

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Кафедра электронных приборов (ЭП)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания для студентов к лабораторному практикуму по
курсу: «Квантовая и оптическая электроника»

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Кафедра электронных приборов (ЭП)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. Зав. Каф. ЭП

_____ Н. И. Буримов

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Методические указания для к лабораторному практикуму по курсу:
«Квантовая и оптическая электроника»

Разработчики:

доцент каф. ЭП

_____ Быков В.И.

доцент каф. ЭП

_____ Башкиров А.И.

«__» _____ 2024

Цель работы: Изучение конструкции, принципов работы и использования в устройствах приемников оптического излучения на основе полупроводниковых диодов.

Задачи, решаемые в работе

1. Знакомство с принципом работы и конструктивными особенностями полупроводниковых фотодиодов на основе p-n перехода.
2. Исследование характеристик фотодиода в фотогальваническом и фотодиодном режимах работы.
3. Определение диапазона линейности фотодетектора при проведении измерений интенсивности лазерного излучения в различных режимах работы фотодиодов.

Сведения из теории

Приемники оптического излучения (фотоприемники), представляют собой устройства, в которых под действием оптического излучения происходят изменения, позволяющие обнаружить это изменение и измерить его характеристики. Фотоприемники преобразуют энергию оптического излучения в другие виды энергии (тепловую, электрическую, механическую и т.п.), более удобную для измерений. По принципу действия все фотоприемники подразделяются на две группы: **тепловые**, интегрирующие результаты воздействия излучения за длительное время, и более быстродействующие – **фотоэлектрические**.

Основными параметрами приемников оптического излучения являются:

1. Энергетическая (световая) характеристика, которая определяет зависимость реакции приемника от интенсивности падающего излучения (ампер-ваттная, вольт-ваттная, люкс-ваттная).

2. Спектральная характеристика чувствительности, которая определяет зависимость реакции фотоприемника на воздействие излучения с различной длиной волны.
3. Частотная характеристика, которая определяет зависимость чувствительности фотоприемника от частоты модуляции и характеризует инерционность приемника.
4. Пороговая чувствительность, которая определяет минимальный уровень мощности излучения, который может быть обнаружен на фоне собственных шумов.

Приемники оптического излучения на основе полупроводников с p-n переходом (фотодиоды), используются в устройствах оптоинформатики для преобразования входного оптического сигнала в электрический за счет того, что в области p-n перехода полупроводника поглощаемый фотон образует пару новых носителей заряда – электрон и дырку. Количество этих пар пропорционально количеству падающего света. Электрическое поле, существующее внутри перехода (рис. 1,а), затягивает эти электроны в n-область, а дырки – в p-область. Поэтому при разомкнутой цепи – n-область заряжается отрицательно, а p-область – положительно, т.е. в p-n переходе возникает эдс (**фотоэдс**). А при замыкании внешней цепи в ней возникает ток. Такой режим использования фотодиода в качестве фотоприемника (без внешнего электрического поля) называется **фотогальваническим**.

При подаче на p-n переход обратного напряжения смещения ширину запирающего слоя можно увеличить (рис. 1, б). Такой режим использования фотодиода в качестве фотоприемника называется **фотодиодным**. Фотодиодный режим обладает рядом достоинств по сравнению с фотогальваническим: малой инерционностью, повышенной чувствительностью к длинноволновой части спектра, широким динамическим диапазоном линейности характеристик. Основной недостаток этого режима – наличие шумового тока, протекающего через нагрузку. Поэтому, при необходимости обеспечения низкого уровня шума

фотоприемника в ряде случаев фотогальванический режим может оказаться более выгодным, чем фотодиодный.

Одной из задач данной лабораторной работы является определение диапазона линейности энергетической характеристики исследуемых фотодиодов при двух схемах включения: **фотогальванической схеме и схеме фотодиода** (рис. 1). Следует отметить, что диапазон линейности фотодиодов можно увеличить не только с помощью увеличения сопротивления нагрузки R .

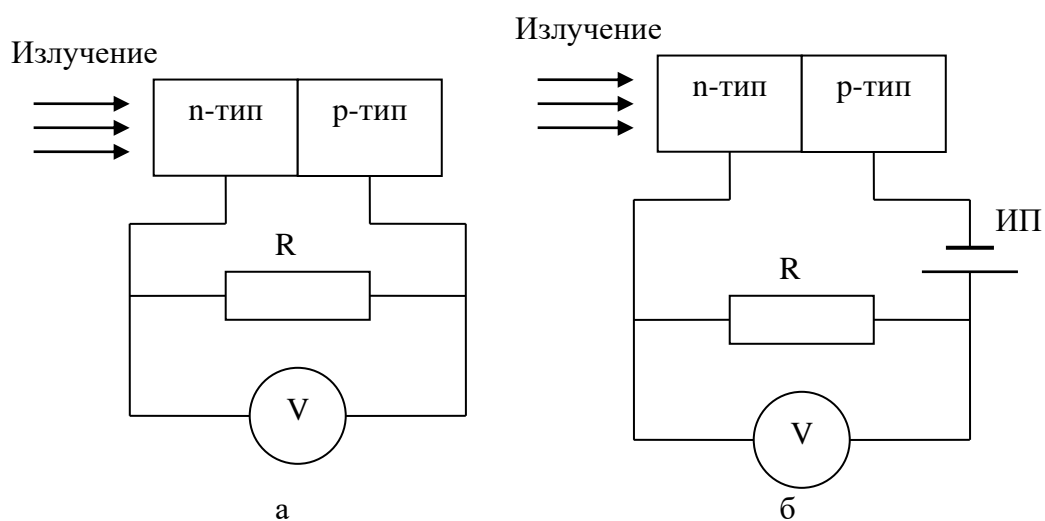


Рис.1. Использование фотодиода в фотогальваническом (а) и фотодиодном (б) режимах. Здесь: R – сопротивление нагрузки, V – вольтметр, ИП – источник питания.

Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка для выполнения данной работы, принципиальная блок-схема которой приведена на рис. 2, состоит из узла источника с полупроводниковым лазером (ПЛ), узла приемника излучения, включающего исследуемый фотодиод (ФД), нейтрального светофильтра (НС) и измерительных приборов (мультиметры M_1 и M_2).

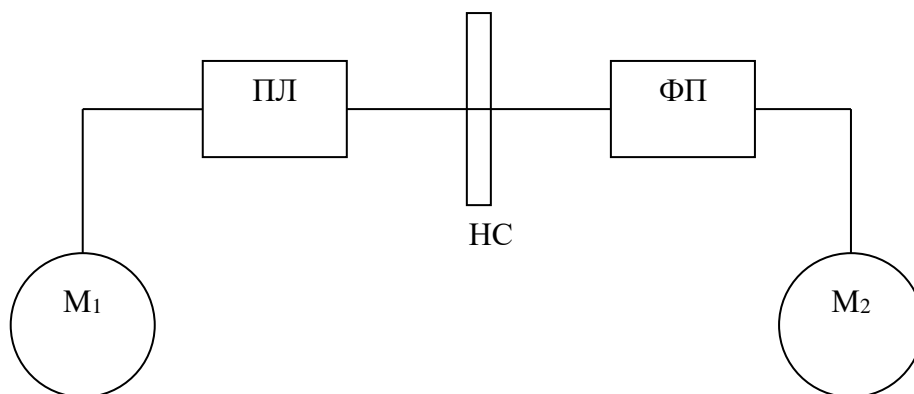


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: ПЛ – полупроводниковый лазер, НС – нейтральный светофильтр, ФД – фотодиод, M_1 и M_2 – измерительные приборы (мультиметры).

Установка смонтирована на оптическом рельсе. Каждый узел (узел источника излучения и узел приемника излучения) установлен в стойке и закреплен на рейтере. Узлы расположены на оптическом рельсе, который определяет оптическую ось системы. Узел источника излучения снабжен потенциометром для регулировки интенсивности излучения лазера. Нейтральный светофильтр может быть отдельным элементом на рельсе (светофильтр устанавливается в специальную оправу, установленную на рельсе в отдельном рейтере) или совмещен с узлом приемника излучения (светофильтр смонтирован в форме насадки на выходное окно фотоприемника). В качестве измерительных приборов используются мультиметры, с помощью которых в работе производится измерение напряжения (U) и сопротивления (R). При исследовании фотодиода в различных режимах работы используется управляющий блок, включенный в узел приемника излучения, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис.3.

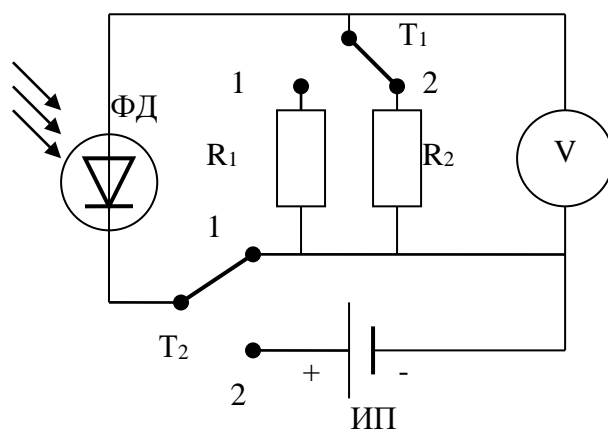


Рис.3. Принципиальная электрическая схема для измерения интенсивности лазерного излучения, используемая при исследовании полупроводникового фотодиода. Здесь: ФД – фотодиод; V – вольтметр; R_1 , R_2 – нагрузочные сопротивления; ИП – источник питания, создающий обратное смещение на р-п переходе (1,5 В); T_1 – тумблер для задания величины нагрузочного сопротивления (имеет два положения для подключения сопротивления R_1 или R_2); T_2 – тумблер для переключения фотодиода в различные режимы работы (положение 1 – фотогальванический режим; положение 2 – фотодиодный режим).

Измерение интенсивности (мощности) излучения в данной работе производится в условных единицах (В – вольты). Все измерения проводятся при использовании источника излучения в лазерном режиме работы – $I_{рп} > I_{пор}$.

Для оценки интенсивности излучения измеряется падение напряжения ($U_{ФД}$) на нагрузочном сопротивлении ($R = R_1 R_2$). Величина $U_{ФД}$ определяется энергией лазерного излучения, падающего на ФД, и характеристиками измерительной системы. Важной особенностью практического использования фотодиодов является необходимость работы в линейном режиме.

Экспериментальная зависимость $U_{ФД}$ от энергии падающего излучения полупроводникового лазера (W) приведена на рис. 4. Как видно из приведенных данных значения $U_{ФД}$ прямо пропорциональны энергии лазерного излучения в диапазоне от W_1 до W_2 . Это диапазон значений

энергии (мощности) излучения, внутри которого фотодиод работает в линейном режиме. Следует напомнить, что измерения энергии лазерного излучения проводятся при величине тока через р-п переход (I_{pn}) больше порогового ($I_{пор.}$). (I_{pn} определяется с помощью показаний измерительного прибора M_1 ($U_{ПЛ}$), подключенного к источнику излучения через нагрузочное сопротивление $R_{ПЛ}$)

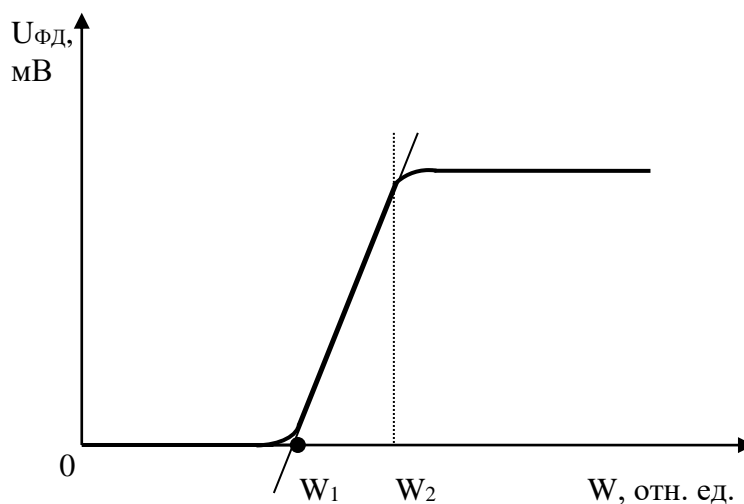


Рис. 4. Зависимость величины $U_{ФД}$ от энергии падающего излучения W .

В процессе выполнения работы необходимо снять зависимость показаний измерительного прибора, подключенного к ФД (ФД-24К), от тока через р-п переход (при изменении интенсивности падающего на ФД излучения) и определить линейный диапазон работы исследуемого фотоприемника в фотогальваническом режиме работы с различной величиной нагрузочного сопротивления и в фотодиодном режиме (с отрицательным смещением) при таком сопротивлении нагрузки, которое в фотогальваническом режиме работы ФД не позволяет осуществить линейность работы ФД в диапазоне энергий излучения используемого источника.

Диапазон линейности работы фотоприемного устройства определяется путем измерения пропускания нейтрального светофильтра (НС) при различных значениях энергии падающего излучения. В линейном

режиме работы фотоприемного устройства измеренное значение пропускания светофильтра (τ) не зависит от уровня энергии измеряемого излучения.

Порядок выполнения работы

Исследование фотоприемника в фотогальваническом режиме работы (Внешнее электрическое поле отсутствует, $U_{CM} = 0$)

1. Собрать схему эксперимента согласно рис.2 и рис.3 с использованием ФД с нагрузочным сопротивлением (без смещения) – тумблер T_2 находится в положении «1».
2. Включить полупроводниковый лазер, переключив тумблер узла источника излучения в положение «Вкл» и отъюстировать оптическую схему.
3. Установить максимальное значение энергии излучения лазера (используя регулировочное сопротивление узла источника излучения). Провести измерения, заполнив строку №1 таблицы 1:
 - Включить измерительный прибор M_1 на измерение постоянного напряжения (шкала 2000 mV) и измерить $U_{пл}$ – данные занести в столбец 2.
 - Включить измерительный прибор M_2 на измерение постоянного напряжения (шкала 2000 mV)
 - Установить тумблер T_1 в положение «1» и измерить $U_{фд}$ – данные занести в столбец 4.
 - Установить светофильтр на входное окно фотоприемника и измерить $U^*_{фд}$ – данные занести в столбец 5.
 - Установить тумблер T_1 в положение «2» и измерить $U^*_{фд}$ (со светофильтром) – данные занести в столбец 8.
 - Убрать светофильтр и измерить $U_{фд}$ – данные занести в столбец 7.

4. Уменьшить значение энергии излучения лазера на $4 \div 7\%$ (контроль по показаниям прибора M_1) и заполнить строчку №2 таблицы 1, проведя измерения аналогично п.3.
 - Для получения требуемых зависимостей необходимо провести измерения и заполнить 10-15 строк таблицы 2.1 при различных значениях энергии лазерного излучения.
5. Выключить лазер.
6. Включить прибор M_1 на измерение сопротивления и измерить величину $R_{пл}$, необходимую для расчета $I_{рп}$.
 - Данные показать преподавателю.
7. Провести предварительные расчеты (оценить τ при максимальной энергии излучения) и для проведения дальнейших измерений выбрать сопротивление нагрузки, при котором фотодиод работает в нелинейном режиме.

Таблица 1. Исследование фотоприемника в фотогальваническом режиме работы при различном сопротивлении нагрузки.

№	$U_{пл}$, мВ	$I_{рп}$, мА	$R_1 = 180 \text{ Ом}$			$R_2 = 1500 \text{ Ом}$		
			$U_{фд}$, мВ	$U^*_{фд}$, мВ	$\tau =$ $U^*_{фд} /$ $U_{фд}$	$U_{фд}$, мВ	$U^*_{фд}$, мВ	$T =$ $U^*_{фд} /$ $U_{фд}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

*Исследование фотоприемника в фотодиодном режиме работы
(Приложено внешнее электрическое поле $U_{см} = -1,5 \text{ В}$)*

1. Установить тумблер T_1 в положение, соответствующее выбранному значению сопротивления нагрузки.
2. Установить тумблер T_2 в положение «2», соответствующее отрицательному смещению.

3. Включить лазер и установить максимальное значение энергии излучения (используя регулировочное сопротивление узла источника излучения). Провести измерения, заполнив строку №1 таблицы 2:
 - Включить измерительный прибор M_1 на измерение постоянного напряжения и измерить $U_{Пл}$ – данные занести в столбец 2.
 - Включить измерительный прибор M_2 на измерение постоянного напряжения и измерить $U_{Фд}$ – данные занести в столбец 4.
 - Установить светофильтр и измерить $U^*_{Фд}$ – данные занести в столбец 5.
4. Уменьшить значение энергии излучения лазера на $4 \div 7\%$ (контроль по показаниям прибора M_1) и заполнить строчку №2 таблицы 2, проведя измерения аналогично п.3.
 - Для получения требуемых зависимостей необходимо провести измерения и заполнить 10-15 строк таблицы 2 при различных значениях энергии лазерного излучения.
 - Данные показать преподавателю.
5. Выключить лазер и измерительные приборы.

Таблица 2. Исследование фотоприемника в фотодиодном режиме работы (отрицательное смещение 2,5 В, сопротивление нагрузки, $R = ?$).

№	$U_{Пл}$, мВ	$I_{рп}$, мА	$U_{Фд}$, мВ	$U^*_{Фд}$, мВ	$\tau = U^*_{Фд} / U_{Фд}$
1	2	3	4	5	6

Обработка результатов измерений

1. Заполнить столбцы 3,6,9 таблиц 1 и 2: рассчитать значения I_{pn} и пропускание фильтра τ при различных значениях энергии лазерного излучения.
2. По данным таблицы 1 построить график зависимости $U_{ФД}$ и τ от тока через р-п переход ($I_{pn} > I_{пор}$) в фотогальваническом режиме работы фотодиода (без смещения) при использовании различных сопротивлений нагрузки (график №1 при $R = 180$ Ом и график №2 при $R = 1500$).
3. По данным таблицы 2 построить график зависимости $U_{ФД}$ и τ от тока через р-п переход ($I_{pn} > I_{пор}$) в фотодиодном режиме (с отрицательным смещением 1,5 В) работы фотоприемника с выбранным сопротивлением нагрузки (график №3).
4. Оценить диапазон линейности фотодетектора при различных режимах его работы.
5. Проанализировать полученные результаты и сделать вывод о возможности использования данного фотодиода при различных схемах его подключения к измерительному прибору.

Список литературы

1. Розеншер Э. Оптоэлектроника : Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; ред. пер. О. Н. Ермаков. - М. : Техносфера, 2006. - 588 с.
2. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.