрямляющих фоточувствительных структур на разнообразных полупроводниках, технологическая и физическая совместимость фотодиодов с оптическими интегральными схемами;
- 2) сочетание высокой фоточувствительности и высокого быстродействия, сравнимых с $p - i - n$ -фотодиодами;
- 3) широкий выбор используемых металлов, что позволяет варьировать в широких пределах высотой потенциального барьера Φ_K , а следовательно и граничной длиной волны $\lambda_{ГР}$;

Наиболее широкое применение получили кремниевые, германиевые и арсенид-галлиевые фотодиоды. Практически фотодиоды Шоттки оказались удобными для $\lambda = 0,63$ мкм. При быстродействии 10^{-10} с почти достигается теоретический порог фоточувствительности ($S_0 \approx 0,5$ А/Вт).

2.2.4 Гетерофотодиоды

Гетеропереходом называется переходный слой между двумя различными по химическому составу полупроводниками с существующим в нем диффузионным электрическим полем [1].

Гетерофотодиоды (ГФД) относятся к наиболее перспективному классу фотоэлектронных фотоприемников. Устройство и принцип функционирования ГФД рассмотрим на примере гетероструктуры $GaAs - GaAlAs$ (рисунок 2.3).

На подложке $GaAs$ n^+ -типа методом жидкофазной эпитаксии последовательно наращивают сначала слой чистого арсенида галлия n -типа, а затем слой твердого раствора арсенида галлия-алюминия $Ga_{1-x}Al_xAs$ p^+ -типа. При $x = 0,3 \dots 0,4$ по разные стороны гетероперехода устанавливается разница в ширине запрещенной зоны $E_{g2} - E_{g1} \approx 0,4$ эВ.

Слой $GaAlAs$ играет роль широкозонного окна, пропускающего излучение, поглощаемое в средней n -области ($GaAs$). Структура зонной диаграммы обеспечивает беспрепятственный перенос генерируемых в n -области дырок в p^+ -область ($GaAlAs$). Толщина d n -области выбирается такой, чтобы обеспечить поглощение всей падающей мощности излучения (при $\lambda \approx 0,85$ мкм $d \approx 20$ мкм).

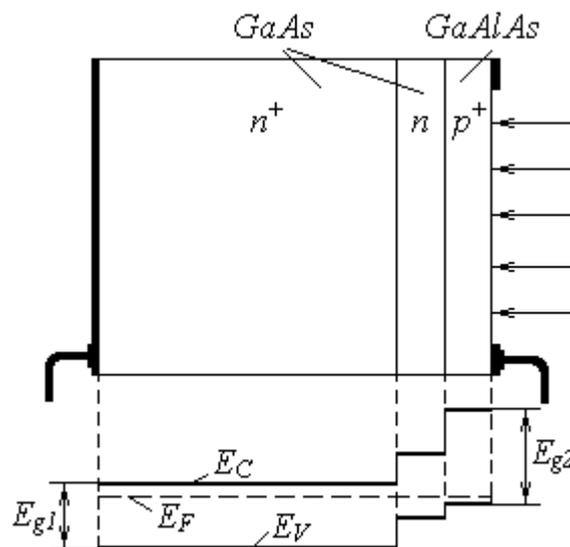


Рисунок 2.3 – Устройство и зонная диаграмма фотодиода с однозонной гетероструктурой

Данная гетероструктура по физике поглощения света, накоплению и рассеиванию генерируемых носителей заряда в значительной степени подобна $p-i-n$ -структуре. Потери на рекомбинацию малы благодаря высокой чистоте n -слоя и совершенной структуре гетероперехода. Фоточувствительность определяется эффективным временем жизни носителей в среднем n -слое, а время переключения — его толщиной d и напряженностью электрического поля.

К достоинствам фотоприемников с гетеропереходом относятся:

- высокая фоточувствительность;
- высокое быстродействие;
- возможность эффективной работы при малых обратных напряжениях;
- высокий к.п.д, близкий к 100 %;
- более высокая фото-э.д.с ($U_{\text{ф.д.с}} \approx 0,8 \dots 1,1$ В);
- более высокая температурная и радиационная стойкость, чем у кремниевых фотоприемников.

Основной недостаток гетерофотодиодов — сложность изготовления.

2.2.5 Сравнительный анализ фотоприемников

Для сравнительной оценки свойств различных типов полупроводниковых фотоприемников, получивших наиболее широкое применение в оптоэлектронике и в других электронных устройствах в таблице 2.1 приведены их основные параметры и характеристики [2, с.77, таблица 2.3].

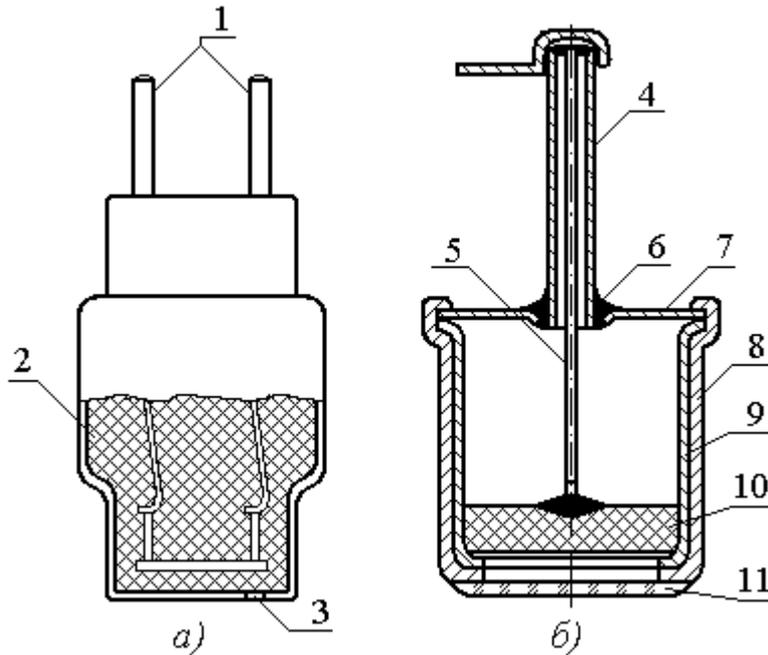
Таблица 2.1 - Основные параметры и характеристики оптоэлектронных фотоприемников

Тип фотопремника	Кэф-ент усиления	Быстродействие, $t_{\text{вкл/выкл}}, \text{с}$	Рабочее напряжение, $U_{\text{min}} / U_{\text{max}}, \text{В}$	Используемая доля падающей мощности	Стабильность температурная /временная	Применение в электронных устр-вах
<i>p-n</i> -фотодиод	1	$10^{-6}..10^{-9}$	3..5 / 50..100	Невысокая	Высокая	Универсальное
<i>p-i-n</i> -фотодиод	1	$10^{-8}..10^{-10}$	0 / 300..500	Очень высокая	Высокая	Универсальное
Фотодиод Шоттки	1	$10^{-9}..10^{-11}$	0 / 50..100	Невысокая	Высокая	Универсальное
Гетерофотодиод	1	$10^{-8}..10^{-10}$	0 / 10..100	Высокая	Высокая	Универсальное
Фототранзистор	$\sim 10^2$	$10^{-5}..10^{-6}$	$\sim 1 / 30..50$	Низкая	Невысокая/ высокая	В устр-вах среднего быстродействия
Интегральный фотоприемник	$10^2..10^5$	$10^{-6}..10^{-8}$	5 / 30	Низкая	Высокая	Универсальное
Фототиристор	–	$10^{-4}..10^{-5}$	1,5 / $\sim 10^3$	Низкая	Невысокая/ высокая	В коммутационных устр-вах
Фоторезистор	$10^3..10^5$	$10^{-2}.. 1$	3..5 / 200..300	Очень высокая	Очень низкая	В низкочастотных устр-вах

Анализ показывает, что наиболее быстродействующими, высокостабильными и универсальными являются фотодиоды и интегральные фотоприемники. Среди них наиболее быстродействующие фотодиоды Шоттки, *p-i-n*-фотодиоды и гетерофотодиоды. Но фотодиоды имеют самый низкий коэффициент усиления. Наибольшую схмотехническую гибкость обеспечивают фототранзисторы и фототиристоры, позволяющие реализовывать функциональные устройства различного назначения, но они имеют низкое быстродействие. Из фотодиодов к перспективным относят гетерофотодиоды, но наиболее перспективны интегральные фотоприемники, которые сочетают в себе преимущества и фотодиодов, и фототранзисторов. На их основе могут быть реализованы микросхемы со сложными функциональными характеристиками.

2.3 Конструкции некоторых типов фотодиодов

Конструктивно ФД представляет собой полупроводниковый кристалл с p - n - или др. переходом, снабженный двумя металлическими выводами и смонтированный в защитный корпус. В конструкции ФД должны быть предусмотрены специальное окно для облучающего потока от контролируемого источника и защита от облучения посторонних источников. В качестве примера на рисунке 2.4 приведены конструкции ФД в пластмассовом (а) и металлическом (б) корпусах.



1 – выводы; 2 – пластмасса; 3 – отверстие для облучающего потока; 4 – металлическая трубка; 5 – вывод; 6 – изолятор; 7 – крышка; 8 – металлический корпус; 9 – кристаллодержатель; 10 – полупроводниковый монокристалл; 11 – входное окно, закрытое стеклом

Рисунок 2.4 – Конструкции фотодиодов в пластмассовом (а) и металлическом (б) корпусах

Различают три типа ФД: точечные, плоскостные и поверхностно-барьерные. Точечный ФД выполняется в виде тонкой пластины монокристаллического германия с проводимостью n -типа, к которой присоединяется коллектор в виде металлического электрода из пружинящей вольфрамовой проволоки, покрытой слоем индия. При подключении ФД к внешнему источнику напряжения через точечный контакт потечет ток большой плотности (площадь контакта очень мала). Как следствие, в области контакта будет выделяться достаточно большое количество энергии и произойдет локальный разогрев контактной пружины и пластины полупроводника в месте контактирования. При высокой температуре атомы индия с контактной пружины будут активно диффундировать в пластину германия n -типа. Так под острием коллектора образуется p - n переход – область диаметром около 1 мм. Облучение p - n перехода осуществляется с внешней стороны пластины германия. Такие ФД имеют вы-

сокую чувствительность на больших частотах в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4...1,0 \text{ мкм}$.

Плоскостные ФД имеют форму прямоугольных пластин размерами в несколько миллиметров. Наибольшая эффективность достигается при падении потока излучения в пределах нескольких десятых миллиметра от $p-n$ перехода. Максимальная чувствительность соответствует длинам волн $1,5 \text{ мкм}$ для германиевых и $0,7 \text{ мкм}$ для кремниевых фотодиодов.

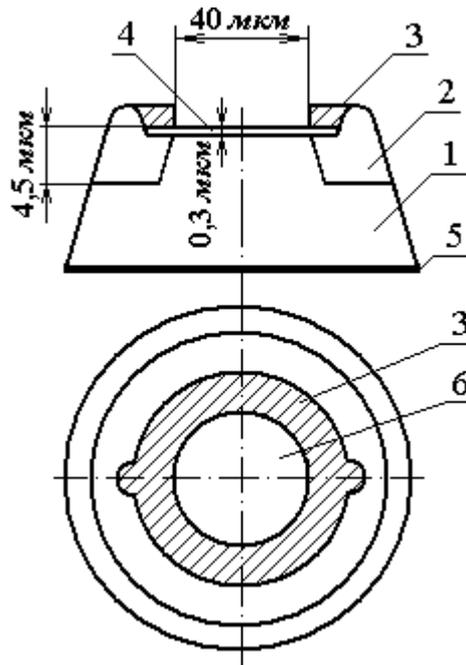
Основными преимуществами полупроводниковых фотодиодов являются высокое быстродействие и высокая чувствительность. При воздействии постоянного светового потока быстродействие $p-i-n$ фотодиодов, фотодиодов Шоттки и ГФД достигает порядка $10^{-8} - 10^{-11} \text{ с}$, а у ФД на $p-n$ структуре время включения/выключения на 2 порядка больше ($10^{-6} - 10^{-9} \text{ с}$) (см. таблицу 2.1). Однако при модуляции светового потока быстродействие и чувствительность ФД существенно снижаются. Так при частоте модуляции более 15 кГц чувствительность снижается вдвое.

Существенным недостатком рассмотренных выше фотодиодов считается отсутствие внутреннего усиления. Но этот недостаток следует отнести к разряду условных, относящихся только к фотодиодам как к самостоятельным функциональным элементам. В оптоэлектронных же устройствах ФД, как правило, подключается к другим элементам через согласующую схему. При современном уровне интегральной технологии введение усилительного каскада в эту схему значительно проще и целесообразнее, нежели придание ФД несвойственных ему функций усиления [2, с.80].

С другой стороны указанный недостаток устранен при разработке лавинных фотодиодов (ЛФД). Принцип функционирования ЛФД основан на явлении лавинного электрического пробоя $p-n$ перехода, который заключается в лавинообразном нарастании числа носителей заряда, размножающихся за счет ударной ионизации. В результате увеличение фототока достигает у германиевых ФД до $200...300$, а у кремниевых порядка $10^4...10^6$. Структура германиевого лавинного фотодиода показана на рисунке 2.5.

Основанием ЛФД 1 является германий p -типа. Область n^+ -типа 4 создается диффузией мышьяка, на поверхность которой наносится электрод – контактное кольцо из золота 3. Тыльный контакт 5 к базовому материалу p -типа создается осаждением золота с последующим никелированием. Чтобы ограничить область лавинного пробоя центральной областью $p-n$ перехода в конструкции ЛФД предусмотрено охранное кольцо 2. Оно представляет собой периферийную область с более низким градиентом концентрации примеси, т.е. с более высоким пробивным напряжением, чем в центральной области $p-n$ перехода. Охранное кольцо создается диффузией сурьмы.

Основные данные германиевых ЛФД: рабочая площадь чувствительной площадки $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$, пробивное напряжение 30 В , темновой ток при обратном смещении 20 В лежит в пределах $0,1...0,3 \text{ мкА}$, граничная частота 3 ГГц , квантовая эффективность $30...50 \%$ для $\lambda = 1,05 \text{ мкм}$. ФД герметизируются в корпусах, наполненных сухим азотом.



1 – германий *p*-типа; 2 – охранный кольцо; 3 – контакт из золота;
4 – область *n*⁺-типа (As); 5 – нижний контакт; 6 – активная область

Рисунок 2.5 – Конструкция германиевого ЛФД с охранным кольцом

По мнению иностранных специалистов высокая чувствительность и быстродействие германиевых ЛФД делают их перспективными приемниками для лазерных систем связи, особенно в области рабочих длин волн лазера на основе арсенида галлия (0,96 мкм) и иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (ИАГ Nd-лазер - $\lambda=1,06$ мкм). Кремниевые ЛФД широко используются в измерительной аппаратуре, так как их характеристики обеспечивают:

- линейность тока выходного сигнала с изменением уровня мощности падающего излучения;
- малый нижний предел обнаружения мощности ($10^{-12} \dots 10^{-15}$ Вт в зависимости от величины активной площади и способа изготовления) и большой верхний предел ($10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-1}$ Вт);
- высокую термостабильность (темновой ток удваивается с ростом температуры на 10 °С).

Разработаны неохлаждаемые ЛФД на основе сложных полупроводников для приема излучения с длиной волны 1,06 мкм. ЛФД на слоях арсенида галлия-индия $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, рабочая область которых соответствует $x=0,17$ и $x=0,20$, имеют в два раза большую квантовую эффективность, чем у кремниевых ЛФД.

Фотодиоды изготавливаются также из селена, сернистого галлия, сернистого серебра, арсенида индия и др. материалов.

Особенности конструкции и принцип функционирования поверхностно-барьерных фотодиодов (фотодиодов Шоттки) приведены в пункте 2.2.3. Они просты в изготовлении, а наибольшая чувствительность может варьироваться в широком диапазоне оптического излучения (от 0,4 до 1,0 мкм) путем подбора соответствующих материалов электрода и полупроводника.

3 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ

3.1 Вольтамперные характеристики

Как уже было сказано в подразделе 2.1 фотодиоды могут работать либо в фотодиодном, либо в вентильном режиме. В данной работе исследуются характеристики ФД с $p-n$ переходом в фотодиодном режиме. Вольтамперные характеристики (ВАХ) ФД в данном режиме представляют собой зависимость обратного тока I_{OBR} от обратного напряжения U_{OBR} при воздействии на фотодиод светового потока.

На рисунке 3.1 приведено семейство ВАХ фотодиода при различной интенсивности (мощности)¹ светового потока $\Phi_{\text{э}}$. Из анализа характеристик очевидно, что при увеличении интенсивности светового потока $\Phi_{\text{э}}$ соответственно увеличивается фототок I_{ϕ} . Исследования показали, что зависимость $I_{\phi}(\Phi_{\text{э}})$ почти линейная в широком диапазоне изменения интенсивности падающего излучения и практически не зависит от напряжения смещения. Следует также отметить, что в рабочем диапазоне обратных напряжений при освещении фотодиода обратные токи практически не зависят от приложенного напряжения – ВАХ практически параллельны оси напряжения.

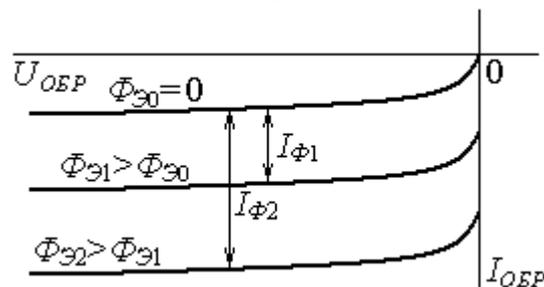


Рисунок 3.1 – Обратные ветви ВАХ фотодиодов при различных световых потоках $\Phi_{\text{э}}$

3.2 Энергетическая характеристика ФД

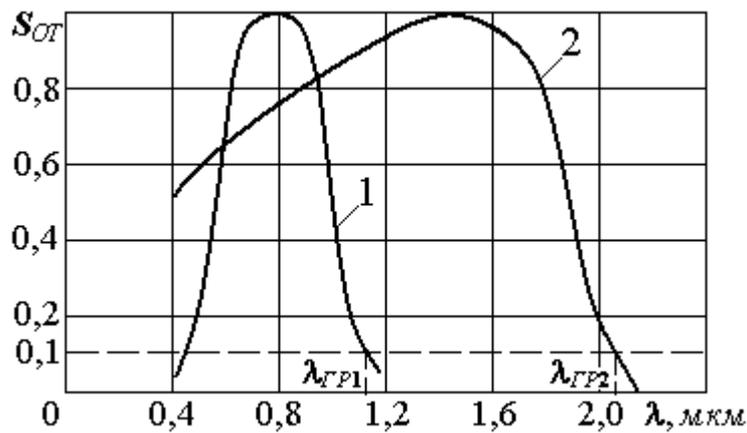
Энергетическая характеристика ФД $I_{\phi}(\Phi_{\text{э}})$ – зависимость фототока I_{ϕ} от потока излучения $\Phi_{\text{э}}$, падающего на фотодиод. Эта зависимость практически линейная, так как толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда и практически все неосновные носители, возникшие в базе в результате световой генерации, доходят до $p-n$ перехода и принимают участие в образовании фототока. Следствием линейности энергетической характеристики фотодиода является независимость интегральной чувствительности фотодиода от приложенного обратного напряжения.

3.3 Спектральная характеристика

¹ $\Phi_{\text{э}}$ – интенсивность (мощность) светового потока – это энергия светового потока, падающего на активную площадь фотодиода в единицу времени, измеряется в Ваттах ($Вт$). Не путать со световым потоком, который обозначается через Φ и измеряется в люменах ($лм$).

Спектральная характеристика – это зависимость чувствительности фотодиода S от длины волны λ регистрируемого монохроматического потока излучения. Спектральная характеристика может измеряться в абсолютных единицах – *абсолютная спектральная характеристика*, или может быть отнесена к величине максимальной чувствительности – *относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприемника* $S_{OT} = S/S_{max}$. Относительные спектральные характеристики серийно выпускаемых фотодиодов представлены на рисунке 3.2.

В области низких частот (больших длин волн) спектральная характеристика определяется шириной запрещенной зоны исходного полупроводникового материала. При больших длинах волн энергия квантов света оказывается недостаточной для переноса электронов через запрещенную зону из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому для каждого полупроводника и, соответственно, для каждого фотодиода существует *длинноволновая граница спектральной чувствительности* λ_{GR} , которая определяется на уровне $S_{OT} = 0,1$ относительной спектральной характеристики чувствительности фотоприемника.



1 – кремниевый фотодиод; 2 – германиевый фотодиод

Рисунок 3.2 – Спектральные характеристики плоскостных фотодиодов

В области высоких частот (малых длинах волн) с уменьшением длины волны принимаемого фотодиодом излучения растет коэффициент поглощения. Поэтому большая часть квантов света поглощается в приповерхностном фоточувствительном слое полупроводника и основная часть неравновесных носителей заряда возникает вблизи освещаемой поверхности. При этом увеличивается роль поверхностной рекомбинации и уменьшается среднее время жизни неравновесных носителей, что приводит к снижению чувствительности фотоприемника. Таким образом, спектральная характеристика имеет спад и в области малых длин волн.

Различные полупроводники имеют ширину запрещенной зоны от десятых долей до 3 эВ. Поэтому максимум спектральной характеристики различных фотодиодов может находиться как в видимой, так и в инфракрасной или ультрафиолетовой областях электромагнитного спектра излучения. *Коротковолновая граница спектральной чувствительности* фотодиода зависит от толщины базы

и от скорости поверхностной рекомбинации. Уменьшая эти величины, можно существенно сдвигать коротковолновую границу фоточувствительности ФД в сторону меньших длин волн. Например, максимум спектральной характеристики кремниевых диодов можно смещать в диапазоне от 0,6 до 1 мкм путем изменения их конструкции и технологии изготовления.

3.4 Интегральная чувствительность

Интегральная чувствительность $S_{ИИТ}$ – один из основных параметров фотодиода, определяется отношением фототока I_{ϕ} к интенсивности лучистого потока (мощности потока излучения) Φ_{Δ}

$$S_{ИИТ} = \frac{I_{\phi}}{\Phi_{\Delta}}, \text{ мкА/Вт}. \quad (3.1)$$

Вследствие линейности энергетической характеристики ФД интегральная чувствительность не зависит от приложенного напряжения. В практике чаще применяют параметр, который характеризует чувствительность не фотоприёмника вообще, а с учетом схемы, в которую он включен. Этот параметр получил название **вольтовая чувствительность** S_V – это отношение амплитуды эффективного напряжения, снимаемого с фотоприёмника $U_{\phi m}$, к амплитуде синусоидального модулированного эффективного лучистого потока $\Phi_{\Delta m}$

$$S_V = \frac{U_{\phi m}}{\Phi_{\Delta m}}, \text{ В/Вт}. \quad (3.2)$$

При отсутствии модуляции сигнала вольтовую чувствительность определяют как отношение приращения напряжения ΔU , снимаемого с приёмника, к вызвавшему его приращению лучистого потока $\Delta \Phi_{\Delta}$.

$$S_V = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi_{\Delta}}. \quad (3.3)$$

Интегральная чувствительность служит для оценки качества фотоприёмника, а вольтовая чувствительность позволяет оценить как сам фотоприёмник, так и схему его включения.

3.5 Квантовая эффективность

Интегральную чувствительность приёмника излучения характеризуют также *отношением числа эмитированных электронов (вызвавших фотоэффект) к общему числу квантов излучения, попавших на чувствительную площадку.* Это отношение называют **квантовой эффективностью** или **квантовым выходом** η (безразмерная величина)

$$\eta = \frac{I_{\phi} / q}{\Phi_{\Delta} / h\nu} = S_{ИИТ} \cdot \frac{h\nu}{q}, \quad (3.4)$$

где I_{ϕ} – фототок, А; q – заряд электрона ($q \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); Φ_{Δ} – интенсивность облучающего потока, Вт; h – постоянная Планка ($h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,14 \cdot 10^{-15}$ Эв·с); ν – частота светового потока, c^{-1} .

Одним из основных факторов, определяющих квантовую эффективность, является *коэффициент поглощения*, зависящий от длины волны падающего лучистого потока и от температуры. Вследствие этого для данного полупроводника область длин волн, в которой можно получить заметный фототок, ограничена.

3.6 Порог чувствительности

К важным параметрам фотодиодов относится **порог чувствительности** Φ_{Π} – это минимальное значение интенсивности облучающего потока, вызывающего на выходе из приёмника сигнал, равный напряжению шумов (среднему квадратичному значению) или превышающий его в заданное m число раз.

$$\Phi_{\Pi} = m \frac{\sqrt{\bar{U}_{\text{ш}}^2}}{S_V}, \text{ Вт}, \quad (3.5)$$

где $U_{\text{ш}}$ – напряжение шума; m – коэффициент.

Порог чувствительности определяет максимальную дальность действия фотодиода. Значение коэффициента m зависит от того, к чему относят порог. Если рассматривать порог обособленно для приёмников в стандартизованных условиях, то обычно принимают $m = 1$. Если же этот параметр относится к приёмникам, включенным в определённую схему, служащую для выделения сигнала на фоне шумов, то принимают коэффициент $m = 3 \dots 5$, а для некоторых специальных схем – $m \leq 1$.

Так как напряжение шумов фотоприёмника зависит от площади его чувствительной области и полосы частот Δf усилителя сигнала, то для сравнения различных приёмников используют **удельный порог чувствительности** – величину порога чувствительности, отнесённую к полосе пропускания и площади фотоприёмника:

$$\Phi_{\Pi}^* = \frac{\Phi_{\Pi}}{\sqrt{A \cdot \Delta f}} = \frac{m}{S_V} \cdot \sqrt{\frac{\bar{U}_{\text{ш}}^2}{A \cdot \Delta f}}, \quad (3.6)$$

где Φ_{Π}^* – удельный порог чувствительности, $\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2})$; A – площадь чувствительного элемента, см^2 ; Δf – полоса пропускания усилительного тракта, Гц .

В инженерной практике предпочтение отдается другому критерию оценки порога чувствительности фотоприёмников – **удельной обнаружительной способности** D^* – это обратная величина удельного порога чувствительности.

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{\Pi}^*} = \frac{S_V}{m} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \Delta f}{\bar{U}_{\text{ш}}^2}}, \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}. \quad (3.7)$$

Удельная обнаружительная способность не зависит от площади приёмника, что делает её удобной для сравнения различных приборов. Для того, чтобы исключить неопределённость при расчёте обнаружительной способности, необходимо указывать, является ли источником излучения абсолютно чёрное тело или монохроматический источник и при какой частоте осуществляется модуля-

ция. Рекомендуется выражать удельную обнаружительную способность D^* как функцию длины волны излучения λ (мкм), частоты модуляции f (Гц) и полосы пропускания ($\Delta f = 1$ Гц) – $D^*(\lambda, f, \Delta f = 1)$.

4 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает в себя:

- лабораторный макет;
- генератор синусоидальных колебаний низкочастотный ГЗ-102;
- усилитель селективный У2-8.

Схема электрическая принципиальная лабораторного макета представлена на рисунке 4.1, а схема передней панели макета приведена на рисунке 4.2.

Лабораторный макет состоит из следующих функциональных устройств:

- исследуемого фотодиода VD10 типа ФД-1 и светодиода VD9, служащего для облучения фотодиода. Они смонтированы в отдельном выдвижном блоке, расположенном на левой панели макета и подключаются к схеме макета с помощью разъема X2. На рисунке 4.1 блок выделен штриховой линией;

- источника вторичного электропитания на два стабилизированных напряжения постоянного тока, реализованного на трансформаторе питания Т1 с двумя вторичными обмотками. Питание фотодиода VD10 осуществляется от обмотки трансформатора W2 через выпрямительный модуль UZ1, сглаживающий С-фильтров (С2) и транзисторный стабилизатор на стабилитроне VD6 и транзисторе VT1. Светодиод питается от обмотки трансформатора W3 через мостовой выпрямитель (VD1-VD4), сглаживающий RC-фильтров (R₄-C3) и транзисторный стабилизатор (VD7-VT2).

- встроенного миллиамперметра PA1 (mA), служащего для измерения тока светодиода и для снятия ВАХ фотодиода;

- встроенного вольтметра постоянного напряжения PV1 (V), предназначенного для снятия ВАХ фотодиода;

- переключателей:

- S1 (Сеть) для подключения лабораторного макета к электросети;
- S2 (Пит.СД) для переключения цепи питания светодиода от источника постоянного напряжения (Пост.) и от генератора переменного напряжения (ВЧ);
- S3 (Род работы), служащий для коммутации схемы макета при снятии прямой и обратной ВАХ фотодиода на постоянном токе (Пр.ВАХ и Обр.ВАХ) и для установки величины постоянного тока (интенсивности светового потока) светодиода (СД);

- S4 (mA), предназначенного для выбора предела измерения миллиамперметра;

- соединителей XS1 (ОТ ГЕНЕР.) и XS3 (К УСИЛ.) для подключения внешнего частотного генератора и селективного усилителя.

Для установки необходимой величины тока светодиода предусмотрен резистор переменного сопротивления R2 (Ток СД), а величину напряжения на фотодиоде можно регулировать с помощью резистора R7 (Напр.ФД).

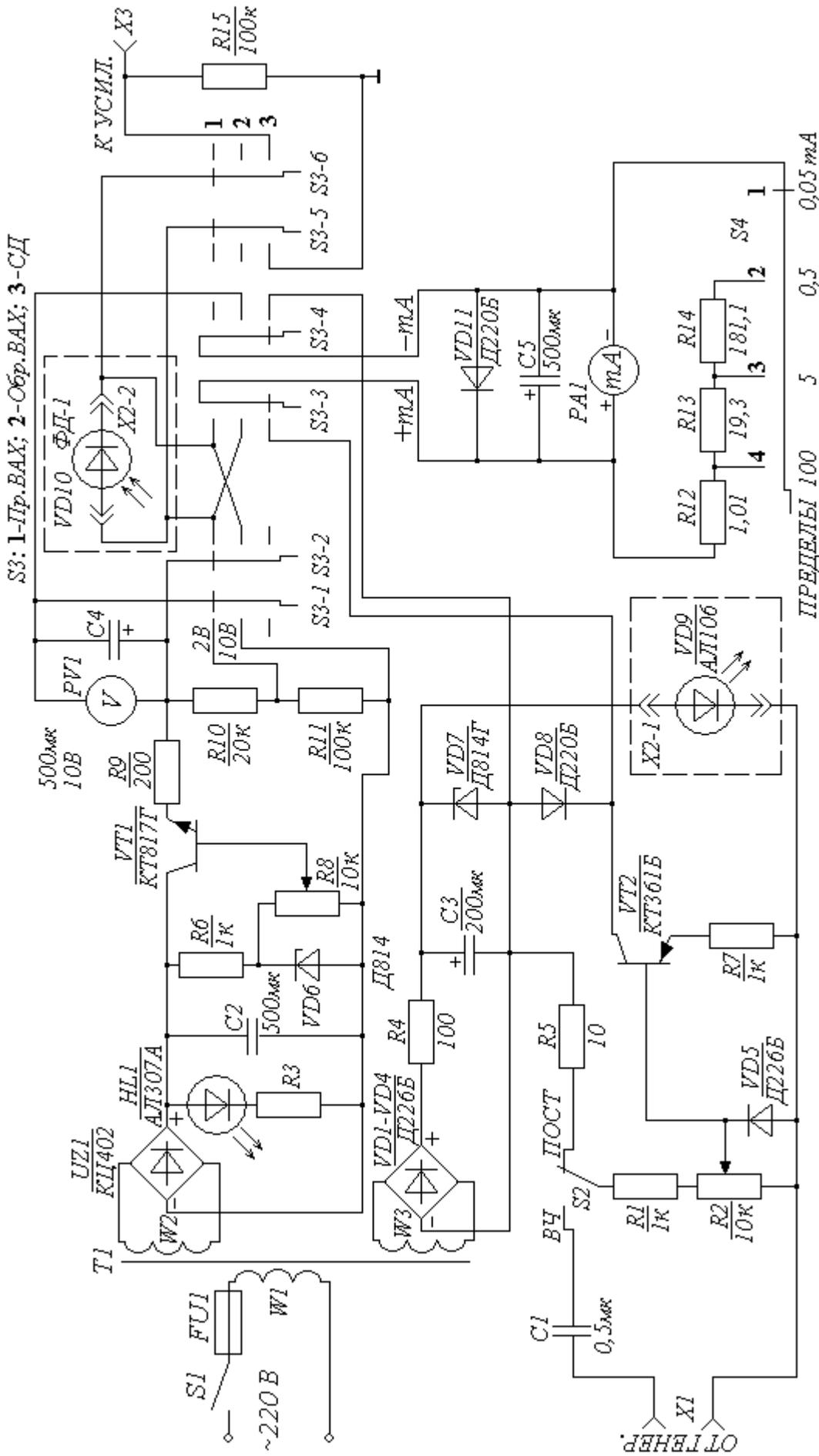
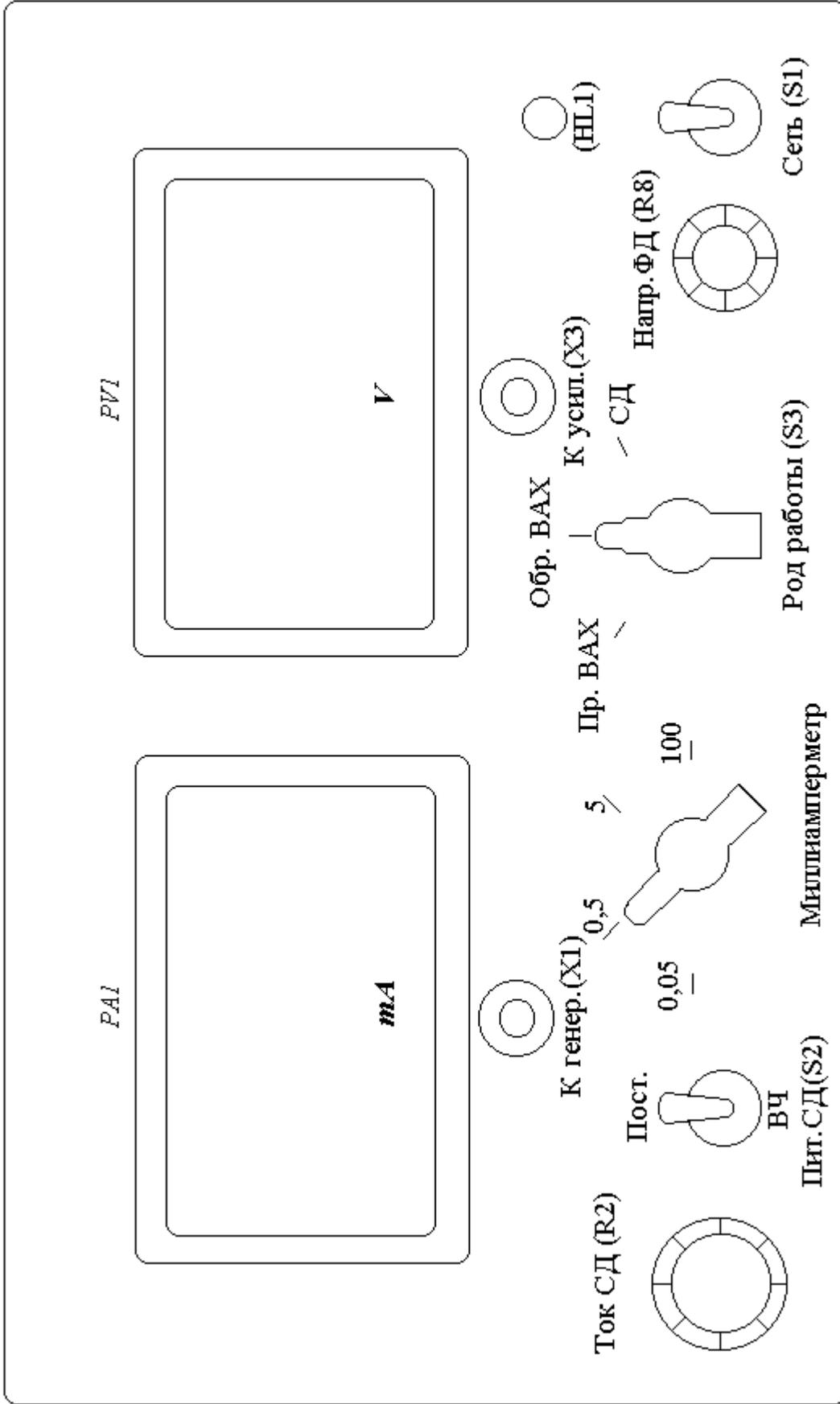


Рисунок 4.1- Электрическая принципиальная схема макета



4.2 - Передняя панель лабораторного макета

5 ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

5.1 Ознакомьтесь с лабораторной установкой и с конструкцией лабораторного макета, подготовить установку к проведению экспериментальных исследований. Рекомендации см. в пункте 6.1.1.

5.2. Снять прямую и обратную вольтамперные характеристики фотодиода при нулевом лучистом потоке ($\Phi_{\text{э}} = 0$ – ток светодиода $I_{\text{сд}} = 0$). Результаты измерений внести в таблицы 5.1 и 5.2. Методику измерений см. в пунктах 6.2.1 и 6.2.2.

5.3 Снять прямую и обратную вольтамперные характеристики фотодиода при потоке излучения светодиода $\Phi_{\text{э}} = 44 \text{ мкВт}$ (ток светодиода $I_{\text{сд}} = 16 \text{ мА}$) и внести результаты измерений в таблицы 5.1 и 5.2. Методику измерений см. в пункте 6.2.3.

Таблица 5.1 – Результаты измерения прямой ВАХ фотодиода

$I_{\text{ФД.ПР}}, \text{ мА}$	0	0,1	0,5	1	2	5	10	15	20	Ток светодиода
$U_{\text{ФД.ПР}}, \text{ В}$	0									$I_{\text{сд}} = 0$
$U_{\text{ФД.ПР}}, \text{ В}$	0									$I_{\text{сд}} = 16 \text{ мА}$

Таблица 5.2 – Результаты измерения обратной ВАХ фотодиода

$U_{\text{ФД.ОБР}}, \text{ В}$	1	2	3	4	5	7	10	Ток светодиода
$I_{\text{ФД.ОБР}}, \text{ мА}$								$I_{\text{сд}} = 0$
$I_{\text{ФД.ОБР}}, \text{ мА}$								$I_{\text{сд}} = 16 \text{ мА}$

5.4 По результатам измерений построить вольтамперные характеристики в одних осях координат.

5.5 При постоянном потоке излучения светодиода $\Phi_{\text{э}} = 11 \text{ мкВт}$ (ток светодиода $I_{\text{св}} = 4 \text{ мА}$) измерить напряжение фото-ЭДС $U_{\text{фм}}$ и напряжение шума $U_{\text{ш}}$ при пяти различных частотах. Результаты внести в таблицу 5.3. Методику измерений см. в подразделе 6.3.

Таблица 5.3 – Результаты измерения и расчета частотных характеристик ФД

$f, \text{ кГц}$	0,05	1,0	10	50	100
$U_{\text{фм}}, \text{ мВ}$					
$U_{\text{ш}}, \text{ мкВ}$					
$S_{\text{v}}, \text{ В/Вт}$					
$\Phi_{\text{ш}}, \text{ Вт}$					
$D^*, \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$					

5.5. По результатам измерений (пункт 5.5) рассчитать и внести в таблицу 5.3 следующие параметры фотодиода:

1) вольтовую чувствительность S_V по формуле (3.2)

$$S_V = \frac{U_{\Phi m}}{\Phi_{\text{Эм}}};$$

2) порог чувствительности Φ_{II} по формуле (3.5)

$$\Phi_{II} = m \frac{\sqrt{\overline{U_{III}^2}}}{S_V};$$

3) удельную обнаружительную способность D^* по формуле (3.7)

$$D^* = \frac{S_V}{m} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \Delta f}{\overline{U_{III}^2}}} = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{\Phi_{II}},$$

где A – чувствительная площадь фотодиода ($A = 0,03 \text{ см}^2$);

Δf – полоса пропускания усилительного тракта, определяется по формуле

$$\Delta f = 0,014 f.$$

Здесь f – частота модуляции лучистого потока, Гц.

5.7 По результатам расчетов построить в одних осях координат зависимости S_V , Φ_{II} и D^* от частоты модуляции лучистого потока f .

5.8 Рассчитать интегральную чувствительность по формуле (3.1) и квантовую эффективность по формуле (3.4) фотодиода.

5.9 Провести критический анализ полученных результатов и сделать выводы по работе.

6 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФД

6.1 Подготовка лабораторной установки

6.1.1 Ознакомиться с лабораторной установкой и составить функциональную схему ее (см. раздел 4).

6.1.2 Ознакомиться с устройством лабораторного макета – изучить схему электрическую лабораторного макета по рисунку 4.1 и найти на лицевой панели все элементы коммутации и регулирования (рисунок 4.2): выключатели СЕТЬ (S1) и ПИТ.СД (S2); переключатель пределов измерения миллиамперметра МИЛЛИАМП. (S4); переключатель РОД РАБОТЫ (S3); гнезда соединителей: ОТ ГЕНЕР. (XS1) и К УСИЛ. (XS3); ручки регулирования ТОК СД (R2) и НАПР.ФД (R8).

6.1.3 Привести лабораторную установку в исходное состояние:

- выключатели СЕТЬ на макете и на приборах установки должны быть выключены (контрольные лампочки не горят);
- выключатель ПИТ.СД установить в положение ПОСТ – питание СД от встроенного источника постоянного напряжения;

- ручки ТОК СД и НАПР.ФД повернуть в крайнее левое положение до упора – ток СД и напряжение на фотодиоде минимальные;
- переключатель МИЛЛИАМП. установить в крайнее правое положение – диапазон миллиамперметра максимальный – 100 мА;
- переключатель РОД РАБОТЫ установить в крайнее левое положение – Пр.ВАХ – прямая вольтамперная характеристика;
- подключить с помощью специальных кабелей выход генератора ГЗ-102 к гнезду соединителя ОТ ГЕНЕР. на макете и вход селективного усилителя У2-8 к гнезду соединителя К УСИЛ. на макете;
- Ознакомиться с элементами управления генератора ГЗ-102, вывести рукоятку регулирования напряжения в крайнее левое положение;
- Ознакомиться с элементами управления селективного усилителя У2-8 и установить ... ;
- Получить у преподавателя разрешение на проведение экспериментальных исследований и подключить к сети питания генератор, усилитель и макет.

6.2 Измерение прямой и обратной ВАХ фотодиода

6.2.1 Для снятия прямой ВАХ фотодиода при нулевом лучистом потоке ($\Phi_{\text{э}} = 0$) переключатель РОД РАБОТЫ должен находиться в положении Пр.ВАХ, а рукоятка ТОК СД должна быть выведена влево до упора. При этом ток светодиода должен отсутствовать – стрелка миллиамперметра должна стоять на нуле ($I_{\text{сд}} = 0$). Рукоятка НАПР.ФД также должна быть выведена влево, а стрелка вольтметра должна стоять на нуле.

Плавное поворачивание рукоятки НАПР.ФД вправо и устанавливая соответствующие значения тока (не забывая переключать пределы измерения миллиамперметра), снять показания миллиамперметра и вольтметра (предел измерения вольтметра в этом режиме равен 2 В).

После снятия последних показаний приборов рукоятку НАПР.ФД вывести влево – снять напряжение с фотодиода.

Результаты измерений внести в таблицу 5.1 и показать преподавателю.

6.2.2 Для снятия обратной ВАХ фотодиода при нулевом лучистом потоке переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение Обр.ВАХ. При этом предел измерения вольтметра будет равен 10 В. Плавное изменение напряжения, снять показания вольтметра и миллиамперметра, внести их в таблицу 5.2 и показать преподавателю. Рукоятку НАПР.ФД вывести влево.

6.2.3 Для снятия прямой и обратной ВАХ фотодиода при потоке излучения светодиода $\Phi_{\text{э}} = 44 \text{ мкВт}$ переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение СД и установить ток светодиода $I_{\text{сд}} = 16 \text{ мА}$.

Установив переключатель РОД РАБОТЫ в положение Пр.ВАХ, снять прямую ВАХ фотодиода и внести результаты в таблицу 5.1.

Установив переключатель РОД РАБОТЫ в положение Обр.ВАХ, снять обратную ВАХ, внести результаты в таблицу 5.2 и показать преподавателю.

6.3 Измерение напряжения фото-ЭДС и напряжения шума ФД

- Выключатель ПИТ.СД установить в положение ВЧ – питание светодиода от генератора переменного напряжения.
- На генераторе установить частоту напряжения 50 Гц и величину напряжения 10 В .
- Переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение СД и установить ток светодиода $I_{СД} = 4 \text{ мА}$.
- Переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение Обр.ВАХ, настроить селективный усилитель на частоту модуляции светового потока (частоту генератора) и снять показание вольтметра усилителя (фото-ЭДС $U_{\phi m}$).
- Не меняя настроек установки, отсоединить макет от генератора и с помощью селективного усилителя У2-8 измерить напряжение шума $U_{ш}$ (напряжение шума измеряется при нулевом световом потоке).
- Подключить генератор к макету, установить следующее значение частоты генератора и измерить фото-ЭДС и напряжение шума по приведенной выше методике. Провести измерения $U_{\phi m}$ и $U_{ш}$ для пяти значений частоты модуляции светового потока. Результаты измерений внести в таблицу 5.3 и показать преподавателю.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 7.1 Что называется фотоприемником (фотодетектором)?
- 7.2 Какие типы фотоприемников используются в оптоэлектронике?
- 7.3 Какие типы фотодиодов вы знаете?
- 7.4 Поясните принцип действия фотодиода на $p-n$ переходе. Что такое фотодиодный и вентильный режимы работы фотодиодов?
- 7.5 Как условно обозначаются светодиоды и фотодиоды в электрических схемах?
- 7.6 Как маркируются фотодиоды?
- 7.7 Каковы особенности вольтамперной характеристики фотодиода?
- 7.8 Что понимается под энергетической характеристикой фотодиода?
- 7.9 Какие свойства фотодиода отражает спектральная характеристика?
- 7.10 Что такое интегральная и вольтовая чувствительность фотодиода?
- 7.11 Что понимается под порогом чувствительности и удельной обнаружительной способностью фотодиода?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. – СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 480 с.
- 2 Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – М.: Сов. радио, 1977. – 232 с.
- 3 Кузубных Н.И. Физика функциональных устройств: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 152 с.

4 Геда Н.Ф. Измерение параметров приборов оптоэлектроники / Под ред. С.В.Свечникова. – М.: Радио и связь, 1981. - 368 с.

5 Иванов Е.В, Аксенов В., Юшин А.М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 448 с.

6 Кузбных Н.И. Общие требования и правила оформления отчетов по лабораторным работам: Метод. указания по оформлению отчетов по лабораторным работам для студентов всех специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – 12 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [edu,tusur.ru/training/publications/](http://edu.tusur.ru/training/publications/)