

ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Л.Н. Толстого

Лабораторная работа №6
Изучение температурной зависимости
сопротивления полупроводников и
определение энергии активации

Тула 2009

Цель работы: определение ширины запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости его сопротивления.

Приборы и принадлежности: установка для исследования зависимости электрического сопротивления образца от температуры.

Теоретическое введение

Полупроводники отличаются от металлов меньшей величиной удельной электропроводности при комнатной температуре, а также тем, что их электропроводность резко возрастает с повышением температуры (у металлов она при нагревании уменьшается). Полупроводники обладают высокой чувствительностью к содержанию примесей, к изменению температуры и давления, к воздействию различных излучений.

Электропроводность полупроводников хорошо объясняется зонной теорией твердого тела. В кристалле электронные энергетические уровни отдельных атомов образуют полосы (зоны) разрешенных значений энергий, разделенные запрещенными зонами.

Схема энергетических зон химически чистого полупроводника, называемого "собственным", изображена на рис. 1.

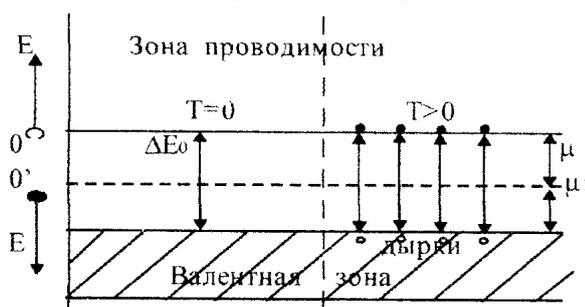


Рис. 1

Все энергетические уровни в валентной зоне при $T=0\text{K}$ заняты электронами, а все уровни в зоне проводимости – свободны.

Ширина запрещенной зоны при 0 K называется энергией активации. Ширина запрещенной зоны является основным параметром, определяющим электрические свойства твердых тел. С увеличением температуры ширина запрещенной зоны уменьшается. У полупроводников ширина запрещенной зоны мала, не превышает $1,5\text{-}2\text{эВ}$.

Поэтому при любой температуре $T>0\text{ K}$ существует определенная вероятность теплового возбуждения электронов, вызывающего их переход из валентной зоны в зону проводимости (см. рис.1). Одновременно в валентной зоне освобождаются валентные уровни - дырки. В собственных полупроводниках концентрация электронов в зоне проводимости равна концентрации дырок в валентной зоне. Движение электронов и дырок в зонах описывается законами квантовой механики. Анализ их поведения внутри разрешенных энергетических зон показывает, что электроны и дырки проводимости являются квазичастицами, введение которых упрощает описание свойств твердых тел в зонной теории. Число электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне собственного полупроводника значительно меньше числа квантовых состояний, содержащихся в этих

зонах. Поэтому функция распределения $f(E)$, определяющая вероятность того, что состояние с энергией E занято электроном при данной температуре T , значительно меньше единицы.

$$f(E) \ll 1 \quad (1)$$

Полупроводники, у которых электронный газ в зоне проводимости и дырочный газ в валентной зоне удовлетворяют условию (1). называется невырожденными. В этом случае распределение Ферми-Дирака переходит классическое распределение Максвелла-Больцмана:

$$f(E) = e^{\frac{\mu}{kT}} e^{\frac{-E}{kT}} = A e^{\frac{-E}{kT}} = A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (2)$$

где μ - энергия Ферми (или химический потенциал), определяющая приращение энергии системы частиц при увеличении числа частиц на единицу; k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Чтобы найти зависимость электропроводности полупроводников от температуры, нужно, прежде всего, определить концентрацию свободных носителей, способных участвовать в процессе проводимости. Число квантовых состояний $z(E)dE$, заключенное в интервале dE :

$$z(E)dE = \frac{4\pi V (2m)^{3/2} E^{1/2}}{h^3} dE \quad (3)$$

Для вычисления равновесной концентрации носителей заряда в зоне проводимости и в валентной зоне нужно найти число частиц dn в единице объема полупроводника в интервале энергии заключенном между E и $(E+dE)$,

$$dn(E) = z(E) f(E) dE$$

а затем проинтегрировать по всем значениям энергии, которые доступны частицам, т. е. от 0 до ∞ . Принимая за начало отсчета энергии электронов дно зоны проводимости, получим:

$$N_n = \int_0^{\infty} dn(E) = \frac{4\pi (cm^*)^3}{h^3} e^{\frac{\mu}{kT}} \int_0^{\infty} e^{\frac{-E}{kT}} E^{1/2} dE \quad (4)$$

Учтя, что интеграл:

$$\int_0^{\infty} e^{\frac{-E}{kT}} E^{1/2} dE = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (kT)^{3/2} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), находим, что число электронов проводимости:

$$N_n = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{\mu}{kT}} \quad (6)$$

Принимая за начало отсчета энергии дырок потолок валентной зоны и проводя аналогичные расчеты, получим, что число дырок:

$$N_p = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{\mu}{kT}} \quad (7)$$

В эти выражения входят эффективные массы электронов и дырок m_n^* и m_p^* .

На зонной схеме (см. рис.1) μ - расстояние от равновесного уровня

Ферми до дна зоны проводимости, а μ' - расстояние от равновесного уровня Ферми до потолка валентной зоны. Если за нуль отсчета энергии для электронов и дырок принять дно зоны проводимости, то, как видно на рисунке

$$\mu + \mu' = -\Delta E_0 \text{ и } \mu' = -\Delta E_0 - \mu$$

Так как в собственных полупроводниках носители тока возбуждаются всегда парами, то $N_n = N_p$. На основании этого получим равенство:

$$(m_n^*)^{3/2} e^{\frac{\mu}{kT}} = (m_p^*)^{3/2} e^{\frac{-E + \mu}{kT}} \quad (8)$$

Логарифмируя (8) и производя элементарные преобразования, найдем

$$\mu = -\frac{\Delta E_0}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*} \quad (9)$$

При $T=0\text{K}$ уровень Ферми в собственных полупроводниках лежит в середине запрещенной зоны. Подставив (9) и формулы (6) и (7), получим:

$$N_n \approx N_p = \frac{2 \left(2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} kT \right)^{3/2}}{h^3} e^{\frac{-\Delta E_0}{2kT}} \quad (10)$$

При $T=300\text{K}$ ширина запрещенной зоны германия $-0,72\text{ эВ}$, кремния $-1,12\text{ эВ}$. Собственная концентрация носителей заряда при этой температуре в германии $2,5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$, в кремнии $2 \cdot 10^{10}\text{ см}^{-3}$.

Из общих представлений о механизме электрического тока для удельной электропроводности собственных полупроводников можно получить выражение:

$$\sigma = en(U_n + U_p) \quad (11)$$

Где U_n, U_p – подвижности электронов и дырок, e – величина натурального заряда.

Подвижность носителей заряда U численно равна скорости носителей, приобретаемой ими под действием электрического поля единичной напряженности. Величина подвижности зависит от температуры и механизма рассеяния носителей заряда в полупроводнике. Последний определяется типом химической связи кристаллической решетки, наличием примесей и других кристаллических дефектов полупроводника. Для собственных полупроводников теоретические расчеты дают:

$$U_n = \alpha_n n T^{-3/2} \text{ и } U_p = \alpha_p p T^{-3/2}$$

Где α_n и α_p - константы определяются экспериментально.

Подставив значения n, U_n, U_p в формулу (11) и обозначив через σ_0 выражение, стоящее перед экспонентой и не зависящее от температуры, получим:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-\Delta E}{2kT}} \quad (12)$$

Сопrotивление полупроводника определяется формулой $R = \rho \frac{l}{s}$.

Подставляя значение σ из (12) в данную формулу, найдем:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E_0}{2kT}}, \text{ где } R_0 = \frac{1}{\sigma_0 S} \quad (13)$$

Формула (13) лежит в основе одного из методов определения ширины запрещенной зоны полупроводников. Логарифмируя (13), находим:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT}$$

Экспериментальную зависимость сопротивления от температуры удобно изображать графически в координатах $\ln R$ и $\frac{1}{T}$. График представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой к оси $\frac{1}{T}$ равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln R(T_2) - \ln R(T_1)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{\Delta E_0}{2k},$$

Откуда определяем энергию активации

$$\Delta E_0 = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (14)$$

Описание экспериментальной установки.

Полупроводниковое сопротивление помещается в термостатируемую камеру, температура в которой измеряется термометром. Температура камеры задается и поддерживается током термостатирующей жидкости. Сопротивление образца измеряется мостовым методом с помощью прибора "Мост универсальный Е7-4", при помощи правой ручки "Отсчет".



Порядок выполнения работы.

Включите мост, прибор готов к работе через 5 мин. Задайте небольшое значение напряжения на ЛАТРе, для того чтобы нагрев проходил равномерно. Необходимо измерить сопротивление образца для пяти-шести температур в интервале 20 - 75°C, отключая установку от сети при достижении каждого значения температуры и снять показания сопротивления моста. Регулируйте точность измерения сопротивления при помощи ручки "Чувствит. индикатора". Умножьте полученный результат на "Множитель". Занесите снятые данные в таблицу.

1. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу.
2. Построить графики $R = f(T)$ и $\ln R = f(1/T)$. Каждая из найденных точек должна находиться на графике в центре прямоугольника, размеры которого

определяются приборными ошибками

$$\delta(\ln R) = \frac{\delta R}{R} \text{ и } \delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{\delta T}{T^2}$$

| № | t, °C | T, К | $\frac{1}{T}$ | $\frac{\delta T}{T^2}$ | R | ln R | $\frac{\delta R}{R}$ | примечание |
|---|-------|------|---------------|------------------------|---|------|----------------------|------------|
| | | | | | | | | |

3. По графику $\ln R = f(1/T)$ определить ΔE_0 , определяя тангенс из рассчитанных данных.

4. По формуле (9) рассчитать величину энергии Ферми для данного полупроводника при комнатной температуре. Так как при этой температуре

$$\frac{\Delta E}{2} \gg \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*},$$

то вторым слагаемым можно пренебречь, считая, что $\mu \approx -\frac{\Delta E_0}{2}$.

5. Найти концентрацию электронов в зоне проводимости при комнатной температуре по формуле (6), считая для простоты, что $m_n^* = m_0$,

где m_0 - масса покоя электрона.

1) Энергия Ферми: $E_F =$

2) Концентрация электронов: $n =$

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте основные положения теории твердых тел.
2. Дайте классификацию твердых тел по электрическим свойствам на основе зонной теории.
3. Объясните собственную электропроводность полупроводников на основе зонной теории и на моделях кристаллической решетки.
4. Запишите формулу, выражающую зависимость электропроводности полупроводников от температуры.
5. Запишите формулу, определяющую положение уровня Ферми в полупроводниках.
6. Что называется подвижностью носителей заряда и как она зависит от температуры?

Литература.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.5
3. Руководство к лабораторным работам по физике. Под ред. Л.Л.Гольдина