

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Иванченко Ксения Алексеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение ширины запрещенной зоны германия из температурной
зависимости проводимости**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19307

Научный руководитель:

к.-ф-м.н. Солдаткина Е. И., с.н.с. ИЯФ
СО РАН

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Терещенко О. Е.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

Целью работы является знакомство со свойствами полупроводника, исследование температурной зависимости проводимости и определение ширины запрещенной зоны полупроводника. В качестве проводника выбран германий. Построен график зависимости логарифма проводимости от обратной температуры, рассчитана ширина запрещенной зоны. Вычислены характеристики полупроводника: подвижность, концентрация носителей зарядов, коэффициент диффузии. Дополнительно при помощи вольтамперной характеристики рассчитана проводимость германия при комнатной температуре и ее погрешность. Для всех рассчитанных величин проведено сравнение с табличными данными.

Ключевые слова: полупроводник, ширина запрещенной зоны, проводимость, подвижность, концентрация носителей заряда

Работа выполнена в Межфакультетской лаборатории электричества и магнетизма Кафедры общей физики Физического факультета НГУ.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....	6
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ	7
ВЫВОДЫ.....	13
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	13

Введение

Зонная теория – основополагающая в современной электронной теории твердых тел. Она необходима для понимания электрических свойств металлов, полупроводников и диэлектриков, работы множества радиоэлектронных устройств. Широкозонные полупроводники типа нитридов III–V групп (GaN, AlGaN и AlN) являются наиболее перспективными материалами для создания светодиодов и лазерных диодов, работающих в ультрафиолетовой области. Эти материалы также используются в приборах, работающих при повышенных температурах и мощностях. Таким образом, изучение запрещенной зоны, являющейся одним из центральных понятий зонной теории, является актуальным.

Электроны одиночного атома энергетически связаны с ядром, поэтому нужно приложить энергию, чтобы разорвать эту связь. Электроны в атоме могут располагаться лишь на некоторых дискретных значениях энергии (уровнях). В основном (невозбужденном) состоянии атома его валентные электроны имеют минимальную энергию связи с ядром, которая называется «основным уровнем». Под ним расположены заполненные уровни внутренних оболочек атома, а над ним – ряд разрешенных уровней. Если передать атому энергию выше энергии ионизации, то связь электрона с ядром будет нарушена, и электрон станет свободным.

В процессе образования кристалла атомы сближаются, и между ними возникает взаимодействие, обратно пропорциональное расстоянию. Характер движения электронов меняется: электроны получают возможность свободно перемещаться вдоль всего кристалла путем перехода на уровни других атомов. Таким образом, возникает множество близкорасположенных подуровней. Иначе говоря, каждый из уровней одиночного атома в кристалле расщепляется на множество подуровней, образуя энергетические зоны кристалла.

Собственными называются полупроводники, не содержащие примесных атомов. Концентрации носителей зарядов в собственных полупроводниках одинаковы и зависят от температуры. Примесными называются полупроводники, легированные примесными атомами с целью регулировки концентраций

электронов n и дырок p . При низких температурах концентрация электронов в полупроводнике определяется концентрацией примесных центров. С ростом температуры примесная концентрация растет, значит возрастает проводимость. При определенной температуре концентрация электронов перестает зависеть от температуры. Это область примесного истощения. И, наконец, в области еще более высоких температур начинается резкий рост концентрации. Это область собственной проводимости, в ней концентрация свободных носителей определяется зависимостью $e^{-E_g/2kT}$. Проводимость прямо пропорциональна концентрации носителей зарядов. Отсюда видно, что из температурной зависимости проводимости можно извлечь важную характеристику полупроводника – ширину запрещенной зоны.

Методика измерений и экспериментальная установка

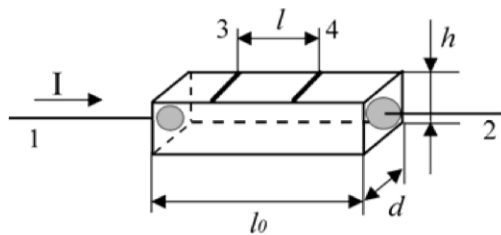


Рис. 1. Образец

1, 2 – токовые контакты образца

3, 4 – потенциальные контакты образца

Геометрические измерения:

$h = 1$ мм

$d = 2$ мм

$l = 7,3$ мм

Часть 1. Измерение проводимости полупроводника при комнатной температуре.

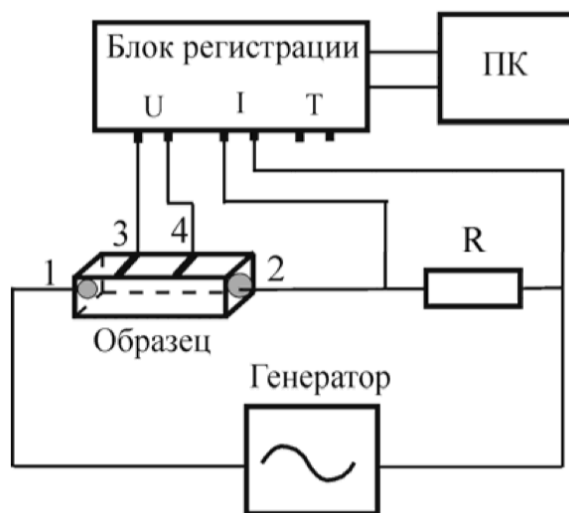


Рис. 3. Схема измерения вольтамперной характеристики полупроводника

При протекании в цепи образца тока I на сопротивлении R происходит падение напряжения, пропорциональное току $U = I \cdot R$, которое подается в канал I блока регистрации. Разность потенциалов между контактами (3, 4) образца подается в канал U . Получив вольтамперную характеристику, зная геометрические размеры

образца и его сопротивление, можно по формуле $j = \sigma E$ рассчитать проводимость полупроводника.

Часть 2. Изучение температурной зависимости проводимости полупроводника.

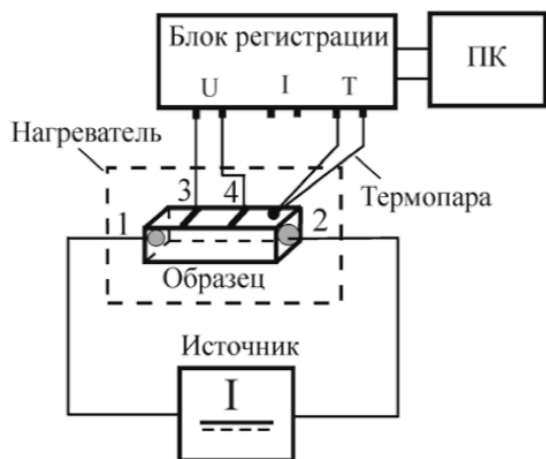


Рис. 2. Схема измерения температурной зависимости электропроводности полупроводника

Образец помещается в нагреватель. Величина тока выставляется 500 мА, напряжение – 20 В. В это время записывается температурная характеристика в программе Temp_Vol на ПК. Приблизительно каждые 10 минут нужно увеличивать напряжение на 10 В. При достижении температуры приблизительно 100°C (это соответствует примерно 60 В), образец вынимается из нагревателя и записывается температурная зависимость при естественном охлаждении образца. Образец необходимо нагревать очень медленно, иначе погрешность измерения термопары будет велика. Для вычисления запрещенной зоны полупроводника будем брать точки, лежащие в диапазоне 10-15 °С выше комнатной температуры.

Результаты измерений

Часть 1.

Сопротивление между точками 1 и 2 образца: $R_{12} = 2,2 \text{ кОм}$

Сопротивление между точками 3 и 4 образца: $R_{34} = 1,1 \text{ кОм}$

Максимально допустимый ток через образец: $I_{max} = 2 \text{ мА}$

Таким образом, можно рассчитать величину напряжения, которую необходимо выставить на выходе генератора:

$$U = I_{max}R_{12} = (2 * 10^3 * 2 * 10^{-3}) \text{ Ом} * \text{А} = 4,4 \text{ В}$$

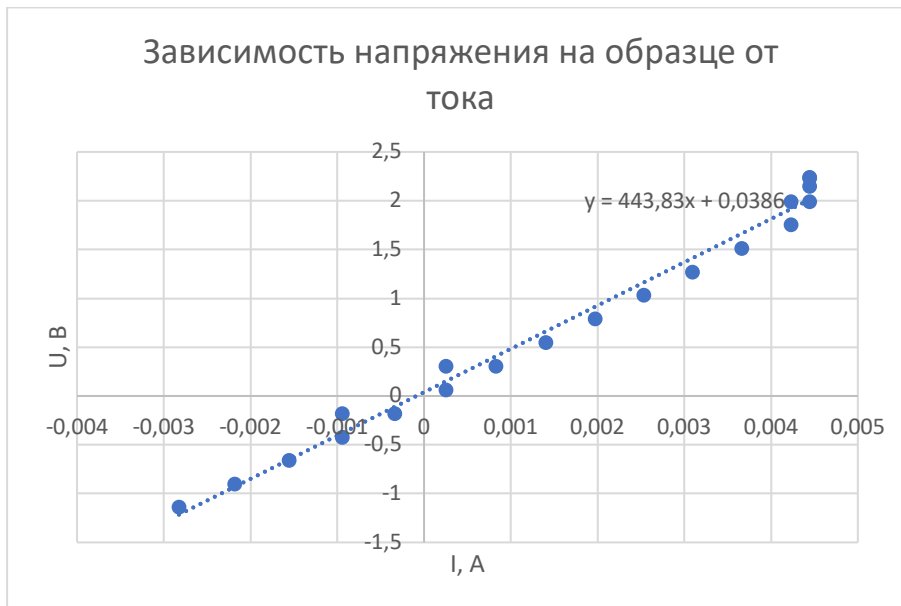


Рис. 3. График зависимости напряжения на образце от тока

Исходя из графика и формулы $U = R * I$, можно сделать вывод, что $R_{34} \approx 0,4 \text{ кОм}$

Рассчитаем проводимость σ .

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

где ρ – удельное сопротивление образца

$$\rho \frac{l}{S_{\perp}} = R$$
$$\rho = \frac{R * S_{\perp}}{l}$$

где ρ – удельное сопротивление образца, l – расстояние между потенциальными контактами образца 3 и 4, S_{\perp} – площадь поперечного сечения образца, R – сопротивление

Тогда рассчитаем проводимость по формуле:

$$\sigma = \frac{l}{RS_{\perp}}$$

$$S_{\perp} = h * d = (0,1 * 0,2) \text{ см}^2 = 0,02 \text{ см}^2$$

где h и d – геометрические измерения образца

$$\sigma = \frac{0,73 \text{ см}}{(0,4 * 10^3 * 0,02) \text{ Ом} * \text{ см}^2} = 9,1 * 10^{-2} (\text{Ом} * \text{ см})^{-1}$$

Рассчитаем погрешность для проводимости:

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{l}{RS_{\perp}}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{l}{RS_{\perp}}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial S_{\perp}} \left(\frac{l}{RS_{\perp}}\right)\right)^2}$$

$$= 0,0018 * 10^{-2} (\text{Ом} * \text{ см})^{-1}$$

Табличные данные: $\sigma_{Ge} = 2 * 10^{-2} (\text{Ом} * \text{ см})^{-1}$

Различия в табличных и экспериментальных данных можно объяснить не точным экспериментальным измерением сопротивления на контактах 3, 4.

Часть 2.

Снята вольт-температурная характеристика, построен график зависимости U(T)

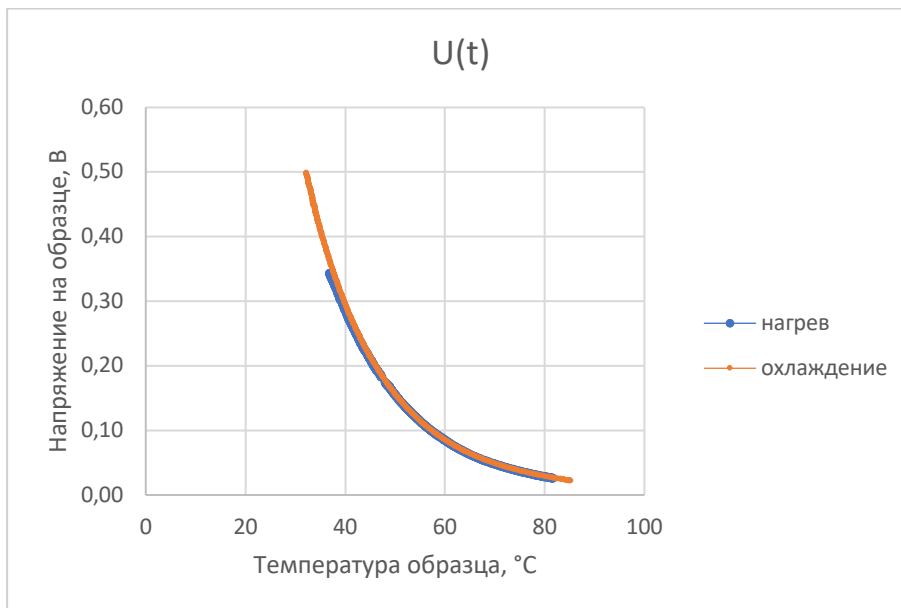


Рис. 4. График зависимости напряжения от температуры

Построим график зависимости $\ln\sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

Рассмотрим формулу

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-Eg}{2kT}}$$

Прологарифмируем и получим формулу (1):

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} * \frac{1}{T} = \ln \sigma_0 + \alpha * \frac{1}{T}$$

Из закона Ома $R = \frac{U}{I}$, с другой стороны $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}$

Тогда $\frac{U}{I} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}$. Можно выразить σ :

$$\sigma = \frac{I l}{U S}$$

Таким образом, можно найти величины σ и построить график зависимости

$$\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

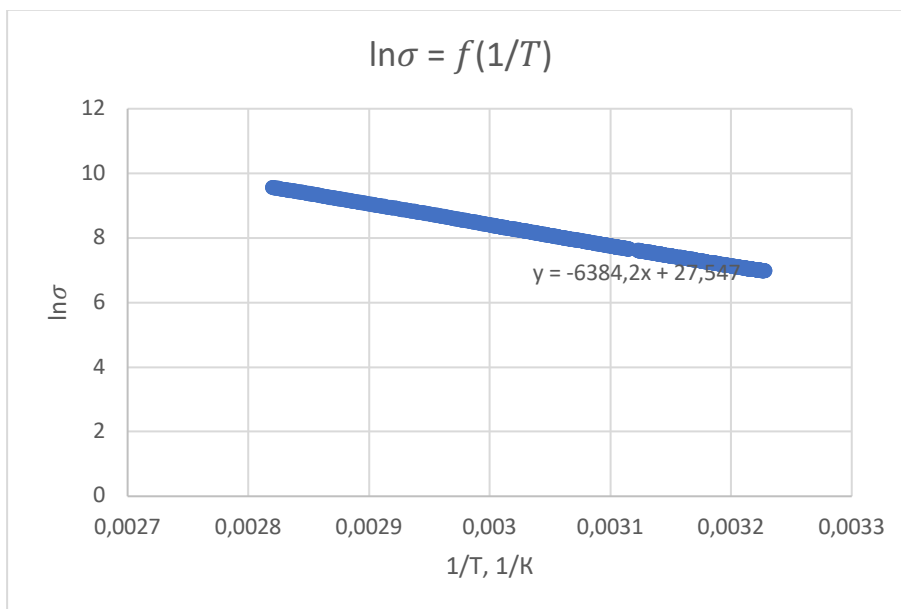


Рис. 5. График зависимости логарифма проводимости от обратной температуры при нагреве образца

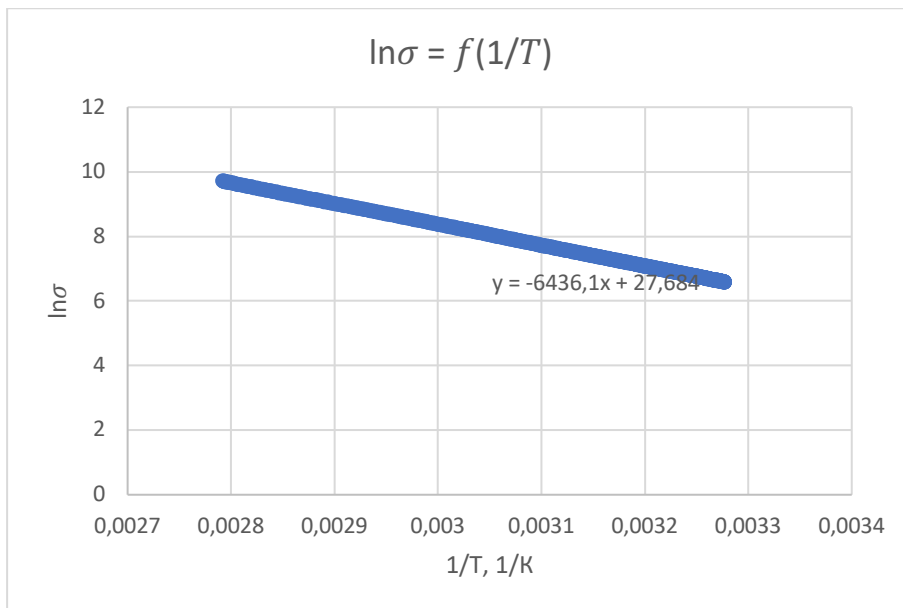


Рис. 6. График зависимости логарифма проводимости от обратной температуры при охлаждении образца

Рассмотрим формулу (1). $\ln\sigma_0$ - это сдвиг по оси ординат на графике. Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент α из формулы (1) – это коэффициент a в уравнении $y = ax + b$ аппроксимирующей прямой.

Тогда можно найти ширину запрещенной зоны

$$E_g = -\alpha * 2k = -(-6384 * 2 * 8,6 * 10^{-5}) \approx 1 \text{ эВ}$$

Из табличных данных ширина запрещенной зоны германия вблизи комнатной температуры составляет 0,67 эВ.

Найдем собственную концентрацию носителей при комнатной температуре по формуле:

$$n = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2RT}}$$

где $N_{c/v}$ - эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно, E_g – ширина запрещенной зоны

$$N_{c/v} = 2 * \left(2\pi \frac{m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = 2,05 * 10^{19} * \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}$$

Таким образом получаем

$$N_c = 1,04 * 10^{19}, \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 6,9 * 10^{18}, \text{ см}^{-3}$$

Табличные данные:

$$N_c = 1,02 * 10^{19}, \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 6,04 * 10^{18}, \text{ см}^{-3}$$

Тогда посчитаем собственную концентрацию:

$$n_i = 10^{18} \sqrt{6,9 * 10,4} * \exp\left(-\frac{0,59}{2 * 8,625 * 10^{-5} * 300}\right) \approx 2,1 * 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Табличные данные:

$$n_i = 2,33 * 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Рассчитаем подвижность носителей заряда.

$$\sigma_i = en_i u_n + ep_i u_p = en_i (u_n + u_p) = en_i u$$

где u_n – подвижность электронов, u_p – подвижность дырок

Используем значение проводимости, полученное в части 1: $\sigma_i = 0,4 * 10^{-3} (\text{Ом} * \text{см})^{-1}$

$$u = \frac{\sigma_i}{en_i} = \frac{9,1 * 10^{-2} (\text{Ом} * \text{см})^{-1}}{1,6 * 10^{-19} * 2,1 * 10^{13} \text{ см}^{-3}} = 2700 \frac{\text{см}^2}{\text{В} * \text{с}}$$

Табличные данные:

$$u = 5800 \frac{\text{см}^2}{\text{В} * \text{с}}$$

Найдем коэффициент диффузии из соотношения Эйнштейна:

$$\frac{u_{n,p}}{D} = \frac{e}{kT}$$

$$D = \frac{kT u}{e} = 4,5 * 10^{-13} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

Табличные данные: $D = 4,2 * 10^{-14}$

Выводы

Электрофизические измерения позволяют определить ширину запрещенной зоны. Чтобы эксперимент можно было считать достоверным, температурную характеристику необходимо снимать на значениях температуры, близких к комнатной, а также при медленном нагревании образца, при нормальном атмосферном давлении и отсутствии заметных электрических и магнитных полей.

Получены следующие характеристики германия, произведено сравнение с табличными данными:

	Экспериментальные данные	Табличные данные
σ	$9,1 * 10^{-2} (\text{Ом} * \text{см})^{-1}$	$2 * 10^{-2} (\text{Ом} * \text{см})^{-1}$
E_g	1 эВ	0,67 эВ
n_i	$2,1 * 10^{13} \text{см}^{-3}$	$2,33 * 10^{13} \text{см}^{-3}$

Список литературы

1. А. Г. Костюрина, С. А. Бордзиловский, В.В. Максимов, О. Е. Терещенко Учебно-методическое пособие «Электрические и магнитные свойства твердых тел». Новосибирск: НГУ
2. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Электричество. Т.3, часть 1. М.Наука, 1996.
3. Князев Б. А., Черкасский В. С. Начала обработки экспериментальных данных. Новосибирск: НГУ, 2005.