

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

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

Кафедра физики

**К.В. Захарченко, Т.В. Скоробогатова,
С.Н. Спасибкина**

ФИЗИКА

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ПОСОБИЕ

по выполнению лабораторной работы КС-3

**Определение ширины запрещенной зоны
полупроводника**

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

Москва - 2015

ББК 53

З-38

Рецензент канд. техн. наук, доц. С.М. Новиков

Захарченко К.В., Скоробогатова Т.В., Спасибкина С.Н.

З-38 Физика. Дополнительные главы физики. Физические основы современных технологий: пособие по выполнению лабораторной работы КС-3 «Определение ширины запрещенной зоны полупроводника». - М.: МГТУ ГА, 2015. - 12 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебных дисциплин «Физика», «Дополнительные главы физики», «Физические основы современных технологий» по учебному плану для студентов I-II курсов всех направлений и специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 04.09.2014 г. и методического совета 23.09.2014 г.

Подписано в печать 13.03.15 г.

Печать офсетная
0,7 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 1972/

0,61 уч.-изд. л.
Тираж 100 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-3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

1. Цель работы

Изучение зонной теории твердых тел; экспериментальное определение ширины запрещенной зоны полупроводника; исследование зависимости сопротивления полупроводника от температуры.

2. Подготовка к работе

Изучите по лекциям или учебникам [1, 2] основные понятия, относящиеся к данной работе: механизм собственной электропроводности полупроводников, электроны и дырки, зависимость электропроводности полупроводников от температуры; зонная теория твердых тел, распределение Ферми-Дирака, энергия Ферми, разрешенные и запрещенные зоны энергии. Прочитайте также разделы 3 и 4 методического описания, ознакомьтесь с конструкцией лабораторного стенда, порядком проведения измерений и обработки их результатов. Подготовьте ответы на контрольные вопросы. Оформите проект отчета по лабораторной работе.

3. Краткая теория

Кристаллические твердые тела по своим электрическим свойствам подразделяются на три основных типа: металлы, полупроводники, диэлектрики. Наименьшим удельным сопротивлением характеризуются металлы ($\rho < 10^5$ Ом·м при комнатной температуре), далее идут полупроводники ($\rho = 10^5 \div 10^8$ Ом·м) и диэлектрики ($\rho > 10^8$ Ом·м). При этом у **металлов** удельное сопротивление **возрастает с увеличением температуры**, а у **полупроводников** и диэлектриков – **уменьшается**.

Объяснение такой зависимости проводимости от температуры дает **зонная теория** твердых тел. Электроны в кристаллах находятся в периодическом потенциальном поле, создаваемом неподвижными ионами кристаллической решетки. Из решения уравнения Шредингера следует, что

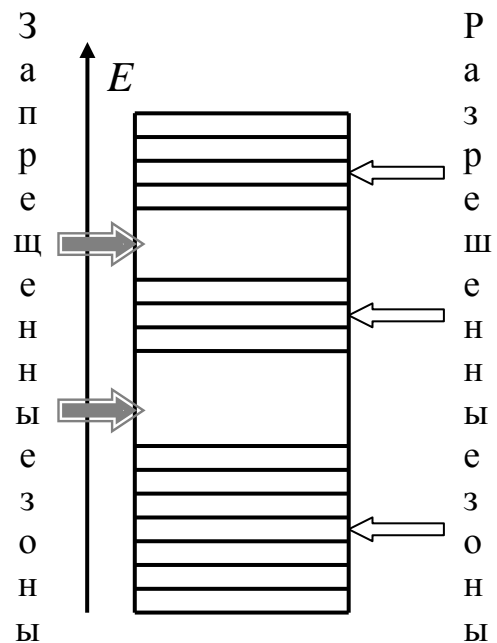


Рис. 1. Схема энергетических зон в твердом теле

спектр энергии электронов в этом случае представляет собой набор **разрешенных зон**, которые принято обозначать на энергетической диаграмме в виде полос (зон) близкорасположенных дискретных уровней рядом с осью энергии и **запрещенных зон**, не содержащих энергетических уровней (рис. 1).

Ширина зон постоянна для данного вещества и не зависит от размеров кристалла. Таким образом, чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Разрешенные зоны имеют ширину порядка нескольких электрон-вольт. Следовательно, если кристалл содержит 10^{23} атомов, расстояние между соседними уровнями в зоне составляет примерно 10^{-23} эВ.

Существование энергетических зон позволяет объяснить с единой точки зрения особенности электропроводности металлов, полупроводников и диэлектриков.

Заполнение электронами уровней в разрешенных зонах **при абсолютном нуле** температуры происходит согласно:

1) **принципу Паули**: в любом квантовом состоянии, характеризуемом одинаковым набором 4-х квантовых чисел, может быть не более одного электрона;

2) **принципу минимума энергии**: электроны заполняют энергетические уровни, начиная с самого нижнего.

Согласно квантовой статистике среднее количество электронов в одном квантовом состоянии с энергией E в условиях термодинамического равновесия определяется **распределением (функцией) Ферми-Дирака**:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}, \quad (1)$$

где E_F – называется **уровнем Ферми** или **энергией Ферми** (энергия, ниже которой все электронные состояния при $T = 0$ К заняты), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

В металлах при температуре $T = 0$ К график зависимости функции Ферми-Дирака от энергии имеет вид, показанный на рис. 2

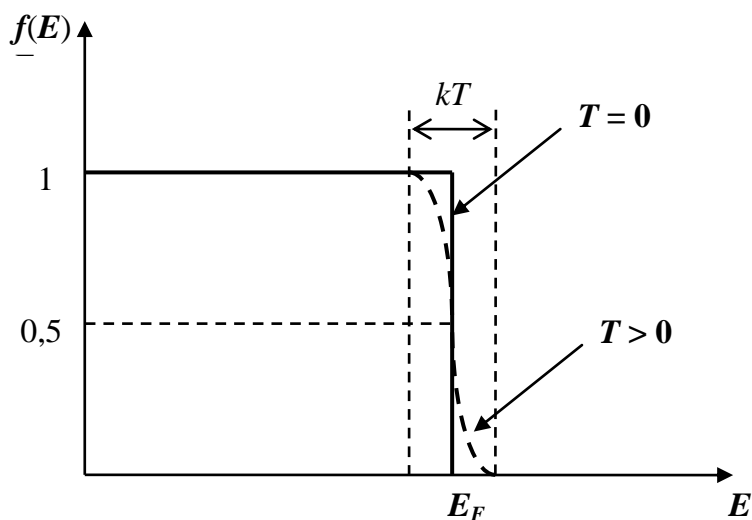


Рис. 2. Функция распределения Ферми-Дирака

от энергии имеет вид, показанный на рис. 2 (сплошная линия). При $T = 0$ К все энергетические уровни при $E \leq E_F$ заняты попарно электронами (с учетом проекции спина $m_s = \pm \frac{1}{2}$), а при $E > E_F$ – свободны. При температурах, отличных от абсолютного нуля, часть электронов переходит на более высокие уровни, что приводит к

«размытию» ступеньки (пунктирная линия). При любой температуре в **металлах** среднее значение функции распределения при $E = E_F$ (рис. 2):

$$\langle f(E_F) \rangle = \frac{1}{2}.$$

Рассмотрим заполнение зон в металлах, полупроводниках и диэлектриках. **Валентной зоной** будем называть разрешенную зону, возникшую из уровней, на которых находятся валентные электроны в основном состоянии атомов. При абсолютном нуле валентные электроны заполняют нижние уровни валентной зоны. При этом более высокие разрешенные зоны будут от электронов свободны. В зависимости от степени заполнения валентной зоны электронами и ширины запрещенной зоны возможны три случая, изображенные на рис. 3.

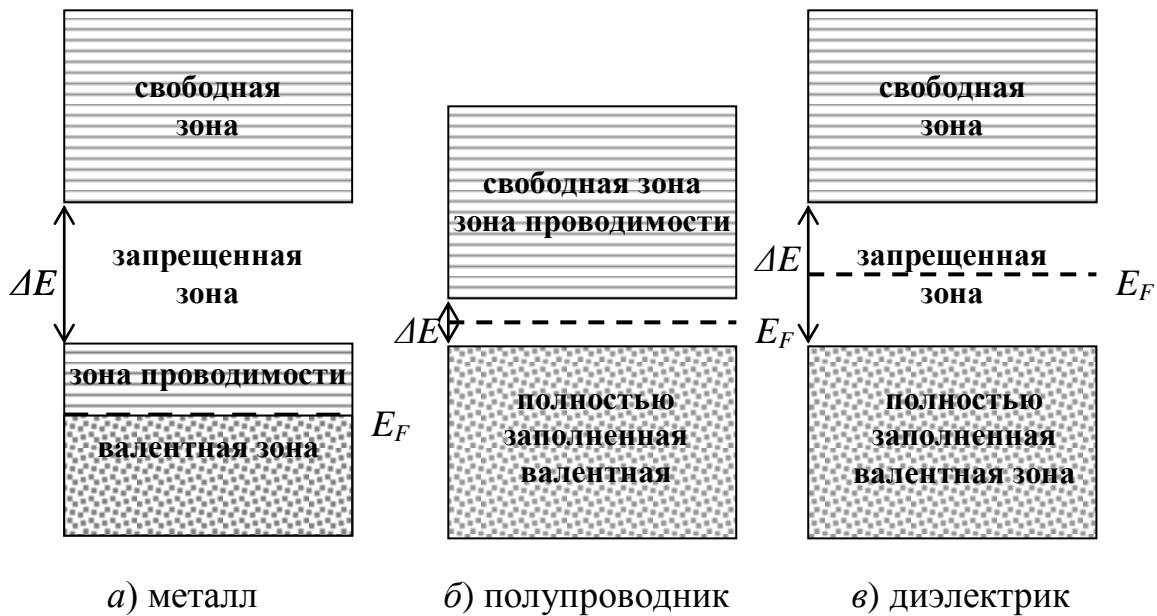


Рис. 3. Схема энергетических зон металлов, полупроводников и диэлектриков при $T = 0$ К.

В случае металлов (а) электроны заполняют валентную зону не полностью, поэтому для того, чтобы электроны, находящиеся на верхних уровнях, переместились на более высокие свободные уровни, им достаточно сообщить совсем небольшую порцию энергии порядка $10^{-23} \div 10^{-22}$ эВ. Энергия теплового движения (kT) составляет при $T = 1$ К величину порядка 10^{-4} эВ. Следовательно, при температурах, отличных от абсолютного нуля, часть электронов переходит на более высокие уровни за счет тепловой энергии. Дополнительная энергия, вызванная действием на электрон электрического поля, также оказывается достаточной для перевода электронов на свободные уровни. Кристалл с подобной схемой заполнения энергетических уровней будет представлять собой **проводник**. При этом уровень Ферми лежит внутри валентной зоны (рис. 3а). Для металлов **валентная зона** является **зоной проводимости**. В случаях (б) и (в) (рис. 3) уровни валентной зоны **полностью заняты** электронами – зона заполнена.

Для того чтобы увеличить энергию электрона на ΔE , необходимо сообщить ему количество энергии не меньше, чем ширина запрещенной зоны. Электрическое поле (во всяком случае, такой напряженности, при которой не происходит электрический пробой кристалла) сообщить электрону такую энергию не в состоянии. При таких условиях **электрические свойства кристалла** определяются **шириной запрещенной зоны ΔE** . Если **ширина запрещенной зоны ΔE** велика (порядка нескольких электрон-вольт), тепловое движение не сможет забросить в свободную зону заметное количество электронов. В этом случае кристалл проявляет свойства **диэлектрика**. Если же ширина запрещенной зоны ΔE невелика ($0,5 \div 1,5$ эВ), энергия теплового движения оказывается достаточной для того, чтобы перевести часть электронов в верхнюю свободную зону. Эти электроны будут находиться в условиях, аналогичных тем, в которых находятся валентные электроны в металле. **Свободная зона** окажется для них **зоной проводимости**. Одновременно станет возможным переход электронов валентной зоны на её освободившиеся верхние уровни. Такое вещество называется **собственным полупроводником**.

Таким образом, **полупроводниками** являются кристаллические вещества, у которых при $T = 0$ К валентная зона полностью заполнена электронами, ширина запрещенной зоны ΔE невелика (рис. 3б).

Различают **собственные** и **примесные** полупроводники. К числу собственных относятся химически чистые полупроводники. В **собственном полупроводнике** при абсолютном нуле все уровни валентной зоны полностью заполнены, а в зоне проводимости электроны отсутствуют. Электрическое поле не может перебросить электроны из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому собственные полупроводники ведут себя при абсолютном нуле как диэлектрики. При температурах, отличных от нуля, часть электронов с верхних уровней валентной зоны переходит в результате теплового возбуждения на

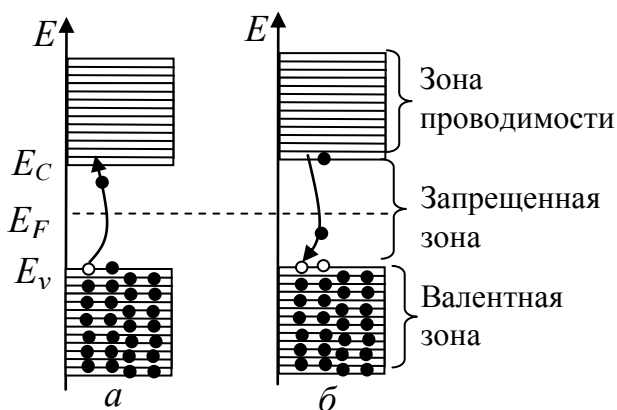


Рис. 4. Процессы генерации (а) и рекомбинации (б) в полупроводниках

нижние уровни зоны проводимости. В этих условиях электрическое поле получает возможность изменять состояние электронов, находящихся в зоне проводимости. Вследствие образования вакантных уровней в валентной зоне электроны этой зоны также могут участвовать в проводимости и изменять свою скорость под воздействием внешнего электрического поля. В результате электропроводность полупроводника становится отличной от нуля.

Процесс перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости называется **генерацией** (рис. 4а). В результате генерации в валентной зоне воз-

никают вакантные состояния, получившие название «дырок». Во внешнем электрическом поле на освободившееся от электрона место – «дырку» – может переместиться электрон с соседнего уровня, а «дырка» появится в том месте, откуда ушел электрон и т. д. Такое эстафетное перемещение электронов в валентной зоне эквивалентно перемещению «дырки» в направлении, противоположном движению электрона, так, как если бы «дырка» обладала положительным зарядом, равным по величине заряду электрона. Проводимость собственных полупроводников, обусловленная электронами, называется **электронной** или проводимостью ***n*-типа** (от лат. *negative* – отрицательный), а проводимость, обусловленная квазичастицами – «дырками», **дырочной** проводимостью или проводимостью ***p*-типа** (от лат. *positive* – положительный).

Возможен процесс, когда на место «дырки» попадает не валентный электрон, а электрон проводимости. При этом происходит как бы исчезновение электрона проводимости и «дырки». Это явление называется **рекомбинацией** (рис. 4б).

Отметим, что по условию сохранения нейтральности (полный заряд полупроводника равен нулю) концентрации электронов проводимости ***n*** и дырок ***p*** в собственном полупроводнике равны: **$n = p$** .

Среднее количество электронов на уровнях, находящихся вблизи дна зоны проводимости (E_C), согласно формуле (1) равно:

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_C - E_F}{kT}}} \approx e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}. \quad (2)$$

Обычно $E_C - E_F \gg kT$, так как величина $kT \approx 0,026$ эВ при $T = 300$ К, тогда как $(E_C - E_F) = 0,3 \div 0,6$ эВ, следовательно $e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} \gg 1$.

Концентрацию электронов в зоне проводимости ***n*** и концентрацию дырок ***p*** с энергиями, близкими к верхней границе валентной зоны, можно найти по формуле:

$$n = p = Ce^{-\frac{\Delta E}{2kT}}. \quad (3)$$

При этом плотность тока в полупроводнике \vec{j} будет зависеть от носителей заряда как одного, так и другого знака:

$$\vec{j} = e(p\vec{v}_p + n\vec{v}_n). \quad (4)$$

Здесь e – заряд электрона; n , p – концентрации электронов проводимости и дырок; \vec{v}_p, \vec{v}_n – их дрейфовые скорости.

По закону Ома плотность тока $|\vec{j}|$ обратно пропорциональна удельному сопротивлению ρ :

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho},$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля.

Учитывая зависимость плотности тока от концентрации электронов и дырок (4), зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры можно найти по формуле:

$$\rho = \rho_{\text{пр}} e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{пр}}$ – коэффициент, слабо зависящий от температуры, а ΔE – ширина запрещенной зоны.

Формула (5) справедлива для **собственного полупроводника**. В реальных полупроводниках всегда присутствуют примесные атомы. Энергетические уровни атомов примеси могут находиться в запрещенной зоне, следовательно, электроны с этих уровней могут перейти в зону проводимости, имея меньшую энергию активации, чем электроны из валентной зоны. Поэтому при **низких температурах** проводимость полупроводников преимущественно зависит от концентрации и типа примеси. Для того чтобы можно было воспользоваться формулой (5), необходимо нагреть образец до сравнительно **высокой температуры**, при которой проводимость полупроводника можно считать **собственной**. Таким образом, для определения ширины запрещенной зоны полупроводника следует проводить измерения сопротивления при сравнительно более высоких температурах.

4. Постановка эксперимента

Сопротивление образца R связано с удельным сопротивлением материала ρ :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (6)$$

где l – длина образца, S – площадь его поперечного сечения. Изменением линейных размеров образцов в условиях данной задачи можно пренебречь.

Так как сопротивление образца пропорционально его удельному сопротивлению, их температурные зависимости качественно совпадают:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

Прологарифмировав это выражение, получим:

$$\ln \frac{R}{R_{100}} = \frac{\Delta E}{2kT} \cdot \frac{1}{T} + B, \quad (7)$$

где B – константа, зависящая от выбора значения R_{100} .

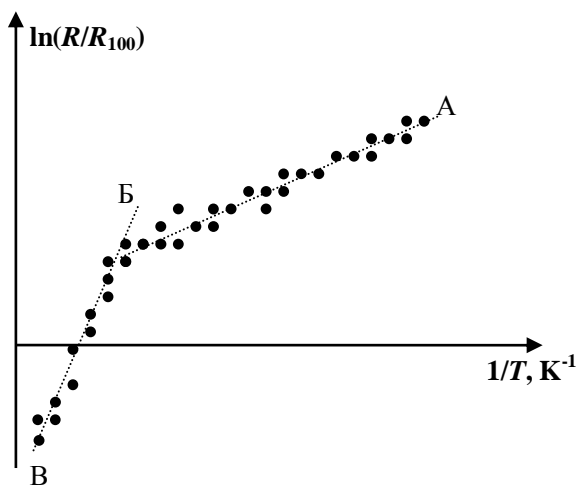


Рис. 5. Примерный график зависимости логарифма относительного сопротивления полупроводника от обратной температуры

В работе будем исследовать образец №3 (полупроводник). Ширина запрещенной зоны полупроводника может быть найдена из наклона графика зависимости $\ln(R/R_{100}) = f(1/T)$ на участке **БВ**. При **низких температурах** (участок **АБ** на рис. 5) проводимость, следовательно, и сопротивление полупроводника определяются наличием **примесей и дефектов**. При **высоких температурах** (участок **БВ** на графике) проводимость полупроводника преимущественно определяется **собственной** проводимостью полупроводника, и согласно формуле (7) значение энергии ΔE (**ширины запрещенной зоны**) может быть определено из наклона прямой на этом участке.

Таким образом, для исследования собственной проводимости полупроводника мы будем исследовать высокотемпературный участок **БВ** графика $\ln(R/R_{100}) = f(1/T)$.

Коэффициент наклона этой прямой может быть использован для вычисления ΔE – ширины запрещенной зоны:

$$\Delta E = 2k \cdot a, \quad (8)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

5. Описание установки

Экспериментальная установка состоит из измерительного блока и блока управления, которые соединены кабелем (рис. 6). Блоки подключаются к сети электропитания с напряжением $U = 220$ В.

Измерительный блок содержит электропечь с помещенными внутри образцами, датчик температуры (термометр сопротивления), вентилятор для работы в режиме охлаждения и источники питания электропечи и вентилятора.

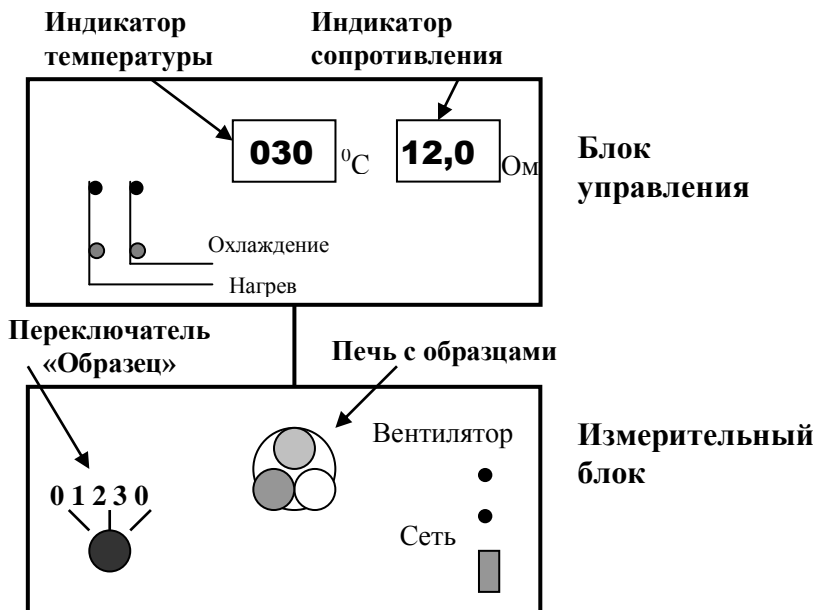


Рис. 6. Схема установки

На передней панели измерительного блока находится окно, позволяющее наблюдать образцы, установленные в электропечи. На этой же панели размещены выключатель «Сеть» и переключатель «Образец». Переключатель «Образец» позволяет менять образец, подключенный к измерительному входу блока управления. Индикаторы «Сеть» и «Вентилятор» светятся при вклю-

чении питающей сети и во время работы вентилятора, соответственно.

Блок управления позволяет осуществлять включение и выключение электропечи и вентилятора в измерительном блоке. Управление осуществляется при помощи кнопок «Нагрев» и «Охлаждение», расположенных на передней панели блока. Кроме того, на передней панели находятся индикаторы температуры и сопротивления образцов.

Установка позволяет проводить измерения сопротивления трех различных образцов (металла, полупроводника и сплава с низким температурным коэффициентом сопротивления) в диапазоне температур от комнатной температуры до 120 °С. Цифры около переключателя образцов соответствуют: «1» - металл, «2» - сплав с низким температурным коэффициентом, «3» - полупроводник, «0» - измерение сопротивления не производится.

6. Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что переключатель «Образец» находится в положении «0» - справа. Нажата кнопка «Охлаждение». Включите оба блока измерительный и блок управления в сеть (выполняет лаборант). Дать прогреться в течение 5 минут. При этом индикатор температуры на блоке управления должен показывать температуру в помещении.

2. Перевести переключатель «Образец» в положение «3». Включить нагрев образца, измерить сопротивление образца $R_{\text{нагр}}$ при различных температурах и занести в таблицу 1 результаты. Измерения проводить при нагреве через каждые 3÷10 градусов (**необходимое количество столбцов в таблице 1 определить самостоятельно или по указанию преподавателя**). Записать сопротивление R_{100} при выбранной температуре (например, при температуре 100 °С). Выключить нагрев, достигнув максимальной температуры (100 °С).

3. Включить охлаждение образца и занести в таблицу 1 результаты измерений сопротивления образца $R_{\text{охл}}$ при различных температурах. Измерения проводить при охлаждении через каждые 3÷10 градусов, начиная от максимальной температуры и заканчивая первоначальной (30±5) °С.

4. Дождаться, пока температура образца достигнет комнатной, после чего **обязательно** выключить установку.

ВНИМАНИЕ! Через каждые полтора часа измерений установку следует выключать на 20–30 минут.

7. Обработка результатов и оформление отчета

1. По данным табл.1 рассчитать среднее значение сопротивления R при каждой температуре по формуле:

$$R = \frac{R_{\text{нагр}} + R_{\text{охл}}}{2}, \quad (9)$$

где $R_{\text{нагр}}$ и $R_{\text{охл}}$ – значения сопротивления образца, измеренные в режиме нагрева и охлаждения, соответственно. Полученные значения занести в таблицу.

2. Рассчитать натуральный логарифм отношения сопротивления $\ln(R/R_{100})$ при каждой из температур. (R_{100} – сопротивление при температуре 100 °С или другое по указанию преподавателя).

3. Построить график зависимости $\ln(R/R_{100})$ от величины $1/T$, где T – абсолютная температура (примерный график приведен на рис. 5). Определить по коэффициенту наклона прямой $a = \frac{\Delta \ln(R/R_{100})}{\Delta(1/T)}$ величину ширины запрещенной зоны ΔE по формуле (8).

4. При помощи программы обработки данных «расчет $y=ax+b$ МНК.xls» найти коэффициент наклона прямой a и его среднеквадратичную погрешность σ_a , при этом за переменную x принять величину $1/T$, за переменную y принять $\ln(R/R_{100})$. Рассчитать ширину запрещенной зоны ΔE и ее среднеквадратичную погрешность $\sigma_{\Delta E}$:

$$\Delta E = 2k \cdot a \text{ и } \sigma_{\Delta E} = 2k \cdot \sigma_a, \quad (10)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Выразить величины ΔE и $\sigma_{\Delta E}$ в электрон-вольтах ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

5. Вычислить абсолютную погрешность $\Delta a = t_{0,7} \sigma_a$ и относительную погрешность $\delta a = \frac{\Delta a}{a}$ для доверительной вероятности $P=0,7$, где $t_{0,7}$ – коэффициент Стьюдента для данного количества точек измерения.

6. Сравнить результаты расчёта ΔE , полученные в п. 3 и п. 4

7. По найденной величине ΔE определить исследуемый полупроводник, используя данные табл. 2.

8. Написать заключение.

8. Контрольные вопросы

1. Что такое валентная зона и зона проводимости?
2. Каковы основные отличия схемы энергетических зон металлов, полупроводников и диэлектриков?
3. Что такое запрещенная зона? Как различается её ширина для полупроводников и диэлектриков?
4. Как определить среднее количество электронов в квантовом состоянии с заданной энергией?
5. Что такое энергия Ферми?
6. Как зависят от температуры удельное сопротивление металлов полупроводников?
7. Что такое собственный полупроводник?

8. Нарисуйте схему энергетических зон собственного полупроводника. Обозначьте энергии дна зоны проводимости, потолка валентной зоны, уровень энергии Ферми при нулевой температуре.

9. Объясните методику определения ширины запрещенной зоны полупроводника по полученным в работе экспериментальным данным.

9. Список литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа. 2005–2012 гг.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: Пособие: Кн.5. – М.: Наука. Физмат лит. 2010 г.

Таблица 1

Зависимость сопротивления полупроводника от температуры

(необходимое количество столбцов определить самостоятельно!
или по указанию преподавателя)

$R_{100} =$ Ом								
$t, ^\circ\text{C}$								
T, K								
$1/T, 10^{-2} \text{K}^{-1}$								
$R_{\text{нагр}}, \text{Ом}$								
$R_{\text{охл}}, \text{Ом}$								
$R, \text{Ом}$								
$\ln(R/R_{100})$								
$a =$ К, $\sigma_a =$ К, $\Delta a =$ К, $\delta a =$ $a = (\pm) \text{K}$ $P = 0,7$								
$\Delta E = (\pm) \text{эВ}$ материал –								

Таблица 2

Ширина запрещенных зон некоторых полупроводников

Полупроводник	Кремний	Германий	Арсенид галлия	Арсенид алюминия	Арсенид индия	Нитрид галлия
$\Delta E, \text{эВ}$	1,12	0,67	1,42	2,2	0,35	3,41