

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА

*Методические указания к лабораторной работе № 33 по курсу «Физика»
для студентов высших учебных заведений*

Екатеринбург
УрФУ
2017

УДК 621.316.86 (076.5)

Составители: Л. Г. Малышев, А. В. Мелких, А. А. Повзнер, А. Н. Филанович
Научный редактор – д-р физ.-мат. наук, проф. Ф. А. Сидоренко

Исследование полупроводникового резистора : методические указания к лабораторной работе № 33 по физике / сост. Л.Г. Малышев, А. В. Мелких, А. А. Повзнер, А. Н. Филанович. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 15 с.

В методических указаниях изложена методика изучения электрических свойств полупроводника с собственной проводимостью. Рассмотрены задачи по изучению вольтамперной характеристики полупроводникового резистора и влиянию температуры на электрические свойства полупроводника.

Указания предназначены для студентов всех специальностей всех форм обучения.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный
университет, 2017

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Собственные полупроводники – это химически чистые (без примесей) полупроводники. В кристаллических твердых телах атомы расположены упорядоченно, 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 и расщепляются, образуя зоны разрешенных энергий, разделенные зонами запрещенных энергий.

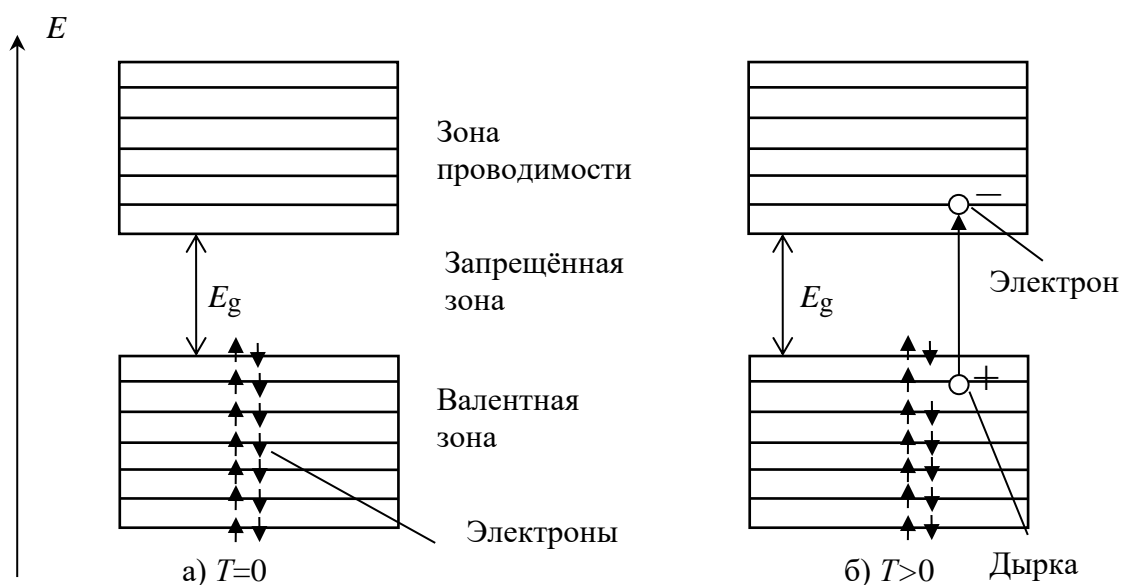


Рис. 1. Зонная структура собственного полупроводника

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 . 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 ширина запрещенной зоны 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. 1, б).

Дырки рассматриваются как самостоятельные свободные носители заряда; им приписываются 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.

Запишем общее выражение для удельной проводимости полупроводника:

$$\sigma = qn \cdot \mu. \quad (1)$$

Поскольку в полупроводнике два типа подвижных носителей, удельная проводимость складывается из двух составляющих – электронной и дырочной проводимостей.

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p, \quad (2)$$

где μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок;

n, p – концентрации электронов и дырок в полупроводнике.

Для собственного полупроводника $n = p = n_i$ и, следовательно,

$$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p). \quad (3)$$

Таким образом, при оценке проводимости необходимо прежде всего знать концентрации носителей заряда и их подвижности при любой температуре.

Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда

Разрешенные зоны содержат огромное количество уровней (10^{22} – 10^{23} в 1 см^3), на каждом из которых могут находиться электроны. Фактическое же количество электронов зависит от концентрации доноров и от температуры.

Чтобы оценить фактическую концентрацию носителей в полупроводнике, нужно знать распределение уровней и вероятность заполнения этих уровней.

Энергетическое распределение электронов в твердом теле определяется статистикой Ферми–Дирака. Принципиальный результат функции распределения Ферми–Дирака дает вероятность того, что электрон занимает уровень, соответствующий энергии E :

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1}. \quad (4)$$

Общее число электронов в кристалле можно определить следующим образом:

$$n = \int_0^{\infty} f_n(E) g(E) dE, \quad (5)$$

где $f(E)$ – функция распределения Ферми–Дирака;

$g(E)$ – функция плотности энергетических состояний.

Можно показать, что

$$g(E) \approx cE^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Рассчитывая интеграл (5) и учитывая, что концентрации n и p электронов и дырок в собственном полупроводнике одинаковы, получим температурную зависимость концентрации носителей заряда в виде

$$n = p = CT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (7)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; C – некоторая константа.

Температурная зависимость подвижности носителей заряда. В твердом теле движущиеся электроны непрерывно испытывают столкновения с узлами кристаллической решетки, примесями и дефектами, т. е. испытывают рассеяние. Равноускоренное движение под действием поля возможно только в коротких интервалах между столкновениями на длине свободного пробега. После каждого столкновения электрон, грубо говоря, должен заново набирать скорость. В результате средняя скорость электронов и дырок пропорциональна напряженности поля, коэффициент пропорциональности называется *подвижностью* $\langle \vec{v} \rangle = \mu E$.

Таким образом, подвижность – это скорость движения носителей заряда при единичной напряженности поля.

Подвижность, обусловленная рассеянием на узлах решетки, находится по формуле

$$\mu_L = \mu_{OL} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^C. \quad (8)$$

Если преобладает рассеяние на ионах примеси, то

$$\mu_I = \mu_{OI} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{-3/2}. \quad (9)$$

Константа C зависит от материала и типа проводимости. Например, для кремния $C \approx 5/2$. Учет двух процессов приводит к следующему выражению для подвижности:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_L}.$$

Результирующая подвижность близка к меньшей из двух составляющих μ_L и μ_I . Для кремния при температурах $T > 0$ °С меньшей оказывается составляющая μ_L ; поэтому зависимость $\mu(T)$ описывается формулой (8): подвижность уменьшается с ростом температуры. При $T < -50$ °С меньшей оказывается составляющая μ_I ; поэтому зависимость $\mu(T)$ описывается формулой (9): подвижность уменьшается с уменьшением температуры.

Поскольку в рассматриваемом интервале температур определяющим механизмом рассеяния является рассеяние на фононах, то температурная зависимость подвижности определяется $\mu = \mu_0 (T_0/T)^{3/2}$.

Однако среди отмеченных особенностей механизмов проводимости определяющей при формировании свойств полупроводникового резистора является экспоненциальная температурная зависимость концентрации носителей заряда собственного полупроводника. Поэтому окончательное выражение можно представить в виде

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (10)$$

где σ_0 – предэкспоненциальный множитель, зависящий от природы полупроводника.

Данное выражение можно записать и для полной электрической проводимости G :

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (11)$$

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

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (12)$$

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

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задача 1. Снятие вольт-амперной характеристики терморезистора

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

Статическая вольт-амперная характеристика терморезистора – зависимость силы протекающего по нему тока I 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.

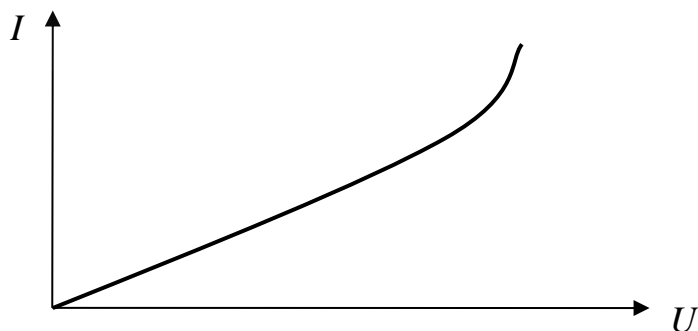


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика терморезистора

При малом токе в терморезисторе выделяющейся в нем тепловой мощности недостаточно для существенного изменения его температуры, вследствие этого практически не меняются 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.

Функции вольтметров, миллиамперметра, а также термометра в настоящей работе выполняет АЦП (аналого-цифровой преобразователь), который является устройством, сопрягающим установку с компьютером. Программа сбора и обработки результатов измерений, написанная в среде LabVIEW (рис. 3),

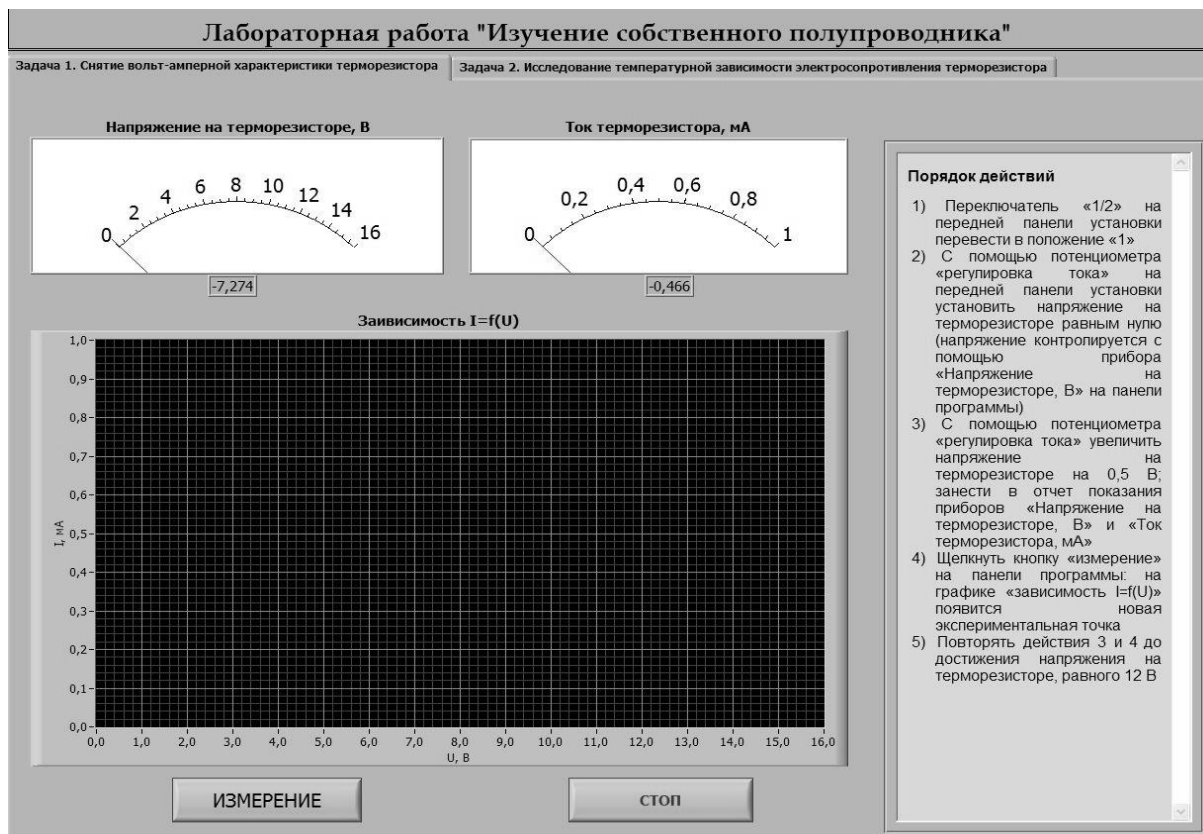


Рис. 3. Вид лицевой панели программы измерений

отображает виртуальные приборы, которые выводят на экран монитора данные, измеряемые аналого-цифровым преобразователем. Также программа проведения измерений отображает органы управления: переключатель выполняемых задач, клавишу проведения дискретных измерений (по точкам), графики получаемых зависимостей, краткую инструкцию по проведению измерений.

Порядок проведения измерений

1. Включить компьютер, привести указатель мыши на ярлык *Работа № 33* на рабочем столе и два раза щелкнуть левой клавишей мыши. На экране монитора появится программа сбора и обработки результатов измерений (рис. 3).

2. Включить установку, для чего перевести тумблер СЕТЬ в верхнее положение.

3. С помощью потенциометра РЕГУЛИРОВКА ТОКА установки и прибора НАПРЯЖЕНИЕ НА ТЕРМОРЕЗИСТОРЕ на панели программы установить минимально возможное напряжение на терморезисторе.

4. Занести в отчет (табл. 1) показания приборов НАПРЯЖЕНИЕ НА ТЕРМОРЕЗИСТОРЕ, В и ТОК ТЕРМОРЕЗИСТОРА, мА, и щелкнуть кнопку ИЗМЕРЕНИЕ на панели программы.

Таблица 1

Напряжение U , В										
Сила тока I , мА										

5. С помощью потенциометра РЕГУЛИРОВКА ТОКА увеличить напряжение на терморезисторе на 1 В.

6. Повторять действия 4 и 5 до достижения напряжения на терморезисторе, равного 9 В. **После достижения напряжения 5 В перед измерением делать выдержку 1–2 минуты.**

7. С помощью потенциометра РЕГУЛИРОВКА ТОКА установки и прибора НАПРЯЖЕНИЕ НА ТЕРМОРЕЗИСТОРЕ, В, на панели программы установить напряжение на терморезисторе равным 4 В, сделать выдержку 2–3 минуты.

8. На лицевой панели программы перейти на вкладку «Задача 2. Изучение температурной зависимости электросопротивления терморезистора».

Задача 2. Исследование температурной зависимости электрического сопротивления полупроводникового резистора и определение ширины запрещенной зоны в собственном полупроводнике

В соответствии с формулой (12) в собственных полупроводниках температурная зависимость сопротивления имеет вид

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

или, после логарифмирования,

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{E_g}{2kT}, \quad (13)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны. Зависимость $\ln(R) = f(1/T)$ (рис. 4) представляет собой прямую, и в соответствии с формулой (13) ширина запрещенной зоны будет связана с угловым коэффициентом этой прямой выражением

$$E_g = 2k \operatorname{tg} \alpha = 2k \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{1/T_1 - 1/T_2}, \quad (14)$$

где k – постоянная Больцмана – $k = 0,862 \cdot 10^{-4}$ 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.

Программа измерений (рис. 3) позволяет выполнить аппроксимацию полученной зависимости $\ln(R) = f(1/T)$ линейной функцией с помощью метода наименьших квадратов и найти параметры прямой (угловой коэффициент b и постоянную a , а также погрешность определения этих параметров).

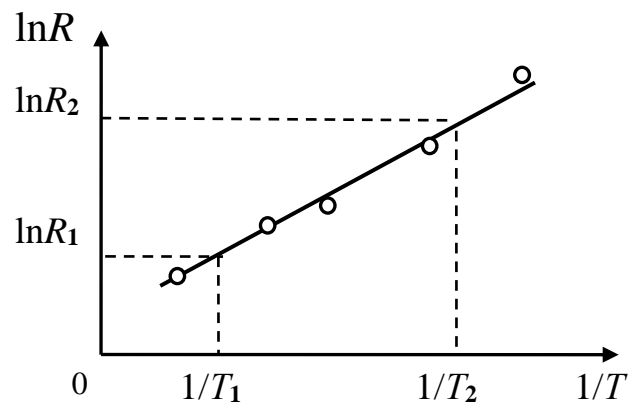


Рис. 4. Зависимость логарифма сопротивления $\ln R$ полупроводника от обратной температуры $1/T$

Тогда, согласно выражению (14), ширина запрещенной зоны E_g может быть рассчитана по формуле $E_g = 2k \cdot b$, а абсолютную погрешность определения ширины запрещенной зоны можно оценить по формуле $\Delta E_g = 2k \cdot \Delta b$. Необходимо отметить, что на практике удобнее строить зависимость $\ln(R)$ не от $1/T$, а от $(1/T) \cdot 10^3$ (именно таким образом строится график компьютерной программой), поэтому перед подстановкой получаемого коэффициента b и его погрешности Δb в соответствующие выражения для E_g и ΔE_g они должны быть умножены на 10^3 .

Порядок проведения измерений

1. Проверить, выполнены ли пункты 7–8 задачи 1.
2. В поле программы КОМНАТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, °С ввести значение температуры в лаборатории.
3. Переключатель НАГРЕВ на передней панели установки перевести в верхнее положение, при этом температура, измеряемая с помощью термометра на панели программы, начнет постепенно возрастать.
4. Записать в отчет (табл. 2) показания приборов « t , °С» и «Сопротивление терморезистора, Ом».

Таблица 2

t , °С	T , К	$1000/T$, К ⁻¹	R , Ом	$\ln R$

5. Щелкнуть кнопку ИЗМЕРЕНИЕ на панели программы, на графике «Зависимость $\ln(R) = f(1/T)$ » появится новая экспериментальная точка.
6. Повторять действия 4 и 5 через каждые два градуса Цельсия до достижения температуры на 17-20 °С выше комнатной. Примечание: вы можете убрать последнюю точку в случае неудачного измерения, нажав кнопку УБРАТЬ ПОСЛЕДНЮЮ ТОЧКУ.
7. Щелкнуть кнопку ПРОИЗВЕСТИ АППРОКСИМАЦИЮ ФУНКЦИЕЙ $y(x) = a + bx$; на графике, помимо экспериментальных точек, появится аппроксимирующая прямая, а в полях « a » и « b » – значения соответствующих констант. Занести в отчет значение коэффициента b и его погрешности Δb .
8. Переключатель НАГРЕВ установки перевести в нижнее положение, выключить установку, для чего перевести тумблер «Сеть» в нижнее положение.
9. На основе полученных данных по коэффициенту b и его погрешности Δb определить ширину запрещенной зоны E_g и погрешность ΔE_g .
10. Построить графики и выполнить расчеты, предусмотренные в отчёте.

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?

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе №33

«Исследование полупроводникового резистора»

Студент(ка) _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

1. Расчетная формула для измеряемой величины

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

где $k = 0,8625 \cdot 10^{-4}$ эВ/К – постоянная Больцмана;

R_1, R_2 – _____ при температурах T_1 и T_2 .

2. Средства измерений и их характеристики

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности или класс точности
1. Вольтметр 2. Миллиамперметр 3. Омметр 4. Цифровой термометр			

3. Результаты измерений

Результаты измерений вольтамперной характеристики

Таблица 1

Напряжение $U, \text{В}$										
Сила тока $I,$ мА										

График зависимости $I=f(U)$ прилагается к отчету.

Результаты измерений температурной зависимости электросопротивления

Таблица 2

$t, \text{°C}$	$T, \text{К}$	$1000/T, \text{К}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$

График зависимости $\ln R=f(1000/T)$ прилагается к отчету.

Значения параметров в аппроксимационной формуле $y(x) = a + bx$:

$$a = (\dots \pm \dots)$$

$$b = (\dots \pm \dots)$$

4. Расчет искомой величины из обработки методом наименьших квадратов (МНК):

$$E_g = 2k \cdot 10^3 \cdot b = \dots$$

5. Расчет абсолютной погрешности искомой величины

$$\Delta E_g = 2k \cdot 10^3 \cdot \Delta b = \dots$$

где Δb – погрешность определения b в формуле $y(x) = a + bx$.

6. Окончательный результат

$$E_g = (\dots \pm \dots) \text{ эВ.}$$

7. Расчет искомой величины из графика $\ln R=f(1000/T)$:

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

8. Выводы

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЗИСТОРА

Составители: **Малышев** Леонид Григорьевич,
Мелких Алексей Вениаминович,
Повзнер Александр Александрович,
Филанович Антон Николаевич

Редактор *В.О. Корионова*
Компьютерный набор *Н. Н. Суслиной*

Подписано в печать Формат 60×90 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 1,0.
Уч.-изд. л. 0,59. Тираж 100 экз. Заказ _____ .

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфического центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
E-mail.: press.info@usu.ru