

Лабораторная работа

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы

Измерение температурной зависимости сопротивления полупроводника, определение экспоненциального характера этой зависимости и вычисление ширины запрещенной зоны (энергии активации) полупроводника графическим способом.

Приборы и принадлежности

1. Установка (полупроводниковый диод и нагреватель)
2. Мультиметр (омметр)
3. Термометр спиртовой

Содержание работы

Электрический ток в металлах и полупроводниках обусловлен тем, что под действием внешнего электрического поля свободные носители заряда (в металлах – электроны, в полупроводниках – электроны и дырки) движутся в одном направлении. Это направленное движение зарядов и называют электрическим током.

Однако ни электроны, ни дырки не являются действительно свободными носителями заряда. При своем движении они встречают сопротивление со стороны кристаллической решетки (поэтому их называют квазисвободными). Оно обусловлено тем, что решетка не является идеальной и содержит различные примеси и дефекты, а также тем, что ионы колеблются вокруг своих положений равновесия. Поэтому говорят, что **сопротивление материалов обусловлено рассеянием носителей заряда на дефектах, примесях и на тепловых колебаниях решетки (фононах).**

Согласно электронной теории металлов удельная проводимость σ (величина, обратная удельному сопротивлению ρ) связана с характеристиками носителей заряда формулой:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (1)$$

где: n – концентрация свободных носителей заряда, т. е. число частиц в единице объема);

e – заряд электрона;

m – эффективная масса электрона (с учетом воздействия решетки);

τ - время релаксации, т. е. время, за которое при отключении поля скорость направленного движения зарядов падает в $e \approx 2,71$ раз (за счет сил торможения со стороны решетки).

На зависимость сопротивления полупроводников от температуры влияют несколько факторов. Самым значительным из них является то, что при повышении температуры растет концентрация n свободных носителей заряда – электронов и дырок. При температуре, равной $T = 0$ К все электроны связаны. На энергетической диаграмме собственного (беспримесного) полупроводника видно, что при этом все электроны находятся в валентной зоне, а зона проводимости пуста (рисунок 1 а). На схеме, изображающей кристаллическую решетку кремния, линии, соединяющие ионы **Si** обозначают неполярную ковалентную связь, образованную электронами (рисунок 1 в).

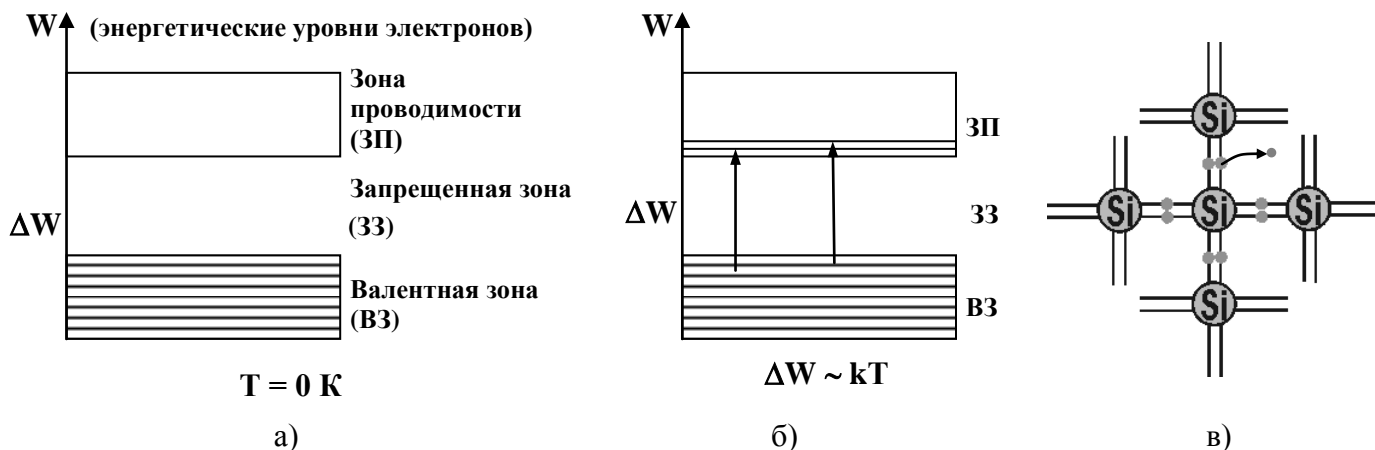


Рисунок 1 Собственный полупроводник

При повышении температуры, когда тепловая энергия kT ионов становится порядка ширины запрещенной зоны (энергии активации ΔW), электрон может получить от кристаллической решетки энергию и разорвать химическую связь. При этом он переходит из валентной зоны в зону проводимости. Таким образом, в собственном полупроводнике образуются сразу два свободных носителя заряда – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне (положительная «частица» на месте вылетевшего электрона). Этот процесс изображен на рисунке 1 б и 1 в.

Чем больше температура полупроводника, тем больше электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости, а это значит, что концентрация свободных носителей заряда увеличивается. Зависимость концентрации от температуры экспоненциальная:

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (2)$$

Кроме концентрации от температуры зависит также время релаксации τ , причем при повышении температуры τ падает. Однако эта зависимость линейная, и ощутимого вклада в сопротивление не вносит.

Таким образом, сопротивление собственных полупроводников при повышении температуры падает:

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (3)$$

Аналогично выглядит механизм проводимости для примесных полупроводников, только энергия активации у них меньше.

Найдем ширину запрещенной зоны ΔW из формулы (3). Для этого прологарифмируем это выражение, то есть возьмем натуральный логарифм от обеих частей уравнения:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2kT} \quad (4)$$

Перепишем это уравнение в виде:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

И сравним с уравнением прямой:

$$y = a + b \cdot x \quad (6)$$

Таким образом, если построить график зависимости сопротивления полупроводника от температуры в координатах $\ln R \left(\frac{1}{T} \right)$, то мы получим прямую, угловой коэффициент которой b будет равен:

$$b = \frac{\Delta W}{2k}, \quad (7)$$

где k – константа Больцмана.

Для определения ширины запрещенной зоны полупроводника проведем 8 – 10 измерений и занесем данные в таблицу 1:

Таблица 1

№	t °C	R, Ом	T, К	1/T	ln R
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					

Теперь по результатам измерений построим график зависимости $\ln R \left(\frac{1}{T} \right)$. Если зависимость $R(T)$ экспоненциальная, то график будет представлять собой прямую линию (рисунок 2).

Экспериментальные точки (они обозначены крестиками) не будут лежать на одной прямой вследствие разброса. Поэтому при построении графика результаты измерений усредняют.

Для определения углового коэффициента прямой следует выбрать две точки, лежащие на прямой подальше друг от друга, но в пределах измерений (эти точки обозначены кружками) и построить треугольник, как показано на рисунке 2. Угловой коэффициент прямой может быть определен из этого треугольника как тангенс угла наклона прямой α :

$$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (8)$$

Теперь из соотношений (7) и (8) можно вычислить ширину запрещенной зоны полупроводника.

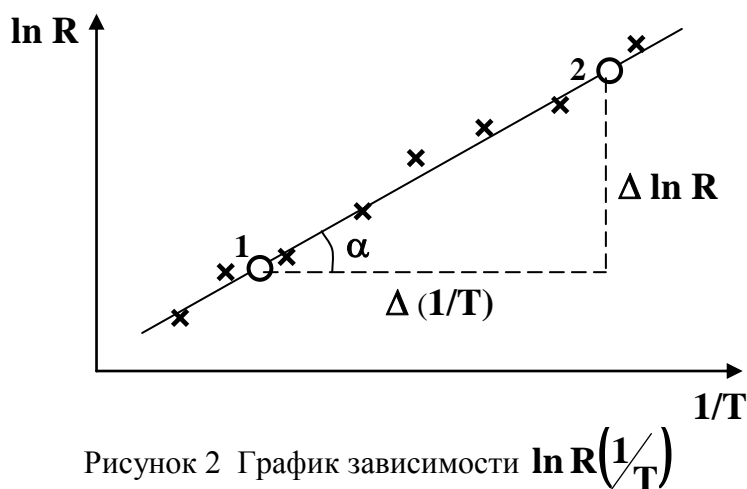


Рисунок 2 График зависимости $\ln R(1/T)$

Порядок выполнения работы

1. Соберите схему и внимательно изучите ее работу. Получите разрешение преподавателя и приступайте к выполнению работы.
2. Включите нагреватель и доведите температуру образца до $60^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C}$. Затем выключите его и дождитесь, пока температура начнет снижаться. Измерения следует проводить при остывании, т.к. нагрев происходит слишком быстро и образец не успевает прийти в состояние термодинамического равновесия.
3. Проведите 8 – 10 измерений сопротивления образца при различных температурах через $1^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}$ в зависимости от скорости остывания. Желательно, чтобы в одной серии измерений интервал был постоянным. Занесите результаты измерений в таблицу 1.
4. Проведите вычисления и заполните таблицу 1.
5. Постройте график зависимости $\ln R(1/T)$, выбрав масштаб таким образом, чтобы максимально использовать площадь графика.
6. Вычислите угловой коэффициент прямой по формуле (8), а затем определите ширину запрещенной зоны ΔW , пользуясь формулой (7).
7. Переведите величину ΔW из джоулей в электронвольты.
8. Сделайте выводы относительно характера температурной зависимости сопротивления полупроводника. Какому виду проводимости (собственному или примесному) она соответствует?
9. Ответьте на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлено электрическое сопротивление в кристаллах?
2. Запишите формулу, связывающую удельную проводимость кристалла с характеристиками свободных носителей заряда.
3. Как зависит сопротивление металлов от температуры? Объясните, почему.
4. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры? Объясните, почему.
5. Чем отличаются зонные модели металлов и полупроводников?
6. Опишите механизм образования свободных носителей заряда в собственных полупроводниках.
7. Опишите механизм образования свободных носителей заряда в донорных и акцепторных полупроводниках, используя их зонные модели.
8. Запишите формулу, выражающую зависимость сопротивления полупроводника от температуры. Какие величины в нее входят?
9. Как, пользуясь этой формулой, определить энергию активации полупроводника?