

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Методические указания к лабораторной работе № 78

по дисциплине «Физика»

Уфа 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Методические указания к лабораторной работе № 78

по дисциплине «Физика»

Уфа 2015

Составитель С. Н. Сазонов

УДК
ББК

Исследование полупроводникового диода: Методические указания к лабораторной работе № 78 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. С. Н. Сазонов – Уфа, 2015. – 17 с.

Цель методических указаний – закрепление и совершенствование знаний студентов по дисциплине «Физика» и формирование умений их применять для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, возникающих в последующей профессиональной деятельности выпускников технического университета.

Изучается строение собственных и примесных полупроводников и свойства p - n - перехода.

Приведены краткая теория работы p - n - перехода и необходимые для её понимания сведения из физики твёрдого тела, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы и форма отчетности.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Оптика и атомная физика» на всех направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Табл. 2. Ил. 11. Библ.: 2 назв.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, доц. Михайлов Г. П.,
канд. тех. наук, доц. Иванов М. П.

©Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2015

Содержание

Введение	4
1. Цели работы	5
2. Задача	5
3. Теоретическая часть	5
3.1. Собственные полупроводники	5
3.2. Примесные полупроводники <i>n</i> - типа	7
3.3. Примесные полупроводники <i>p</i> - типа	8
3.4. Контакт электронного и дырочного полупроводников (<i>p-n</i> - переход)	10
4. Экспериментальная установка.....	13
5. Требования по технике безопасности	13
6. Задания.....	13
7. Методика выполнения заданий	13
Контрольные вопросы	16
Требования к содержанию и оформлению отчёта	17
Критерии результативности выполнения лабораторной работы	17
Список литературы	17

Введение

Полупроводниковым диодом называется прибор с двумя внешними выводами, содержащий внутри один $p-n$ - переход. Такой переход реализуется на границе полупроводника p - типа, называемого акцепторным, и n - полупроводника, называемого донорным. Это одно из самых распространённых устройств электроники. $p-n$ - переход диода имеет одностороннюю проводимость. Ниже изложены физические принципы работы диода.

В результате выполнения данной лабораторной работы формируются следующие **компетенции**:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;
- способность проводить эксперименты по заданной методике, обрабатывать результаты, оценивать их погрешность и достоверность.

Перечисленные компетенции формируются через **умения**:

- работать с измерительными приборами;
 - рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;
 - анализировать результаты опыта;
 - оформлять отчет;
- а также **владения**:
- теоретическим материалом;
 - навыками измерения физических величин по приборам;
 - технологией обработки экспериментальных данных.

Лабораторная работа № 78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

1. ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучение вольт-амперной характеристики диода.
2. Изучение зависимости сопротивления диода от величины приложенного напряжения.

2. ЗАДАЧА

Приобретение навыков проведения измерений и умения обработки экспериментальных данных, характеризующих работу диода в электрических схемах.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Полупроводниками называется группа веществ, удельное сопротивление которых изменяется в широких пределах: от 10^{-5} до 10^{+8} Ом·м. Характерным для полупроводников является изменение их электропроводности под действием внешних факторов: температуры, освещения, давления, что позволяет создавать чувствительные термосопротивления, фотосопротивления и т.п.

С точки зрения зонной теории полупроводниками являются кристаллические вещества, у которых при 0 К валентная зона полностью заполнена электронами, а ширина запрещенной зоны невелика (порядка 1 эВ). Поэтому при абсолютном нуле полупроводник, как и диэлектрик, обладает нулевой проводимостью.

Различают собственные и примесные полупроводники. К числу собственных относятся химически чистые полупроводники (германий, кремний, селен и др.). Электрические свойства примесных полупроводников определяются имеющимися в них искусственно вводимыми примесями.

3.1. Собственные полупроводники

В таких полупроводниках атомы нейтральны и связаны друг с другом ковалентными связями. Чтобы создать проводимость, необходимо разорвать хотя бы одну из связей, удалив электрон из атома, например, германия и перенеся его в какую-либо другую кристаллическую ячейку, где все связи заполнены, и этот электрон

будет лишним. Такой электрон в дальнейшем может свободно переходить из одной кристаллической ячейки в другую, перенося с собой избыточный отрицательный заряд, то есть становится электроном проводимости. В атоме же германия, в его валентной оболочке, образуется вакантное место, которое называется дыркой. Дырка перемещается по кристаллу, поскольку электрон соседнего атома быстро занимает место ушедшего. Отсутствие электрона означает наличие у атома германия единичного положительного заряда, который переносится вместе с дыркой.

На рис. 3.1, а показаны энергетические зоны собственного полупроводника при $T \rightarrow 0$ К: валентная зона I заполнена электронами полностью, уровни зоны проводимости II свободны.

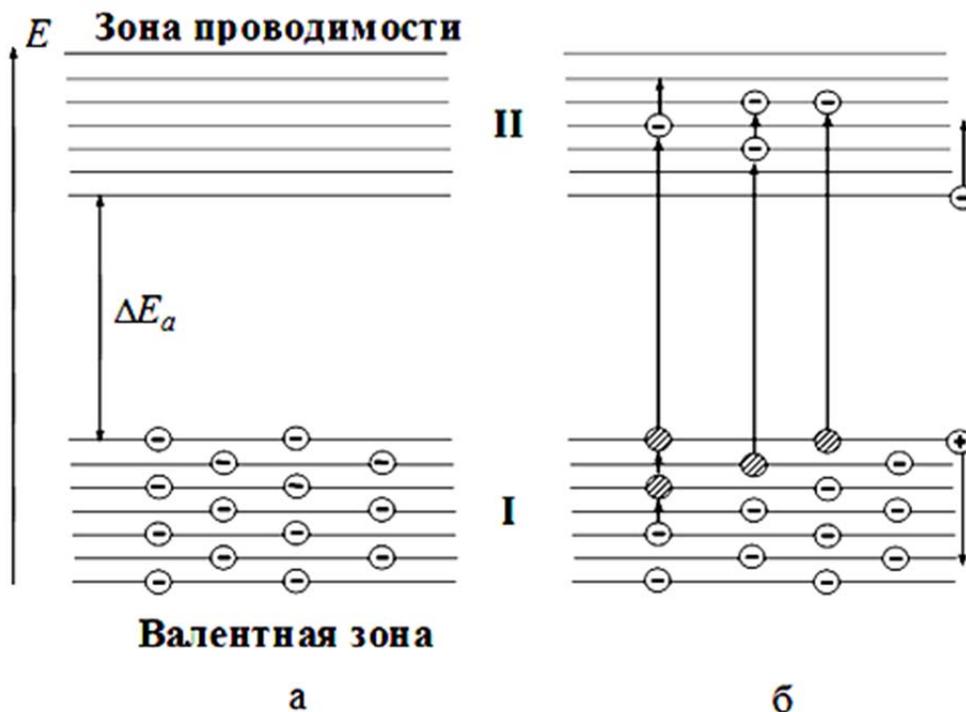


Рис. 3.1. Энергетическая зонная диаграмма собственного полупроводника.
На вертикальной оси энергия электронов

С повышением температуры вследствие термического возбуждения электронов валентной зоны часть из них приобретает энергию, достаточную для преодоления запрещенной зоны (ΔE_a) и перехода в зону проводимости. Это приводит к появлению в зоне проводимости свободных электронов, а в валентной зоне – дырок, которые ведут себя как частицы с положительным зарядом (рис. 3.1, б).

При наложении электрического поля электроны зоны II начинают переходить на более высокие энергетические уровни, т.к. они свободны. В зоне I электроны под действием поля также

получают возможность переходить на более высокие энергетические уровни, занимая вакантное место дырки, в результате чего появляется новая дырка ниже первоначальной, наблюдается движение дырок в зоне I сверху вниз. Таким образом, в собственных полупроводниках электроны в зоне II являются отрицательными носителями тока, дырки в зоне I – положительными носителями.

3.2. Примесные полупроводники *n*- типа

Предположим, что в кристаллической решетке германия (Ge) часть атомов замещена атомами большей валентности, например, атомами пентавалентного мышьяка (As) (рис. 3.2, а).

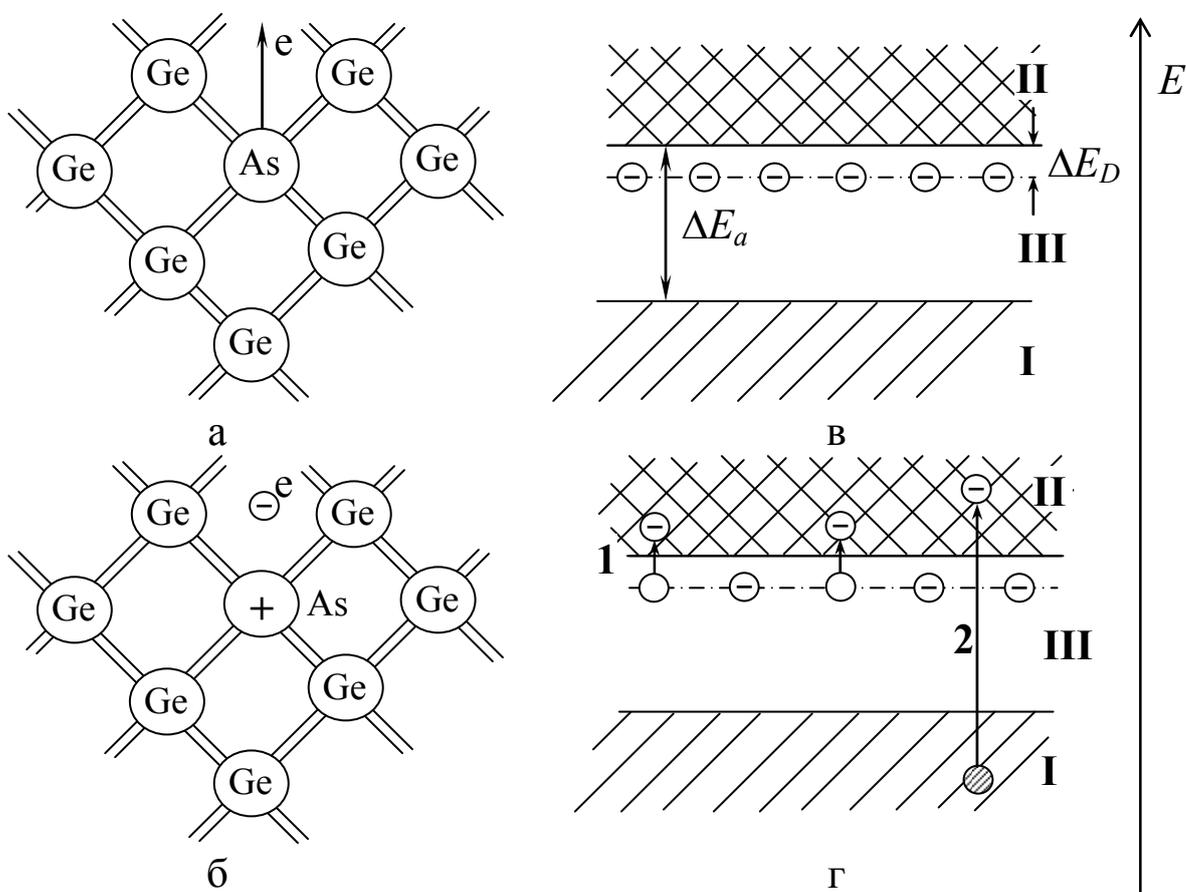


Рис. 3.2. Энергетическая зонная диаграмма *n*- полупроводника

Для образования ковалентной химической связи с соседними атомами германия атом мышьяка расходует четыре валентных электрона, пятый электрон в образовании связи не участвует. При сообщении этому «лишнему» электрону энергии $\approx 0,01$ эВ он может оторваться от атома мышьяка и свободно перемещаться в решетке германия, превращаясь, таким образом, в электрон проводимости (рис. 3.2, б). Примеси, являющиеся источниками электронов,

называются донорными, а полупроводники, содержащие такую примесь, электронными полупроводниками или полупроводниками *n*- типа.

С точки зрения зонной теории этот процесс можно представить следующим образом. При абсолютном нуле между заполненной валентной зоной **I** и свободной зоной проводимости **II** располагаются энергетические уровни мышьяка, заполненные электронами (рис. 3.2, в). Эти уровни, называемые донорными, находятся непосредственно у «дна» зоны **II**, на расстоянии $\Delta E_D \approx 0,01$ эВ от нее.

Энергия ΔE_D называется энергией ионизации донорного примесного атома. С повышением температуры тепловое движение «выбрасывает» в зону **II** электроны с донорных уровней (рис. 3.2, г). При наложении электрического поля эти электроны перемещаются в зоне **II**, т.к. энергетические уровни этой зоны свободны. Образующиеся при переходах **1** (рис. 3.2, г) положительные заряды локализуются на донорных уровнях и в проводимости не участвуют. Наряду с переходами типа **1** возможны переходы электронов из валентной зоны **I** в зону проводимости **II**. Поскольку энергия ионизации донорного атома много меньше ширины запрещенной зоны ($\Delta E_D \ll \Delta E_a$), то при не очень высоких температурах первый из этих процессов (**1** на рис. 3.2, г) оказывается доминирующим. Концентрация электронов в зоне **II** при этом во много раз больше концентрации дырок в зоне **I**. В таких условиях электроны называются основными носителями, а дырки – неосновными.

3.3. Примесные полупроводники *p*- типа

Полупроводники *p*- типа могут быть получены, если в решетке германия часть атомов замещена атомами меньшей валентности, чем атомы германия, например, при введении в качестве примеси индия (In) (рис. 3.3, а).

Три электрона атома In участвуют в образовании валентной связи с соседними атомами германия, но на образование связи с четвертым атомом германия у индия не хватает электрона. Индий обладает свойством притягивать к себе электроны, являясь акцептором. На образование четвертой связи он «заимствует» электрон у атома германия. Расчет показывает, что для этого требуется энергия $\Delta E_A \approx 0,01$ эВ, называемая энергией ионизации акцепторного атома. В валентной оболочке германия образуется

вакантное место – дырка (рис. 3.3, б).

Представим этот процесс с точки зрения зонной теории. Введение индия в кристалл германия приводит к появлению в запрещенной зоне **III** примесного уровня, называемого акцепторным, который располагается у «потолка» зоны **I** на расстоянии ΔE_A от нее. При абсолютном нуле он ничем не заполнен, т.к. при этих условиях невозможен отрыв электрона от атома германия (рис. 3.3, в).

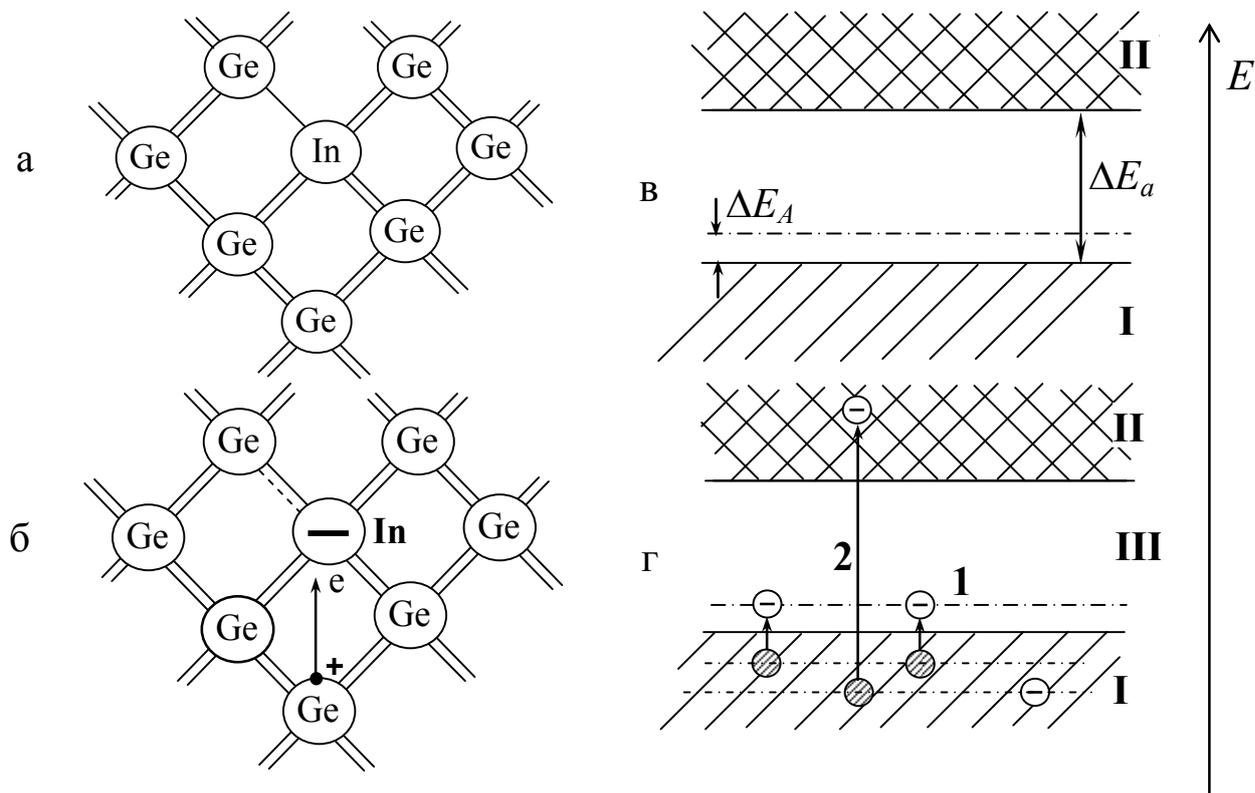


Рис. 3.3. Энергетическая зонная диаграмма *p*-полупроводника

С повышением температуры электроны из валентной зоны переходят на примесные уровни (рис. 3.3, г), в результате чего в зоне **I** появляются дырки, являющиеся носителями положительного заряда. Электроны, перешедшие из зоны **I** на примесный уровень, связываются с атомами индия и в проводимости не участвуют. Наряду с переходом **1** (рис. 3.3, г), возможен переход **2**, приводящий к появлению в зоне **II** отрицательных носителей тока – электронов. Но так как $\Delta E_A \ll \Delta E_a$, первый процесс является доминирующим, поэтому дырки в зоне **I** являются основными носителями, а электроны зоны **II** – неосновными.

Полупроводники описанного типа называются дырочными или полупроводниками *p*-типа. Часто их называют акцепторными полупроводниками.

3.4. Контакт электронного и дырочного полупроводников (*p-n*- переход)

p-n- переходом называется электрический контакт двух примесных полупроводников с различным типом проводимости.

3.4.1. Равновесное состояние *p-n*- перехода

Равновесное состояние соответствует отсутствию внешнего напряжения на *p-n*- переходе (рис. 3.4).

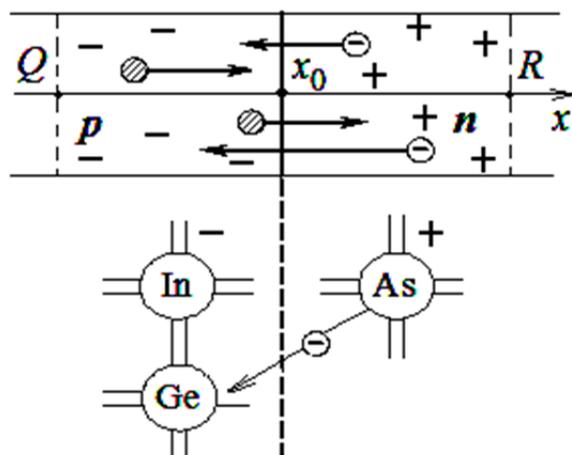


Рис. 3.4. Образование обедненного слоя на границе *p-n*- полупроводников

Верхняя часть рисунка изображает область диода вблизи *p-n*- перехода (точка x_0). Шарики моделируют свободные носители заряда. Дырки показаны заштрихованными, электроны – с символом заряда внутри. И те и другие оторвались от примесных атомов, превратившихся в ионы, также показанные символами зарядов. Поскольку концентрация электронов в полупроводнике *n*- типа больше, чем в полупроводнике *p*- типа, часть электронов диффундирует из *n*- области в *p*- область; дырки же наоборот, диффундируют из *p*- области в *n*- область. Электроны, оказавшиеся в *p*- полупроводнике, рекомбинируют с дырками, то есть занимают вакантные места в атоме германия (нижняя часть рис. 3.4). В результате рекомбинации электрон как носитель тока исчезает, ион германия превращается в нейтральный атом, а на атоме акцептора появится нескомпенсированный отрицательный заряд. Дырка, оказавшаяся в результате диффузии в *n*- полупроводнике, рекомбинирует с основным носителем – электроном, в результате чего на донорном атоме появится нескомпенсированный положительный заряд. Так как акцепторные и донорные атомы

находятся в узлах кристаллической решетки и не могут перемещаться, по обе стороны границы между двумя полупроводниками образуется двойной слой пространственного заряда – отрицательные заряды ионов акцепторных атомов в p - области и положительные заряды ионов донорных атомов в n - области (область QR на рис. 3.4). Возникающее при этом контактное электрическое поле противодействует дальнейшей диффузии основных носителей тока, то есть создает для них потенциальный барьер. Высота барьера $U_k \approx 0,7$ В для Ge и $U_k \approx 1,1$ В для Si.

В условиях равновесия диффузионный поток электронов из n - в p - область, создающий ток основных носителей I_n через p - n - переход, уравнивается встречным потоком электронов из p - в n - область, создающим ток неосновных носителей I_{gen} . То же самое можно сказать и о токе, создаваемом дырками.

Следовательно, в условиях равновесия $I_{gen} + I_n = 0$ и результирующий ток, создаваемый потоком носителей, равен нулю.

3.4.2. Выпрямляющие свойства p - n - перехода

Внешнее электрическое поле изменяет высоту барьера и нарушает равновесие потоков носителей тока через p - n - переход.

Приложим к p - n - переходу, находившемуся в равновесии (рис. 3.5, а), внешнюю разность потенциалов U в прямом направлении, подключив к n - области отрицательный полюс источника, к p - области – положительный (рис. 3.5, б). На рис. 3.5 (б) и 3.5 (в), E и E_k – напряженности электрических полей внешнего и контактного, соответственно. Эта разность потенциалов вызывает понижение потенциального барьера для основных носителей до значения $(eU_k - eU)$.

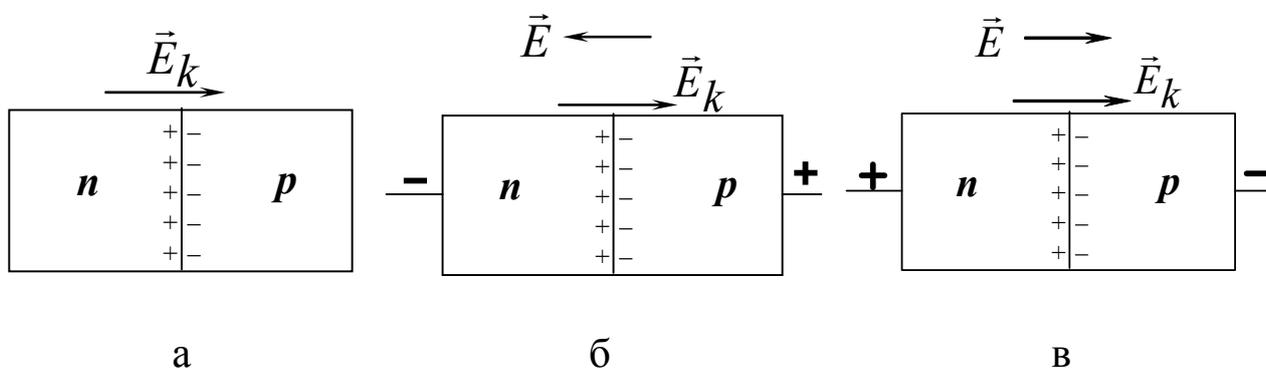


Рис. 3.5. Взаимная ориентация внешнего и внутреннего электрических полей

в p - n - переходе при различной полярности подключения источника ЭДС

Поэтому поток электронов из n - в p - полупроводник увеличит ток основных носителей. Ток неосновных носителей останется без изменения, так как поток неосновных носителей от высоты потенциального барьера не зависит. Через p - n - переход будет протекать отличный от нуля результирующий ток (прямой ток).

Приложим теперь к p - n - переходу внешнюю разность потенциалов (U) в обратном направлении, подключив к p - области отрицательный полюс источника напряжения, к n - области – положительный (рис. 3.5, в). Под действием этой разности потенциалов потенциальный барьер перехода повысится до значения $(eU_k + eU)$, что вызовет уменьшение потока основных носителей и электрического тока, созданного ими. Более подробный анализ показывает, что зависимость тока через диод от внешнего напряжения U имеет вид

$$I(U) = I_{gen} \left(e^{eU/kT} - 1 \right).$$

Как видно, при этом $I(0) = 0$ и $|I(-\infty)| = I_{gen}$.

Зависимость тока от напряжения для диода характеризуется резко выраженной нелинейностью. Левую и правую полуплоскости системы координат, ввиду малости обратного тока, приходится вычерчивать в разных масштабах (рис. 3.6). Это приводит к появлению излома на графике в центре координат.

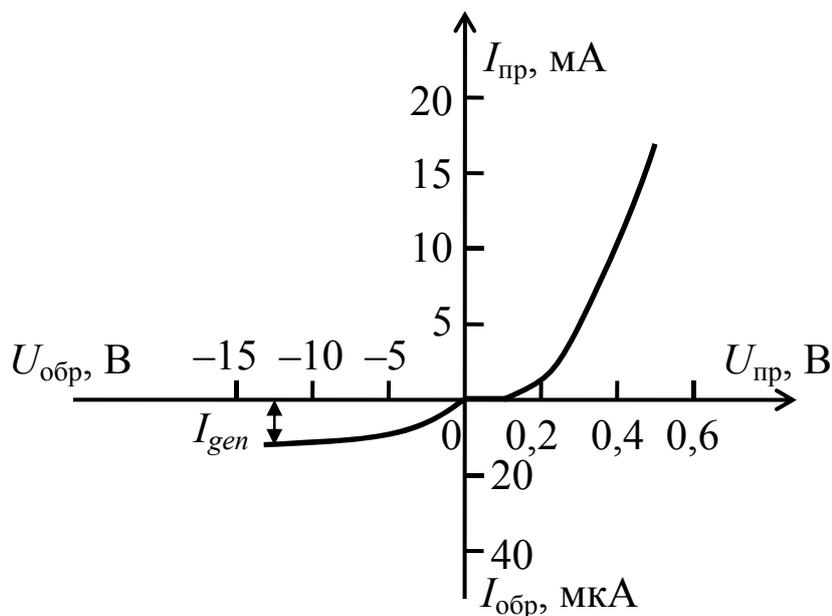


Рис. 3.6. Вольт-амперная характеристика диода ИД507А

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Объект исследования (ОИ) представляет собой вилку с переключателем, в корпусе которой установлены образцы – промышленные диоды. ОИ вставлен в БУИ – блок управления и индикации. На переднюю панель БУИ выведены:

- 1) кнопки набора режимов работы «ВАХ-ФВХ», «прямая-обратная» и лампочки для индикации выбранных режимов;
- 2) кнопки «+», «-», предназначенные для установки напряжения в режимах «ВАХ» «прямая» и «ВАХ» «обратная»;
- 3) розетка для установки объекта исследования.

5. ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Электропитание экспериментальной установки осуществляется от розетки, расположенной на стене, к которой подведено сетевое напряжение 220 В. Установка подключается проводом с двухполосной вилкой. Заземление установки осуществляется через одну из полос, поэтому специальный «земляной» провод отсутствует. Все токоведущие части установки закрыты, что исключает их касание.

При выполнении работы необходимо:

- 1) внимательно ознакомиться с заданием и экспериментальной установкой;
- 2) проверить изоляцию токоведущего провода, о замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
- 3) не загромождать лабораторный стол с установкой посторонними предметами;
- 4) не оставлять без присмотра работающую установку;
- 5) по окончании работы выключить установку, не отсоединяя провода от сети и привести в порядок рабочее место.

6. ЗАДАНИЯ

1. Построение вольт-амперной характеристики диода.
2. Построение зависимости сопротивления диода от величины приложенного напряжения.

7. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

Задание 1. Построение вольт-амперной характеристики диода

1. Переключатель на ОИ поставить в положение, указанное преподавателем.

2. Включите переключатель «Сеть» на задней панели БУИ. При этом на всех индикаторах должны установиться нули и загореться лампочки «ВАХ» и «прямая». (На последнем разряде индикаторов возможно появление цифр 1-3, что следует отнести к систематической ошибке прибора.)

3. Дайте прогреться установке 2 мин.

4. Начните увеличивать напряжение от 0,00 до 1,00 В с шагом $\Delta U = 0,05$ В. Вначале (при малых $U < 0,50$ В) прямой ток заметен не будет; микроамперметр будет показывать нули. Продолжайте увеличивать напряжение U . Когда вместо нулей на индикаторе тока появятся отличные от нуля ($0,0 \mu\text{A}$) цифры, начните заполнять табл. 7.1 вольт-амперной характеристики (ВАХ) $p-n$ - перехода, включенного в прямом пропускном направлении. В режиме автоматического выбора пределов измерения амперметра, в ходе увеличения U произойдет переключение пределов измерений от микроампер к миллиамперам. В табл. 7.1 следует выбрать миллиамперы. По достижении величины $U = 1,00$ В, нажмите кнопку «сброс».

Таблица 7.1

$U_{\text{пр}}, \text{В}$	
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$	

5. Постройте график ВАХ $p-n$ - перехода для прямого включения, выбрав удобный масштаб (размер графика – не менее $10 \times 10 \text{ см}^2$). Для этого нанесите экспериментальные точки на вашу координатную сетку и соедините экспериментальные точки гладкой кривой. Пример графика показан на рис. 7.1.

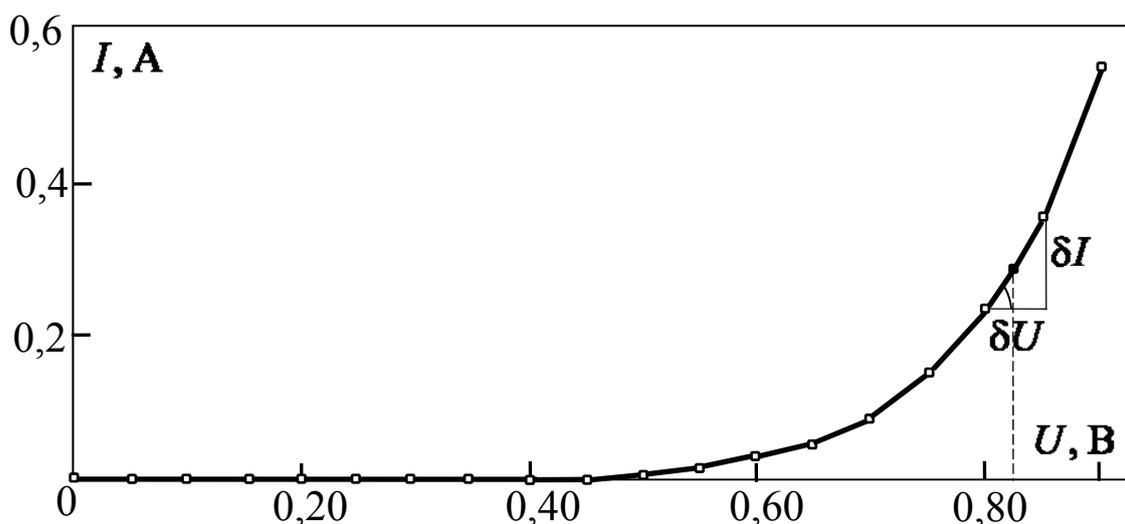


Рис. 7.1. Вольт-амперная характеристика диода Д7
(один из используемых в установке)

Задание 2. Построение зависимости сопротивления диода от величины приложенного напряжения

В отличие от резистора у диода нет определённого сопротивления, это нелинейный прибор. Но для диода можно ввести так называемое дифференциальное сопротивление, зависящее от приложенного напряжения U по формуле

$$R(U) = \left(\frac{dU}{dI} \right)_U, \quad (7.1)$$

при расчётах R , дифференциалы заменяются конечными приращениями $\Delta U = U_2 - U_1$ для напряжения и $\Delta I = I_2 - I_1$ – для тока соответственно

$$R(U) = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}. \quad (7.2)$$

Для определения сопротивления $R(U)$ необходимо:

1. Для каждого U из табл. 7.1 вычислить величину

$$\Delta I = I_2 - I_1 = I(U + \Delta U) - I(U), \quad (7.3)$$

взяв $\Delta U = 0,05$ В.

2. Для каждого значения U вычислить отношение $R = \Delta U / \Delta I$. Это будут значения R для напряжений, равных полусумме соседних значений напряжения в табл. 7.1. Например, на рис. 7.1 показано построение, необходимое для вычисления $R = \Delta U / \Delta I$ при $U = 0,825$ В.

3. Занесите полученные данные в табл. 7.2.

$U_{пр}, В$	
$R_{пр}, Ом$	

4. Постройте график зависимости $R = R(U)$.

5. Рассчитайте абсолютную ΔR и относительную ε_R погрешности величины R для одного значения U по указанию преподавателя.

При этом за абсолютную погрешность числителя и знаменателя в формуле (7.1) нужно взять цену деления соответствующего прибора. Вычислите относительную погрешность ε_R определения дифференциального сопротивления по формуле

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{\Delta U} + \varepsilon_{\Delta I}, \quad (7.4)$$

где $\varepsilon_{\Delta U}$ и $\varepsilon_{\Delta I}$ – относительные погрешности определения величин ΔU и ΔI в числителе и знаменателе формулы (7.2) соответственно. Подробно эта формула выглядит так

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\delta U}{U_2 - U_1} + \frac{\delta I}{I_2 - I_1},$$

где δU – цена деления вольтметра, δI – цена деления амперметра. Зная ε_R , определите абсолютную погрешность ΔR по формуле $\Delta R = R \cdot \varepsilon_R$.

Контрольные вопросы

1. Как возникает электронная проводимость в полупроводниках n - типа?
2. Как возникает дырочная проводимость в полупроводниках p - типа?
3. Почему на границе полупроводников p - и n - типа возникает обеднённый слой?
4. Какова природа электрических зарядов на границе p - n - перехода?
5. Чему равен ток через p - n - переход в условиях равновесия?
6. Каким выражением определяется ток через p - n - переход?
7. Чем объясняется односторонняя проводимость p - n - перехода?
8. Как включить p - n - переход в прямом направлении?
9. Как зависит сопротивление p - n - перехода от напряжения при прямом и обратном включении?

Требования к содержанию и оформлению отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Теоретические основы принципов работы полупроводникового диода под напряжением.
4. Схему установки.
5. Таблицы с результатами измерений $I(U)$ и вычислений $R(U)$.
6. Графики зависимостей $I(U)$ и $R(U)$.
7. Результаты вычисления погрешности косвенного измерения величины $R(U)$ одного значения U .
8. Выводы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- умеет объяснять физические принципы работы полупроводникового диода, в частности явление односторонней проводимости диода;
- правильно выполнил измерения и расчеты;
- грамотно построил графики;
- представил отчет, соответствующий предъявляемым требованиям;
- знает ответы на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Трофимова Т. И. Курс физики. – М.: Академия, 2012.
2. Левинштейн М. Е., Симин Г. С. Барьеры. – М.: Наука, 1987.

Составитель САЗОНОВ Сергей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Методические указания к лабораторной работе № 78

по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2015. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman.

Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отг. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ

450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12