

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Севастопольский государственный университет»

**ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ
«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА.
АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА»**

Методические указания
к лабораторному работам по дисциплине «Физика»
для студентов технических направлений подготовки
и специальностей очной формы обучения

Севастополь
СевГУ
2015

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
<i>Лабораторная работа 1.</i>	
Градуирование шкалы спектроскопа и исследование линейчатых спектров испускания газов. Определение постоянной Планка по спектру поглощения раствора	7
<i>Лабораторная работа 2.</i>	
Определение потенциала ионизации газа	12
<i>Лабораторная работа 3.</i>	
Распределение Пуассона	15
<i>Лабораторная работа 4.</i>	
Изучение работы газоразрядного счетчика	19
<i>Лабораторная работа 5.</i>	
Определение энергии альфа-частиц и периода полураспада изотопа	22
<i>Лабораторная работа 6.</i>	
Исследование эффекта Холла в полупроводниках	26
<i>Лабораторная работа 7.</i>	
Определение параметров кристаллической решетки и плотности вещества методом рентгеноструктурного анализа	32
<i>Лабораторная работа 8.</i>	
Снятие спектральной характеристики и определение ширины запрещенной зоны полупроводников на монохроматоре УМ-2	38
<i>Дополнение к лабораторной работе 8.</i>	
Учет систематической погрешности в определении "красной границы" фотопроводимости и ее устранение	41
<i>Лабораторная работа 9.</i>	
Изучение фотоэлектрических свойств и параметров фоторезисторов	44
<i>Лабораторная работа 10.</i>	
Определение интегральной чувствительности фотоэлемента с запирающим слоем	48
<i>Лабораторная работа 11.</i>	
Изучение характеристик терморезисторов	53
<i>Дополнение 1 к лабораторной работе 11.</i>	
Изучение характеристик терморезисторов	58
<i>Дополнение 2 к лабораторной работе 11.</i>	
Определение типа проводимости полупроводников методом термозонда	59
<i>Лабораторная работа 12.</i>	
Исследование полупроводниковых выпрямителей	61
<i>Дополнение к лабораторной работе 12.</i>	
Исследование вольтамперных характеристик р-n-переходов полупроводниковых приборов осциллографическим методом	66
<i>Лабораторная работа 13.</i>	
Изучение туннельных диодов	68

<i>Лабораторной работа 14.</i>	
Исследование кремниевого стабилитрона	73
<i>Лабораторная работа 15.</i>	
Изучение биполярного транзистора	76
<i>Дополнение к лабораторной работе 15.</i>	
Изучение входных и выходных характеристик транзистора осциллографическим методом	84
<i>Лабораторная работа 16.</i>	
Изучение принципа действия фотодиода, светодиода и элементов диодного оптрона	86
<i>Лабораторная работа 17.</i>	
Исследование работы фотодиодного оптрона и оценка времени жизни неравновесных носителей заряда	99
<i>Лабораторная работа 18.</i>	
Изучение характеристик магнитодиодов	106
<i>Лабораторная работа 19.</i>	
Основы дозиметрии. Методики определения характеристик дозиметрического контроля	110
<i>Лабораторная работа 20.</i>	
Определение работы выхода электронов из металлов и постоянной Планка	125
<i>Лабораторная работа 21.</i>	
Проверка законов сохранения при столкновении микрочастиц	134
<i>Лабораторная работа 22 (7 В).</i>	
Эффект Комптона	139
<i>Лабораторная работа 23 (8 В).</i>	
Опыт Франка и Герца	144
Приложения	149

ПРЕДИСЛОВИЕ

Весь исторический опыт развития науки показывает, что физика – это, прежде всего, экспериментальная наука. Согласно высказыванию великого физика А. Эйнштейна: "Все наши сведения начинаются с эксперимента и кончаются им". Таким образом, курс физики должен давать представления о физике как о науке, имеющей экспериментальную основу. В этой связи совершенствование лабораторного физического практикума имеет важное методологическое значение.

Предлагаемое пособие в какой-то мере решает эту задачу и составлено на основе многолетней работы кафедры «Физика» Севастопольского государственного университета.

Настоящее пособие содержит описание 23 лабораторных работ по разделам атомной и ядерной физики и физики твердого тела, в том числе двух виртуальных, и написано в соответствии с программой дисциплины «Физика» для ГОС 3-го поколения.

В описании каждой лабораторной работы содержатся: цель, рекомендованная литература, теоретическое введение, обоснование используемых методик, приборы и принадлежности, порядок выполнения работ, измерение и обработка экспериментальных исследований, контрольные вопросы.

При подготовке к лабораторным занятиям студент должен составить в рабочей тетради краткий конспект выполняемой лабораторной работы с описанием теоретического обоснования, схемы лабораторной установки и методики обработки результатов экспериментальных измерений. Отдельно составляется отчет к лабораторной работе по установленной форме. В отчете к лабораторной работе студент должен представить для защиты заполненные таблицы, результаты расчетов экспериментальных измерений и оценку их погрешности. Особое внимание должно уделяться графической обработке полученных данных, а также выводам по выполняемой лабораторной работе.

При постановке данного практикума учтены пожелания ряда общеинженерных кафедр о включении в физический практикум лабораторных работ по изучению полупроводниковых устройств и приборов. Это нашло отражение в создании цикла работ по опто- и магнитоэлектронике (работы по изучению фотодиодов, светодиодов, оптронов, магнитодиодов).

Особое внимание уделяется лабораторным работам по ядерной физике, знакомству с современной методикой измерений.

Отличительная особенность данного пособия состоит также в том, что для постановки лабораторных работ предусмотрено использование как современного физического оборудования (детекторы α - и β -излучения, радиометрическая аппаратура, монохроматоры, цифровые измерительные приборы, осциллографы и т.д.), так и простейших макетов лабораторных установок на базе стандартного оборудования (работы по опто- и магнитоэлектронике и др.), что представляется важным в период перестройки системы высшего образования страны.

В постановке, апробировании, наладке лабораторных установок, а также при составлении методических указаний и рекомендаций принимали участие сотрудники кафедры «Физика» Севастопольского государственного университета.

Труд авторов распределился следующим образом: С.Ф. Барановский (л.р. 15), Д.П. Воронин (л.р. 8, 18), М.П. Евстигнеев (л.р. 5, 14), О.С. Завьялова (л.р. 11, 22), В.В. Костюков (л.р. 1, 5, 21), А.О. Лантушенко (л.р. 3, 23), А.Л. Леонтович (л.р. 7), В.А. Лисютин (л.р. 15, 19), В.Л. Лучин (л.р. 14, 18), А.А. Мосунов (л.р. 20), Ю.В. Мухина (л.р. 10), Н.В. Петренко (л.р. 13, 17), О.В. Рогова (л.р. 4), М.А. Рубинсон (л.р. 2, 6), К.А. Рыбакова (л.р. 9, 16, 17), В.А. Сигаев (л.р. 1, 7, 12).

Подготовка практикума к изданию осуществлена старшим преподавателем кафедры «Физика» Д.П. Ворониным.

Работа по совершенствованию физического практикума продолжается, и мы надеемся получить от читателей советы и предложения по улучшению данного пособия.

Авторы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ГРАДУИРОВАНИЕ ШКАЛЫ СПЕКТРОСКОПА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ ГАЗОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА ПО СПЕКТРУ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА РАСТВОРОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством спектроскопа, проградуировать его шкалу по длинам волн.
2. Изучить закономерности в атомных спектрах излучения.
3. Вычислить постоянную Планка по длине волны, соответствующей границе спектра поглощения света раствором.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное излучение обусловлено колебаниями электрических зарядов – электронов и ионов. Ионы вследствие значительной массы дают излучение низкой частоты (инфракрасное), а электроны в атомах способны на излучение высокой частоты (в видимой и ультрафиолетовой областях). Спектр раскаленных твердых тел - сплошной, разреженных газов в атомарном состоянии - линейчатый, а в молекулярном - полосатый.

Атому каждого элемента присущ свой спектр. Швейцарский ученый И. Бальмер подобрал эмпирическую формулу, описывающую излучение атома водорода, но описывать этой формулой более сложные спектры (например, паров щелочных металлов) было невозможно.

В 1913 году датский физик Нильс Бор предпринял попытку построить квантовую теорию атома. Он сформулировал два постулата:

- 1) электроны в атоме движутся по стационарным орбитам, не излучая энергии;
- 2) поглощение или излучение кванта энергии происходит при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую.

На стационарных орбитах момент импульса электрона кратен постоянной Планка

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (1)$$

где r - радиус орбиты; n - номер орбиты; v - скорость электрона на ней.

Если ввести грубое допущение, что электроны движутся вокруг ядра по окружностям, то роль центростремительной силы играет кулоновская сила

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) можно определить радиус стационарной орбиты $r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{Ze^2 m \pi}$ и скорость электрона $v = \frac{nh}{2\pi m r}$. Потенциальная энергия связи электрона с ядром

$$n = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{Z^2 e^4 m}{4\epsilon_0 n^2 h^2}.$$

Кинетическая энергия электрона $T = \frac{mv^2}{2} = \frac{Z^2 e^4 m}{8\epsilon_0 n^2 h^2}$, а полная энергия

$$E = T + \Pi = -T:$$

$$E = -\frac{Z^2 e^4 m}{8\pi \epsilon_0 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -RZ^2 \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (3)$$

где R - постоянная Ридберга. Из формулы (3) видно, что электрон в атоме приобретает не любые, а строго определенные значения энергии.

При переходе атома водорода из состояния n_2 (с большей энергией) в состояние n_1 излучается квант света (фотон) с энергией

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1} = -R\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right) = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right).$$

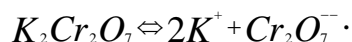
Теория Бора, используя классические представления, не является последовательно квантовой и попытки применить ее для атомов других элементов были неудачными. Квантовая механика учитывает волновые свойства частиц и устраняет недостатки теории Бора. Решение уравнения Шредингера для электрона в атоме водорода дает те же значения энергии, что и теория Бора.

Для наблюдения спектров служат спектроскопы, спектрографы, стилоскопы и другие приборы, в которых происходит разложение белого света в спектр. Спектроскоп состоит из призмы и двух зрительных труб, укрепленных на штативе (рис. 1). Оптическая труба, в которой объектив заменен щелью, ширину которой можно изменять с помощью винта, называется коллиматором. Назначение коллиматора - дать параллельный пучок света, падающий на призму, поэтому щель расположена в фокусе линзы L_1 .

В призме параллельные лучи белого света преломляются и вследствие дисперсии распадаются на параллельные пучки цветовых лучей. Линза L_2 собирает каждый пучок лучей одного цвета в своей фокальной плоскости. Полученный спектр рассматривается в окуляр O . Располагая зрительную трубу T_2 с помощью микрометрического винта M под различными углами к падающему лучу, можно совмещать индекс (черточку в окуляре) с любой линией спектра. На винте есть миллиметровые деления, а барабан винта разделен на 50 частей. Ход винта равен 1 мм, следовательно, цена деления барабана 0,02 мм.

Если на пути лучей от источника, дающего сплошной спектр, расположить трубку с газом или с раствором, то на фоне сплошного спектра появятся темные линии или полосы, соответствующие частотам поглощенной энергии.

В данной работе свет от нити электрической лампочки пропускают через раствор $K_2Cr_2O_7$. В водном растворе $K_2Cr_2O_7$ диссоциирует на ионы:



Ион калия в видимой части спектра не поглощает лучей, а $Cr_2O_7^{2-}$ поглощает все лучи сине-фиолетовой части спектра. Спектр оказывается отрезанным с сине-фиолетового конца. Границе поглощения соответствует энергия $E = 3,72 \cdot 10^{-19}$ Дж. Определив длину волны границы поглощения $\lambda_{\text{п}}$, можно найти постоянную Планка h по формуле $h = \frac{E}{\nu} = \frac{E}{c} \lambda$, где c - скорость света в вакууме.

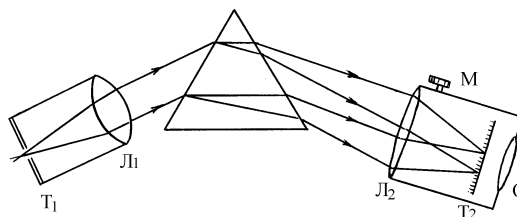


Рис. 1

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Спектроскоп.
2. Спектральные трубки со штативом для них.
3. Индукционная катушка.
4. Кювета с водным раствором $K_2Cr_2O_7$.
5. Источник сплошного спектра.
6. Таблица длин волн, излучаемых известным газом.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Градуировка шкалы спектроскопа

- 1.1. Установить окуляр зрительной трубы так, чтобы индекс был четко виден.
- 1.2. Расположить щель коллиматора перед неоновой лампой.
- 1.3. Убедиться в том, что все тумблеры "сеть" на установке и "спектр поглощения" находятся в положении "выкл". Переключатель "неон" - "неизвестный газ" поставить в положение "неон". Подключить вилку с проводом к сети (220 В). При этом загорится неоновая лампа.
- 1.4. Индекс окуляра совмещать поочередно с каждой линией спектра и производить отсчет по шкале микрометрического винта и барабана, повторяя его для каждой линии по три раза.
- 1.5. Результаты измерений и соответствующие им длины волн занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Испускающий элемент	Цвет линии	Отсчет по микрометру, дел			Среднее значение	Длина волны λ , нм
		1	2	3		

1.6. По данным опытов построить градуировочный график, откладывая по оси абсцисс средние значения показаний микрометра, а по оси ординат - длины волн.

2. Исследование линейчатого спектра испускания неизвестного газа

2.1. Повернуть коллиматор так, чтобы щель находилась перед трубкой с неизвестным газом. Тумблеры "сеть" на установке и источнике высокого напряжения поставить в положение "вкл". Тумблер "неизвестный газ" поставить в нижнее положение.

2.2. Повторить действия пунктов 1.4 и 1.5 упражнения 1. Занести результаты в таблицу 1.

2.3. По градуировочному графику спектроскопа определить длины волн, излучаемые неизвестным газом.

2.4. По таблицам спектров выяснить, какой газ является излучателем.

2.5. Выключить тумблер "Сеть" источника высокого напряжения.

3. Определение постоянной Планка

3.1. Включить тумблер "спектр поглощения". Убедиться в том, что нить электрической лампочки дает сплошной спектр.

3.2. Расположить щель коллиматора перед кюветой с раствором.

3.3. Навести индекс на границу раздела поглощенной и непоглощенной частей спектра и снять отсчет. Опыт повторить 5 раз.

3.4. По градуировочному графику найти длину волны границы поглощения.

3.5. Рассчитать h_i по формуле $h_i = \frac{E}{c} \lambda_i$.

3.6. Найти $\langle h \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$, $\Delta h_i = \langle h \rangle - h_i$, $\langle \Delta h \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta h_i|}{n}$

$$\text{Ц } \varepsilon = \frac{\langle \Delta h \rangle}{\langle h \rangle} \cdot 100\%.$$

Здесь n - число измерений.

3.7. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

№ опы- та	Отсчет по мик- рометру для границы по- глощения	Длина вол- ны границы поглощения λ_i , мкм	h_i , $\cdot 10^{-34}$ Дж·с	$\langle h \rangle$, $\cdot 10^{-34}$ Дж·с	Δh_i , $\cdot 10^{-34}$ Дж·с	$\langle \Delta h \rangle$, $\cdot 10^{-34}$ Дж·с	ε , %
1							
2							
3							
4							
5							

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте постулаты Бора.
2. Выведите формулы радиуса боровской орбиты атома водорода, скорости электрона на ней, а также потенциальной, кинетической и полной энергии электрона.
3. Какие серии в излучении атома водорода вам известны и как определяются частоты, соответствующие линиям этих серий?
4. Из каких энергий складывается энергия молекулы и какой вид имеют молекулярные спектры?
5. В чем заключается опыт Франка и Герца и какой вывод из него был сделан?
6. Как определить постоянную Планка по спектру поглощения?
7. Как устроен спектроскоп?
8. В чем заключается явление дисперсии света?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ИОНИЗАЦИИ ГАЗА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить потенциал ионизации аргона.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.

3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ИОНИЗАЦИИ ГАЗА

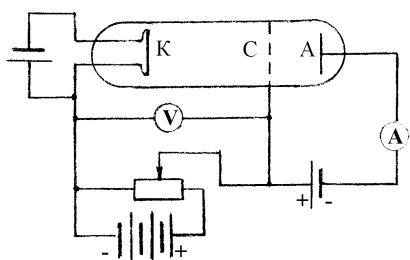


Рис. 1

При поглощении электроном атома достаточной энергии он может покинуть атом, в результате чего образуется положительный ион. Этот процесс называется ионизацией. В качестве ионизаторов газов могут выступать рентгеновское, ультрафиолетовое, радиоактивное излучения, высокая температура. Возможна и ударная ионизация, когда свободный движущийся электрон, обладающий достаточной

кинетической энергией, при соударении выбивает электрон атома. Работа против сил взаимодействия между электроном атома и ядром называется работой ионизации. Потенциалом ионизации называется та разность потенциалов, которую должен пройти электрон в ускоряющем электрическом поле для того, чтобы увеличение его энергии было равно работе ионизации.

Немецкие физики Джеймс Франк и Густав Герц на опыте подтвердили наличие дискретных энергетических уровней атома. Электроны, вылетающие из катода К, ускорялись разностью потенциалов U между катодом и сеткой и, преодолевая задерживающее поле между сеткой и анодом (порядка 0,5 В), попадали на анод (рис. 1). Если в сосуде был вакуум, то график зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения имел вид, показанный на рис. 2. При наполнении сосуда парами ртути на графике возникали максимумы и минимумы тока. Расстояние между двумя соседними максимумами или минимумами равны 4,9 В.

Пока кинетическая энергия электрона меньше 4,9 эВ, он упруго взаимодействует при столкновениях с атомами ртути, изменяя лишь направление движения. Но у части электронов после серии столкновений восстанавливается первоначальное направление движения. Анодный ток растет с увеличением ускоряющего напряжения.

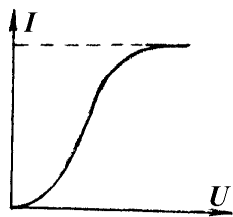


Рис. 2

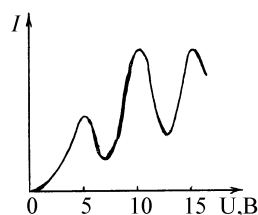


Рис. 3

Когда энергия электрона достигает значения 4,9 эВ, столкновения становятся неупругими, т.е. электрон отдает свою кинетическую энергию одному из электронов атома ртути. Электроны, потерявшие кинетическую энергию, не могут преодолеть тормозящее поле и дойти до анода, следовательно, анодный ток резко падает. При дальнейшем возрастании ускоряющего напряжения электрон может опять набрать энергию, достаточную для возбуждения атома ртути и т.д., что обеспечит следующие максимумы тока (рис. 3).

Если потенциал анода сделать ниже потенциала катода, то электроны независимо от величины ускоряющего напряжения до анода доходить не будут. Ток возникнет только при появлении положительных ионов, т.е. когда электроны будут ионизировать атомы ртути. На этом основан способ определения потенциала ионизации атомов.

Для определения потенциала ионизации в работе применяется газоразрядная лампа - тиратрон, заполненная исследуемым газом. Расстояние катод-сетка меньше, чем расстояние сетка-анод и давление газа подбирается таким образом, чтобы длина свободного пробега электронов в газе была больше расстояния между катодом и сеткой. На сетку подается положительный относительно катода потенциал, который можно изменять с помощью потенциометра R и измерять вольтметром V . На анод подается отрицательный потенциал, такой, чтобы тормозящее напряжение между сеткой и анодом было больше, чем ускоряющее между катодом и сеткой.

Электроны, испускаемые катодом, движутся до сетки практически без соударений и приобретают кинетическую энергию $T = eU$. Так как потенциал анода более низкий, чем потенциал катода, то электроны не будут долетать до анода и ток через микроамперметр равен нулю.

При увеличении разности потенциалов между катодом и сеткой энергия электрона станет равной энергии ионизации. В пространстве сетка-анод появятся положительные ионы, которые будут двигаться к аноду, через амперметр пойдет ток. Наименьший потенциал сетки, при котором появился анодный ток, и является потенциалом ионизации.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Тиратрон.
2. Блок питания.
3. Микроамперметр.
4. Вольтметр.
5. Омическое сопротивление.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить установку (рис. 4) к сети (220 В) и включить тумблер "Сеть". Прогреть установку в течение трех минут.
2. Медленно повышая потенциометром ускоряющее напряжение, заметить, при каком его значении микроамперметр покажет наличие тока.

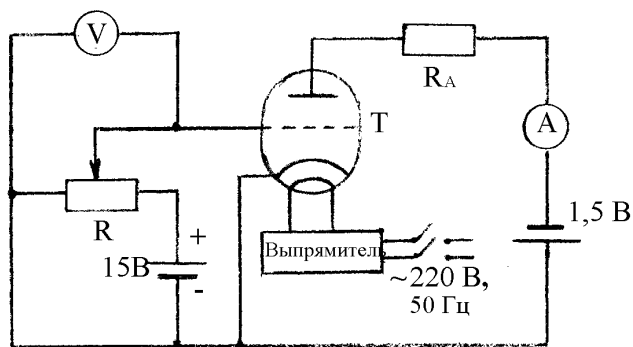


Рис. 4

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление ионизации газов?
2. Перечислите и охарактеризуйте известные Вам способы ионизации газов?
3. Что называется потенциалом возбуждения и потенциалом ионизации газа?
4. Объясните суть метода определения потенциала ионизации газа в данной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПУАССОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение закона распределения Пуассона.
2. Ознакомление с методикой оценки ошибок измерений при наблюдении редких случайных событий.
3. Построение кривой распределения Пуассона по экспериментальным данным, полученным при регистрации радиоактивного излучения.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Практикум по ядерной физике / Под ред. Ш.Ш. Башкирова. - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1985. - 126 с.
2. Жуковский Ю.Г. Практикум по ядерной физике. - М.: Высш. шк., 1975. - 197 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

При измерении любых физических величин из-за разнообразных неконтролируемых воздействий результаты измерений носят статистический характер. При изучении многих физических явлений обычно численное значение измеряемой величины является в эксперименте неизменным, а результаты измерений флуктуируют из-за несовершенства измерительных приборов, воздействия каких либо внешних факторов и пр. Полученные в процессе измерений численные значения распределены, как правило, по некоторому непрерывному вероятностному закону, чаще всего, по закону Гаусса. Вместе с тем, можно указать достаточно широкий класс экспериментов, в особой мере относящихся к физическим явлениям в микромире, когда сама измеряемая величина случайна по своей природе. Это означает, что регистрируемые значения флуктуируют даже в случае идеального измерительного прибора, не подверженного статистическому влиянию окружающих условий. Измеряемая величина является уже не непрерывной, а дискретной и наиболее характерным законом распределения вместо закона Гаусса будет закон Пуассона, а иногда биномиальный закон. Если, например, исследуется радиоактивный распад, наблюдается рассеяние частиц в данном интервале углов, изучаются ядерные реакции - во всех этих случаях фактически имеют дело с событиями, которые либо происходят, либо не происходят в данный интервал времени. Так, радиоактивное ядро или распадается или нет, частицы либо попадут в интересующий интервал углов, либо нет, ядерная реакция произойдет или нет. При достаточно большом числе повторных испытаний в неизменных условиях случайные значения измеряемой величины приближенно укладываются в некоторое распределение вероятности получить в отдельном испытании то или иное ее значение. Если, например производятся измерения числа актов радиоактивного распада и счетчик регистрирует отсчеты n_1, n_2, \dots в течение заданного промежутка времени, то средняя вероятность P_n получить при большом числе опытов отсчеты, равные n определяется соотношением Пуассона

$$P_n = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle}, \quad (1)$$

где $\langle n \rangle$ - среднее число актов распада, причем $\langle n \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n$.

Характерной особенностью распределения Пуассона является следующее:

1) дисперсия σ_n^2 случайной величины n равняется ее среднему значению,

т.е. $\sigma_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\infty} (n - \langle n \rangle)^2 = \langle n \rangle$;

2) при больших значениях $\langle n \rangle$ распределение становится почти симметричным относительно $n = \langle n \rangle$ и близким к распределению Гаусса:

$$P(\varepsilon) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} \right) \exp \left[-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_n^2} \right], \quad (2)$$

где $\varepsilon = n - \langle n \rangle$.

Как видно из формулы (1) и рис. 1, распределение Пуассона полностью определяется заданием только одного параметра - среднего числа $\langle n \rangle$. Поэтому, если выполнить измерения и получить соответствующее распределение величин, то можно найти их среднее значение $\langle n \rangle$, что и является часто основной целью эксперимента.

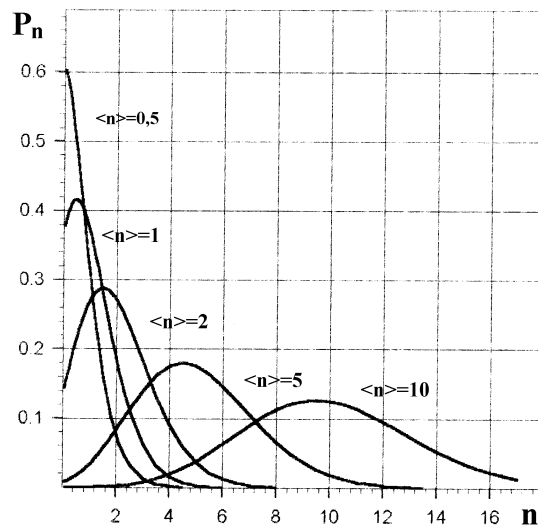


Рис. 1

Из формулы (2) видно, что в случае закона Пуассона среднее квадратичное отклонение Δn , равное σ_n , определяется как $\Delta n = \sqrt{\langle n \rangle}$, а относительная ошибка

измерений $\delta = \frac{\Delta n}{\langle n \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\langle n \rangle}}$.

Таким образом, величина δ уменьшается обратно пропорционально $\sqrt{\langle n \rangle}$ и если стоит задача измерить число распадов с заданной относительной ошибкой δ , то необходимо сделать $n = \frac{1}{\delta^2}$ отсчетов измеряемой величины. Например, ста-

тистическая ошибка составит не более 1 %, если в эксперименте производится регистрация 10^4 частиц.

Используя формулу (2) (в случае $\sqrt{\langle n \rangle} \gg 1$), можно вычислить вероятность P того, что величина $\varepsilon = n - \langle n \rangle$ заключена в интервале от $\varepsilon = \varepsilon_1$ до $\varepsilon = \varepsilon_2$. В частности, вероятность того, что отклонение измеренного значения n от среднего $\langle n \rangle$ не превышает по модулю величины абсолютной ошибки Δn :

$$P(|\varepsilon| \leq \Delta n) = 0,682. \quad (3)$$

Точно также получаем

$$P(|\varepsilon| \leq 2\Delta n) = 0,954. \quad (4)$$

Таким образом, если регистрировать большое количество значений величины n , то в 68,2 % случаев отсчеты будут отличаться от $\langle n \rangle$ не более, чем на $\langle n \rangle$, а в 95,4 % случаев - не более, чем на $2\langle n \rangle$ и т.д. Результат измерения отсчетов n приводится всегда вместе со своей абсолютной ошибкой $\Delta n = \sqrt{\langle n \rangle}$, которая является показателем статистической точности измерений.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Радиометр Б-2 с блоком газовых счетчиков БГС-2 и торцевым счетчиком Гейгера-Мюллера.
2. Электронное реле времени.
3. Источник радиоактивного излучения.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Регистрируется бета-распад радиоактивного препарата, при помощи торцевого счетчика Гейгера-Мюллера МСТ-17 и радиометра Б-2 (рис. 2).

В комплект радиометра входят выносной блок БГС-2 (где и установлен торцевой счетчик) и основной блок ВСП, включающий в себя пересчетную схему для регистрации числа бета-частиц, попавших в счетчик, и высоковольтный выпрямитель для питания счетчика. Источник излучения (И) помещается в кассету вблизи входного окна счетчика. Управление пуском и остановкой счета через заданный интервал времени производится с помощью электронного реле времени (ЭРВ), подключенного к цепи тумблера "пуск" радиометра.

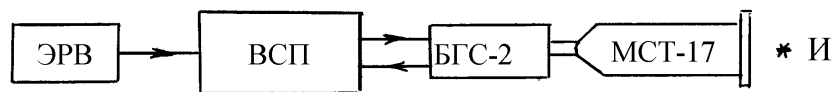


Рис. 2

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить радиометр к работе, для этого:
 - а) проверить заземление прибора;
 - б) вывести ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению, подаваемому на счетчик;
 - в) включить тумблер "Сеть" и дать прогреться прибору в течение ≈ 3 мин.;
 - г) нажать кнопку "Сброс" и убедиться, что погасли все неоновые лампочки пересчетного устройства;
 - д) установить переключатель коэффициентов пересчета в положение "x64";
 - е) осторожным медленным поворотом ручки регулятора напряжение под-
нять до 1500 В (не выше!).

2. На реле времени задать время выдержки 3 с.

3. Произвести по 100 измерений числа импульсов без источника, т.е. используя фоновое излучение. При каждом счете:

а) нажать кнопку "Пуск" на реле времени;

б) после остановки счета отсчитать число импульсов, для этого сложить числа, стоящие у горящих неоновых лампочек;

в) нажать кнопку "Сброс" на радиометре, тем самым приготовиться к следующему счету.

4. Установить с помощью лаборанта источник излучения в кассету и вновь произвести 100 измерений числа импульсов с источником.

5. Обработать полученные результаты и представить их в виде графика (гистограммы) для каждой из двух серий измерений. По оси абсцисс откладывать n - число импульсов в отдельном измерении, по оси ординат N_n - число измерений, в которых было получено значение n , т.е. число "нулей", "единиц", "двоек" и т.д.

6. Рассчитать значение $\langle n \rangle$ по данным гистограммы, используя формулу

$$\langle n \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{n=n_{\max}} n N_n}{N},$$

где N_n - количество измерений, в которых зарегистрировано n число импульсов; N - общее количество выполненных измерений ($N = 100$); n_{\max} - максимальное число импульсов, зарегистрированное в эксперименте.

7. На графики-гистограммы нанести расчетную кривую распределения Пуассона для полученных опытных значений $\langle n \rangle$. При этом нужно умножить теоретические значения вероятностей P_n на полное число измерений N . Тогда обе кривые будут одинаково нормированы (к полному числу измерений) и их можно сравнивать.

8. Найти абсолютную Δn и относительную δ флуктуации по соотношениям $\Delta n = \sqrt{\langle n \rangle}$ и $\delta = \frac{1}{\sqrt{\langle n \rangle}}$ для счета при установленном источнике излучения.

9. Определить, какая доля измеренных величин имеют значения в диапазоне от $(n - \sqrt{\langle n \rangle})$ до $(n + \sqrt{\langle n \rangle})$, для чего найти отношение числа таких измерений к полному числу измерений. Сравнить полученный результат с теоретическим, согласно которому $P \approx 0,682$ (см. соотношение (3)).

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой класс явлений описывает распределение Пуассона?

2. Каковы характерные особенности распределения Пуассона?

3. Как рассчитываются абсолютная и относительная флуктуации случайных величин от среднего значения?

4. Как оценивается число необходимых замеров при заданной относительной ошибке?

5. Как оценивается вероятность того, что измеряемая величина n находится в определенном интервале значений.

6. Опишите опытную установку и методику измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ГАЗОРАЗРЯДНОГО СЧЕТЧИКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомление с методами регистрации ионизирующих частиц.
2. Изучение принципа работы счетчика Гейгера - Мюллера.
3. Построение счетной характеристики и определение рабочего напряжения счетчика.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Счетчик Гейгера - Мюллера является наиболее распространенным детектором ядерного излучения. Конструкция гейгеровских счетчиков разнообразна и определяется конкретным их назначением. Цилиндрический газоразрядный счетчик СТС-5, изучаемый в настоящей работе, представляет собой металлический цилиндр, по оси которого натянута тонкая металлическая нить (рис. 1). Нить служит анодом, трубка – катодом.

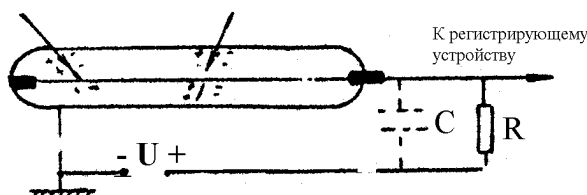


Рис. 1

Ядерное излучение, обладающее достаточно большой энергией, превышающей энергию ионизации молекул газа, создает в объеме счетчика носители зарядов обоих знаков, которые движутся под действием электрического поля к электродам. При достаточно высоком напряжении в объеме счетчика начинается ударная ионизация, приводящая к процессу газового усиления и самостоятельному газовому разряду. Коэффициент размножения ионов может достигать 10^8 и более, возникают большие импульсы напряжения на аноде, не зависящие от числа первичных ионов, образованных частицей. Электронная аппаратура, регистрируя импульс, отмечает факт попадания ионизирующей частицы в объем счетчика.

Самостоятельный разряд, возникающий в счетчике, необходимо погашать, иначе счетчик не в состоянии будет фиксировать следующие частицы. В зависимости от механизма гашения счетчики Гейгера - Мюллера подразделяются на самогасящиеся и несамогасящиеся. В несамогасящихся применяется внешнее гашение с помощью специальной гасящей радиотехнической схемы, периодически понижающей напряжение на счетчике, вследствие чего разряд прерывается. В самогасящихся счетчиках гашение достигается наполнением счетчика гасящей смесью, включающей добавки многоатомных газов или галогена, которая видоизменяет механизм разряда так, что достигается быстрое прекраще-

ние разряда. В настоящей работе используется самогасящийся галогенный счетчик (СГС). Преимуществом СГС перед другими счетчиками является сравнительно низкое рабочее напряжение - порядка (300...500) В и большой срок службы. К недостаткам их относятся несколько большая длительность разряда - порядка 10^{-5} с.

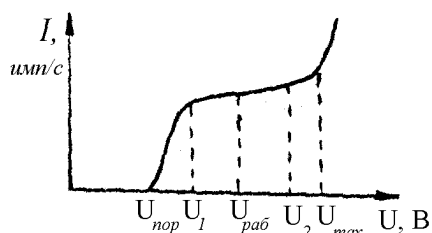


Рис. 2

На рис. 2 изображена типичная счетная характеристика счетчиков Гейгера - Мюллера, представляющая зависимость числа сосчитанных импульсов от напряжения на счетчике при облучении его постоянным потоком частиц.

Счет начинается при некотором пороговом напряжении $U_{\text{пор}}$ и при увеличении напряжения в некотором диапазоне $U_1...U_2$ скорость счета I мало изменяется. Этот участок счетной характеристики, называемый плато счетчика, соответствует регистрации каждой частицы, создающей в объеме счетчика хотя бы одну пару ионов. Обычно хорошие счетчики имеют ширину плато порядка 200 В и наклон его не превышает (2...3) % на 100 В. Существование плато снижает требования к стабильности источника напряжения, питающего счетчик. Рабочее напряжение выбирается в середине плато.

Поскольку счетная характеристика несколько видоизменяется в зависимости от числа поступающих в счетчик ионизирующих частиц, в лабораторной работе снимается две счетные характеристики без активного источника с регистрацией "фона" и с радиоактивным источником.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Свинцовый домик с блоком газовых счетчиков (БГС) и счетчиком Гейгера - Мюллера (СТС-5).
2. Декадный пересчетный прибор (ПП-16).
3. Выпрямитель.
4. Источники излучения.
5. Секундомер.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Счетчик СГС-5 (рис. 3) установлен в блок газовых счетчиков БГС-4 и помещен в защитный домик (D), облицованный свинцовыми пластинами. Источник излучения (И) крепится в зажиме вблизи счетчика. Напряжение на счетчик

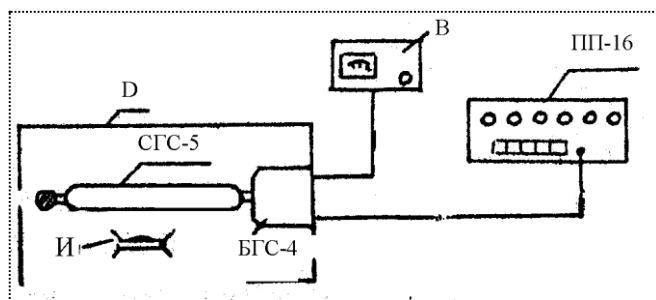


Рис. 3

подается от выпрямителя (В) и может изменяться вращением ручки потенциометра в пределах (200...600) В. Для регистрации импульсов используется прибор ПП-16 с декадной системой счета. Прибор собран из газоразрядных счетчиков ламп-декатронов. Первый справа на лицевой панели прибора декактрон отсчи-

тывает число импульсов до 9-ти включительно, десятый импульс фиксируется цифрой 0 на первом декатроне и цифрой 1 на втором. Второй декатрон отсчитывает десятки импульсов, третий - сотни и т.д. Включение ПП-16 осуществляется кнопкой "сеть", начало и конец счета производится кнопками "пуск" и "стоп" соответственно, а установка декатронов на нули - кнопкой "сброс".

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Вывести потенциометр на выпрямителе в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению, подаваемому на счетчик.

2. Подключить выпрямитель и ПП к сети 220 В, на ПП нажать кнопку "сеть" и затем "сброс"; для готовности приборов к работе требуется 5-минутный прогрев.

3. Снять счетную характеристику $I = f(U)$ без радиоактивного препарата. Счет производить в течение 1 мин. трижды при каждом фиксированном напряжении. Менять напряжение через 25 В (в области быстрого изменения скорости счета - через 10 В). Зафиксировать напряжение начала счета $U_{\text{нор}}$.

Внимание: во избежание поломки ПП запрещается нажимать одновременно две и более кнопок управления счетом на панели прибора. Очередность управления следующая: "пуск", "стоп", "сброс".

4. Установить в зажимы радиоактивный препарат. Радиоактивный источник из домика самовольно не вынимать, защитный фартук из просвинцованной резины должен быть закрыт.

5. Снять счетную характеристику с источником излучения по методике, указанной в п. 3.

6. Все полученные данные занести в таблицы произвольной формы.

7. По выполнении работы:

а) отжать кнопку "сеть" на ПП;

б) отключить ПП и выпрямитель от сети;

в) вызвать лаборанта и сдать радиоактивный препарат.

8. Построить счетные характеристики при работе с источником излучения и без него.

9. Указать пороговое напряжение $U_{\text{нор}}$ и рабочее напряжение счетчика $U_{\text{раб}}$.

10. Определить наклон плато К как отношение разности в скорости счета в конце (I_2) и в начале (I_1) "плато" протяженностью в 100 В к средней скорости счета, т.е. $K = \frac{2(I_2 - I_1)}{I_1 + I_2}$.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют методы регистрации ионизирующих частиц и каковы преимущества и недостатки каждого метода?

2. Как работает счетчик Гейгера - Мюллера?

3. Каково различие самогасящихся и несамогасящихся счетчиков?

4. Как выбирается рабочее напряжение счетчика?

5. Что такое плато счетной характеристики и как определяется его наклон?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АЛЬФА-ЧАСТИЦ И ПЕРИОДА ПОЛУРАСПАДА ИЗОТОПА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить закономерность альфа-распада и взаимодействие альфа-частиц с веществом.
2. Ознакомиться с методами определения длины пробега и энергии альфа-частиц.
3. Определить максимальный, экстраполированный и средний пробег альфа-частиц в воздухе и алюминии, энергию альфа-частиц и период полураспада изотопа.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. - М.: Наука, 1989.-304 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
3. Практикум по ядерной физике / Под ред. Ш.Ш. Башкирова. - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1985. - 126 с.
4. Практикум по ядерной физике / Под ред. В.О. Сергеева. - М.: Высш. шк., 1975. - 197 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Альфа-распад - это самопроизвольное радиоактивное превращение атомного ядра, при котором испускается α -частица - ядро гелия ${}^4_2\text{He}$. Данный вид радиоактивного распада является характерным для тяжелых ядер ($Z > 82$). В виде редких исключений встречаются α -радиоактивные ядра и с $Z < 82$, например, среди редкоземельных элементов или среди некоторых нейтронодефицитных ядер. Времена жизни α -радиоактивных ядер колеблются в очень широких пределах: от $3 \cdot 10^{-4}$ с для ${}_{84}\text{Po}^{212}$ до $5 \cdot 10^{15}$ лет для ${}_{60}\text{Nd}^{144}$. В то же время энергии вылетающих α -частиц варьируются в значительно меньшей степени - от 4 до 9 МэВ (для редкоземельных α -активных ядер - от 2 до 4,5 МэВ).

В процессе α -распада различают две основные стадии: образование α -частицы из нуклонов ядра и испускания α -частицы ядром. Первая стадия происходит с достаточно большой вероятностью и вследствие этого мало сказывается

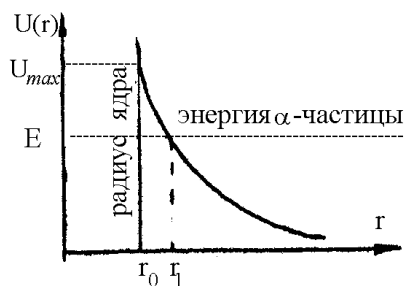


Рис. 1

на временах жизни ядер, которые, в основном, определяются второй, существенно более медленной стадией. Известно, что α -частицы, испускаемые ядром, имеют энергию меньшую, чем максимальное значение потенциальной энергии системы ядро- α -частица (меньше высоты потенциального барьера U_{\max} , рис. 1). Проникновение α -частицы через кулоновский барьер происходит вследствие туннельного эффекта.

Прозрачность барьера D при движении частицы по радиусу r определяется соотношением

$$D = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{r_0}^r \sqrt{2m(U - E)} dr\right], \quad (1)$$

где D_0 - постоянная, близкая к единице; r_0 - эффективный радиус ядра; E - энергия частицы; m - масса частицы.

Вероятность частицы массой m пройти сквозь барьер, т.е. постоянная распада ядра λ , пропорциональна прозрачности барьера и числу ударов частицы о барьер в единицу времени $\nu \approx \frac{V}{2r_0}$, где V - скорость α -частицы, причем, $V = \sqrt{\frac{2E}{m}}$.

Таким образом, можно записать для постоянной распада

$$\lambda = D \nu = \frac{1}{2r_0} \sqrt{\frac{2E}{m}} \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{r_0}^r \sqrt{2m(U - E)} dr\right]. \quad (2)$$

Формула (2) показывает резкую зависимость постоянной α -распада ядер, а значит и периода полураспада T изотопа от энергии E_α испускаемых α -частиц. Так, изменение энергии α -частицы на 10 % приводит к изменению вероятности α -распада примерно в 1000 раз. Формула (1) составляет теоретическую основу закона Гейгера - Неттола, который может быть записан в виде

$$\lg T = C_1 + \frac{C_2}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad (3)$$

где C_1 и C_2 - константы, зависящие от заряда ядра. Более точные исследования показали, что у α -излучающего ядра существует несколько групп «моноэнергетических» α -частиц, т.е. определенный спектр энергий, вследствие того, что распад может идти не только на основной, но и на возбужденные уровни дочернего ядра. Кроме того, материнское ядро может также находиться в возбужденном состоянии в результате предшествующего β -распада.

Энергия вылетающих α -частиц может быть определена по величине их пробега в веществе, т.е. по расстоянию, которое частица проходит до момента полной потери энергии. При прохождении α -частиц через вещество их энергия расходуется преимущественно на ионизацию и возбуждение атомов поглощающего вещества в результате неупругих столкновений с орбитальными электронами атомов. Эти потери и определяют пробег частицы, т.е. путь, который она проходит до полной потери энергии. Затрата энергии на каждый акт ионизации мала (в воздухе $\approx 33,5$ эВ) в сравнении с начальной энергией частицы, вследствие чего она испытывает многократные взаимодействия, и это, в свою очередь, определяет почти одинаковый пробег однородных по энергии α -частиц. Пробег является константой, характеризующей α -излучение изотопа. Некоторое различие в пробегах частиц одинаковой энергии вызывается статистическими флуктуациями в числе ионизационных столкновений и флуктуациями малых потерь энергии в отдельных столкновениях. Связь пробега R_α в воздухе, измеренного в сантиметрах, и кинетической энергии E_α определяется эмпирической формулой

$$R_{\alpha} = 0,318E_{\alpha}^{3/2}, \quad (4)$$

Обычно средний пробег R_{α} измеряется экспериментально по кривой прохождения α -частиц через вещество (рис. 2), т.е. при измерении числа прошедших через вещество частиц как функции толщины $N(x)$.

Средний пробег R_{α} определяется как толщина вещества, поглощающая половину частиц. Различают еще максимальный пробег R_m и экстраполированный пробег R_e , физический смысл которых ясен из рисунка. Штриховой линией на рис. 2 построена дифференциальная кривая $dN(x)/dx = f(x)$, показывающая распределение α -частиц по длине пробега.

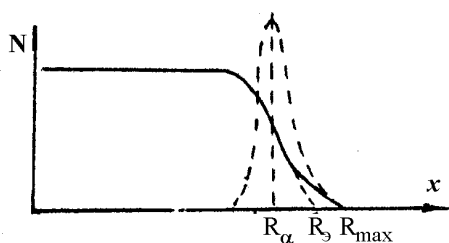


Рис. 2

Зная пробег α -частицы в воздухе, можно вычислить ее пробег в другой среде, пользуясь соотношением Брега - Климана:

$$R = \frac{0,56 \cdot 10^{-3} R_{\alpha} \sqrt[3]{A}}{\rho}, \quad (5)$$

где A - атомная масса вещества, а.е.м.; ρ - плотность вещества, г/см³; R_{α} - средний пробег α -частиц в воздухе, см; R - средний пробег α -частиц в веществе, см.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Сцинтилляционный счетчик.
2. Измеритель скорости счета.
3. Приспособление для перемещения источника альфа-частиц
4. Препарат альфа-радиоактивного изотопа плутония.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для регистрации α -частиц используется блок детектирования БДА2-01, основу которого составляет сцинтилляционный счетчик с кристаллом $ZnS(Ag)$. Блок обеспечивает регистрацию α -частиц с энергией не менее 5,15 МэВ. Сигналы с блока детектирования поступают на измеритель скорости счета УИМ2-1еМ, который показывает число регистрируемых счетчиком частиц в единицу времени. Радиоактивный препарат Pu устанавливается в координатное устройство, которое позволяет перемещать препарат и отмечать расстояние x от источника до счетчика.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить измеритель скорости счета с блоком детектирования к работе в соответствии с инструкциями к приборам.
2. Установить в координатное устройство источник α -излучения.
3. Вращая винт координатного устройства, подать радиоактивный источник на минимальное расстояние x_0 от блока детектирования; величину x_0 учитывать при дальнейших отсчетах пробега частиц.
4. Последовательно увеличивая расстояние между источником и счетчи-

ком на 2 мм, снимать показания измерителя скорости счета (в соответствии с инструкцией к прибору).

5. По полученным данным построить график зависимости скорости счета импульсов от толщины слоя воздуха между счетчиком и источником. По графику определить средний пробег R_α , максимальный пробег R_m и экстраполированный пробег R_e .

6. По найденному среднему пробегу вычислить, пользуясь эмпирической формулой (4), (здесь R_α - в см, E_α - в МэВ) энергию α -частиц.

7. С помощью соотношения (3) (здесь E_α - в МэВ, T - в секундах) вычислить период полураспада изотопа, принимая для плутония $C_1 = - 53,35$, $C_2 = 147,4$.

8. Вычислить пробег α -частиц в алюминии, используя соотношение (5).

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы закономерности α -распада?
2. Почему α -частицы обладают дискретным спектром энергии?
3. Какой механизм взаимодействия α -частиц с веществом?
4. Что такое средний, экстраполированный и максимальный пробег?
5. Опишите экспериментальную установку для измерения пробега α -частиц в воздухе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование эффекта Холла и определение типа, концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводнике.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т.]. - Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - М.: Наука, 1989. - 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1998. - 478 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Суть эффекта Холла заключается в следующем: если через металлическую или полупроводниковую пластинку, помещенную в магнитное поле, пропустить постоянный ток плотностью \vec{j} , направление которого перпендикулярно вектору \vec{B} , то на ее плоскостях в направлении, перпендикулярном \vec{j} и \vec{B} , возникнет разность потенциалов $\phi_1 - \phi_2$. Появление поперечной разности потенциалов на проводнике с током в магнитном поле называется эффектом Холла (рис. 1).

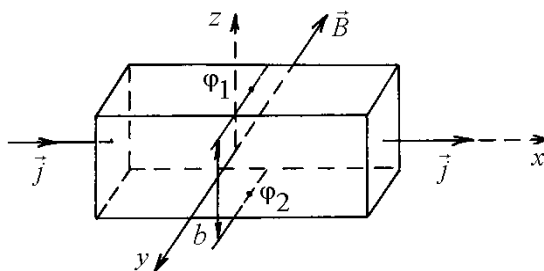


Рис. 1

Холловская разность потенциалов определяется выражением

$$U_H = R b j B, \quad (1)$$

где b - расстояние между рассматриваемыми параллельными гранями проводника; j - плотность тока; B - магнитная индукция поля; R - коэффициент пропорциональности (постоянная Холла).

Простейшая микроскопическая теория эффекта Холла основана на представлении о свободных носителях заряда в проводнике. Рассмотрим проводник в форме прямоугольной пластинки, через которую течет ток плотностью j (рис. 2).

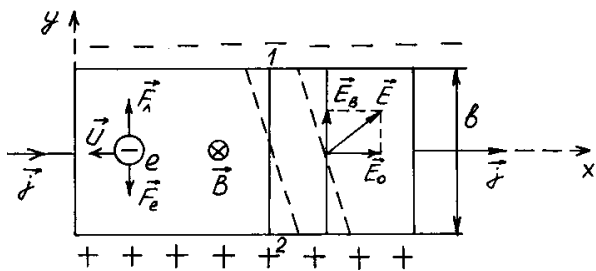


Рис. 2

В отсутствие магнитного поля ток в пластинке обусловлен электрическим полем \vec{E}_0 , создаваемым внешним источником. Эквипотенциальные поверхности этого поля образуют систему перпендикулярных к вектору \vec{E}_0 плоско-

стей. Две из них изображены на рис. 2 сплошными линиями. Потенциал в любой точке каждой из плоскостей, а, следовательно, и в точках 1 и 2, одинаков. Поскольку носители заряда – электроны – имеют отрицательный заряд, то скорость их упорядоченного движения \vec{v} направлена противоположно вектору плотности тока \vec{j} .

При появлении магнитного поля, перпендикулярного направлению тока, каждый носитель отрицательного заряда оказывается под воздействием силы Лоренца, действующей со стороны магнитного поля и направленной как показано на рисунке 2 вдоль оси y вверх.

$$\vec{F}_L = e [\vec{v} \times \vec{B}], \quad (2)$$

или в скалярной форме:

$$F_L = e \cdot \langle v \rangle \cdot B. \quad (3)$$

В результате у электронов появляется составляющая скорости, направленная к верхней границе пластины. У этой грани образуется избыток отрицательных зарядов, у нижней, соответственно, их недостаток. Следовательно, возникает дополнительное поперечное электрическое поле \vec{E}_b и сила $e\vec{E}_b$, действующая на носители тока в направлении, противоположном силе Лоренца. При равенстве этих сил устанавливается стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Соответствующее значение E_b определяется условием

$$F_L = F_e,$$

или

$$e \langle v \rangle B = eE_b,$$

откуда

$$E_b = \langle v \rangle B. \quad (4)$$

Поле \vec{E}_b складывается с полем \vec{E}_o , образуя результирующее поле \vec{E} . Поскольку эквипотенциальные поверхности должны оставаться перпендикулярными вектору напряженности поля, они займут положение, изображенное на рисунке 2 пунктиром. Точки 1 и 2, которые прежде лежали на одной и той же эквипотенциальной поверхности, теперь имеют разные потенциалы. Разность потенциалов между точками 1 и 2 связана с напряженностью поля E_b соотношением:

$$U_{1,2} = b E_b = b \langle v \rangle B. \quad (5)$$

Учитывая, что средняя скорость упорядоченного движения носителей заряда связана с плотностью тока соотношением

$$j = e n \langle v \rangle, \quad \text{или} \quad \langle v \rangle = \frac{j}{en}, \quad (6)$$

находим

$$U_{12} = \frac{1}{en} j b B. \quad (7)$$

Полученная формула совпадает с выражением (1), если положить

$$R = \frac{1}{e \cdot n} . \quad (8)$$

Таким образом, постоянная Холла зависит от концентрации носителей заряда. Определив экспериментально R , можно найти и концентрацию носителей заряда.

Важной характеристикой проводника является подвижность в нем носителей заряда. Подвижностью носителей заряда называется средняя скорость, приобретаемая носителями в электрическом поле, напряженность которого равна единице:

$$\langle v_o \rangle = \frac{\langle v \rangle}{E} . \quad (9)$$

Подвижность можно связать с проводимостью σ и концентрацией носителей заряда. Действительно, $j = e \cdot n \cdot \langle v \rangle$. Поделим обе части равенства на напряженность поля E :

$$\frac{j}{E} = \frac{\langle v \rangle}{E} en.$$

Приняв во внимание, что $\frac{j}{E} = \sigma$, и $\frac{\langle v \rangle}{E} = \langle v_o \rangle$, получим

$$\sigma = e n \langle v_o \rangle . \quad (10)$$

Измерив постоянную Холла и проводимость σ , можно по формулам (8) и (10) найти концентрацию и подвижность носителей тока в образце.

Нетрудно видеть, что знак поперечной разности потенциалов $U_{1,2}$ зависит от знака движущихся зарядов. На рис. 3 показан эффект Холла для образцов с положительными и отрицательными зарядами.

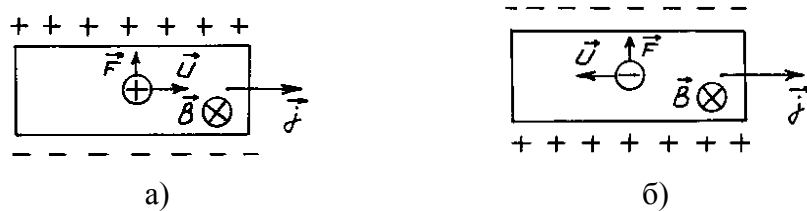


Рис. 3

Направление магнитной силы изменяется на противоположное как при изменении направления движения заряда, так и при изменении его знака. Следовательно, для двух разных образцов при одинаковом направлении тока и поля, магнитная сила, действующая на положительные и отрицательные носители, имеет одинаковое направление. Поэтому, в случае положительных носителей потенциал верхней (рис. 3) грани, выше, чем нижней, а в случае отрицательных носителей - ниже. Таким образом, определив знак холловской разности потенциалов, можно установить знак носителей заряда.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Датчик Холла.
2. Миллиамперметр.
3. Реостат.
4. Источник постоянного тока.
5. Электромагнит.
6. Регулируемый источник постоянного тока питания электромагнита.
7. Милливольтметр.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

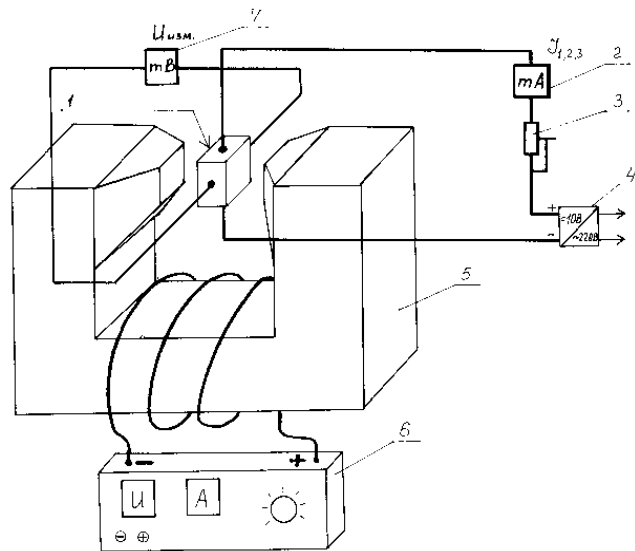


Рис. 4

Используемые приборы показаны на рис. 4. Датчик Холла расположен между полюсными наконечниками - концентраторами магнитного поля. Обмотка электромагнита подключена к источнику постоянного тока с регулируемым напряжением. Путем регулировки тока в обмотке электромагнита устанавливается необходимое значение индукции B в зазоре между его полюсами. В продольном направлении через датчик Холла пропускают ток, величину которого устанавливают с помощью реостата 3 и измеряют с помощью миллиамперметра 2. Величина тока I не должна превышать 3 мА. В поперечном направлении к контактам датчика Холла подключен милливольтметр 7, который определяет разность потенциалов U_H . Применяемая конструкция датчика Холла не имеет выводов для компенсации начальной разности потенциалов, поэтому даже при отсутствии внешнего магнитного поля и небольшом продольном токе I через образец, существует некоторая поперечная разность потенциалов U_0 , не связанная с эффектом Холла. Разность потенциалов, связанную с эффектом Холла определяют при наличии магнитного поля и тока через образец как разницу между измеренным значением разности потенциалов U_H и начальным значением U_0 при данном токе через образец

$$U_H = U_H - U_0. \quad (11)$$

Таким образом, расчетным путем компенсируется начальная разность потенциалов, не обусловленная эффектом Холла. Величина U_0 различна для различных значений тока I через датчик и может обозначаться как U_{01} , U_{02} , U_{03} и т.д. Следует отметить, что прибор 7 имеет невысокое входное сопротивление, поэтому его показания нельзя принимать за ЭДС Холла. Чтобы рассчитать ЭДС Холла, необходимо воспользоваться законом Ома для полной цепи, приняв внутреннее сопротивление образца $r = 200$ Ом. Например, если в результате эксперимента определено значение $U_H = 200$ мВ, $I = 0,2$ мА, то зная сопротивление внешней цепи, т.е. прибора ($R_n = 1000$ Ом), можно определить ЭДС Холла по формуле

$$\varepsilon_H = I \cdot (R_n + r) = 0,2 \cdot (1000 + 200) = 240 \text{ мВ},$$

где I - ток (в мА) отклонения прибора, соответствующий приложенной разности потенциалов. Величина этого тока, взятая в мкА, численно совпадает с величиной поперечной разности потенциалов, взятой в мВ. Это обусловлено особенностями построения шкалы измерительного прибора, что и позволило непосредственно использовать это числовое значение для подстановки в формулу определения ЭДС Холла, но с изменением ее размерности.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять вольтамперную характеристику датчика Холла $I = f(U)$ при отсутствии магнитного поля и значениях питающего напряжения U_n датчика, указанных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

$U_n, \text{В}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I, \text{мА}$										

2. Построить график зависимости $I = f(U)$.

3.1. Определить разность потенциалов Холла U_x в зависимости от магнитной индукции B при трех значениях тока I через датчик: $I_1 = 1$ мА, $I_2 = 2$ мА, $I_3 = 3$ мА.

3.2. Установить значение тока через датчик $I_1 = 1$ мА и при $B = 0$ определить остаточное напряжение U_{01} в датчике при данном токе.

3.3. Установить различные значения индукции магнитного поля B путем изменения напряжения питания электромагнита (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

$U_M, \text{В}$	0	4	8	12	16	20	24
$I_M, \text{А}$	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$B, \text{Тл}$	0	1	2	3	4	5	6

3.4 Для каждого значения индукции магнитного поля B определить напряжение U_3 , возникающее на датчике Холла, и занести в табл. 3.

Т а б л и ц а 3.1

$$I_1 = 1 \text{ мА}$$

$B, \text{Тл}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$U_3, \text{мВ}$								
$U_H = U_3 - U_{01}, \text{мВ}$								

Т а б л и ц а 3.2

$$I_1 = 2 \text{ мА}$$

B , Тл	0	1	2	3	4	5	6	7
U_3 , мВ								
$U_H = U_3 - U_{01}$, мВ								

Т а б л и ц а 3.3

$$I_1 = 3 \text{ мА}$$

B , Тл	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
U_3 , мВ								
$U_H = U_3 - U_{01}$, мВ								

3.5. Вычислить значения разности потенциалов Холла как разность $U_3 - U_{01}$ и занести в табл. 3.

4. Аналогичные измерения произвести для $I_2 = 2 \text{ мА}$, $I_3 = 3 \text{ мА}$, повторив п.п. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4. Данные занести в табл. 3.1, 3.2.

5. Построить графики зависимости $U_H = f(B)$ для I_1 , I_2 и I_3 .

6. Рассчитать постоянную Холла по формуле

$$R = \frac{U_x \cdot b}{I \cdot B},$$

где $b = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

7. Рассчитать концентрацию носителей заряда $n = \frac{3\pi}{8Re}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

8. Рассчитать подвижность носителей тока $\sigma = \frac{8R}{3\pi\rho}$, где $\rho = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ -

удельное сопротивление проводника.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите поведение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.

2. Запишите выражение для силы Лоренца и укажите направление этой силы.

3. Объясните механизм возникновения холловской разности потенциалов.

4. Объясните эффект Холла с позиций электронной теории.

5. Что такое «подвижность носителей заряда»?

6. Как связана подвижность носителей заряда с проводимостью σ и концентрацией n ?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ И ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение элементов кристаллографии. Определение типа кристаллической решетки по дебаеграмме поликристаллического образца.

Изучение работы рентгеновских аппаратов УРС-60 и УРС-50 ИМ.

Определение межплоскостных расстояний и плотности поликристаллического образца кубической структуры.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

По определению Г.В. Вульфа, кристаллом называется тело, ограниченное в силу своих внутренних свойств плоскими поверхностями - гранями. Наука о кристаллах и о кристаллическом состоянии вещества называется кристаллографией. Для кристаллов характерны правильные формы и их симметрия. Связь между геометрией внешней формы и внутреннего строения кристаллов, с одной стороны, и их физическими свойствами - с другой, устанавливается физической кристаллографией. В природе иногда встречаются достаточно крупные кристаллы, грани которых хорошо различимы визуально, а их внутренняя структура свидетельствует о том, что мы имеем дело с одиночным кристаллом. Такие кристаллы называются монокристаллами. Их линейные размеры составляют от 10 мкм до нескольких метров. Монокристаллы размерами в десятки сантиметров выращиваются искусственно на заводах. Гораздо более распространены твердые тела, состоящие из множества очень мелких кристаллов (размером от 10^{-3} до 10 мкм), сцепленных друг с другом межатомными и межмолекулярными силами и по разному ориентированных по отношению друг к другу. Такие компактные тела носят название поликристаллических. Для описания положения граней кристалла пользуются приемами аналитической геометрии, а именно - системой осей координат. Но если в аналитической геометрии предпочитают декартовы координаты, то в кристаллографии выбирают систему координат так, чтобы оси координат были параллельны ребрам кристалла и совпадали с поворотными осями (если таковые имеются). Причем, по каждой оси выбирается свой масштаб измерений - a , b , c - периоды кристаллической решетки, углы между осями обозначаются α , β , γ .

Кристаллам разных сингоний отвечают следующие характеристики:

- 1) кубическая: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
- 2) тетрагональная: $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
- 3) ромбическая: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
- 4) тригональная: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$;

- 5) моноклинная: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$;
 6) триклинная: $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$;
 7) гексагональная: $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$.

Если параметры граней измерять осевыми единицами (в единицах a , b и c , т. е. $x = A \cdot a$, $y = B \cdot b$, $z = C \cdot c$), то при таком методе характеристики положения граней выявляется весьма важный закон - закон рациональных отношений.

Параметры любой грани кристалла A , B , C , выраженные в осевых единицах, относятся как простые целые числа - индексы грани h , k , l (индексы Миллера).

Индексы грани - это величины, обратно пропорциональные параметрам грани A , B , C :

$$\frac{1}{A} : \frac{1}{B} : \frac{1}{C} = h : k : l. \quad (1)$$

Совокупность индексов грани называется символом грани: (hkl) ; символ единичной грани (111) . Если грань пересекает отрицательные направления осей, символ запишется $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$. Найдем, например, индексы грани с параметрами: $A = 2$, $B = 5$, $C = 2$ (рис. 1).

Отношение индексов граней

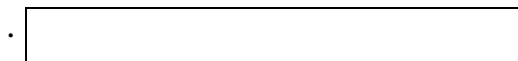
$$h:k:l = \frac{1}{2} : \frac{1}{5} : \frac{1}{2}.$$

Приведем дроби к общему знаменателю 10, который после этого отбросим. Получим: $h:k:l = 5:2:5$. Следовательно, символ грани (525) . Если грань параллельна одной из осей, например X , отношение ее индексов запишется в виде

$$h:k:l = \frac{1}{\infty} : \frac{1}{B} : \frac{1}{C} \Rightarrow (0kl).$$

Если грань параллельна двум осям, например, Y и Z , ее символом будет $(h00)$. Разделив на h , получаем окончательно (100) .

Помимо обозначений отдельных граней (hkl) применяются обозначения для совокупности сходных граней $\{hkl\}$. Например, обозначение $\{100\}$ заменяет совокупность



Направление, перпендикулярное грани (hkl) , обозначается $\{hkl\}$. Совокупность направлений, перпендикулярных граням, обозначается $\langle hkl \rangle$.

Пространственные решетки, например, относящиеся к кубической сингонии, бывают простые (P) и сложные - объемно-центрированные (I) и гранецентрированные (F) (рис. 2).



Рис. 2

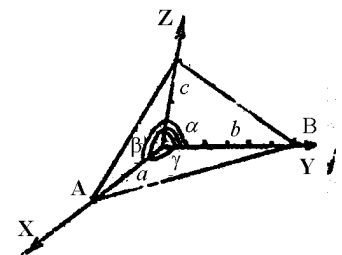


Рис. 1

В простой решетке на одну ячейку приходится одна частица, т.к. в каждой ячейке имеется 8 вершин, а каждая частица в вершине относится в свою очередь к 8 ячейкам: $\left(N = \frac{1}{8} \cdot 8 = 1\right)$.

В объемно-центрированной решетке на 1 ячейку приходится 2 частицы: $\left(N = \frac{1}{8} \cdot 8 + 1 = 2\right)$, в гранецентрированной - 4:

$$\left(N = \frac{1}{8} \cdot 8 + \frac{1}{2} \cdot 6 = 4\right).$$

В кубической сингонии величина межплоскостного расстояния d_{hkl} , выраженная в единицах периода идентичности a , как функция (hkl) выражается уравнением

$$d_{hkl}^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

или

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (3)$$

Таким образом, наибольшие межплоскостные расстояния отвечают наименьшим значениям $(h^2 + k^2 + l^2)$. Для рефлекса (100) $d = a$. Чем сложнее решетка, тем меньше рефлексов может возникнуть на рентгенограмме. Количество рефлексов на рентгенограмме зависит от длины волны рентгеновских монохроматических лучей, используемых для исследования и от величины периода идентичности a вещества. Индексы рефлексов обозначаются H, K, L . Они связаны с индексами плоскостей следующим образом: $H=nk, K=nk, L=nl$. Определив из характера кристаллической решетки индексы рефлексов HKL , легко найти их общий множитель n и затем индексы плоскости (hkl) .

Так, для кубических решеток разрешены следующие рефлексы (и индексы hkl):

- 1) примитивная (P) - все;
- 2) объемно-центрированная (I) - $H^2 + K^2 + L^2 = 2k$ (сумма квадратов индексов рефлексов - четное число, или $h+k+l=2k$);
- 3) гранецентрированная (F) - или все четные, или все нечетные (считая 0 - четным);
- 4) гранецентрированная, алмазная (D) - или все нечетные, или все четные при условии, если сумма четных делится на 4 ($h+k+l=4k$).

Рентгенографический анализ развивался в несколько самостоятельных направлений. Одно из важнейших - рентгеновский структурный анализ, задачей которого является нахождение точных позиций атомов в элементарной ячейке, установление пространственной группы структуры, распределения электронной плотности. Рентгеновский фазовый анализ является одной из основ контроля технологии производства полупроводников, диэлектриков, металлов и сплавов.

В основе рентгеновского анализа лежит уравнение Вульфа - Брэгга

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda, \quad (3)$$

где θ - брэгговский угол скольжения; n - порядок спектра.

Точность измерения межплоскостного расстояния определяется величиной

$$\frac{\Delta d}{d} = \operatorname{Ctg} \theta \cdot \Delta \theta. \quad (4)$$

Отсюда следует, что чем больше θ , тем меньше относительная погрешность в определении межплоскостного расстояния. Поэтому при прецизионной съемке выбирают излучение исходя из возможно больших реализуемых значений θ . По найденному значению межплоскостного расстояния можно найти период кристаллической решетки, используя формулу (2)

$$a = d_{hkl} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (5)$$

и затем объем элементарной ячейки.

Важные сведения об объемных дефектах в кристаллах дает сопоставление рентгеновской и пикнометрической плотностей исследуемого вещества.

Рентгеновская плотность в случае кубической структуры может быть рассчитана по формуле

$$\rho = \frac{N \cdot A}{N_a \cdot a^3}, \quad (6)$$

где N - число атомов в элементарной ячейке; A - атомная масса атомов, кг/моль; N_a - число Авогадро, моль⁻¹.

Применяемые методы рентгеновского анализа опираются на два вида аппаратуры:

- 1) использующие съемку рефлексов на фотопленку (УРС-55, УРС-60 и др.);
- 2) применяющие счетчики Гейгера - Мюллера (УРС-50 ИМ) или фотоумножители (ДРОН-2 и др.).

Для регистрации рентгеновских рефлексов на фотопленке часто употребляются цилиндрические камеры, в которых образец устанавливается по оси камеры (рис. 3).

При укладке пленки в цилиндрической камере по Дебаю - Шереру используется пленка с одним отверстием в центре, у выхода луча (X). Следовательно, ближе к отверстию лежат рефлексы под малыми углами θ .



Рис. 3

По окончании съемки рентгенограмма проявляется, сушится и расстояние $2l$ между симметричными линиями промеряется под компаратором или с помощью измерительной линейки. Промер производится либо по внешнему краю, либо по середине линии. В измеренное $2l_{ин}$ или $2l_{ср}$ вносится поправка на диаметр столбика образца $2r$ по уравнению

$$2l_0 = 2l_{внеш} - 2r \quad \text{или} \quad 2l_0 = 2l_{ср} - 2r \cos^2 \theta. \quad (7)$$

Брэгговский угол рассчитывается по формуле

$$\theta = \frac{2l_0}{4R} \text{ (рад)} = \frac{2l_0}{4R} \cdot 57,3^\circ. \quad (8)$$

Эффективный диаметр камеры $2R$ равен $57,3$ мм (или кратен этому числу), т.е. угол θ , выраженный в градусах, равен половине расстояния между симметричными линиями, выраженного в миллиметрах:

$$\theta^\circ = \frac{2l_0}{2}. \quad (9)$$

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Рентгеновская камера РКД.
2. Рентгенограмма.
3. Компаратор, линейка.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с камерой РКД (рентгеновская камера Дебая).
2. Измерить расстояние между симметричными рефлексами рентгенограммы ($2l$), внести поправки на диаметр образца, вычислить брэгговские углы θ :

$$\left(\theta = \frac{2l_0}{4R} \text{ (рад)} = \frac{2l_0}{4R} \cdot 57,3^\circ = \frac{2l_0}{2 \cdot 57,3} \cdot 57,3 = \frac{2l_0}{2} \right)$$

и $\sin \theta$.

3. Определить тип пространственной решетки (сингония кубическая). Если $\sin^2 \theta_1 : \sin^2 \theta_2 : \sin^2 \theta_3 : \sin^2 \theta_4 = 2:4:6:8$, то решетка ОЦК.

4. Рассчитать индексы рефлексов HKL , индексы плоскостей hkl , порядок спектра n и N .

5. Вычислить межплоскостные расстояния d_{hkl} по формуле (3).

6. Вычислить период кристаллический решетки a по формуле (5) с учетом условия (4).

7. Определить плотность вещества по формуле (6).

8. Данные измерений и вычислений занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№	HKL	hkl	n	$2l$, мм	$2l_0$, мм	θ_0	$\sin \theta$	$\sin^2 \theta$	d_{hkl} , нм	a , нм	ρ , кг/м ³
1											
2											
3											
4											
5											

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие о кристаллической решетке, постоянные решетки, элементарная ячейка. Простые и сложные пространственные решетки. Количество атомов решетки.

2. Кристаллографические плоскости. Межплоскостные расстояния.
3. Природа тормозного и характеристического спектров рентгеновского излучения.
4. Уравнение Вульфа - Брэгга.
5. Дифракция рентгеновских лучей в поликристаллах.
6. Определение по рентгенограмме брэгговских углов.
7. Определение межплоскостных расстояний.
8. Семь систем кристаллических ячеек.
9. Индексы кристаллографических плоскостей.
10. Почему физические свойства кристаллов по различным направлениям различны?
11. Определение типа кристаллической решетки по рентгенограмме.
12. Определение периода кубической решетки.
14. Определение плотности исследуемого вещества рентгенографическим способом.

СНЯТИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА МОНОХРОМАТОРЕ УМ-2

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Общее ознакомление с методикой исследования фотоэлектрических свойств полупроводников, измерение спектральной зависимости фотопроводимости и определение ширины запрещенной зоны полупроводников.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.
3. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.
4. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / Под ред. К.В. Шалимовой. - М.: Высш. шк., 1971. - 311 с.
5. Бушманов Б.И. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1971. - 224 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если при поглощении полупроводником кванта энергии излучения $h\nu$ электроны валентной зоны, приобретая дополнительную энергию, превышающую или равную ширине запрещенной зоны ΔE , переходят в зону проводимости, такое поглощение называется собственным или фундаментальным. Наряду с собственным, являющимся основным видом поглощения, в полупроводниках возможны и другие виды поглощения: экситонное, примесное, поглощение свободными носителями, поглощение кристаллической решеткой. В настоящей работе эти виды поглощения не проявляются на опыте и поэтому не рассматриваются.

Рассмотрим некоторые закономерности собственного поглощения. Свет, падая на полупроводник, вызывает появление в нем избыточных носителей тока, увеличивающих общую концентрацию свободных зарядов. Процесс генерации носителей под действием света называется внутренним фотоэффектом. Добавочную проводимость, обусловленную внутренним фотоэффектом, называют фотопроводимостью.

Собственное поглощение возможно при выполнении условия

$$h\nu \geq \Delta E, \quad (1)$$

где $\nu = \frac{c}{\lambda}$ - частота излучения; ΔE - ширина запрещенной зоны полупроводника.

Процесс возбуждения фотоносителей из валентной зоны показан на рис. 1. Этот процесс приводит к образованию пары электрон-дырка. Из соотношения (1) следует, что для каждого полупроводника существует своя "красная" граница фотоэффекта.

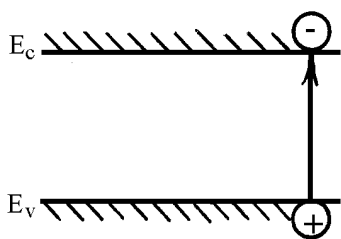


Рис. 1

Фотопроводимость полупроводника зависит от спектрального состава излучения. Качественно зависимость фотопроводимости $\sigma_{\text{ф}}$ от длины волны излучения λ приведена на рис. 2. Здесь же показана зависимость коэффициента поглощения излучения η от λ .

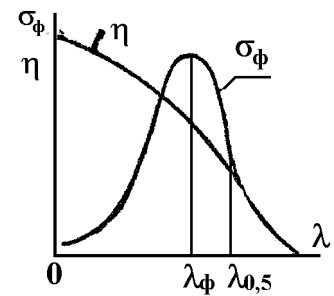


Рис. 2

Спектральная характеристика фотопроводимости имеет вид кривой с экстремумом. Качественно это можно пояснить следующим образом. Свет длиной волны λ , большей λ_m (красная граница), является неактивным. С другой стороны, свет с длиной волны λ меньшей λ_m , становится все менее активным по мере уменьшения λ , хотя энергия квантов этого света более чем достаточная для возбуждения проводимости. Спад проводимости $\sigma_{\text{ф}}$ объясняется тем, что по мере уменьшения λ и увеличения концентрации избыточных носителей тока быстро возрастает коэффициент поглощения η полупроводника. Одной из причин этого является рассеяние фотонов на свободных носителях тока. Таким образом, падающее на поверхность полупроводника излучение в основном поглощается лишь в тонком поверхностном слое. В этом тонком слое резко возрастает скорость поверхностной рекомбинации неравновесных носителей тока и уменьшается их подвижность (в данном случае поверхность полупроводника выступает в качестве дефектной области, где ускоряются процессы рекомбинации электронов и дырок). Это приводит к дополнительному спаду фотопроводимости.

При определении ширины запрещенной зоны полупроводника условились в качестве красной границы фотоэффекта считать длину волны, при которой $\sigma_{\text{ф}}$ на правой спадающей ветви спектральной характеристики уменьшается в 2 раза (рис. 2). Ширина запрещенной зоны определится тогда по формуле

$$\Delta E = h \frac{c}{\lambda_{0,5}}. \quad (2)$$

На использовании внутреннего фотоэффекта основано устройство фоторезисторов - чувствительных индикаторов излучения, получивших широкое применение в различных областях науки и техники.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Для снятия спектральной зависимости фотопроводимости полупроводника необходимы:

1. Источник излучения.
2. Монохроматор.
3. Фоторезистор.
4. Омметр (ламповый вольтметр).

В данной работе в качестве прибора, позволяющего получить на выходе пучок света определенной длины волны, используется монохроматор УМ-2. Рабочий диапазон длин волн на этом приборе составляет $(3,8...10) \cdot 10^{-7}$ м. При работе с монохроматором следует пользоваться прилагаемым к нему описанием.

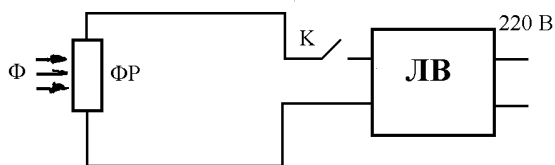


Рис. 3

В качестве источника излучения в видимой области спектра применяется лампа накаливания, дающая сплошной спектр (рис. 3)

Прежде чем снимать спектральную зависимость фотопроводимости полупроводника, необходимо проградуировать монохроматор. Задача по градуировке сводится к построению графика, показывающего, какой длине волны излучения на выходе прибора соответствует каждое деление монохроматора. Для градуировки в видимой области спектра используются ртутно-кварцевые лампы (типа ПРК-4 и СВДЖ-250). Такие лампы дают спектр ртути, который, благодаря наличию характерных групп линий, используется как эталонный спектр. Наиболее интенсивные линии ртути в видимой области $(4...5,8) \cdot 10^{-7}$ м указаны в приложении к монохроматору.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проградуировать монохроматор по длинам волн.
2. Построить градуировочную кривую монохроматора $\lambda = f(n_{\text{дел}})$, пользуясь эталонным спектром. Градуировочная кривая строится на основе результатов опыта, оформленных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№	Вещество эталонного спектра	Цвет линии	Длина волны, мкм	Отсчет по барабану, дел.
1	2	3	4	5

3. Снять спектральную характеристику фотопроводимости полупроводника, выполняя операции в следующей последовательности:

- а) включить ламповый вольтметр и дать ему прогреться в течение 10 минут;
- б) включить фоторезистор и измерить темновое сопротивление R_T ;
- в) включить монохроматор и измерить вольтметром световое сопротивление R_c фоторезистора в разном диапазоне длин волн; измерения проводить через каждые 50 делений барабана монохроматора.

4. Воспользовавшись градуировочным графиком, перевести показания измерительного барабана в длины волн λ (в метрах).

5. По формуле $\sigma = \frac{1}{R}$ подсчитать электропроводность фоторезистора без освещения и для фиксированных значений длин волн светового потока.

6. По формуле $\sigma = \sigma_c - \sigma_T$ подсчитать фотопроводимость.

7. Построить график зависимости $\sigma_{\text{ф}}(\lambda)$. Результаты эксперимента могут быть суммированы в табл. 2.

8. По графику определить $\lambda_{0,5}$ и по формуле (2) рассчитать ширину запрещенной зоны полупроводника.

Т а б л и ц а 2

№	λ , мкм	$R_{\text{т}}$, Ом	$\sigma_{\text{т}} = \frac{1}{R_{\text{т}}}$, См	$R_{\text{с}}$, Ом	$\sigma_{\text{с}} = \frac{1}{R_{\text{с}}}$, См	$\sigma = \sigma_{\text{с}} - \sigma_{\text{т}}$, См
1	2	3	4	5	6	7

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта?
2. Поясните природу фундаментального поглощения и укажите условие его существования.
3. Что такое фотопроводимость полупроводника? Объясните зависимость фотопроводимости от спектрального состава излучения.
4. Поясните устройство и назначение монохроматора.
5. Как оценивается "красная граница" фотоэффекта? Объясните происхождения этого термина?
6. Как рассчитывается ширина запрещенной зоны полупроводника?
7. Устройство, принцип действия и применение фоторезисторов.

ДОПОЛНЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 8

УЧЕТ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ “КРАСНОЙ ГРАНИЦЫ” ФОТОПРОВОДИМОСТИ И ЕЕ УСТРАНЕНИЕ

Определяя “красную границу” фотопроводимости (ФП) по половинному спаду от ее максимального значения, мы совершаем систематическую ошибку, рассчитывая $\lambda_{\text{гр}}$, так как не учитываем нескольких важных факторов, влияющих на быстроту спада ФП в длинноволновой области в проведенном эксперименте. Во-первых, используемая в опыте лампа накаливания с вольфрамовой нитью испускает излучение, плотность которого неравномерно распределена по длинам волн и подчиняется формуле М. Планка

$$j_{\lambda, T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}.$$

Общий вид этой зависимости для различных температур излучателя изображен на рис. 1.

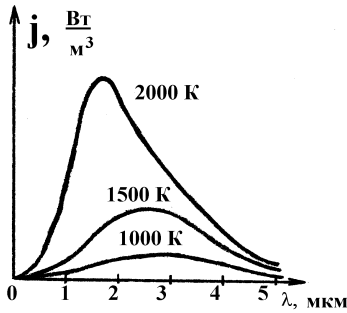


Рис. 1

Положение максимума ФП в проведенном эксперименте соответствует обычно значениям длины волны в диапазоне (0,74...0,75) мкм и λ граничное отличается от этих значений приблизительно на 0,07 мкм. Из зависимости, приведенной на рис. 1, видно, что плотность излучения вблизи λ граничное значительно превышает $j_{\lambda, T}$ вблизи максимума ФП. Так при температуре нити накаливания 2250 К, что соответствует условиям опыта, отношение $k = \frac{j_{0.82}}{j_{0.75}} \approx 1,56$, где индексы означают длины

волн, которым сопоставляется плотность излучения. Таким образом, мы определяем половинный спад фотопроводимости в условиях заметно возросшего (на 56 %) потока излучения, падающего на фоторезистор, по сравнению с потоком излучения, падавшим на него вблизи максимума ФП.

В то же время физический смысл “красной границы” ФП $\lambda_{гр}$ в том, что это длина волны излучения, вызывающего внутренний фотоэффект, при которой вдвое снижается, по сравнению с максимальным значением квантовый выход фотопроводимости, то есть вдвое уменьшается число неравновесных носителей тока, генерируемых постоянным по числу действующих на фоторезистор потоком фотонов. Несколько упрощая реальный смысл квантового выхода β , можно сказать, что среднее число носителей фототока, генерируемых на каждый поглощенный материалом полупроводника фотон. В полупроводнике с фундаментальной фотопроводимостью β вблизи максимума внутреннего фотоэффекта приближается к двум, так как одновременно генерируются электрон проводимости и квантово-механическая дырка. Поэтому для точного определения $\lambda_{гр}$ необходимо нормировать поток фотонов, например, к значению его в максимуме ФП. Напомним, что энергия фотонов убывает с ростом длины волны излучения, поэтому отношение энергии фотонов при $\lambda_{гр}$ и λ_{max} , где последняя длина волны соответствует σ_{max} , отличается от единицы: $C = \frac{h\nu_{гр}}{h\nu_{max}} = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{гр}}$. Например, в

случае рассмотренном выше $\lambda_{max} = 0,75$ мкм, $\lambda_{гр} = 0,8$ мкм, тогда $C = 0,75/0,82 = 0,9146 \approx 0,915$. Полученный результат показывает, что нормировочный коэффициент для потока фотонов N должен учитывать как возрастание плотности излучения в длинноволновой области $\lambda_{гр}$, так и уменьшение энергии отдельного фотона: $N = K/C \approx 1,70$, то есть поток фотонов в нашем примере возрастет вблизи $\lambda_{гр}$ более чем в полтора раза по сравнению с потоком фотонов в максимуме ФП.

Значит, квантовый выход $\beta_{гр}$ на определенной нами без увеличения плотности потока фотонов $\lambda_{гр}$ составляет не 0,5, как требуется по физическому смыслу “красной границы” ФП, а только лишь $\beta' = 0,5/1,7 = 0,294$ или в общем виде

$$\beta' = \beta_{гр}/N.$$

Для того чтобы устранить рассмотренную систематическую погрешность в определении $\lambda_{гр}$, а следовательно и заниженные значения ΔE_g полупроводника, полученное в данной работе, надо определить истинное значение граничной длины волны, соответствующей квантовому выходу β , равному 0,5, т.е. $\lambda_{гр}$. Точное решение этой задачи может быть найдено методом последовательных приближений. Для упрощения действий и учитывая погрешность, вносимую другими факторами, не включенными в

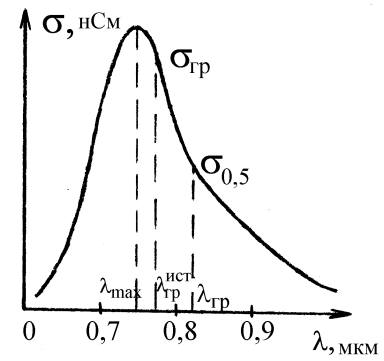


Рис. 2

расчет - например, изменением скорости рекомбинации носителей тока при уменьшении коэффициента поглощения света с возрастанием длины волны; конечной шириной щели монохроматора, что обуславливает одновременное воздействие на фоторезистор фотонов не со строго определенной длиной волны, а в некотором диапазоне длин волн $\Delta\lambda$, - прибегнем к следующей оценке

$\lambda_{гр}^{уст}$: $\sigma_{0,5} = \frac{\sigma_{max}}{2} = \frac{\sigma_{гр}}{N}$, где $\sigma_{гр}$ - истинное значение фотопроводимости, соответствующее “красной границе”.

По этому значению ФП и следует находить на экспериментальной зависимости $\lambda_{гр}^{уст}$, а по нему рассчитывать ширину запрещенной зоны полупроводника:

$$\Delta E_g^{уст} = \frac{hc}{\lambda_{гр}^{уст}}.$$

В нашем примере, соответствующем рис. 2, при $\sigma_{0,5}$:

$$\Delta E_g^{уст} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,77 \cdot 10^{-6}} \approx 2,58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 1,62 \text{ эВ},$$

а при $\lambda_{гр}$ получается 1,52 эВ. Табличное значение ширины запрещенной зоны для $CdSe$, используемого в фоторезисторах, 1,7 эВ.

Дальнейшее улучшение согласия экспериментального результата с табличным может быть достигнуто путем учета резкого возрастания скорости рекомбинации носителей тока при уменьшении длины волны излучения, что обусловит перемещение истинного максимума фотопроводимости, вычисляемого по максимальному квантовому выходу в сторону коротких волн и соответствующее смещение $\lambda_{гр}^{уст}$.

ЗАДАНИЕ: пользуясь собственными экспериментальными данными по зависимости $s(l)$ найти нормировочный коэффициент для потока фотонов N , рассчитать $\lambda_{гр}^{уст}$ и $\Delta E_g^{уст}$. Сравнить с табличным значением ΔE_g .

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПАРАМЕТРОВ ФОТОРЕЗИСТОРОВ (ФР)

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить основные параметры ФР.
2. Построить вольт-амперные, световые характеристики и зависимость от носительного изменения сопротивления от освещенности фоторезистора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- М.: Высш. шк., 1989.- 608 с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. -М.: Наука, 1989.- 304 с.
3. Бушманов Б.И. Физика твердого тела.- М.: Высш. шк., 1971.- 224 с.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники.- М.: Сов. радио, 1971.- 375 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом называются фоторезисторами (ФР), (рисунок 1). Они изготавливаются из сернистого свинца, сернистого висмута, сернистого кадмия (2), нанесенных на стеклянную пластинку (1) с токопроводящими электродами (3). Для удобства использования и для защиты от повреждений фоторезисторы изготавливают в пластмассовой оправе с окошком и с двумя клеммами от электродов. Фоторезисторы, в отличие от газонаполненных фотоэлементов, не имеют тока насыщения - величина фототока пропорциональна приложенному напряжению.

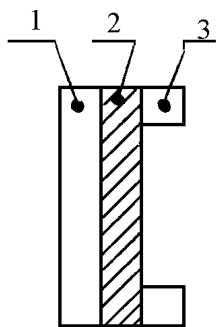


Рис. 1

Фотоэлектрические процессы обладают инерционностью, которая объясняется тем, что электроны, освобожденные светом, находятся в свободном состоянии в течение некоторого отрезка времени - времени жизни фотоэлектронов. Фоторезисторы имеют большую чувствительность, чем газонаполненные или вакуумные фотоэлементы. Для характеристики фоторезисторов используется ряд параметров:

1. *Удельная интегральная чувствительность K* , которая численно равна отношению величины фототока Δi , через фоторезистор, к величине падающего на него светового потока Φ при приложенном к фоторезистору напряжении U , равном единице

$$K = \frac{\Delta i}{U\Phi},$$

где Δi - фототок, равный разности токов i_c - (светового) и i_t - (темнового).

Так как $\Phi = ES$, где E - освещенность фоторезистора; S - его поверхность, то при нормальном падении света

$$E = \frac{I}{r^2},$$

где I - сила света источника, в канделах; r - расстояние от источника света до фоторезистора.

Окончательно получаем

$$K = \frac{\Delta i}{\Phi U} = \frac{\Delta i}{ESU} = \frac{r^2 \Delta i}{ISU}. \quad (1)$$

2. *Интегральная чувствительность* γ определяется произведением удельной интегральной чувствительности на приложенное напряжение U

$$\gamma = KU = \frac{\Delta i}{\Phi}. \quad (2)$$

Максимальная чувствительность γ_{\max} будет при U_{\max} , т.е. при предельно допустимом рабочем напряжении.

3. *Спектральная чувствительность* γ_{λ}

В зависимости от материала проводника "ФР" могут иметь различную чувствительность к разным длинам волн падающего света от ультрафиолетовой до ближайшей инфракрасной, т.е.

$$\gamma = f(\lambda). \quad (3)$$

4. *Относительное изменение сопротивления* вычисляется по формуле

$$\frac{\Delta R}{R_T} = \frac{R_T - R_c}{R_T}, \quad (4)$$

где R_T - сопротивление в темноте; R_c - сопротивление при освещенности.

5. *Фотопроводимость*

$$\sigma = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_T}. \quad (5)$$

Вольт-амперные характеристики выражают зависимость фототока от приложенного напряжения U к фоторезистору при неизменной величине светового потока. Световые характеристики показывают зависимость фототока от светового потока Φ при постоянном напряжении. Из световой (интегральной) характеристики можно определить интегральную чувствительность фоторезистора.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Фоторезистор.
2. Оптическая скамья.
3. Вольтметр, многопредельный микроамперметр.
4. Потенциометр.
5. Источники переменного и постоянного тока.
6. Ключ.
7. Трансформатор.

5. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Электрическая схема для измерений параметров "ФР" показана на рис. 2. Оптическая установка состоит из эталонной лампы, которая укреплена на штативе и установлена на оптической скамье, фоторезистора, укрепленного также на штативе. Лампочка питается от источника по-

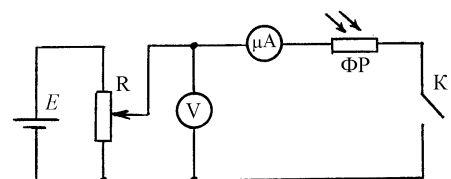


Рис. 2

стоянного тока через реостат R и с помощью переключателя может быть включена на время освещения фоторезистора.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собирают электрическую и оптическую схемы.

2. Снимают вольт-амперные характеристики $i = f(U)_E$ для определенных значений освещенности. Данные темнового тока i_T (т.е. при $E = 0$) определяют по микроамперметру для U от 0 до 4,2 В через каждые 0,6 В, или берут по указанию преподавателя из табл. 1.

Т а б л и ц а 1

U	В	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2
i	мкА								

Затем определяют i_c - световой ток по микроамперметру для тех же значений U при $E = \text{const}$. Различные значения освещенности получают изменением расстояния r от точечного источника до фотоэлемента. Данные заносят в табл. 2. Зависимости

$$i_T = f(U) \quad (6)$$

и

$$i_c = f(U) \quad (7)$$

выражают графически в одной системе координат.

3. Определяют световые характеристики фоторезисторов, т.е. находят $i = i_c - i_T = f(E)_U$ из табл. 2. Зависимость $\Delta i = f(E)_U$ выражают графически.

Т а б л и ц а 2

r , м	E , лк	Φ , лм	$\frac{U, \text{В}}{i, \text{мкА}}$	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2
0,6											
0,5											
0,4											
0,3											
0,2											
0,1											

4. По вольт-амперным характеристикам для различных освещенностей E и напряжений U с использованием табл. 3 определяются параметры фоторезистора:

а) темновое сопротивление $R_T = \frac{U}{i_T}$;

б) сопротивление при освещении $R_c = \frac{U}{i_c}$;

в) отношение $\frac{\Delta R}{R_T} = \frac{R_T - R_c}{R_T} = 1 - \frac{i_T}{i_c}$;

г) фотопроводимость $\sigma = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_T}$.

5. Определяют удельную чувствительность фоторезистора (K) по формуле (1) для $U = 3,6$ В и значений светового потока, соответствующих значениям $r = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ и $0,6$ м.

Результат записать в виде:

$$K = \langle K \rangle \pm \langle \Delta K \rangle,$$

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta K \rangle}{\langle K \rangle} * 100\% .$$

6. Определяют интегральную чувствительность фоторезистора γ по формуле (2) для $U = 3,6$ В и значений светового потока, соответствующих $r = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ м. Результат записать в виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \langle \Delta \gamma \rangle,$$

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta \gamma \rangle}{\langle \gamma \rangle} * 100\% .$$

Определить зависимости:

$$R = f(E)_U, \quad \frac{\Delta R}{R_T} = f(E)_U \quad \text{и} \quad \sigma = f(E)_U.$$

Построить три таблицы для $U = 0,6$ В; $2,4$ В и $4,2$ В.

Т а б л и ц а 3

r	м	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
E	лк						
Φ	лм						
R_T	Ом						
I/R_T	См						
R_c	Ом						
I/R_c	См						
ΔR	Ом						
σ	См						
$\Delta R/R_T$	-						

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта? Сформулируйте законы фотоэффекта.

2. Перечислите и охарактеризуйте виды фотоэффектов.

3. На основе зонной теории твердого тела объясните явление собственной и примесной проводимости полупроводников.

4. Объясните механизм влияния электромагнитного излучения (света) на электропроводность полупроводников.

5. Назовите и дайте определения основных параметров фоторезисторов.

6. Перечислите достоинства и недостатки фоторезисторов.

7. Приведите примеры практического применения фоторезисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕМЕНТА С ЗАПИРАЮЩИМ СЛОЕМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение устройства, принципа действия и основных характеристик фотоэлементов с запирающим слоем.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
3. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1977. - 288 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

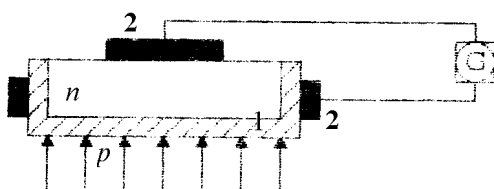


Рис. 1

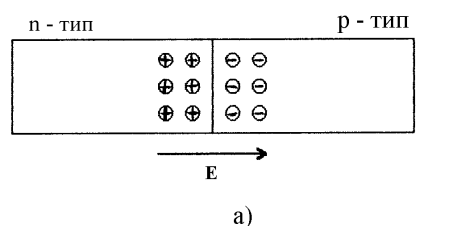
При освещении p - n -перехода в замкнутой цепи возникает ЭДС и электрический ток. Этот ток называют фотогальваническим.

Указанное явление используется в фотоэлементах с запирающим слоем, называемых также вентильными или фотоэлементами с p - n -переходом. Фотоэлементы служат индикаторами лучистой энергии и преобразователями этой энергии в электрическую энергию.

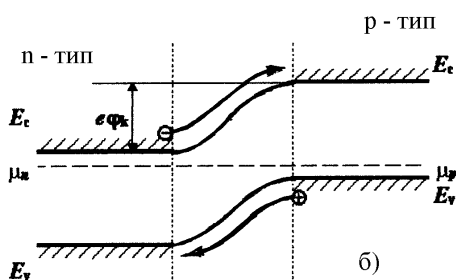
Схематически устройство фотоэлемента с p - n -переходом и включение его в цепь показано на рис. 1 (стрелками показана освещаемая поверхность фотоэлемента).

На поверхности исходного полупроводника n -типа путем диффузии формируется тонкий слой полупроводника p -типа: образуется p - n -переход.

Рассмотрим принцип действия фотоэлемента с p - n -переходом как источника ЭДС.



а)



б)

Рис. 2

1. Освещение отсутствует.

В этом случае p - n -переход находится в равновесном состоянии. Физические процессы, протекающие в этом случае в p - n -переходе, описаны в теоретическом введении к работе 12. Важно еще раз подчеркнуть, что за счет перераспределения электронов и дырок в p - n -переходе возникает потенциальный барьер $e\phi_k$, где ϕ_k - контактная разность потенциалов на переходе.

Величина потенциального барьера на p - n -переходе в состоянии равновесия представляет собой внутреннюю характеристику полупроводника. Численно энергетический барьер $e\phi_k$

близок к ширине запрещенной зоны соответствующего полупроводника. За счет наличия $e\varphi_k$ в p - n -переходе возникает электрическое поле E , направленное от n - к p -полупроводнику (рис. 2).

2. При освещении.

При освещении в объеме полупроводника n - и p -типа генерируются электронно-дырочные пары за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Образованные при этом основные носители не представляют особого интереса, так как при практически достижимых интенсивностях света плотности основных носителей не могут заметно превышать их равновесных значений. Однако плотность неосновных носителей, созданных светом, может во много раз превышать их малые равновесные концентрации. При этом движение фотоносителей будет определяться контактным полем E в p - n -переходе. Так электроны, образовавшиеся в p -области, контактным полем выбрасываются в n -область, а дырки - из n -области в p -область. Поэтому p -область будет подзаряжаться положительно, а n -область - отрицательно. В соответствии с этим в n -области уровень Ферми μ_n сместится вверх, а уровень Ферми μ_p в p -области сместится вниз. Это эквивалентно появлению дополнительной разности потенциалов U_Φ , приложенной p - n -переходу в прямом направлении. Ее называют фотоэлектродвижущей силой (фотоЭДС). На величину U_Φ понизится потенциальный барьер на p - n -переходе, а это приведет к возрастанию диффузионного тока через p - n -переход. Процесс разделения подвижных зарядов и энергетическая диаграмма p - n -перехода при освещении показаны на рис. 3.

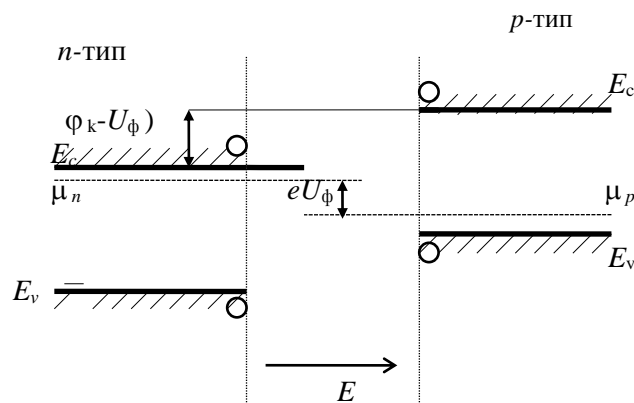


Рис. 3

Итак, при освещении происходит отклонение p - n -перехода от состояния равновесия - понижается потенциальный барьер на переходе. Система стремится вернуться в состояние равновесия за счет возрастания прямого тока через p - n -переход. Фотоэлемент работает как источник ЭДС: при подключении его по цепи потечет электрический ток.

Одной из основных характеристик фотоэлементов является интегральная чувствительность, отражающая зависимость фототока от светового потока при постоянном напряжении на зажимах фотоэлемента. Существенным преимуществом фотогальванических элементов перед фотоэлементами с внешним фотоэффектом является высокая интегральная чувствительность.

Фотоэлементы с p - n -переходом являются преобразователями лучистой энергии в электрическую. Анализ показывает, что наиболее подходящими полупроводниковыми материалами для фотогальванических элементов оказываются те, у которых ширина запрещенной зоны лежит в пределах $1,1 < \Delta E < 1,6$ эВ. В настоящее время для изготовления фотоэлементов наиболее широко применяется кремний. Это обусловлено его спектральной чувствительностью в широком диапазоне солнечного излучения (max - в зеленой области). Кремниевые фотоэлементы используются в качестве источников питания электро- и радиоаппаратуры на искусственных спутниках Земли и управляемых космических аппаратах, а также в наземных условиях. Расчет показывает, что КПД кремниевых преобразователей солнечной энергии составляет около 21 %. Лучшие современные лабораторные образцы имеют КПД около 15 %.

3. Интегральная чувствительность фотоэлемента.

Интегральной чувствительностью фотоэлемента - γ называется отношение величины тока i' , даваемого фотоэлементом, к величине падающего на него светового потока Φ :

$$\gamma = \frac{i'}{\Phi}; \quad (1)$$

$$i' = i - i_0, \quad (2)$$

где i - ток фотоэлемента; i_0 - темновой (нулевой) ток фотоэлемента при выключенном осветителе. Чувствительность выражается в мкА/лм.

Поскольку

$$\Phi = ES, \quad (3)$$

и для точечного источника зависимость освещенности от расстояния -

$$E = \frac{J}{r_0^2}, \quad (4)$$

где E - освещенность фотоэлемента, лк; S - площадь светочувствительного слоя фотоэлемента, м²; J - сила света лампочки накаливания, кд; r_0 - расстояние между источником света и фотоэлементом, м, то

$$\gamma = \frac{i' r_0^2}{JS}. \quad (5)$$

4. ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Собрать схему, как показано на рис. 4.
2. Не включая лампочку, определить нулевой ток гальванометра i_0 (при открытом фотоэлементе).
3. Установить фотоэлемент на расстоянии 25...30 см от источника света.
4. Открыть колпачок фотоэлемента, определить по гальванометру величину фототока i и расстояние r_0 . Рассчитать силу фототока создаваемого источником света по формуле $i' = i - i_0$.
5. Вычислить площадь S фоточувствительного слоя.
6. Измерения провести несколько раз (по указанию преподавателя), меняя r_0 на 1...2 см. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение интегральной чувствительности.
2. Выведите формулу для определения интегральной чувствительности фотоэлемента.
3. Объясните принцип работы фотоэлементов с запирающим слоем.
4. Дайте определение уровня Ферми.
5. Начертите энергетическую диаграмму p - n -перехода и объясните работу фотоэлемента.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование основных характеристик и параметров терморезисторов.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. - М.: Наука, 1987. - 304 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.
5. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / Под ред. К.В. Шалимовой. - М.: Высш. шк., 1971. - 311 с.
6. Бушманов Б.И. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1971. - 224 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

1. *Терморезисторы* (термисторы) - это приборы, сопротивление которых зависит от температуры. Терморезисторы (ТР) представляют собой объемные полупроводниковые резисторы с большим температурным коэффициентом сопротивления и нелинейной вольт-амперной характеристикой. Изготавливаются термисторы с помощью специальной технологии из смеси различных веществ, например, из смеси двуокиси титана с окисью магния, закиси никеля с окисью лития и т.д. ТР выпускаются в виде стержней, трубок, дисков. Размеры ТР варьируются от нескольких микрометров до нескольких сантиметров. На основе ТР разработаны системы и устройства дистанционного измерения температуры, противопожарной сигнализации, теплового контроля. Свойства ТР широко используются в электрических цепях для стабилизации напряжения и силы тока. Основными характеристиками ТР служат зависимость его сопротивления от температуры и вольт-амперная характеристика.

2. Рассмотрим с точки зрения зонной теории твердого тела, чем обусловлена *зависимость сопротивления ТР от температуры*. В полупроводниках при абсолютной температуре, равной нулю, все электроны находятся на энергетических уровнях валентной зоны. Эти электроны не могут участвовать в электрическом токе, т.к. любое их движение связано с изменением энергии и следовательно, с переходом на более высокий энергетический уровень, что невозможно в пределах заполненной зоны. Поэтому при $T = 0$ К полупроводник подобен изолятору и его проводимость равна нулю. Переход электронов в зону проводимости связан с затратой энергии ΔE_0 , равной ширине запрещенной зоны, и может произойти под действием внешних факторов (повышения температуры, облучения и т.д.). Благодаря наличию в зоне проводимости свободных энергетических уровней, электрон может перемещаться по ним под действием внешнего электрического поля. С точки зрения зонной теории твердого тела это

соответствует протеканию электрического тока в кристалле. Зависимость электропроводности от температуры полупроводника выражается экспоненциальной функцией:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{kT}\right), \quad (1)$$

где σ_0 - постоянная величина; ΔE_0 - ширина запрещенной зоны; T - абсолютная температура; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана.

Электропроводность полупроводника растет с увеличением температуры. Это обусловлено тем, что концентрация носителей тока при увеличении температуры возрастает в большей степени, нежели уменьшение подвижности электронов из-за сокращения средней длины свободного пробега. Если в полупроводнике имеются примеси, то это приводит к образованию внутри запрещенной зоны дополнительных энергетических уровней. При этом под примесями понимают не только атомы посторонних элементов, но и различные дефекты в кристалле, а также несоответствие стехиометрического состава вещества кристалла. Эти уровни могут поставлять электроны в зону проводимости (донорные уровни) или захватывать электроны из заполненной зоны (акцепторные уровни). Очевидно, что энергия активации ΔE , необходимая для перехода электронов с донорного уровня в зону проводимости или из заполненной зоны на акцепторный уровень, значительно меньше, чем энергия, необходимая для перехода электронов из заполненной зоны в свободную. Благодаря этому число носителей заряда и электропроводность при увеличении температуры (в определенном интервале) возрастают. Измерения показывают, что в этом интервале температур зависимость сопротивления терморезистора от температуры с достаточной точностью аппроксимируется выражением

$$R_T = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (2)$$

где R_T - сопротивление терморезистора при температуре T ; R_0 - начальное сопротивление терморезистора, зависящее от свойств материала, габаритов ТР и т.д.; ΔE - энергия активации; $B = \frac{\Delta E}{2k}$ - постоянная величина, определяемая материалом ТР и характеризующая его температурный коэффициент сопротивления.

3. Расчет энергии активации ΔE и коэффициента B

Прологарифмируем соотношение (2):

$$\ln R_T = \ln R_0 + \frac{B}{T}. \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой уравнение прямой в координатах $\ln R_T$ от $1/T$, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс равен значению коэффициента B . Построив экспериментально полученную зависимость $\ln R_T$ от $1/T$ (рис. 1), определим значения коэффициента B и энергии активации по формулам

$$\operatorname{tg} \beta = B; B = \frac{\ln R_{T_2} - \ln R_{T_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}, \quad (4)$$

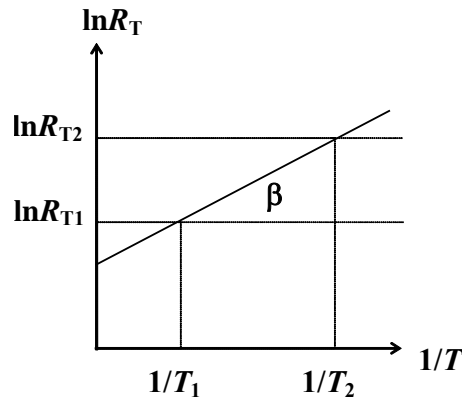


Рис. 1

$$\Delta E = 2kB. \quad (5)$$

4. Основным параметром терморезистора является *температурный коэффициент сопротивления* α . Он определяется как относительное изменение сопротивления ТР при изменении температуры на 1 К

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (6)$$

Учитывая (2), выражение (6) запишем в виде

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}. \quad (7)$$

Зная постоянную B , можно вычислить α для любой температуры.

5. Рассмотрим типичную *вольт-амперную характеристику* ТР (рис. 2).

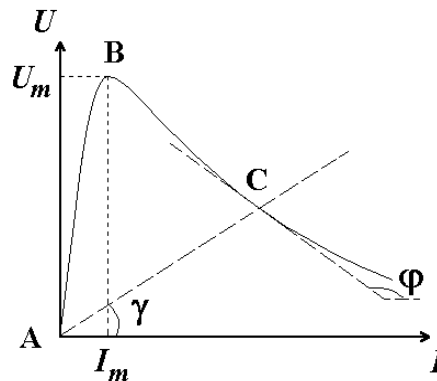


Рис. 2

На начальном участке АВ характеристика почти линейная, т.к. при малых токах, соответствующих этому участку, рассеиваемая мощность на ТР недостаточна для заметного изменения температуры и следовательно для уменьшения сопротивления ТР. При дальнейшем увеличении силы тока рассеиваемая мощность становится значительной, ТР нагревается выше температуры окружающей среды и сопротивление ТР уменьшается. Таким образом, начиная с некоторого критического значения силы тока $I_{кр}$, напряжение на приборе при увеличении тока уменьшается (участок ВС). Область характеристики ВС является рабочей областью токов ТР.

Помимо вольт-амперной характеристики, свойства нелинейного сопротивления ТР могут быть охарактеризованы его статическим и дифференциальным сопротивлением. *Статическое сопротивление* R_c равно отношению напряжения на ТР к протекающему по нему току. Если в рабочей области характеристики выбрать точку C , то тангенс угла γ между осью абсцисс и прямой, идущей в точку C даст величину статического сопротивления ТР

$$R_c = \operatorname{tg} \gamma = \frac{U_c}{I_c}. \quad (8)$$

При переходе от одной точки ВАХ к соседней, статическое сопротивление изменяется. Оно характеризует поведение ТР в режиме неизменного тока. Под *дифференциальным сопротивлением* R'_c принято понимать отношение бесконечно малого приращения напряжения dU на ТР к соответствующему приращению тока dI . Дифференциальное сопротивление численно равно тангенсу угла φ наклона касательной к ВАХ в рабочей точке C и характеризует поведение ТР при достаточно малых отклонениях от предшествующего состояния

$$R'_c = \operatorname{tg} \varphi = \frac{dU}{dI}. \quad (9)$$

Так, участку АВ вольт-амперной характеристики соответствует положительное значение дифференциального сопротивления $dU/dI > 0$, а участку ВС - отрицательное, где $dU/dI < 0$.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Печь.
2. Термисторы.
3. Мост постоянного тока.
4. Амперметр, вольтметр, реостат.
5. Термометр.

5. ОПИСАНИЕ МЕТОДА И СХЕМА УСТАНОВКИ

1. Для измерения электрического сопротивления ТР при различной температуре применяется один из промышленных терморезисторов, который включается в схему моста МВП-47 (МО-59, МВЧ-49) (рис. 3).

Напряжение питания устанавливается реостатом $R_{\text{РЕГ}}$ по вольтметру V . Терморезистор нагревается в печи, питаемой напряжением переменного тока от лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1. Температура измеряется термометром.

2. Для снятия вольт-амперной характеристики собирается схема (рис. 4). Добавочное сопротивление R_1 необходимо для обеспечения устойчивой работы схемы.

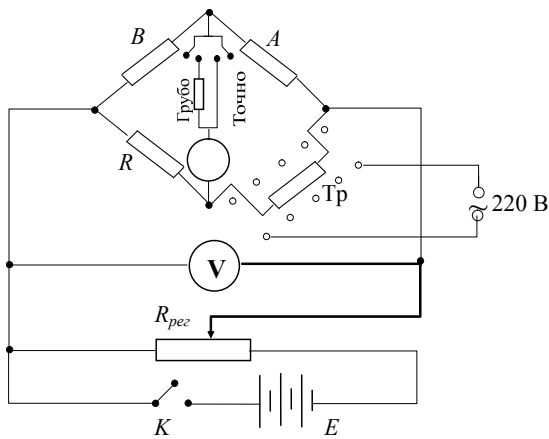


Рис. 3

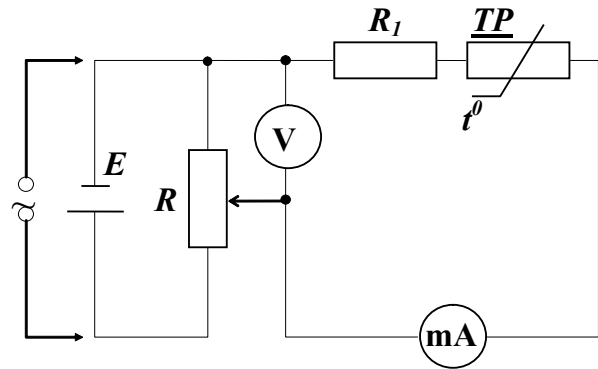


Рис. 4

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить сопротивление R_0 терморезистора при комнатной температуре.
2. Включить электропечь и произвести измерения сопротивления ТР при различных температурах от комнатной до 600 °С через 50 °С.
3. Полученные данные занести в таблицу.
4. Построить график зависимости $R_T = f(T)$.
5. Построить график зависимости $\ln R_T = f(1/T)$.
6. По графику п. 4 определить постоянную B .
7. Определить энергию активации ΔE по формуле (5).
8. По формуле (7) вычислить температурный коэффициент α для $T = 300$ К, 315 К, 330 К.
9. Снять и построить вольт-амперную характеристику ТР при комнатной температуре.
10. Вычислить величину статического и дифференциального сопротивлений для некоторой точки на участке характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются энергетические состояния электронов в изолированном атоме и кристалле?
2. Что такое запрещенные и разрешенные энергетические зоны?
3. При каких условиях электроны из валентной зоны могут переходить в зону проводимости?
4. Какова зависимость сопротивления полупроводников от температуры?
5. Объясните вольт-амперную характеристику термистора.
6. Как с помощью терморезистора стабилизировать ток в цепи? Напряжение? Температуру?
7. Что называется температурным коэффициентом сопротивления?
8. Что такое статическое и дифференциальное сопротивление ТР?

ДОПОЛНЕНИЕ 1 К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 11

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

1. Изучить методические указания к работе.

2. Ознакомиться с приборами и схемой подключения.

3. НЕ ВКЛЮЧАЯ ПЕЧЬ, произвести измерение сопротивления термистора TR_1 при комнатной температуре, для чего:

а) подключить к мосту постоянного тока (Р-329) гальванометр (клеммы моста Г1, Г2), измеряемый терморезистор (клеммы X_{01} , X_{02}) и источник питания (соединить клеммы моста Б1, Б2 и соответствующие клеммы измерительной установки);

б) измерить термометром начальную температуру терморезистора;

в) установить на передней панели моста значения $R_2 = 1000$ Ом и $R_3 = 100$ Ом путем замыкания соответствующих гнезд;

г) на передней панели измерительной установки перевести переключатели К1, К2 в положение «Вкл»;

д) на передней панели моста зафиксировать кнопку «ГРУБО», уравновесить мост вращением ручек декад (1...5) плеча резистора (стрелка гальванометра подводится к нулю), затем нажать кнопку «ТОЧНО» и получить точный отсчет.

Значение сопротивления снимается с ручек декад и определяется по формуле $R_{TR} = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_1$.

Пример: $R_2 = 1000$; $R_3 = 100$; $R_1 = 631$; $R_{TR} = \frac{1000}{100} \cdot 631 = 6310$ Ом.

4. Подключить электропечь к сети 220 В. Аналогично (п.п. 3а...3д) произвести измерение сопротивлений термистора при различных температурах от комнатной до 60° через каждые 5° ПЕЧЬ ОТКЛЮЧИТЬ, результаты занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

t°, C	T, K	$1/T, K^{-1}$	$R_{TR}, \text{Ом}$	$\lg(R_{TR})$	B, K	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta E, \text{Дж}$	α, K^{-1}

5. Снять вольт-амперную характеристику $U = f(I)$ терморезистора, выполняя условие: после установки тока выждать 30... 40 секунд, после чего снять показания вольтметра и занести в табл. 2.

УСТАНОВКУ ОТКЛЮЧИТЬ !

Т а б л и ц а 2

I, mA	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$U, \text{В}$									

Примечание:

Для снятия ВАХ используется измерительная установка, в схему которой подключается терморезистор TR_2 !

ДОПОЛНЕНИЕ 2 К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ТЕРМОЗОНДА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение типа проводимости полупроводников.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т.3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим однородный полупроводник при наличии градиента температуры. Если полупроводник нагрет неравномерно, то средняя энергия носителей заряда и их концентрация будут больше там, где выше температура. Вследствие этого в полупроводнике возникнет диффузионный поток носителей заряда, т.е. возникнет электрический ток. При разомкнутой цепи в стационарном состоянии плотность тока во всех точках образца равна нулю. Это возможно благодаря появлению в результате зарядов электрического поля, которое вызовет в каждой точке полупроводника ток, компенсирующий поток носителей, обусловленный градиентом температуры. На образце возникает электродвижущая сила, которую называют термоэлектродвижущей силой. Определив знак термоэлектродвижущей силы или направление тока во внешней цепи, нетрудно указать тип проводимости полупроводников.

Пусть, например, дан полупроводник с электронной проводимостью (рис. 1).

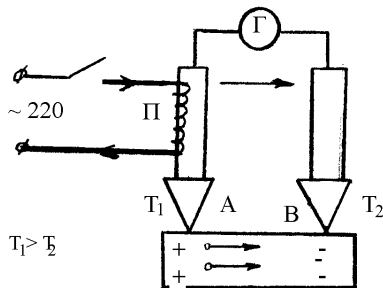


Рис. 1

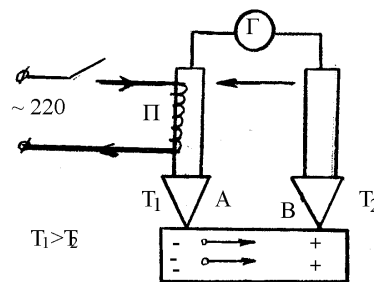


Рис. 2

Если к поверхности полупроводника укрепить два зонда, один из которых нагрет печью П до температуры T_1 (горячий зонд), а другой находится при комнатной температуре (холодный зонд), то благодаря градиенту температур в полупроводнике электроны диффундируют из левой части полупроводника в правую так, что левая часть будет заряжаться положительно, а правая - отрицательно. Во внешней цепи возникает ток, направленный от точки А к точке В, т.е. от горячего зонда к холодному.

Если исследуется полупроводник с дырочной проводимостью (рис. 2), то основные носители заряда - дырки - диффундируют вдоль однородного полупроводника из левой части в правую, левая часть (точка А) заряжается отрица-

тельно, правая (точка В) - положительно. Во внешней цепи возникнет ток, направленный от точки В к точке А, т.е. от холодного зонда к горячему.

Таким образом, направление тока или знак термоЭДС, может свидетельствовать об электронном или дырочном механизме проводимости.

В данной работе определение типа носителей заряда производится на приборе, схема которого представлена на рис. 1.

Основными элементами прибора являются горячий и холодный металлические зонды, гальванометр, образец полупроводника.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Прибор для определения знака основных носителей заряда.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить прибор в сеть переменного тока с напряжением 220 В (включение печи нагрева зонда).

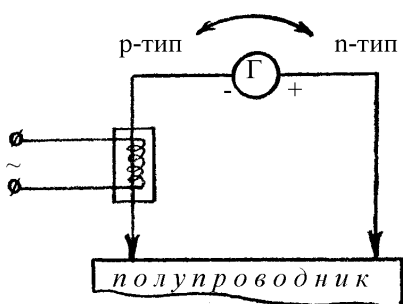


Рис. 3

2. Установить на подставку исследуемый образец.

3. После нагрева зонда при кратковременном касании поверхности образца зондом определить по отклонению стрелки гальванометра направление тока во внешней цепи и тип проводимости образца.

Принцип определения типа проводимости образца поясняется на рис. 3. На этом рисунке обозначена полярность клемм гальванометра и

возможное направление отклонения стрелки и, соответственно, тип проводимости полупроводника.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое *p*- и *n*-полупроводники?
2. Что называется основными и неосновными носителями заряда в полупроводниках?
3. Объясните температурную зависимость концентрации носителей заряда в полупроводниках.
4. Объясните сущность метода термозонда для определения знака носителей заряда в полупроводниках.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить принцип действия и вольт-амперную характеристику полупроводникового выпрямителя, определить контактную разность потенциалов в области p - n -перехода.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. - М.: Наука, 1987. - 304 с.
3. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия полупроводниковых выпрямителей основан на явлениях, происходящих на границе, разделяющей два полупроводника с различным типом проводимости: электронный (n) и дырочный (p) (рис. 1, а). В n -полупроводнике имеется большая концентрация электронов, называемых основными носителями заряда; вместе с тем в n -полупроводнике всегда имеется и небольшое количество дырок, называемых неосновными носителями. Эти дырки появляются в результате переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости. Аналогично дырки в p -полупроводнике будут основными носителями, а электроны - неосновными.

В силу того, что концентрация электронов и дырок по разные стороны от границы раздела значительно различаются, электроны стремятся проникнуть в p -область, а дырки диффундируют из p -области, в n -область. Электроны, переходя через границу раздела, оставляют после себя положительно заряженные неподвижные ионы доноров, а дырки, уходя из p -области, оставляют отрицательно заряженные неподвижные ионы акцепторов. В результате p -область заряжается отрицательно, а n -область положительно (рис. 1, б).

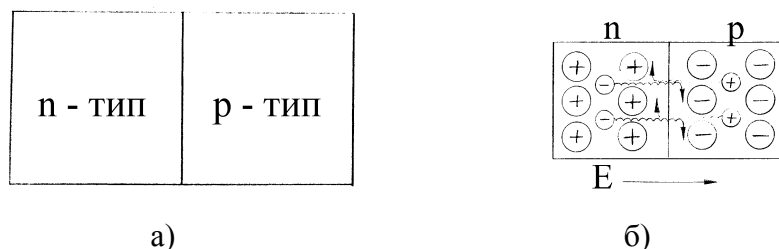


Рис. 1

Таким образом, на границе двух полупроводников образуется так называемая область объемного заряда. В этой области возникает электрическое поле \vec{E} , направленное от n - к p -полупроводнику. Под влиянием электрического поля \vec{E} в p - n -переходе возникает встречный поток электронов из p - в n -область и дырок из n - в p -область.

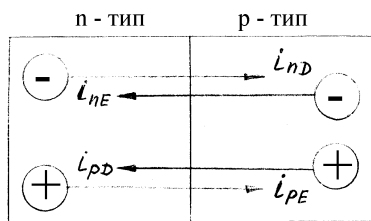


Рис. 2

новных носителей заряда.

Схематически токи через n - p -переход в состоянии равновесия, т.е. при отсутствии внешнего электрического поля показаны на рис. 2. Рассмотрим энергетическую диаграмму n - p -перехода при различных его состояниях:

1. Равновесное состояние

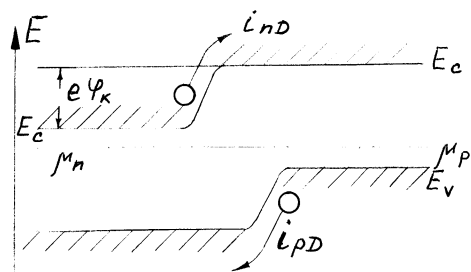


Рис. 3

Наличие объемного заряда в переходе приводит к возникновению контактной разности потенциалов ϕ_k и появлению энергетического барьера $e\phi_k$ на n - p -переходе (рис. 3). Так как в состоянии равновесия средняя энергия электронов по обе стороны от перехода одинакова, то уровень Ферми будет находиться на одной горизонтали.

2. Обратное (запирающее) смещение

Приложим к n - p -переходу внешнее напряжение U так, как показано на рис. 4, а.

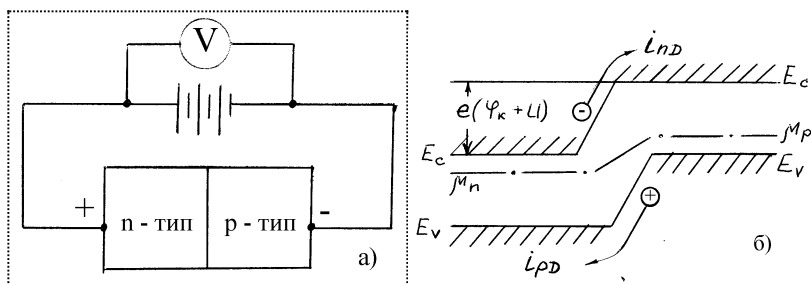


Рис. 4

В этом случае приложенное внешнее напряжение U суммируется с контактной разностью потенциалов ϕ_k . Высота потенциального барьера на n - p -переходе увеличится и станет равной $e(\phi_k + U)$ (рис. 4, б). Увеличение высоты потенциального барьера не отразится на величине тока проводимости через переход. Действительно, для неосновных носителей заряда поле в n - p -переходе является тянущим, ускоряющим.

Диффузионный же ток, обусловленный движением основных носителей, резко падает. Таким образом, в данном случае через n - p -переход будет протекать так называемый обратный ток. Этот ток мал по величине, так как концентрация неосновных носителей заряда меньше концентрации основных носителей.

3. Прямое (пропускное) смещение.

Изменим полярность приложенного к n - p -переходу напряжения U (рис. 5, а). В этом случае напряжение будет уменьшать величину потенциального барьера до значения $e(\varphi_k - U)$ (рис. 5, б).

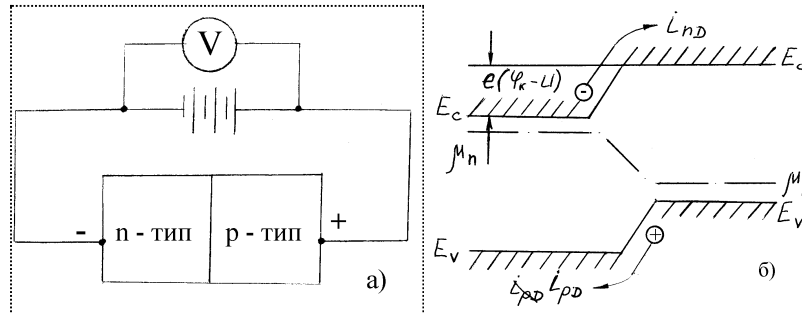


Рис. 5

Ток проводимости при этом останется неизменным, как и в предыдущем случае, т.к. для неосновных носителей заряда поле в n - p -переходе остается тянущим. Диффузионный ток электронов и дырок резко возрастает вследствие уменьшения потенциального барьера. Через n - p -переход потечет прямой ток.

Таким образом, мы рассмотрели два состояния n - p -перехода, резко отличающихся величиной протекающего тока. Это свойство n - p -перехода используется для изготовления полупроводниковых выпрямителей тока.

Если выпрямительный диод включить в цепь переменного тока, то в течение одного полупериода будет течь прямой ток, а в течение другого полупериода - очень малый обратный ток.

Зависимость между током и напряжением на диоде может быть записана аналитически или представлена графически в виде так называемой вольт-амперной характеристики (ВАХ). Аналитически эта зависимость имеет вид

$$i = i_{i\delta} - i_{i\delta\delta} = i_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad (1)$$

При обратном смещении $U < 0$ и слагаемое $e^{-\frac{eU}{kT}} \ll 1$. Тогда $i_{обр} \approx i_s$. Обратный ток i_s называют током насыщения. При прямом смещении: $U > 0$ и $e^{\frac{eU}{kT}} \gg 1$, тогда $i_{пр} \approx i_s e^{\frac{eU}{kT}}$, т.е. $i_{пр}$ растет с ростом U по экспоненте.

График зависимости i от U (ВАХ) показан на рис. 6. Свойства выпрямительных диодов характеризуются коэффициентом выпрямления α , равным отношению прямого тока $i_{пр}$ к обратному $i_{обр}$, измеренным при одинаковых напряжениях:

$$\alpha = \frac{i_{i\delta}}{i_{i\delta\delta}}, \text{ где } U_{i\delta} = |U_{i\delta\delta}|.$$

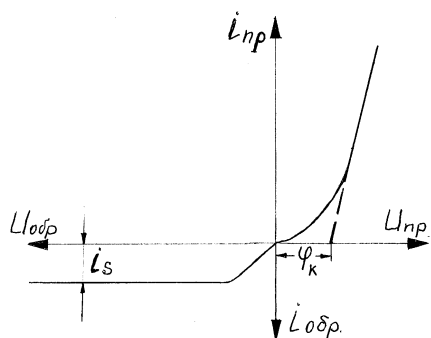


Рис. 6

на n - p -переходе (рис. 6).

При значениях прямого смещения $U > \varphi_k$ потенциальный барьер на n - p -переходе практически исчезает. Сопротивление диода в этом случае обусловлено лишь последовательным сопротивлением объема полупроводника и контактов. ВАХ из экспоненты переходит в прямую линию. Проводя касательную на линейном участке прямой ветви ВАХ до пересечения с осью напряжения U , можно оценить значение контактной разности потенциалов φ_k .

4. Методы получения и устройство полупроводниковых выпрямителей

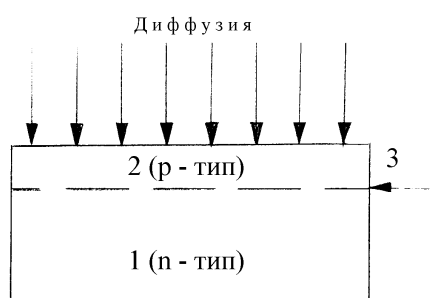


Рис. 7

Наиболее распространенным методом получения p - n -переходов в настоящее время является метод диффузии акцепторной примеси в p -полупроводник и донорной примеси в n -полупроводник. Переходом служит граница, отделяющая области с различным типом проводимости (рис. 7). Широкое применение находит также эпитаксиальный метод получения p - n -переходов, состоящий в наращивании на полупроводниковой подложке одного типа проводимости слоя полупроводника с противоположным типом проводимости.

Успешно осваивается метод получения p - n -переходов путем введения в полупроводник необходимой примеси с помощью ионного пучка — метод ионного легирования.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Источник тока.
2. Потенциометр.
3. Миллиамперметр.
4. Микроамперметр.
5. Вольтметр.
6. Полупроводниковый выпрямитель.

5. СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

В работе исследуется зависимость силы тока через диод от величины и направления приложенного напряжения. Для измерения тока собирается цепь по схеме (рис. 8).

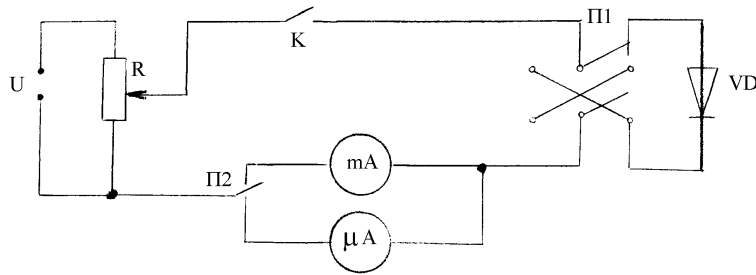


Рис. 8

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить ток через диод, изменяя величину и полярность внешнего напряжения. Результаты записать в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Напряжение	U, В						
Прямой ток	$I_{пр}$, А						
Обратный ток	$I_{обр}$, А						
Коэффициент выпрямления	α						

2. По результатам измерения построить ВАХ. Учитывая существенное различие в значениях $i_{пр}$ и $i_{обр}$ целесообразно прямую и обратную ветви ВАХ строить в разном масштабе.

3. Построить график зависимости $\alpha = f(U)$.

4. Определить контактную разность потенциалов ϕ_k в p - n -переходе.

5. По результатам работы сделать выводы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое p - и n -полупроводники?

2. Что называется основными и неосновными носителями заряда в полупроводниках?

3. Объясните температурную зависимость концентрации носителей заряда в полупроводниках.

4. Что такое p - n -переход?

5. Объясните механизм возникновения области объемного заряда и контактной разности потенциалов в p - n -переходе.

6. Укажите составляющие тока, протекающего через переход в равновесном состоянии, объясните их природу.

7. Нарисуйте энергетическую диаграмму p - n -перехода в состоянии равновесия, при прямом и обратных смещениях.

8. Запишите и объясните аналитическое выражение для тока через переход.

9. Нарисуйте и объясните вольт-амперную характеристику выпрямительного диода.

10. Что такое коэффициент выпрямления?

11. Какие методы получения p - n -переходов Вам известны?

ДОПОЛНЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК *p-n*-ПЕРЕХОДОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить осциллографический метод наблюдения вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов.

Исследовать вольт-амперные характеристики полупроводникового диода, светодиода, фотодиода, фоторезистора, *p-n*-переходов транзистора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Портис А. Физическая лаборатория. - М.: Наука, 1972. - 320 с.

3. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

- 3.1. Генератор низкой частоты ГЗ-53.
- 3.2. Электроннолучевой осциллограф.
- 3.3. Установка для наблюдения вольт-амперных характеристик.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 4.1. Собрать схему, изображенную на рис. 9.

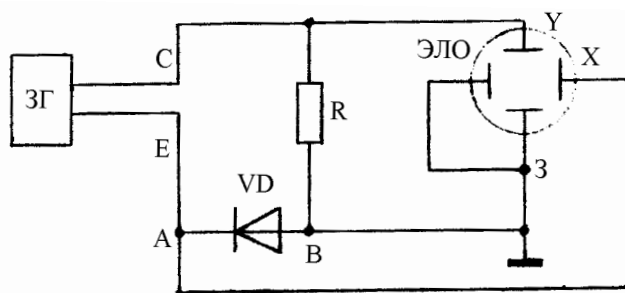


Рис. 9

- 4.2. Включить звуковой генератор ГЗ-53 в сеть 220 В.
 - 4.2.1. Переключатель "Поддиапазон" поставить в положение "0".
 - 4.2.3. Переключатель "Напряжение выхода" поставить в положение "3 В".
- 4.3. Включить электроннолучевой осциллограф в сеть 42 В.
 - 4.3.1. С помощью рукояток "Яркость" (*), фокусировки (·), координат (↔), (↖), установить электронный пучок примерно в центр экрана трубки осциллографа.
 - 4.3.2. Нажать тумблер "мах" входа Y.
 - 4.3.3. Нажать тумблер входа X.
- 4.4. Установить выходное напряжение звукового генератора (1...2) В с помощью рукоятки "Регулировка выхода". Получить на экране осциллографа устойчивую вольт-амперную характеристику исследуемого полупроводникового

вого прибора. Зарисовать полученную характеристику в отчет к лабораторной работе.

4.5. Наблюдать на экране картину выпрямления тока. Для этого включить внутреннюю синхронизацию 1 или 10 Гц и с помощью рукоятки синхронизации получить устойчивую картину выпрямления. Зарисовать полученную осциллограмму выпрямления переменного напряжения в отчет.

4.6. Изменяя частоту, проследить динамику изменения вольт-амперной характеристики диода.

4.7. Повторить пункты 4...6 для фотодиода, светодиода, фоторезистора, *p-n*-переходов транзистора по заданию преподавателя. Результаты наблюдений записать в отчет.

4.8. Оформить отчет и сделать выводы по работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить методику получения вольт-амперных характеристик с помощью осциллографа.

2. Пояснить ассиметричную картину выпрямления тока.

3. Пояснить влияние частоты на вольт-амперную характеристику полупроводниковых приборов.

ИЗУЧЕНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Иллюстрация эффекта туннелирования микрочастиц сквозь потенциальный барьер на примере анализа работы туннельного диода, исследование вольт-амперной характеристики туннельного диода.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
2. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.
3. Бушманов Б.И. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1971. - 224 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Сущность туннельного эффекта заключается в том, что частица, имеющая энергию E меньше высоты потенциального барьера U_0 , может при определенных условиях преодолеть его без потери энергии, если с обеих сторон барьера имеются изоэнергетические уровни (рис. 1). При этом вероятность туннелирования тем больше, чем меньше ширина потенциального барьера l и его высота U .

Для идеализированного потенциального барьера прямоугольной формы (рис. 1, а) вероятность прохождения (туннелирования) микрочастицы сквозь барьер равна

$$D = D_0 e^{-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}}, \quad (1)$$

где D_0 - коэффициент, по порядку величины близкий к единице.

Для потенциального барьера произвольной формы (рис. 1, б) обобщение формулы (1) приводит к следующему выражению для вероятности туннелирования:

$$D = D_0 e^{-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U(x) - E)} dx}. \quad (2)$$

Туннельный эффект играет большую роль в электронике. Он обуславливает протекание таких явлений, как эмиссия электронов под действием сильного поля, прохождение тока через тонкие диэлектрические пленки, пробой p - n -перехода. На его основе созданы полупроводниковые туннельные диоды, разрабатываются активные пленочные элементы и т.д.

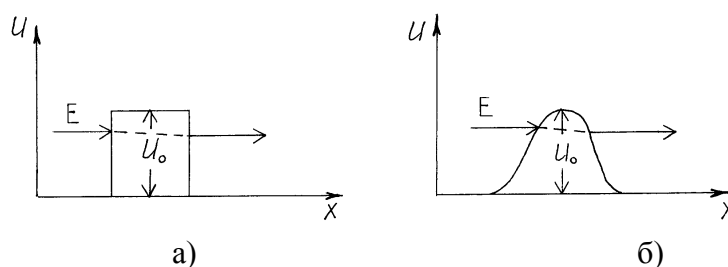


Рис. 1

Туннельный диод

В туннельном диоде потенциальным барьером является p - n -переход. Для заметного проявления туннельного эффекта в p - n -переходе необходимо выполнение двух основных условий:

1. Ширина области объемного заряда в p - n -переходе, иными словами, ширина потенциального барьера для электронов должна быть мала (порядка нескольких десятков ангстрем).

2. p - и n -области полупроводников должны быть вырождены, т.е. иметь высокую концентрацию легирующих примесей (акцепторов и доноров), достигающую $10^{25} \dots 10^{26}$ атомов/м³. В этом случае уровень Ферми будет проходить выше дна зоны проводимости в n -области и ниже потолка валентной зоны в p -области полупроводника. Как мы увидим ниже, в этом случае с обеих сторон p - n -перехода образуются изоэнергетические уровни, между которыми возможны туннельные переходы. Положение уровня Ферми в вырожденном электронном и дырочном полупроводниках показано на рис. 2.

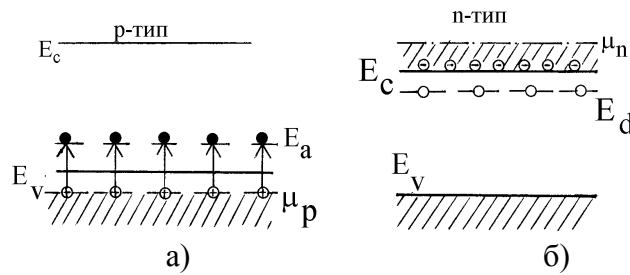


Рис. 2

Как видно на зонных диаграммах (рис. 2), в полупроводниках n -типа вследствие большой концентрации доноров в зоне проводимости образуется "примесная зона", заполненная электронами. В p -полупроводниках примесная зона, заполненная "дырками" (т.е. свободная от электронов) образуется в валентной зоне. Таким образом, все энергетические состояния, лежащие ниже уровня Ферми, заполнены электронами (на рисунках они заштрихованы), а выше - свободны.

Для анализа работы туннельного диода рассмотрим энергетические диаграммы p - n -перехода при отсутствии смещения и при различных напряжениях смещения.

1. Смещение отсутствует.

Пусть внешнее напряжение на p - n -переходе отсутствует. Уровень Ферми в p - и n -полупроводниках проходит горизонтально, нет перекрытия свободных и занятых электронами уровней в p - и n -областях и ток через p - n -переход отсутствует. Это состояние соответствует точке "0" на вольт-амперной характеристике (рис. 3).

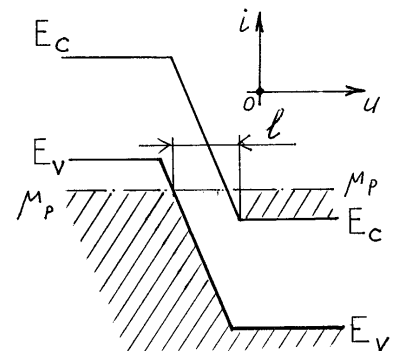


Рис. 3

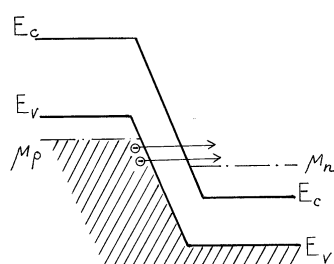


Рис. 4

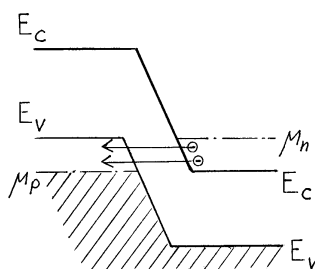
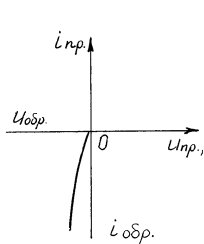
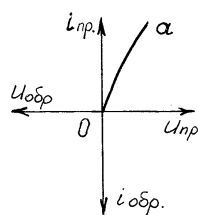


Рис. 5



2. Отрицательное смещение.

При подаче отрицательного смещения на p - n -переход ("минус" источника присоединен к p -области, а "плюс" - к n -области) заполненные электронами состояния валентной зоны p -области окажутся лежащими против свободных состояний зоны проводимости n -области (рис. 4). Вследствие этого резко возрастет число туннельных переходов электронов слева направо (показано стрелками) и ток возрастет.

3. Прямое смещение

При подаче прямого смещения по мере его роста заполненные состояния зоны проводимости n -области окажутся против незаполненных состояний валентной зоны p -области. При этом начинает возрастать количество туннельных переходов электронов из зоны проводимости n -полупроводника на свободные уровни в валентной зоне p -полупроводника. Когда дно зоны проводимости n -области окажется на одной горизонтали с уровнем Ферми p -области, прямой туннельный ток достигнет максимума (туннелирование электронов из n - в p -область показано на рис. 5 стрелками). Данному состоянию p - n -перехода соответствует участок "0-а" вольт-амперной характеристики диода.

Дальнейшее увеличение прямого смещения приведет к уменьшению тока, так как число занятых состояний в зоне проводимости p -области, лежащих против свободных состояний в валентной зоне p -области, становится меньше, поскольку часть их оказывается против запрещенной зоны p -области. Наконец, при таком смещении, при котором исчезнет перекрытие зон, т.е. положение дна зоны проводимости n -области совпадает с положением валентной зоны в p -области, туннельные переходы прекратятся и ток достигнет минимума (рис. 6, участок "а-б").

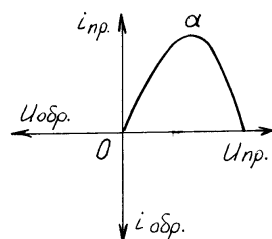
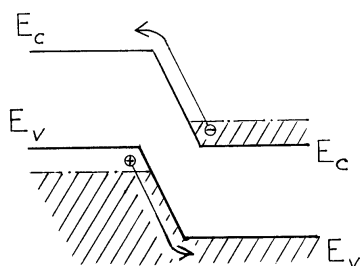


Рис. 6

При дальнейшем увеличении прямого смещения происходит уменьшение барьера на p - n -переходе: начинается инжекция электронов из n - в p -область и дырок из p - в n -область (на рис. 7 переходы показаны стрелкой). Через p - n -переход потечет диффузионный ток как в обычных невырожденных p - n -переходах. Зависимость диффузионного тока i_d через p - n -переход от приложенного напряжения показана на рис. 7.

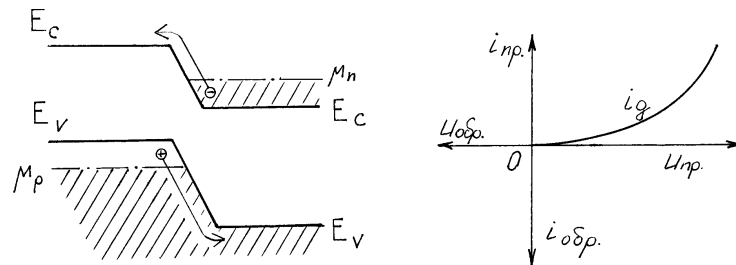


Рис. 7

Таким образом, своеобразная вольт-амперная характеристика туннельного диода обусловлена наложением тока туннельных переходов электронов (составляющая тока 1 на рис. 8) и диффузионного тока (составляющая 2). Результирующая этих токов (составляющая 3) и представляет собой вольт-амперную характеристику туннельного диода. Особенностью вольт-амперной характеристики является наличие отрицательного дифференциального сопротивления " R_d " на падающем участке "а - б" ($R_d = \frac{dU}{dI} < 0$).

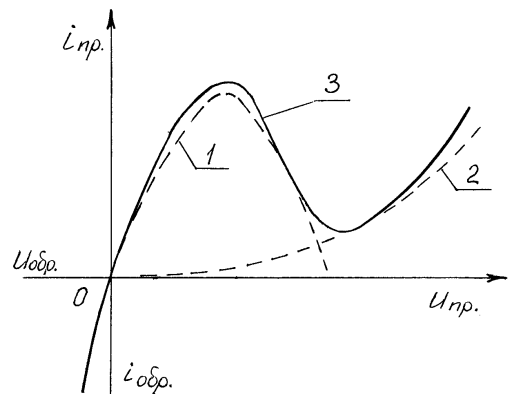


Рис. 8

Наличие отрицательного сопротивления и резкая нелинейность вольт-амперной характеристики туннельного диода позволяют использовать его как активный элемент в различных радиотехнических устройствах: усилителях, генераторах, смесителях. Кроме того, на туннельных диодах можно строить различные импульсные устройства - триггеры, спусковые схемы с очень малыми временами переключения.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Туннельный диод.
2. Установка для снятия вольт-амперной характеристики диода.

5. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки для снятия вольт-амперной характеристики изображена на рис. 9. Диод включается в гнезда Г1 и Г2. Ток через диод измеряется миллиамперметром mA , имеющим два предела измерений, переключаемых тумблером П2. Напряжение на диоде изменяется потенциометром R_1 . Переключатель

П1 служит для переключения рода работ (снятие вольт-амперной характеристики на постоянном токе, переменном токе).

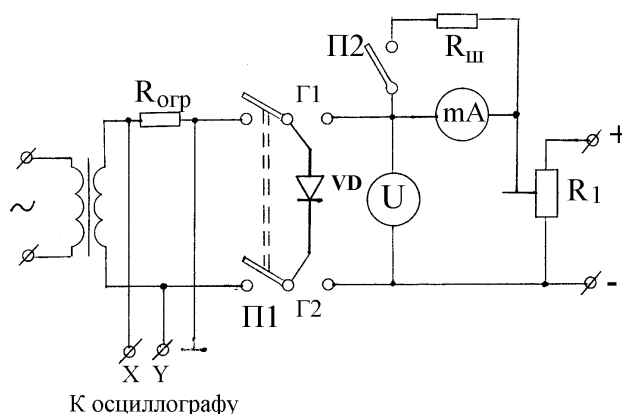


Рис. 9

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снятие вольт-амперной характеристики на постоянном токе.

Включить диод в схему для снятия вольт-амперной характеристики на постоянном токе. Тумблер П1 поставить в правое положение. Потенциометр R_1 полностью вывести поворотом рукоятки против часовой стрелки. Подключить установку с помощью сетевого шнура к сети с напряжением 220 В.

Увеличивая напряжение потенциометром R_1 снять зависимость $I = f(U)$. Результаты измерений занести в таблицу. Особое внимание обратить на снятие участка отрицательного сопротивления.

2. Снятие вольт-амперной характеристики осциллографическим методом.

Для наблюдения характеристики туннельного диода на осциллографе необходимо подключить последний к соответствующим клеммам установки. Переключатель П1 поставить в левое положение. Зарисовать вольт-амперную характеристику с экрана осциллографа.

3. Сравнить полученные характеристики.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое вырожденные p - и n -полупроводники?
2. Объясните работу туннельного диода.
3. Начертите схему p - n -перехода для диода при отсутствии и наличии смещения.
4. Дайте определение уровня Ферми.
5. Запишите распределение Ферми - Дирака.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14

ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО СТАБИЛИТРОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить напряжение стабилизации диода КС 156 А.
2. Определить статическое и динамическое сопротивление стабилитрона в рабочей точке, выбрав ее по указанию преподавателя.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник для студентов вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.
2. Пасынков В.В. и др. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов.- М.: Высш. шк., 1983. - 398 с.
3. Тугов Н.М. и др. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1990. - 576 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Стабилитроном (опорным диодом) называется полупроводниковый прибор, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока в заданном диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения в цепи (рис. 1). Стабилитроны работают в режиме электрического пробоя. Под действием сильного электрического поля в области p - n -перехода обратный ток резко возрастает при малых изменениях приложенного напряжения из-за сильной зависимости коэффициента α ударной ионизации для области лавинного пробоя от напряженности электрического поля: $\alpha = AE^m$, где обычно $m > 5$, A - постоянная, зависящая от материала, из которого изготовлен прибор. Напряженность электрического поля E в области лавинного пробоя превышает значение 10^7 В/м, поэтому наблюдать ударную ионизацию можно лишь в p - n -переходах, поскольку создать поля $10^7 \dots 10^8$ В/м в однородных полупроводниках чрезвычайно трудно.

Суть явления лавинного пробоя состоит в том, что носители заряда, например электроны, разогнавшись в сильном электрическом поле, могут приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов полупроводника, т.е. для образования новых носителей заряда. Ускорение электронов до порога ионизации зависит от соотношения двух факторов - ускорения во внешнем электрическом поле и рассеивания энергии при столкновениях с фононами. Наибольший вклад в релаксацию по энергиям вносят фононы с энергией больше 0,1 эВ, называемые

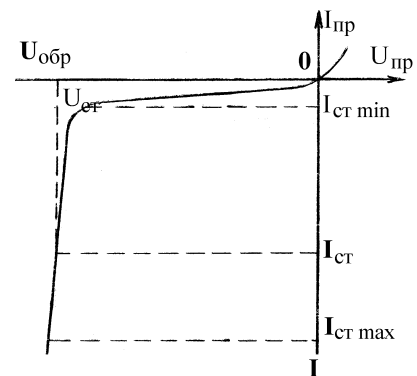


Рис. 1

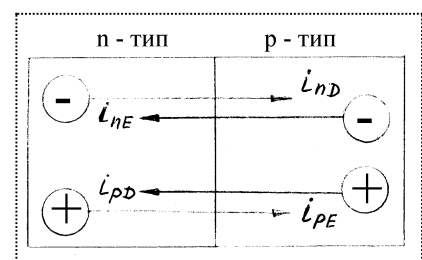


Рис. 2

оптическими. Ускорение до энергии ионизации ϵ_u можно проиллюстрировать диаграммой, показанной на рис. 2. Здесь l - средняя длина свободного пробега электронов, независимая от их энергии. В первом случае в очень сильных электрических полях, когда выполняется условие $|\vec{e}\vec{E}l| > \hbar\omega_0$, где $\hbar\omega_0$ - энергия оптического фонона, электроны могут набрать энергию ионизации ϵ_u в результате многократных столкновений с фононами (линия 1). Это, так называемое, диффузионное приближение ударной ионизации. Во втором случае, когда $|\vec{e}\vec{E}l| < \hbar\omega_0$, носители могут набрать энергию ϵ_u лишь на расстояниях L_u , многократно превышающих длину свободного пробега l (линия 2). Вероятность такого пробега до порога ионизации без столкновений $P_u = \exp\left(-\frac{L_u}{l}\right)$. Это приближение называют дрейфовым. В узких p - n -переходах ударная ионизация идет по диффузионному приближению, а в толстых, плавных - по дрейфовому.

В стабилитронах обратный ток диода, т.е. рабочий участок ВАХ, определяется выражением

$$I_{обp} = M(I_S + I_g),$$

где I_S - обычный ток насыщения обратной ветви ВАХ p - n -перехода (см. описание работы 12); I_g - генерационный ток p - n -перехода, определяемый скоростью тепловой генерации носителей в области объемного заряда; M - коэффициент лавинного умножения носителей заряда.

Он может быть рассчитан с помощью коэффициента ударной ионизации α , например, для электронов $M_n = \frac{K-1}{K-Z}$, где $K = \frac{\beta}{\alpha}$, здесь β - коэффициент ударной ионизации для дырок; $Z = \exp\left[(K-1)\int_0^\delta \alpha dx\right]$, где δ - толщина области объемного заряда p - n -перехода.

Обычно коэффициенты лавинного умножения носителей рассчитываются по формуле

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{проб}}\right)^b},$$

где $b = 3$ для кремниевых стабилитронов; $U_{проб}$ - пробивное напряжение p - n -перехода; U - приложенное к p - n -переходу напряжение.

Важной характеристикой стабилитрона является его динамическое сопротивление $r = \frac{dU}{dI}$ (в рабочей точке). Чем меньше величина r , тем выше качество стабилизации напряжения. Потери в диоде на джоулево тепло определяет статическое сопротивление $R = \frac{U}{I}$ (в рабочей точке).

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Макет установки для измерения ВАХ полупроводникового диода.
2. Стабилитрон КС 156 А.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку.
2. Подключить стабилитрон к диодным клеммам в обратном (запирающем) включении.
3. Увеличивая потенциометром напряжение на стабилитроне от 0 до 6 вольт, снять зависимость тока стабилитрона I_C от напряжения U и занести ее в табл. 1. Напряжение увеличивать на 0,5 В в диапазоне от 0 до 5 В и на 0,2 В в диапазоне от 5 до 6 В.

Т а б л и ц а 1

Напряжение, U , В								
Ток стабилитрона, I_C , мА								

4. Определить динамическое и статическое сопротивления стабилитрона при 5,8 В.
5. Построить график зависимости $I_C(U)$.
6. По результатам измерений сделать вывод о характеристиках стабилитрона ($U_{сн}$, $I_{сн}$, r , R).

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое стабилитрон, и каково его назначение в электрических цепях?
2. Каков физический механизм стабилизации напряжения на обратной ветви ВАХ опорного диода?
3. Объясните механизм ударной ионизации при лавинном пробое p - n -перехода.
4. Что такое коэффициент лавинного умножения носителей, и каково его влияние на обратный ток диода?
5. Смысл статического и динамического сопротивлений стабилитрона.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15

ИЗУЧЕНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение работы биполярного транзистора. Исследование статических характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - Т.3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.
2. Бушманов Б.Н. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1971. - 224 с.
3. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.

3. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Лабораторная установка.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

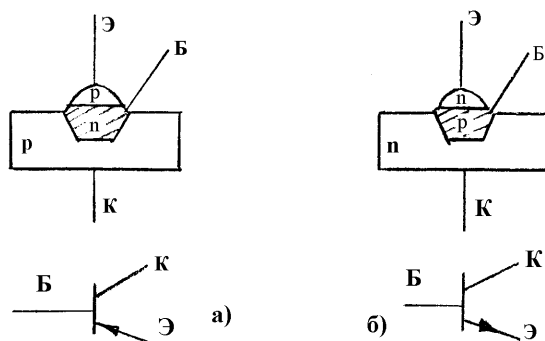


Рис. 1

1. Биполярный транзистор - полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Изобретен в 1948 г. У. Шокли, У. Браттейном и Дж. Бардиным (Нобелевская премия 1956 г.). Транзистор представляет собой монокристаллическую структуру - полупроводниковую пластину, в которой технологически созданы три чередующиеся области с различными типами проводимости: $p-n-p$ или $n-p-n$ (рисунок 1, а,б). Средняя область называется базой (Б), крайние - эмиттером (Э) и коллектором (К). База отделена от эмиттера эмиттерным $p-n$ -переходом (переход ЭБ или ЭП), от коллектора - коллекторным переходом (переход КБ или КП). От базы, эмиттера и коллектора сделаны металлические невыпрямляющие выводы - одноименные электроды.

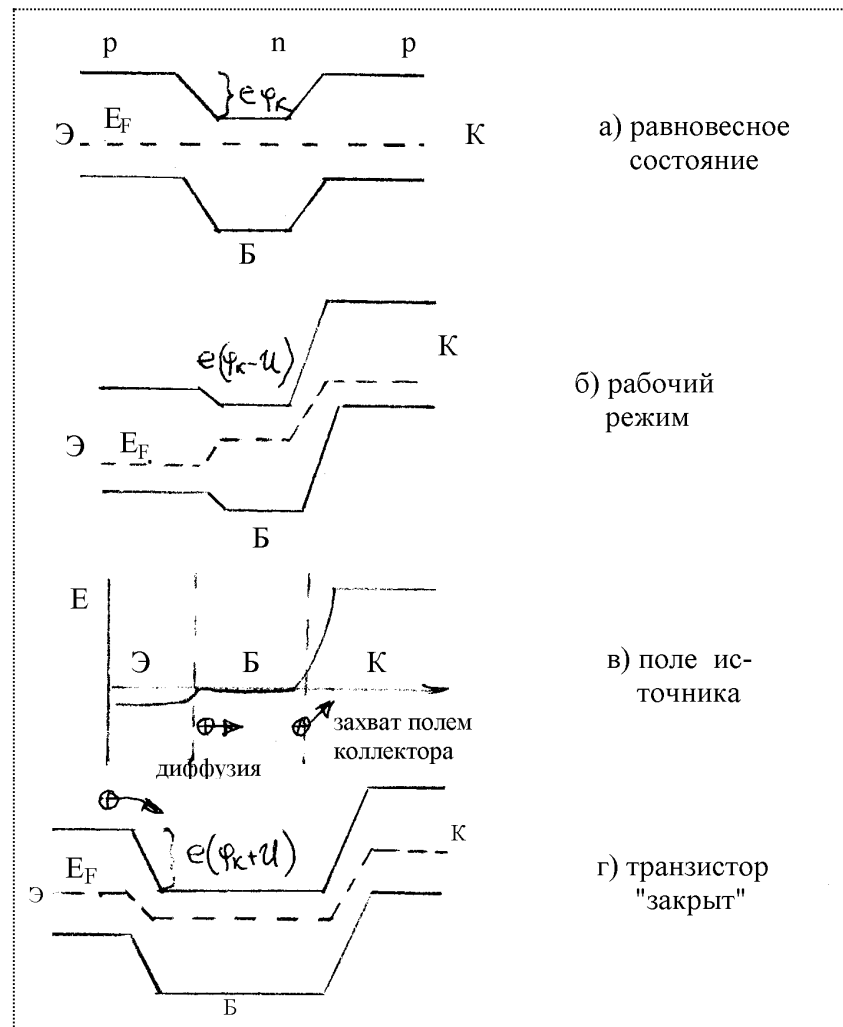


Рис. 2

2. Схемы включения и принцип действия.

В технике применяются три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ) с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК). Принцип действия схем в зависимости от структуры применяемых транзистором $p-n-p$ или $n-p-n$ не различается. Только в $p-n-p$ -транзисторах главную роль в протекающих процессах принимают дырки, а в $n-p-n$ -транзисторах - электроны.

Схема с ОЭ

Рассмотрим физические процессы происходящие в транзисторе на примере транзистора $p-n-p$ -типа. В рабочем режиме к эмиттерному переходу (ЭП) приложено постоянное напряжение смещения $U_{бэ}$ (для кремниевых транзисторов $U_{бэ} = 0,6$ В, для германиевых $U_{бэ} = 0,3$ В) понижающее потенциальный барьер перехода база-эмиттер так, что он оказывается включенным в прямом направлении (рис. 2, б, рис. 3), как говорят, "открыт". К коллекторному переходу (КП) приложено значительное обратное напряжение $U_{кэ}$, повышающее потенциальный барьер перехода и создающее сильное электрическое поле на границе коллектор - база. Это поле является тормозящим для основных носителей заряда в области базы.

Под действием напряжения $U_{бэ}$ через эмиттерный переход (ЭП) течет прямой ток $I_э$, который обусловлен главным образом инжекцией дырок из эмиттера в базу. Сильное электрическое поле, создаваемое в тонкой области базы мощным источником $U_{кэ}$, резко неоднородно (рис. 2, в). По мере удаления от области коллектора и приближения к области эмиттера поле уменьшается от максимального значения практически до нуля (эффект экранирования базой поля коллектора).

Поэтому движение дырок, инжектированных из эмиттера в базу определяется сначала диффузией (из-за различия в концентрациях - в базе дырок очень мало), а так как толщина базы мала по сравнению со средней длиной пробега дырки до рекомбинации с электроном, то большинство дырок диффундируя через базу достигают перехода коллектор - база и затягиваются сильным полем на границе перехода КБ, образуя ток коллектора $I_к$. Незначительная часть дырок рекомбинирует, незначительная часть ответвляется в базу, образуя ток базы $I_б$ (рис. 3). Таким образом,

$$I_э = I_к + I_б \quad \text{и} \quad I_б \ll I_к, \quad I_к \approx I_э.$$

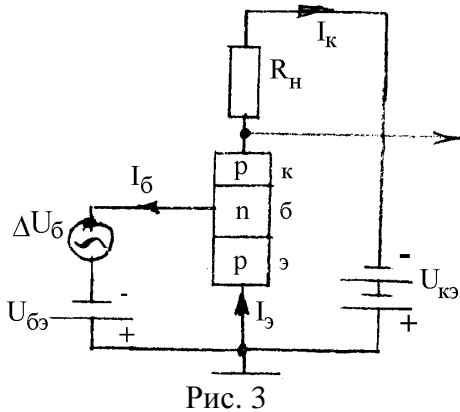


Рис. 3

В цепь базы включен источник усищаемого напряжения $\Delta U_б$. Всякое изменение напряжения в цепи базы вызывает изменение тока эмиттера $\Delta I_э$ (в соответствии с вольт-амперной характеристикой $p-n$ -перехода) и соответственно изменение тока коллектора $\Delta I_к$, причем, $\Delta I_к \approx \Delta I_э$ поскольку в цепи коллектора включен высоковольтный источник $U_{кэ}$, то амплитуда напряжения $\Delta U_к$ на сопротивлении нагрузки $R_н$ за счет протекания тока $\Delta I_к$ оказывается $\Delta U_к = R_н \cdot \Delta I_к$ и

может во много раз превышать $\Delta U_б$.

Отношение $K_u = \frac{\Delta U_к}{\Delta U_б}$ называется коэффициентом усиления по напряжению.

Транзистор тем лучше, чем меньшая часть дырок инжектированных эмиттером создает ток базы. Отношение $h_{21э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}$ называется коэффициентом передачи тока базы. Таким образом,

$$\Delta U_к = R_н \cdot \Delta I_к = R_н \cdot h_{21э} \cdot \Delta I_б = \frac{R_н}{R_э} \cdot h_{21э} \cdot \Delta U_б,$$

где $R_э$ - объемное сопротивление эмиттерной области транзистора. Это сопротивление является входным сопротивлением транзистора со стороны источника усищаемого сигнала. Таким образом, в первом приближении коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{R_н}{R_э} \cdot h_{21э}.$$

Коэффициент усиления по току в первом приближении равен

$$K_I = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{\bar{\epsilon}}} = h_{21\bar{\epsilon}}.$$

Коэффициент усиления по мощности определяется как

$$K_p = K_U \cdot K_I.$$

Эти параметры можно определить, имея семейство вольт-амперных характеристик транзистора.

Таким образом, транзистор, включенный по схеме с ОЭ, дает значительное усиление по напряжению, по току и по мощности. Если к переходу ЭБ подключить обратное "запирающее" напряжение, то диффузионный ток эмиттер-база резко уменьшается, физическая толщина области базы увеличивается и становится сравнимой со средней длиной пробега дырок до рекомбинации (рис. 2, г). В результате область базы быстро обедняется носителями тока и приобретает большое сопротивление, коллекторный ток падает. Транзистор, как говорят, "закрывается".

К недостаткам схемы с ОЭ следует отнести сильную зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала (плохие частотные свойства) и большие искажения вследствие существенной нелинейности входной характеристики (рис. 6).

Схема с ОБ

Схема включения транзистора с ОБ приведена на рис. 4. Физические принципы работы схемы аналогичны схеме с ОЭ. Технические же параметры существенно различаются.

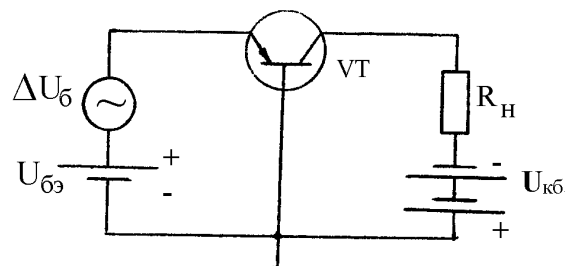


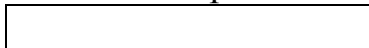
Рис. 4

В отличие от схемы с ОЭ источник усиливаемого сигнала подключен не к базовому, а к эмиттерному электроду транзистора. Изменение напряжения источника сигнала $\Delta U_{\bar{\epsilon}}$ вызывает изменение $\Delta I_{\bar{\epsilon}}$ эмиттерного тока. Но поскольку $I_k \leq I_{\bar{\epsilon}}$, то коэффициент усиления по току $K_I = \frac{\Delta I_{\bar{\epsilon}}}{\Delta I_k} < 1$ оказывается меньше

единицы. Входное сопротивление транзистора в схеме с ОБ $R_{вхОБ}$ оказывается много меньше входного сопротивления $R_{вхОЭ}$ в схеме с ОЭ. Это создает сложности при согласовании входных и выходных сопротивлений для каскадного соединения усилителей. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_{UОБ} = \frac{\Delta U_k}{\Delta U_{\bar{\epsilon}}} = \frac{\Delta I_k \cdot R_n}{\Delta I_{\bar{\epsilon}} \cdot R_{вхОБ}} \approx \frac{R_n}{R_{вхОБ}} \gg 1.$$

Коэффициент усиления по мощности равен



Большое достоинство схемы с ОБ - хорошие частотные свойства. Это объясняется экранирующим действием базы, которая по переменному току является "заземленной".

Схема с ОК

Схема включения транзистора с общим коллектором приведена на рис. 5.

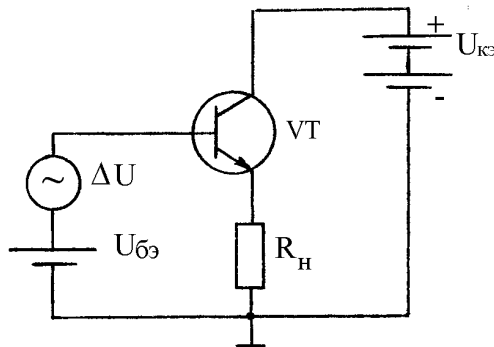


Рис. 5

Поскольку источник усиливаемого сигнала $\Delta U_{\text{б}}$ и сопротивление $R_{\text{н}}$ нагрузки включены в общую цепь эмиттера, то входное напряжение и выходное примерно равны, т.е. коэффициент усиления по напряжению меньше единицы. Коэффициент усиления по току

$$K_{\text{ТОК}} \approx \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \approx h_{21\text{э}}.$$

Достоинство схемы - большое входное сопротивление и хорошие частотные свойства, а также очень низкое выходное сопротивление. Применяется схема с ОК для согласования сопротивления нагрузки с сопротивлением источника сигнала и в качестве усилителя мощности при работе на низкоомную либо частотозависимую нагрузку.

5. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА

Вольт-амперные характеристики транзистора позволяют примерно оценить параметры транзистора, коэффициент усиления каскада в режиме малого сигнала.

а) *Входные характеристики* - это зависимость тока базы от напряжения между базой и эмиттером при условии постоянного напряжения коллектор-эмиттер: $I_{\text{к}} = f(U_{\text{БЭ}}) \Big|_{U_{\text{кэ}} = \text{const}}$.

Типичный вид входных характеристик показан на рис. 6.

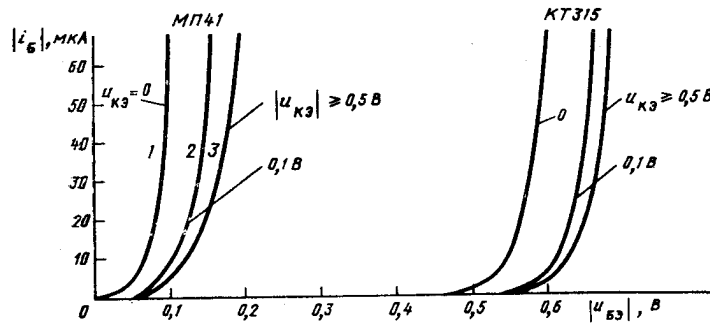


Рис. 6

Вид характеристики слабо зависит от напряжения между коллектором и эмиттером. Это объясняется экранирующим действием базы на переход ЭБ. Вблизи точки "перегиба", т.е. когда транзистор открывается, характеристика существенно нелинейна, следовательно, входное сопротивление сильно зависит от напряжения между базой и эмиттером. Этим объясняются большие гармонические искажения схемы с ОЭ. Входное сопротивление $R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}}$ рассчитывается

вблизи точки перегиба, причем приращения надо брать достаточно малыми.

б) *Выходные характеристики* - зависимости тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при условии постоянного тока базы $I_k = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{I_{\text{б}} = \text{const}}$.

Теоретически выходные характеристики должны представлять собой прямые, т.к.

$$I_k = h_{21э} \cdot I_{\text{б}}; \quad I_{\text{б}} = \text{const}; \quad I_k = \text{const}.$$

Типичный вид реальных характеристик приведен на рис. 7.

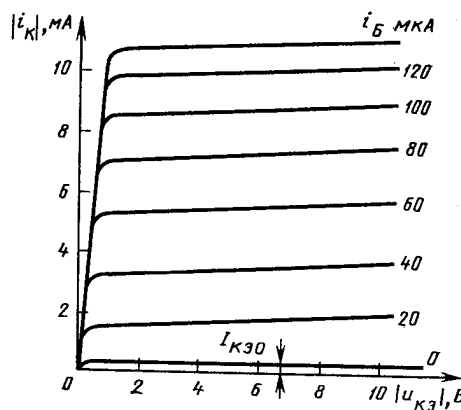


Рис. 7

Самая нижняя характеристика при $I_{\text{б}} = 0$ соответствует протеканию обратного тока коллектора, обусловленного движением неосновных носителей из базы в коллектор. Режим при $I_{\text{б}} = 0$ называется режимом "отсечки". При очень малых напряжениях $U_{\text{кэ}}$ наблюдается резкое падение коллекторного тока и независимость тока коллектора от тока базы. Говорят, что при этом транзистор входит в режим насыщения, который характеризуется тем, что при малых напряжениях коллектор-эмиттер оба p - n -перехода, как эмиттерный, так и кол-

латорный оказываются смещенными в прямом направлении. Для схемы с ОЭ сопротивление нагрузки $R_n = R_{вых}$ совпадает с выходным сопротивлением схемы (транзистора): $R_{вых} = \frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_K}$.

При расчете $R_{вых}$ необходимо выбирать рабочий участок вольт-амперной характеристики.

в) *Проходные характеристики* - это зависимости тока коллектора от тока базы при постоянном напряжении коллектор-эмиттер:

$$I_k = f(I_{\bar{o}}) \Big|_{U_{КЭ} = const}.$$

Теоретически зависимость линейная: $I_k = h_{21э} \cdot I_{\bar{o}}$ с плавным переходом к области насыщения. По проходной характеристике рассчитывается коэффициент передачи тока базы: $h_{21э} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{\bar{o}}}$.

6. СХЕМА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема измерения ВАХ на постоянном токе приведена на рис. 8. Изменение режима работы генератора осуществляется с помощью регулируемых источников питания ИП₁ и ИП₂ соответственно на входе и выходе схемы.

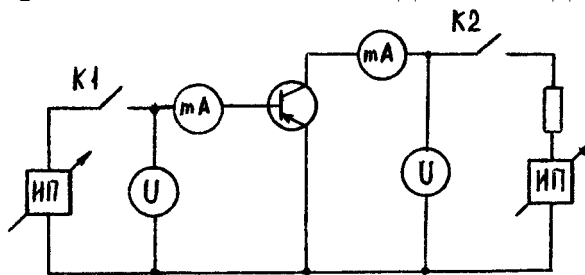


Рис. 8

7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять семейство входных характеристик транзистора.
2. Снять семейство выходных характеристик транзистора.
3. Снять проходную характеристику.
4. По результатам измерений построить семейство ВАХ транзистора. На графиках отметить нерабочие области режимов транзистора (отсечки и насыщения).
5. Вычислить входное $R_{вх}$, выходное $R_{вых}$ сопротивления, коэффициент передачи тока базы $h_{21э}$.
6. Вычислить ожидаемый коэффициент усиления по напряжению K_U и по мощности K_P для малого сигнала.
7. Сделать выводы и дать рекомендации относительно выбора тока базы для получения максимального коэффициента усиления.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразите схемы включения транзистора, объясните принцип их работы.
2. Охарактеризуйте принцип действия транзистора в схеме с ОЭ.
3. Дайте качественную уравнительную характеристику схем включения с ОЭ, ОБ, ОК (по входному, выходному сопротивлениям, коэффициентам усиления по напряжению, току, мощности).
4. Охарактеризуйте влияние тока базы на параметры транзистора в схеме с ОЭ?
5. Перечислите и охарактеризуйте области применения схем с ОЭ, ОБ, ОК.

ДОПОЛНЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 15

ИЗУЧЕНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить работу транзистора.
2. Изучить осциллографический метод наблюдения входных и выходных характеристик транзистора.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

Портис А. Физическая лаборатория. - М.: Наука, 1972. - 302 с.

3. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

- 3.1. Генератор низкой частоты ГЗ-53.
- 3.2. Электроннолучевой осциллограф С1-1.
- 3.3. Установка для наблюдения входных и выходных характеристик транзистора.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Собрать схему для наблюдения входных характеристик транзистора, представленную на рисунке 9.

4.2. Включить звуковой генератор ГЗ-53 в сеть 220 В.

4.2.1. Переключатель **"ПОДДИПАЗОН"** поставить в положение "0".

4.2.2. Рукояткой **"ЧАСТОТА"** установить частоту $50 \div 100$ Гц.

4.2.3. Переключатель **"НАПРЯЖЕНИЕ ВЫХОДА"** поставить в положение "3 В".

4.3. Включить электроннолучевой осциллограф в сеть 220 В тумблером **"СЕТЬ"**.

4.3.1. Установить электронный пучок в центр экрана с помощью рукояток **"ЯРКОСТЬ"**, **"ФОКУС"**, **"ОСЬ У ВНИЗ, ВВЕРХ"**, **"ОСЬ X ВЛЕВО, ВПРАВО"**.

4.3.2. Выключить синхронизацию. Для этого переключатель **"ДИАПАЗОН ЧАСТОТ"** поставить в положение **"ВЫКЛ"**, рукоятку **"ОСЛАБЛЕНИЕ"** установить в положение 1:1, рукоятки **"УСИЛЕНИЕ"** осей У и Х поставить в положение "10".

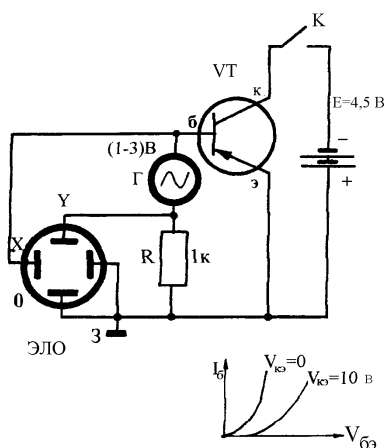


Рис. 9

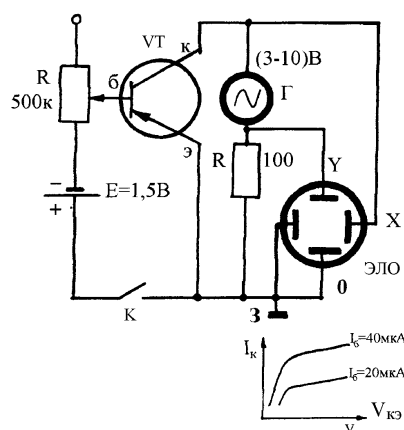


Рис. 10

4.4. Увеличивая напряжение выхода звукового генератора ГЗ-53 до 0,5...1 В, получить на экране осциллографа устойчивую входную характеристику транзистора.

Зарисовать полученную характеристику в отчет к лабораторной работе.

4.5. Включить кнопкой "К" напряжение 4,5 В между коллектором и эмиттером. Зарисовать полученную характеристику в отчет.

4.6. Собрать схему для наблюдения выходных характеристик транзистора, представленную на рисунке 10.

4.7. Повторить пункты 4.2...4.3.2.

4.8. Увеличивая напряжение выхода со звукового генератора ГЗ-53 до 1 В, получить на экране осциллографа устойчивую выходную характеристику транзистора. Зарисовать полученную характеристику в отчет к лабораторной работе.

4.9. Включить кнопкой "К" напряжение 1,5 В, подаваемое на базу. Изменяя напряжение на базе с помощью рукоятки потенциометра, просмотреть выходные характеристики транзистора. Зарисовать полученные характеристики в отчет к лабораторной работе.

4.10. Изменяя частоту звукового генератора, проследить динамику изменения входных и выходных характеристик транзистора.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Объясните методику получения входных и выходных характеристик транзистора с помощью осциллографа.

5.2. Качественно поясните примерный ход характеристик и влияние частоты на характеристики транзистора.

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ФОТОДИОДА, СВЕТОДИОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ДИОДНОГО ОПТРОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с физикой работы основных элементов оптронной техники и изучить их электрические характеристики.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. - М.: Радио и связь, 1989. - 360 с.
2. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 275 с.
3. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. - М.: Высш. шк., 1983. - 304 с.
4. Шарупич Л.С., Тугов Н.М. Оптоэлектроника. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 256 с.
5. Шалимова К.И. Физика полупроводников. - М.: Энергия, 1976. - 416 с.
6. Герщунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники. - Киев: Выща школа, 1987. - 456 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ. ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Оптоэлектроника - это область электроники, изучающая и использующая процессы взаимодействия оптического излучения с веществом для передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации. Эти функции выполняют оптоэлектронные приборы, созданные методами микроэлектронной технологии и относящиеся к приборам твердотельной электроники. Физической основой оптоэлектроники являются процессы преобразования оптических сигналов в электрические (и наоборот), процессы распространения оптического излучения в различных средах и его взаимодействия с веществом.

Оптическое излучение охватывает диапазон электромагнитных волн длиной от 1 нм до 1 мм. Эти границы достаточно условны и перекрываются со стороны коротких волн с мягким рентгеновским излучением, а со стороны длинных волн - с субмиллиметровыми радиоволнами. Практически в оптоэлектронных приборах используется диапазон длин волн $\lambda = (0,2...50)$ мкм, что составляет по шкале энергий λ (0,02... 5,0) эВ и соответствует ширине запрещенной зоны полупроводников. Такое оптическое излучение возникает в результате возбуждения валентных электронов атомов полупроводника и их последующей излучательной рекомбинации с дырками.

Для регистрации оптического излучения в оптоэлектронике используется внутренний фотоэффект, т.е. генерация свободных носителей заряда в полупроводниках при поглощении света, приводящая к увеличению их электропроводности или к возникновению фотоЭДС.

Видимое человеческим глазом оптическое излучение занимает узкий диапазон спектра: от 380 нм (фиолетовое) до 780 нм (красное излучение), заключенный между ультрафиолетовым (10...380 нм) и инфракрасным (0,78...100

мкм) излучениями. Максимум чувствительности глаза совпадает с максимумом энергии солнечного излучения, доходящего до Земли, приходящимся на зеленый свет (555 нм), что является результатом длительного приспособления органов зрения человека к условиям жизни на Земле.

Оптическое излучение дает человеку более 90 % информации о внешнем мире (через органы зрения). Огромные информационные возможности света обусловлены следующими его основными особенностями, используемыми в оптоэлектронных приборах:

1) высокой частотой электромагнитных колебаний (до 10^{15} Гц), позволяющей в миллионы раз увеличить информационную емкость канала оптической связи по полосе пропускания по сравнению с радиосвязью;

2) малой длиной волны света и высокой (порядка λ^2) разрешающей способностью передачи двумерного изображения, а также возможностью высокой концентрации энергии оптического излучения в пространстве (реализуемой с помощью лазеров);

3) электронейтральностью фотона как носителя информации, исключающей взаимодействие оптических пучков в волноводах (световодах) и обеспечивающей практически идеальную помехозащищенность и электрическую развязку входа и выхода оптической системы связи.

Основной тенденцией развития оптоэлектронных приборов является устранение двойного преобразования энергии (электрической в оптическую и наоборот) и создание чисто оптических интегральных схем. Такая задача стоит перед ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКОЙ, но она еще далека от своего инженерного решения. Современная оптоэлектроника развивается в следующих основных направлениях:

1) индикаторные устройства (единичные, линейные, цифровые индикаторы, табло и твердотельные экраны) для визуального отображения информации;

2) формирователи сигналов изображений (двумерных картин и образов), которые совместно с микропроцессорами составляют систему искусственного зрения в робототехнике, в будущем предназначенную и для человека;

3) волоконно-оптические системы связи, передающие сигналы на расстояния ($10^2 \dots 10^7$) м по волоконным световодам с потерями оптической энергии менее 0,1 дБ/км;

4) оптическая вычислительная техника, включающая в себя системы оптической памяти и чисто оптические процессоры.

Одновременно происходит разработка и совершенствование существующих дискретных оптоэлектронных приборов: светодиодов, оптронов, полупроводниковых лазеров (фотоприемников, модуляторов и др.).

Разработка и внедрение в радиоэлектронную аппаратуру ОПТРОНОВ (приборов, в которых конструктивно объединены излучатель и фотоприемник, связанные между собой оптически и изолированные электрически) позволило завершить комплексную микроминиатюризацию аппаратуры. При этом оптроны выполняют не только функции реле, трансформаторов, потенциометров и других известных радиокомпонентов (на качественно более высоком уровне),

но и ряд новых схемотехнических функций. Многие оптоэлектронные приборы вообще не имеют аналогов в микроэлектронике. Таким образом, опто- и микроэлектроника не противоречат и не соперничают, а взаимно дополняют друг друга, неизмеримо расширяя возможности обработки информации как по объему, так и по скорости.

Совмещение в оптоэлектронных функциональных устройствах двух способов обработки и передачи информации - оптического и электрического - позволяет достигать огромного быстродействия, высокой плотности размещения хранимой информации, создание высокоэффективных средств отображения информации. Очень важным достоинством элементов оптоэлектроники является то, что они оптически связаны, а электрически изолированы между собой. Это обеспечивает надежное согласование различных оптоэлектронных цепей, содействует однонаправленности передачи информации, помехоустойчивости каналов передачи сигналов.

С оптоэлектроникой связаны новые принципы и методы работы и построения больших систем вычислительной техники, оптической связи, запоминания и обработки информации, не имеющих аналогов в традиционной радиоэлектронике. Сюда относятся машины с так называемой картинной логикой, сверхбыстродействующие вычислительные комплексы со скоростью обработки информации ($10^9 \dots 10^{11}$) с⁻¹, лазерное телевидение и т.д.

Изготовление полупроводниковых элементов оптоэлектроники - оптронов - совместимо с интегральной технологией, поэтому их создание может быть включено в единый технологический цикл производства интегральных микросхем.

Рассмотрим основные технические средства оптоэлектроники. Основным элементом оптоэлектроники является оптрон. Оптрон представляет собой четырехполюсник (рис. 1), состоящий из трех элементов:

- источника излучения (фотоизлучателя) 1;
- оптической среды (активной, либо пассивной) 2;
- приемника излучения (фотоприемника) 3.

Все элементы оптрона заключаются в герметичный светонепроницаемый корпус.

Сочетание фотоизлучателя и фотоприемника в оптроне получило название

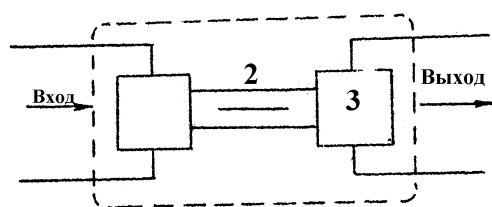


Рис. 1

оптоэлектронной пары. Наиболее распространенными излучателями являются полупроводниковые светодиоды. Они имеют высокое быстродействие (порядка 0,5 мкс), миниатюрны и надежны в работе. Спектральные характеристики фотоизлучателя должны быть согласованы с фотоприемниками. Поскольку

схемотехнические возможности оптрона определяются главным образом характеристиками фотоприемника, этот элемент и дает название оптрона в целом. К основным разновидностям оптронов относятся:

- резисторные (фотоприемником служит фоторезистор);
- диодные (фотоприемник - фотодиод);
- транзисторные (фотоприемник - фототранзистор);

- тиристорные (фотоприемник - фототиристор).

В данной работе рассматривается работа диодного оптрона, схематическое изображение которого показано на рис. 2.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СВЕТОДИОДОВ

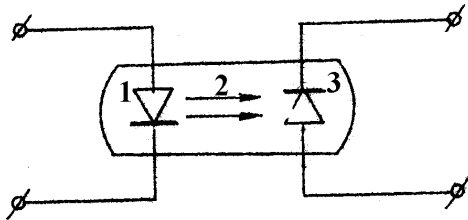


Рис. 2

Традиционные (в быту) источники некогерентного оптического излучения: накаливающие и газоразрядные лампочки не могут быть использованы в современных оптоэлектронных приборах, так как они не удовлетворяют требованиям по быстродействию, потребляемой мощности, надежности, габаритам, совместимости с

микроэлектронными приборами. Этим требованиям удовлетворяют лишь полупроводниковые светоизлучающие диоды (светодиоды), характеризующиеся высокой эффективностью прямого преобразования электрической энергии в световую, надежностью и большим сроком службы, высоким быстродействием, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям.

Светодиодом называется полупроводниковый диод с *p-n*-переходом, выполняющий функции преобразования электрических информационных сигналов в оптические на основе инжекционной электролюминесценции. В оптоэлектронике светодиоды являются основными источниками некогерентного излучения видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов спектра (с длиной волны от 400 нм до 2 мкм). Они широко используются в составе оптронов, волоконно-оптических линий связи, в датчиках, фотоэлектрических устройствах автоматики и контроля окружающей среды, индикаторах и других устройствах.

Люминесценция - это излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний. Люминесценция, в отличие от теплового излучения, может наблюдаться при любой температуре. Если тепловое излучение испускается за счет внутренней энергии вещества, то люминесценция всегда возбуждается внешними источниками энергии (электрическим полем или током, потоком электронов, воздействием света, химической реакцией и др.). В светодиодах люминесценция возбуждается за счет энергии инжектированных *p-n*-переходом носителей заряда в активную область (базу) диода.

Инжекция (проникновение неравновесных (избыточных) носителей заряда в область базы светодиода под действием электрического поля) происходит при прямом смещении *p-n*-перехода. При рекомбинации части этих неравновесных носителей заряда возникает некогерентное оптическое излучение с узким спектром. Другая часть инжектированных носителей рекомбинирует безызлучательно. Для того, чтобы большая часть носителей заряда рекомбинировала с излучением света, материал светодиода должен быть достаточно широкозонным (с шириной запрещенной зоны более 1,5 эВ), содержать минимальное количество структурных дефектов и быть "прямозонным" - минимум энергии

электронов в зоне проводимости должен совпадать с максимумом их энергии в валентной зоне в функции импульса (точнее - квазиимпульса) электрона в кристаллической решетке. В таких материалах квантовые переходы с излучением или поглощением света происходят без изменения импульса электрона для выполнения закона сохранения импульса (так как импульс фотона пренебрежимо мал по сравнению с импульсом электрона). До и после перехода импульс электрона равен нулю (если условно начало отсчета энергии и квазиимпульса совместить с основным, стационарным состоянием электрона в атоме). Типичными прямозонными полупроводниками являются *GaAs*, *InSb*, *InAs*, некоторые составы твердых растворов двойных соединений элементов III и V групп (A^3B^5): *GaAlAs*, *GaAsP*, *InGaAsP*, большинство соединений типа A^2B^6 (*ZnS*, *ZnSe*, *ZnTe*, *CdS*, *CdTe*), а также ряд других двойных соединений (*PbS*, *PbSe*, *PbTe*).

Вероятность излучательной рекомбинации, очень низкая в непрямозонных полупроводниках (например, *GaP*), может резко возрасти при образовании в них изоэлектронных (электрически нейтральных) "ловушек" носителей заряда. В *GaP* такие ловушки образуются путем легирования кристалла азотом (замещающим в решетке атом фосфора) или одновременно кислородом и цинком. После связывания пары носителей заряда на таком центре (ловушке) они рекомбинируют излучательно, а избыток импульса электрона передается этому центру. Энергия кванта света при таком переходе отличается от ширины запрещенной зоны (меньше ее) на величину энергии связи носителей заряда на ловушке. Светодиоды на фосфиде галлия, легированном азотом, излучают зеленый свет, а легированные цинком и кислородом - красный свет. Наиболее распространенным современным материалом для светодиодов является твердый раствор *GaAsP*, в котором, изменяя соотношение концентраций мышьяка и фосфора, можно менять ширину запрещенной зоны, а следовательно и цвет свечения - от красного до желто-зеленого. Светодиоды с цветом свечения от голубого до фиолетового создают на основе карбида кремния (*SiC*).

Максимальный КПД светодиодов (отношение мощности оптического излучения к потребляемой электрической мощности) не превышает 10...15% для источников видимого света и 20% - для ИК-излучателей, даже в том случае, когда каждый инжектированный электрон при рекомбинации "родит" квант света. Потери оптической энергии внутри кристалла светодиода обусловлены, в основном, самопоглощением излучения в том же кристалле или в подложке, а также явлением полного внутреннего отражения света на границе раздела кристалла с воздухом.

Для снижения самопоглощения света принимают ряд технологических приемов: создают многослойную структуру кристалла, обеспечивающую "многoproходность" (многократное отражение света, генерированного внутри кристалла, от его тылового контакта - т.е. со стороны, противоположной выходу света) и "переизлучение" (повторную излучательную рекомбинацию носителей заряда, образованных в результате поглощения света внутри кристалла). Для уменьшения доли отраженного от поверхности кристалла света и увеличения предельного угла полного внутреннего отражения кристалл заливают прозрачным полимерным компаундом, имеющим наружную сферическую поверхность.

Такая пластмассовая линза, имеющая показатель преломления промежуточный между кристаллом и воздухом, снижает потери на внутреннее отражение, обеспечивает некоторую фокусировку света в направлении нормали к поверхности кристалла и защищает кристалл от внешних воздействий климатических и механических). Для улучшения характеристик направленности излучения кристалл помещают также в конический отражатель.

К важнейшим эксплуатационным параметрам светодиодов относятся:

- 1) сила света (в канделах) для источников видимого света и мощность излучения для ИК-излучателей при заданном значении прямого тока (обычно 10...20 мА);
- 2) постоянное прямое напряжение при максимально допустимом прямом токе (обычно прямое напряжение не превышает 1...2 В);
- 3) длина волны света (или ИК-излучения) в максимуме спектральной полосы, а также "полуширина" спектральной полосы, измеренная на уровне половины высоты спектрального пика;
- 4) рабочий температурный диапазон (обычно от -60 °С до +80 °С);
- 5) угол излучения (в стерadianах), в котором сосредоточена большая часть излучаемой энергии;
- 6) импульсные характеристики: времена нарастания и спада импульса излучения при возбуждении светодиода прямоугольными импульсами тока (обычно задаются только для ИК-излучателей, входящих в состав оптронов или волоконно-оптических линий связи).

В технических условиях (ТУ) на каждый тип светодиода приводятся также их вольтамперные и люмен-амперные характеристики (последние представляют собой зависимость мощности излучения (или силы света) от прямого тока в рабочем диапазоне температур). В ТУ указаны и предельно допустимые уровни, как рассеиваемой электрической мощности, так и внешних воздействий (климатических, механических и радиационных).

Светоизлучающие диоды или светодиоды - это полупроводниковые диоды, преобразующие электрическую энергию в энергию оптического излучения на основе явления инжекционной люминесценции, происходящей в полупроводниковом кристалле с электронно-дырочным переходом, гетеропереходом, либо контактом металл-полупроводник.

Светодиодом называют излучающий полупроводниковый прибор с одним электронно-дырочным переходом, предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.

При пропускании в светодиоде постоянного тока в прямом направлении (прямое смещение) в *p-n*-переход инжектируются избыточные носители тока - электроны и дырки. При рекомбинации части этих неравновесных носителей заряда (электронов и дырок в *p-n*-переходе) возникает оптическое некогерентное излучение с узким спектром. Другая часть инжектированных носителей заряда рекомбинирует безызлучательно. Для изготовления светодиодов используются полупроводниковые материалы, такие как арсенид галлия (*GaAs*), арсенид алю-

миния (*AlAs*), фосфид индия (*InP*) и их твердые растворы. В зависимости от ширины запрещенной зоны полупроводника излучение может лежать в инфракрасной, видимой или в ультрафиолетовой областях спектра. Наибольшее распространение получили светодиоды, излучающие желтый, красный и зеленый свет.

Связь длины волны λ с шириной запрещенной зоны ΔE определяется соотношением

$$\Delta E = \frac{1,24}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ - выражается в мкм; ΔE - в эВ. Оптический диапазон спектра составляет электромагнитные волны с длиной волны от 1 мм до 1 нм. КПД светодиодов видимого излучения составляет от 0,01 до 10... 15 %.

В светодиодах с целью понижения потерь на полное внутреннее отражение и поглощение в теле кристалла для последнего выбирают полусферическую форму, а для улучшения их характеристик направленности излучения светодиод помещают в параболический или конический отражатель. КПД светодиода с полусферической формой кристалла достигает 40 %. Свойства и эффективность, работы светодиодов характеризуется совокупностью электрических, световых и эксплуатационных параметров. Важнейшие из них:

- 1) постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при максимально допустимом токе; величина $U_{пр}$ для большинства светодиодов не превышает единиц вольт;
- 2) яркость свечения диода B (кД/м²) при максимально допустимом прямом токе $I_{пр.мах}$. Яркость большинства светодиодов находится на уровне $10^3...10^5$ Кд/м². Значение $I_{пр.мах}$ имеет величину порядка единиц-десятков миллиампер;
- 3) Полная мощность излучения $P_{полн}$ равна десятым долям милливатта;
- 4) спектральная характеристика излучения, представляющая собой зависимость относительной мощности излучения $P/P_{полн}$ от длины волны излучения;
- 5) характеристика направленности, определяющая величину интенсивности светового излучения в зависимости от направления излучения.

Масса прибора не превышает долей грамма. Температурный диапазон: -60 °С...+70 °С.

В настоящее время промышленность выпускает дискретные и интегральные (многоэлементные) светодиоды. Они находят применение в качестве сигнальных индикаторов. Интегральные светодиоды применяются в различных системах отображения информации, при изготовлении цветных шкал, табло и экранов. Светодиоды применяются при изготовлении устройств оптической локации, оптической связи, светодальномерах и т.д.

В ряде областей светодиоды конкурируют с родственным им прибором - инжекционным лазером, который в отличие от светодиода генерирует когерентное излучение.

Таким образом, светодиоды являются важнейшими элементами оптоэлектроники.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ФОТОДИОДОВ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ

В основе работы любого фотоэлектрического устройства лежит элемент, электрические параметры которого изменяются под действием освещения. Одним из элементов такого рода является фотодиод.

Фотодиод представляет собой p - n -переход, в котором используется эффект разделения неравновесных носителей заряда на границе p - n -перехода при воздействии на фотодиод света. Различают два режима работы фотодиодов:

- а) вентильный;
- б) фотодиодный.

ВЕНТИЛЬНЫЙ РЕЖИМ

Вентильный режим характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи фотодиода. В отсутствие смещения между p - и n -областями существует потенциальный барьер, энергетическая диаграмма которого представлена на рис. 3.

В области p - n -перехода имеется область объемного заряда, в которой существует электрическое поле. Это приводит к тому, что без внешнего электрического смещения электронно-дырочные пары, возникшие под действием света в области объемного заряда, будут разделяться внутренним полем: дырки будут выбрасываться в p -область и создавать там избыточный положительный заряд; электроны перемещаться в n -область и создавать отрицательный заряд. Между p - и n -областями элемента возникает разность потенциалов U_ϕ .

Энергетическая диаграмма p - n -фотодиода при освещении в отсутствие внешнего источника напряжения приведена на рис. 4.

Если через соответствующие контакты соединить друг с другом n - и p -области через сопротивление нагрузки R_H , то во внешней цепи потечет ток, направленный от p -области к n -области, - фототок.

Фототок I_f , протекающий через сопротивление нагрузки R_H (этим сопротивлением может быть заряжаемый аккумулятор, двигатель, нагревательный

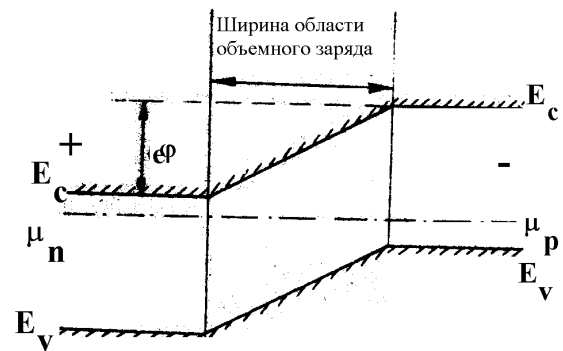


Рис. 3

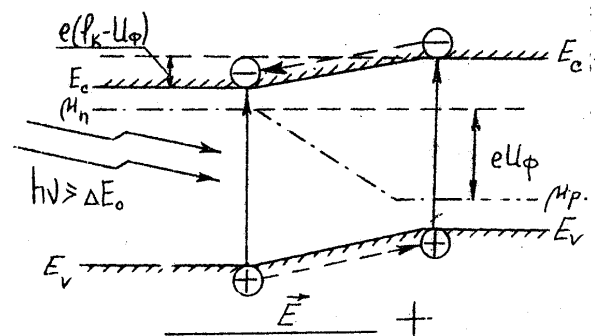


Рис. 4

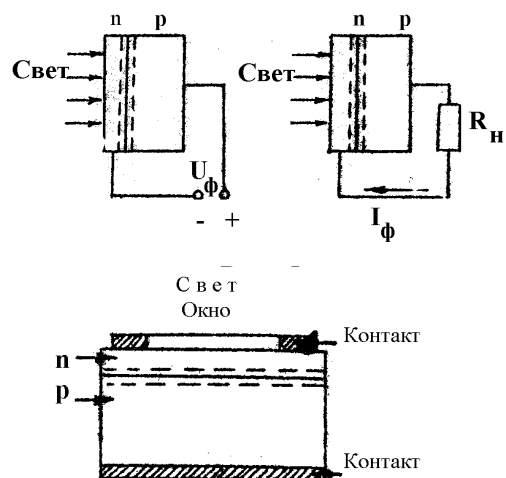


Рис. 6

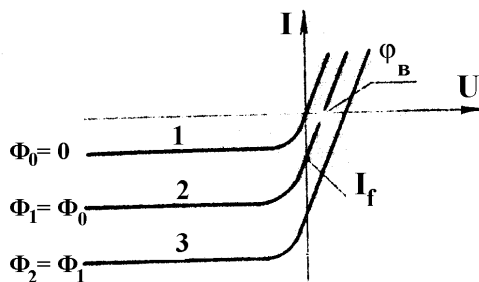


Рис. 7

элемент и т.д.), совершает полезную работу. Энергия света преобразовалась в электрическую энергию. Описываемые процессы схематически показаны на рис. 5.

На рис. 6 показана типичная конструкция фотодиода. Внешний контакт выполнен в форме кольца. Область p - n -перехода внутри кольца, так называемое окно, доступна для света. В фотодиоде плоскость p - n -перехода располагается

близко к поверхности кристалла (на расстоянии порядка единиц микрометра). Такой p - n -переход можно изготовить методом диффузии или ионной имплантации.

При такой конструкции подавляющая часть неравновесных носителей заряда - электронов и дырок, возникающих под действием света не успевает прорекомбинировать, диффундирует до границы p - n -перехода и разделяется полем p - n -перехода. В этом случае вольтметр, подключенный непосредственно к фотодиоду, определяет вентильную фотоЭДС. Если к фотодиоду непосредственно подключен амперметр, то он определит ток короткого замыкания I_f в вентильном режиме.

На рис. 7 изображены вольт-амперные характеристики фотодиода и значения тока короткого замыкания I_f , вентильной фотоЭДС - Φ_v для одной из характеристик (кривая 2, выделенные точки).

ФОТОДИОДНЫЙ РЕЖИМ

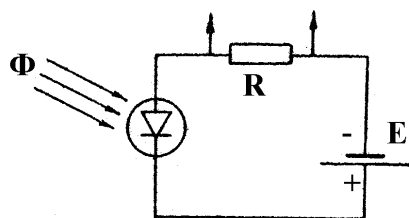


Рис. 8

Фотодиодный режим характеризуется наличием обратного напряжения на переходе. На рис. 8 показано подключение фотодиода в электрическую цепь. Энергетическая диаграмма при таком включении изображена на рис. 9.

Без освещения генерационный ток p - n -перехода (так называемый темновой ток) определяется числом электронов и дырок, возникающих в области объемного заряда за счет тепловой генерации. При освещении обратно смещенного перехода светом с энергией $h\nu > \Delta E$, где ΔE - ширина запрещенной зоны, ток через переход увеличивается. Возникающий под действием света фототок во столько раз больше темнового, во сколько раз число носителей, создаваемых в области объемного заряда светом, будет больше, чем число электронов и дырок, возникающих за счет тепловой генерации.

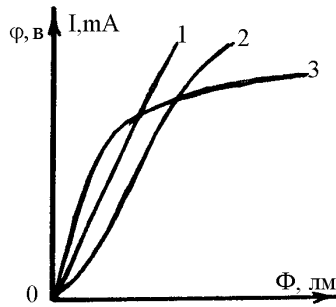


Рис. 10

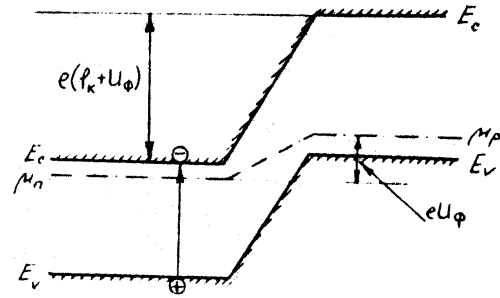


Рис. 9

Величина обратного напряжения $U_{обр}$, прикладываемого к p - n -переходу, составляет обычно 10...30 В. С увеличением обратного напряжения область объемного заряда расширяется. Величина $U_{обр}$ и концентрация примеси в слабо легированной n -области кристалла выбираются такими, чтобы практически весь световой поток, падающий на поверхность фотодиода, поглотился в области объемного заряда и дал вклад в фототок. Обычно необходимая для этого толщина обедненной области составляет несколько микрон.

Зависимость тока от освещенности образца (фотодиода) называется люкс-амперной (световой) характеристикой прибора. В фотодиодном режиме она линейна в большом диапазоне световых потоков (рис. 10, кривая 1). В режиме короткого замыкания световая характеристика нелинейна (рис. 10, кривая 2).

Важными характеристиками фотодиода являются его спектральная и интегральная чувствительности. Чувствительностью называется физическая величина, равная отношению фототока к величине светового потока. По определению

$$\gamma = \frac{i}{\Phi}; \quad i' = i - i_0, \quad (2)$$

где i' - фототок; Φ - величина светового потока; i_0 - ток фотодиода при выключенном осветителе (темновой ток); i - ток фотодиода.

Как и для любых оптических приборов различают спектральную и интегральную чувствительность. Так как освещенность фотодиода определяется отношением светового потока к освещаемой площади, то

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (3)$$

где E - освещенность, лк (люкс); Φ - световой поток, лм (люмен); S - освещаемая площадь, m^2 . При этом освещенность связана с силой света источника следующим выражением

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (4)$$

где E - освещенность, лк; I - сила света, кд (кандела); r - расстояние от источника до фотодиода, м.

Подставляя (3) и (4) в (2), получаем выражение для определения интегральной чувствительности

$$\gamma = \frac{i' r_0^2}{IS}. \quad (5)$$

Следует указать, что фотодиодный режим имеет ряд преимуществ перед вентильным режимом: большая чувствительность, меньшая инерционность. Промышленностью в настоящее время выпускаются несколько типов фотодиодов на основе *Ge*, *Si*, а также на основе полупроводниковых соединений двойного (*GaAs*, *InAs*, *GaP* и др.) и тройного составов (*GaInAs*, *GaAlAs* и др.). Фотодиод, изготовленный из определенного материала, способен эффективно реагировать на свет с длиной волны, лежащей только в определенном диапазоне. Это свойство фотодиодов называют селективностью. Область максимальной фоточувствительности диодов определяется шириной запрещенной зоны полупроводника и соответствует условию

$$E_{\phi} \geq \Delta E. \quad (6)$$

Полупроводники с небольшой шириной запрещенной зоны, так называемые узкозонные полупроводники, используются для создания фотодиодов, чувствительных к свету с малой энергией квантов. Полупроводники с большой шириной запрещенной зоны (широкозонные полупроводники) используются для создания приемников ультрафиолетового света.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

УПРАЖНЕНИЕ 1

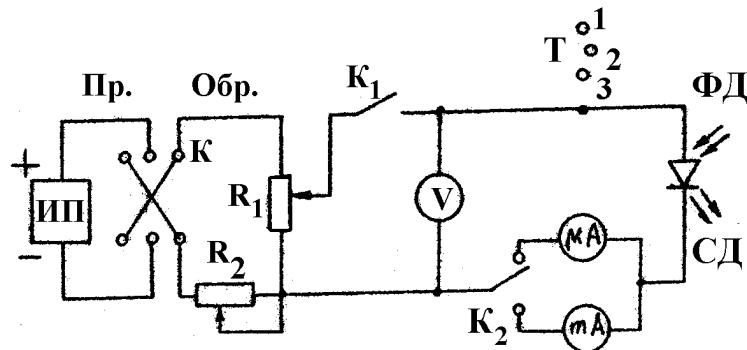


Рис. 11

1. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 11.
2. Переключатель К поставить в положение "Пр" (прямое смещение).
3. Включить миллиамперметр ключом К₂ (нижнее положение). Установить пределы миллиамперметра в положение 15 мА.
4. Включить в цепь светодиода СД₁ переключателем Т (положение 2).
5. Установить реостатом нулевое смещение (рукоятка реостата против часовой стрелки до упора).
6. Снять вольт-амперную характеристику светодиода СД₁. Ток изменять в пределах 0,5 мА от 0 до 7...8 мА. Измерения проводить при прямом смещении для прямого тока.
7. Наблюдать за процессом свечения светодиода. Результаты экспериментальных исследований занести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты экспериментальных исследований светодиодов

Ток I , мА	0,25	0,5	1,0	1,5	...	5,5	6,0
Напряжение U , В							

Цвет излучения светодиода: _____

Длина волны излучения: _____

Установить переключатель Т в положение 3. При этом в схеме подключается светодиод СД2. Провести съемку вольт-амперной характеристики светодиода СД2 в соответствии с п.п. 5, 6.

8. Построить вольт-амперные характеристики светодиодов.

9. По формуле (6) оценить ширину запрещенной зоны для исследуемых светодиодов:

- длина волны красного излучения - 0,7 мкм;
- длина волны зеленого излучения - 0,5 мкм;
- длина волны желтого излучения - 0,6 мкм.

10. По вольт-амперной характеристике определить величину контактной разности потенциалов для исследуемых светодиодов. Величина контактной разности потенциалов ϕ_k может быть определена, если провести касательную на линейном участке ВАХ прямой ветви до пересечения с осью напряжения (рис. 12). Значение ϕ_k служит для приближенной оценки ширины запрещенной зоны полупроводника.

11. Оценить положение уровня Ферми в приближении одинакового легирования p - и n -типов полупроводников светодиода.

12. Изобразить в масштабе энергетическую диаграмму p - n -перехода светодиода в отсутствие смещения.

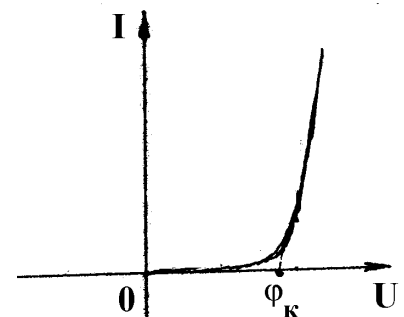


Рис. 12

УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 11.
2. Снять световую характеристику фотодиода в режиме короткого замыкания. Для этого переключатель К поставить в нейтральное положение, включить ключ K_1 (нижнее положение). Включить микроамперметр ключом K_2 (верхнее положение), сопротивление R_1 в нижнее положение (закоротить фотодиод).
3. Не включая источник света, определить нулевой ток фотодиода i_0 . Установить источник света на расстоянии 25...30 см от фотодиода.
4. Открыть колпачок фотодиода и измерить по микроамперметру величину тока короткого замыкания фотодиода i . Сила фототока, создаваемого источником света равна $i^{\wedge} = i - i_0$.

Результаты измерений записать в табл. 2.

Результаты экспериментальных исследований вентильного режима

Расстояние, м	0,25	0,30	0,35	0,40
Ток короткого замыкания, i , мкА				
Темновой ток, i_0 , мкА				
Фототок, i , мкА				
Сила света лампочки, I , кд				
Освещаемая площадь фотодиода S , м ²				

5. Определить по формуле (5) интегральную чувствительность фотодиода при различных освещенностях и построить зависимость чувствительности фотодиода от освещенности в вентильном режиме.

6. Снять вольт-амперную характеристику фотодиода в фотодиодном режиме при различных освещенностях фотодиода, для этого:

- включить обратное смещение. Ключ К поставить в положение "Обр";
- включить микроамперметр ключом K_2 (верхнее положение);
- реостатом R_1 изменить напряжение от 0 до 5...6 В, определяя при этом ток через микроамперметр. Результаты экспериментальных измерений занести в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты экспериментальных исследований фотодиодного режима

Напряжение U , В		0	0,5	...	5,5	6,0
Расстояние 25см	Ток, мкА					
Расстояние 30см	Ток, мкА					
Расстояние 35см	Ток, мкА					
Расстояние 40см	Ток, мкА					
Чувствительность, мкА/лм						

7. Построить вольт-амперные характеристики фотодиода в фотодиодном режиме при различных освещенностях.

8. По указанию преподавателя рассчитать интегральную чувствительность фотодиода при определенном значении освещенности и построить зависимость интегральной чувствительности от приложенного напряжения. Сравнить интегральную чувствительность в вентильном и фотодиодном режимах.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип работы фотодиода, светодиода.
2. Объясните методику определения ширины запрещенной зоны материалов светодиода.
3. Нарисуйте энергетическую диаграмму n - p -перехода в светодиоде.
4. Сформулируйте определение уровня Ферми.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 17

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОДИОДНОГО ОПТРОНА И ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение устройства, принципа действия и основных характеристик фотодиодного оптрона. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. - М.: Радио и связь, 1989. - 360 с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т. 3. - М.: Наука, 1989. - 304 с.
3. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - М.: Высш. шк., 1977. - 288 с.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.
5. Практикум по твердотельной электронике / Под ред. В.И. Петрова, Г.В. Спивака. - М.: Изд-во МГУ, 1984. - 390 с.
6. Мухин Ю.А. Учебное пособие по курсу оптоэлектроники. Лабораторные работы. - М.: Изд-во МЭИ, 1979. - 79 с.
7. Герщунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники. - Киев: Выща школа, 1987. - 456 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Оптоэлектроника - это область электроники, охватывающая проблему одновременного использования оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации. Оптоэлектроника отличается от вакуумной и полупроводниковой электроники наличием оптической связи. Таким образом, сущность оптоэлектроники состоит в замене электрической связи оптической.

Основным элементом оптоэлектроники является оптрон. Простейший оптрон представляет собой четырехполюсник (рис. 1), состоящий из трех элементов:

- источника излучения (фотоизлучателя) 1;
- световода 2;
- приемника излучения (фотоприемника) 3.

Все элементы заключены в герметичный светонепроницаемый корпус.

Сочетание фотоизлучателя и фотоприемника в оптроне получило название оптоэлектронной пары. Наиболее распространенными излучателями являются светодиоды, выполненные на основе арсенида галлия ($GaAs$), фосфида галлия (GaP), арсенида индия ($InAs$), арсенида алюминия ($AlAs$), фосфида индия (InP) и их твердых растворов.

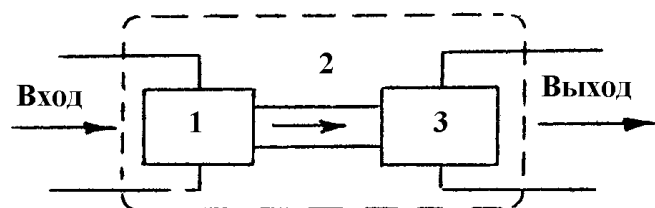


Рис. 1

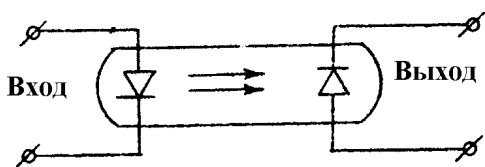


Рис. 2

По своим спектральным характеристикам светодиоды хорошо согласуются с фотоприемниками, выполненными на основе кремния.

Схемотехнические возможности оптрона определяются главным образом характеристиками фотоприемника. Поэтому вид фотоприемника дает название оптрона в целом. К основным разновидностям оптронов относятся:

- резисторные (фотоприемником служит фоторезистор);
- диодные (фотоприемник - фотодиод);
- транзисторные (фотоприемник - фототранзистор);
- тиристорные (фотоприемник - фототиристор).

В зависимости от совокупности характеристик используемой оптронной пары оптрон может выполнять различные функции в электронных цепях: переключение, усиление, согласование, преобразование сигнала, индикация и др.

Целью настоящей работы является исследование работы фотодиодного оптрона, схематическое изображение которого показано на рис. 2.

Простейшая схема включения фотодиодного оптрона показана на рис. 3. Эта схема может работать в ключевом (импульсном режиме) и при этом создавать на выходе импульсное напряжение, превышающее по своей амплитуде уровень управляющих входных импульсов. В приведенной схеме оптрон используется в качестве управляемого делителя напряжения. Фотодиод включается последовательно с сопротивлением нагрузки - R_n в выходную электрическую цепь, содержащую источник питания относительно высокого напряжения (10...20 В).

При отсутствии управляющего импульса на светодиоде излучение отсутствует. В этом состоянии сопротивление фотодиода велико и ток в выходной цепи мал; следовательно сигнал, снимаемый с сопротивления нагрузки R_n мал ($U_{\text{вых}} = IR_n$). Под воздействием управляющего входного импульса напряжения $U_{\text{вх}}$ изменяется прямой ток светодиода и его излучение. Излучение светодиода попадает на фотодиод, в результате чего сопротивление его резко падает. Это приводит к резкому возрастанию тока в выходной цепи и возрастанию сигнала, снимаемого с сопротивления нагрузки R_n . При этом амплитуда входных импульсов, воздействующих на фотодиод, может быть значительно меньше, чем напряжение $U_{\text{вых}}$. Аналогичным способом могут быть построены ключевые схемы на транзисторных и тиристорных оптронах.

Совмещение в оптронах двух способов обработки и передачи информации - оптического и электрического - позволяет достигать огромного быстродействия, высокой плотности размещения хранимой информации, создания высокоэффективных средств отображения информации. Очень важным достоинством оптронов является то, что они оптически связаны, а электрически изолированы между собой. Это обеспечивает надежное согласование раз-

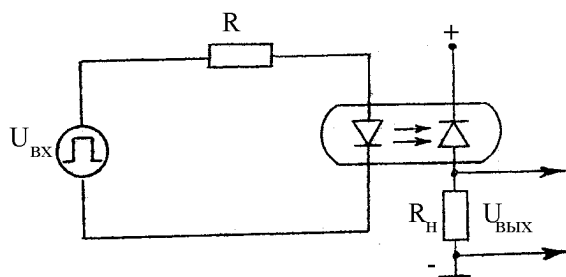


Рис. 3

ствия, высокой плотности размещения хранимой информации, создания высокоэффективных средств отображения информации. Очень важным достоинством оптронов является то, что они оптически связаны, а электрически изолированы между собой. Это обеспечивает надежное согласование раз-

личных оптоэлектронных цепей, способствует однонаправленности передачи информации, помехоустойчивости каналов передачи сигналов.

С оптоэлектроникой связаны новые принципы и методы работы и построение больших систем вычислительной техники, оптической связи, запоминания и обработки информации, не имеющих аналогов в традиционной радиоэлектронике. Сюда относятся машины с так называемой картинной логикой, сверхбыстродействующие вычислительные комплексы со скоростью обработки информации $10^9 \dots 10^{11}$ операций в секунду, устройства памяти большой емкости ($10^{10} \dots 10^{12}$ битов), лазерное телевидение и т.д.

Изготовление светодиодов и фотоприемников совместимо с интегральной технологией. В настоящее время созданы оптоэлектронные интегральные схемы, в которых на основе соединений A^3B^5 и их твердых растворов, на общей подложке и в едином технологическом цикле создаются интегрированные модули, содержащие как оптоэлектронные элементы, так и "обычные" интегральные схемы. В тоже время недостатком оптронов является так называемая "этажерочная" конструкция, несовместимая с планарной технологией.

Наиболее широкое применение в современной оптоэлектронике получили оптроны, содержащие ИК-излучающий диод (инфракрасное излучение - ИК) на основе арсенида галлия ($GaAs$) или тройного полупроводникового соединения $GaAlAs$ и кремниевый фотодиод. Такие приборы характеризуются высоким быстродействием, линейностью передаточной характеристики, т.е. зависимостью выходного сигнала от входного, хорошее согласование спектральных характеристик излучателя и приемника.

Принцип работы светодиода основан на преобразовании в полупроводниковом диоде электрической энергии непосредственно в энергию оптического излучения. При пропускании в светодиоде постоянного тока в прямом направлении (прямое смещение) в p - n -переход инжектируются избыточные носители заряда - электроны и дырки. При рекомбинации электронов и дырок возникает оптическое некогерентное излучение с узким спектром.

Принцип работы полупроводниковых фотоприемников, в том числе фотодиодов (ФД), основан на явления внутреннего фотоэффекта - возникновении неравновесных носителей заряда - электронно-дырочных пар при воздействии оптического излучения и увеличении проводимости полупроводников (фотопроводимости). Оптическая среда, заключенная между излучателем и фотоприемником имеет следующее назначение:

- свести к минимуму потери передачи оптической энергии от излучателя к фотоприемнику;
- обеспечить высокое значение параметров электрической развязки (сопротивления изоляции, пробивного напряжения, проходной емкости);
- создать конструктивно целостный прибор, устойчивый к воздействию эксплуатационных нагрузок (механических, климатических и других факторов).

В качестве оптической среды обычно используются полимерные клеи и лаки, а также отрезки волоконных световодов и воздушные промежутки.

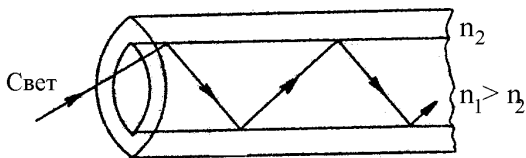


Рис. 4

электрический сигнал. Потери энергии при таком преобразовании характеризуются основным параметром оптрона - коэффициентом передачи K , который равен отношению выходного тока к входному

$$K = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad (1)$$

Наиболее эффективно связь между передатчиком и приемником осуществляется с помощью специального световода - волоконно-оптического кабеля, обеспечивающего помехоустойчивость и надежность связи. Широкополосность такого, оптического канала огромная. Подобные линии связи могут быть использованы в вычислительной технике для передачи огромных массивов информации, обрабатываемой в различных блоках ЭВМ. Передача света по волоконно-оптическим световодам основана на использовании эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред с разными показателями преломления. При углах падения больше предельного луч света полностью отражается от поверхности раздела сред. В световом волноводе используется именно это явление: луч, последовательно отражаясь от стенок волновода, распространяется в заданном направлении. В волоконно-оптических световодах используется двухслойное волокно. Оно состоит из "сердцевинки" (внутренней жилы) с показателем преломления n_1 и оболочки с показателем преломления n_2 . Внутренняя жила оптически более плотная, чем оболочка ($n_1 > n_2$); в этом случае легко выполняется условие полного внутреннего отражения: при падении световой волны на границу оболочки вся ее энергия отражается внутрь "сердцевинки" (рис. 4).

Обычно внутренняя (световедущая) жила изготавливается из чистого кварца, а светоотражающая оболочка - из кварца, легированного бором. Диаметр внутренней жилы световода обычно не превышает десятков микрон, диаметр оболочки - 100 мкм. Такие световоды отличаются высокой прочностью и в тоже время устойчивы к изгибам и скручиванию. Световоды могут объединяться в кабели, содержащие до нескольких сот двухслойных волокон.

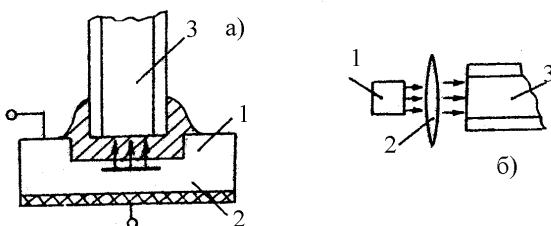


Рис. 5

Сложную задачу представляет собой ввод излучения в световод от светоизлучающих диодов, в особенности от светодиодов с широкой диаграммой направленности. В этом случае световедущая сердцевина волокна размещается непосредственно под активной областью светодиода (рис. 5, а). Эффективность ввода может

быть повышена с помощью специальных фокусирующих линзовых систем (рис. 5, б), однако это существенно усложняет конструкцию устройства ввода.

Диодные оптроны имеют низкие коэффициенты передачи, равные 1...5 %. Однако этот недостаток может быть компенсирован включением в схему оптрона внешнего усилителя, часто изготавливаемого на одной подложке с кремниевым фотодиодом, в едином технологическом цикле. Такие приборы относят к классу интегральных микросхем. Широкое распространение получили также оптроны, в которых используются фотоприемники с внутренним усилением - лавинные фотодиоды, фототиристоры, фототранзисторы и другие.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает серийно более 50 различных типов оптронов с объемом производства более 10 млн штук в год. Оptronная техника бурно развивается, порождая качественно новые приборы и целые технологические направления.

4. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки для снятия переходной характеристики и оценки времени жизни неравновесных носителей заряда показана на рис. 6.

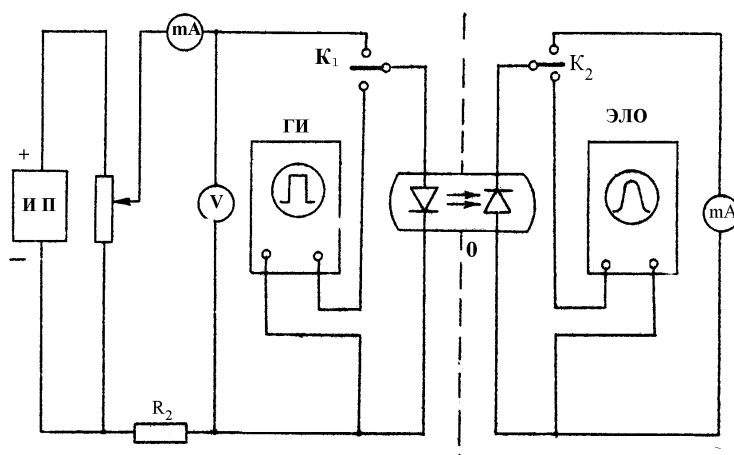


Рис. 6

Для изучения переходной характеристики используется часть схемы при верхнем положении переключателей K_1 и K_2 . Входной ток измеряется миллиамперметром до 15 мА, выходной ток - миллиамперметром, включенным на выход фотодиода оптрона с пределами измерения 0,3...0,6 мА.

Для оценки времени жизни ключи K_1 и K_2 переключаются в нижнее положение. При этом генератор прямоугольных импульсов ГИ подключается к светодиоду оптрона, а осциллограф ЭЛО к выходу фотодиода оптрона. Частота и длительность импульсов составляют соответственно 10 кГц и 20 мкс.

На рис. 7 показаны диаграммы переходных процессов в оптроне. Расчеты показывают, что вентильная фотоЭДС может быть определена по формуле

$$\varphi_v = \varphi_T \ln\left(\frac{I_f}{I_s} + 1\right), \quad (2)$$

где φ_v - вентильная фотоЭДС; $\varphi_T = kT/e$ - равная, примерно для комнатной температуры 0,025 эВ; I_f - ток короткого замыкания фотодиода оптрона; I_s - ток насыщения при обратном смещении.

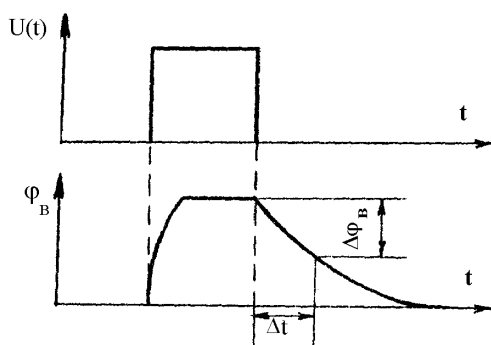


Рис. 7

В вентильном режиме спад фототока можно описать уравнением

$$I(t) = I_f e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

где $I(t)$ - ток в момент времени t ; τ - время жизни носителей заряда.

Подставляя (3) в (2), получаем следующее выражение для определения времени жизни носителей заряда

$$\tau = \Phi_{\tau} \frac{\Delta t}{\Delta \Phi_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где Δt - время, в течение которого вентильная фотоЭДС изменилась на величину $\Delta \Phi_{\text{в}}$.

Следует обратить внимание, что определение времени Δt и $\Delta \Phi_{\text{в}}$ необходимо производить на линейном участке спада зависимости вентильной фотоЭДС от времени.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему, показанную на рисунке 6.
2. Снять переходную характеристику оптрона.
 - 2.1. Переключатели K_1 и K_2 поставить в верхнее положение.
 - 2.2. Включить источник постоянного тока ИП.
 - 2.3. Увеличивая напряжение потенциометром R_1 , снять зависимость входного и выходного тока от входного напряжения. Входной ток изменять от 0 до 15 мА.

Результаты измерений записать в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные результаты ВАХ светодиода
и переходной характеристики оптрона

Входной ток	$I_{\text{вх}}, \text{ мА}$	0	1	2	...	15
Входное напряжение	$U, \text{ В}$					
Выходной ток	$I_{\text{вых}}, \text{ мА}$					
Коэффициент передачи	$K = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$					

2.4. Построить входную вольт-амперную характеристику светодиода оптрона $I_{\text{вх}} = f(U)$. По характеристике определить величину контактной разности потенциалов.

2.5. Построить переходную характеристику оптрона $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$.

2.6. Вычислить для измеренных значений входного и выходного токов коэффициент передачи $K = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$. Результаты занести в табл. 1.

3. Определить время жизни носителей заряда.

3.1. Переключатели K_1 и K_2 поставить в нижнее положение.

3.2. Включить генератор пилообразных напряжений и осциллограф ЭЛО. Установить частоту 10 кГц, длительность импульсов - 10 мкс, выходное напряжение на генераторе - 15...20 В.

Посмотреть на осциллографе форму сигнала генератора импульсов. Для этого вход осциллографа подключить к выходу генератора.

3.3. Подключить генератор ГИ и осциллограф ЭЛО в соответствие со схемой рис. 2.

3.4. Зарисовать кривую релаксации фотоЭДС. По наклону кривой и формуле (4) оценить время жизни носителей заряда.

4. Сделать краткие выводы по работе.

5. Закончив работу, выключите приборы!

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите принцип работы оптрона.

2. Поясните принцип работы фотодиода и светодиода.

3. Объясните применение оптронов в технике.

4. В чем заключается методика определения времени жизни неравновесных носителей заряда.

5. Объясните причину низкого значения коэффициента передачи оптрона.

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОДИОДОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование основных характеристик и параметров магнитодиодов.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов. радио, 1980. - 262 с.
3. Егиазарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. - М.: Радио и связь, 1997. - 88 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

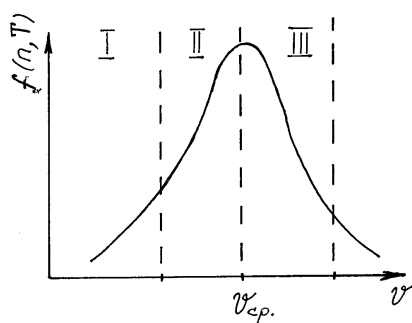


Рис. 1

Магнитодиоды - это полупроводниковые приборы, которые под воздействием магнитного поля изменяют свое электрическое сопротивление.

В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, при прохождении электрического тока на носители действует сила Лоренца, искривляющая их линии тока. Если в полупроводнике один вид носителей, то тогда в нем возникает поперечное электрическое поле - поле Холла. Величина этого поля такова, чтобы точно скомпенсировать действие на

носители силы Лоренца: линии тока должны быть параллельны граням образца. Это условие вытекает из требования постоянной концентрации носителей заряда у поверхностей полупроводника.

Однако скорости движения носителей неодинаковы из-за теплового размытия, поэтому поле Холла компенсирует действие силы Лоренца только для носителей, движущихся со средней скоростью. На более медленные носители сильнее действует поле Холла, а на более быстрые - сила Лоренца (рис. 1).

Поэтому вклад в проводимость носителей, движущихся со скоростью, отличной от средней, в магнитном поле оказывается меньше. Уменьшение проводимости полупроводника в магнитном поле называется эффектом Гаусса или магниторезистивным (эффектом магнитосопротивления).

В полупроводнике с двумя видами носителей (электроны и дырки) поле Холла меньше, поэтому линии тока в нем не параллельны граням и эффект маг-

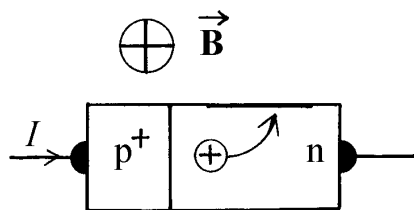


Рис. 2

нитосопротивления соответственно больше. К полупроводникам с двумя видами носителей относится структура p - n -перехода, т.е. диодная структура, называемая в технике длинным диодом или магнитодиодом (рис. 2).

Магнитное поле в магнитодиодах не только искривляет линии тока, но и уменьшает подвижность носителей заряда, т.к. концентрации элек-

тронов и дырок практически одинаковы и поле Холла отсутствует. Удлинение линий тока приводит к уменьшению глубины проникновения неравновесных носителей, т.е. к повышению магниточувствительности. Искривление линий тока приводит также к повышению концентрации носителей у одной грани и к ее понижению у другой. Поскольку эффективное время жизни носителей в тонких пленках определяется поверхностной рекомбинацией, то перераспределение носителей приводит к изменению роли поверхностной рекомбинации и изменению эффективного времени жизни. Роль рекомбинации на грани, к которой отклоняются носители, возрастает, а рекомбинация на второй грани не имеет большого значения. Если скорости рекомбинации на гранях одинаковы, то эффективное время жизни уменьшается и соответственно ток такого магнитодиода в магнитном поле уменьшится.

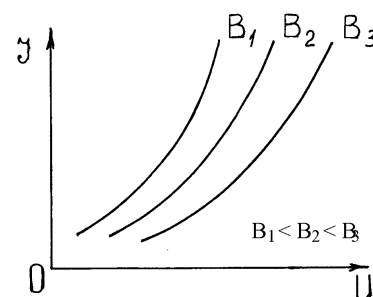


Рис. 3

Если скорость рекомбинации на одной грани много меньше, чем на другой (рис. 2), то тогда при отклонении носителей к этой грани роль рекомбинации на второй грани с высокой скоростью рекомбинации резко уменьшается.

Эффективное время жизни при таком направлении магнитного поля будет возрастать, поэтому ток магнитодиода также будет возрастать. При противоположном направлении магнитного поля будет наблюдаться обычный магнитодиодный эффект - ток резко убывает с ростом магнитного поля. На рис. 3 показаны типовые вольт-амперные характеристики магнитодиода.

Основными параметрами магнитодиодов являются:

1. Вольтовая магниточувствительность. Она равна отношению изменения напряжения на образце к протекающему через него току и изменению магнитного поля, приведшего к данному изменению напряжения

$$\gamma_u = \frac{\Delta U}{\Delta B \cdot I} . \quad (1)$$

Вольтовая магниточувствительность определяется при постоянном значении тока I , допустимом для данного типа магнитодиода (обычно 1...3 мА).

2. Токовая магниточувствительность γ_I определяется изменением тока через магнитодиод при изменении магнитного поля и постоянном напряжении на магнитодиоде

$$\gamma_I = \frac{U}{\Delta B \cdot \Delta I} . \quad (2)$$

Токовая магниточувствительность определяется при постоянном напряжении на магнитодиоде и для исследуемого диода типа КД304Б может принимать фиксированные значения в диапазоне от 10 до 30 В.

Магнитодиоды используются в бесконтактных синхронных электродвигателях переменного тока как чувствительные элементы датчика положения ротора, определяющие последовательность коммутации тока в секциях обмотки статора.

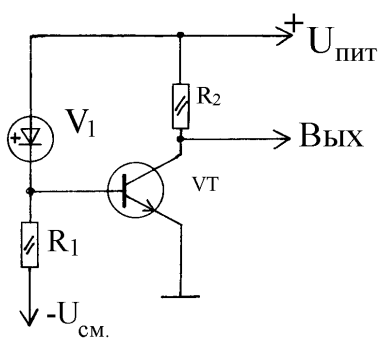


Рис. 4

Они применяются в устройствах вычислительной техники для изготовления бесконтактных клавиш ручного ввода информации и устройств для считывания информации с магнитных лент - магниторезистивные считывающие головки; в радиотехнике для построения магнитодиодных усилителей, основным преимуществом которых является электрическое разделение (гальваническая развязка) входа и выхода; в автоматике датчиков постоянного тока, бесконтактных реле тока, датчиков положения движущихся предметов и т.д.

Устанавливать магнитодиоды следует таким образом, чтобы линии магнитной индукции были перпендикулярны боковым граням полупроводниковой структуры. Типовая схема включения магнитодиода изображена на рис. 4.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Магнитодиод.
2. Электромагнит.
3. Источник регулируемого напряжения постоянного тока.
4. Амперметр.
5. Вольтметр.

5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки для снятия вольт-амперной характеристики магнитодиода и определения его токовой магниточувствительности γ_I показана на рис. 5.

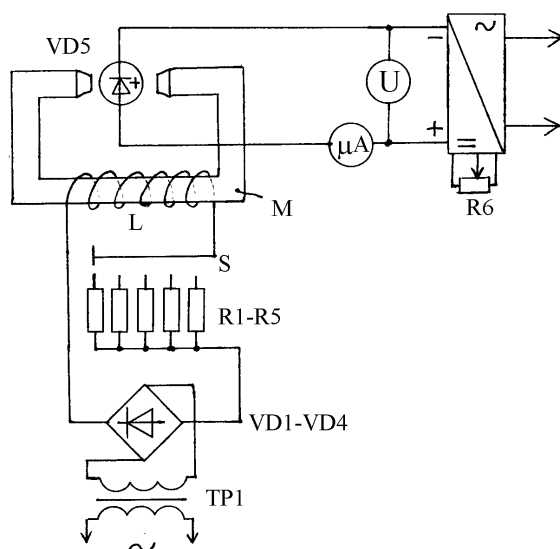


Рис. 5

Установка состоит из электромагнита, выполненного из катушки индуктивности L и магнитопровода M . Электромагнит питается источником постоянного тока через резисторы $R1 - R5$, от выпрямительного моста, собранного на

диодах VD1- VD4 и подключенного ко вторичной обмотке трансформатора Tr1. В зазоре магнитопровода М расположен исследуемый магнитодиод VD5 типа KD304Б. Магнитодиод включен в цепь постоянного тока источника регулируемого напряжения. Величина тока в цепи и напряжение на магнитодиоде контролируются с помощью микроамперметра μA и вольтметра U соответственно.

Поочередно подключая резисторы R1, R2, R3, R4 и R5 можно ступенчато изменять значение тока в цепи электромагнита, что приводит к изменению индукции В магнитного поля в зазоре магнитопровода М, где расположен магнитодиод. С помощью переменного резистора R6 можно устанавливать на магнитодиоде напряжение от 1 до 30 В.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку в цепь переменного тока.
2. Переключатель тока электромагнита S и резистор R6 установить в крайнее левое положение.
3. Снять вольт-амперную характеристику магнитодиода на постоянном токе, для этого переключателем S тока электромагнита установить величину индукции B_1 в зазоре магнитопровода. Начальное положение 1 переключателя S соответствует величине индукции $B_1 = 0,1$ Тл, шаг изменения индукции магнитного поля $\Delta B = 0,1$ Тл. При заданной величине индукции снять зависимость изменения тока через магнитодиод при изменении напряжения на нем. Диапазон изменения напряжения от 2 до 26 В с шагом $\Delta U = 2$ В.
4. Полученные данные занести в таблицу 1 и построить графики зависимости $I = f(U)$ для каждого значения индукции магнитного поля.
5. Сделать выводы по работе.
6. Рассчитать токовую чувствительность магнитодиода, используя формулу (2).

Т а б л и ц а 1

U, В	Индукция магнитного поля				
	$B_1 = 0,1$ Тл	$B_2 = 0,2$ Тл	$B_3 = 0,3$ Тл	$B_4 = 0,4$ Тл	$B_5 = 0,5$ Тл
	I_1 , мкА	I_2 , мкА	I_3 , мкА	I_4 , мкА	I_5 , мкА
2					
4					
6					
8					
...					
...					
...					

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните работу магнитного диода.
2. Что такое магниторезистивный эффект?
3. Какие основные характеристики и параметры магнитодиодов вы знаете?
4. Назовите области применения магнитодиодов в технике.

**ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ. МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ****1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Ознакомление с основными понятиями и определениями дозиметрии, знакомство с дозиметрическими приборами и с элементами дозиметрического контроля.

2. Снятие кривых распада гамма- и бета-активных изотопов атмосферного воздуха, определение периода полураспада, среднего времени жизни радиоактивных нуклидов воздуха.

3. Измерение мощности экспозиционной дозы и определение содержания калия в солях радиометрическим методом.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т].- Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - М.: Наука, 1979. - 304 с.

2. Лабораторный практикум по физике. - Ч.2: Учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Базакуца, Л.Г. Воинова, Н.И. Гнидаш и др.; под ред. В.А. Базакуца. - Харьков: Издательство Харьковского университета, 1972. - 240 с.

3. Майсова Н.Н. Лабораторный практикум по физике: учеб. пособие для студентов вузов. - М.: Росвузиздат, 1963. - 442 с.

4. Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике: учеб. пособие для медвузов / И.А. Эссаулова и др.; под ред. А.Н. Ремизова. - М.: Высш. шк., 1987. - 271 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ**3.1. Основы дозиметрии**

В 1896 году французский физик Анри Беккерель открыл явление радиоактивности, т.е. самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое излучением из ядер элементарных частиц и гамма-лучей, способных ионизировать вещество. Ионизирующим излучением называют любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков. К ионизирующим излучениям относятся гамма-излучение, тормозное, рентгеновское и корпускулярное излучения.

- Гамма-излучение – это электромагнитное излучение, испускаемое при ядерных превращениях.

- Тормозное излучение – фотонное излучение с непрерывным спектром, излучаемое при ускоренном движении заряженных частиц.

- Рентгеновское излучение – тормозное и характеристическое излучение с энергией 1 кэВ - 1 МэВ.

- Корпускулярное излучение – потоки альфа-, бета-частиц, протонов, нейтронов и других частиц.

Так как радиоактивные ядра претерпевают самопроизвольное превращение независимо друг от друга, то можно считать, что количество ядер dN , распадающихся за малый промежуток времени dt пропорционально как числу нераспавшихся ядер, так и промежутку времени dt :

$$dN = -\lambda N dt,$$

где λ - постоянная радиоактивного распада, характеризующая данные ядра. Знак минус указывает на уменьшение количества нераспавшихся ядер с увеличением времени.

Разделяя переменные, получим дифференциальное уравнение, описывающее закономерности изменения числа нераспавшихся ядер во времени:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt.$$

Интегрируя данное дифференциальное уравнение, получим основной закон радиоактивного превращения:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где N - количество нераспавшихся атомов в процессе радиоактивного превращения; N_0 - количество атомов в начальный момент времени.

Для характеристики радиоактивного распада часто применяют величину, называемую периодом полураспада. Периодом полураспада T называют время, за которое распадается половина первоначального количества ядер, т.е. при $t = T$ распадется половина первоначального числа ядер $N = N_0/2$. Отсюда $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$ и, сокращая на N_0 , получим

$$\lambda = \ln 2 / T = 0,693 / T, \text{ и } T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda. \quad (2)$$

Можно доказать, что среднее время жизни τ радиоактивного ядра численно равно обратной величине постоянной радиоактивного распада λ .

$$\tau = 1 / \lambda. \quad (3)$$

Активность A нуклида в радиоактивном источнике (активность изотопа) есть величина, равная отношению числа dN ядер, распавшихся в изотопе к промежутку времени dt , за которое произошел распад:

$$A = \left| -\frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Таким образом, активность – это физическая величина, показывающая число распавшихся ядер за единицу времени.

Активность изотопа в начальный момент времени ($t = 0$) равна

$$A_0 = \lambda N_0. \quad (5)$$

С учетом соотношения (5) выражение (4) для определения активности имеет вид

$$A = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) видно, что активность с увеличением времени уменьшается по экспоненциальному закону.

Удельная активность a радиоактивного источника есть величина, равная отношению его активности A к массе m этого источника (активность единицы массы вещества):

$$a = A/m. \quad (7)$$

Единицы активности.

За единицу активности в международной системе (СИ) принимается беккерель ($Bк$): 1 $Bк$ – активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада.

Активность в миллион раз большая 1 $Bк$ называется резерфордом ($Рд$). Таким образом, 1 $Рд = 10^6 Bк$.

До сих пор в ядерной физике широко применяется внесистемная единица активности нуклида в радиоактивном источнике – кюри ($Kи$): 1 $Kи$ – это активность нуклида в радиоактивном источнике, в котором за 1 с происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада. 1 $Kи = 3,7 \cdot 10^{10} Bк$.

Следует заметить, что 1 г радия характеризуется активностью, равной примерно 1 $Kи$.

Взаимодействие излучения с веществом и дозы ионизирующих излучений.

Любой вид ионизирующего излучения при взаимодействии с веществом производит в нем определенные изменения. При этом фотоны рентгеновских и гамма – лучей взаимодействуют со средой наиболее сложным образом. Различают четыре характерных процесса взаимодействия, вероятности которых зависят как от заряда ядер, так и от энергии кванта электромагнитного излучения. Первый из этих процессов – фотопоглощение. Фотоэффект является главным процессом поглощения при относительно малых энергиях ионизирующих излучений.

Второй процесс характерен для гамма-квантов с энергиями порядка 1 МэВ. Фотоны этого диапазона энергий чаще всего испытывают упругое рассеяние на электронах внешних слоев атомов облучаемого вещества. Процесс рассеяния фотонов средней энергии на электронах любых атомов подобен упругому соударению свободных тел. Эффект рассеяния фотонов средней энергии на несвязанных электронах детально исследовал в 20-х годах прошлого столетия американский физик Артур Комптон, в честь которого этот процесс получил название эффекта Комптона.

Третий процесс характерен для высокоэнергетических гамма-квантов (порядка 10 МэВ). В поле ядра высокоэнергетический квант превращается в две частицы – электрон и позитрон, разлетающихся в противоположных направлениях. Вероятность образования пар быстро растет с увеличением энергии фотонов и пропорциональна квадрату заряда ядра, в поле которого генерируются электронно-позитронные пары.

Четвертый процесс характерен для фотонов, энергия которых превышает энергию связи нуклонов в ядре ($> 8 - 10$ МэВ). В результате поглощения таких фотонов наблюдается ядерный фотоэффект – выброс из ядра одного из нуклонов, чаще всего нейтрона.

В результате каждого из четырех описанных процессов в среде возникает большое количество быстро движущихся электронов, нейтронов, значительная часть которых обладает энергией, достаточной для ионизации атомов вещества.

Экспозиционная доза (D_x).

Для количественной характеристики ионизирующего излучения вводят величину, называемую экспозиционной дозой (D_x). Экспозиционной дозой (D_x) излучения называют величину равную отношению суммы электрических зарядов всех ионов одного знака, образующихся в результате действия ионизирующего излучения к массе облучаемого вещества.

За единицу экспозиционной дозы в международной системе (СИ) принимают кулон на килограмм (1 Кл/кг), т.е. такую дозу при которой в 1 кг облучаемого вещества образуется суммарный заряд ионов одного знака, равный 1 Кл.

В настоящее время, на практике наиболее употребляемой внесистемной единицей экспозиционной дозы (D_x) является рентген (R): $1R$ – это такая доза, при которой в 1 см^3 сухого воздуха при нормальных условиях образуется $2 \cdot 10^9$ пар ионов.

Суммарный заряд одного знака, который в этом случае образуется, равен $2 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{19} \text{ Кл} = 3,2 \cdot 10^{10} \text{ Кл} = 1/3 \text{ нКл}$. Таким образом, экспозиционная доза в $1R$ – это такая доза, при которой в 1 см^3 сухого воздуха при нормальных условиях возникает суммарный заряд ионов одного знака, равный трети нКл.

Определим массу 1 см^3 сухого воздуха при нормальных условиях в соответствии с уравнением Менделеева - Клапейрона

$$pv = \frac{m}{M} RT.$$

Масса воздуха найдется из выражения

$$m = \frac{pvM}{RT} = \frac{10^5 * 10^{-6} * 0,029}{8,31 * 273} = 1,28 * 10^{-6} \text{ кг}.$$

Экспозиционная доза в $1R$ равна

$$1R \cong \frac{3,2 * 10^{-10} \text{ Кл}}{1,28 * 10^{-6} \text{ м}^3} = 2,58 * 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Так как для ионизации одной пары ионов сухого воздуха требуется энергия, примерно равная 35 эВ, то при экспозиционной дозе в $1R$ в 1 см^3 воздуха затрачивается на ионизацию энергия, равная $2 * 10^9 \cdot 35 \text{ эВ} = 7 * 10^{10} \text{ эВ} = 1,12 * 10^{-8} \text{ Дж} = 0,11 \text{ эрг}$.

Следует заметить, что доза в $1R$ накапливается за 1 ч на расстоянии 1 м от источника радия массой 1 г, т.е. активностью примерно равной 1 Ки .

Мощность экспозиционной дозы (P_x).

Мощность экспозиционной дозы называется величина, равная отношению экспозиционной дозы ко времени.

$$P_x = \frac{D_x}{t},$$

где D_x – экспозиционная доза; t – время.

На практике широко применяют внесистемные единицы мощности экспозиционной дозы (Р/с, мР/с, мкР/с мкР/ч и др. В международной системе (СИ) применяется 1 А/кг. При этом $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$.

Поглощенная доза (D_n) (при облучении неживых объектов).

Поглощенная доза (D_n) – это физическая величина, равная отношению энергии излучения к массе облучаемого вещества.

За единицу поглощенной дозы принимается 1 грей (Гр). 1 Гр – это такая доза, при которой облученному веществу массой в 1 кг сообщается энергия любого ионизирующего излучения в 1 Дж.

1 Гр – эта непривычная, мало употребляемая единица, названа в честь английского физика А. Грея.

На практике часто используют другую внесистемную единицу – 1 рад. 1 рад – аббревиатура от английских слов radiation absorbed dose, т.е. поглощенная доза излучения.

$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$.

Для мягких тканей в поле рентгеновского или гамма-излучений поглощенная доза 1 рад примерно соответствует экспозиции 1 Р, т.е.

$$1 \text{ Р} \approx 1 \text{ рад} \text{ (точно } 1 \text{ Р} = 0,88 \text{ рад)}.$$

Эквивалентная (биологическая) доза ($D_{эkv}$) (при облучении живых объектов).

Для сравнения биологических эффектов различных видов излучений вводится эквивалентная или биологическая доза $D_{эkv}$. Эквивалентная доза $D_{эkv}$ определяется по формуле

$$D_{эkv} = D_n \cdot K_r,$$

где D_n – поглощенная доза, K_r – коэффициент качества какого либо излучения – числовой коэффициент, который равен отношению поглощенной дозы эталонного излучения, вызывающей определенный радиобиологический эффект, к дозе рассматриваемого излучения, вызывающей тот же биологический эффект.

Коэффициент качества K_r ионизирующего излучения по определению равен единице для гамма-, бета-излучения, для протонов и нейтронов он равен 10 и для альфа-частиц равен 20.

Единицей измерения эквивалентной дозы является биологический эквивалент рада: $1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад} \cdot K_r$. В международной системе (СИ) единицей эквивалентной дозы является *зиверт* (Зв), названный в честь известного шведского радиолога Рольфа Зиверта. При этом $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$.

Таким образом, основные дозиметрические единицы можно представить в табл. 1.

Максимальная эквивалентная доза ($D_{эkv}$).

Максимальная эквивалентная доза – это наибольшее значение суммарной эквивалентной дозы от всех источников излучения в критическом органе. Критические органы разделяются на три группы: 1 группа – все тело, гонады и красный костный мозг; 2 группа – мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза, и другие органы; 3 группа – кожный покров, костная ткань, кости, предплечья, лодыжки, стопы.

Т а б л и ц а 1

Источник	Поле	Облучение	
		Неживых объектов	Живых объектов
Активность	Экспозиционная доза	Поглощенная доза	Эквивалентная доза
1 Ки - в 1 с распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомов	1 Р – доза, при которой в 1 см^3 сухого воздуха при нормальном давлении образуется $2 \cdot 10^9$ пар ионов	$D_n = \frac{Q}{m}$ - поглощенная энергия (или суммарный заряд) единицы массы. 1 рад - рентгеновская адсорбционная доза	$D_{\text{экв}} = D_n \cdot K_r$ 1 бэр – биологический эквивалент рада 1 бэр = 1 рад · K_r
1 Рд - в 1 с распадается 10^6 атомов	1 Р = 0,88 рад	1 Р = 0,88 рад 1 рад = 1,14 Р 1 рад \cong 1 Р	$K_r = 1 (\gamma, \beta)$ $K_r = 10 (n, p)$ $K_r = 20 (\alpha)$
1 Бк - в 1 с распадается 1 атом (СИ)	1 Кл/кг (СИ)	1 Гр = 100 рад(СИ)	1 Зв = 100 бэр(СИ)
	Уровень фона $\approx 10 \text{ мкР/ч}$		

Предельно допустимая доза (ПДД) – наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья персонала патологических изменений. Для каждой группы критических органов установлены предельно-допустимые дозы за год (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Группа критических органов	ПДД, бэр/год
1	5
2	15
3	30

В табл. 3 представлена иерархия организмов по величине среднелетальной дозы, при облучении которой 50 % их погибает за 30-суточный срок наблюдения. Как видно, человек и его ближайший друг собака занимают верхнюю ступень иерархической лестницы радиочувствительности.

Т а б л и ц а 3

Вид организма	Доза, рад	Вид организма	Доза, рад
Человек	450	Черепаша	1500
Собака	450	Тритон	3000
Обезьяна	525	Золотая рыбка	6700
Крыса	600	Улитка	15000
Лягушка	700	Дрозофила	80000
Кролик	800	Амеба	10000
Курица	1000	Инфузория	300000

В табл. 4 представлены данные возможных клинических последствий при радиоактивном облучении человека.

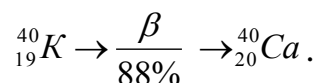
3.2. Калий, соли калия и некоторые свойства

Калий – химический элемент 1 группы периодической системы Менделеева; атомный номер 19, атомная масса 39,098. Серебристо белый металл. Природный калий состоит из трех изотопов – двух стабильных $^{39}_{19}\text{K}$ $^{41}_{19}\text{K}$ (в природной смеси их содержится 93,10 % и 6,88 % соответственно) и одного радиоактивного $^{40}_{19}\text{K}$ (0,0119 %). Большая часть $^{40}_{19}\text{K}$, испуская β^- -лучи, превращается в изотоп $^{40}_{20}\text{Ca}$, а меньшая часть, захватывая электрон, превращается в изотоп $^{40}_{18}\text{Ar}$ с выделением гамма-лучей.

Т а б л и ц а 4

Доза облучения, бэр	Тип облучения		Повреждения
	Тотальное	Локальное	
Не более 25	Все тело		Не обнаруживаются клинических симптомов
50	Все тело		Временное снижение количества лимфоцитов
100	Все тело		Тошнота, рвота, вялость во всем теле, значительное снижение числа лимфоцитов
150	Все тело		Смертность 5 %, «похмелье» от облучения 50 %
200	Все тело		Снижение количества лейкоцитов на долгое время
400	Все тело		Смертность 50 % за 30 суток
600	Все тело		Смертность 90 % за 14 суток
Не менее 600	Все тело		Смертность 100 %
300-500		Кожа	Выпадение волос и краснота кожи

Распад калия с образованием кальция идет по схеме

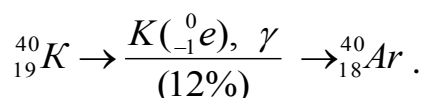


Скорость образования кальция $^{40}_{20}\text{Ca}$ характеризуется постоянной распада $\lambda_{\beta} = 4,72 \cdot 10^{-10} \text{ лет}^{-1}$.

Удельная β -активность калия, характеризующаяся числом β -частиц, испускаемых 1 г калия в 1 с, равна 26. Максимальная энергия β -частиц равна 1,35 МэВ.

Период полураспада радиоактивного изотопа ^{40}K составляет 1 миллиард 320 лет. Некоторые соединения калия (например, поташ, добывавшийся из древесной золы) были известны в древности; однако их не отличали от соединений натрия. Только в 18 веке было установлено различие между «растительной щелочью» (поташом K_2CO_3) и минеральной щелочью Na_2CO_3 .

Аргон $^{40}_{18}\text{Ar}$ образуется в результате захвата ядром $^{40}_{19}\text{K}$ электрона (К-захват):



Скорость образования ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ характеризуется постоянной распада $\lambda_K = 5,49 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$. Энергия испускаемых γ -квантов равна 1,46 МэВ. Удельная γ -активность калия, характеризующаяся числом γ -квантов, испускаемых 1 г обычного калия, равна примерно 3,6 квант/(с г).

Содержание калия в земной коре составляет 2,5 % по массе и по распространенности он занимает 7 место. В свободном состоянии K в природе не встречается. Его наиболее важные минералы это сильвин KCl , сильвинит, корналлит, каинит. Богаты калием многие силикаты (слюды, нефелиты, полевые шпаты и др.). Большое количество калийных солей растворено в морской воде, соляных озерах.

Анализ показывает, что при изучении пород с нормальным содержанием элементов рядов урана – радия, тория и большим содержанием калия влиянием бета- и гамма-излучения калия на результаты измерений пренебрегать нельзя. Для гранитов с содержанием $1,02 \cdot 10^{-10}$ % радия, равновесного с ураном, $8 \cdot 10^{-4}$ % тория и 3,8 % калия получается следующее соотношение активностей: по β -излучению $U:Th:K = 1:0,47:2,9$; по γ излучению $U:Th:K = 1:0,18:2,5$.

Следовательно, величина активности за счет калия больше, чем элементов уранового и ториевого рядов, вместе взятых. Поэтому при измерении содержания урана и тория в породах с большим содержанием калия необходимо вводить поправку на бета- и гамма-излучение ${}^{40}_{19}\text{K}$. В настоящей работе для определения мощности полевой дозы используется поташ K_2CO_3 и сильвин KCl .

3.3. Радон и некоторые его свойства

Атмосферный воздух обладает естественной радиоактивностью, которая обусловлена в основном наличием в нем радона и его продуктов распада. Рассмотрим некоторые свойства радона. Радон ${}^{222}_{86}\text{Ra}$ – радиоактивный химический элемент 8 группы периодической системы Менделеева; атомный номер 86; инертный газ. Все изотопы радона радиоактивны, однако наиболее долгоживущий изотоп радона имеет период полураспада, равный 3,823 дня. Несмотря на быстрый распад количество радона в природе постоянно. Это объясняется тем, что радон образуется при распаде урана, радия, тория.

Распространенность радона на Земле крайне низка. Во всей атмосфере его содержится лишь 370 л. В атмосферу радон попадает из горных пород и других объектов, содержащих уран или торий. Из-за быстрого распада радон не успевает равномерно перемешиваться с другими газами атмосферы, поэтому содержание его над разными участками земной поверхности неодинаково. Больше всего радона там, где много радиоактивных руд.

Работа с радоном крайне опасна. Вызвано это тем, что с воздухом радон попадает в легкие, где многие ядра радона успевают распасться за время между вдохом и выдохом. К тому же радон хорошо растворим в воде, а, следовательно, и в крови. После распада образуются радиоактивные изотопы полония, вис-

мута, свинца и таллия, которые прочно прилипают к стенкам легких и, постепенно накапливаясь, могут вызвать патологические изменения в организме и привести к заболеваниям. Поэтому работа с радоном требует особых мер предосторожности (мощная вентиляция, защита органов дыхания марлевой повязкой – респиратором и др.). В начале 20 века, когда проводились первые исследования радона, ученые не подозревали об опасности работы с радоном. Так англичанин У. Рамзай, много работавший с радоном и впервые определивший плотность и атомную массу радона, погиб в 1916 году от рака легких.

Однако радон в небольших концентрациях обладает целебными свойствами. Для лечения часто используют радоновые ванны. Во время приема такой ванны небольшая часть (1 - 2 %) растворенного в воде радона попадает внутрь организма или абсорбируется на коже. Распадаясь, атомы радона и его продукты распада вызывают как бы микроуколы, благотворно влияющие на организм. Раньше для радоновых ванн использовали только природные источники, в настоящее время такую воду можно получать искусственно в специализированных лечебных учреждениях.

Продуктами распада радона $^{222}_{86}\text{Ra}$ являются изотопы $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{214}_{83}\text{Bi}$, $^{214}_{84}\text{Po}$, $^{218}_{84}\text{Po}$.

Несмотря на малую концентрацию этих продуктов в воздухе, их можно сравнительно легко обнаружить. При встрече с твердыми частицами дыма, пыли, капельками тумана радиоактивные изотопы оседают на поверхности. Если пропустить значительный объем воздуха через фильтр, улавливающий твердые частицы, то можно сконцентрировать естественные радиоактивные изотопы, присутствующие в данном объеме воздуха, в небольшом объеме фильтра. Для этой цели можно использовать специальные аэрозольные фильтры и фильтровальное полотно, а также вату или фильтровальную бумагу. Активность полученного препарата зависит в основном от β^- и γ -радиоактивности изотопов $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{214}_{83}\text{Bi}$. Некоторые характеристики радона и его продуктов распада представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Атомный номер	Химический символ	Массовое число	Распространенность или период полураспада	Энергия частиц, МэВ
82	$^{214}_{82}\text{Pb}$	214	β^- , γ , 26,8 мин	0,69; 0,63
83	$^{214}_{83}\text{Bi}$	214	β^- , α , γ - 19,7 мин (β^- , 99,98%)	β^- , 3,2 α , 5,5
84	$^{218}_{84}\text{Po}$	218	α , β^- , 3,05 мин	α , 5,998
86	$^{222}_{86}\text{Rn}$	222	α , 3,825 суток	α , 5,486

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДА ПОЛУРАСПАДА РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА

Для измерения интенсивности ионизирующих излучений в данной работе используется дозиметр РКСБ-104, передняя панель которого представлена на рис. 1.

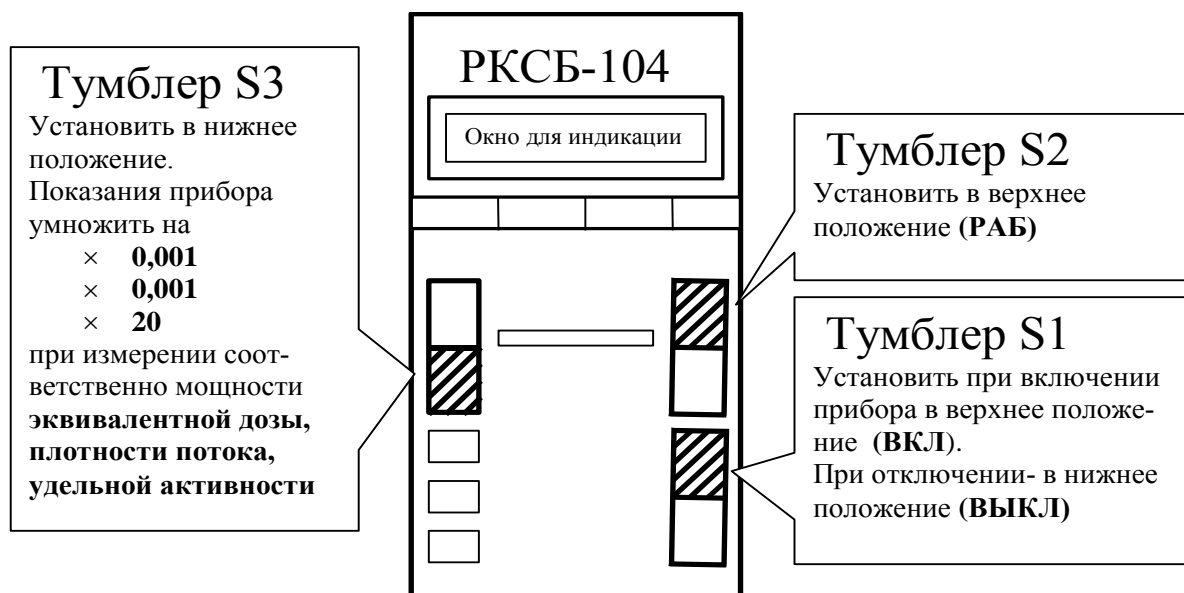


Рис. 1

На лицевой панели дозиметра предусмотрены окно для индикации и три тумблера – для включения прибора (S1) и для выбора режима его работы S2 и S3.

При установлении тумблера S1 в верхнем положении (ВКЛ) электрическое питание от батареи типа «КРОНА» (9 В) подключается к дозиметру. При отключение электрического питания тумблер S1 необходимо перевести в нижнее положение (ВЫКЛ).

Тумблер S2 при любых измерениях должен находиться в верхнем рабочем положении (РАБ). Тумблер S3 при выполнении данной работы необходимо установить в нижнее положение. В этом случае при измерении мощности эквивалентной дозы показания в жидкокристаллическом окне для индикации следует умножить на коэффициент 0,001. При этом единица измерения выражается в мкЗВ/ч.

Рассмотрим пример: на табло индицируется число 0054; показание прибора – 54. Показания прибора при измерении мощности эквивалентной дозы необходимо умножить на пересчетный коэффициент 0,001; в результате получим 0,054 мкЗВ/ч. Умножив этот результат на 100, получим 5,4 мкР/ч. Время измерения составляет примерно 270 с (4,5 мин). Время окончания измерения сигнализируется звуковым сигналом.

Более подробно методика измерения мощности эквивалентной дозы, плотности потока и удельной активности описана в паспорте, содержащего техническое описание и инструкцию по эксплуатации комбинированного прибора РКСБ-104.

Для определения постоянной радиоактивного распада и периода полураспада проанализируем основной закон распада (соотношение 1). С учетом (2) закон радиоактивного распада можно записать в виде

$$N = N_0 e^{-\frac{0,693}{T}t}.$$

Предположив, что мощность полевой дозы P пропорциональна N , имеем

$$P = P_0 e^{-\frac{0,693}{T}t}.$$

Отсюда

$$\ln \frac{P_0}{P} = \frac{0,693}{T}t. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что $\ln \frac{P_0}{P}$ линейно зависит от времени t .

Построив график зависимости $\ln \frac{P_0}{P}$ от времени t , нетрудно найти постоянную радиоактивного распада и период полураспада. При этом постоянная радиоактивного распада будет равна тангенсу угла наклона графика к оси абсцисс

$$\operatorname{tg} \alpha = \lambda = \frac{\ln \frac{P_0}{P}}{t}. \quad (9)$$

Теперь можно рассчитать период полураспада по формуле (2)

$$T = 0,693 / \lambda.$$

5. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Дозиметр РКСБ-104.
2. Воздухопротяжная установка (пылесос).
3. Радиоактивный препарат с малым периодом полураспада, полученный с использованием воздухопротяжной установки (бытового пылесоса) на фильтровальном полотне или на вате достаточно большого объема (30 – 50 см³).
4. Соли, содержащие калий (поташ K_2CO_3 , сильвин KCl).
5. Устройства для установки радиоактивного препарата и дозиметра.
6. Секундомер.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6.1 Упражнение 1. *Определение мощности полевой дозы сильвина (KCl)*

1. Подготовьте дозиметр к работе. Тумблер S2 установите в верхнее положение (РАБ), а тумблер S3 – в нижнее положение. Снимите с помощью лаборанта или преподавателя заднюю крышку дозиметра.

2. Определите фон. Для этого включите питание дозиметра переводом тумблера S₁ в верхнее положение (ВКЛ). Примерно через 4,5 мин прибор должен выдать прерывистый звуковой сигнал; при этом на табло индикатора должно индицироваться 4-разрядное число, значащая часть которого, умноженная на пересчетный коэффициент, равный 0,001 при измерении мощности полевой эквивалентной дозы внешнего фона гамма-излучения даст измеренную величину в микрозивертах в час (мкЗв/ч). Умножив на 100, получим мощность

дозы в микрорентгенах в час (мкР/ч). Повторите трижды измерение фона. Результаты измерения запишите в табл. 6.

3. Установите образец № 1 с хлористым калием на специально подготовленную подставку. Установите над образцом исследуемой соли дозиметр и в соответствии с пунктом 2 определите мощность эквивалентной дозы. Повторите трижды измерения мощности эквивалентной дозы исследуемой соли. Результаты измерения запишите в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

№	Фон, P_{ϕ} МкР/ч	$\langle P_{\phi} \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
	Образец №1	$\langle P_I \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							

4. Рассчитайте вероятностным методом среднюю величину мощности полевой дозы фона и образца № 1, величину абсолютной и относительной погрешности при заданной надежности ($\alpha = 0,95$).

5. Определите мощность полевой дозы образца № 1 с учетом поправки на фон по формуле (10):

$$P_1 = \langle P_1 \rangle - \langle P_{\phi} \rangle. \quad (10)$$

6. Рассчитайте значение абсолютной и относительной погрешности мощности экспозиционной дозы исследуемых образцов.

7. Сделайте выводы по упражнению 1.

6.2 Упражнение 2. *Определение содержания калия в солях радиометрическим методом*

1. Определите с учетом фона (соотношение 10) в соответствии с пунктом 3 упражнения 1 мощность экспозиционной дозы для образцов № 2, № 3, № 4 с известным процентным содержанием в них калия. Результаты измерений запишите в табл. 7.

2. Постройте градуировочный график, отложив на оси абсцисс процентное содержание калия, а на оси ординат мощность полевой дозы.

3. Определите мощность полевой дозы для образцов № 5 и № 6 с неизвестным процентным содержанием калия.

4. По градуировочному графику найдите процентное содержание калия в этих образцах.

5. Сделайте выводы по упражнению 2.

Т а б л и ц а 7

	Образец №2 (50%)	$\langle P_3 \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
	Образец №3 (75%)	$\langle P_3 \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
	Образец №4 (100%)	$\langle P_4 \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
	Образец №5	$\langle P_5 \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
	Образец №6	$\langle P_6 \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							

6.3 Упражнение 3. *Определение постоянной распада, периода полураспада и среднего времени жизни радиоактивных изотопов в воздухе*

1. Получите β^- и γ -радиоактивный препарат. С этой целью:

- закрепите фильтр (вату, вложенную между марлей) в держателе на входном отверстии пылесоса;
- включите пылесос и пропускайте воздух через полученный фильтр (вату) в течение 10 - 15 мин.

2. Во время работы пылесоса подготовьте дозиметр к работе. Тумблер S2 установите в верхнее положение (РАБ), а тумблер S3 – в нижнее положение. Снимите с помощью лаборанта или преподавателя заднюю крышку дозиметра.

3. Измерьте величину мощности полевой эквивалентной дозы внешнего фона β^- и γ -излучения. Для этого:

- включите питание дозиметра переводом тумблера S₁ в верхнее положение (ВКЛ);
- примерно через 4,5 мин прибор должен выдать прерывистый звуковой сигнал; при этом на табло индикатора должно индизироваться 4-разрядное число, значащая часть которого, умноженная на пересчетный коэффициент, равный 0,001 при измерении мощности полевой эквивалентной дозы внешнего фона гамма-излучения даст измеренную величину в микрозивертах в час (мкЗв/ч). Умножив на 100, получим мощность дозы в микрорентгенах в час (мкР/ч);
- повторите трижды измерение фона. Результаты измерения запишите в табл. 8.

- Выключите пылесос.

Т а б л и ц а 8

№	Фон P_{ϕ} , МкР/ч	$\langle P_{\phi} \rangle$	ΔP_i	$(\Delta P_i)^2$	ΔS	ΔP	ε , %
1							
2							
3							

4. Снимите кривую распада исследуемого образца. С этой целью:

- быстро укрепите исследуемый образец (фильтровальную бумагу или вату установленную на входном отверстии пылесоса) на специально подготовленную подставку;
- установите над образцом дозиметр и в соответствии с пунктом 3 определите мощность эквивалентной дозы. Время измерения составляет 4,5 мин. Значение мощности полевой дозы образца запишите в табл. 9.
- Выключите и вновь включите дозиметр. Проведите 10-15 замеров полевой дозы, значение которой должно уменьшаться со временем по закону радиоактивного распада. Результаты измерения дозы запишите в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

№ п/п	Время, t , мин	Мощность дозы, P_i , мкР/ч, (без учета фона)	Мощность дозы, $P_i = \langle P_i \rangle - \langle P_{\phi} \rangle$, мкР/ч (с учетом фона)	$\ln \frac{P_0}{P}$
1	0			
2	4,5			
3	9,0			
4	13,5			
5	18,0			
6	22,5			
7	27,0			
8	31,5			
9	36,0			
10	40,5			
11	45,0			
...				
...				
...				

5. Определите мощность полевой дозы исследуемого образца с учетом поправки на фон по формуле

$$P_i = \langle P_i \rangle - \langle P_{\phi} \rangle. \quad (10)$$

Результаты расчета запишите в табл. 9.

6. Постройте график зависимости $\ln \frac{P_0}{P}$ отношения начальной мощности полевой дозы к мощности дозы в данный момент времени в функции времени

(на оси абсцисс отложите время t , на оси ординат $\ln \frac{P_0}{P}$). График должен быть представлен в виде прямой, проходящей через начало координат.

7. Рассчитайте тангенс угла наклона полученной зависимости (прямой) по формуле (9)

$$\operatorname{tg} \alpha = \lambda = \frac{\ln \frac{P_0}{P}}{t}.$$

8. Рассчитайте по формуле (2) период полураспада

$$T = 0,693 / \lambda.$$

9. Оцените погрешность при определении постоянной распада и периода полураспада. Оцените среднее время жизни радиоактивных нуклидов исследуемого препарата по формуле (3)

$$\tau = 1 / \lambda.$$

10. Сделайте краткие выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа альфа-, бета- и гамма-излучений.
2. Поясните механизм и природу рассеяния гамма-квантов.
3. Получите основной закон радиоактивного распада. Дайте определение периода полураспада. Докажите связь между постоянной радиоактивного распада и периодом полураспада.
4. Определите среднее время жизни ядер нуклидов.
5. Дайте определение активности, экспозиционной, поглощенной и эквивалентной доз и единиц измерения этих величин.
6. Поясните влияние облучения на живые организмы. Каков допустимый уровень облучения? Каков уровень фона?
7. Объясните свойства радона и его продуктов распада.
8. Поясните методику определения постоянной распада и периода полураспада радиоактивных изотопов.
9. Объясните устройство и принцип работы дозиметрических приборов. Поясните основные характеристики дозиметра РКСБ – 104 (бытового дозиметра «БЕЛЛА»).
10. Поясните механизм и природу рассеяния гамма-квантов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛОВ И ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение термодинамической работы выхода электронов из металлов и постоянной Планка из исследований вольтамперной характеристики фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

2. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. - [В 3-х т]. - Т.2. М.: Наука, 1989. - 301 с.
2. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. - 375 с.
3. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. - М.: Высш. шк., 1971. - 448 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное определение термодинамической работы выхода электронов из металлов и постоянной Планка выполняется из исследований явления фотоэффекта. Различают фотоэффект внешний, внутренний и вентильный. В соответствии с этим фотоэлементы бывают трех различных типов.

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Внутренний фотоэффект также вызывается поглощением электромагнитного излучения полупроводниками или диэлектриками; при этом происходит переход электронов из связанного состояния в свободное без вылета за пределы твердого тела. В результате резко увеличивается концентрация свободных носителей тока внутри твердого тела, что приводит к фотопроводимости – повышению электропроводности полупроводников и диэлектриков при их освещении.

Вентильный фотоэффект возникает при освещении контакта двух полупроводников разного типа проводимости или полупроводника и металла. В результате на контакте возникает ЭДС (фотоЭДС) при отсутствии внешнего электрического поля. Вентильный фотоэффект используется для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую в солнечных батареях.

В настоящей работе для экспериментального определения работы выхода электронов из металлов и постоянной планка используется метод, основанный на исследовании явления внешнего фотоэффекта.

Как показывает опыт, свободные электроны при обычных температурах практически не покидают металл. Связано это с тем, что положительные ионы, образующие решетку металла, создают внутри него электрическое поле с положительным потенциалом, периодически меняющимся при переходе вдоль прямой, проходящей через узлы решетки (рис. 1).

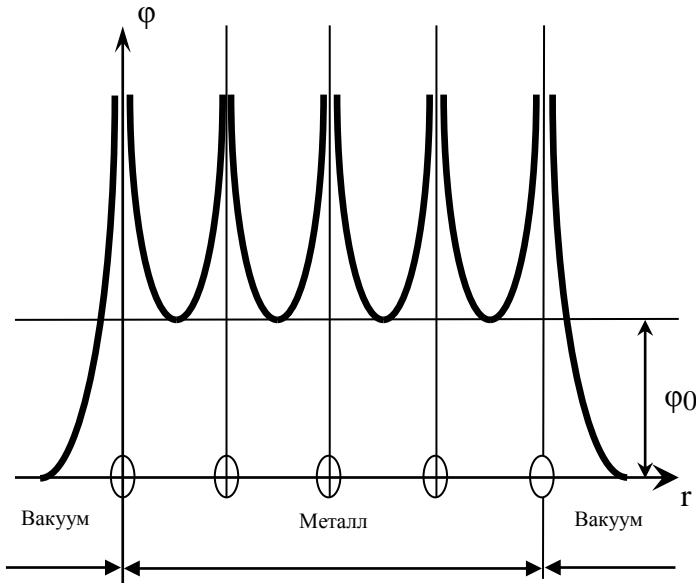


Рис. 1

параметру кристаллической решетки. Из рис. 2 видно, что металл является для электронов потенциальной ямой, которую он не может свободно покинуть. Выход электрона из металла, как из потенциальной ямы, требует затраты работы. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из вещества, называется работой выхода.

При температуре вблизи абсолютного нуля значения энергии электронов проводимости заключены в пределах от 0 до совпадающей с уровнем Ферми

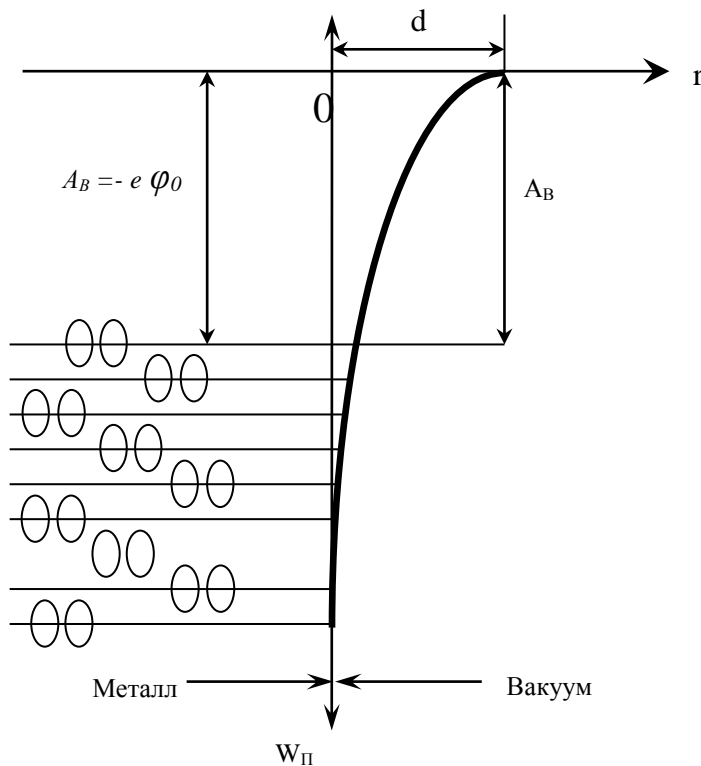


Рис. 2

В грубом приближении этим изменением можно пренебречь и считать потенциал во всех точках одинаковым и равным ϕ_0 . Электрон, находящийся в таком поле, обладает отрицательной потенциальной энергией $W_{\Pi 0} = -e\phi_0$, где e - заряд электрона.

На рис. 2 представлено изменение потенциальной энергии электрона при переходе из металла в вакуум: в вакууме $W_{\Pi} = 0$, в металле $W_{\Pi} = -e\phi_0$. Это изменение хотя и носит скачкообразный характер, но происходит не мгновенно, а на протяжении отрезка d , по порядку величины равного па-

раметру кристаллической решетки. Из рис. 2 видно, что металл является для электронов потенциальной ямой, которую он не может свободно покинуть. Выход электрона из металла, как из потенциальной ямы, требует затраты работы. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из вещества, называется работой выхода.

При температуре вблизи абсолютного нуля значения энергии электронов проводимости заключены в пределах от 0 до совпадающей с уровнем Ферми W_F . На рис. 3 энергетические уровни зоны проводимости вписаны в потенциальную яму (пунктиром изображены не занятые при 0 К уровни). Для удаления за пределы металла разным электронам нужно сообщить неодинаковую энергию. Так электрону, находящемуся на самом нижнем уровне зоны проводимости, необходимо сообщить энергию $W_{\Pi 0}$, равную глубине потенциальной ямы. Эту работу называют полной или внешней работой выхода.

Наименьшая работа совершается при удалении электронов, располагающихся на уровне Ферми W_F . Для них она равна расстоянию от уровня Ферми до нулевого уровня энергии. Работа,

которую нужно затратить для удаления электрона с уровня Ферми в вакуум, называется термодинамической работой выхода. Эта работа равна

$$A_B = W_m - W_F. \quad (1)$$

При температуре, отличной от абсолютного нуля, работа выхода теряет, до некоторой степени, свою определенность. Тепловое возбуждение приводит к появлению в зоне проводимости электронов, располагающихся на уровнях, лежащих выше уровня Ферми, удаление которых требует меньшей работы выхода. Это обусловлено несколькими факторами. С ростом температуры увеличивается кинетическая энергия электронов, что облегчает их выход из металла. С изменением температуры меняется также положение уровня Ферми. Кроме того, из-за обусловленного тепловым расширением изменения средних расстояний между атомами изменяется глубина потенциальной ямы $W_{\text{по}}$. Работу, необходимую для удаления электрона из металла, в этом случае также называют термодинамической работой выхода при соответствующих условиях, последняя определяется экспериментально.

Вылетающие электроны образуют над металлом “электронное облако”. Часть этих электронов вновь возвращается в металл, другие его покидают. Явление это весьма похоже на испарение жидкостей. Поверхность металла и электронное облако образуют двойной электрический слой, аналогичный плоскому конденсатору. Силы, действующие на электрон в таком слое, направлены внутрь металла. Работа, совершаемая против этих сил при переводе электронов из металла наружу, идет на увеличение потенциальной энергии электрона. Как отмечалось, толщина двойного электрического слоя равна нескольким межатомным расстояниям $d = 10^{-10} \div 10^{-9}$ м (рис. 4). Разность потенциалов в этом слое называется поверхностным скачком потенциала на границе металл – вакуум или контактной разностью потенциалов между металлом и вакуумом.

Для оценки этой величины сделаем следующий ориентировочный расчет. Представим себе, что электрон вылетает из металла. Тогда в последнем возникает положительный заряд, равный по модулю заряду электрона. Этот заряд называется электрическим изображением электрона.

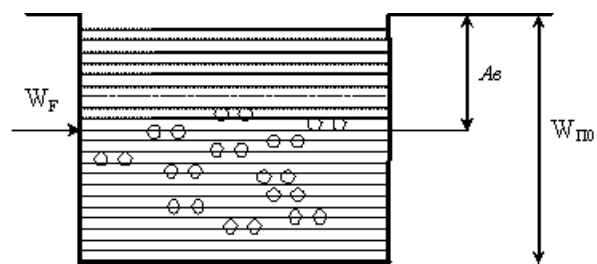


Рис. 3

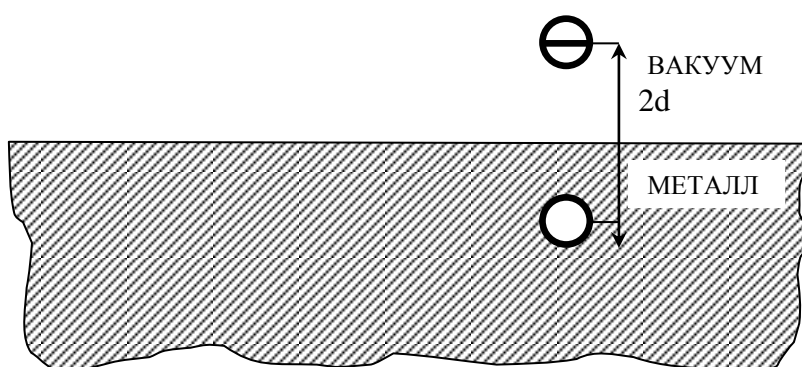


Рис. 4

Оказывается, что взаимодействие электрона с металлом равно взаимодействию между электроном и его изображением, т.е. сводится к взаимодействию точечных зарядов, которое несложно рассчитать. Примем $d = 10^{-10}$ м:

$$\phi_{i\bar{i}o} \approx \frac{1}{4\pi E_0} \cdot \frac{e}{2d} \approx \frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{4 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-10}} \approx 1,4 \text{ \AA}.$$

И работа выхода $A_0 = 1,4$ эВ. По порядку величины получилось разумное значение работы выхода.

Работа выхода электронов зависит от химической природы металла и колеблется в пределах нескольких электрон-вольт.

В табл. 1 приведены значения работы выхода для ряда металлов.

Т а б л и ц а 1

Металл	Работа выхода электронов, эВ
Серебро	4,28
Алюминий	3,47
Бериллий	3,37
Натрий	2,27
Кадмий	3,92
Свинец	4,02
Кобальт	4,18
Золото	4,81
Медь	4,47
Железо	4,36
Ртуть	4,52
Цинк	3,47
Платина	5,39
Серебро	4,28

Следует отметить, что состояние поверхности металла существенно влияет на значение величины $A_{\text{в}}$. Подобрав определенным образом покрытие поверхности, можно значительно уменьшить $A_{\text{в}}$. Например, если нанести на поверхность вольфрама ($A_{\text{в}} = 4,5$ эВ) слой оксида щелочноземельных металлов (Ca , Ba), то $A_{\text{в}}$ снижается до 2 эВ. Этот эффект используется в электровакуумных приборах для усиления термоэлектронной эмиссии из катодов.

В данной работе значение $A_{\text{в}}$ из металла, а также значение постоянной Планка определялось из исследований ВАХ вакуумного фотоэлемента. Как известно, уравнение Эйнштейна для фотоэффекта имеет вид

$$h\nu = A_{\text{в}} + \frac{mV_i^2}{2}, \quad (3)$$

где $h\nu$ – энергия фотона частоты ν ; $A_{\text{в}}$ – работа выхода; $V_{\text{м}}$ – максимальная скорость фотоэлектронов; h – постоянная Планка.

На рис. 5 изображен график зависимости фототока от напряжения между катодом и анодом фотоэлемента (ВАХ) при неизменном значении светового потока.

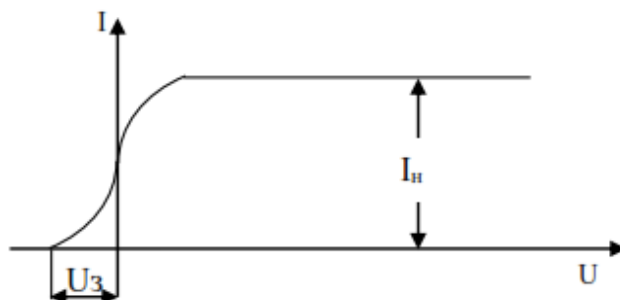


Рис. 5

Из графика видно, что фототок сначала растет, затем достигает насыщения. Максимальное значение фототока I_n называется фототоком насыщения. Фототок существует и тогда, когда в цепи нет источника питания. Это объясняется тем, что электроны покидают катод со скоростью отличной от нуля. Часть из них достигает анода и в отсутствии напряжения между электродами. Для того, чтобы фототок стал равным нулю, нужно приложить к аноду некоторое задерживающее отрицательное напряжение $-U_z$ (рис. 6).

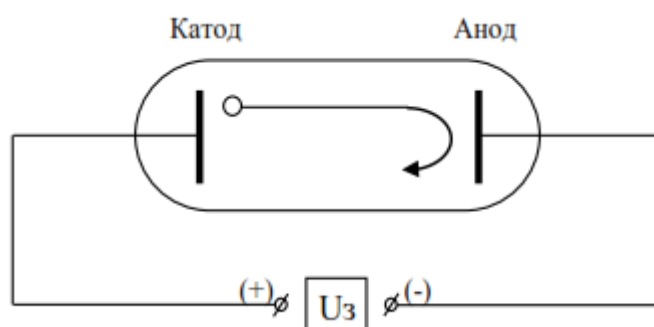


Рис. 6

Оно должно быть таким, чтобы электроны, обладающие при вылете из катода даже наибольшей скоростью V_m , не могли преодолеть задерживающее электронное поле и достигнуть анода. Между максимальной скоростью фотоэлектронов и задерживающим напряжением выполняется следующее соотношение:

$$\frac{1}{2} m_e V_m^2 = eU_z \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) можно представить в виде

$$h\nu = A_B + eU_z. \quad (5)$$

Измерение U_z при известном значении V и h позволяет экспериментально определить A_B .

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА h

Постоянная Планка имеет исключительно большое значение и прямо или косвенно входит в большинство соотношений квантовой физики. Фундаментальный характер величины, ее место в квантовой теории ставит важной задачей ее экспериментальное определение. Существуют разные методы измерения постоянной h . Наиболее доступен метод, основанный на использовании явления внешнего фотоэффекта. При освещении фотокатода светом частоты ν имеем

$$h\nu_1 = A_B + \frac{mv_1^2}{2}$$

или

$$h\nu_1 = A_B + eU_1 \quad (5),$$

где U_1 – тормозящее напряжение

Повторим опыт, освещая фотокатод светом с частотой ν_2 . Для этого случая

$$h\nu_2 = A_B + \frac{mv_2^2}{2}$$

или

$$h\nu_2 = A_B + eU_2. \quad (6),$$

Решая систему уравнений (5) – (6) относительно h , получаем

$$h = \frac{(U_2 - U_1)e}{\nu_2 - \nu_1} \quad (7)$$

Зная значения ν_1 и ν_2 и измерив на опыте U_1 и U_2 , можно вычислить постоянную h .

Следует заметить, что при определении частот, соответствующих максимальной интенсивности света, падающей на фотокатод, возможно проявление так называемого избирательного или селективного фотоэффекта. В чем отличие селективного фотоэффекта от нормального? Характерной особенностью нормального фотоэффекта является плавность изменения силы фототока насыщения в зависимости от длины волны (частоты). Для получения сравнимых между собой результатов необходимо рассчитать, какой фототок приходится на единицу энергии излучения поглощенного активным веществом.

Если по осе абсцисс откладывать длину волны λ , а по оси ординат – фототок насыщения, соответствующий единицы поглощенной активным веществом энергии, то для нормального фотоэффекта наблюдается зависимость, показанная на рис. 7.

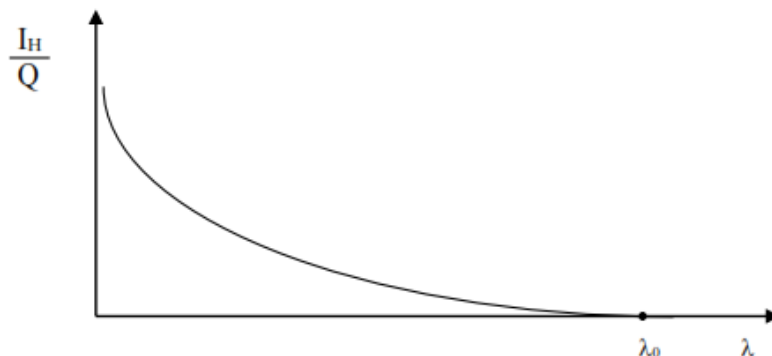


Рис. 7

График показывает, что при некоторой λ_0 (красная граница фотоэффекта) появляется фототок и сила фототока насыщения плавно возрастает по мере уменьшения λ .

Сущность селективного фотоэффекта заключается в том, что некоторые вещества при определенной для них длине волны λ_s испускает особенно много фотоэлектронов, причем число последних убывает как при увеличении λ , так и при ее уменьшении (рисунок 8). График приведен для калия; по осе ординат отложена сила фототока насыщения, рассчитанная на единицу поглощенной энергии.

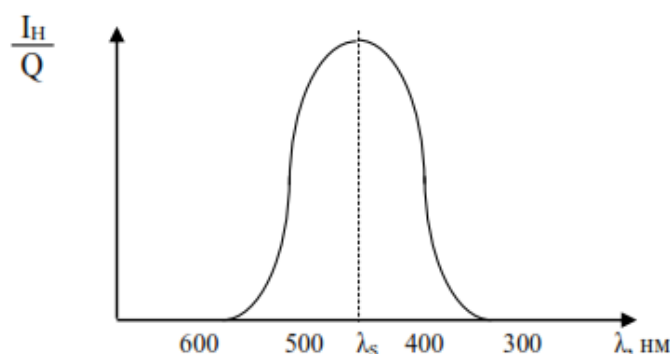


Рис. 8

Селективный фотоэффект может быть объяснен на основе явления резонанса. В атомах активного вещества, дающего резонансный эффект, электроны совершают колебания с некоторой определенной частотой. Если на это вещество падает излучение близкой частоты, то электроны энергию такого излучения будут усваивать более полно, благодаря чему у них может накопиться запас энергии, достаточный для того, чтобы покинуть вещество и стать фотоэлектронами.

Поэтому при выполнении работы желательно использовать светофильтры, коэффициент пропускания которых максимален в области длин волн, лежащих вблизи λ_s для конкретного фотоэлемента, используемого в работе. Соответствующие длины волн находятся из справочных данных. Коэффициент пропускания светофильтра также зависит от λ и определяется в настоящей работе экспериментально на спектрофотометре СФ-26. По имеющимся данным определяются частоты, соответствующие максимальной эффективности фототока.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Вакуумный фотоэлемент
2. Набор светофильтров
3. Спектрофотометр СФ-26
4. Источник постоянного тока, потенциометр, вольтметр, микроамперметр.

5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 9.

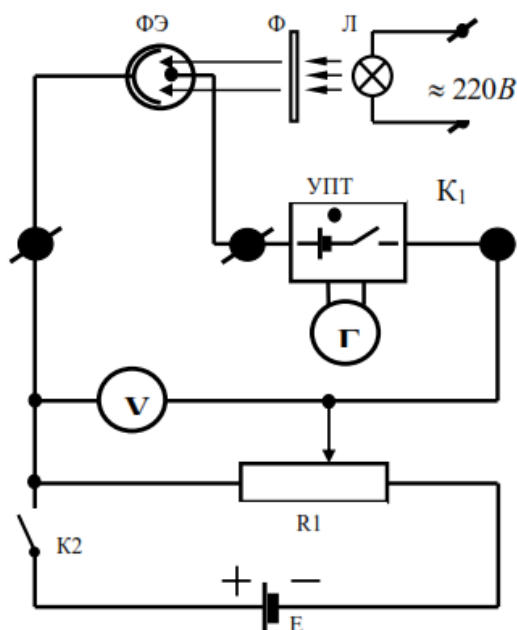


Рис. 9

Свет от источника света Л через светофильтр Ф падает на фотоэлемента ФЭ. В лабораторной работе используется сурьмяно-цезиевый фотоэлемент, для которого выполняется нормальный фотоэффект. От источника E нажатием кнопки К2 с потенциометра $R1$ подаем задерживающее напряжение U_3 на фотоэлемент до получения нулевого значения фототока. Нулевой ток фиксируется гальванометром Г, включенным последовательно с ФЭ. Для увеличения чувствительности гальванометра используется усилитель постоянного тока (УПТ), включаемый нажатием кнопки К1. Задерживающее напряжение измеряется вольтметром V.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы спектрофотометра СФ-26.
2. Для светофильтров используемых в работе (по указаниям преподавателя) построить графики коэффициентов пропускания света а зависимости от λ .
3. Проверить электрическую схему макета.
4. Включить питание УПТ ключом К1, переведя его в положение "Вкл".
5. В УПТ используются полупроводниковые германиевые транзисторы, поэтому установившийся режим работы наступает после прогрева схемы в течение 10-12 минут.
6. С помощью потенциометра установки нуля УН добиться нулевого значения тока через ФЭ. Отсутствие тока фиксируется гальванометром Г (сопротивление фотоэлемента в этом случае равно бесконечности.)
7. Поставить светофильтр, включить источник света. Нажав кнопку ключа К2 установить нулевое значение стрелки гальванометра ручкой R потенциометра и по показаниям вольтметра определить напряжение запираения U_{31} . Измерения провести 3 раза и занести в табл. 2.
8. Аналогично измерения провести с другим светофильтром,

9. Выключить источник света, питание УПТ ключом К1 и потенциометр ключом К2.

10. По формуле (7) рассчитать значение постоянной Планка.

11. По формуле (5) рассчитать значение работы выхода электронов для данного фотокатода.

Т а б л и ц а 2

№ n/n	λ_1		λ_2		H , (Дж с)	$A_{\text{в}}$ (эВ)
	U_{31}	$U_{32}^{\text{ср}}$	U_{31}	$U_{32}^{\text{ср}}$		
1						
2						
3						

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите виды фотоэффектов и дайте их формулировку.
2. Объясните существование потенциальной ямы для электронов в металле.
3. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта, дайте понятие работы выхода и красной границы фотоэффекта.
4. В чем заключается отличие спектрального эффекта от нормального?
5. Выведите формулу для экспериментального определения постоянной Планка.
6. Запишите формулу для определения работы выхода электронов из металла.

ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ МИКРОЧАСТИЦ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально проверить выполнение законов сохранения импульса и энергии.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс физики. В 3 т. Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. - Лань, 2008. – 352 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 19-е изд. - Академия, 2012. – 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- Академия, 2009. – 720 с.

3. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Фотографии с треками частиц.
2. Графики кривых в координатах «пробег - энергия».
3. Масштабная линейка, транспорир, калька.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Быстрая заряженная микрочастица, попадая в фотоэмульсию, нарушает на своем пути структуру кристаллической решетки зерен бромистого серебра и делает их способными к проявлению. Следы частиц в эмульсии (треки) при тщательном осмотре и промере под микроскопом позволяют получить информацию как о природе частиц, оставивших след, так и о характере элементарного процесса (рассеяние, ядерная реакция, распад частиц, рождение пар и т.д.). В данной работе изучается рассеяние α -частиц на протонах, являющихся ядрами атомов водорода, входящего в состав эмульсии.

Каждому значению энергии данной частицы соответствует определенная длина пробега. Для определения длины пробега частицы на фотографии треков наносят масштаб. Связь между энергиями α -частиц, протонов и длиной их пробега в данной эмульсии определяется с помощью кривых, приведенных на рис. 1.

На рис. 2 приведена схема столкновения α -частицы с протоном. Импульс α -частицы до взаимодействия равен $\vec{p}_\alpha = m_\alpha \vec{V}_\alpha$, после взаимодействия $\vec{p}'_\alpha = m_\alpha \vec{V}'_\alpha$. Импульс протона определяется выражением $\vec{p}_p = m_p \vec{V}_p$. Изменение направления движения α -частицы вследствие столкновения с протоном характеризуется углом рассеяния θ . Угол φ следа протона относительно начального направления движения α -частицы называется углом отдачи. Углы φ и θ называют также углами вылета.

Лабораторная работа состоит из трех этапов.

Первый этап - определение кинетических энергий частиц K после взаимодействия с помощью кривых «пробег - энергия».

Второй этап - определение импульсов частиц и проверка закона сохранения импульса для данного взаимодействия. Вычисление импульсов производится по формуле

$$p = \sqrt{2mK}, \quad (1)$$

где K - кинетическая энергия; m - масса частицы ($m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27}$ кг, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг). Так как m - масса нерелятивистской частицы, то вычисленный импульс также является нерелятивистским.

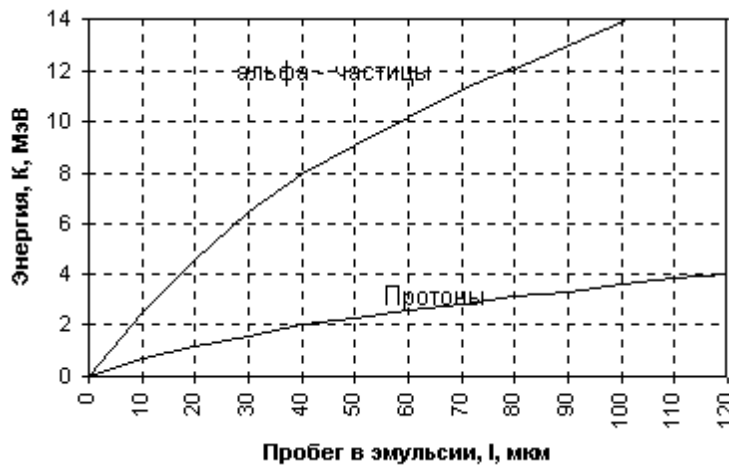


Рис. 1. Связь между энергиями α -частиц, протонов и длиной их пробега

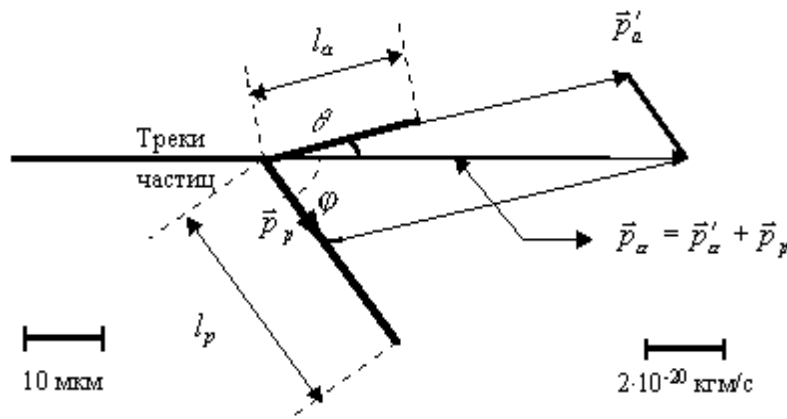


Рис. 2. Схема столкновения α -частицы с протоном

Для проверки закона сохранения импульса следует, пользуясь изготовленным на кальке сколом с фотографии, найти результирующий вектор импульса по правилу параллелограмма. Если его направление совпадает с направлением движения налетающей α -частицы, то закон сохранения импульса выполняется.

Третий этап - установление характера взаимодействия частиц (упругое или неупругое) исходя из сохранения кинетической энергии. Энергия α -частицы до столкновения с протоном (K_α) может быть определена по формуле

$$K_\alpha = \frac{p_\alpha^2}{2m_\alpha}, \quad (2)$$

где p_α - импульс α -частицы до взаимодействия с протоном. Его можно выразить через импульс частицы после взаимодействия, используя теорему синусов:

$$p_{\alpha} = \frac{p'_{\alpha} \sin(\varphi + \theta)}{\sin \varphi}. \quad (3)$$

Поэтому

$$K_{\alpha} = \frac{K'_{\alpha} \sin^2(\varphi + \theta)}{\sin^2 \varphi}, \quad (4)$$

где K'_{α} - найденная ранее энергия α -частицы после взаимодействия. Если $K_{\alpha} = K'_{\alpha} + K_p$, то взаимодействие частиц имеет упругий характер.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Определение энергии частиц после столкновения.

5.1.1. Подготовить таблицу для записи результатов измерений и расчетов.

5.1.2. По фотографии определить длины треков и длину масштабной единицы. Вычислить пробег частиц в эмульсии (1). Учесть погрешность измерений (пункт 6.1).

5.1.3. Пользуясь кривыми «пробег - энергия» (рис. 1) найти энергию частиц (в МэВ) после взаимодействия. Учесть погрешность измерений (пункт 6.2).

5.2. Определение импульса частиц и проверка закона сохранения импульса.

5.2.1. Выразить энергию частиц (в Дж).

Т а б л и ц а 1

Частица	l	Δl	K'	$\Delta K'$	K'	$\Delta K'$
	мкм	мкм	МэВ	МэВ	10^{-13} Дж	10^{-13} Дж
α						
p						
Частица	p	Δp	θ, φ	$\Delta \varphi = \Delta \theta$	K_{α}	ΔK_{α}
	10^{-20} кг·м/с	10^{-20} кг·м/с	град		МэВ	МэВ
α						
p						

5.2.2. Сделать на кальке сколок с фотографии треков взаимодействующих частиц.

5.2.3. Измерить углы вылета частиц θ и φ .

5.2.4. По формуле (1) вычислить значения импульсов частиц.

5.2.5. Вычислить абсолютные ошибки измерения импульсов частиц (пункт 6.3).

5.2.6. Построить на кальке в масштабе (например, 10^{-20} кг·м/с - 5 мм) импульсы частиц. По правилу параллелограмма найти суммарный импульс $\vec{p}'_{\alpha} + \vec{p}_p$.

5.2.7. Продолжить след α -частицы. Если это продолжение совпадает с $\vec{p}'_{\alpha} + \vec{p}_p$, можно утверждать, что закон сохранения импульса выполняется.

5.3. Установление характера взаимодействия.

5.3.1. Вычислить кинетическую энергию α -частицы до взаимодействия по формуле (4).

5.3.2. Вычислить относительную и абсолютную погрешности энергии α -частицы до столкновения (пункт 6.4). Результаты вычислений занести в таблицу.

5.3.3. Найти сумму энергий частиц после взаимодействия. Сравнить энергию α -частицы до взаимодействия и сумму энергий протона и α -частицы после взаимодействия. Сделать вывод о характере взаимодействия.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

6.1. Выполняя прямые измерения, считают, что абсолютная ошибка измеряемой величины равна половине цены деления измерительного прибора. Так, если измеренные углы вылета и пробег частиц в эмульсии имеют значения $\theta = 14^\circ$, $l_\alpha = 20$ мкм для α -частицы и $\varphi = 55^\circ$, $l_p = 30$ мкм для протона, то $\Delta\theta = \Delta\varphi = 0,5^\circ$, а $\Delta l_\alpha = \Delta l_p = 0,5$ мкм, если масштабная единица (10 мкм) имеет длину 1 см.

6.2. Пользуясь графиками «пробег - энергия», определить абсолютную ошибку измерения энергии, учитывая абсолютную ошибку измерения пробега. Для рассматриваемого случая

$$K'_\alpha = (4,5 \pm 0,1) \text{ МэВ} = (7,20 \pm 0,16) \cdot 10^{-13} \text{ Дж};$$

$$K_p = (1,60 \pm 0,04) \text{ МэВ} = (2,56 \pm 0,06) \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

6.3. Вычислить абсолютную ошибку определения импульсов частиц. Поскольку относительную ошибку величины, заданной выражением $x = \sqrt[n]{A}$, на-

ходят по формуле $\frac{\Delta x}{x} = \pm \frac{1}{n} \frac{\Delta A}{A}$, то относительная ошибка определения импуль-

са (формула (1)) имеет вид $\frac{\Delta p}{p} = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta K}{K}$. Границы абсолютной ошибки

$\Delta p = \pm \frac{1}{2} p \frac{\Delta K}{K}$. Подставив численные значения соответствующих величин для

рассматриваемого случая ($p'_\alpha = 9,78 \cdot 10^{-20}$ кг·м/с, $p_p = 2,92 \cdot 10^{-20}$ кг·м/с), получаем

$$\Delta p'_\alpha = \pm 0,1 \cdot 10^{-20} \text{ кг·м/с и } \Delta p_p = 0,04 \cdot 10^{-20} \text{ кг·м/с}.$$

6.4 Вычислить относительную и абсолютную ошибки энергии α -частицы до столкновения (K_α). Для этого, воспользовавшись методом определения погрешностей косвенных измерений, прологарифмировать формулу (4), продифференцировать полученные выражения и заменить дифференциалы погрешностями соответствующих величин. В результате получим:

$$\frac{\Delta K_\alpha}{K_\alpha} = \pm \left(\frac{\Delta K'_\alpha}{K'_\alpha} + 2 \operatorname{ctg}(\varphi + \theta) \Delta(\varphi + \theta) + 2 \operatorname{ctg} \varphi \cdot \Delta \varphi \right).$$

Для рассматриваемого случая, учитывая, что $\Delta\varphi = \Delta\theta \approx 0,01$ рад, а следовательно, $\Delta(\varphi + \theta) = 0,02$ рад, находим $\frac{\Delta K_\alpha}{K_\alpha} = \pm 0,05$ (5%). Отсюда $\Delta K_\alpha = \pm 0,3$ МэВ и $K_\alpha = (5,8 \pm 0,3)$ МэВ.

6.5. Проверить, выполняется ли равенство

$$K_\alpha \pm \Delta K_\alpha = (K'_\alpha + K_p) \pm (\Delta K'_\alpha + \Delta K_p).$$

В рассматриваемом случае это равенство справедливо в пределах погрешностей эксперимента:

$$(5,8 \pm 0,3) \text{ МэВ} = (6,10 \pm 0,14) \text{ МэВ}.$$

6.6. Сделать выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем суть фотоэмульсионного метода регистрации микрочастиц?
2. Сформулируйте закон сохранения импульса. Как проверить, выполняется ли этот закон при столкновении микрочастиц?
3. Какие законы сохранения выполняются при абсолютно упругом и неупругом столкновениях?
4. Выведите формулу для расчета энергии α -частицы до столкновения с протоном.
5. Выведите формулу для расчета абсолютной ошибки определения импульса.
6. Выведите формулу для расчета абсолютной ошибки энергии α -частицы до столкновения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 22 (7 В)

ЭФФЕКТ КОМПТОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить эффект Комптона с помощью компьютерного эксперимента.
2. Определить зависимость изменения длины волны падающего излучения от угла рассеяния.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М. : Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1982. - 304 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 ЭФФЕКТ КОМПТОНА

В конце XVII века почти одновременно возникли две теории о природе света. Ньютон предложил **теорию истечения**, согласно которой свет представляет собой поток световых частиц (корпускул), летящих от светящегося тела по прямолинейным траекториям. Гюйгенс выдвинул **волновую теорию**, в которой свет рассматривался как упругая волна, распространяющаяся в мировом эфире.

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комптон, исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также излучение более длинных волн. Опыты показали, что разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только величиной угла рассеяния θ .

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2(\theta/2), \quad (1)$$

где λ' – длина волны рассеянного излучения, λ_C – комптоновская длина волны, (при рассеянии фотона на электроне $\lambda_C = 2,426$ пм).

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

Объяснение эффекта Комптона дано на основе квантовых представлений о природе электромагнитных волн. Если считать, как это делает квантовая теория, что излучение представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона - результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными элек-

тронами вещества (для легких атомов электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их в первом приближении можно считать свободными). В процессе этого столкновения фотон передает электрону часть своих энергии и импульса в соответствии с законами их сохранения.

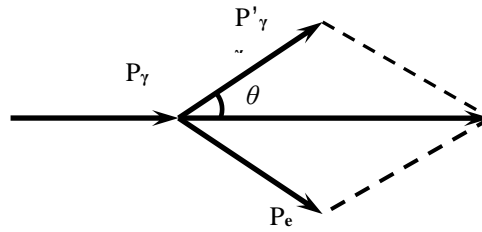


Рис. 1

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц (рис. 1) – налетающего фотона, обладающего импульсом $p_\gamma = \hbar v/c$ и энергией $\varepsilon_\gamma = \hbar v$, с покоящимся свободным электроном (энергия покоя $W_0 = m_0 c^2$; m_0 - масса покоя электрона). Фотон, столкнувшись с электроном, передает ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается). Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. Пусть импульс и энергия рассеянного фотона равны $p'_\gamma = \hbar v'/c$ и $\varepsilon'_\gamma = \hbar v'$. Электрон, ранее покоившийся, приобретает импульс $p_e = mv$, энергию $W = mc^2$ и приходит в движение – испытывает отдачу. При каждом таком столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

Согласно закону сохранения энергии,

$$\hbar\omega + m_0 c^2 = \hbar\omega' + mc^2, \quad (2)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Согласно закону сохранения импульса,

$$\hbar k = mv + \hbar k', \quad (3)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Разделив первое уравнение на c , можно привести его к виду

$$mc = m_0 c + \hbar(k - k'). \quad (4)$$

Возведение этого уравнения в квадрат дает:

$$(mc)^2 = (m_0 c)^2 + (\hbar k)^2 + (\hbar k')^2 - 2(\hbar k)(\hbar k') + 2m_0 c \hbar(k - k'). \quad (5)$$

Из рис. 1 следует, что

$$(mv)^2 = (\hbar k)^2 + (\hbar k')^2 - 2(\hbar k)(\hbar k') \cos \theta. \quad (6)$$

Вычтя уравнение (6) из уравнения (5), получим:

$$m^2(c^2 - v^2) = m_0^2 c^2 - 2\hbar^2 k k' (1 - \cos \theta) + 2m_0 c \hbar(k - k'). \quad (7)$$

Можно убедиться, что $m^2(c^2 - v^2) = m_0^2 c^2$, и тогда все приходит к равенству:

$$m_0 c(k - k') = \hbar k k' (1 - \cos \theta). \quad (8)$$

Умножив равенство на 2π , разделив на $m_0 c k k'$ и учтя, что $2\pi/k = \lambda$, получим формулу

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (9)$$

Выражение (9) есть не что иное, как полученная экспериментально Комптоном формула (1). Подстановка в нее значений h , m_0 и c дает комптоновскую длину волны электрона $\lambda_C = h/(m_0 c) = 2,426$ пм.

Наличие в составе рассеянного излучения «несмещенной» линии (излучения первоначальной длины волны) можно объяснить следующим образом. При рассмотрении механизма рассеяния предполагалось, что фотон соударяется лишь со свободным электроном. Однако если электрон сильно связан с атомом, как это имеет место для внутренних электронов (особенно в тяжелых атомах), то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Так как масса атома по сравнению с массой электрона очень велика, то атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона. Поэтому в данном случае длина волны λ' рассеянного излучения практически не будет отличаться от длины волны λ падающего излучения.

Эффект Комптона наблюдается не только на электронах, но и на других заряженных частицах, например протонах, однако из-за большой массы протона его отдача «просматривается» лишь при рассеянии фотонов очень высоких энергий.

3.2. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент позволяет изменять угол рассеяния и длину волны падающего излучения. Компьютерная программа предусматривает расчет длины волны рассеянного излучения, вывод на монитор векторной диаграммы импульсов фотона и покоящейся частицы до и после взаимодействия, а также графика относительных интенсивностей падающей и рассеянной волны в зависимости от заданных длины волны падающего излучения и угла рассеяния.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Открытая физика 1.1» ООО «Физикон».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Установите программу «Открытая физика» на компьютер.
2. Запустите установленную программу, в разделе «Содержание» откройте закладку «Квантовая физика», выберите компьютерную модель «Комптовское рассеивание», рис. 2.
3. Установите начальные значения угла рассеяния и длины волны λ падающего излучения θ : 30° и 0,03 нм, соответственно. Нажмите «Старт» и наблюдайте эффект Комптона. Проанализируйте полученный график относительных интенсивностей падающей и рассеянной волны.
4. В соответствии с исходными данными табл. 1 определите длину волны рассеянного излучения λ' в зависимости от угла рассеяния θ и длины волны падающего излучения λ . Полученные данные занесите в таблицу.

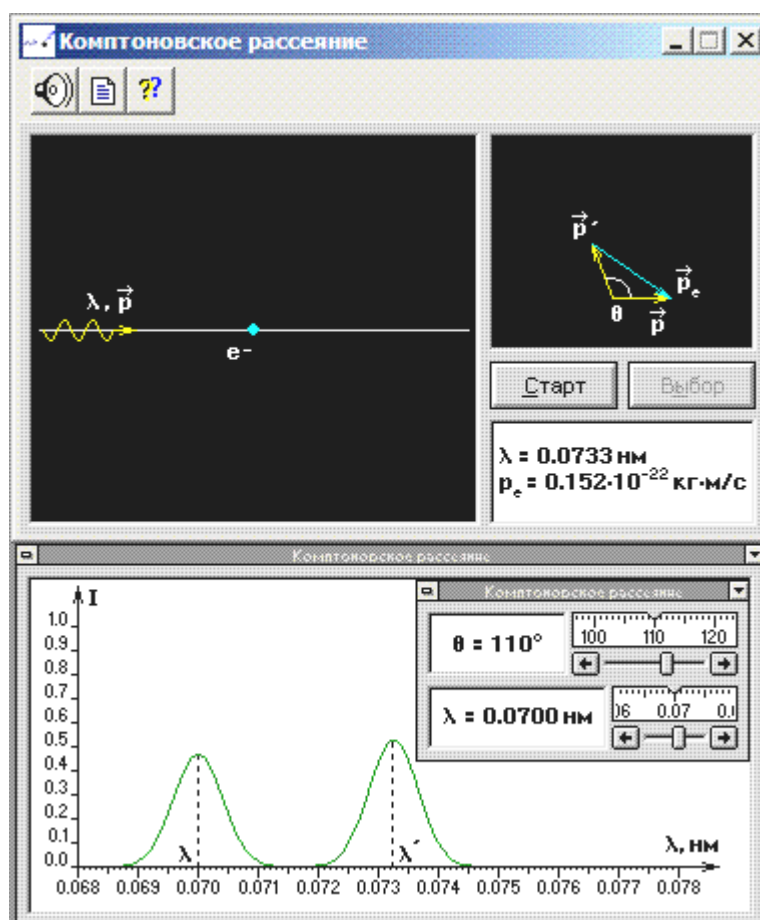


Рис. 2. Модель «Комптоновское рассеивание»

5. Определите изменение длины волны $\Delta\lambda$ для каждого угла рассеяния θ и занесите в последнюю строку табл. 1.

Т а б л и ц а 1

θ	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°
λ , нм									
0,03									
0,04									
0,05									
0,06									
0,07									
0,08									
0,09									
0,1									
$\Delta\lambda$									

6. Сделайте вывод о зависимости изменения длины волны $\Delta\lambda$ от угла рассеяния θ .

7. Для длины волны падающего излучения 0,03 нм при всех заданных углах рассеяния θ взять из табл. 1 значения λ' и $\Delta\lambda$, рассчитать $\sin(\theta/2)$, $\sin^2(\theta/2)$ и занести полученные данные в табл. 2.

8. По данным табл. 2 построить зависимость изменения длины волны $\Delta\lambda$ от $\sin^2(\theta/2)$.

9. Выразите из формулы (9) $\lambda_k = \frac{2h}{m_0 c} \tan(\theta/2)$ и, используя график, рассчитайте комптоновскую длину волны для электрона как \tan угла наклона полученной прямой.

Т а б л и ц а 2

θ	$\theta/2$	$\sin(\theta/2)$	$\sin^2(\theta/2)$	λ , нм	λ' , нм	$\Delta\lambda$, нм
30						
45						
60						
75						
90						
105						
120						
135						
150						

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите примеры явлений, подтверждающих волновую теорию природы света, и примеры, подтверждающие корпускулярную теорию.
2. Что называется эффектом Комптона?
3. Какие законы выполняются при упругом рассеянии света на свободных электронах? Запишите их.
4. Получите выражение для изменения длины волны падающего излучения.
5. Получите математическое выражение и рассчитайте комптоновскую длину волны электрона.
6. От чего зависит величина изменения длины волны падающего излучения?

ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Исследование распределения скоростей электронов до и после соударения их с атомами и молекулами разреженного газа.
2. Исследование и анализ упругого и неупругого соударения электронов с молекулами разреженного газа.
3. Изучение вольтамперной характеристики установки Франка Герца. Доказательство дискретности энергетических уровней атомов. Проверка постулатов Бора.

2. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 2-е изд. - М.: Высш. шк., 1990. - 478 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов. - В 3 т. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. - М.: Наука, 1982. - 304 с.
3. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

3.1. ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

В основе современной теории атома лежит экспериментальный факт, установленный в опытах Джеймса Франка и Густава Герца в 1914 г. В этих опытах исследовалось распределение скоростей электронов до и после соударения их с атомами и молекулами разреженного газа. Было найдено, что при скоростях электронов, меньших некоторой критической скорости, соударение происходит вполне упруго – электрон не передает атому своей энергии, а изменяет лишь направление импульса. При скоростях, достигающих некоторой критической скорости, столкновение электрона с атомом становится неупругим – электрон теряет всю энергию, передавая ее атому, который после этого переходит в другое состояние с большей энергией. Отсюда следовало, что атом либо вообще не воспринимает энергию, либо воспринимает ее в количествах, равных разности энергий в двух стационарных состояниях, характерной для данного атома.

Схема установки Франка - Герца показана на рис. 1. В вакуумный баллон (трубку) впаяны термокатод K , сетки C и анод A . Трубку заполняли парами исследуемых веществ (ртути, гелия и др.) под небольшим давлением (~ 1 мм рт. ст.). Электроны, вылетевшие из катода, ускорялись разностью потенциалов $U(I)$, приложенной между катодом K и сеткой C_1 . Эта разность потенциалов регулируется потенциометром $П1$. Между сеткой C_2 и анодом A включается источник постоянного напряжения примерно 0,5 В. Этот источник создает электрическое поле, задерживающее электроны при их движении к аноду. При этом анод достигают только те электроны, энергия которых больше величины энергии задерживающего потенциала.

$$E = eU . \quad (1)$$

Исследовалась зависимость тока I , регистрируемого гальванометром (микроамперметром) G , помещенным в цепь анода A , от напряжения U .

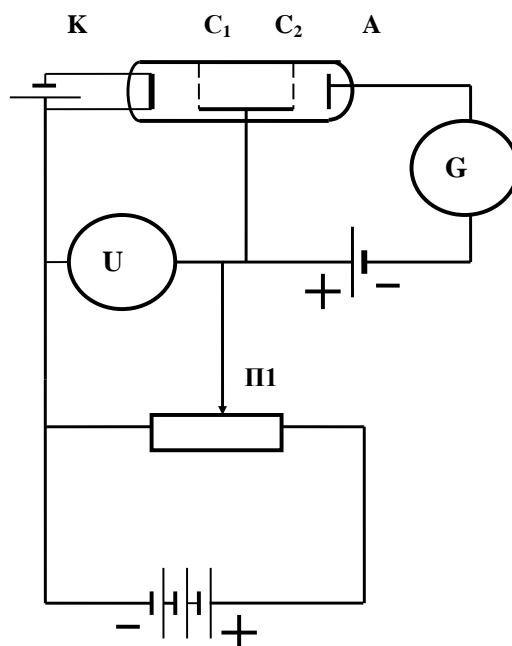


Рис.1. Схема установки Франка и Герца

Полученный результат для случая с парами ртути показан на рис. 2.

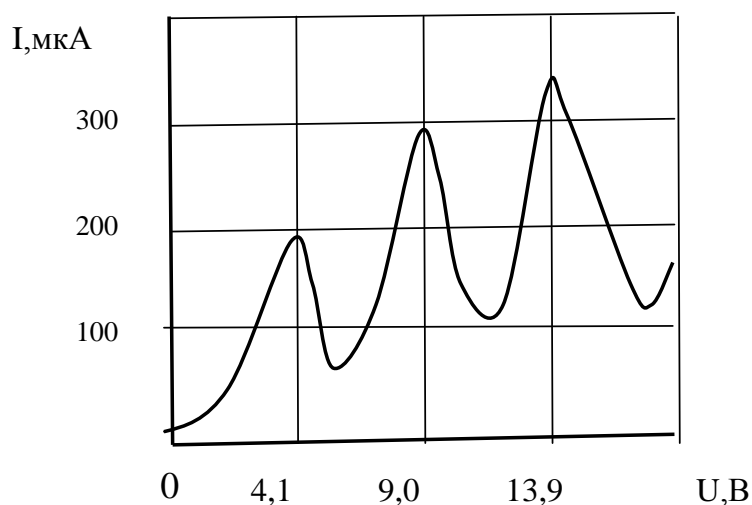


Рис. 2. Зависимость силы тока от напряжения

Максимумы тока I наблюдались при потенциалах $U = 4,1; 9,0; 13,9$ В. Разность между этими значениями постоянна и равна $4,9$ В (с точностью до $0,1$ В). Если к приложенному извне ускоряющему потенциалу прибавить контактную разность потенциалов, которая в опыте равнялась $0,8$ В, то получается ряд значений энергий электрона $E = 4,9; 9,8; 14,7$ эВ, в котором первое значение совпадает с разностью между соседними значениями. Максимумы на кривой рисунка 2 имеют простое истолкование. Пока энергия электронов меньше $4,9$ эВ, они испытывают с атомами ртути упругие соударения, их энергия достаточна

для преодоления разности потенциалов между электродами C и A и ток возрастает с увеличением потенциала по обычному закону. При потенциалах, кратных 4,9 В, удары становятся неупругими, электроны отдают всю свою энергию атомам ртути и задерживаются сеткой. В результате ток в цепи анода резко падает. Если энергия электронов заметно превосходит величину, кратную 4,9 эВ, то такие электроны, потеряв часть своей энергии при неупругом столкновении с атомами ртути, сохраняют достаточно энергии для преодоления задерживающего напряжения и ток начинает возрастать.

Ускоряющий потенциал 4,9 В называется резонансным потенциалом атома ртути. Атом любого химического элемента характеризуется своим значением резонансного потенциала.

Дальнейшие исследования показали, что у атомов данного сорта существует не одно дискретное возбужденное состояние, а множество таких состояний. У атома ртути, например, кроме резонансного потенциала 4,9 В имеется второй критический потенциал 6,7 В.

Таким образом, опыты Франка и Герца показали, что энергия атомов изменяется дискретно. Тем самым было получено экспериментальное подтверждение постулатов Бора.

3.2 КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Компьютерный эксперимент опыта Франка и Герца позволяет исследовать зависимость силы тока от приложенного напряжения, проанализировать полученные вольтамперные характеристики. При проведении эксперимента на экран дисплея выводятся данные о приложенном напряжении и возникшем электрическом током.

4. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Компьютер.
2. Программа «Frank & Hertz», выполненная для компьютерного моделирования физических опытов Дж. Франка и Г. Герца для подтверждения постулатов Бора.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установите компьютерную программу «Frank & Hertz» на ЭВМ.
2. Запустите программу, используя ярлык расположенный на рабочем столе, в меню программы выберите пункт «Опыт» рис. 3.
2. Пользуясь компьютерной программой, снимите зависимость анодного тока от величины ускоряющего потенциала между катодом K и сеткой C_1 . Ускоряющее напряжение на компьютере можно изменять с помощью клавиш управления курсором \leftarrow и \rightarrow . Напряжение следует изменять в диапазоне от 0 до 15 В через каждые 0,5 В, а в области максимумов – через 0,2 В, записывая показания вольтметра и гальванометра в табл. 1.



Рис. 3. Модель «Опыт Франка и Герца»

3. Постройте график зависимости величины анодного тока от ускоряющего напряжения. Определите из графика потенциал возбуждения атомов ртути.

Т а б л и ц а 1

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В										
I, мкА										

Номер опыта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U, В										
I, мкА										

Номер опыта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U, В										
I, мкА										

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие законы сохранения выполняются при упругом и неупругом соударениях тел?

2. Что называется абсолютно упругим и неупругим ударами?

3. Объясните, на каких участках вольтамперной характеристики (рис. 2) имеют место упругие и на каких – неупругие столкновения электронов с атомами?

4. Какова длина волны линии излучения при переходе электрона в атоме ртути из первого возбужденного состояния в основное?

5. Сформулируйте постулаты Бора.

6. С помощью постулатов Бора получите выражения для определения скорости, радиуса и энергии движущегося электрона в атоме водорода и водородоподобных атомов.

7. Опишите схему установки Франка и Герца, поясните смысл опытов Франка и Герца и дайте пояснения результатов этих опытов.

8. С какой целью на электрод А (на коллектор А) подается задерживающее напряжение и из каких соображений оно выбирается?

9. Как проявляется контактная разность потенциалов в опыте Франка и Герца?

П Р И Л О Ж Е Н И Я

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная Авогадро $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.
 Постоянная Больцмана $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.
 Универсальная газовая постоянная $R = 8,31441$ Дж/(моль·К).
 Элементарный электрический заряд $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл.
 Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.
 Скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с.
 Постоянная Планка $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с;
 $\hbar = 1,0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $6,59 \cdot 10^{-16}$ эВ·с.
 Масса покоя электрона $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.
 Энергия покоя электрона $E_{0e} = 0,511$ МэВ.
 Масса покоя протона $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,0072776470$ а.е.м.
 Энергия покоя протона $E_{0p} = 938,26$ МэВ.
 Масса покоя нейтрона $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,008665012$ а.е.м.
 Энергия покоя нейтрона $E_{0n} = 939,55$ МэВ.
 Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.
 Постоянная Фарадея $F = N_A \cdot e = 9,648456 \cdot 10^4$ Кл/моль.
 Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).
 Постоянная Вина $b = 0,00289782$ м·К.
 Постоянная Ридберга $R_\infty = 10973731,77$ м⁻¹.
 Радиус первой боровской орбиты $a_0 = 0,529117706 \cdot 10^{-10}$ м.
 Комптоновская длина волны электрона $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м.
 Магнетон Бора $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл.
 Энергия ионизации атома водорода $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж.

Относительная атомная масса некоторых изотопов*, а.е.м.

Изотоп	Масса нейтрального атома	Изотоп	Масса нейтрального атома
${}_1\text{H}^1$ (водород)	1,00783	${}_5\text{B}^{10}$ (бор)	10,01294
${}_1\text{H}^2$ (дейтерий)	2,01410	${}_5\text{B}^{11}$ (бор)	11,00931
${}_1\text{H}^3$ (тритий)	3,01605	${}_6\text{C}^{12}$ (углерод)	12,00000
${}_2\text{He}^3$ (гелий)	3,01602	${}_7\text{N}^{14}$ (азот)	14,00307
${}_2\text{He}^4$ (гелий)	4,00260	${}_7\text{N}^{15}$ (азот)	15,00011
${}_3\text{Li}^6$ (литий)	6,01513	${}_8\text{O}^{16}$ (кислород)	15,99491
${}_3\text{Li}^7$ (литий)	7,01601	${}_8\text{O}^{17}$ (кислород)	16,99913
${}_4\text{Be}^8$ (бериллий)	8,00531	${}_{13}\text{Al}^{27}$ (алюминий)	26,98146

* Для нахождения массы ядра необходимо вычесть суммарную массу электронов.

Пробег α -частиц в различных веществах

Радиоактивный изотоп	Период полураспада радиоактивного изотопа	Энергия частицы, МэВ	Длина пробега частицы, см	
			в воздухе	в мягкой биологической ткани
^{210}Po	138,4 сут	5,3	3,8	0,0045
^{212}Po	$3 \cdot 10^{-7}$ с	8,8	8,6	0,0105
^{226}Ra	1662 года	4,8	3,3	0,0040
^{222}Rn	3,83 сут	5,5	4,0	0,0049
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	4,0	2,5	0,0031
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ лет	4,2	2,7	0,0034
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$ лет	5,2	3,7	0,0043

Пробег β -частиц в различных веществах

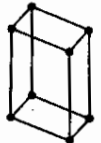
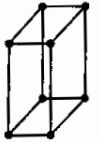
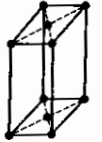
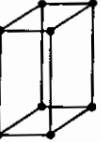

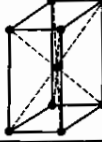
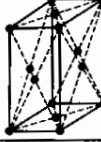


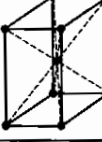
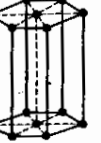
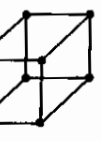

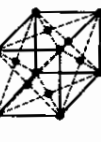
Радиоактивный изотоп	Период полураспада радиоактивного изотопа	Энергия частицы, МэВ	Длина пробега β -частицы, см		
			в воздухе	в мягкой биологической ткани	в алюминии
^{14}C	5530 лет	0,155	22	0,02	0,008
^{32}P	14,3 сут	1,71	610	0,92	0,01
^{35}S	87,9 сут	0,167	28	0,02	0,01
^{45}Ca	165 сут	0,255	47	0,06	0,02
^{60}Co	5,26 года	0,310	62	0,09	0,029
^{204}Tl	3,56 года	0,76	217	0,35	0,11

Длина волн де Бройля

В таблице приведены длины волн λ де Бройля для некоторых движущихся частиц и тел. Масса и скорость частиц и тел обозначены соответственно буквами m и V .

Частица, тело	m , кг	V , м/с	λ	
			м	в других единицах
Электрон, обладающий энергией 100 эВ	$9,11 \cdot 10^{-31}$	$5,94 \cdot 10^6$	$1,23 \cdot 10^{-10}$	0,123 нм
Электрон, обладающий энергией 1000 эВ	$9,1 \cdot 10^{-31}$	$18,75 \cdot 10^6$	$3,88 \cdot 10^{-11}$	$\approx 0,039$ нм
Нейтрон тепловой	$1,67 \cdot 10^{-27}$	$2,2 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	0,18 нм
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	$13,86 \cdot 10^4$	$2,86 \cdot 10^{-12}$	2,86 нм
Альфа-частица, вылетающая из ядра радия	$6,6 \cdot 10^{-27}$	$1,5 \cdot 10^7$	$6,6 \cdot 10^{-15}$	6,6 фм
Пылинка	10^{-15}	0,01	$6,6 \cdot 10^{-17}$	66,0 ам
Пуля	$9 \cdot 10^{-3}$	860	$8,5 \cdot 10^{-35}$	
Теннисный мяч	$58 \cdot 10^{-3}$	25	$4,6 \cdot 10^{-34}$	
Снаряд 76-миллиметровой пушки образца 1942 г.	6,2	680	$1,6 \cdot 10^{-37}$	

14 решеток Браве

Сингония	Тип решетки			
	Примитивная	Базоцентрированная	Объемно-центрированная	Гранецентрированная
Триклинная	 P			
Моноклинные	 P	 C		
Ромбическая	 P	 C	 I	 F
Тригональная (ромбоэдрическая)	 R			
Тетрагональная	 P		 I	
Гексагональная	 P			
Кубическая	 P		 I	 F

Плотность ρ металлов (при $t = 20^\circ\text{C}$)

Металл	ρ , кг/м ³	Металл	ρ , кг/м ³	Металл	ρ , кг/м ³
Алюминий	2 698,9	Кобальт	8900	Плутоний	19860
Бериллий	1847,7	Литий	534	Ртуть	13546,2
Бор	2340	Магний	1738	Свинец	11350
Ванадий	6110	Марганец	7440	Серебро	10500
Висмут	9800	Медь	8900	Тантал	16600
Вольфрам	19350	Молибден	10200	Титан	4500
Германий	5323	Натрий	968,4	Торий	11720
Железо	7874	Никель	8900	Уран	18950
Золото	19320	Ниобий	8570	Хром	7190
Индий	7310	Олово	7298	Цезий	1870
Иридий	22400	Осмий	22570	Цинк	7140
Калий	862	Платина	21450	Цирконий	6510

Характеристики элементарных полупроводников со структурой типа алмаза

Элемент	Параметр решетки, нм	Температура плавления, °С	Ширина запрещенной зоны, эВ
Алмаз	0,357	-	5,6
Кремний	0,543	1420	1,21
Германий	0,566	936	0,78
Серое олово	0,649	232	0,08

Физические свойства некоторых полупроводниковых материалов

В таблице приняты обозначения: ρ - плотность; $t_{пл}$ - температура плавления; α - температурный коэффициент линейного расширения; ε_0 - ширина запрещенной зоны; μ_e - подвижность электронов; μ_d - подвижность дырок.

Вещество	ρ , кг/м ³	$t_{пл}$, °С	$\alpha \cdot 10^{-6}$ °С	ε_0 , эВ	μ_e , м ² /(В·с)	μ_d , м ² /(В·с)
Ge	5326	937	5,75	0,66	0,39	0,19
Si	2328	1417	2,4	1,107	0,16	0,05
Se	4800	219	47	1,79	-	0,0001
Te	6250	452	16,8	0,33	0,17	0,08
GaAs	5317	1238	6,0	1,428	0,8	0,04
GaSb	5614	712	6,9	0,78	0,4	0,065
InAs	5667	942	5,19	0,356	2,26	0,02
ZnS	4089	1830	6,2	3,6	0,014	0,0005 (700 K)
ZnSe	5260	1520	1,9	2,7	0,053	0,0028
PbS	7610	1113	26	0,41	0,06	0,06
PbTe	6450	924	19,8	0,32	0,17	0,084

Примечания

1. К полупроводникам относят вещества, удельная электропроводность (σ) которых имеет при комнатной температуре промежуточное значение между удельной электропроводностью металлов ($\sigma \approx 10^8 \dots 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) и хороших диэлектриков ($\sigma \approx 10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$).

2. Кремний играет и в ближайшем будущем будет играть основную роль в полупроводниковых устройствах. Однако в ряде ответственных физических и технических устройств кремний вытесняется арсенидом галлия (GaAs): у последнего высокая подвижность электронов, большая, чем у кремния, ширина запрещенной зоны, в 3 раза большая устойчивость к воздействию радиации и большая термическая устойчивость (верхний предел стабильной рабочей температуры составляет до 200 °С против 125 °С у кремния). КПД фотопреобразователей на GaAs достигает 20 %, а на Si \approx 15 %.

Красная граница λ_0 фотоэффекта

Вещество	λ_0 , нм	Вещество	λ_0 , нм
Алюминий	450	Оксид бария	1235
Барий	484	Оксид меди (1)	239
Барий на вольфраме	1130	Парафин	215
Висмут	330	Платина	230
Вода	200	Ртуть	260
Вольфрам	272	Рубидий	573
Германий	272	Свинец	310
Железо	287	Селен	220
Золото	285	Сера	230
Кадмий	320	Серебро	260
Калий	550	Сурьма	310
Кальций	370	Сурьмяно-цезиевый катод	670
Кислородно-цезиевый катод	1400	Торий на вольфраме	473
Литий	500	Цезий	620
Магний	330	Цезий на вольфраме	909
Медь	270	Цезий на платине	895
Натрий	540	Цинк	290
Никель	249		

Основные характеристики фотодиодов

Марка фотодиода	Область спектральной чувствительности, мкм	Длина волны максимальной чувствительности, мкм	Интегральная чувствительность, мА/лм	Темновой ток, мкА	Пороговый поток, лм
ФД-1	0,4-0,6	1,6	20	30	$1,5 \cdot 10^{-10}$
ФД-К1	0,5-1,2	1,0	3,0	3,0	$3 \cdot 10^{-10}$
ФД-А2	0,5-1,2	1,0	6-7	3,0	$2,5 \cdot 10^{-13}$
ФД-8К	0,5-1,2	1,0	$8 \cdot 10^{-6}$	1,0	$1,4 \cdot 10^{-10}$
ФТ-1	0,4-1,9	1,6	170-500	300	$5 \cdot 10^{-7}$
ФТГ-2А	0,4-1,9	1,6	1000	50	$2,5 \cdot 10^{-7}$

Работа выхода электронов

Вещество	Работа выхода, эВ	Вещество	Работа выхода, эВ	Вещество	Работа выхода, эВ
Алюминий	4,25	Магний	3,64	Ртуть	4,52
Барий	2,49	Медь	4,4	Рубидий	2,16
Бериллий	3,92	Молибден	4,3	Свинец	4,0
Бор	4,5	Калий	2,22	Селен	4,72
Ванадий	4,58	Кальций	2,80	Серебро	4,3
Висмут	4,4	Кобальт	4,41	Сурьма	4,8
Вольфрам	4,54	Кремний	4,8	Таллий	3,7
Германий	4,76	Литий	2,38	Тантал	4,12
Железо	4,31	Натрий	2,35	Торий	3,30
Золото	4,30	Никель	4,50	Углерод	4,7
Индий	3,8	Ниобий	3,99	Уран	3,3
Иридий	4,7	Олово	4,38	Цезий	1,81
Кадмий	3,8	Осмий	4,7	Цинк	4,24
		Платина	5,32	Цирконий	3,9

Параметры фоторезисторов

Материал чувствительного элемента	Длина волны максимальной чувствительности, мкм	Граница рабочего диапазона, мкм	Рабочая температура, К	Обнаружительная способность $\text{Вт}^{-1} \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{см}$	Постоянная времени, с
PbS	2,1	2,7	300	$4,5 \cdot 10^8$	10^{-4}
PbS	2,7	3,5	78	$4 \cdot 10^9$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
PbTe	4,1	6,0	78	$4 \cdot 10^8$	$0,25 \cdot 10^{-4}$
PbSe	2,3-3,4	5,5	78	$2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{-5}$
InSb	5,5	5,7	78	$8,6 \cdot 10^9$	10^{-6}
Ge: Au	6	9	78	$7,5 \cdot 10^9$	10^{-6}
Ge: Zn	36	40	4,2	$4 \cdot 10^9$	10^{-8}
Hg-Cd-Te	10,6	15	300	10^{10}	10^{-8}