

Содержание

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть	4
2.1. Деление кристаллов на проводники, полупроводники и диэлектрики	4
2.2. Зависимость электропроводности металлов от температуры	5
2.3. Зависимость собственной проводимости полупроводников от температуры	6
2.4. Температурная зависимость проводимости примесных полупроводников	9
3. Экспериментальная часть.....	10
3.1. Описание установки	10
3.2. Требования по технике безопасности.....	11
3.3. Порядок выполнения работы	11
3.4. Требования к отчету	14
4. Контрольные вопросы	15
Список литературы	15

Лабораторная работа № 80

Исследование температурной зависимости сопротивления металлов и полупроводников

1. Цель работы

1. Определение температурного коэффициента сопротивления металлов.
2. Определение ширины запрещенной зоны полупроводников.

2. Теоретическая часть

2.1. Деление кристаллов на проводники, полупроводники и диэлектрики

Энергетическая зона кристалла, состоящая из N атомов, представляет собой систему N дискретных энергетических уровней, причем на каждом уровне в соответствии с принципом Паули может разместиться не более двух электронов. По характеру заполнения зон электронами все кристаллы можно разделить на две большие группы: проводники (металлы) и непроводники.

В металлах электроны заполняют валентную зону (I) не полностью (рис. 2.1, а)

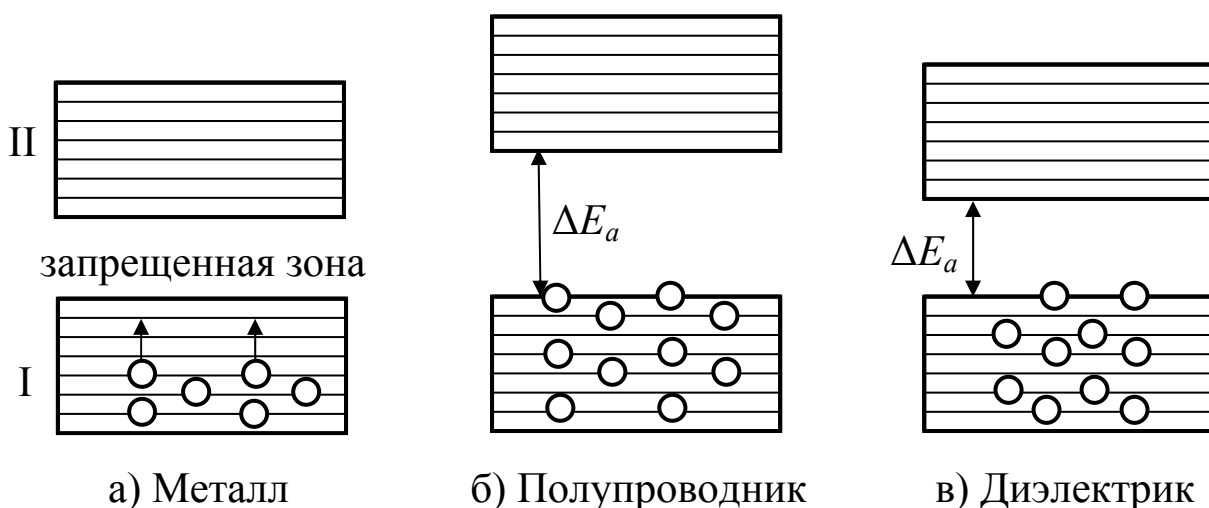


Рис. 2.1

Если поместить такой кристалл в электрическое поле напряженности E , то дополнительная энергия, вызванная действием

на электрон этого поля, оказывается достаточной для перевода электронов в зоне I на более высокие свободные уровни, а их места занимают электроны с более низких уровней. Поэтому электроны могут приобретать дополнительную скорость в направлении, противоположном направлению поля. Следовательно, наблюдается преимущественное движение электронов, что указывает на появление электропроводности в кристалле.

Если валентная зона (I) заполнена электронами целиком, т.е. нет свободных энергетических уровней (рис. 2.1, б, в), то движение электронов внутри зоны I невозможно, так как это противоречило бы принципу Паули. В отсутствие внешнего возбуждения (нагревания, облучения и т.д.) такой кристалл является диэлектриком, следовательно, не проводит электрический ток. В зоне проводимости II (рис. 2.1) энергетические уровни свободны, но перевод электронов из заполненной зоны I в зону II только под влиянием электрического поля невозможен, так как энергии даже очень мощных электрических полей для этого недостаточно.

Таким образом, необходимым условием появления у кристаллов электропроводности является наличие в их энергетическом спектре зон, укомплектованных электронами лишь частично (рис. 2.1, а), отсутствие таких зон делает их непроводниками (рис. 2.1, а, б). Деление же непроводников на типичных диэлектриков и полупроводников условно: по ширине запрещенной зоны (ΔE_a). У типичных диэлектриков $\Delta E_a > 3$ эВ, у типичных полупроводников $\Delta E_a < 1$ эВ.

2.2. Зависимость электропроводности металлов от температуры

Электропроводность чистых металлов обусловлена дрейфом свободных электронов. Удельная электропроводность металлов описывается формулой

$$\sigma = e n u, \quad (2.1)$$

где e – заряд электрона, n – концентрация, u – подвижность электронов, $\sigma = \frac{1}{\rho}$ (ρ – удельное сопротивление металла).

По квантовой теории существование у металлов электрического сопротивления объясняется рассеянием электронных волн

(волн де-Бройля) на дефектах кристаллической решетки. Рассеяние электронных волн тем больше, чем более несовершенна эта решетка, т.е. чем больше дефектов она содержит. Тепловые колебания решетки нарушают ее периодичность, следовательно, тоже приводят к появлению дефектов. При увеличении температуры происходит возрастание тепловых колебаний кристаллической решетки, на которых рассеиваются электроны, и электропроводность уменьшается, а сопротивление, наоборот, растет. Это происходит до тех пор, пока температура не достигнет температуры Дебая, имеющей определенное значение для каждого металла (например, для меди 339 К). Температура Дебая (Θ) определяет низкотемпературную область, где необходимо пользоваться квантовой статистикой, от высокотемпературной, где справедливы законы классической статистической механики. При температурах $T \gg \Theta$, удельная электропроводность $\sigma \sim \frac{1}{T}$, а так как удельное

сопротивление $\rho = \frac{1}{\sigma}$, то $\rho \sim T$. Сопротивление проводника определяется формулой

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} \quad (2.2)$$

и при температурах, значительно превышающих температуру Дебая,

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (2.3)$$

где R_0 – сопротивление при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления металла.

2.3. Зависимость собственной проводимости полупроводников от температуры

Химически чистые полупроводники в области не слишком низких температур обладают электропроводностью, обусловленной наличием в них собственных носителей тока – электронов и дырок. Эту проводимость называют собственной проводимостью.

С точки зрения зонной теории возникновение носителей тока объясняется тем, что с повышением температуры электроны из валентной зоны (I) переходят в зону проводимости (II) (рис. 2.2, а). Это приводит к появлению в зоне II свободных электронов, а в зоне I дырок, которые ведут себя как частицы с положительным зарядом.

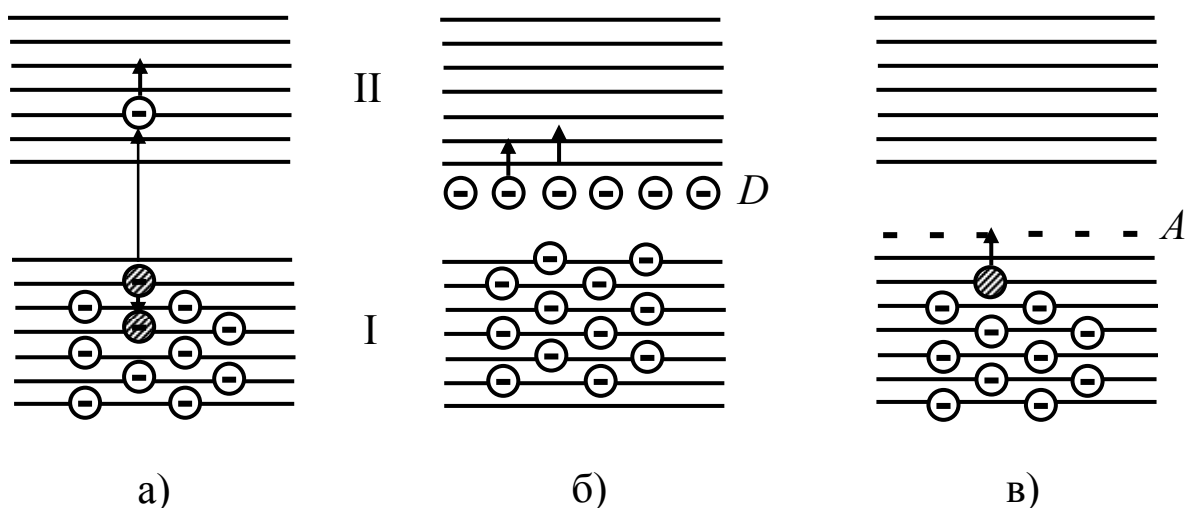


Рис. 2.2

Так как в этих полупроводниках имеются носители двух типов, их удельная электропроводность складывается из удельных электропроводностей электронов $\sigma_n = q_- n_- u_-$ и дырок $\sigma_p = q_+ n_+ u_+$. Заряды носителей $q_- = q_+ = e$, концентрации $n_- = n_+$, отсюда следует, что полная удельная электропроводность собственных полупроводников определяется соотношением

$$\sigma = q_- n_- u_- + q_+ n_+ u_+ = e n (u_- + u_+). \quad (2.4)$$

Температурная зависимость удельной электропроводности σ определяется зависимостью концентрации n от температуры и выражается формулой

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E_a}{2 k T}}.$$

Перейдя от удельной электропроводности σ к сопротивлению полупроводника R , получим

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E_a}{2 k T}}, \quad (2.5)$$

где ΔE_a – ширина запрещенной зоны (энергия активации собственного полупроводника), R_0 – константа, зависящая от природы кристалла, k – константа Больцмана.

В отличие от проводника (2.3), сопротивление полупроводника с ростом температуры падает (рис. 2.3: 1 – проводник, 2 – полупроводник).

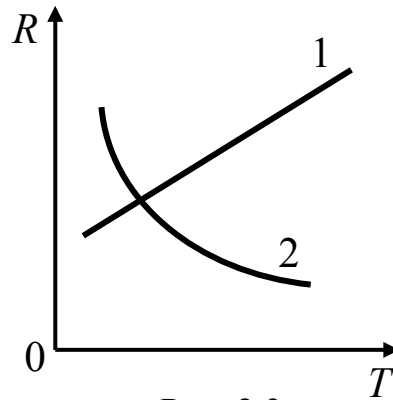


Рис. 2.3

Температурную зависимость сопротивления собственного полупроводника можно изобразить графически. Прологарифмировав выражение (2.5), получим

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E_a}{2k} \frac{1}{T}. \quad (2.6)$$

Зависимость $\ln R$ от $\frac{1}{T}$ имеет вид прямой (рис. 2.4), тангенс угла (α) наклона которой, определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E_a}{2k}. \quad (2.7)$$

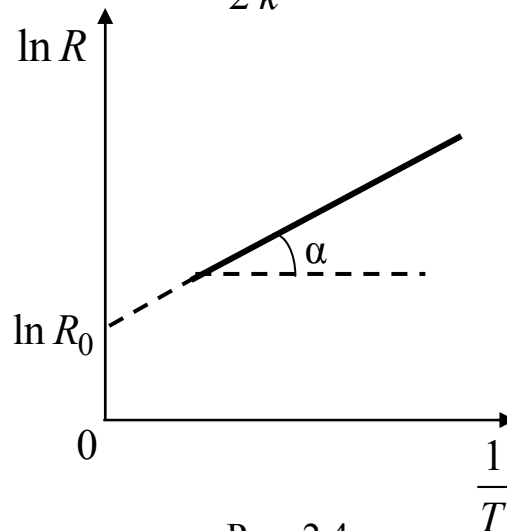


Рис. 2.4

Из приведенного графика можно определить ширину запрещенной зоны, которая согласно (2.7) равна

$$\Delta E_a = 2k \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.8)$$

2.4. Температурная зависимость проводимости примесных полупроводников

Примесные полупроводники бывают двух типов: донорные (n -типа) и акцепторные (p -типа). В донорных полупроводниках основными носителями являются электроны, в акцепторных – дырки.

С точки зрения зонной теории появление носителей тока в полупроводниках n -типа объясняется переходом электронов с донорных примесных уровней (D на рис. 2.2, б) в зону проводимости (II). В полупроводниках p -типа электроны переходят из валентной зоны (I) на акцепторные примесные уровни (A на рис. 2.2, в), в результате чего в зоне I появляются дырки.

Удельная электропроводность полупроводников n -типа определяется соотношением $\sigma_- = q_- n_- u_-$, p -типа – $\sigma_+ = q_+ n_+ u_+$. Температурная зависимость удельной электропроводности примесных полупроводников, а, следовательно, и зависимость от температуры их сопротивления, одинакова для полупроводников n - и p -типа

$$R_n = R_{0n} e^{\frac{\Delta E_D}{2kT}}, \quad R_p = R_{0p} e^{\frac{\Delta E_A}{2kT}},$$

где ΔE_D и ΔE_A – энергии ионизации, соответственно, донорных и акцепторных примесных атомов, $\Delta E_D \approx \Delta E_A \approx 0,015$ эВ.

График зависимости $\ln R_n$ и $\ln R_p$ от $\frac{1}{T}$ является также прямой линией (подобно графику на рис. 2.3), только тангенс угла наклона будет равен, соответственно,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E_D}{2k} \text{ для полупроводника } n\text{-типа}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E_A}{2k} \text{ для полупроводника } p\text{-типа.}$$

Так как энергия ионизации примесных атомов много меньше ширины запрещенной зоны, наклон прямой в случае примесной проводимости меньше, чем на графике температурной зависимости собственных полупроводников.

На рис. 2.5 приведен пример графика температурной зависимости сопротивления примесного полупроводника. На графике можно выделить три характерные области ab , bc , cd .

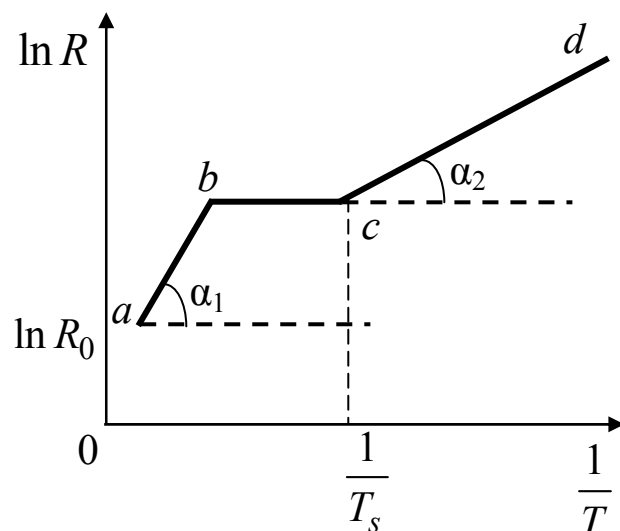


Рис. 2.5

Область cd соответствует низким температурам и отвечает примесной проводимости. Эта область простирается до температуры T_s истощения примесей, при которой все примесные атомы ионизированы, но еще не происходит заметного возбуждения собственных носителей (область bc). Область (ab) соответствует переходу к собственной проводимости полупроводника. Как уже было сказано выше, $\text{tg}\alpha_1 > \text{tg}\alpha_2$.

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание установки

Установка выполнена в виде двух функционально законченных блоков: блока управления и индукции (БУИ) и блока нагревателя (БН). Общий вид установки показан на рис. 3.1.

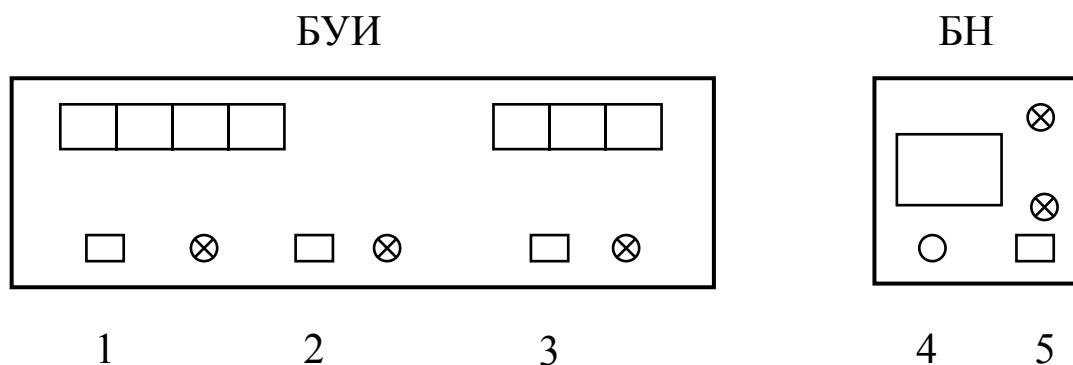


Рис. 3.1

На передней панели БУИ размещены органы управления, позволяющие включать и отключать нагреватель и вентилятор, а так же фиксировать показания температуры и сопротивления. На блоке нагревателя БН имеются переключатели для переключения типа образца (металл – 1, сплав с низким температурным коэффициентом сопротивления – 2, полупроводник – 3). Цифрами обозначены следующие ручки управления установкой: 1 – клавиша «СТОП ИНД» – фиксация показаний, 2 – клавиша «Нагрев» – включение и выключение нагревателя, 3 – клавиша «Вент» – включение и выключение вентилятора в блоке нагревателя, 4 – переключатель типов образцов, 5 – клавиша «Сеть». Температура и сопротивление образца контролируются по индикаторам «°С» и «Ом, кОм, МОм». Для фиксации показаний температуры и сопротивления необходимо нажать клавишу 1, при этом на индикаторах установится значение, соответствующее моменту нажатия. Фактическое значение этих величин соответствует отжатою положению клавиши 5 «СТОП ИНД». Для нагрева образцов необходимо нажать клавишу 3 «Нагрев». При включенном нагревателе на панели загорается индикатор «Нагрев». Пределы измерения устанавливаются автоматически.

3.2. Требования по технике безопасности

1. При выполнении работы необходимо:

- а) ознакомиться с устройством установки, принципом действия;
- б) убедиться, что установка заземлена;
- в) убедиться в исправности сетевых шнуров.

2. При работе необходимо соблюдать осторожность, так как в ходе эксперимента происходит нагрев печи до 125°С.

3. Вскрытие печи категорически запрещается.

3.3. Порядок выполнения работы

1. Подключите к сети блок БУИ и на блоке БН нажмите кнопку «Сеть», при этом должна загореться лампочка.

2. На блоке БН переключатель 4 (рис. 3.1) поставьте сначала в положение 1 (металл), затем в положение 3 (полупроводник), снимая

при этом показания с индикаторов температуры (t) и сопротивления (R). Эти данные будут соответствовать комнатной температуре.

3. На блоке БУИ клавишей 2 (рис. 3.1) «Нагрев» включите нагреватель образцов. Через каждые 10°C снимайте показания сопротивления образцов из металла и полупроводника, ставя переключатель 4 сначала в положение 1, затем в положение 3. Производите измерения до 120°C , затем выключите нагреватель, отжав клавишу 2.

4. Данные для образца 1 занесите в табл. 3.1, для образца 3 – в табл. 3.2.

5. По данным табл. 3.1 на миллиметровой бумаге постройте график зависимости R от t . Экстраполяцией определите значение R_0 (рис. 3.2).

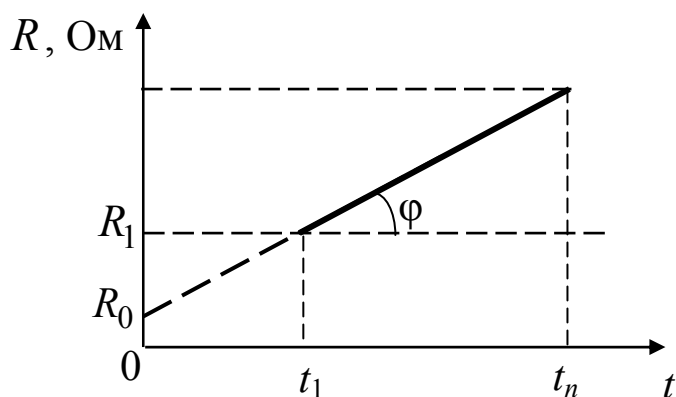


Рис. 3.2

6. Из графика определите тангенс угла наклона прямой

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_n - R_1}{t_n - t_1}.$$

Как следует из формулы (2.3), $\operatorname{tg} \varphi = R_0 \cdot \alpha$, отсюда температурный коэффициент сопротивления металла равен

$$\alpha = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{R_0}.$$

7. Рассчитайте коэффициент α , сравните полученный результат с данными, приведенными в табл. 3.3 и определите металл, из которого сделан образец.

8. По данным табл. 3.2 постройте график зависимости $\ln R$ от $\frac{1}{T}$.

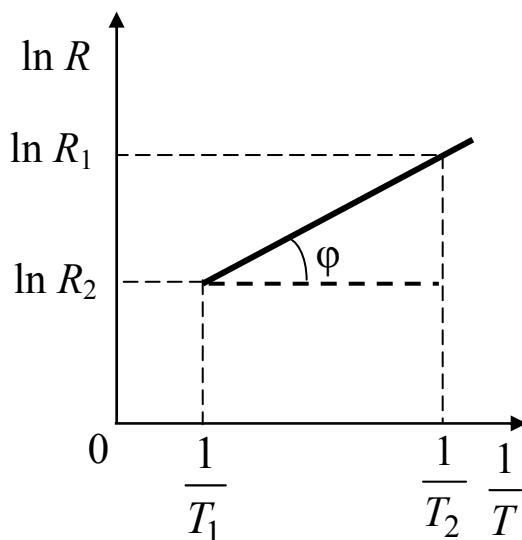


Рис. 3.3

Выделите на графике прямолинейный участок и определите $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$. Так как $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta E}{2k}$ (2.7), то $\Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg} \varphi$,

где k – постоянная Больцмана, равная $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. По значению ΔE определите тип проводника: примесный или собственный.

Таблица 3.1

Номер показания	1	2	3	4
$t, ^\circ\text{C}$				
$R, \text{Ом}$				

Таблица 3.2

Номер показания	1	2	3	4
$t, ^\circ\text{C}$				
T^{-1}, K^{-1}				
$R, \text{кОм}$				
$\ln R$				

Температурный коэффициент сопротивления
металлических образцов (при 18°C)

Таблица 3.3

Вещество	$\alpha \cdot 10^4$
Алюминий	38
Вольфрам	51
Железо	62
Золото	40
Латунь	10
Манганин (3% Ni, 12% Mn, 85% Cu)	0,02 – 0,5
Медь	42,8
Никель	27
Константан (40% Ni, 1,2% Mn, 58,8% Cu)	0,4 – 0,1
Нихром (67,5% Ni, 1,5% Mn, 16% Fe, 15% Cr)	1,7
Олово	45
Платина	38
Свинец	43
Серебро	40
Цинк	37

3.4. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Краткую теорию.
4. Формулы для выполнения расчетов.
5. Заполненные таблицы.
6. Графики зависимости: для проводника $R = f(t)$, для полупроводника $\ln R = f(1/T)$, выполненные на миллиметровой бумаге.
7. Определенные из графиков значения температурного коэффициента сопротивления металла α и ширины запрещенной зоны полупроводника ΔE .
8. Выводы. В выводах указать, из какого металла сделан образец и к какому типу относится полупроводник: химически чистому или примесному.

4. Контрольные вопросы

1. Какие вещества с точки зрения зонной теории относятся к проводникам, полупроводникам и диэлектрикам?
2. От чего зависит электропроводность вещества?
3. Как изменяется с температурой сопротивление проводника?
4. Какую физическую величину можно получить из температурной зависимости сопротивления металлов?
5. Как объясняется с точки зрения зонной теории собственная проводимость полупроводников?
6. Какую физическую величину можно получить из температурной зависимости электропроводности собственных полупроводников?
7. Как объясняется с точки зрения зонной теории проводимость полупроводников n -типа?
8. Как объясняется с точки зрения зонной теории проводимость полупроводников p -типа?
9. Какую физическую величину можно получить из температурной зависимости электропроводности примесных полупроводников?

Список литературы

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. т. 3. – Спб.: Издательство «Ланси», 2007.
2. *Епифанов Г.И.* Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977.
3. *Трофимова Т. И.* Курс физики. М.: Высшая школа, 1998.