

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры
(КУДР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРО-
ВОДНОСТИ ГЕРМАНИЯ

Руководство

к лабораторной работе по курсу «Физические основы микро- и наноэлектро-
ники»

для студентов специальностей 211000

Разработчик

доцент каф. КУДР

_____М. М Славникова

1. ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства полупроводников тесно связаны со структурой валентных оболочек атомов, образующих их кристаллическую решетку. Под влиянием взаимодействия атомов в кристалле энергетические уровни электронов объединяются и расщепляются в зоны. Для полупроводников и диэлектриков характерно наличие запрещенной зоны энергий между валентной зоной и зоной проводимости. Валентная зона - это полностью заполненная валентными электронами зона, а зона проводимости - это полностью свободная зона при температуре абсолютного нуля (см. рис. 1.1).

Ширина запрещенной зоны (ΔE) - энергия активации процесса освобождения валентных электронов в кристалле от связей с атомами - в полупроводниках не превышает 3 эВ, поэтому при повышении температуры заметное количество электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости. Появляющиеся вакантные места в валентной зоне - дырки - ведут себя как свободные положительные носители заряда.

Если в кристаллическую решетку полупроводника входят атомы при

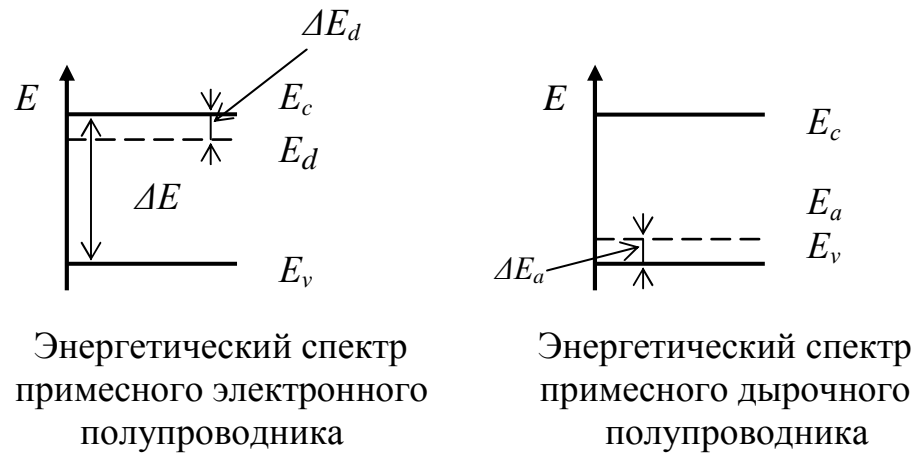


Рисунок 1.1. Энергетические спектры примесных полупроводников

меси, то часть энергетических уровней примесных атомов попадает на запрещенную зону (рис. 1.1). Атомы примеси, отдающие (например, при повышении температуры) электроны в зону проводимости, называют донорами, а соответствующие энергетические уровни - донорными уровнями. Энергетические уровни, на которые забрасываются электроны из валентной зоны, называют акцепторными, а атомы примеси, которым принадлежат эти уровни - акцепторами. В полупроводнике с примесью доноров концентрация свободных электронов n_n превышает концентрацию дырок p_n , поэтому такой полупроводник называют электронным (n -типа). В полупроводнике с примесью акцепторов выполняется обратное соотношение, такой полупроводник - дырочный (p -типа).

Электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне принимают участие в электропроводности. Удельная электропроводность полупроводника описывается выражением

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p, \quad (1.1)$$

где q - заряд электрона;

μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок, т.е. скорости дрейфа в единичном электрическом поле.

2. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Температурная зависимость электропроводности полупроводника определяется температурными зависимостями концентрации носителей заряда и их подвижности.

В собственном (беспримесном) полупроводнике

$$n(T) = p(T) = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (2.1)$$

где N_c, N_v - эффективные плотности квантовых состояний в зоне проводимости и валентной зоне;

T - абсолютная температура;

k – постоянная Больцмана;

ΔE - ширина запрещенной зоны.

Температурную зависимость концентрации носителей заряда в примесном полупроводнике иллюстрирует рис. 2.1. В области низких температур ход зависимости $n(T), p(T)$ определяется термической ионизацией атомов примеси.

Для полупроводника n - типа

$$n(T) = (N_c \cdot N_d)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right). \quad (2.2)$$

Для полупроводника p -типа

$$p(T) = (N_v \cdot N_a)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{2kT}\right). \quad (2.3)$$

Здесь N_d, N_a - концентрации доноров и акцепторов в полупроводнике; $\Delta E_d, \Delta E_a$ — энергии донорного и акцепторного уровней в запрещенной зоне, отсчитываемые от ближайшей разрешенной зоны, т. е. энергии ионизации доноров и акцепторов.

При температуре истощения (T_s) все атомы примеси ионизованы. Температурный интервал от температуры истощения до температуры наступления собственной проводимости (T_i) называется областью полной ионизации примеси. В этой области нагрев полупроводника практически не приводит к изменению концентрации основных носителей заряда. При температуре выше T_i концентрация носителей заряда изменяется в соответствии с выражением (2.1) за счет более интенсивного переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Температурная зависимость подвижности носителей заряда определяется механизмом рассеяния в данном интервале температур. Для атомарных полупроводников типа германия и кремния при низких температурах преобладает рассеяние на ионизованных примесях. В этом случае (рис. 2.2) подвижность

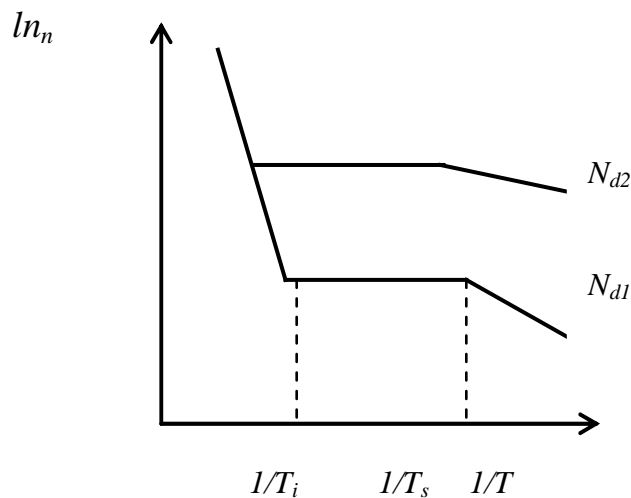


Рисунок 2.1. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в примесном полупроводнике для различных концентраций примеси ($N_{d1} < N_{d2}$)

носителей заряда μ увеличивается с ростом температуры пропорционально $T^{3/2}$, т. е.

$$\mu \sim T^{3/2}. \quad (2.4)$$

С повышением температуры амплитуда тепловых колебаний атомов кристаллической решетки возрастает. Поэтому при высоких температурах преобладающим становится рассеяние на акустических колебаниях решетки, и подвижность носителей заряда с ростом температуры уменьшается

$$\mu \sim T^{-3/2}. \quad (2.5)$$

При $\Delta E, \Delta E_d, \Delta E_a \gg kT$ - экспоненциальные множители в формулах (2.1 - 2.3) значительно сильнее изменяются при изменении температуры, чем N_c, N_v или подвижность носителей заряда. В этом случае температурная зависимость электропроводности полупроводника за пределами области истощения примеси определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда и спрямляется в координатах $\ln \sigma \sim 1/T$ (рис. 2.3). В области истощения примеси концентрация основных носителей заряда не зависит от

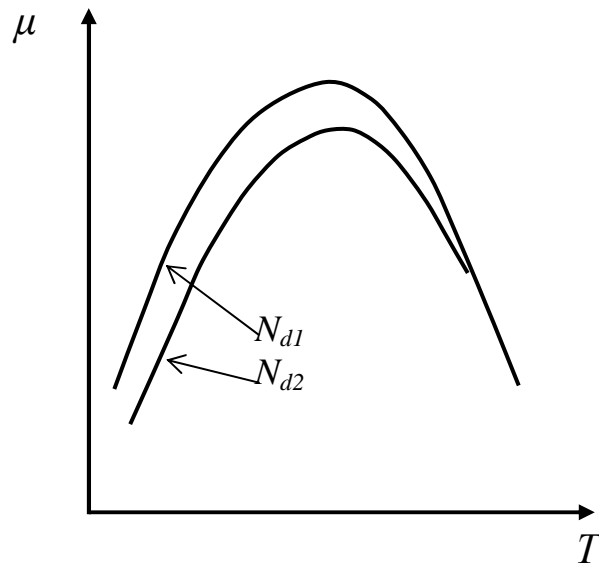


Рисунок 2.2 Температурная зависимость подвижности носителей заряда в атомарных полупроводниках при рассеянии на ионах примеси и акустических колебаниях кристаллической решетки ($N_{d1} < N_{d2}$)

температуры и ход зависимости $\ln \sigma \sim 1/T$ определяется температурной зависимостью подвижности.

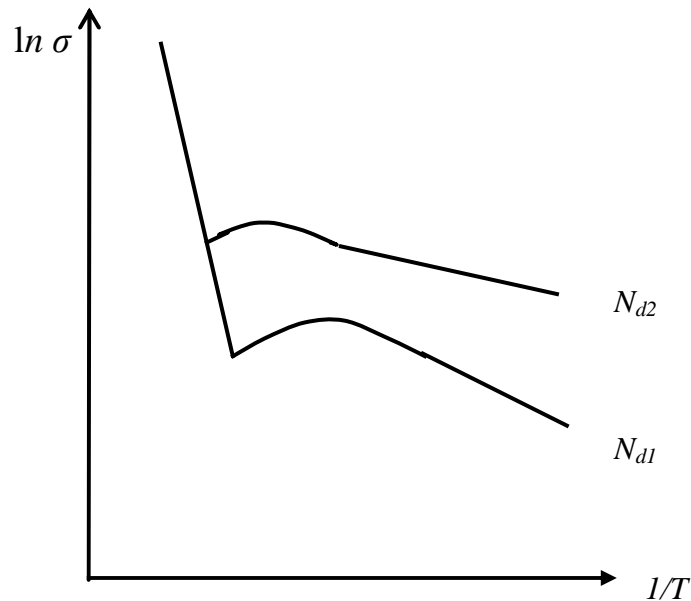


Рисунок 2.3 Зависимость электропроводности полупроводника от температуры для разных концентраций примеси ($N_{d1} < N_{d2}$)

По наклону температурной зависимости электропроводности, построенной в координатах $\ln \sigma \sim 1/T$, в области высоких температур можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника, а в области низких температур – энергию ионизации примеси (рис. 2.3).

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В работе исследуются два образца германия, параметры которых приведены в табл.3.1.

Параметры образцов

Таблица 3.1

Номер образца	Материал	Удельное сопротивление, ρ , Ом·см	l , см	d , см	c , см

1	<i>n - Ge</i>	31	1,2	0,4	0,2
2	<i>n - Ge</i>	2,9	1,1	0,3	0,18

Первый образец весьма слабо легирован сурьмой и уже при комнатной температуре имеет собственную электропроводность. Второй образец более сильно легирован сурьмой, зависимость $\ln\sigma \sim 1/T$ для этого образца обнаруживает особенности, связанные с примесной электропроводностью.

Для определения удельной электропроводности исследуемых образцов используется метод вольтметра - амперметра. Суть метода иллюстрирует рис. 3.1.

К образцу, по которому течет постоянный ток I_0 , присоединены боковые контакты 1 и 2 (зонды). С помощью высокоомного милливольтметра измеряется разность потенциалов V между зондами 1 и 2. Зная величину тока через образец I_0 и разность потенциалов, можно рассчитать сопротивление R участка образца, расположенного между зондами 1 и 2.

$$R = V / I_0 . \quad (3.1)$$

Удельное сопротивление образца равно

$$\rho = \frac{d \cdot c}{l} \cdot R , \quad (3.2)$$

где d - ширина образца;

c - толщина образца;

l - расстояние между зондами 1 и 2.

Отсюда можно получить выражение для искомой удельной электропроводности.

$$\sigma = 1 / \rho = \frac{l}{d \cdot c} \cdot \frac{I_0}{V} . \quad (3.3)$$

Образцы закреплены в держатели с зондами. Ток через образец регулируется ручками ГРУБО и ПЛАВНО на блоке питания и измеряется с помо-

4.4. Оформить результаты работы в виде графика $\ln\sigma \sim 1/T$

Согласно выражению (2.6) рассчитать ширину запрещенной зоны. Постоянную Больцмана k принять равной $8.62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

4.5. Объяснить полученные зависимости.

После окончания работы выключить приборы из сети.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Чем отличается энергетический спектр электронов в кристаллическом полупроводнике от спектра абсолютно свободного электрона?

5.2. Что такое зона проводимости, валентная и запрещенная зоны?

5.3. Какое отношение имеют валентная зона и зона проводимости к электропроводности полупроводника?

5.4. Чем собственный полупроводник отличается от электронного, электронный от дырочного?

5.5. Почему концентрация собственных носителей заряда зависит от ширины запрещенной зоны, а концентрация электронов в примесном полупроводнике n - типа от энергии примесного уровня?

5.6. В какой области экспериментальной зависимости $\ln\sigma \sim 1/T$ и почему проявляется температурная зависимость подвижности носителей заряда?

5.7. Объясните температурную зависимость электропроводности полупроводника.

5.8. Как концентрация примеси и энергия ионизации примесного уровня влияют на зависимость $\ln\sigma \sim 1/T$?

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

6.1. Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Физические основы конструирования и технологам РЭА и ЭВА.- М,: Сов. радио,-1979.

6.2. Несмелов Н. С., Славникова М. М., Широков А. А. Физические основы микроэлектроники: Учебное пособие. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 276 с.

6.3. Несмелов Н.С. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе. - Томск, 2007, 16 с.