

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
(КБГУ)

Институт электроники, робототехники и искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП

 Р.Ш. Тешев

«12» февраля 2026 г.



ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Б1.В.ДВ.07.02 «Оптоэлектронные приборы и устройства»

Специальность

11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы

Специализация

Радиоэлектронные системы передачи информации

Квалификация (степень) выпускника

Инженер

Форма обучения

Очная

Нальчик 2025

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Таблица 1

Код и формулировка компетенции	Индикаторы достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУН)
<p>ПК-1. Способен к обработке результатов измерений с использованием средств вычислительной техники, основ математического обеспечения и программирования.</p>	<p>ПК-1.1. Способен проводить анализ и обобщать материал по использованию современных баз данных, технологиям</p>	<p>Знать Способы проведения анализа и обобщения материалов по использованию современных баз данных, технологиям автоматической обработки информации.</p>
	<p>автоматической обработки информации.</p> <p>ПК-1.2. Способен изучать,</p>	<p>Уметь использовать и подключать устройства для расширения возможностей вычислительной техники.</p>
	<p>использовать и подключать устройства для расширения возможностей вычислительной техники</p> <p>ПК-1.3. Способен определять приоритетные методы обработки результатов тестирования и выбирать рациональные условия работы для практического использования радиоэлектронных систем.</p>	<p>Владеть Способами определения приоритетных методов обработки результатов тестирования и выбора рациональных условий работы для практического использования радиоэлектронных систем.</p>

2 Шкала оценивания планируемых результатов обучения

2.1 Текущий контроль

Оценка результатов текущей успеваемости в рамках контрольных точек осуществляется посредством 70-балльной системы, при этом за добросовестное посещение занятий обучающийся может набрать до 10 баллов, за качественное прохождение оценочных мероприятий - до 60 баллов.

Таблица 2

Карта распределения рейтинговых баллов в рамках текущего контроля в 7 семестре

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Лабораторная работа №1 «Исследование характеристик фоторезистора».	экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	7	7-6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 5-4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 3-2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 1-все задания выполнены частично, некоторые из них выполнены неверно. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
2	Лабораторная работа №2 «Исследование фотоэлемента с внешним фотоэффектом Ф-9.».	экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	7	7-6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 5-4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 3-2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 1-все задания выполнены частично, некоторые из них выполнены неверно. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
3	Лабораторная работа №3 «Изучение работы фотодиода».	экспериментальная	Работа включает в себя два задания, выполняется студентами попарно.	7	7-6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 5-4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 3-2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 1-все задания

					выполнены частично, некоторые из них выполнены неверно. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
4	Лабораторная работа №4 «Исследование характеристик фотоэлектронного умножителя ФЭУ-4».	экспериментальная	Работа включает в себя 6 заданий, выполняется студентами попарно.	7	7-6- все задания выполнены верно, выводы по работе обоснованы; 5-4 - все задания выполнены верно, выводы по работе некорректны; 3-2 – задания выполнены частично или одно из заданий выполнено не верно, выводы содержат ошибки. 1-все задания выполнены частично, некоторые из них выполнены неверно. 0 – задания не выполнены или все задания выполнены неверно
5	Тесты 1	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	8	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
6	Тесты 2	с применением ДТ	Студент проходит компьютерное тестирование в ЭИОС.	8	Количество баллов пропорционально количеству правильных ответов
7	Коллоквиум 1	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	8	8-7– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 6-5 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4-3 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 2-1-ответы не на все вопросы, частичные. 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.

8	Коллоквиум 2	письменная	Студенты отвечают письменно на вопросы коллоквиума	8	8-7– ответы полные, точные, демонстрируют глубокое понимание темы, аргументация логична; 6-5 – ответы в основном правильные, но содержат незначительные ошибки; 4-3 – ответы частичные, содержат ошибки или требуют наводящих вопросов; 2-1-ответы не на все вопросы, частичные. 0 – ответы отсутствуют или полностью неверные.
	Итого:			60	

Карта распределения баллов в рамках промежуточной аттестации

№	Оценочное средство	Форма проведения	Порядок проведения	Максимальное количество баллов	Критерии оценивания
1	Билет для зачета	Устный опрос	Билет содержит 2 теоретических вопроса. На теоретические вопросы студент должен ответить устно.	Теоретические вопросы – 30 баллов.	Критерии оценивания теоретических вопросов: 25 до 30 баллов: Глубокий уровень владения материалом, точное знание ключевых концепций, способность анализировать и интерпретировать факты, грамотно строить высказывания, привести примеры, свободно оперировать терминологией. От 19 до 24 баллов: Базовое владение предметом, умение последовательно раскрыть основную мысль вопроса, грамотное применение терминов, наличие существенных элементов анализа и обобщений, но недостаточное развертывание или отдельные неточности. От 13 до 18

					<p>баллов: Частичное освоение материала, попытка объяснить основной смысл вопроса, использование некоторых базовых терминов, но отсутствие глубокого понимания сложных моментов, логические недостатки изложения, отсутствие выводов.</p> <p>От 7 до 12 баллов: Ошибочные представления, слабо выраженное владение основными понятиями, значительные затруднения в интерпретации вопросов, существенные фактологические ошибки, отсутствие обоснованных выводов и примеров.</p> <p>От 0 до 6 баллов: Полное непонимание темы, неспособность сформулировать адекватный ответ, грубые ошибки, несоответствие требованиям задания.</p>
--	--	--	--	--	---

3. Оценочные материалы для текущего и промежуточного контроля успеваемости

3.1. Оценочные материалы для текущего контроля

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ФОТОРЕЗИСТОРА

Цель работы: исследование устройства, характеристик и работы фоторезисторов.

Фоторезистор — полупроводниковый прибор, изменяющий величину своего сопротивления при облучении светом.






Фоторезистор не имеет р-п перехода, поэтому обладает одинаковой проводимостью независимо от направления протекания тока.

Явление изменения электрического сопротивления полупроводника, обусловленное непосредственным действием излучения, называют **фоторезистивным эффектом**, (рис.1).



Рис.1. Внешний вид некоторых типов фоторезисторов.

Фоторезисторы относятся к фотонным приемникам на основе внутреннего фотоэффекта. Принцип их работы построен на взаимодействии квантов падающего на вход фоторезистора оптического излучения и кристаллической решетки полупроводника. В результате данного взаимодействия атомы кристаллической решетки ионизируются и, как следствие, образуются свободные носители зарядов (электроны и дырки), что, в свою очередь, изменяет электропроводность полупроводника. В полупроводниках энергетические состояния свободных и связанных электронов различны, что можно охарактеризовать с помощью энергетической диаграммы, представленной на рис. 2а.

 это максимальная энергия, которой могут обладать электроны полупроводника без примесей в связанном состоянии. Если электрон, имеет энергию ниже , то он связан с атомам и находится в валентной зоне (ВЗ). Уровень  определяет минимальную энергию, которую может иметь свободный электрон. Выше нее лежат возможные значения энергии свободных электронов, образующих зону проводимости (ЗП). Если падающий квант света сообщит свободному электрону энергию большую, чем Δ  (равную $E_c - E_v$), то электрон перейдет из связанного состояния в свободное. Энергия Δ  - это так называемая ширина запрещенной зоны. Ее определяет природа химических связей п/п.

В собственном п/п падающие кванты света освобождают электронно-дырочную пару. Часть энергии переходит в тепло в виде тепловых квантов (фононов). Собственный проводник обладает электронно-дырочной проводимостью. В полупроводнике, имеющем примеси, наблюдается примесная проводимость. В этом случае в запрещенной зоне появляется дополнительный локальный уровень.

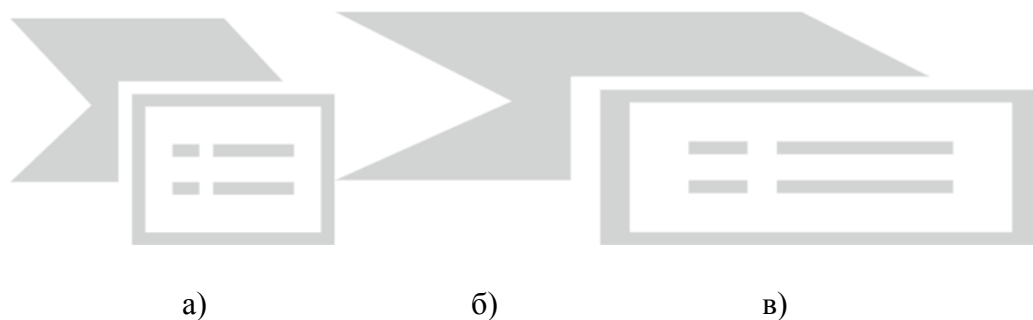





Рис.2. Энергетическая диаграмма (а)собственного полупроводника, (б) полупроводника с акцепторной примесью; (в) полупроводника с донорной примесью.

В примесном полупроводнике под действием света с энергией кванта, превышающей энергию активации примеси Δ , т.е. h  электроны могут переходить с донорных уровней примеси в зону проводимости (рисунок 1.2б) или из валентной зоны на акцепторные уровни примеси. В первом случае возникает электронная проводимость, во втором – дырочная.



Длинноволновая граница спектральной чувствительности полупроводников при внутреннем фотоэффекте определяется как(1.0):

	$\lambda''[\text{мкм}] =$ 	(1.0)
--	---	-------

Основные процессы, лежащие в основе принципа действия фоторезистора, его основные параметры и характеристики.

Фоторезистор обладает начальной темновой проводимостью, т.е. проводимостью без засветки(1.1).

		(1.1)
--	--	-------

где q – заряд электрона;  – концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике в равновесном состоянии;  – подвижность электронов и дырок соответственно. Под действием света в полупроводнике генерируются избыточные подвижные носители заряда, концентрация которых увеличивается на величину Δn и Δp , а проводимость полупроводника изменяется на величину, называемую фотопроводимостью(1.2).

		(1.2)
--	--	-------

При повышении или понижении яркости света, фотопроводимость также будет изменяться. Это явление и лежит в основе принципа действия фоторезистора.

Из основных параметров, характеризующих фоторезистор можно выделить:

Темновое сопротивление – сопротивление фоторезистора в отсутствие освещения. Его принято определять через 30 секунд после затемнения фоторезистора, предварительно находившегося под световым потоком освещенностью 200 лк. Обусловлено это инерционностью опустошения ловушек захвата после прекращения освещения. Температурный коэффициент фототока – это коэффициент, который отражает зависимость изменения параметров фоторезистора при изменении температуры. Он определяется как(1.3):

		(1.3)
--	--	-------

Как уже было сказано выше, под действием света в полупроводнике будет изменяться его проводимость. При этом полный ток через фоторезистор при определенном внешнем напряжении U будет определяться суммой темнового тока (тока, возникающего в полупроводнике в отсутствие освещения), и фототока – дополнительной составляющая

тока, вызванной как раз–таки избыточной концентрацией носителей заряда под действием света(1.4).

		(1.4)
--	--	-------


Темновой ток определяется темновым омическим сопротивлением фоторезистора, и при учете геометрии фоторезистора будет равен:




		(1.5)
--	---	-------

где ω –толщина, d – ширина, l –длина фоторезистора.

В стационарных условиях при освещении фоторезистора получаем:

		(1.6)
--	---	-------

Следовательно, изменение концентрации основных носителей  будет:

		(1.7)
	<p>где  коэффициент поглощения,</p> <p>–квантовый выход (количество неравновесных носителей, которые генерируются при поглощении одного фотона)</p> <p>Φ – световой поток (количество падающих на единицу площади фотонов)</p>	

поскольку темп генерации в случае однородного поглощения света в фоторезисторе будет:

		(1.8)
--	--	-------

При освещении фоторезистора изменение фотопроводимости будет:

		(1.9)
--	---	-------

Исходя из определения токовой чувствительности фоторезистора, находим:

		(1.10)
--	--	--------

Используем для связи светового потока Φ и мощность оптического излучения P , при энергии кванта $h\nu$ соотношение:

	$\Phi = \frac{P}{h\nu}$	(1.11)
--	-------------------------	--------

Подставляя полученное выражение в (1.10), находим выражение токовой чувствительности фоторезистора:

		(1.12)
--	--	--------

Но чаще, для характеристики фоторезистора все-таки используют такой параметр, как удельная интегральная чувствительность:

		(1.13)
--	---	--------

Основные характеристики фоторезистора:

Вольт-амперная характеристика фоторезистора представляет собой линейную зависимость светового тока от напряжения, приложенного к выводам, при различных значениях освещения (Рис. 3). Из графика видно, что с увеличением освещения, значение фототока также увеличивается. Это связано с избыточной генерацией носителей заряда. При $\Phi = 0$ наклон характеристики определяется темновым сопротивлением фоторезистора. В рабочем диапазоне напряжения на ВАХ фоторезисторов при различных освещенностях почти линейны. Тем не менее, у большинства пленочных фоторезисторов, а также у фоторезисторов с ЧПЭ из поликристаллического п/п ВАХ теряет нелинейность уже при малых напряжениях. При малых напряжениях ВАХ может быть квадратичной из-за потенциальных барьеров контактах между отдельными зернами или кристаллами полупроводника, между полупроводниковым слоем и выводами фоторезистора. При больших напряжениях разогревается фоторезистивный слой, поэтому ВАХ линейна при заданном световом потоке в ограниченной области напряжений.



Рис. 3. – Вольт-амперная характеристика фоторезистора при различных освещенностях Φ .

Люкс-амперная или световая характеристика, представленная на рис.4 - это зависимость фототока от светового потока Φ при постоянном напряжении $U = \text{const}$. При малых значениях Φ характеристика имеет линейный вид, но при дальнейшем увеличении Φ , рост замедляется. Это объясняется возрастанием рекомбинации носителей заряда через ловушки и уменьшения их времени жизни.



Рис. 4 – Люкс-амперная (световая) характеристика фоторезистора.

Спектральная характеристика – это зависимость фототока от длины волны λ падающего на вход фоторезистора излучения (Рис. 5).

При больших λ , т. е. при малых энергиях фотонов по сравнению с Δ п/п, энергии фотона оказывается недостаточно для перехода электрона из ВЗ в ЗП. Поэтому для каждого фоторезистора вводят понятие пороговой длины, которая обычно определяется как λ , соответствующая спаду на 50%. При малых λ с уменьшением λ падающего на вход фоторезистора света увеличивается коэффициент поглощения. Этим объясняется уменьшение глубины проникновения фотонов в п/п - большая часть неравновесных носителей заряда возникает вблизи входа фоторезистора. При этом увеличивается влияние поверхностной рекомбинации и уменьшается среднее время жизни неравновесных носителей. Таким образом, спектральная характеристика имеет спад и при малых длинах волн.

Различные полупроводники обладают различной Δ , поэтому, в зависимости от выбранного п/п материала, фоторезистор будет иметь различную избирательную спектральную чувствительность. Фоторезисторы на основе CdS и CdSe проявляют спектральную чувствительность к видимому и ультрафиолетовому излучению, в то время

как фоторезисторы на основе InSb и CdHgTe – к длинноволновому инфракрасному излучению (рис. 5).



Рис. 5. – Спектральная чувствительность различных фоторезисторов

1 - CdS, 2 - CdS, 3 - PbS, 4-5 – твердый раствор PbS-PbSe, 6 - PbSe, 7 – PbSnTe

Для фоторезисторов характерны малая инерционность и простота их устройства.

Устройство фоторезистора.

На диэлектрическую пластинку нанесен тонкий слой полупроводника с контактами по краям. Полярность источника питания не играет роли. Если облучения нет, то фоторезистор имеет некоторое большое сопротивление R_T , называемое *темновым*. Оно является одним из параметров фоторезистора и составляет 10^6 - 10^7 Ом. Соответствующий ток через фоторезистор называется *темновым током*. При действии излучения с достаточной энергией фотонов на фоторезистор в нем происходит генерация пар подвижных носителей заряда (электронов и дырок), и его сопротивление уменьшается. Для фоторезисторов применяются различные полупроводники, имеющие нужные свойства. Так, например, сернистый свинец наиболее чувствителен к инфракрасным, а сернистый кадмий – к видимым лучам. Фоторезисторы характеризуются *удельной чувствительностью по потоку*, т.е. интегральной чувствительностью (это – отношение фототока к вызвавшему его потоку белого (немонохроматического) света), отнесенной к 1В приложенного напряжения:

$$S_{уд} = I / (\Phi U), \quad (1.14)$$

где: Φ – световой поток.

Обычно удельная чувствительность составляет несколько сотен или тысяч микроампер на вольт-люмен.

К параметрам фоторезисторов кроме темнового сопротивления и удельной чувствительности следует еще отнести максимальное допустимое рабочее напряжение (до 600В), кратность изменения сопротивления (может быть до 500), температурный коэффициент фототока $TK\Phi = \Delta I / (I \Delta T)$. Значительная зависимость сопротивления от температуры, характерная для полупроводников, является недостатком фоторезисторов. Существенным недостатком надо считать также их большую инерционность, объясняющуюся довольно большим временем рекомбинации электронов и дырок после прекращения облучения. Практически фоторезисторы применяются лишь на частотах не

выше нескольких сотен герц или единиц килогерц. Собственные шумы фоторезисторов значительны. Тем не менее, фоторезисторы широко применяются в различных схемах автоматики и во многих других устройствах.

Маркировка и кодировка номиналов

Многие фоторезисторы, представленные в справочнике, имеют старое обозначение, состоящее из двух букв: ФС, последующей буквы, указывающей на материал фоточувствительного элемента (А-PbS, К-CdS, Д-CdSe); цифры — указание на конструктивное оформление фоторезистора, иногда перед цифрой стоит буква Г или П характеризующие конструктивное исполнение, и означающие, что конструкция герметизирована для условий тропического климата и повышенной влажности. (Г — герметизированные, П-пленочные).

Новое обозначение фоторезисторов состоит из букв ФР и номера разработки. Например, ФР-193 Д означает: фоторезистор с номером разработки 193, группы Д. Название типа фоторезисторов складывается из букв и цифр, причем цифры обозначают тип использованного светочувствительного материала. Условное-графическое обозначение фоторезистора на электрических принципиальных схемах представлено на рис.6.

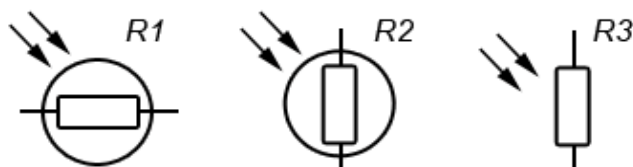


Рис.6. Условное-графическое обозначение фоторезистора на электрических принципиальных схемах.

Классификация фоторезисторов.

<https://thepresentation.ru/uncategorized/fotorezistory-klassifikatsiya-naznachenie-funktsiya-i-oblasti-primeneniya-parametry-i-ih-raschetnye-formuly>

По материалам изготовления фоторезисторы делятся на виды:

- 1) с внутренним фотоэффектом.
- 2) с внешним фотоэффектом.

Они отличаются лишь по технологии производства, а точнее, по составу фоторезистивного слоя. Первые — это фоторезисторы, в которых полупроводник изготавливается из чистых химических элементов, без примесей. Они малочувствительны к видимому свету, однако хорошо реагируют на тепловые лучи (инфракрасный свет).

Фоторезисторы с внешним эффектом содержат примеси, которыми легируют основной состав полупроводникового вещества. Спектр чувствительности у этих датчиков гораздо шире и перемещается в зону видимого спектра и даже в зону УФ излучения.

При изготовлении фотосопротивлений с внутренним фотоэффектом применяют нелегированные вещества: германий или кремний. Фотосопротивления с возникновением внешнего фотоэффекта изготавливают из смешанных материалов, в которые входят легирующие добавки. Несмотря на различные материалы, оба снижают сопротивление при освещении. При повышении интенсивности освещения снижается сопротивление. Поэтому, получается обратная зависимость сопротивления от света, причем нелинейная.

Назначение и области применения

Наиболее широкое применение фоторезисторы нашли в системах автоматики (например, автоматическое включение и выключение уличного освещения в зависимости от времени суток и от уровня рассеянной освещенности при разных погодных условиях).

Также можно выделить такие области, как химическая промышленность, пожарная безопасность большинства предприятий и т.д. Еще одной наиболее известной сферой применения фоторезисторов является нефелометрия (измерение мутности). Принцип определения мутности основывается на зависимости интенсивности освещения от содержания в растворе различных веществ. Фотодетекторами, которые реагируют на изменение интенсивности, в устройствах по определению мутности являются фоторезисторы. Примером могут быть, также, тепловые извещатели пламени инфракрасного диапазона частот. В них фоторезисторы выполняют функцию приемников.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.

Работы по замеру параметров фоторезистора производятся с помощью макета, в котором размещаются фоторезистор и источник света.

Устройство макета.

Макет состоит из корпуса, внутри которого размещены фоторезистор и источник света (6-вольтовая лампочка накаливания), которые расположены друг относительно друга параллельно.

Вывода от этих компонентов размещены на внешней стороне корпуса макета.

Часть 1.

Снятие зависимости тока, протекающего фоторезистор от интенсивности светового потока, падающего на рабочую поверхность фоторезистора.

Оборудование:

- милливольтметр В7-35
- блок питания БП-49
- макет с фоторезистором

Выполнение работы.

Собираем схему измерений согласно рис. 7.

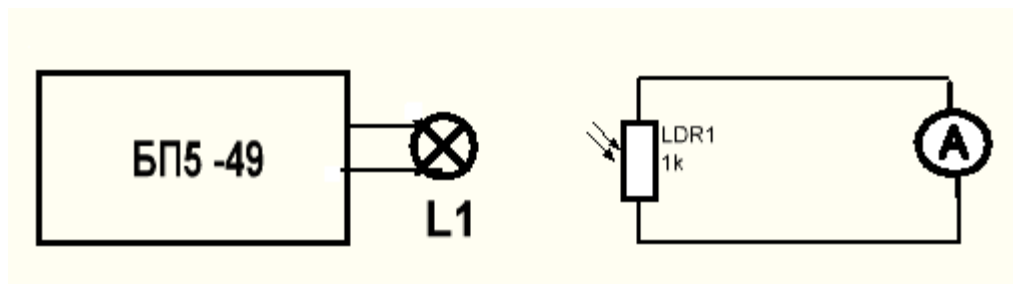


Рис.7. Схема измерений зависимости тока, протекающего фоторезистор от интенсивности светового потока

1. Подключаем к клеммам источника света L1 блок питания БП5-49. Все регулировки прибора должны находиться в минимальном положении. Полярность не соблюдается.
2. Подключаем к клеммам фоторезистора LDR1 миллиамперметр В7-35.
3. Включаем сетевым тумблером миллиамперметр В7-35. Выставляем необходимые параметры для замеров (выбрать параметр «постоянный ток» переключателем с левой стороны прибора и параметры « μA -mA» с правой стороны прибора).
4. Включаем сетевым тумблером блок питания БП5-49. Все регулировки должны быть в минимальном положении.
5. Подаём с прибора БП5-49 напряжение на источник света L1 начиная с 1 вольта до 6 вольт через каждые 0,5 вольта. Получаемые показания на приборе В7-35 записываем в таблицу 1.

Таблица 1.

Иф/р (mA)											
UL1 (В)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0

Полученные данные представляют зависимость тока фоторезистора от напряжения, подаваемого на источник света L1. Для получения зависимости величины фототока от величины освещенности необходимо сделать перерасчет. Для этого надо использовать данные таблицы 2, где представлены зависимости величины освещенности фоторезистора (в люксах – «лк») от напряжения на источнике света L1.

Таблица 2.

Φ (лк)	1.0	2.0	6.5	7	11	15	22	28	
UL1 (В)	3.0	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	

Из таблицы 1 выбираем значения фототока Иф/р(mA), а из таблицы 2 – соответствующие значения освещенности Φ (лк). Из полученных данных составляем таблицу 3.

Таблица 3.

Иф/р (mA)									
Φ (лк)									

По данным таблицы 3 строим график зависимости величины фототока от освещенности фоторезистора

Часть 2.

Построение вольтамперной характеристики фоторезистора.

Оборудование:

-милливольтметр В7-35

-блок питания БП-49

-источник постоянного тока ВИП 009

-макет с фоторезистором

Собираем схему замеров параметров вольтамперной характеристики фоторезистора(рис.8).

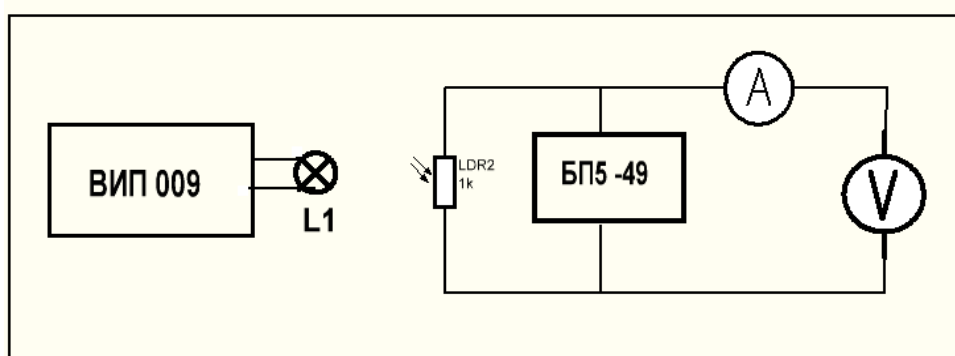


Рис.8. Схема замеров параметров вольтамперной характеристики фоторезистора.

Замеры производятся при постоянной освещенности фоторезистора. Напряжение на источник света выставляем 4 вольт на прибор ВИП 009.

Подключаем в прибору БП5- 49 выводы фоторезистора. Подаём напряжение на фоторезистор от 1вольта до 6 вольт, через 1 вольт. Результаты заносим в таблицу 4.

Иф/р(μА)							
Uф/р(В)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	

По данным таблицы 4 строим график вольтамперной характеристики фоторезистора.

Полученные данные представить в отчете по работе.

Работа считается выполненной после предъявления отчёта по работе.

Контрольные вопросы

1. Условно-графические и буквенные обозначения фоторезисторов на электрических принципиальных схемах.
2. Объяснить механизм работы фоторезистора.
3. Объяснить механизм внутреннего фотоэффекта.

4. Где применяются фоторезисторы.
5. Объяснить устройство фоторезистора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТА С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ Ф-9

Цель работы: изучить принцип действия фотоэлемента Ф-9.

Фотоэлектрическими приборами называют преобразователи лучистой энергии, благодаря которой изменяются электрические свойства вещества, образующего данный прибор. Эти приборы делятся на два типа: с внешним и внутренним фотоэффектом.

Суть внешнего фотоэффекта состоит в том, что при облучении фотокатода светом возникает явление фотоэлектронной эмиссии. При этом ток фотоэмиссии прямо пропорционален световому потоку (закон Столетова):

$$I_{\phi} = k\Phi,$$

где I_{ϕ} – ток фотоэмиссии, мкА; Φ – световой поток, лм; k – интегральная чувствительность фотокатода. Интегральная чувствительность равна значению фототока, вызванного световым потоком стандартного источника белого света в 1 лм.

Главные закономерности фотоэффекта были выведены А. Эйнштейном на основе фотонной теории света. Согласно этой теории, лучистая энергия излучается и поглощается не как непрерывный поток, а определенными порциями – квантами. Каждый квант (фотон) в зависимости от частоты излучения ν обладает определенным количеством энергии:

$$W = h\nu,$$

где $h = 6,66 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Когда поток фотонов падает на фотокатод, энергия фотонов передается свободным электронам, которые, совершая определенную работу выхода W_0 , покидают катод с начальной скоростью U_0 . Этот процесс описывается уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = W_0 + \frac{m_e U_0^2}{2}.$$

Из уравнения Эйнштейна следует, что электрон может покинуть катод, если работа выхода меньше энергии кванта.

Суть внутреннего фотоэффекта состоит в том, что в полупроводнике под действием световой энергии возникают подвижные носители зарядов: пары электронов и дырок. При этом энергия фотона идет на перемещение электрона из валентной зоны в зону проводимости и сопротивление полупроводника уменьшается.

Фотоэлементами с внешним фотоэффектом называются электронные приборы, работа которых основана на явлении фотоэлектронной эмиссии с катода. Фотоэлемент монтируется в стеклянной колбе, внутри которой, как и в электронных лампах, создается вакуум. Фотокатодом 1 элемента (рис. 1) является тонкий слой светочувствительного материала (щелочноземельного металла), которым покрыто около 50 % внутренней

поверхности колбы. Анодом фотоэлемента 2 является кольцо из тонкой никелевой проволоки, что обеспечивает свободное поступление света на фотокатод. На рис. 2 представлена схема включения фотоэлемента, которая служит для преобразования светового потока в сигнал постоянного напряжения (тока). При освещении фотокатода в цепи появляется фототок I_{ϕ} , проходящий через сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$. Так как, значение I_{ϕ} прямо пропорционально световому потоку, то выходное напряжение $U_{\text{н}} = K I_{\phi} R_{\text{н}}$.

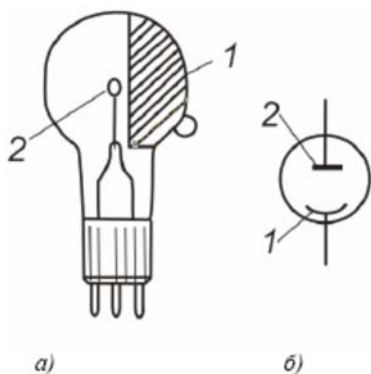


Рис. 1. Устройство а) и условное изображение фотоэлемента б)

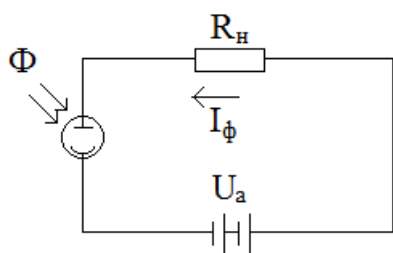


Рис. 2. Схема включения вакуумного фотоэлемента

Интегральная чувствительность электронных фотоэлементов с кислородно-цезиевым катодом составляет 20–60 мкА/лм, с сурьмяно-цезиевым – 80–180 мкА/лм. Для правильной эксплуатации фотоэлементов необходимо знать их спектральные характеристики, ход которых показан на рис.3.

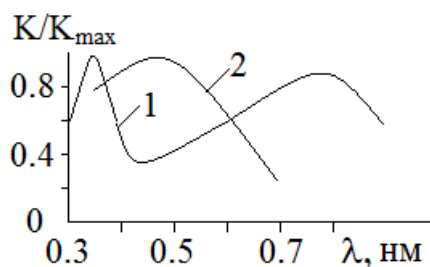


Рис.3. Спектральные характеристики

Вольтамперные характеристики, приведенные на рис. 4, дают возможность судить о зависимости фототока I_{ϕ} от анодного напряжения $U_{\text{а}}$ при различных значениях светового потока Φ . Видно, что в режиме насыщения фототок не зависит от анодного напряжения. Этот режим и является рабочим. Электронные фотоэлементы широко применяются в различных

областях науки и техники. В частности, их применяют в фотореле, которые обеспечивают контроль различных величин на производстве: освещенности, прозрачности сред, качества обработки поверхности деталей и т. п.

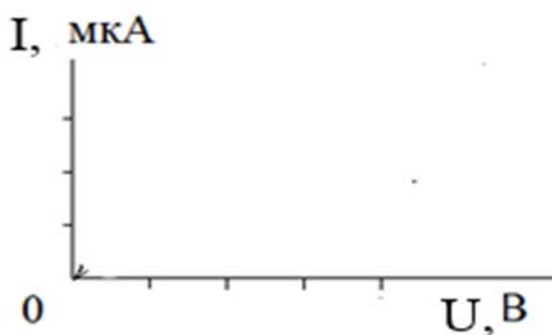
Выполнение работы

1 часть.

1. Собрать схему согласно рис.5.
2. Установите на блоке питания БП (Б5-49) напряжение 10 В.
3. Изменяя напряжение на блоке питания БП (Б5-49) с шагом 10 В от 10 до 100 В измерьте ток фотозлемента и занесите в таблицу №1.
4. Построить график зависимости $I(\text{мкА})$ от $U(\text{В})$

Таблица 1

U (В)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
I (мкА)									

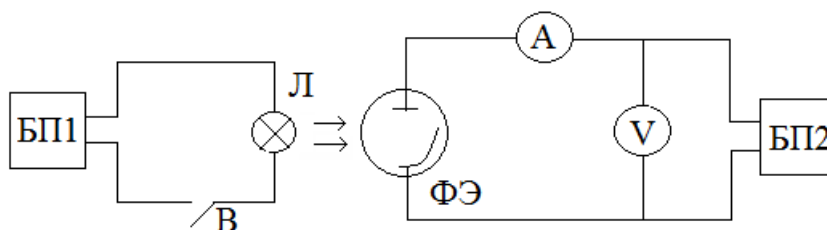
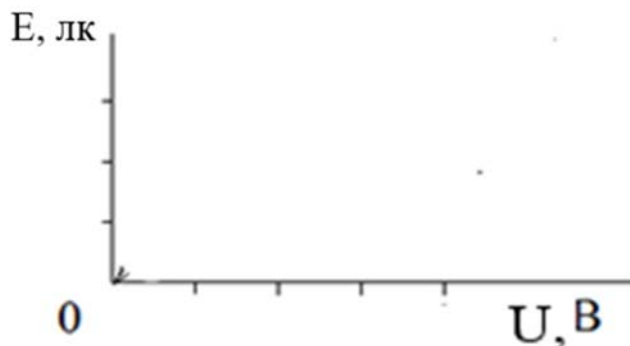


2 часть

1. Аналогичные измерения проводим и для полупроводникового фотозлемента.
2. Изменяя напряжение измерьте показания освещенности и занесите в таблицу №2.
3. Построить график зависимости $E(\text{лк})$ от $U(\text{В})$.

Таблица 2

U (В)										
E(лк)										



Контрольные вопросы

1. Дать определение фотоэлектрическим приборам.
2. Суть внешнего фотоэффекта.
3. Суть внутреннего фотоэффекта.
4. Законы фотоэффекта.
5. Устройство принцип действия фотоэлемента.
6. Вольтамперная характеристика и световая характеристика фотоэлементов.
7. Области применения фотоэлемента.
8. Обозначения фотоэлемента.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ФОТОДИОДА

Цель работы: изучение устройства, основных характеристик и работы фотодиодов.

Фотодиоды представляют собой полупроводниковые диоды, в которых используется внутренний фотоэффект (рис.1). Световой поток управляет обратным током фотодиодов. Под воздействием света на электронно-дырочный переход и прилегающие к нему области происходит генерация пар носителей заряда, проводимость диода возрастает и обратный ток увеличивается.



Рис.1. Внешний вид некоторых типов фотодиодов.

Принцип действия фотодиода. Простой фотодиод является обыкновенным полупроводниковым диодом с р-п-переходом, на который оказывает действие оптическое излучение. При полном отсутствии светового потока, диод находится в состоянии равновесия и обладает обычными свойствами.

ФотоЭДС на р-п-переходе

При поглощении света непосредственно изменяются только концентрации электронов и дырок. Для возникновения фотоэлектродвижущих сил необходимо разделение зарядов в пространстве. Особенно эффективное разделение неравновесных носителей имеет место в неоднородном полупроводнике и, в частности, в электронно-дырочных переходах.

В области р-п-перехода существует объемный заряд и объемное поле \mathcal{E}_k , направленное от п-области к р-области. Электроны и дырки, генерируемые в п-области и р-области на расстояниях, не превышающих длин диффузии L_p и L_n соответственно от области объемного заряда, будут разделены полем \mathcal{E}_k так, что неравновесные электроны будут переведены в п-область, а дырки в р-область, т. е. контактное поле способствует переходу через область объемного заряда неосновных носителей.

Электронная область заряжается отрицательно, дырочная - положительно. Если такой полупроводник включить в замкнутую цепь, то в ней потечет ток, направленный от р-области к п-области, приводящий к уничтожению избыточной концентрации электронов и дырок. Из самого механизма возникновения полей следует, что максимальная фотоЭДС на р-п-переходе не может превзойти величину контактной разности потенциалов. Энергетические диаграммы освещенного и неосвещенного р-п-переходов приведены на рис. 2 (для случая, когда освещается р-область). Полупроводниковый прибор, использующий эффект разделения неравновесных носителей, создаваемых светом, полем р-п-перехода, является фотодиодом.

Величина тока короткого замыкания I_f определяется числом неравновесных пар, разделенных полем р-п-перехода. Отсюда

$$(1)$$

Где:

L – длина диффузии носителей;

β – квантовый выход (величина безразмерная);

k – коэффициент поглощения

η - коэффициент собирания, определяющий долю носителей, дошедших до р-n-перехода.

Из основного уравнения фотодиода


$$(2)$$

Где: I_s - ток насыщения через р-n -переход, а I - ток во внешней цепи, следует, что напряжение разомкнутой цепи V определяется следующим выражением


$$(3)$$

Из формулы(3) получается логарифмическая зависимость V от интенсивности освещения:

$$(4)$$

где B - не зависящий от L коэффициент.

Из (3) и (4) следует, что спектральной характеристикой фотодиода является либо спектральная зависимость тока короткого замыкания I_f , либо спектральная зависимость фотоэдс в режиме малого сигнала

$$(5)$$

Спектральная зависимость фотоэффекта на р-n-переходе подобна спектральной зависимости ФП, так как возникновение обоих явлений связано с поглощением света и образованием электронно-дырочных пар. Однако необходимо учитывать, что в примесной области возникновение фотоэффекта возможно лишь в том случае, если при поглощении генерируются неосновные носители.

Рис. 2. Энергетические диаграммы неосвещенного (а), освещенного разомкнутого (б) и освещенного короткозамкнутого (в) $p-n$ -перехода.

Действие излучения направлено перпендикулярно относительно плоскости, где расположен $p-n$ -переход(рис.3). Энергия, с которой поглощаются фотоны, превышает ширину запрещенной зоны, что приводит к возникновению электронно-дырочных пар. Данные пары, состоящие из электронов и дырок, получили наименование фотоносителей. Когда фотоносители проникают внутрь n -области, электроны и дырки, в основной массе не успевают распасться на составляющие и подходят непосредственно к границе $p-n$ -перехода. В этом месте происходит разделение фотоносителей с помощью электрического поля. В результате, дырки попадают в p -область. Электроны же не в состоянии пройти через поле, окружающее переход, поэтому начинается их скапливание возле n -области и у границы перехода. Таким образом, прохождение тока через переход полностью зависит от движения дырок. Данный вид тока с участием фотоносителей получил название фототока. Под воздействием фотоносителей-дырок в p -области по отношению к n -области возникает положительный заряд. Таким же образом, n -область заряжается отрицательно относительно p -области. Происходит возникновение разности потенциалов, именуемой фото-ЭДС. Ток, сгенерированный в фотодиоде, имеет обратное значение и направление от катода к аноду. Величина этого тока возрастает в зависимости от увеличения степени освещенности. Работа фотодиодов может осуществляться в двух режимах. В первом случае используется фотогенераторный режим, не предусматривающий внешний источник электроэнергии. В режиме фотопреобразователя необходимо использование внешнего источника электроэнергии. Режим фотогенератора позволяет использовать фотодиоды как источники питания, преобразующие солнечное излучение в электрическую энергию. Они используются в качестве элементов солнечной батареи. Коэффициент полезного действия элементов на основе кремния составляет примерно 20%. КПД у пленочных конструкций может быть значительно выше.

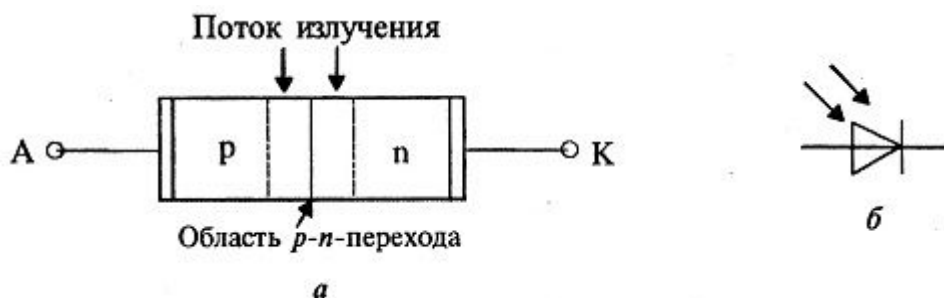


Рис.3. Схематичное представление фотодиодов

Фотодиоды с черным корпусом воспринимают только ИК-излучение. Черное покрытие – это что-то похожее на тонировку. Фильтрует ИК-спектр, чтобы исключить возможность срабатывания на излучения других спектров.

У фотодиодов, как и у фоторезисторов есть граничная частота, только здесь она на порядки больше и достигает 10 МГц, что позволяет обеспечить неплохое быстродействие. P-i-N фотодиоды обладают большим быстродействием – 100МГц-1ГГц, как и диоды на основании барьера Шоттки. Лавинные диоды имеют граничную частоту в порядке 1-10 ГГц.

В режиме фотопреобразователя такой диод работает как ключ управляемый светом, для этого его подключают в цепь в прямом смещении. То есть, катодом к точке с более положительным потенциалом (к плюсу), а анодом к более отрицательному (к минусу).

Когда диод не освещается светом – в цепи протекает только обратный темновой ток $I_{обрт}$ (единицы и десятки мкА), а когда диод освещен к нему добавляется фототок, который зависит только от степени освещенности (десятки мА). Чем больше света – тем больше ток.

В зависимости от схемы включения фотодиод может работать в двух режимах(рис 4 и 5).

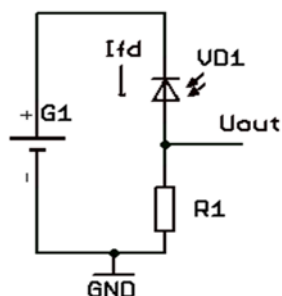


Рис.4. Типовая схема включения фотодиода в режиме фотопреобразователя. Он подключен – в обратном направлении по отношению к источнику питания.

Другой режим – генератор. При попадании света на фотодиод на его выводах образуется напряжение, при этом токи короткого замыкания в таком режиме равняются десятки ампер. Это напоминает работу элементов солнечной батареи, но имеют малую мощность.

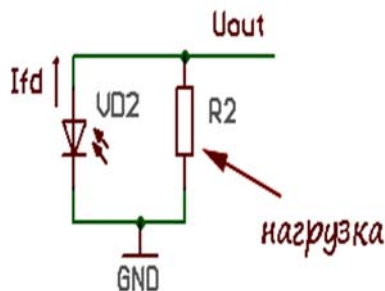


Рис.5. Схема включения фотодиода в режиме генератора.

В работе фотодиодом нередко используется свойство обратимого электрического пробоя. В результате, количество носителей заряда умножается лавинообразно, по аналогии с полупроводниковыми стабилитронами. Происходит значительный рост фототока и чувствительности фотодиодов. Данное значение превышает обычные параметры в сотни раз. Частота лавинных фотодиодов достигает величины до 10 ГГц, что позволяет использовать их в качестве быстродействующих фотоэлектрических приборов. Единственным недостатком этих устройств является повышенный уровень шума. Фотодиоды очень часто используются в паре со светодиодами. Они размещаются в общем корпусе, при этом, расположение светочувствительной площадки фотодиода наиболее оптимально к излучающей светодиодной площадке. Данные

приборы получили название оптронов. Электрические связи совершенно не касаются входных и выходных цепей, поскольку сигналы передаются путем оптического излучения. Существует несколько разновидностей фотодиодов. У *лавинных фотодиодов* происходит лавинное размножение носителей в р-п-переходе и за счет этого в десятки раз возрастает чувствительность. В *фотодиодах с барьером Шотки* имеется контакт полупроводника с металлом. Это диоды с повышенным быстродействием. Все фотодиоды могут работать и как генераторы ЭДС в фотопереходном режиме.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Оборудование:

- источник питания ВИП-009
- вольтметр цифровой В7-35
- макет с фотодиодом

УСТРОЙСТВО МАКЕТА

В корпусе макета размещается фотодиод и источник света (лампочка накаливания, рассчитанная на напряжение 6 вольт). Вывода фотодиода, размещенные на корпусе макета обозначены знаками \oplus \ominus , обозначающие полярность. При соединении выводов макета с измерительными приборами и источником питания необходимо соблюдать полярность.

1. Исследование фотодиода в фотогенераторном режиме.

Собираем схему измерений согласно рис.6.

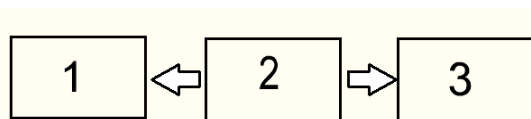


Рис.6. Схема соединения макета с приборами:

- 1 – источник питания ВИП – 009
- 2 – макет с фотодиодом и источником света
- 3 – вольтметр цифровой В7 – 35.

Подключаем приборы ВИП 009 и В37 35 к сети 220 вольт. Сетевыми тумблерами включаем приборы. С помощью соединительных проводов соединяем выводы макета с приборами ВИП 009 и В37 35. Для выводов от фотодиода полярность соблюдать обязательно. Для лампочки накаливания – безразлично.

Изменяя положение регулировок прибора ВИП – 009 (фиксация величины подаваемого на фотодиод напряжения осуществляется вольтметром, размещенным на лицевой панели прибора) подаём на лампочку накаливания напряжения от 1.0 до 4.0 вольт через каждые 0,5 вольт. С прибора В7-35 считываем соответствующие показания фототока I_{ϕ} .

Полученные данные заносим в таблицу №1.

Таблица №1. Зависимость величины фототока от яркости свечения источника света.

U(B)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
I_{ϕ} (mA)								

По данным таблицы 1 строим график зависимости величины фототока от яркости свечения источника света(опосредовано – от величины напряжения накала лампочки).

2. Исследование фотодиода в фотодиодном режиме(построение вольтамперной характеристики фотодиода).

Собираем схему измерений согласно рис.7.

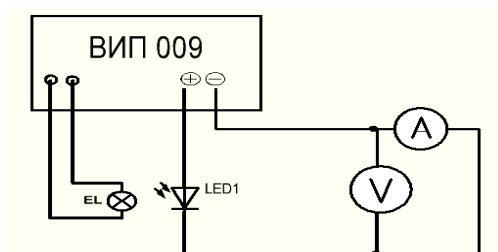


Рис.7. Схема измерений параметров фотодиода.

Собираем схему измерений параметров фотодиода согласно рис.2. При этом – вольтметры, указанные на схеме(рис.2), встроены в прибор ВИП 009 и располагаются на лицевой панели прибора. В качестве амперметра используется прибор В7-35. Подключить приборы к сети 220вольт, включить.

-Сначала снимаем отрицательную ветвь фотодиода при различных освещенностях. Поэтому полярность подключения фотодиода обратная: плюс прибора ВИП-009 соединяем к минусу фотодиода. Подаём это отрицательное напряжение от -9 вольт до нуля. Замеры фототока производим через 1 вольт. Замеры повторить 3 раза(при трёх различных освещенностях: при напряжениях накала лампочки освещения 2, 3 и 4вольт). Полученные данные заносим в таблицу 2.

Таблица 2. Зависимость фототока фотодиода от обратного напряжения.

Uобр(В)									
I ф (mA)									

-Для замеров положительной ветви вольтамперной характеристики фотодиода необходимо подавать на него положительное напряжение, т.е. производим переподключение подаваемого на фотодиод напряжения. Подаём напряжение от 0 до 9 вольт при различных освещенностях – как выполнялось ранее.

Таблица 3. Зависимость фототока фотодиода от прямого напряжения.

U(В)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
Iф (mA)									

По данным таблиц №№2 и 3 строим график зависимости фототока фотодиода от прилагаемого напряжения(ВАХ).

Полученные результаты оформляются в виде отчета и предъявляются преподавателю.

Контрольные вопросы

1. Объяснить механизм работы фотодиодов.
2. Условно-графические и буквенные обозначения фотодиодов на электрических принципиальных схемах.
3. Объяснить механизм внешнего фотоэффекта.
4. Назвать область применения фотодиодов.

5. Объяснить устройство фотодиода.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ ФЭУ-4

Закономерности внешнего фотоэлектрического эффекта

При описании внешнего фотоэффекта используется следующая терминология. Свободные электроны, вышедшие под действием светового излучения из кристаллической решетки твердого тела в вакуум, называют *фотоэлектронами*, а электрод, из которого они выходят, – *фотокатодом*.

Если рядом с фотокатодом в вакууме поместить электрод, к которому приложить положительный относительно фотокатода потенциал, то этот электрод будет собирать фотоэлектроны и во внешней цепи потечет электрический ток. Положительный электрод получил название *анода*, а вакуумный прибор, состоящий из двух электродов, – *вакуумного фотодиода*, или *фотоэлемента*. Существуют и более сложные вакуумные приборы, использующие фотокатод в качестве источника свободных электронов. К ним относятся фототриоды, фотоэлектронные коммутаторы, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и др.

Экспериментальные исследования позволили установить основные закономерности, которым подчиняется внешний фотоэлектрический эффект в области слабых световых потоков.

1. При фиксированной частоте излучения ($\omega = \text{const}$) величина тока фотоэлектронов на анод в режиме насыщения (т. е. когда все эмитируемые электроны достигают анода) прямо пропорциональна интенсивности падающего на поверхность катода света (закон Столетова).

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от плотности потока излучения, т. е. от амплитуды электрического вектора световой волны. Она линейно зависит от частоты света ω .

3. Для каждого материала, из которого сделан фотокатод, существует длина волны излучения λ_0 , при превышении которой фотоэмиссия электронов полностью прекращается. Эту длину волны называют *красной границей* фотоэффекта, а соответствующую ей частоту $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ – *красной частотой*.

Физический механизм внешнего фотоэлектрического эффекта

Для объяснения явления внешнего фотоэффекта А. Эйнштейн предположил, что поток энергии в пучке монохроматического света состоит из дискретных порций, называемых *квантами*, или *фотонами* (корпускулярная теория света). Энергия фотона для света с частотой ω равна $h\omega$, где $h = 1,05 \times 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка. При столкновении фотона со связанным электроном последний может полностью поглотить всю энергию фотона. Если энергия электрона достаточно велика, то он может преодолеть силы связи, удерживающие его в металле, и выйти из вещества.

Закон сохранения энергии для процесса столкновения двух частиц можно записать в виде

$$\hbar\omega \tag{1}$$

Здесь V_{\max} – максимальная скорость электрона непосредственно после выхода его из металла, Φ – работа выхода. Соотношение (1) называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*. Оно позволяет объяснить особенности внешнего фотоэлектрического эффекта.

Число фотонов, падающих в единицу времени на нормальную единичную площадку поверхности фотокатода (N_f), линейно зависит от интенсивности света (I):

$$N_f = I/\hbar\omega \tag{2}$$

Число вышедших в вакуум в единицу времени электронов N_e прямо пропорционально плотности потока фотонов:

$$N_e = \gamma N_f \tag{3}$$

из чего следует закон Столетова для фотоэффекта. Действительно, ток фотоэлектронов в режиме, когда они все собираются анодом фотоэлемента, выражается в следующем виде:

$$I_n = eN_e$$

С учетом выражений (2) и (3) получаем

$$I_n = \frac{e}{\hbar\omega} \gamma I = (const) \cdot I$$

Поглотившие кванты излучения электроны выходят из кристаллической решетки в вакуум с различными значениями кинетической энергии. Это связано с тем, что внутри твердого тела электроны находятся на различных энергетических уровнях в соответствии с квантовой статистикой Ферми–Дирака. Кроме того, возникающие фотоэлектроны случайным образом теряют энергию при различных взаимодействиях. Минимумом энергетических затрат при выходе фотоэлектрона из металла в вакуум является энергия, которая необходима электрону, находящемуся на самом верхнем уровне в зоне проводимости, для преодоления потенциального барьера на границе металл–вакуум. Из соотношения (1) непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия, с которой фотоэлектрон покидает твердое тело, линейно растет с частотой света (энергией фотонов) и не зависит от его интенсивности (числа фотонов).

Уравнение Эйнштейна позволяет определить красную границу фотоэффекта. Действительно, кинетическая энергия электрона лишь тогда будет больше нуля, когда энергия фотона $\hbar\omega$ превышает работу выхода электрона из металла ϕ . Отсюда следует, что для каждого вещества существует граничная частота $\omega_0 = \phi/\hbar$, такая, что при $\omega < \omega_0$ фотон уже не сможет обеспечить выход электрона в свободное пространство.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) электровакуумный прибор, в котором поток электронов, эмитируемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в 10^5 раз и выше). Впервые был предложен и разработан Л. А. Кубецким в 1930–1934 гг.

Для счёта сцинтилляций обычно используются два типа фотоумножителей: с круговой электростатической фокусировкой и линейные электростатические без фокусировки. В умножителях первого типа диоды расположены по кругу; они представляют собой пластины, выгнутые в форме корыт. Другой тип ФЭУ имеет ряд параллельных диодов, состоящих из узких твёрдых активированных полос, расположенных в форме жалюзи.



Рис.1. Внешний вид ФЭУ

Фотоны, возникшие в сцинтилляторе под действием заряженной частицы, по светопроводу достигают ФЭУ и через его стеклянную стенку попадают на фотокатод.

ФЭУ представляет собой баллон (рис.1), внутри которого в вакууме располагается фотокатод и система последовательных диодов, находящихся под положительным увеличивающимся от диода к диоду электрическим потенциалом.

Для целей спектрометрии ядерных излучений фотокатод обычно располагается на внутренней поверхности плоской торцевой части баллона ФЭУ. В качестве материала фотокатода выбирается вещество достаточно чувствительное к свету, испускаемому сцинтилляторами. Наибольшее распространение получили сурьмяно-цезиевые фотокатоды, максимум спектральной чувствительности которых лежит при $\lambda = 390, 420$ нм, что соответствует, максимумам спектров люминесценции многих сцинтилляторов. Одной из характеристик фотокатода является его квантовый выход, т. е. вероятность вырывания фотоэлектрона фотоном, попавшим на фотокатод. Свойства фотокатода характеризуются также интегральной чувствительностью, представляющей собой отношение фототока (μA) к падающему на фотокатод световому потоку ($лм$).

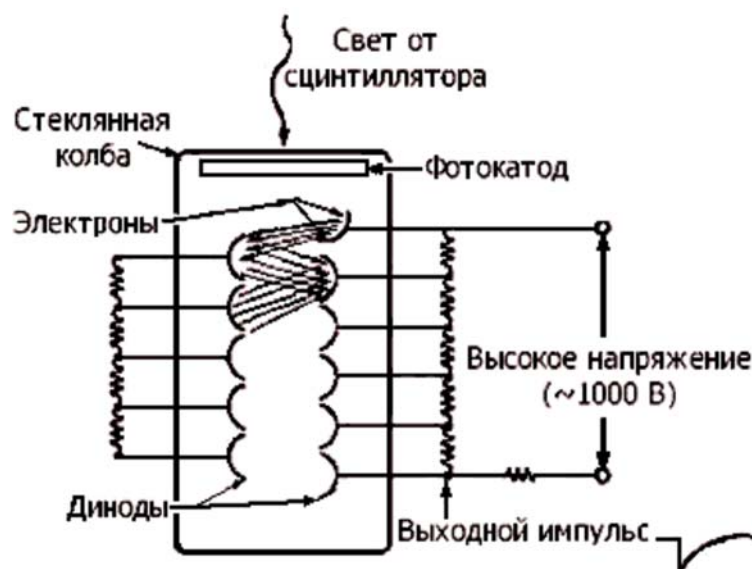


Рис. 2. Устройство ФЭУ

Фотокатод (рис.2) наносится на стекло в виде тонкого полупрозрачного слоя. Существенна толщина этого слоя. С одной стороны, для большого поглощения света она должна быть значительной, с другой стороны, возникающие фотоэлектроны, обладая очень малой энергией не смогут выходить из толстого слоя и эффективный квантовый выход может оказаться малым. Поэтому подбирается оптимальная толщина фотокатода. Существенно также обеспечить равномерную толщину фотокатода, чтобы его чувствительность была одинакова на всей площади. В сцинтилляционной спектроскопии часто необходимо использовать твердые сцинтилляторы больших размеров, как по толщине, так и по диаметру. Поэтому возникает необходимость изготавливать ФЭУ с большими диаметрами фотокатодов. В отечественных ФЭУ фотокатоды делаются с диаметром от нескольких сантиметров до 15,20 см. фотоэлектроны, выбитые из фотокатода, должны быть сфокусированы на первый умножительный электрод. Для этой цели используется система электростатических линз, которые представляют собой ряд фокусирующих диафрагм. Для получения хороших временных характеристик ФЭУ важно создать такую фокусирующую систему, чтобы электроны попадали на первый динод с минимальным временным разбросом.

На рис. 2 приведено схематическое устройство фотоэлектронного умножителя. Высокое напряжение, питающее ФЭУ, отрицательным полюсом присоединяется к катоду и распределяется между всеми электродами. Разность потенциалов между катодом и диафрагмой обеспечивает фокусировку фотоэлектронов на первый умножающий электрод. Умножающие электроды носят название динодов. Диноды изготавливаются из материалов, коэффициент вторичной эмиссии которых больше единицы ($\sigma > 1$). В отечественных ФЭУ диноды изготавливаются либо в виде корытообразной формы (рис. 2), либо в виде жалюзи. В обоих случаях диноды располагаются в линию. Возможно также и кольцеобразное расположение динодов. ФЭУ с кольцеобразной системой динодов обладают лучшими временными характеристиками. Эмитирующим слоем динодов является слой из сурьмы и цезия или слой из специальных сплавов.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Световой поток от источника (1) собирается на входном окне фотоумножителя. Полученное таким образом излучение падает на катод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В качестве источника света в работе используется лампа накаливания. При получении вольтамперных характеристик фотоумножителя электронный ток регистрируется вольтметром с высоким входным сопротивлением, подключенным к аноду ФЭУ.

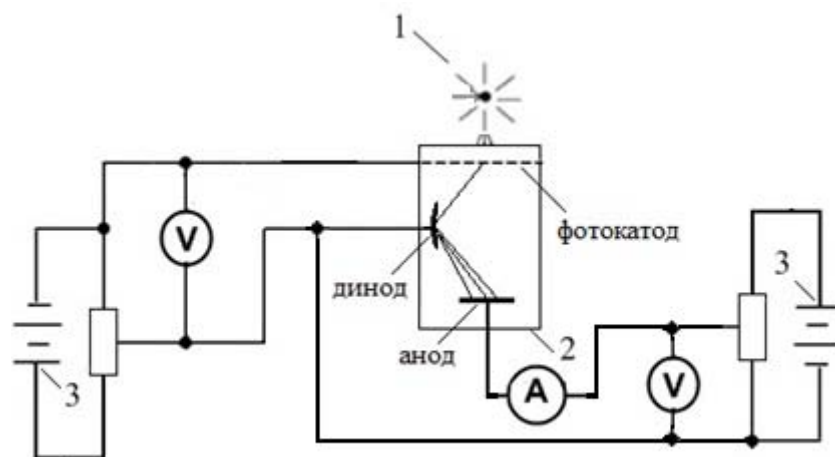


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1- источник света; 2- стеклянный баллон ФЭУ-4; 3- блоки питания

Порядок выполнения работы

В данной работе используется фотоумножитель ФЭУ-4 с мультищелочным фотокатодом. Это химическое соединение $Na_2KSb - Cs$, обладающее отчетливо выраженными полупроводниковыми свойствами. В зависимости от знака приложенного к фотокатоду напряжения, фотоэлектроны, выбитые квантами света из фотокатода, будут либо ускоряться и попадать на первый динод, либо тормозиться. При некотором положительном потенциале на фотокатоду наблюдается полное запираение ФЭУ, и прибор перестает реагировать на засветку. Электроны, достигшие динода, выбивают из него вторичные электроны. Через резистивный делитель к диноду прикладывается максимальное напряжение 150 В.

Порядок выполнения работы

1. Включите блоки питания, вольтметр Ф-203.
2. Снимите вольтамперную характеристику меняя анодное напряжение с шагом 10 В при нулевом диодном напряжении.
3. Установите заданное преподавателем анодное напряжение и снимите вольтамперную характеристику меняя диодное напряжение с шагом 10 В.
4. По результатам измерений постройте графики зависимости анодного тока от анодного и диодного напряжения.
5. Зная величину светового потока 50 лм определите световую чувствительность по формуле $L=I_a/\Phi$, где I_a – анодный ток, Φ – световой поток.

6. Измеряя анодный ток при нулевом напряжении на диноде и напряжении на диноде 150 В при заданном преподавателем анодном напряжении определите коэффициент умножения К.

Вопросы для тестирования

I:

S: Вследствие чего происходит в р-п переходе диффузия дырок в п-область, а электронов в р-область при равновесии?

-: экстракции

+: градиента концентрации

-: дрейфа

-: инъекций

I:

S: Что является ограничивающим фактором диффузии в р-п переходе?

-: внешнее электрическое поле ОПЗ

-: внутреннее и внешнее электрическое поле ОПЗ

-: ограничивающего фактора диффузии в р-п переходе нет

+: электрическое поле ОПЗ

I:

S: Как изменяется ОПЗ при прямом смещении?

+: уменьшается

-: увеличивается

-: не изменяется

-: в начале уменьшается, затем увеличивается

I:

S: Почему уменьшается ОПЗ при прямом смещении?

-: происходит экстракция

-: происходит диффузия

-: результирующая полей увеличивается, а также происходит рекомбинация

+: результирующая полей уменьшается, а также происходит рекомбинация

I:

S: Как изменяется ОПЗ при обратном смещении?

-: уменьшается

+: увеличивается

-: не изменяется

-: в начале уменьшается, затем увеличивается

I:

S: Почему увеличивается ОПЗ при обратном смещении?

-: происходит диффузия

-: происходит инжекция

-: результирующая полей уменьшается, а также происходит оттягивание ННЗ

+: результирующая полей увеличивается, а также происходит оттягивание ННЗ

I:

S: Что происходит при прямом смещении в р-п переходе?

-: экстракция

+: инжекция

-: экстракция и инжекция

-: дрейф НЗ

I:

S: Что происходит при обратном смещении в р-п переходе?

-: - инжекция

+: экстракция

-: экстракция и инжекция

-: дрейф НЗ

I:

S: Что происходит в р-п переходе при равновесии?

-: экстракция

+: диффузия

-: инжекция

-: дрейф НЗ

I:

S: Диодная теория - это теория тонкого р-п перехода, когда

+: Ширина ОПЗ много меньше диффузионной длины $d \ll L$

-: Ширина ОПЗ много больше диффузионной длины $d \gg L$

-: Ширина ОПЗ равно диффузионной длине $d = L$

-: Ширина ОПЗ меньше или равно диффузионной длине $d \leq L$

I:

S: Чем пренебрегают в диодной теории?

-: экстракцией

-: дрейфом

+: рекомбинацией

-: диффузией

I:

S: Как влияет температура на прямую ветвь ВАХ p-n перехода?

-: прямой ток убывает

+: прямой ток возрастает

-: прямой ток равен нулю

-: прямой ток не изменяется

I:

S: Почему прямой ток на ВАХ p-n перехода возрастает с повышением T_0 ?

-: потенциальный барьер увеличивается при постоянном напряжении

+: потенциальный барьер уменьшается при постоянном напряжении

-: потенциальный барьер не изменяется при постоянном напряжении

-: прямой ток не изменяется

I:

S: Как влияет увеличение ширины запрещенной зоны на прямую ветвь ВАХ p-n перехода при постоянном напряжении?

-: прямой ток возрастает

+: прямой ток уменьшается

-: прямой ток равен нулю

-: прямой ток не изменяется

I:

S: Как влияет увеличение концентрации примеси на прямую ветвь ВАХ p-n перехода при постоянном напряжении?

-: прямой ток возрастает

+: прямой ток уменьшается

-: прямой ток равен нулю

-: прямой ток не изменяется

I:

S: Почему прямой ток на ВАХ р-п перехода уменьшается с увеличением концентрации примеси?

-: потенциальный барьер уменьшается при постоянном напряжении

+: потенциальный барьер увеличивается при постоянном напряжении

-: потенциальный барьер не изменяется при постоянном напряжении

I:

S: Как влияет увеличение температуры на обратную ветвь ВАХ р-п перехода?

-: обратный ток убывает

+: обратный ток возрастает

-: обратный ток не изменяется

-: обратный ток равен нулю

I:

S: Как влияет увеличение ширины запрещенной зоны на обратную ветвь ВАХ р-п перехода?

+: обратный ток уменьшается

-: обратный ток возрастает

-: обратный ток не изменяется

-: обратный ток равен нулю

I:

S: Пробоем р-п перехода называют

-: Резкое возрастание тока, при достижении прямым напряжением критического значения

-: Резкое убывание тока, при достижении обратным напряжением критического значения

+: Резкое возрастание тока, при достижении обратным напряжением критического значения

-: Резкое убывание тока, при достижении прямым напряжением критического значения

I:

S: В каких р-п переходах может происходить туннельный пробой?

-: П/П, изготовленных с малой концентрацией примеси и с малой толщиной потенциального барьера

-: П/П, изготовленных с большой концентрацией примеси и с большой толщиной потенциального барьера

+: П/П, изготовленных с большой концентрацией примеси и с малой толщиной потенциального барьера

-: П/П, изготовленных с малой концентрацией примеси и с большой толщиной потенциального барьера

I:

S: Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона с уровня Ферми E_{Fn} в вакууме это:

-: работа выхода электрона из металла

+: работа выхода электрона из полупроводника

-: энергия электронного сродства

-: истинная работа выхода

I:

S: Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона со дна зоны проводимости:

-: работа выхода электрона из металла

-: работа выхода электрона из полупроводника

+: энергия электронного сродства

-: истинная работа выхода

I:

S: Диоды Шотки работают:

-: на неосновных носителях

+: на основных носителях

-: на неосновных и основных носителях

I:

S: Диоды Шотки обладают емкостью:

+: Барьерной

-: Диффузионной

-: Барьерной и диффузионной

-: Не обладают

I:

S: Требования, предъявляемые к омическому контакту:

- + : Линеиность ВАХ, малая величина сопротивления, не должен быть инжектирующим
- : Линеиность ВАХ, большая величина сопротивления, должен быть инжектирующим
- : нелинейность ВАХ, малая величина сопротивления, должен быть инжектирующим
- : нелинейность ВАХ, большая величина сопротивления, не должен быть инжектирующим

I:

S: Биполярным транзистором называется:

- + : полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ
- : полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими невыпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ
- : полупроводниковый прибор с двумя невзаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ
- : полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ОНЗ

I:

S: Сколько режимов работы имеет биполярный транзистор:

- : 1
- : 2
- : 3
- + : 4

I:

S: Если эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный в обратном, то какой это режим работы БТ:

- : Инверсный
- : Отсечки
- : Насыщения
- + : Нормальный

I:

S: Если эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный в прямом, то какой это режим работы БТ:

- : Отсечки
- : Насыщения
- : Нормальный
- + : Инверсный

I:

S: Если эмиттерный переход и коллекторный переход смещены в обратном направлении, то какой режим работы БТ:

- + : Отсечки
- : Насыщения
- : Нормальный
- : Инверсный

I:

S: Если эмиттерный переход и коллекторный переход смещены в прямом направлении, то какой режим работы БТ:

- : Отсечки
- + : Насыщения
- : Нормальный
- : инверсный

I:

S: Биполярный транзистор называется дрейфовым:

- + : если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору
- : если при отсутствии тока в базе не существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору
- : если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к базе
- : если при токе в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору

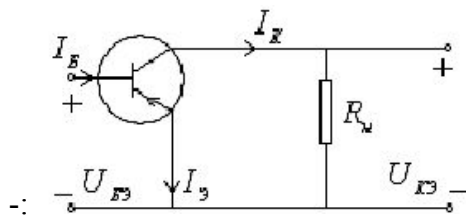
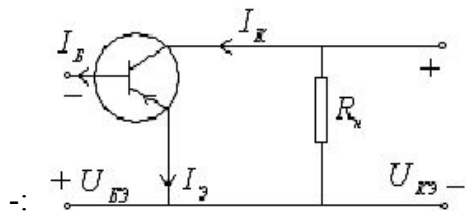
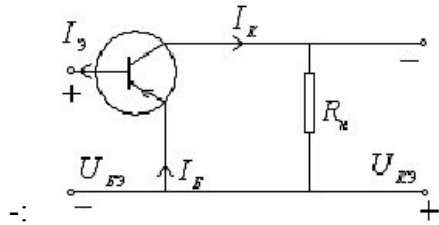
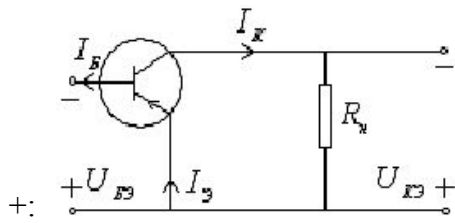
I:

S: Сколько схем включения БТ существует:

- : 1
- : 2
- + : 3
- : 4

I:

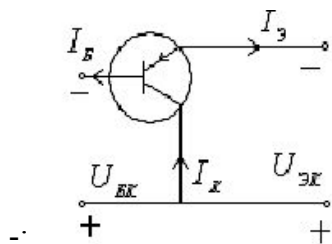
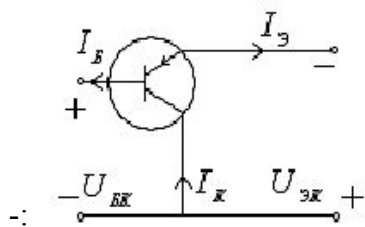
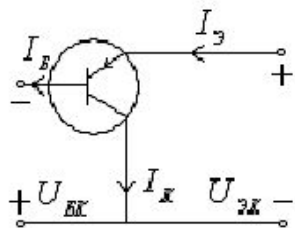
S: Схема включения БТ с общим эмиттером:

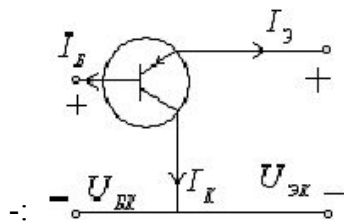


I:

S: Схема включения БТ с общим коллектором:

+:





I:

S: БТ называется бездрейфовым:

+: если при отсутствии тока в базе отсутствует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору

-: если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к коллектору

-: если при отсутствии тока в базе существует электрическое поле, которое способствует движению ННЗ от эмиттера к базе

I:

S: Режим отсечки БТ:

+: оба p-n-перехода смещены в обратном направлении

-: оба p-n-перехода смещены в прямом направлении

-: один переход смещен в прямом направлении

I:

S: Если эмиттерный переход и коллекторный переход смещены в прямом направлении, то такой режим работы БТ называется:

-: Отсечки

+: Насыщения

-: Нормальный

-: Инверсный

I:

S: Полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими переходами, усилительные свойства которого обусловлены инжекцией и экстракцией ННЗ называется...

+: биполярным транзистором

-: резистором

-: конденсатором

I:

S: Сколько схем включения БТ существует?

+: три

-: две

-: одна

I:

S: Если эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный в прямом, то такой режим работы БТ называется...

+: инверсный

-: прямым

-: обратным

I:

S: Что значит $U_{КБнас}$:

-: падение напряжения между выводами коллектора и эмиттера в режиме насыщения

+: падение напряжения между выводами коллектора и базы в режиме насыщения

-: падение напряжения между выводами эмиттера и базы в режиме насыщения

-: увеличение напряжения между выводами эмиттера и базы в режиме насыщения

I:

S: Тиристор - это:

+: полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, тремя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот

-: полупроводниковый прибор с двумя неустойчивыми состояниями, тремя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот

-: полупроводниковый прибор с устойчивыми состояниями, двумя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое

-: полупроводниковый прибор с неустойчивыми состояниями двумя и более выводами, который может переключаться из закрытого состояния в открытое

I:

S: Триодный тиристор можно перевести в открытое состояние:

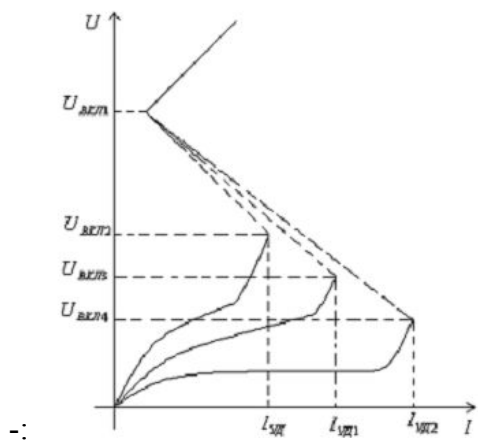
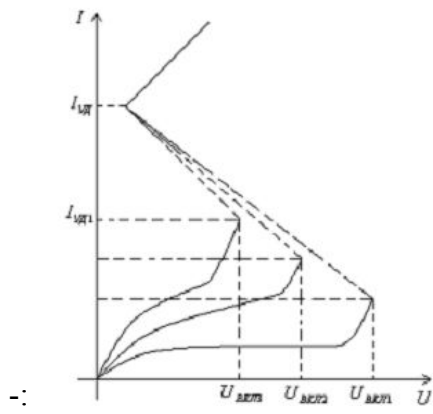
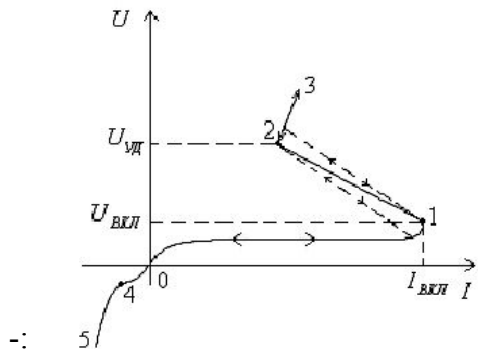
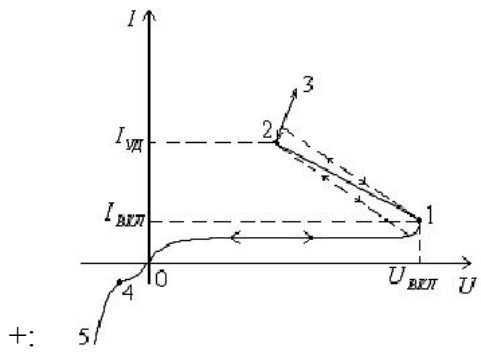
+: подав на одну из базовых областей импульса соответствующей полярности

-: подав на одну из эмиттерных областей импульса соответствующей полярности

-: подав на коллекторный переход импульса соответствующей полярности

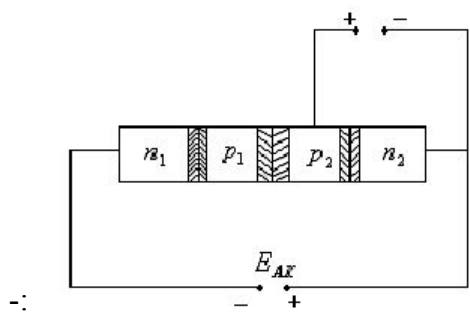
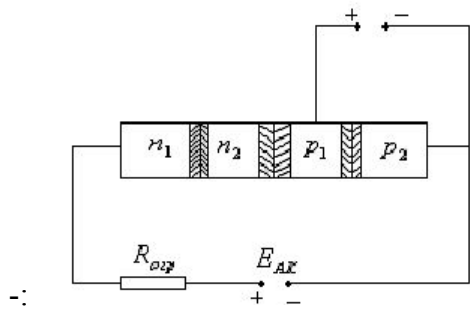
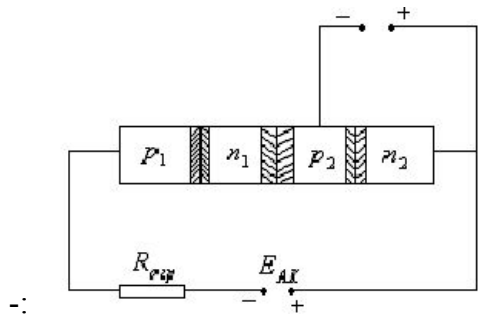
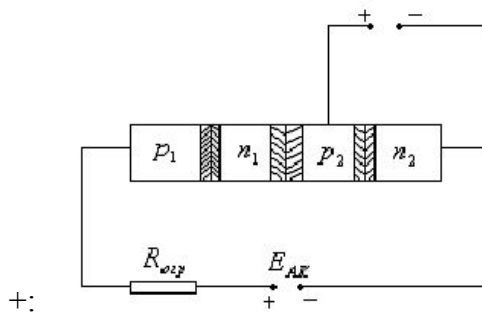
I:

S: ВАХ диодного тиристора:



I:

S: Структура триодного тиристора:



I:

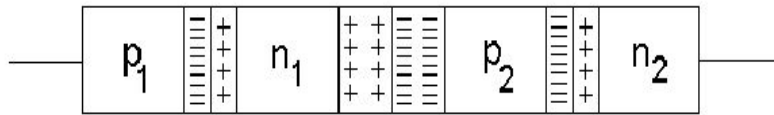
S: Полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, тремя и более ЭДП, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот называется

+: тиристором

-: транзистором

-: полупроводниковым диодом

I:



S: На рисунке показана:

+ : структура диодного тиристора в закрытом состоянии

- : структура диодного тиристора в открытом состоянии

- : структура полевого транзистора

- : структура биполярного транзистора

I:

S: Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены...

- : потоком неосновных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем эмиттера

- : потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем коллектора

+ : потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем

I:

S: Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом – это полевой транзистор, управление потоком...

- : неосновных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении

- : основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в прямом направлении

+ : основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении

I:

S: Электрический вывод от боковой поверхности полевого транзистора называют...

- : исток (И)

- : сток (С)

+ : затвор (З)

I:

S: Электрические выводы от торцевых поверхностей полупроводника называют...

- : исток (И) и затвор (З)

-: сток (С) и затвор (З)

+: исток (И) и сток (С)

I:

S: При подаче напряжения на затвор между истоком и стоком появляется пространство, через которое протекает ток, это пространство называется...

-: запрещенная зона

-: зонная структура

+: токопроводящий канал

I:

S: От ширины р-п-перехода зависит...

+: его сопротивление

-: его теплопроводность

-: его обратное напряжение

I:

S: Изменяя величину напряжения источника $U_{зи}$, меняем...

- : прямое напряжение на р-п-переходе, а значит и его ширину

- : прямое напряжение на р-п-переходе, а значит и $U_{ис}$

+: обратное напряжение на р-п-переходе, а значит и его ширину

I:

S: При увеличении напряжения $U_{зи}$ ширина р-п-перехода...

+: возрастает, а поперечное сечение канала между истоком и стоком уменьшается

-: уменьшается, а поперечное сечение канала между истоком и стоком возрастает

-: возрастает, а продольное сечение канала между истоком и стоком уменьшается

I:

S: Напряжение отсечки это...

+: такая величина напряжения на затворе, при котором р-п переход полностью перекроет канал, и ток в цепи нагрузки прекратится

-: такая величина напряжения на затворе, при котором р-п переход полностью откроет канал, и ток в цепи нагрузки возобновится

-: такая величина напряжения на стоке, при котором р-п переход полностью перекроет канал, а ток в цепи нагрузки возобновится

I:

S: Падение напряжения на сопротивлении нагрузки при...

-: протекании тока I_c является выходным сигналом, мощность которого значительно меньше мощности, затраченной во входной цепи

+: протекании тока I_c является выходным сигналом, мощность которого значительно больше мощности, затраченной во входной цепи

-: протекании тока I_c является выходным сигналом, мощность которого значительно больше мощности, затраченной в выходной цепи

I:

S: Принципиальным отличием полевого транзистора от биполярного является то, что...

-: источник входного сигнала подключен к р-п-переходу в прямом, запирающем направлении, и следовательно входное сопротивление здесь очень большое, а потребляемый от источника выходного сигнала ток очень маленький

-: источник входного сигнала подключен к р-п-переходу в обратном, запирающем направлении, и следовательно входное сопротивление здесь очень малое, а потребляемый от источника выходного сигнала ток очень маленький

+: источник входного сигнала подключен к р-п-переходу в обратном, запирающем направлении, и следовательно входное сопротивление здесь очень большое, а потребляемый от источника входного сигнала ток очень маленький

I:

S: В биполярном транзисторе управление осуществляется...

+: входным током, а в полевом транзисторе – входным напряжением

-: входным напряжением, а в полевом транзисторе – входным током

-: входным током, а в полевом транзисторе – выходным напряжением

I:

S: Поскольку потенциал от истока к стоку возрастает, то соответственно...

-: возрастает и обратное напряжение на рп-переходе, а его ширина уменьшается

-: возрастает и прямое напряжение на рп-переходе, а следовательно, и его ширина

+: возрастает и обратное напряжение на рп-переходе, а следовательно, и его ширина

I:

S: При подаче обратного напряжения на затворы полевого транзистора:

+: ширина проводящего канала уменьшается

- : ширина проводящего канала увеличивается
- : ширина проводящего канала не изменяется
- : ширина проводящего канала сначала увеличивается, затем не изменяется

I:

S: При уменьшении ширины проводящего канала полевого транзистора:

- +: сопротивление канала возрастает, и ток стока уменьшается
- : сопротивление канала уменьшается, и ток стока уменьшается
- : сопротивление канала возрастает, и ток стока не изменяется
- : сопротивление канала возрастает, и ток стока возрастает

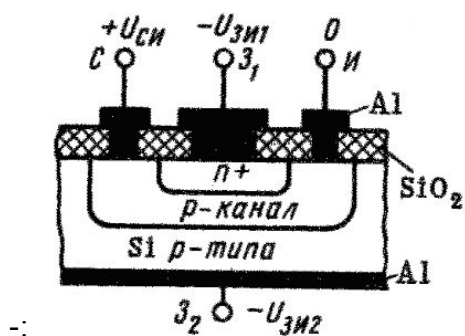
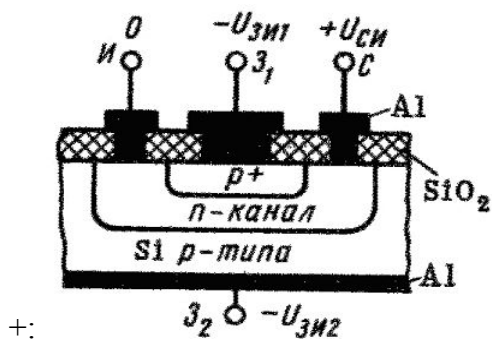
I:

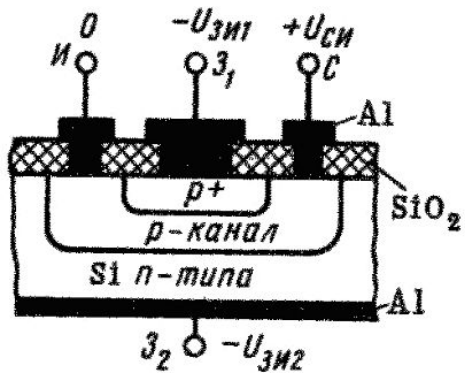
S: К мало сигнальным параметрам полевого транзистора относятся только:

- +: сопротивление канала
- : крутизна передаточной характеристики
- : коэффициент усиления полевого транзистора
- : все перечисленные параметры полевого транзистора

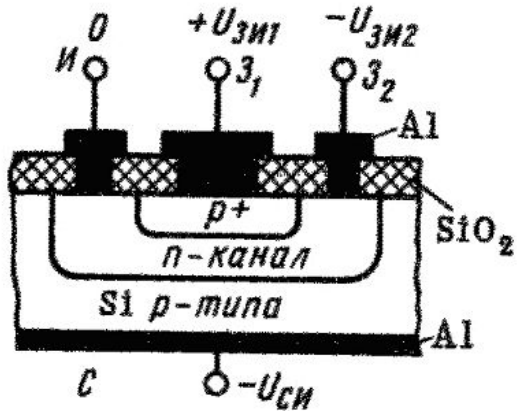
I:

S: Структура полевого транзистора с двумя управляющими p-n-переходами





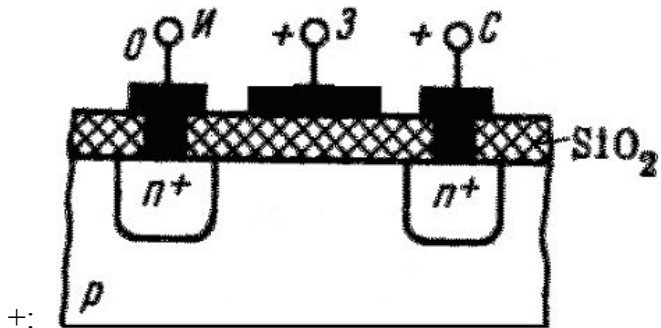
-:



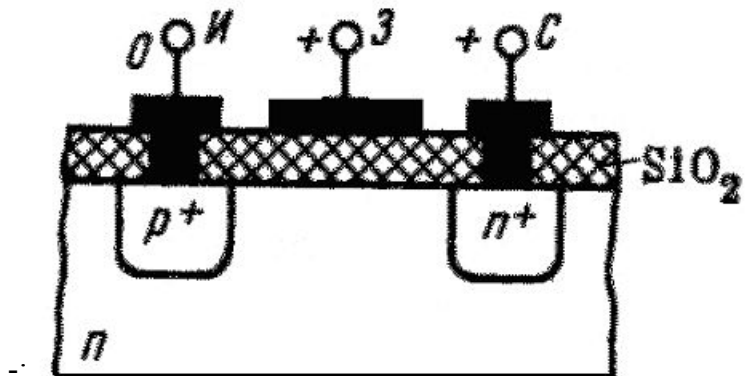
-:

I:

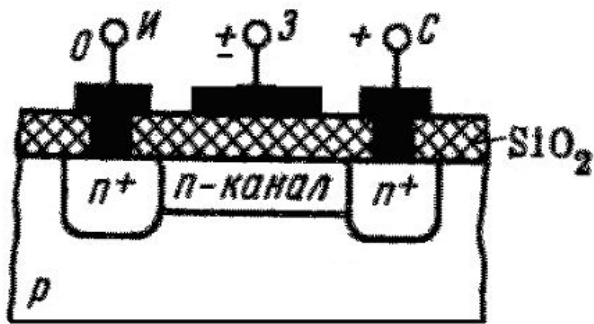
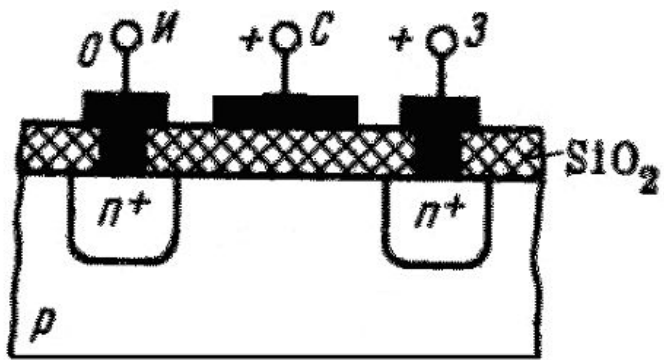
S: Структура МДП - транзистора с индуцированным каналом:



+

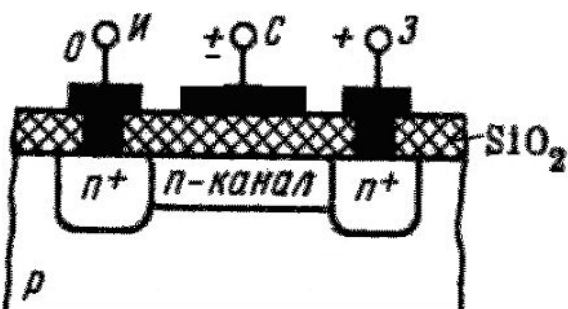
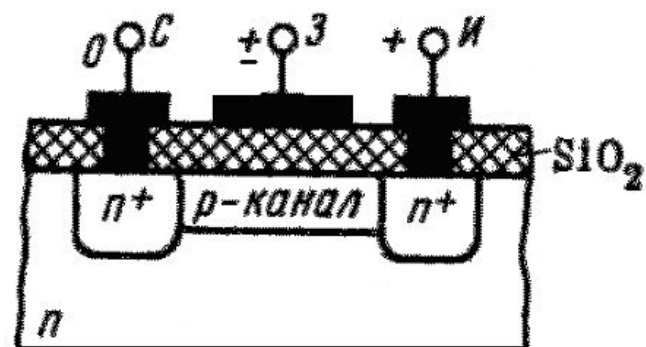
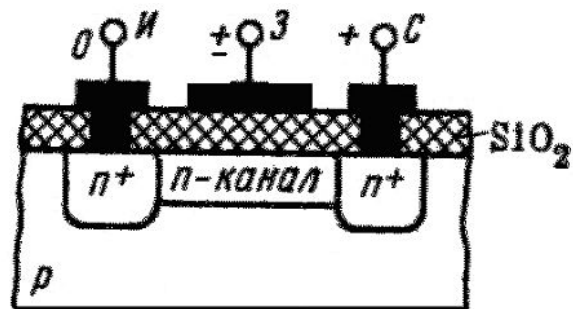


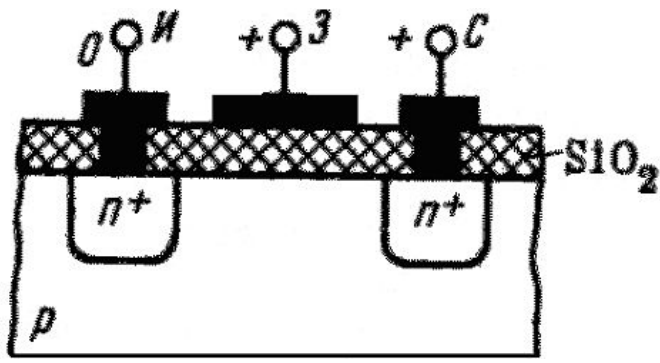
-:



I:

S: Структура МДП - транзистора со встроенным каналом:

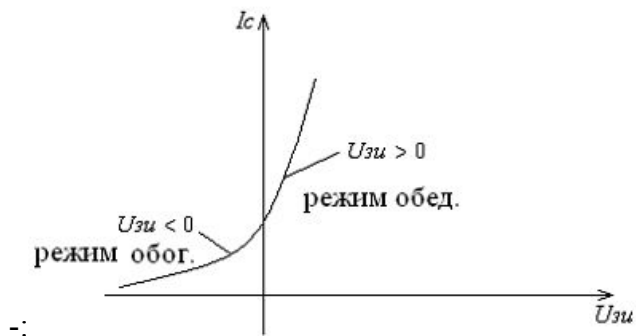
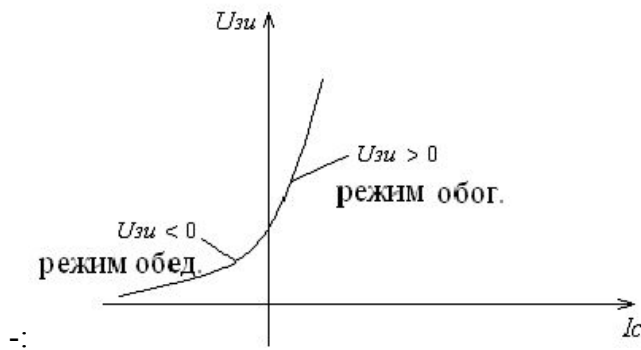
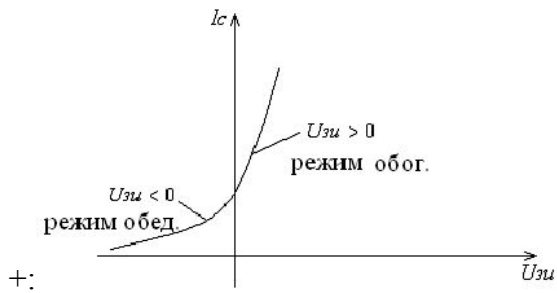


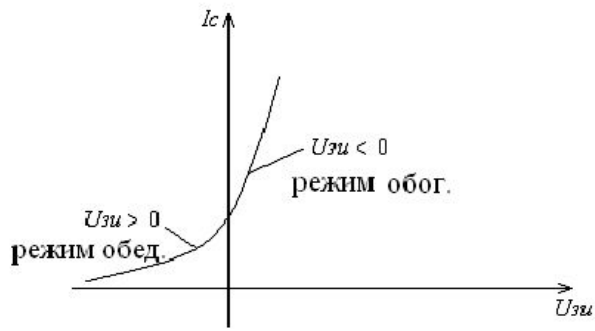


-:

I:

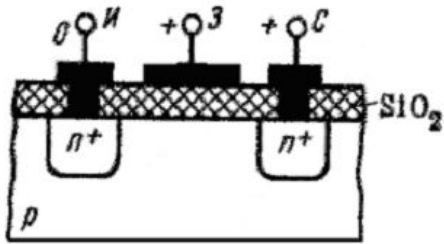
S: Характеристика передачи МДП- транзистора со встроенным каналом:





-:

I:



S: На рисунке изображена:

+ : структура МДП- транзистора с индуцированным каналом

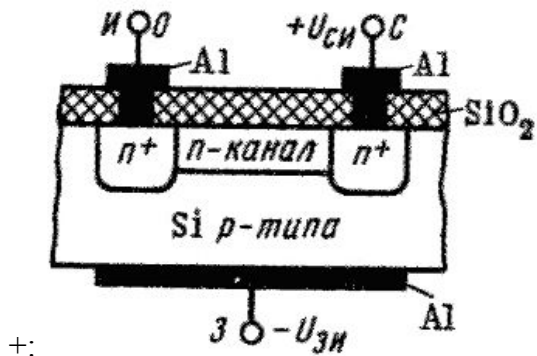
-: структура МОП- транзистора с индуцированным каналом

-: структура МДП- транзистора со встроенным каналом

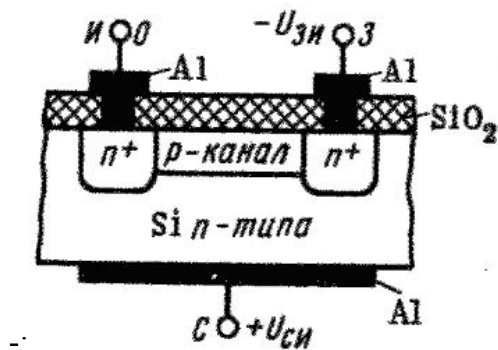
-: структура МОП- транзистора со встроенным каналом

I:

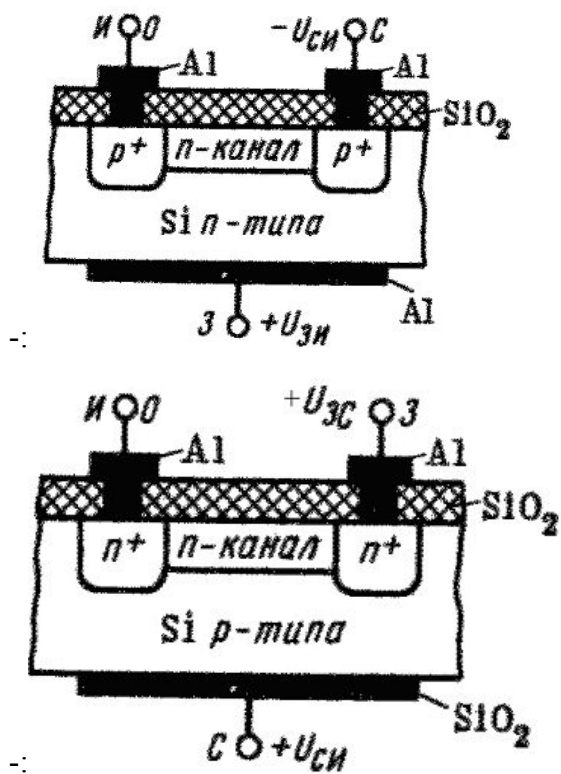
S: Структура полевого транзистора с одним управляющим p-n- переходом



+



-:



I:

S: Схема с общим затвором аналогична схеме с...

- : общим эмиттером у биполярных транзисторов
- : общим коллектором у биполярных транзисторов
- +: общей базой у биполярных транзисторов

I:

S: Схема с общим стоком подобна схеме...

- : коллекторного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют истоковым повторителем
- +: эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют истоковым повторителем
- : эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе и ее называют стоковым повторителем

I:

S: Схема с общим истоком (подобно общему эмиттеру) позволяют получить...

- : усиление тока и напряжения и инвертирование фаз напряжения при усилении, имеют очень высокое входное и низкое выходное сопротивления

+: усиление тока и напряжения и инвертирование фаз напряжения при усилении, имеют очень высокое входное и выходное сопротивления

-: усиление тока и напряжения и инвертирование фаз напряжения при усилении, имеют очень низкое входное и высокое выходное сопротивления

Вопросы, выносимые на коллоквиум

1 коллоквиум

1. Классификация и назначения материалов электронной техники.
2. Основные свойства полупроводников. Проводимость полупроводников.
3. Образование электронно – дырочного перехода.
4. Энергетические диаграммы $p - n$ перехода в равновесии и при смещениях.
5. Высота потенциального барьера и контактная разность потенциалов.
6. Диодная теория ВАХ. Реальная ВАХ $p - n$ перехода.
7. Диффузионная теория. Энергетическая диаграмма $p - i - n$ перехода в равновесии. Ток по диффузионной теории через $p - i - n$ переход.
8. Емкость диода. Барьерная и диффузионная емкость и их зависимости от напряжения.
9. Пробой $p - n$ перехода. Туннельный пробой. Температурная зависимость пробивного напряжения.
10. Лавинный пробой. Связь коэффициента лавинного размножения с коэффициентом ударной ионизации.
11. Температурная зависимость пробивного напряжения. Тепловой пробой.
12. Энергетические диаграммы контакта металл - полупроводник.
13. Обедненные (запорные) и обогащенные (антизапорные слои).
14. Распределение объемного заряда и электрического поля в переходе металл – полупроводник.
15. Ширина обедненного слоя в равновесии и при смещениях.
16. ВАХ диодов с контактом Шоттки. Омический контакт.

17. Биполярный транзистор. Структура. Режимы работы. Схемы включения.
18. Принцип работы БТ. Коэффициенты усиления при различных схемах включения.
19. Статические параметры при различных режимах работы БТ.
20. Статические характеристики в схемах с ОБ и ОЭ.
21. Пробой транзистора.
22. Тиристоры. Структура диодного тиристора (динистора). Принцип работы. ВАХ динистора.
23. Триодный тиристор (тринистор). Принцип действия. ВАХ тринистора в закрытом состоянии.
24. Полевой транзистор с управляющим $p - n$ переходом. Структура и принцип работы.

2 коллоквиум

1. Статические характеристики и малосигнальные параметры полевого транзистора. Частотные характеристики.
2. МДП - транзистор с индуцированным каналом. Структура. Принцип работы. Статические характеристики.
3. МДП – транзистор с встроенным каналом. Структура. Принцип работы. Статические характеристики.

4. Приборы с зарядовой связью. Структура. Принцип действия. Характеристики и параметры.
5. Туннельный диод. Принцип действия.
6. Зонные диаграммы ВАХ. Эквивалентная схема ТД. Основные параметры.
7. Обращенный диод.
8. Лавинно – пролетный диод. Условия появления отрицательного динамического сопротивления и его физический смысл.
9. Структура и принцип действия ЛДП. Лавинно – пролетный режим. Режим с захваченной плазмой.
10. Эффект Ганна. Междолинный переход электронов и ОДС.
11. Принцип действия диода Ганна. Пролетный режим.
12. Термоэлектронная эмиссия.
13. Фотоэлектронная эмиссия.
14. Вторичная электронная эмиссия. Кинетическая ионно-электронная эмиссия.
15. Эмиссия горячих электронов. Экзоэлектронная эмиссия.
16. Автоэлектронная эмиссия. Электронная пушка.
17. Движение электрона в однородных полях. Однородное магнитное поле.
18. Движение электрона в скрещенных полях. Электростатическая отклоняющая система.
19. Управление с помощью электронной оптики. Управление с помощью магнитной оптики.
20. Классификация приборов вакуумной электроники. Электронные лампы.
21. Электронные лампы СВЧ. Приборы типа «сигнал-свет». Прибор типа «свет-сигнал»
22. Приборы с накоплением заряда. Приборы без накопления заряда.
23. Приборы типа «сигнал-сигнал». Приборы типа «свет-свет».
24. Вакуумные фотоэлементы. Фотоэлектронные умножители.

1.2 Оценочные материалы для промежуточной аттестации

Зачет проводится по билетам. В каждом билете 2 теоретических вопроса.

Вопросы к зачету

1. Диффузионный ток в полупроводниках. Закон полного тока.
2. Уравнение непрерывности. Диффузионная длина носителей заряда.
3. Виды электрических контактов, требования к ним.
4. Р-п-переход в равновесии.
5. Р-п-переход в смещении.
6. ВАХ идеального и реального р-п-перехода.
7. Принцип действия, режимы работы, характеристики, условное графическое обозначение и маркировка диодов: выпрямительных, ВЧ, импульсных.
8. Принцип действия, режимы работы, характеристики, условное графическое обозначение и маркировка диодов: варикапов, стабилитронов, стабилиторов.
9. Принцип действия, ВАХ, обозначение туннельного диода.
10. Выпрямляющий контакт металл-полупроводник в равновесии.
11. Выпрямляющий контакт металл-полупроводник в смещении. Диодная и диффузионная теории выпрямления.
12. Контакт металл – полупроводник с омическими свойствами. Способы формирования.
13. Структура и принцип действия биполярных транзисторов.

14. Режимы работы, схемы включения, параметры биполярных транзисторов.
15. Особенности ВАХ, дифференциальные коэффициенты передачи биполярного транзистора, включенного по схеме ОБ.
16. Особенности ВАХ, дифференциальные коэффициенты передачи биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ.
17. Структура и принцип действия тиристоров.
18. Типы тиристоров. Схемы включения, параметры и ВАХ тиристоров.
19. Эффект поля. МДП-структура. Поверхностная проводимость.
20. Вольтфарадные характеристики МДП-структуры. Поверхностный варикап.
21. Структура и принцип действия МДП-транзисторов с индуцированным каналом.
22. ВАХ и параметры МДП-транзисторов с индуцированным каналом.
23. Структура и принцип действия МДП-транзисторов со встроенным каналом.
24. ВАХ и параметры МДП-транзисторов со встроенным каналом.
25. Основы эмиссионной электроники.
26. Физические процессы в двухэлектродной лампе. Назначение и разновидности.
27. Физические процессы в трехэлектродной лампе. Назначение и разновидности.
28. Многоэлектродные лампы. И основные параметры.
29. Устройство и принцип действия электронно-лучевых приборов.
30. Особенности электронно-лучевых приборов различного назначения.

Примерная тематика курсовых работ

1. Оптический резонатор твердотельного лазера с модуляцией добротности;
2. Электрооптический модулятор интенсивности света с поперечным электрическим полем;
3. Электрооптический фазовый модулятор с поперечным электрическим полем.
4. Акустооптический модулятор лазерного излучения.
5. Волноводный акустооптический модулятор.
6. Акустооптический дефлектор.
7. Приемный оптический модуль для волоконно-оптических систем связи.
8. Передающий оптический модуль для волоконно-оптических систем связи
9. Оптоэлектронные технологии
10. Энергетический расчет оптико-электронного прибора.
11. Энергетический расчет оптико-электронной коллимационной системы.
12. Моделирование основных параметров и характеристик оптического усилителя.
13. Разработка устройства лазерного дистанционного управления.