

Министерство науки и образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ГЕРМАНИЯ

РУКОВОДСТВО

к лабораторной работе по курсу

«Физические основы микро- и наноэлектроники»

для студентов, обучающихся по направлению

11.03.03 - «Конструирование и технология электронных средств»

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 ме-
си, то часть энергетических уровней примесных атомов попадает на запрещенную зону (рис. 1.1).

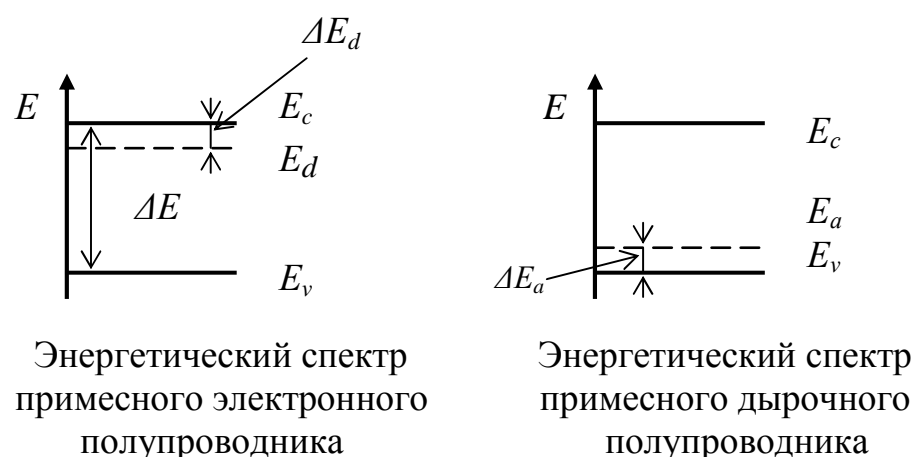


Рисунок 1.1. Энергетические спектры примесных полупроводников

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; ΔE_d , ΔE_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

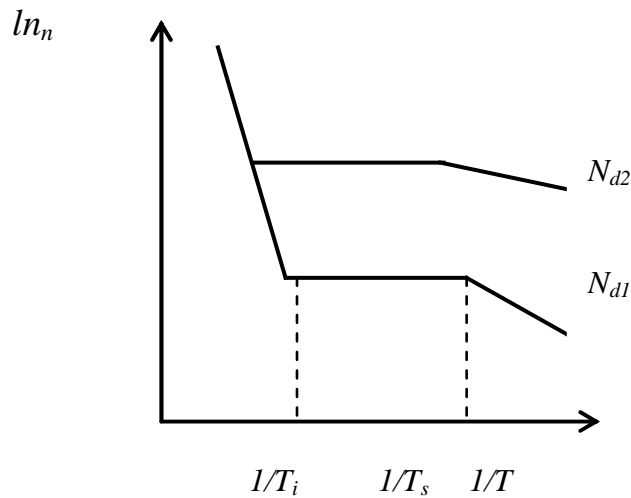


Рисунок 2.1. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в примесном полупроводнике для различных концентраций примеси ($N_{d1} < N_{d2}$)

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 сомножители 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 облас-

ти истощения примеси концентрация основных носителей заряда не зависит от

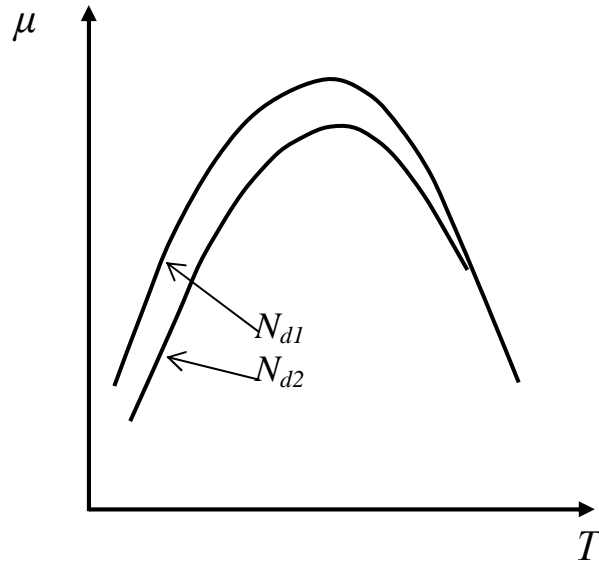


Рисунок 2.2 Температурная зависимость подвижности носителей заряда в атомарных полупроводниках при рассеянии на ионах примеси и акустических колебаниях кристаллической решетки ($N_{d1} < N_{d2}$)

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

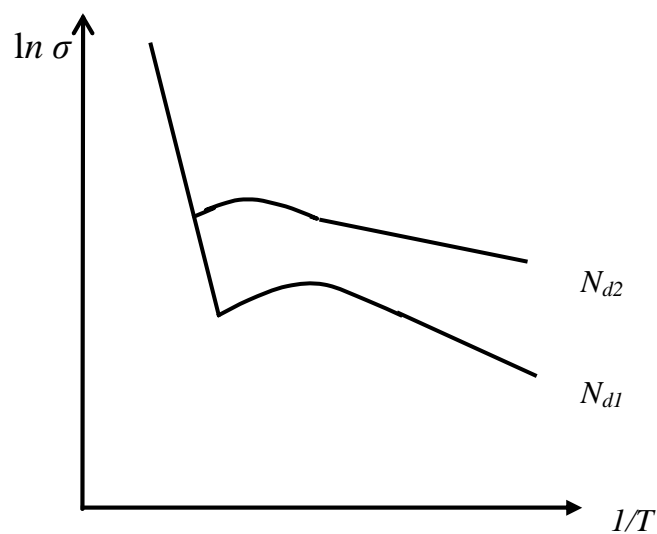


Рисунок 2.3 Зависимость электропроводности полупроводника от температуры для разных концентраций примеси ($N_{d1} < N_{d2}$)

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.

$$R = \frac{V}{I_0} . \quad (3.1)$$

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.

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

Образцы закреплены в держатели с зондами. Ток через образец регулируется ручками ГРУБО и ПЛАВНО на блоке питания и измеряется с помощью встроенного микроамперметра, с пределами измерения от 0 до 500 мкА.

Температура в печи измеряется дифференциальной термопарой медь-константан. Для измерения температуры необходимо использовать градуированную зависимость термоЭ.Д.С. от разности температур. "Холодный" спай термопары находится при комнатной температуре. Разность потенциалов между зондовыми контактами измеряется вольтметром. Подключение вольтметра к исследуемым образцам производится поочередно переключателем с обозначениями № 1-№ 2, расположенным на блоке питания.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Переключателем №1 - № 2 подключить к источнику тока образцы № 1 и № 2 и установить величину тока через образец 200 мкА.

4.2. Измерить напряжение между зондами для образцов № 1 и № 2 при комнатной температуре. Пользуясь выражением (3.3), рассчитать удельную электропроводность образцов.

4.3. Для проведения дальнейших измерений следует включить печь и плавно повышать температуру образца. Измерения разности потенциалов V между зондовыми контактами на обоих образцах производить через $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты измерений представить в соответствии с прилагаемой формой записи (табл. 4.1).

Образец оформления результатов измерений представлен в виде таблицы.

Результаты измерений.

Таблица 4.1

$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T, \text{ K}$	$1/T, \text{ K}^{-1}$	$I_0, \text{ мкА}$	$V_1, \text{ мВ}$	$V_2, \text{ мВ}$	$\sigma_1, \text{ См/см}$	$\sigma_2, \text{ См/см}$	$\ln \sigma_1$	$\ln \sigma_2$

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 технологий 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.