

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

С.К. Камзолов, С.М. Новиков

ФИЗИКА

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ.
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

ПОСОБИЕ

**по выполнению лабораторной работы КС-4
«Физические основы работы *p-n*-переходов»**

*для студентов I и II курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения*

Москва-2015

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра физики

С.К. Камзолов, С.М. Новиков

ФИЗИКА

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПОСОБИЕ

**по выполнению лабораторной работы КС-4
«Физические основы работы p - n -переходов»**

*для студентов I и II курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения*

Москва - 2015

ББК 53
К18

Рецензент канд. физ.-мат. наук А.А. Куколева

Камзолов С.К., Новиков С.М.

К18 Физика. Дополнительные главы физики. Физические основы современных технологий: пособие по выполнению лабораторной работы КС-4 «Физические основы работы p - n -переходов» - М.: МГТУ ГА, 2015. - 8 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по Учебному плану для студентов I и II курсов всех направлений и специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 16.06.2015 г. и методического совета 23.06.2015 г.

Подписано в печать 01.07.15 г.

Печать офсетная
0,47 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 16/

0,34 уч.-изд. л.
Тираж 60 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Редакционно-издательский отдел
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный
технический университет ГА, 2015

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА КС-4
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ
p-n-ПЕРЕХОДОВ»

1. Цель работы

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в *p-n*-переходах, экспериментальное определение реальной вольтамперной характеристики диода и расчет поправочного коэффициента в ее теоретической формуле.

2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по учебнику [1, 2]: зонную теорию электропроводности кристаллов, электропроводность чистых и примесных полупроводников, *p-n*-переходы, принцип работы полупроводниковых диодов. Ознакомьтесь с устройством лабораторного стенда и методикой проведения эксперимента по разделу 4 данного описания. Подготовьте ответы на вопросы из раздела 7. Оформите проект отчета по лабораторной работе.

3. Краткая теория

В современной микро- и наноэлектронике широко применяются интегральные схемы, в которых используются кристаллы полупроводников, легированные микроколичеством примесей атомов из соседних групп периодической системы элементов. Так, если в кристаллическую решетку германия (Ge), атомы которого 4-валентны, внедрить небольшое количество 5-валентных атомов, например, мышьяка (As), то четыре из пяти валентных электронов мышьяка образуют четыре необходимые в решетке германия ковалентные связи с ближайшими соседями (Ge), а пятый валентный электрон мышьяка оказывается «лишним». Он легко отделяется от атома мышьяка за счет энергии теплового движения уже при достаточно низких температурах, образуя свободный электрон. Именно такие электроны и обеспечивают электронную проводимость (*n* – типа) в таком полупроводнике, а соответствующая примесь называется донорной. Если же в кристаллическую решетку 4-валентного германия внедрить небольшое количество 3-валентных атомов, например, индия (In), то трех валентных электронов атома индия недостаточно для образования ковалентных связей с четырьмя ближайшими соседями – атомами германия. Захватывая один из валентных электронов у соседних атомов

Ge, атом In «укомплектовывает» все 4 ковалентные связи с ближайшими атомами Ge. В том месте, где был заимствован электрон, образуется некомпенсированный положительный заряд – дырка, которая может перемещаться по кристаллу, заимствуя электроны у соседних атомов. Дырки обеспечивают дырочную проводимость (p – типа) в таком полупроводнике, а соответствующая примесь называется акцепторной.

Особое место в электронике занимают структуры с контактирующими полупроводниками различного типа проводимости. При этом зона контакта (или кратко p – n -переход) может выполнять несколько схемных функций: усиления, выпрямления, емкостную, резистивную и т.п. Технология производства таких схем такова, что между полупроводниками с разной электропроводностью нет резкой границы. Плавный переход делается очень тонким – до 1 мкм. В такой конструкции блуждающие в полупроводнике n – типа электроны, достигнув границы контакта, переходят (диффундируют) в материал p – типа. Подобным же образом положительные дырки из материала p – типа могут проскользнуть через переход в материал n – типа. Оба процесса приводят к тому, что p – область заряжается отрицательно, а n – область положительно. В результате в области p – n -перехода (область d на рис. 1) создается некоторая разность потенциалов ϕ_0 , и соответствующий скачок потенциальной энергии для дырок $e\phi_0$, называемый потенциальным барьером (для электронов кривая потенциальной энергии симметрична). Возникшее электрическое поле прекращает диффузию через область перехода следующих порций зарядов обоих типов. В области перехода электроны проводимости захватываются движущимися им навстречу дырками (рекомбинируют). Поэтому электропроводность этого слоя весьма мала, что является причиной резистивных свойств p – n -перехода. Кроме того, p – n -переход становится подобным заряженному конденсатору. Этот эффект лежит в основе использования емкостных свойств p – n -перехода.

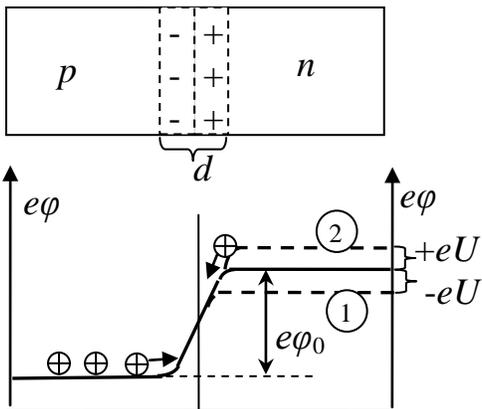


Рис. 1

Для выяснения механизма выпрямляющего действия (односторонней проводимости) p – n -перехода достаточно рассмотреть поведение зарядов одного знака, например, дырок. Электроны дают аналогичный вклад в общую величину и направление электрического тока через p – n -переход.

В материале p – типа имеется высокая концентрация дырок $N_{p,p}$. Эти носители блуждают по кристаллу, и некоторое их количество каждую

В материале p – типа имеется высокая концентрация дырок $N_{p,p}$. Эти носители блуждают по кристаллу, и некоторое их количество каждую

секунду приближается к переходу. Часть из них способна взять потенциальный барьер и перейти в n – область. Обозначим этот ток I_0 .

Имеется также ток дырок, приближающихся к переходу с другой стороны. Этот ток пропорционален концентрации дырок в n – области $N_{p,n}$. Приблизившись к переходу с этой стороны дырки свободно «падают» в p – область с более низкой потенциальной энергией.

Из законов статистической физики следует, что отношение концентраций дырок в обеих областях будет определяться распределением Больцмана:

$$\frac{N_{p,n}}{N_{p,p}} = e^{-\frac{e\phi_0}{kT}}.$$

В условиях равновесия токи с обеих сторон перехода одинаковы, и должно выполняться соотношение:

$$I_0 \sim N_{p,n} = N_{p,p} e^{-\frac{e\phi_0}{kT}}.$$

Если на p – n -переход подано внешнее напряжение U , то высота потенциального барьера изменится от $e\phi_0$ до $e\phi_0 - eU$, где $U > 0$, если на p – область подан «+», а на n – область «-» и $U < 0$ – в противоположном случае. Теперь ток дырок из p – области в n – область будет пропорционален экспоненте, в показателе которой будет стоять разность $e\phi_0 - eU$. Обозначив этот ток через I_1 , получим:

$$I_1 \sim N_{p,p} e^{-\frac{e\phi_0 - eU}{kT}}.$$

Этот ток превосходит ток I_0 в $e^{\frac{eU}{kT}}$ раз. Значит между I_1 и I_0 существует связь

$$I_1 = I_0 e^{\frac{eU}{kT}}.$$

Ток дырок из p в n – область при приложении внешнего напряжения U растет по экспоненте. А ток дырок из n в p – область остается постоянным (пропорциональным концентрации дырок в n – области) и равным I_0 , пока U не слишком велико. Достигая барьера, эти носители будут по-прежнему все скатываться в p – область. В итоге ток положительных носителей I , текущий через переход, будет определяться разницей токов в обе стороны:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad (1)$$

Проведя аналогичный анализ для тока электронов, мы получим схожую формулу. Поэтому формула (1) справедлива и для суммарного тока носителей обоого рода. Из нее следует, что при $U > 0$ ток резко растет с напряжением, а при

$U < 0$ знак тока меняется, но экспоненциальный член вскоре становится пренебрежимо малым, и отрицательный ток не превышает величины тока I_0 , который очень мал. В реальных устройствах $U > 0,1$ В. В этом случае экспоненциальный член существенно превышает единицу в формуле (1) и ею можно пренебречь (рекомендуем проверить):

$$I = I_0 e^{\frac{eU}{kT}}. \quad (2)$$

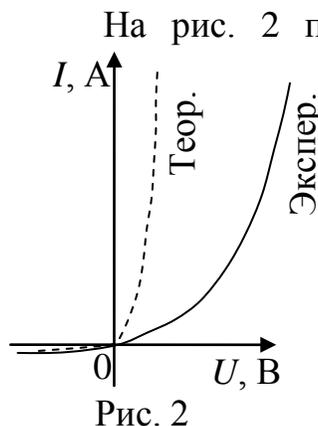


Рис. 2

На рис. 2 пунктирной линией показана вольтамперная характеристика (ВАХ), построенная в соответствии с теоретической формулой (1). В практических целях необходимо знать реальную ВАХ, отображающую зависимость силы тока через устройство от измеряемого напряжения U_{Σ} . Для изучаемого в данной работе диода последнее является суммой напряжения на самом p - n -переходе и напряжения на p и n областях, т.е. слева и справа от области d на рис. 1. Обычно U_{Σ} в γ раз больше напряжения на переходе, т.е. $U_{\Sigma} = \gamma U$, где $\gamma = 2 \div 5$. Поэтому в практических целях формулу (2) используют в виде:

$$I = I_0 e^{\frac{eU_{\Sigma}}{\gamma kT}}. \quad (3)$$

В данной работе измеряется ВАХ и рассчитывается поправочный коэффициент γ для используемых диодов. Для этого формулу (3) удобно преобразовать к виду:

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{e}{\gamma kT} U_{\Sigma}, \quad (4)$$

откуда следует, что график зависимости $\ln I$ от U_{Σ} является прямой линией, коэффициент наклона которой

$$a = \frac{e}{\gamma kT}. \quad (5)$$

4. Методика проведения эксперимента и описание установки

Для экспериментального измерения ВАХ в данной работе используется установка, электрическая схема и внешний вид которой приведены на рис. 3 и 4. Исследуемый диод D подключен в прямом направлении к блоку питания БП, обеспечивающим постоянное напряжение, регулируемое реостатом R . Величина тока и напряжение на диоде измеряются миллиамперметром mA и цифровым вольтметром V . В качестве последнего могут быть использованы различные типы цифро-

вых вольтметров, внешний вид которых отличается от приведенного на рис. 4. Во всех случаях вольтметры подсоединяются к диоду с помощью внешних проводов.

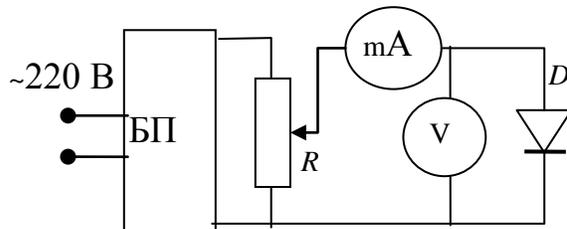


Рис. 3

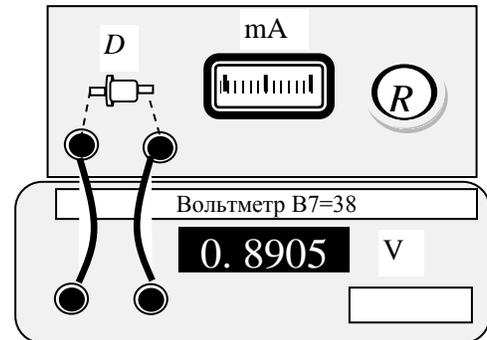


Рис. 4

5. Порядок выполнения работы

Проверьте соединение вольтметра с гнездами контактов диода. Плавно без усилий поверните ручку реостата R против часовой стрелки до упора. Включите вилку питания установки в сеть 220 В. Если используемый вольтметр оснащен тумблером «Вкл–выкл», то включите и его. Последующие измерения можно проводить после прогрева установки в течение не менее 3-х минут. На табло вольтметра должно установиться нулевое значение или близкое к нему. В противном случае необходимо поменять полярность соединительных проводов.

Плавно поворачивая ручку реостата по часовой стрелке, установите показания миллиамперметра 10 мА. Учтите, что миллиамперметр переделан из микроамперметра и вся его шкала соответствует 100 мА. После стабилизации показания вольтметра (обычно проходит несколько секунд) запишите в соответствующую ячейку таблицы 1 значение напряжения на диоде U_D . Проведите аналогичные измерения для других значений тока через диод, указанных в таблице 1.

Выключите установку, вынув вилку питания из розетки.

6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

Рассчитайте с помощью калькулятора $\ln I$ для каждого значения тока в таблице 1 и запишите результаты в соответствующие ячейки. По данным таблицы 1 постройте ВАХ исследуемого диода. На втором графике постройте зависимость $\ln I$ от U_D .

Рассчитайте угловой коэффициент a и стандартную погрешность σ_a его определения методом наименьших квадратов на компьютере, используя програм-

му Microsoft Excel. Для этого откройте папку «Обработка результатов ЛР», расположенную на рабочем столе лабораторного компьютера, и запустите файл «Расчет $y = ax + b$ МНК.xls». Затем руководствуйтесь приведенными в файле пояснениями, введя обозначения $y_i = \ln I_i$ и $x_i = U_{Эi}$. Примите в качестве погрешности определения коэффициента наклона a стандартную погрешность (т.е. $\Delta a \approx \sigma_a$). Запишите результаты расчетов в таблицу 1 в стандартной форме $a \pm \Delta a$.

Замечание: последнее означает, что мы принимаем величину доверительной вероятности (надежности измерения) $P = 0,68$ (68%) и, поэтому, коэффициент Стьюдента $t_{P,n-1} \approx 1,0$.

Таблица 1

$I, \text{ мА}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{Э}, \text{ В}$										
$\ln I$										
$a \pm \Delta a =$					$\gamma \pm \Delta \gamma =$					

Руководствуясь формулой (5) рассчитайте поправочный множитель γ и погрешность его определения. Температуру в помещении лаборатории узнайте у преподавателя. Запишите результаты расчета в таблицу 1 в стандартной форме $\gamma \pm \Delta \gamma$. По полученным результатам эксперимента запишите в отчет выводы.

7. Вопросы для подготовки к допуску к лабораторной работе

1. Напишите выражение для количества основных носителей, способных преодолеть потенциальный барьер, после подачи прямого напряжения на p - n -переход.
2. Поясните причину появления поправочного коэффициента в формуле ВАХ.
3. Расскажите о порядке проведения измерений и обработки результатов.
4. Поясните, почему для определения поправочного коэффициента целесообразно экспериментальные данные представить в виде графической зависимости $\ln I$ от $U_{Э}$.
5. Что является причиной резистивных свойств p - n -перехода?
6. Что является причиной емкостных свойств p - n -перехода?
7. Как должны быть расположены атомы донорной примеси по отношению к атомам основного элемента полупроводника в периодической системе Д.И. Менделеева?

8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008-2014.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. М.: Наука (или другое), 2008-2014 г.