

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования

«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ»

КАФЕДРА ФИЗИКИ

**ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА**

Методические указания к лабораторной работе № 8
по разделу "Электричество и магнетизм" курса общей физики
для студентов всех специальностей дневной и заочной формы обучения

Могилев 2008

УДК 532.516

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры физики

Протокол № 11 от 14.11.08

Составитель Д. Я. Каранчук

Рецензент к. ф–м. н. Скапцов А. С.

©УО«Могилевский государственный
университет продовольствия», 2008

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучить свойства, снять вольтамперную характеристику и рассчитать основные параметры полупроводникового диода.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: Диод Д7Ж, выпрямитель, потенциометр, два мультиметра DT 832, добавочное сопротивление $R_d = 100$ Ом, ключ.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Тела по электропроводимости делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики (изоляторы). Остановимся более подробно на полупроводниках, к которым относятся: селен, германий, кремний, теллур, а также ряд оксидов, сульфидов и карбидов.

Полупроводниковые материалы обладают рядом специфических свойств, которые хорошо объясняются зонной теорией твердых тел. В атомах электроны находятся на определенных энергетических уровнях. При образовании из отдельных атомов кристаллической решетки их энергетические уровни объединяются, образуя энергетические зоны. Число уровней в зоне равно числу атомов в кристалле. Верхнюю зону (II) энергетического спектра твердого тела называют зоной проводимости, а нижнюю зону (I) – валентной зоной. Зона проводимости и валентная зона разделены запрещенной зоной, в которой электроны не могут находиться. Зона проводимости либо свободна от электронов, либо заполнена ими частично.



**Рисунок 1 – Схема энергетических уровней: а – полупроводник;
б – диэлектрик; в, г – проводник**

В основе классификации металлов, полупроводников и изоляторов лежит структура энергетических зон. Если валентная зона (I) заполнена полностью и отделена от зоны проводимости (II) запрещенной зоной ΔW , то в зависимости от ширины запрещенной зоны, твердое тело является полупроводником (рис. 1, а) или диэлектриком (рис. 1, б). Ширина запрещенной зоны у полупроводников составляет порядка $0,18 \div 1,7$ эВ, у диэлектриков свыше 6 эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

У металлов валентная зона и зона проводимости могут перекрываться, образуя частично заполненную обобщенную зону, а запрещенная зона отсутствует (рис. 1, в); (это имеет место для щелочно-земельных элементов, образующих II группу таблицы Менделеева (Be, Mg, Ca, Zn, ...)), или валентная зона заполнена только частично (рис. 1, г).

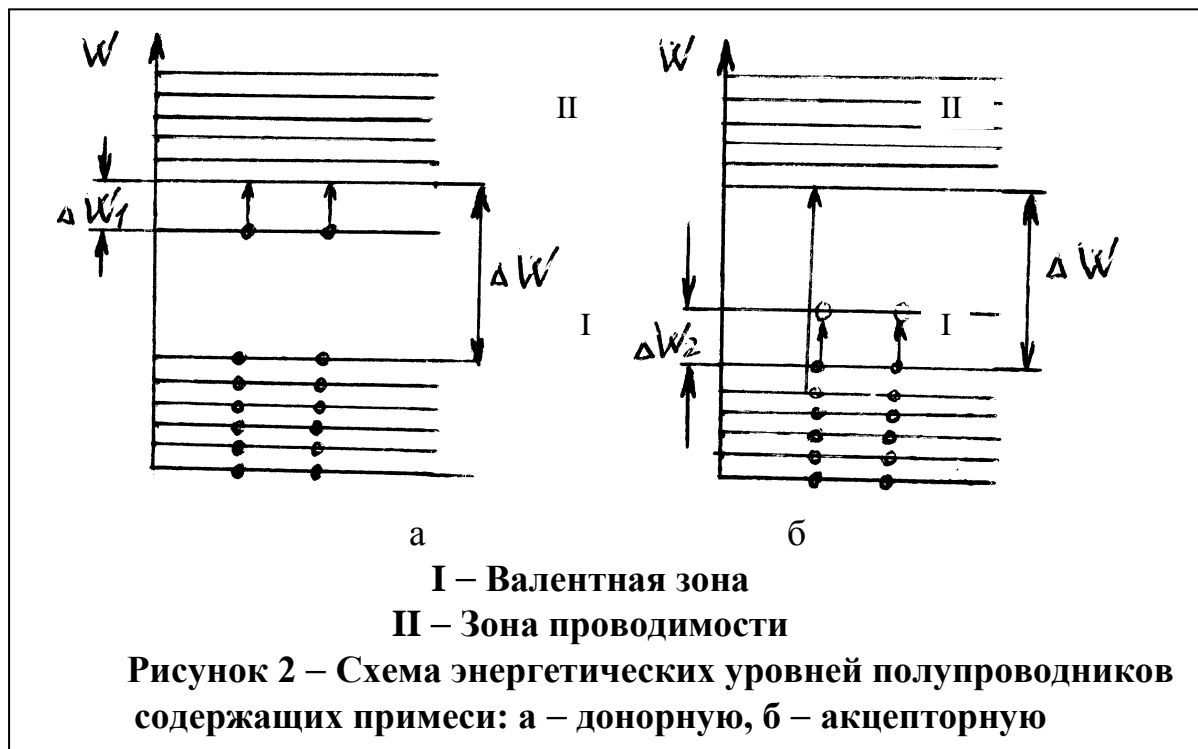
При абсолютном нуле температуры в полупроводниках, как и в диэлектриках, валентная зона полностью занята электронами. Зона, следующая за валентной зоной, т.е. зона проводимости, не содержит ни одного электрона. Чтобы перевести электроны в зону проводимости, необходимо приложить достаточно сильное внешнее воздействие, способное сообщить электронам валентной зоны энергию, превышающую ширину запрещенной зоны ΔW .

При повышении температуры у полупроводников некоторые из электронов валентной зоны могут получить вследствие теплового обмена энергию, превышающую ширину запрещенной зоны, и перейти в зону проводимости. Тогда даже слабое внешнее поле, воздействуя на эти электроны, вызывает ток. С повышением средней энергии теплового движения электронов число их, перешедших в зону проводимости, возрастает, при этом возрастает и электропроводность полупроводников. Однако электропроводность полупроводников намного меньше электропроводности металлов, поскольку в зоне проводимости полупроводника содержится очень мало электронов по сравнению с числом электронов проводимости в металлах.

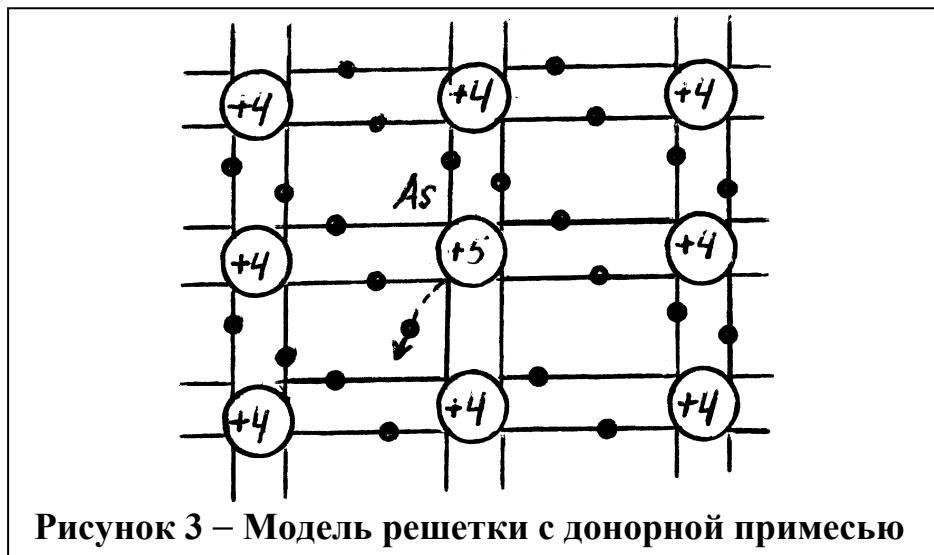
Вместе с переходом электронов в зону проводимости из валентной зоны в последней освобождаются уровни энергии, на которые могут перейти электроны соседних уровней этой же зоны под воздействием сил приложенного электрического поля. Переход электронов внутри валентной зоны носит своеобразный «эстафетный» характер. При таком «эстафетном» переходе электронов освобождающиеся состояния перемещаются в сторону, противоположную направлению движения электронов, подобно частицам с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона. Такие подвижные состояния, характеризующиеся недостатком электронов, называют дырками.

Таким образом, вследствие возбуждения одного электрона в кристалле образуется пара носителей тока: электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Проводимость, обусловленная наличием дырок в валентной зоне, называется дырочной в отличие от электронной, вызванной наличием электронов в зоне проводимости. В идеальном полупроводнике число электронов, перешедших в зону проводимости из валентной зоны, равно числу дырок в последней.

Весьма большой проводимостью обладают полупроводники с искаженной решеткой. Эти искажения могут появиться либо в силу механических воздействий, либо в результате специальной термической обработки, либо благодаря наличию в данном полупроводнике примесей другого вещества.

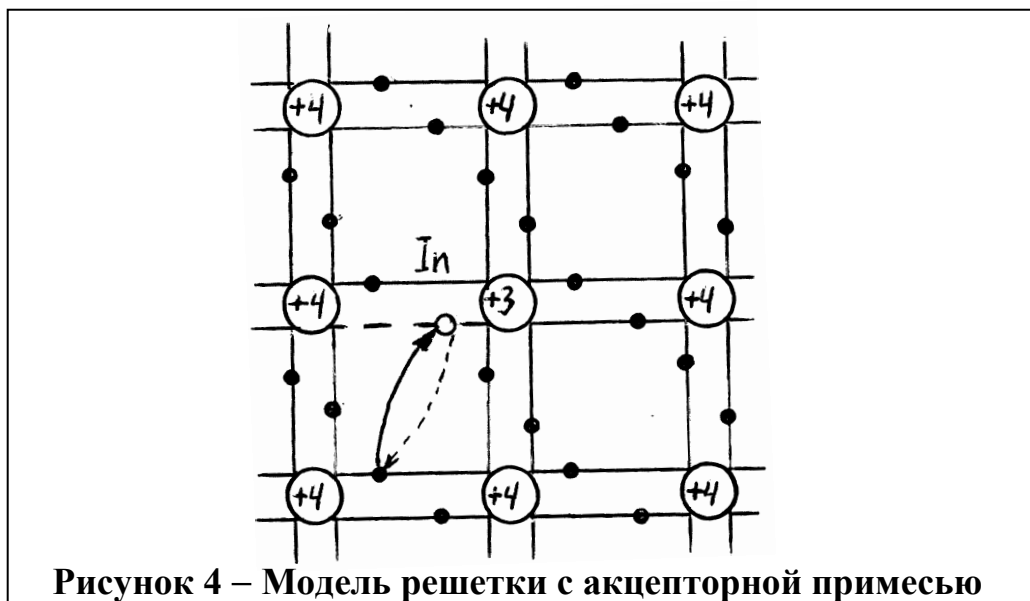


При введении в кристаллическую решетку примеси образуются дополнительные локальные энергетические уровни. Если уровни примеси заполнены электронами и располагаются вблизи зоны проводимости полупроводника (рис. 2, а), то для перехода электронов из примесных уровней в зону проводимости им необходимо сообщить энергию ΔW_1 , намного меньшую ширины запрещенной зоны ΔW . Полупроводник с такой примесью, которая называется донорной, будет обладать электронной или n-проводимостью. Такие полупроводники называют полупроводниками n-типа. В качестве донорных примесей используют фосфор, мышьяк, сурьму и другие элементы пятой группы периодической системы. Атомы примеси замещают в кристаллической решетке атомы четырехвалентных германия или кремния. На рисунке 3 показана модель такой решетки. Пятивалентный атом примеси образует четыре ковалентные связи с соседними атомами полупроводника. Пятый валентный электрон связан только с атомом примеси. Энергия такой связи в десятки раз меньше энергии ковалентной связи и составляет около 0,01 эВ.



Локальные примесные уровни энергии могут располагаться вблизи валентной зоны на расстоянии ΔW_2 от её верхней границы, которая также намного меньше ΔW , и при этом не содержат электронов. Такие примеси называются акцепторными, а полупроводники – полупроводниками р-типа. Они обуславливают, при наличии электрического поля, дырочную или р-проводимость полупроводника (рис, 2, б).

К акцепторным примесям относятся трехвалентные элементы, такие как бор, индий, алюминий. Модель кристаллической решетки полупроводника с атомом индия в качестве примеси показана на рисунке 4. Три валентных электрона атома примеси заняты в трех ковалентных связях с атомами четырехвалентного полупроводника. Четвертая связь не заполнена. Ее может заполнить любой электрон из соседней связи. Атом примеси превращается в отрицательный ион (у него теперь на один электрон больше, чем нужно), а рядом образуется дырка.



В полупроводниках n-типа, где проводимость определяется избытком свободных электронов, электроны принято называть основными носителями заряда, а дырки – неосновными. Соответственно в полупроводниках р-типа

основными носителями заряда являются дырки, а неосновными – электроны.

На границе электронного и дырочного полупроводников и на границе полупроводника с металлом при определенных условиях возникает запирающий слой, т.е. слой, обладающий повышенным по сравнению с остальной частью полупроводника сопротивлением.

Рассмотрим более подробно контакт двух полупроводников с электронной и дырочной проводимостью. При таком контакте образуется р–п–переход. Электроны и дырки диффундируют через р–п–переход, образуя двойной запирающий электрический слой шириной Δx . Переход дырок в п–область создает в ней положительный потенциал. Энергия электронов в ней снижается, а дырок – увеличивается.

В р–области электроны создают отрицательный потенциал, их энергия растет, а энергия дырок уменьшается (рис. 5, а). Из рисунка 5,а видно, что неосновные носители могут свободно переходить через р–п–переход. Это создает некоторый ток неосновных носителей, I_n , направленный от п–области к р–области.

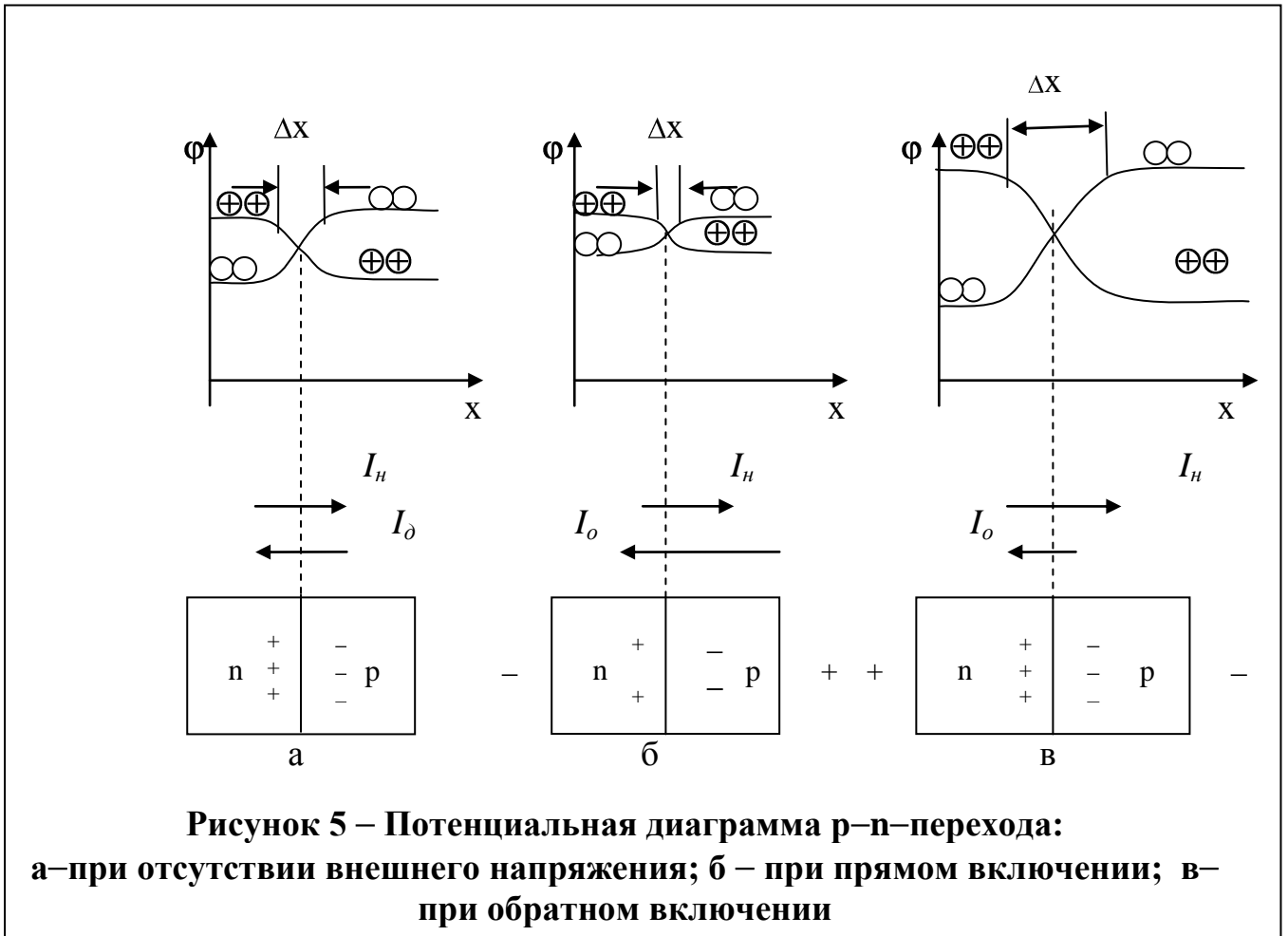
Основные носители – электроны, идущие от п–области к р–области и дырки, идущие от р–области к п–области за счет диффузии, должны переходить на более высокий энергетический уровень. Эти переходы дают некоторый диффузионный ток I_o , направленный от р–области к п–области. Процесс перераспределения зарядов на границе полупроводников п–типа и р–типа продолжается до установления динамического равновесия, т.е. когда $I_o = I_n$.

Рассмотрим, что происходит при наложении на р–п–переход разности потенциалов от внешнего источника. Если на п–область подать отрицательный потенциал, а на р–область положительный (рис. 5, б), то энергия основных носителей увеличивается, что означает уменьшение высоты потенциального барьера. Вследствие этого ток I_o основных носителей увеличивается при сохранении постоянного тока неосновных носителей. Через р–п–переход будет протекать ток

$$I = I_o - I_n,$$

направленный от р–области к п–области. Ширина Δx запирающего слоя уменьшается. Это можно рассматривать как уменьшение сопротивления р–п–перехода при заданном направлении внешнего поля.

Если на п–область подать положительный потенциал, а на р–область – отрицательный (рис 5, в), то энергия основных носителей уменьшится, что означает повышение потенциального барьера. Ток основных носителей сильно уменьшается. Ток в этом случае создается неосновными носителями : из р–области в п–область движутся электроны, а из п–области в р–область дырки. Ширина Δx запирающего слоя увеличивается. Это можно рассматривать как значительное возрастание сопротивления р–п–перехода.



Следовательно, прикладывая к р–п–переходу переменное по знаку напряжение, можно получить значительные токи только одного направления, т.е. система будет служить выпрямителем. Направление тока, соответствующее малому сопротивлению, называется прямым, а противоположное направление – обратным.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

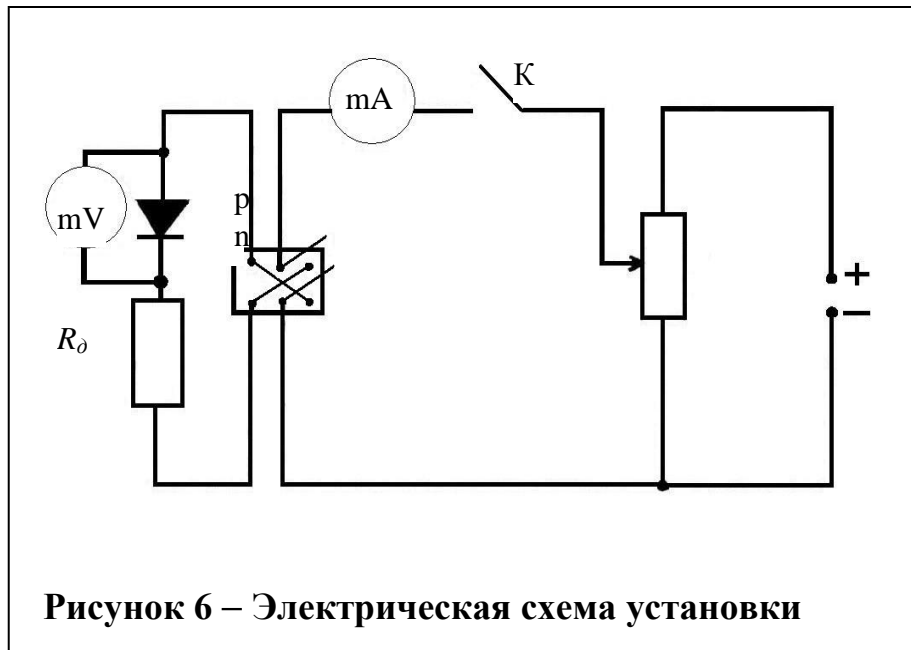
В данной работе применяется германиевый диод Д7Ж. Германий обладает электронной проводимостью. Для получения электронно-дырочного контакта (р–п–перехода) поверхность пластинки электронного германия подвергают специальной обработке, в результате чего образуется слой германия, обладающий дырочной проводимостью.

Пропускным направлением тока является направление от дырочного (р) слоя германия к электронному (n) слою.

Германиевый диод практически пропускает ток только в одном направлении (обратный ток в сотни тысяч раз меньше прямого тока).

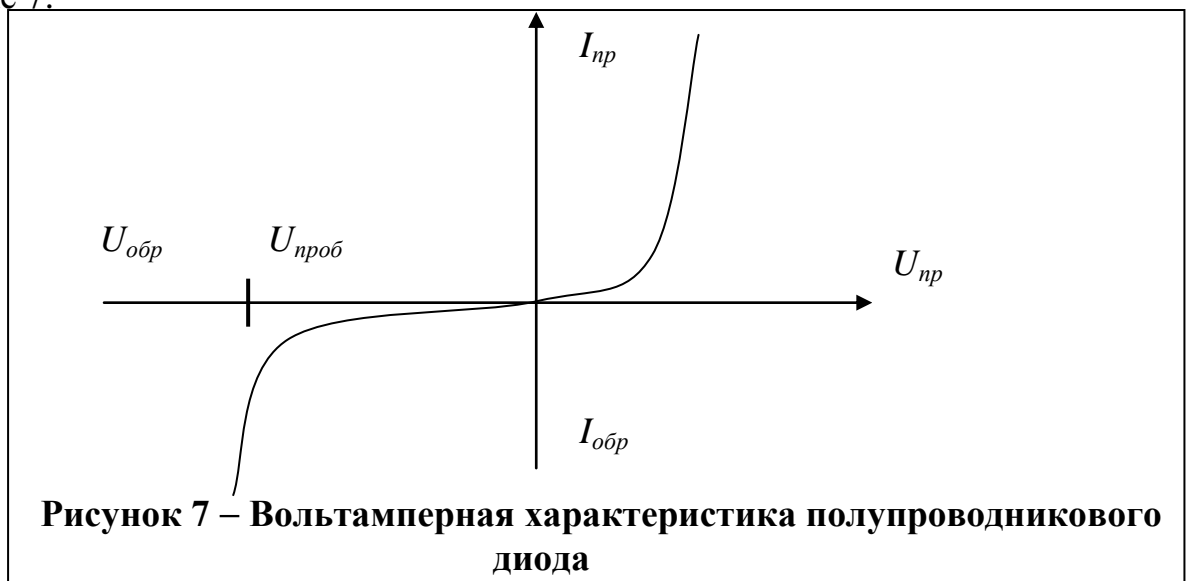
Предельно допустимое прямое постоянное напряжение для диодов серии Д7 составляет 0,5 В. Величина прямого постоянного тока 300 мА.

Схема установки изображена на рисунке 6. Для защиты диода от перегрузки по прямому постоянному напряжению последовательно с ним включено добавочное сопротивление $R_0 = 100 \text{ Ом}$.



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Зависимость тока через р–n–переход от приложенного напряжения называется вольтамперной характеристикой перехода. Ее общий вид показан на рисунке 7.



Часть характеристики $I_{np} = f(U_{np})$ называют прямой ветвью. Она соответствует прямому включению перехода (к р–области подключен «плюс» источника напряжения, к n–области – «минус» источника напряжения).

Обратная ветвь характеристики $I_{обр} = f(U_{обр})$ соответствует закрытому состоянию перехода (к р–области подключен «минус» источника напряжения, к n–области – «плюс» источника напряжения).

Если $U_{обр}$ постепенно повышать по модулю, то при определенном значении напряжения $U_{проб}$ (пробивное напряжение) обратный ток через переход резко увеличивается – происходит пробой перехода. Различают два вида пробоя:

электрический и тепловой. При электрическом пробое напряжение на переходе поддерживается практически постоянным (на практике это используется в стабилизаторах напряжения). При отключении р–п–перехода от источника его свойства восстанавливаются. При тепловом пробое область р–п–перехода разогревается и переход разрушается. Электрический пробой может существовать довольно длительное время при условии, что не перейдет в тепловой пробой.

К основным параметрам полупроводникового диода относят сопротивление постоянному току, дифференциальное сопротивление, крутизну вольтамперной характеристики, мощность тепловых потерь, коэффициент выпрямления.

Сопротивление диода постоянному току выражается формулой

$$R_0 = \frac{U_{np}}{I_{np}}, \quad (1)$$

где U_{np} – напряжение на диоде в прямом направлении, В,

I_{np} – ток, проходящий через диод в прямом направлении, А.

Сопротивление диода переменному току (дифференциальное сопротивление):

$$R_i = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}, \quad (2)$$

где ΔU_{np} – изменение прямого напряжения, В,

ΔI_{np} – изменение прямого тока под действием прямого напряжения,

А.

Крутизна вольтамперной характеристики диода:

$$S = \frac{\Delta I_{np}}{\Delta U_{np}}. \quad (3)$$

Мощность тепловых потерь:

$$P = I_{np} \cdot U_{np}. \quad (4)$$

Выпрямительные свойства диода характеризуются коэффициентом выпрямления α , который равен отношению прямого тока I_{np} к обратному току $I_{обр}$, измеряемым при одинаковых по величине прямом и обратном напряжениях:

$$\alpha = \frac{I_{np}}{|I_{обр}|}. \quad (5)$$

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ

1. До проверки преподавателем вашей готовности к занятиям установку в электрическую сеть не включать.
2. Проверить наличие заземления установки.
3. Выполнять все требования инструкции по охране труда при работе с электрооборудованием.

4. Не устанавливать постоянное напряжение на диоде в прямом включении более 0,5 В и обратном – менее минус 6 В.

5. При обнаружении неисправности в работе установки отключить ее от сети. О неисправности сообщить лаборанту или преподавателю. Самостоятельно неисправность не устранять.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установите переключатель направления тока (коммутатор) в положение «П» – прямой ток, т.е. к р–области подвести положительный потенциал, а к n–области отрицательный.

2. Выведите потенциометр (регулятор напряжения) на 0 В. Для этого, не прилагая больших усилий, осуществите поворот регулятора против хода часовой стрелки до упора.

3. Один из мультиметров DT–832 подключите к выходу «V» установки для измерения напряжения на диоде. Красный провод присоедините к положительной клемме, черный – к отрицательной. Установите переключатель предела измерения в положение «V-» 2000 mV.

4. Второй мультиметр DT–832 подключите к выходу «A» установки для измерения тока. Красный провод присоедините к положительной клемме, черный – к отрицательной клемме. Установите переключатель предела измерения в положение «A-» 200 mA.

5. Включите выпрямитель в сеть с напряжением ~ 220 В, переключите ключ в положение «Вкл».

6. Потенциометром увеличивайте прямое напряжение на диоде от 0 В до 340 mV, фиксируя значения прямого тока через каждые 20 mV. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1 – Зависимость прямого тока от прямого напряжения

U_{np}, mV	20	40	60	80	...
I_{np}, mA					...

7. Потенциометром установите напряжение 0 В.

8. Переключатель направления тока переключите в положение «О»– обратный ток. При этом к р–области подключается отрицательный потенциал, а к n–области положительный.

9. Переключатель предела измерения прибора для измерения тока установите в положение «A-» 2000 μ A.

10. Измерьте обратный ток при следующих значениях обратного напряжения: -280 mV, -320 mV, - 340 mV. При этом следует учесть, что ток имеет обратное направление, поэтому его значения следует записывать со знаком минус.

11. Переключатель предела измерения прибора для измерения напряжения установите в положение «V-» 20 В.

12. Изменяя обратное напряжение от 0 В до минус 6 В через каждые минус 1 В, снимите показания значений обратного тока. Результаты измерений занесите

в таблицу 2. При этом следует учесть, что ток имеет обратное направление, поэтому его значения имеют знак минус.

Таблица 2 – Зависимость обратного тока от обратного напряжения.

$U_{обр}, В$	0	-1	-2	-3	...
$I_{обр}, \mu A$...

13. Переключатели мультиметров DT – 832 установите в положение «OFF». Ключ установки переключите в положение «Выкл». Выпрямитель отсоедините от сети.

14. По результатам измерений пункта №6 постройте график зависимости $I_{np} = f(U_{np})$. Масштаб по оси токов взять $1 \text{ см} = 10 \text{ мА}$, по оси напряжений $1 \text{ см} = 40 \text{ мВ}$.

15. По результатам измерений пунктов №6 и №10 для напряжений 280 мВ, 320 мВ, 340 мВ по формуле (5) вычислите значения коэффициента выпрямления α . Сделайте вывод о величинах проводимостей диода в прямом и в обратном включении.

16. Используя график зависимости $I_{np} = f(U_{np})$ вблизи напряжения $U_{np} = 300 \text{ мВ}$ вычислите значение R_0 используя формулу (1), R_i по формуле (2), S по формуле (3), P по формуле (4).

17. Используя результаты измерений пункта №12 постройте график зависимости $I_{обр} = f(U_{обр})$. Масштаб по оси токов взять $1 \text{ см} = -10 \mu A$, по оси напряжений $1 \text{ см} = -1 \text{ В}$.

18. Используя результаты измерений пункта №6 и формулу (1) постройте график зависимости $R_0 = f(U_{np})$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками с точки зрения зонной теории твердых тел?
2. От чего зависит электропроводность идеальных полупроводников?
3. Почему электропроводность полупроводников намного меньше электропроводности металлов?
4. Как объяснить собственную проводимость полупроводников?
5. Как влияют примеси на электропроводность полупроводников?
6. Как возникают дырочная и электронная примесные проводимости полупроводников? Как располагаются примесные энергетические уровни? Из каких соображений полупроводники делят на полупроводники n–типа и p–типа?
7. Какие примеси называют донорными и акцепторными? Приведите примеры моделей кристаллических решеток полупроводников с акцепторными и донорными примесями.
8. Как образуется p–n–переход? Какие процессы происходят в нем при отсутствии внешнего электрического поля?
9. Как включается p–n–переход (полупроводниковый диод) к источнику напряжения в прямом и в обратном направлениях?

10. Как зависят электрические свойства р–n–перехода от внешнего электрического поля?

11. Как токи основных и неосновных носителей заряда зависят от напряжения на р–n– переходе? Поясните, используя потенциальную диаграмму.

12. Назовите основные характеристики и параметры полупроводникового диода и поясните их смысл.

13. Изобразите и объясните вольтамперную характеристику полупроводникового диода.

14. Где применяют полупроводниковые диоды?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савельев, И.В. Курс общей физики, т.2– М.: Наука, 1988.
2. Калашников, С.Г. Электричество.– М.: Наука, 1988.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики. – М.:Издательский центр «Академия», 2008.
4. Березкина, Т. Ф., Гусев, Н. Г., Масленников, В. В. Задачник по общей электротехнике с основами электроники.– М.: Высш. шк, 1991.
5. Полупроводниковые приборы: Справочник /под ред. Н. Н. Горюнова /. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Учебное издание

**ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ДИОДА**

Методические указания

Составитель: Каранчук Дмитрий Ярославович

Редактор Т. Л. Матеуш

Технический редактор А. А. Щербакова

Подписано в печать	Формат 60x84 ¹ / ₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная.	
Усл. печ. л.	Уч.-изд. л.
Тираж	Заказ

Учреждение образования

«Могилевский государственный университет продовольствия».
212027, Могилев, пр-т Шмидта, 3.
ЛИ № 02330/0131913 от 08.02.2007.

Отпечатано на ризографе редакционно-издательского отдела
учреждения образования

«Могилевский государственный университет продовольствия».
212027, Могилев, пр-т Шмидта, 3.
ЛП№ 226 от 12.02.2003.