

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО “Уральский государственный технический университет – УПИ”

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА

Методические указания к лабораторной работе № 33
по физике для студентов всех видов обучения всех
специальностей

Екатеринбург 2006

УДК 537.324.632

Составители: Мелких А.В., Шейнкер М.Е., Базин Ю.А.

Научный редактор доц., канд. физ.-мат. наук В.С. Гушин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА: методические указания по лабораторной работе 33 по физике/ А.В.Мелких, М.Е.Шейнкер, Ю.А.Базин. Екатеринбург: УГТУ, 2006. 18с.

На примере собственного полупроводника (германия) экспериментально исследуется статическая вольт-амперная характеристика полупроводникового резистора и определяется ширина запрещенной зоны полупроводника. Для проведения эксперимента и обработки результатов измерений наряду с обычными средствами предусмотрено использование учебно-измерительного вычислительного комплекса на базе микро ЭВМ "Искра 1256".

Предназначены для студентов всех видов обучения всех специальностей.

Библиогр.: 5 назв. Рис.6 Прилож. 2

Подготовлено кафедрой физики

Уральский государственный
технический университет, 2006

1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ В СОБСТВЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Собственные полупроводники – это химически чистые (без примесей) полупроводники.

В кристаллических твердых телах атомы, составляющие кристалл, расположены упорядочено, образуя пространственную кристаллическую решетку. Из атомной физики и квантовой механики известно, что энергетический спектр электронов в изолированном атоме дискретен, а число электронов на каждом энергетическом уровне ограничено и определяется принципом Паули. В кристаллах энергетическое состояние электронов определяется не только взаимодействием их с ядром своего атома, но и взаимодействием с другими атомами кристаллической решетки. В результате этого взаимодействия атомные дискретные энергетические уровни смещаются, расщепляются, образуя зоны разрешенных энергий, разделенные зонами запрещенных энергий.

Разрешенная зона, возникающая из того атомного уровня, на котором находятся валентные электроны в основном состоянии атома, называется валентной зоной. При $T=0$ К в собственных полупроводниках валентная зона полностью заполнена.

Более высокие разрешенные зоны при $T = 0$ К от электронов свободны. Наиболее низкая из них, т.е. ближайшая к валентной зоне, называется зоной проводимости (рис. 1, а).

Зона проводимости отделена от валентной зоны запрещенной зоной шириной E_g . При $T=0$ К такой полупроводник не проводит электрического тока, поскольку в нем нет свободных носителей заряда.

Чтобы поднять электрон из валентной зоны в зону проводимости, т.е. перевести его из связанного состояния в свободное, ему необходимо сообщить энергию, не меньшую, чем E_g . Эта энергия может быть получена, например, за счет теплового возбуждения электронов валентной зоны при нагревании полупроводника. При переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости в первой появляются вакантные состояния - дырки (рис. 1б).

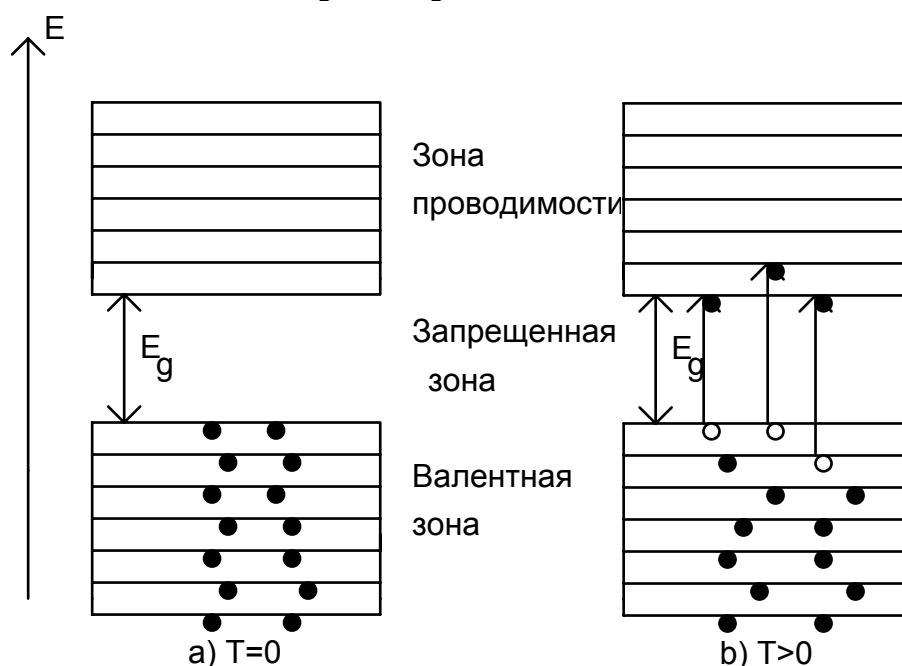


Рис.1. Зонная структура собственного полупроводника

Дырки рассматриваются как самостоятельные свободные носители заряда; им приписывается положительный заряд, определенная масса и т.д. Одновременно с процессом образования (генерацией) свободных носителей заряда идет процесс их исчезновения (рекомбинации), так как часть электронов возвращается в валентную зону и заполняет

разорванные связи - дырки. При $T \neq 0$ за счет действия этих двух конкурирующих процессов в полупроводнике устанавливается некоторая равновесная концентрация свободных носителей заряда.

В отсутствие внешнего электрического поля в полупроводнике свободные электроны и дырки движутся хаотически. При наличии внешнего электрического поля в собственном полупроводнике возникает направленное движение - дрейф - свободных электронов и дырок, т.е. возникает электрический ток. Электропроводность полупроводника, обусловленная направленным движением электронов и дырок, называется собственной.

Концентрации n_n и n_p электронов и дырок в собственном полупроводнике одинаковы; они связаны с шириной E_g запрещенной зоны и температурой T полупроводника соотношением

$$n_n = n_p = CT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (1.1)$$

где C - коэффициент пропорциональности.

В собственных полупроводниках удельная электрическая проводимость определяется по формуле

$$\sigma = |e|n(b_n + b_p), \quad (1.2)$$

где n - концентрация электронов (дырок); $|e|$ - заряд электрона (дырки); b_n и b_p - соответственно подвижности электронов и дырок.

Подвижность носителя заряда есть средняя скорость направленного движения, приобретаемая им в электрическом поле единичной напряженности: $b = \langle u \rangle / E$.

Известно, что подвижность собственных носителей тока пропорциональна $T^{-3/2}$ и с учетом (1.1) можно получить

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (1.3)$$

где σ_0 – постоянная, зависящая от природы полупроводника.

Данное выражение можно записать и для полной электрической проводимости

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (1.4)$$

которая связана с электрическим сопротивлением R соотношением $G=1/R$ и $G_0=1/R_0$.

Тогда

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (1.5)$$

Задачей данной работы является снятие вольт-амперной характеристики полупроводникового терморезистора, изучение температурной зависимости его сопротивления и определение ширины E_g запрещенной зоны исследуемого собственного полупроводника.

2.ХОД РАБОТЫ

Задача 1. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОРЕЗИСТОРА

Терморезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого изменяется с изменением температуры.

Статическая вольт-амперная характеристика терморезистора – зависимость силы I протекающего по нему тока от напряжения U , действующего на терморезисторе, при условии стационарного состояния полупроводника с окружающей средой. Конкретный вид вольт-амперной

характеристики определяется веществом, из которого изготовлено сопротивление, его конструктивным оформлением, массой и условиями теплообмена с окружающей средой. Для всех терморезисторов характерно существование нелинейного участка на вольт-амперной характеристике.

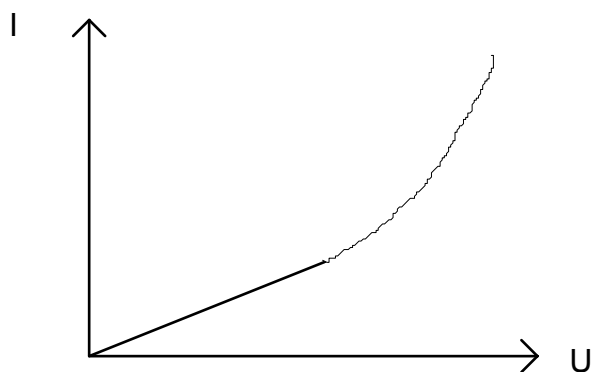


Рис.2. Вольт-амперная характеристика терморезистора

При малом токе в терморезисторе выделяющейся в нем тепловой мощности недостаточно для существенного изменения его температуры, вследствие этого практически не меняется концентрация носителей тока и их подвижность, а следовательно, и сопротивление полупроводника, поэтому выполняется закон Ома.

Дальнейшее увеличение силы тока приводит к росту выделяемой в полупроводнике тепловой мощности и повышению его температуры. Вследствие этого сопротивление полупроводника резко уменьшается и зависимость между напряжением и силой тока становится нелинейной.

Для снятия вольт-амперной характеристики терморезистора используется электрическая цепь, схема которой изображена на рис. 3

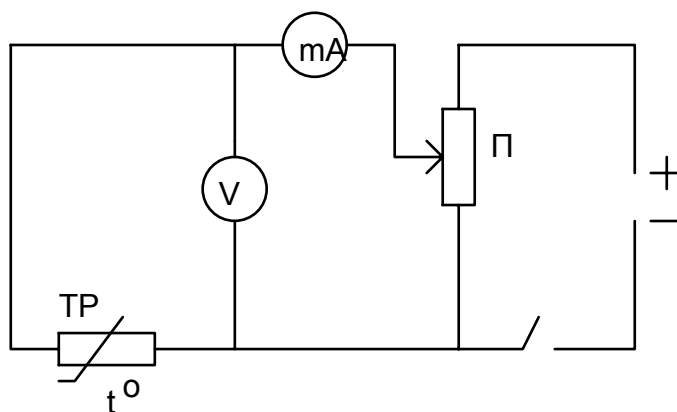


Рис. 3. Схема электрической цепи для снятия вольт-амперной характеристики терморезистора:

ТР - исследуемый терморезистор;

V - вольтметр;

mA - миллиамперметр;

П - потенциометр.

Вольт-амперная характеристика снимается при ступенчатом увеличении силы тока от 0 до 15 мА через 1 мА. Всякий раз после изменения силы тока делают 2-3 минутную выдержку для стабилизации напряжения на терморезисторе, после чего записывают показания приборов в табл.1 (см. приложение 1) и строят вольт-амперную характеристику.

Задача 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ В СОБСТВЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

(Вариант 1: без использования ЭВМ)

В соответствии с (1.5) в собственных полупроводниках температурная зависимость сопротивления имеет вид

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right),$$

или после логарифмирования

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{E_g}{2kT}, \quad (2.1)$$

где E_g - ширина запрещенной зоны.

Терморезистор из чистого германия помещен внутри проволочного нагревателя. Вначале измеряют сопротивление образца при комнатной температуре, затем включают нагреватель и по мере нагрева терморезистора фиксируют его сопротивление с интервалом 4-6 °С до температуры 70°С*. По указанию преподавателя сопротивление образца измеряют с помощью переносного моста или определяют по вольт-амперной характеристике терморезистора (приложение 2).

Результаты измерений заносят в таблицу 2 отчета. Затем строят график, откладывая по оси ординат логарифм сопротивления $\ln R$, а по оси абсцисс - обратную температуру $1/T$.

График, построенный по экспериментальным точкам, аппроксимируют прямой линией, наиболее близкой к этим точкам (рис. 4). Тогда ширина запрещенной зоны будет определяться тангенсом угла наклона этой прямой к оси абсцисс

$$E_g = 2k \operatorname{tg} \alpha = 2k \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \quad (2.2)$$

* Температурную зависимость сопротивления можно определять и в режиме охлаждения образца

где k – постоянная Больцмана; $k=0.862 \times 10^{-4}$ эВ/К; $\ln R_1$, $1/T_1$ и $\ln R_2$, $1/T_2$ – координаты двух произвольных, но не слишком близких точек, лежащих на полученной прямой.

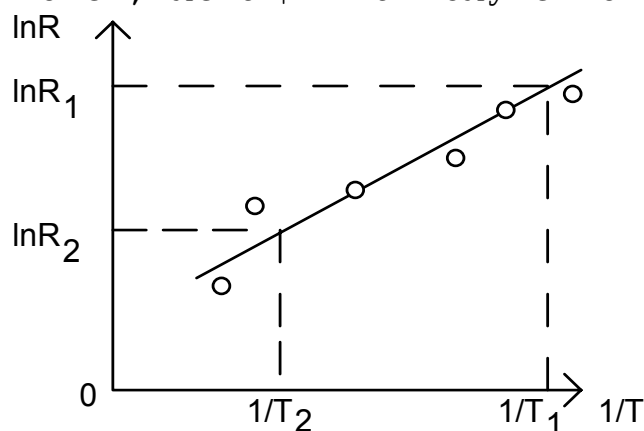


Рис. 4. Зависимость логарифма сопротивления $\ln R$ полупроводника от обратной температуры $1/T$

Погрешность Δ_{Eg} определения ширины запрещенной зоны оценивается по формуле*

$$\Delta_{Eg} = \varepsilon_{Eg} = t \cdot S_{\langle Eg \rangle}. \quad (2.3)$$

Среднее квадратическое отклонение $S_{\langle Eg \rangle}$ рассчитывается по методу наименьших квадратов на ЭВМ или задается преподавателем.

* Систематической погрешностью в данной работе пренебрегают

Задача 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ В СОБСТВЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

(Вариант 2: с использованием учебного измерительно вычислительного комплекса "Искра - 1256")

Учебный измерительно-вычислительный комплекс (УИВК) представляет собой один из простых вариантов современных измерительных систем, предназначенных для проведения измерений и обработки результатов физических экспериментов. В данном варианте работы ресурсы комплекса используются для выполнения всех элементов лабораторной работы.

Блок-схема УИВК представлена на рис. 5.

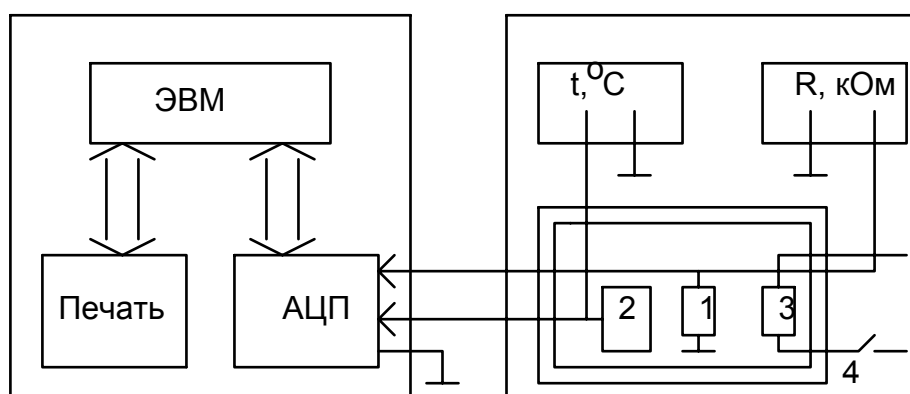


Рис. 5. Блок-схема УИВК

- 1 - образец; 2 - датчик температуры; 3 - нагреватель;
4 - термостат

Комплекс включает в себя микроЭВМ, измерительную ячейку и два цифровых прибора для контроля температуры и сопротивления образца. Измерение этих величин осуществляется автоматически АЦП - аналого-цифровым преобразователем, входящим в состав комплекса.

В УИВК предусматривается возможность проведения эксперимента в двух режимах: ручном и автоматическом. При ручном режиме измерения проводятся с помощью цифровых приборов. Найденные значения величин оформляются в виде табл. 2 (см. приложение 1). После заполнения табл. 2. полученные данные вводятся в ЭВМ, которая в этом случае используется для статистической обработки результатов измерений.

В автоматическом режиме все измерения проводятся ЭВМ, поэтому сначала необходимо задать условия измерений. Для этого по запросу машины с клавиатуры вводят: начальную температуру ТН, конечную температуру ТК и шаг измерений ТШ, все значения температур берут по шкале Цельсия.

ТН=20.0; ТК=70.0; ТШ=5.00; тек.сост:3 мин. 37 сек: 71.00:120.0:

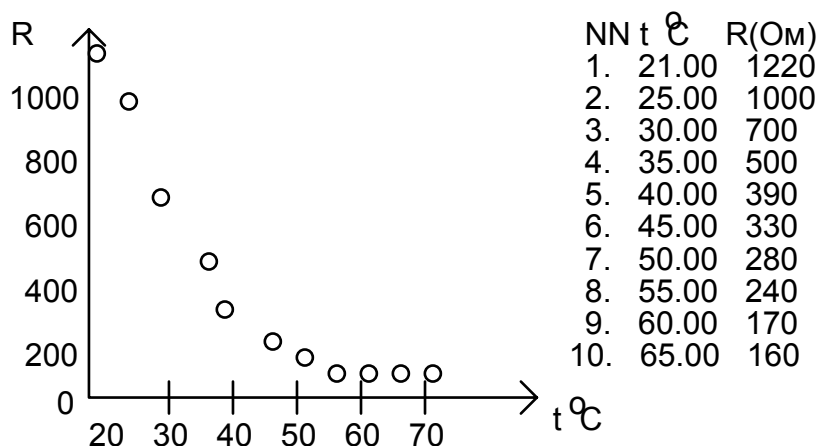


Рис.6. Пример информационного кадра при снятии температурной зависимости сопротивления полупроводникового резистора в автоматическом режиме

Рекомендуемые условия высвечиваются в нижней части соответствующего кадра. В дальнейшем по команде ПУСК эксперимент осуществляется автоматически. При этом ЭВМ формирует на экране информационный кадр, пример которого приведен на рис.6.

В верхней строке последовательно отображаются выбранные условия измерений (ТН, ТК, ТШ) в градусах Цельсия; время измерений, текущие значения температуры и сопротивления образца (эти значения совпадают с показаниями цифровых приборов).

Оси графика R и T высвечиваются спустя некоторое время после появления верхней строки. Масштаб по осям выбирает ЭВМ в соответствии с заданными условиями измерений. В правой части экрана резервируется место для таблицы результатов измерений. По мере изменения температуры образца в таблице заполняется очередная строка, а на графике обозначается соответствующая точка. В центральной части экрана высвечиваются указания по управлению установкой (на рис. 6 они не показаны).

По окончании измерений ЭВМ формирует табл. 2 (см. приложение 1).

Пользуясь данными таблицы, строят график зависимости $\ln R$ от $1/T$ и по формуле (2.1) определяют ширину запрещенной зоны E_g . Полученное графическим способом значение энергии E_g (выраженное в эВ) по запросу вводится в ЭВМ, которая сравнивает его с величиной E_g , вычисленной по методу наименьших квадратов.

В том случае, если найденное графически значение ширины запрещенной зоны укладывается в границы вычисленного статистически интервала значений $E_g \pm \Delta E_g$, эксперимент считается законченным (на экране дисплея высвечиваются окончательные результаты), если же нет, предлагается проверить правильность построения графика и расчетов.

В завершение работы, печатающее устройство выдает распечатку, которая используется для оформления отчета по лабораторной работе. Форма отчета приводится в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие полупроводники называются собственными?
2. Какие носители электрического заряда создают электрический ток в собственном полупроводнике?
3. Что называется вольт-амперной характеристикой терморезистора?
4. Как объяснить нелинейность вольт-амперной характеристики?
5. Как определить ширину запрещенной зоны полупроводника, зная зависимость сопротивления полупроводника от температуры?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. С. 161-162
2. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М.: Высшая школа, 1975. С. 67-70.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. М: Наука, 1987.
4. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1985. С. 242-250.
5. Андреева Л.П., Глазачев Г.П., Заборов А.В. и др. Исследование полупроводникового резистора. Екатеринбург: УПИ, 1992. 16 с.

ФОРМА ОТЧЕТА

Титульный лист:

УГТУ

кафедра физики

ОТЧЕТ

по лабораторной работе _____

Студент (ка) _____

Группа _____

Дата _____

На внутренних страницах:

1. Расчетная формула для измеряемой величины.

$$E_g = 2k\alpha = 2k \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}},$$

где $k = 0.862 \times 10^{-4}$ эВ/К - постоянная Больцмана; R_1, R_2 - сопротивления резистора при температурах T_1 и T_2 .

2. Средства измерений и их характеристики.

| Наименование средства измерения | Предел измерений | Цена деления шкалы | Класс точности |
|---------------------------------|------------------|--------------------|----------------|
| | | | |

3. Задача 1. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА

3.1 Схема электрической цепи

3.2 Результаты измерений

Таблица 1

Данные к построению вольт-амперной характеристики

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Напряжение U , В | | | | | | | | | | |
| Сила тока I , мА | | | | | | | | | | |

4. Задача 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ В СОБСТВЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Таблица 2

Зависимость сопротивления полупроводникового резистора от температуры

| $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $T, \text{ K}$ | $1000/T$, K^{-1} | $U, \text{ В}^*$ | $I, \text{ мА}^*$ | $R, \text{ Ом}$ | $\ln R$ |
|-----------------------------|----------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|---------|
| | | | | | | |

5. Расчет ширины запрещенной зоны в исследуемом полупроводнике по графику $\ln R = f(1/T)$

$$E_g = \text{-----} = \dots \text{ эВ}$$

Значение E_g , полученное на ЭВМ:

$$E_g = \dots \text{ эВ}$$

6. Оценка погрешностей

6.1. Среднее квадратическое отклонение

$$S_{\langle E_g \rangle} = \dots \text{ эВ}$$

6.2. Граница погрешности

$$\Delta E_g = t \times S_{\langle E_g \rangle} = \dots \text{ эВ.}$$

7. Окончательный результат:

$$E_g = \langle E_g \rangle \pm \Delta E_g = (\dots \pm \dots) \text{ эВ, } P=0.95$$

8. Выводы (проанализировать полученную вольт-амперную характеристику полупроводникового резистора, сравнить ширину запрещенной зоны с табличным значением).

*Заполняются при определении сопротивления полупроводника по его вольт-амперной характеристике

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

1. Определение температурной зависимости сопротивления полупроводника по его вольт-амперной характеристике

Метод основан на использовании закона Ома $I = U/R$. При снятии вольт-амперной характеристики при комнатной температуре по достижении в цепи некоторого значения напряжения наблюдаются отклонения от линейной зависимости $I = I(U)$. Эти отклонения обусловлены тем, что при достаточно больших токах начинает сказываться выделение тепла самим образцом, что приводит к росту его температуры и, как следствие, к изменению сопротивления. При включении нагревателя температура образца определяется, в основном, мощностью нагрева, вклад же количества тепла, выделяемого самим образцом, оказывается незначительным. Это дает возможность использовать закон Ома для определения сопротивления полупроводника при разных температурах.

Порядок выполнения измерений

1. Установить напряжение в цепи полупроводника 2 В.
2. Записать значения напряжения и тока при комнатной температуре в таблицу 2.
3. Включить нагреватель и по мере нагрева полупроводника фиксировать значения напряжения (U) и тока (I) в цепи с интервалом 4–6 °С.
4. По достижении $t = 70$ °С выключить нагреватель.

5. Для каждого значения температуры рассчитать сопротивление полупроводника по формуле: $R = U/I$.

2. Определение температурной зависимости сопротивления полупроводника с помощью переносного моста Р 353.

Переносной мост Р 353 предназначен для измерения сопротивления проводников в цепях постоянного тока.

Порядок выполнения измерений

1. Выключить цепь полупроводникового сопротивления.

2. Подключить мост постоянного тока к клеммам полупроводника.

3. Нажать кнопку на передней панели моста постоянного тока и вращением лимба установить стрелку прибора в нулевое положение. Отсчитать значение сопротивления полупроводника по шкале прибора при комнатной температуре и записать в таблицу 2.

4. Включить нагреватель и по мере нагрева полупроводника фиксировать значение его сопротивления с интервалом 4–6 °С.

5. По достижении $t = 70$ °С выключить нагреватель.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА

Составители: Мелких Алексей Вениаминович

Шейнкер Михаил Евсеевич

Базин Юрий Алексеевич

**Рукопись редактирована и подготовлена к изданию
с помощью электронных настольных издательских систем
в Региональном Центре Новых Информационных Технологий
УГТУ-УПИ**

| | | |
|---------------------|----------------|-------------------|
| Подписано в печать | 05.04.2006 | Формат 60x84x1/16 |
| Бумага типографская | Плоская печать | Усл.п.л. 1,0 |
| Уч.-изд.л. 0.8 | Тираж 100 | Цена «С» |

©ГОУ ВПО Уральский государственный
Технический университет

2006