

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Е. В. Саврук, В. В. Каранский, С. В. Смирнов

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

**Учебно-методическое пособие по лабораторным работам
для студентов направлений подготовки
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
профиль «Квантовая и оптическая электроника»,
12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»,
профиль «Фотоника нелинейных, волноводных и периодических
структур»**

2016

Рецензент: Троян П. Е., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Физической электроники ТУСУР.

Саврук Е. В., Каранский В. В., Смирнов С. В.

Физика конденсированного состояния: Учебно-методическое пособие по лабораторным работам для студентов направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», профиль «Квантовая и оптическая электроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», профиль «Фотоника нелинейных, волноводных и периодических структур». — Томск: ТУСУР, Кафедра Физической электроники, 2016. — 44 с.

© Саврук Е. В., Каранский В. В., Смирнов С. В., 2016
© ТУСУР, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Измерение концентрации носителей заряда в полупроводниках методом термо-ЭДС	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Определение частоты колебаний поперечных оптических фононов в ионных кристаллах	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование температурной зависимости электропроводности поликристаллических ферромагнетиков	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование температурной зависимости электропроводности полупроводников	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Определение ширины запрещенной зоны полупроводников по краю собственного поглощения	29
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	43
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	44

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие содержит описание и порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика конденсированного состояния» и предназначено для студентов очной формы, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Квантовая и оптическая электроника») и 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» (профиль «Фотоника нелинейных, волноводных и периодических структур»).

Тематика лабораторных работы: измерение концентрации носителей заряда в полупроводниках методом термо-ЭДС; определение частоты колебаний поперечных оптических фононов в ионных кристаллах; исследование температурной зависимости электропроводности поликристаллических ферромагнетиков; исследование температурной зависимости электропроводности полупроводников; определение ширины запрещенной зоны полупроводников по краю собственного поглощения.

Процесс изучения и выполнения данных лабораторных работ направлен на формирование у студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» следующих компетенций:

– способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);

– способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-2);

– способность выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники (ПК-8).

Процесс изучения и выполнения данных лабораторных работ направлен на формирование у студентов направления подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» следующих компетенций:

– способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);

– способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий (ОПК-2);

– готовность к математическому моделированию процессов и объектов фотоники и оптоинформатики, их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов (ПК-2).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ ТЕРМО-ЭДС»

1. Цель работы

Изучить зависимость термо-ЭДС полупроводников от температуры и методику определения концентрации основных носителей.

2. Теоретическая часть

При наличии градиента температуры в однородном кристалле полупроводника возникают соответствующие ему градиенты концентрации свободных носителей и их средней энергии. В разомкнутой цепи в стационарном состоянии плотность тока во всех точках полупроводника равна нулю, что возможно только в случае возникновения ЭДС, компенсирующей поток носителей. Возникающая при этом электродвижущая сила называется термо-ЭДС.

Рассмотрение термоэлектрических явлений теоретически возможно на основе кинетического уравнения Больцмана. В общем случае термо-ЭДС зависит от механизма рассеяния носителей. В атомном полупроводнике при рассеянии на акустических фононах плотность тока в соответствии с кинетической теорией равна:

$$j = n\mu_n \left\{ \nabla_r (E_F - e\varphi) + \left(2k - \frac{E_F}{T} \right) \nabla_r T \right\} + p\mu_p \left\{ \nabla_r (E_F - e\varphi) - \left(2k - \frac{E_F + \Delta E_g}{T} \right) \nabla_r T \right\}, \quad (1.1)$$

где n и p – концентрации электронов и дырок, соответственно;

μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно;

E_F – уровень Ферми;

T – абсолютная температура;

ΔE_g – ширина запрещенной зоны полупроводника.

При измерении термо-ЭДС кристалл полупроводника находится между двумя металлическими электродами. Поэтому для исключения влияния контактной разности потенциалов на границе металл-полупроводник термо-ЭДС выбирается в виде:

$$\alpha = \frac{\nabla_r \left(\varphi - \frac{E_F}{e} \right)}{\nabla_r T}. \quad (1.2)$$

Из уравнений (1.1) и (1.2) при условии равенства нулю плотности тока получаем:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \frac{1}{\sigma} \left\{ \sigma_n \left(2 - \frac{E_F}{kT} \right) - \sigma_p \left(2 - \frac{E_F + \Delta E_g}{kT} \right) \right\}, \quad (1.3)$$

где $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$;

$$\sigma_n = en\mu_n;$$

$$\sigma_p = ep\mu_p.$$

В полупроводнике с одним типом носителей, например, когда $n \gg p$ (электронный полупроводник):

$$\alpha_n = -\frac{k}{e} \left(2 - \frac{E_F}{kT} \right). \quad (1.4)$$

В дырочном полупроводнике:

$$\alpha_p = \frac{k}{e} \left(2 - \frac{E_F + \Delta E_g}{kT} \right). \quad (1.5)$$

Из формул (1.4) и (1.5) следует, что в зависимости от типа носителей термо-ЭДС имеют противоположные знаки. Таким образом, по знаку термо-ЭДС определяется тип основных носителей.

В невырожденных полупроводниках концентрация носителей находится из выражений:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_F}{kT}\right), \quad (1.6)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{\Delta E_g - E_F}{kT}\right). \quad (1.7)$$

Из формул (1.4) – (1.7) определим зависимости концентраций от величины термо-ЭДС:

$$n = N_C \exp\left[-\left(2 + \frac{\alpha_n e}{k}\right)\right], \quad (1.8)$$

$$p = N_V \exp \left[- \left(2 + \frac{\alpha_p e}{k} \right) \right], \quad (1.9)$$

где N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника:

$$N_C = 2 \left(\frac{m_n^* k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2};$$

где N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне полупроводника:

$$N_V = 2 \left(\frac{m_p^* k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2};$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – приведенная постоянная Планка;

m_n^* и m_p^* – эффективные массы электронов и дырок, соответственно:

$$m_n^* = 1,08 m_0;$$

$$m_p^* = 0,56 m_0.$$

Формулы (1.8) и (1.9) выражают температурные зависимости концентраций электронов и дырок в n - и p -полупроводнике, соответственно.

Рассмотрим такую зависимость в n -полупроводнике. Экспериментально определяется обычно не дифференциальная, а интегральная термо-ЭДС:

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{\partial U}{\partial T}. \quad (1.10)$$

3. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рисунке 1.1. Она состоит из нагревательного элемента 1. Ток в нагревательном элементе регулируется источником питания. Образец полупроводника 2 в форме цилиндра зажимается между стальными электродами 3. В верхнем электроде расположен нагревательный элемент 1. Нижний электрод охлаждается. Температура электродов измеряется термопарами (4) T_1 и T_2 . Термо-ЭДС, возникающая в полупроводнике, подается на вольтметр 5.

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомьтесь с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

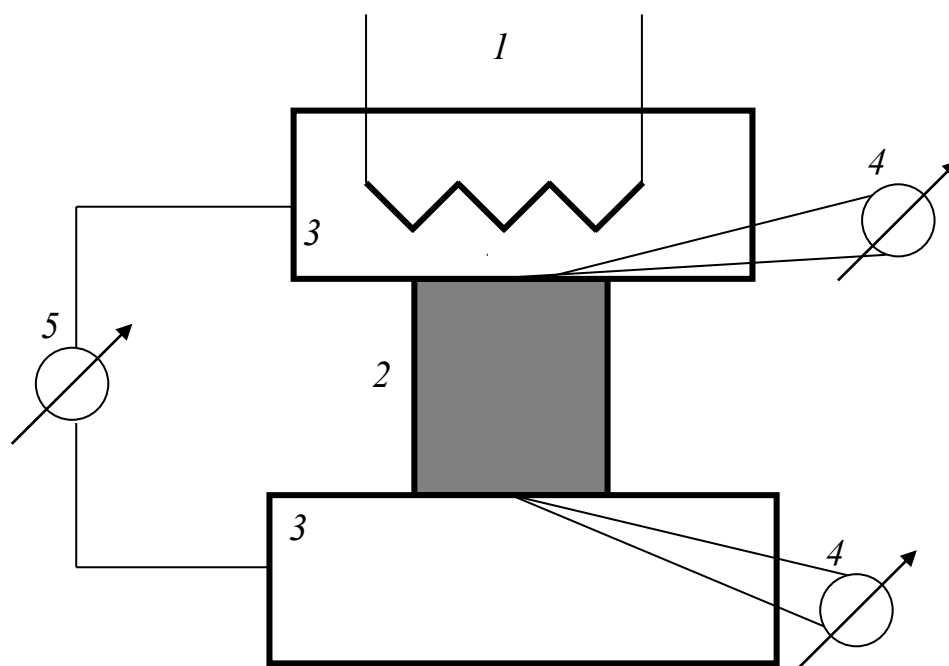


Рисунок 1.1 – Схема измерительной установки

Порядок работы:

1. Получить у преподавателя исследуемый образец полупроводника.
2. Включить нагревательный элемент и приступить к измерению показаний. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений

T_1	T_2	ΔT	ΔU	α

3. По полученным результатам выполнить расчеты в соответствии с заданием на работу.

4. Нагрев образца полупроводника проводить до 80 °С, данные записывать через каждые 5 °С.

5. Задание на работу

1. Снять и построить температурную зависимость падения напряжения в образце полупроводника.
2. Рассчитать и построить температурную зависимость термо-ЭДС.
3. По знаку термо-ЭДС определить тип основных носителей заряда в полупроводнике.
4. Рассчитать и построить температурную зависимость концентрации основных носителей заряда в полупроводнике.
5. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить механизм появления термо-ЭДС в полупроводнике.
2. Что такое дифференциальная термо-ЭДС?
3. Что такое интегральная термо-ЭДС?
4. Какие параметры полупроводника определяют термо-ЭДС?
5. Объяснить принцип работы измерительной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПОПЕРЕЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ФОНОНОВ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ»

1. Цель работы

Определение частоты колебаний поперечных оптических фононов, путем исследования упругой ионной поляризации твердых диэлектриков.

2. Теоретическая часть

Как известно из физики твердого тела, в кристаллах существует несколько типов фононов: оптические и акустические, продольные и поперечные. Для всех фононов уравнение, связывающее частоту ω и волновое число k , имеет вид:

$$\omega^4 - 2\beta \frac{M+m}{M \cdot m} \omega^2 + 4\beta \frac{\sin^2 ka}{M \cdot m} = 0. \quad (2.1)$$

Уравнение имеет два корня:

$$\omega_0 = \sqrt{2\beta \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m} \right)} \text{ — оптическая ветвь;}$$

$$\omega_A = a\beta \sqrt{\frac{2\beta}{M+m}} k \text{ — акустическая ветвь,}$$

где $\beta = C/a$ — силовая постоянная, связанная с жесткостью кристалла C .

Можно показать, что в коллективе из $n \cdot N$ атомов (где n — число атомов в базисе, N — число элементарных ячеек во всем кристалле) может существовать N продольных акустических колебаний, $2N$ поперечных акустических колебаний, $(n-1)N$ продольных оптических колебаний, $2(n-1)N$ поперечных оптических колебаний. На рисунке 2.1 приведена дисперсионная кривая для двух важных направлений в k -пространстве для кристалла алмаза. Алмаз, у которого примитивная ячейка содержит два атома углерода, имеет шесть фононных ветвей: одну продольную акустическую LA, одну продольную оптическую LO, две поперечных акустических ТА, две поперечных оптических ТО.

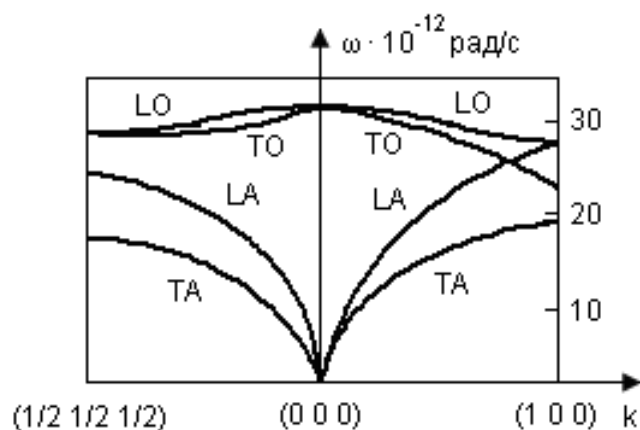


Рисунок 2.1 – Дисперсионная кривая для кристаллов со структурой алмаза

Известно, что взаимосвязь между макроскопическими и микроскопическими параметрами поляризации устанавливается с помощью уравнения Клаузиуса-Мосоти:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} n\alpha, \quad (2.2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость кристалла;

α – поляризуемость частиц;

n – концентрация частиц.

Если, следуя Борну, предположить, что в ионных кристаллах с небольшим значением диэлектрической проницаемости локальное поле равно среднему микроскопическому полю E и ионы в решетке связаны квазиупругими силами с коэффициентом упругости:

$$c = m\omega_0,$$

где ω_0 – частота поперечных оптических колебаний решетки;

m – приведенная масса ионов,

тогда упругая ионная поляризация может быть представлена в виде:

$$P = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_{II})nE, \quad (2.3)$$

где α_{II} – ионная поляризуемость;

α_1 и α_2 – электронные поляризуемости разноименных ионов.

Учитывая, что для электронной поляризации справедливо соотношение, являющееся следствием из теории Максвелла:

$$\varepsilon_{эл} = \tilde{n}^2,$$

где \tilde{n} – показатель преломления, тогда:

$$\varepsilon = \tilde{n}^2 + \frac{n\alpha_{II}}{\varepsilon_0}, \quad (2.4)$$

где

$$\tilde{n}^2 = 1 + (\alpha_1 + \alpha_2) \frac{n}{\varepsilon_0}.$$

Если ввести атомные веса ионов:

$$M_1 = m_1 N_0,$$

$$M_2 = m_2 N_0,$$

где N_0 – число Авогадро.

m_1 и m_2 – масса ионов, и учитывая, что

$$n = \rho \frac{N_0}{M_1 + M_2},$$

где ρ – плотность материала, получим формулу Борна:

$$\varepsilon = \tilde{n}^2 + \frac{q^2}{\varepsilon_0^2 \omega_0} \cdot \frac{N_0 \rho}{M_1 M_2}. \quad (2.5)$$

3. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Включить измеритель добротности (куметр) Е9-4, дать ему прогреться в течение 15 минут.
2. Получить у преподавателя исследуемые образцы диэлектрика.
3. Подключить к измерителю добротности Е9-4 ячейку ЭС-1Т. Вращением барабана замкнуть электроды и установить стрелки индикатора ячейки в нулевое положение. Установить в ячейку исследуемый образец, записав при этом показания стрелочного индикатора H_I .

4. Подключить катушку индуктивности № 2.
5. Установить рабочую частоту куметра 250 кГц.
6. Ручку «Режимы» установить в положение «Уст. нуля». Ручками «Нуль уровня» и «Нуль Q» установить стрелки приборов на нуль.
7. Перевести ручку «Режимы» в положение «Калибровка». Ручкой «Уровень» установить стрелку прибора «Уровень» на красную отметку.
8. Перевести ручку «Режимы» в положение «Измерение».
9. Вращая ручку «Емкость пФ», добиться максимального отклонения стрелки прибора «Q». Записать значение добротности.
10. Убрать образец из измерительной ячейки и вращением барабана ячейки вновь добиться максимального отклонения стрелки прибора «Q», записав при этом показания на стрелочном индикаторе H_2 и значение добротности.
11. Установить рабочую частоту куметра 350 кГц и повторить п.п. 6 – 10.
12. Подключить катушку индуктивности № 3.
13. Повторить п.п. 5 – 10 для рабочих частот 600, 700 и 800 кГц.
14. По полученным данным построить необходимые зависимости в соответствии с заданием на работу.

4. Задание на работу

1. По формуле $\varepsilon = H_1 / H_2$ найти диэлектрическую проницаемость исследуемых образцов для всех рабочих частот.

Рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь по формуле $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2}$.

2. Рассчитать частоту поперечных оптических фононов для исследуемых образцов при всех рабочих частотах.
3. Построить частотную зависимость диэлектрической проницаемости исследуемых образцов.
4. Построить частотную зависимость тангенса диэлектрических потерь исследуемых образцов.
5. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое фононы?
2. Что такое поляризация диэлектриков?
3. Типы поляризации.
4. Электронная упругая поляризация.
5. Ионная упругая поляризация.
6. Методы измерения диэлектрической проницаемости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ»

1. Цель работы

Исследовать температурной зависимости электрофизических параметров поликристаллических марганец-цинковых ферромагнетиков.

2. Теоретическая часть

Физические величины, описывающие магнитное поле в веществе и характеристики магнетиков

Всякое вещество является магнетиком, то есть способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Для объяснения намагничивания тел Ампер предложил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи, которые обладают магнитным моментом и создают в окружающем пространстве магнитное поле.

В отсутствие внешнего поля ($H = 0$) молекулярные токи ориентированы хаотично, вследствие чего обусловленный ими результирующий магнитный момент равен нулю ($\sum P_{mi} = 0$). Под действием поля магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении, вследствие чего суммарный магнитный момент вещества становится отличным от нуля – вещество намагничивается.

Намагниченность магнетика принято характеризовать магнитным моментом единицы объема. Эту величину называют вектором намагничивания (или намагниченности):

$$\vec{J} = \frac{\sum_{i=1} \vec{P}_{mi}}{\Delta V} \quad (\text{суммирование производится по объему } \Delta V).$$

Величина вектора намагничивания зависит от намагничивающего поля и может быть выражена следующим соотношением:

$$\vec{J} = \chi_m \cdot \vec{H}, \quad (3.1)$$

где χ_m – магнитная восприимчивость – величина, зависящая от природы вещества.

Таким образом, для описания магнитного поля магнетика пользуются тремя векторами: вектором намагничения (\vec{J}), вектором напряженности поля (\vec{H}) и вектором магнитной индукции (\vec{B}). Они взаимосвязаны следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}), \quad (3.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная,

или с учетом (1)

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \chi_m \cdot \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}. \quad (3.3)$$

Величина $(1 + \chi_m)$ называется относительной магнитной проницаемостью вещества и обозначается μ . Таким образом, в изотропных средах:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}. \quad (3.4)$$

Магнитная восприимчивость χ_m бывает как положительной, так и отрицательной. Поэтому магнитная проницаемость μ может быть как больше, так и меньше единицы. В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все магнетики подразделяются на три группы:

- 1) диамагнетики, у которых $\chi_m < 0$ и мала по абсолютной величине ($\sim 10^{-6}$);
- 2) парамагнетики, у которых $\chi_m > 0$ и тоже мала ($\sim 10^{-5} - 10^{-3}$);
- 3) ферромагнетики, у которых $\chi_m \gg 0$ и достигает очень больших значений ($\sim 10^2 - 10^5$).

Кроме того, в отличие от диа- и парамагнетиков, для которых χ_m не зависит от H , магнитная восприимчивость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля.

Таким образом, в изотропных веществах вектор намагниченности может как совпадать по направлению с H (пара- и ферромагнетики), так и быть направленным в противоположную сторону (диамагнетики). Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура T_K , при которой области спонтанного намагничивания распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства (становится обычным парамагнетиком). Эта температура называется точкой Кюри.

Точка Кюри – это температура T_K , выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю (рисунок 3.1). Причина этого – разориентирующее тепловое движение молекул, в результате чего ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

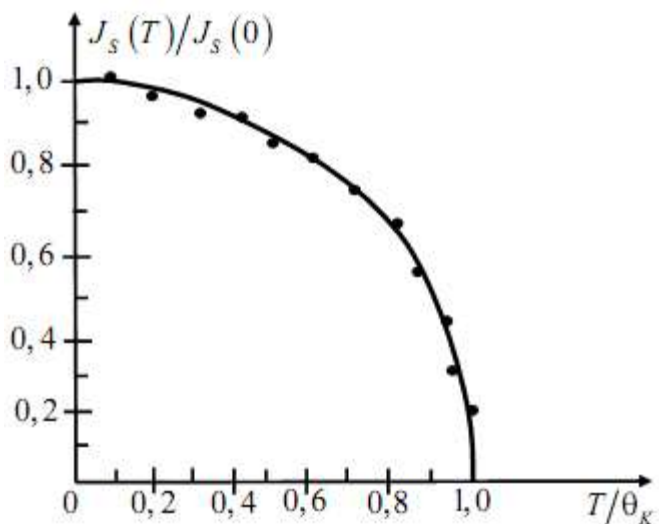


Рисунок 3.1 – Зависимость предельной намагниченности от температуры

По мере уменьшения температуры ферромагнетика от точки Кюри T_K его намагниченность J возрастает, так как магнитные моменты его молекул в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль внешнего магнитного поля: наступает магнитное насыщение, при котором намагниченность вещества J_S максимальна. Ее величина (магнитный момент единицы объема образца) равна сумме магнитных моментов молекул в этом объеме:

$$J_S = np_m, \quad (3.5)$$

где n – концентрация молекул ферромагнетика;

p_m – магнитный момент одной молекулы.

Строго говоря, полное насыщение, для которого справедлива формула (5), возможно только при термодинамической температуре $T = 0$ К. Соответствующую этой температуре величину $J_S(0)$ можно найти из связи магнитной индукции \vec{B} с намагниченностью вещества \vec{J} .

Согласно выражению (3.2) намагниченность насыщения при $T = 0$ К:

$$J_s(0) = \frac{1}{\mu_0} B_s(0) - H_s(0). \quad (3.6)$$

Так как $H_s(0) \ll \frac{1}{\mu_0} B_s(0)$, то

$$J_s(0) \approx \frac{1}{\mu_0} B_s(0). \quad (3.7)$$

Индекс «s» означает, что величины относятся к состоянию насыщения ферромагнетика. Магнитную индукцию насыщения $B_s(0)$ можно найти экстраполяцией графика ее температурной зависимости $B_s=f(T)$ в область абсолютного нуля температуры.

Электропроводность поликристаллических ферритов

Марганец-цинковые ферриты представляют собой электронные полупроводники с низкой подвижностью носителей. В зависимости от состава феррита роль донорных центров играют двухвалентные ионы железа $[Fe^{2+}]$ находящиеся в октаэдрических позициях решетки. Предполагается, что их электропроводность обусловлена прыжками электронов по уровням локализации за счет электрон-фононного взаимодействия и определяется выражением

$$\sigma = q^2 \mu_n N \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3.8)$$

где N – концентрация донорных центров $[Fe^{2+}]$;

E_a – энергия их активации.

В данном случае подвижность носителей заряда можно определить как:

$$\mu_n = \frac{r^2}{kT} \nu, \quad (3.9)$$

где r – длина прыжка (0,3 нм) – расстояние между октаэдрическими позициями;

$\nu = 5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ – характеристическая частота фононов.

Особенностью прыжковой проводимости является ее зависимость от частоты измерительного сигнала. Эту зависимость можно учесть с помощью формулы Друде:

$$\sigma = q^2 N \frac{r^2}{kT} \nu \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \frac{\tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2}, \quad (3.10)$$

где τ – время релаксации.

Магнитная проницаемость рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{L \cdot l_{cp} \cdot 10^7}{4 \cdot \pi \cdot S \cdot n^2} = \frac{L \cdot d_{cp} \cdot 10^7}{4 \cdot S \cdot n^2}, \quad (3.11)$$

где L – индуктивность, Гн;

n – число витков;

l_{cp} – средняя длина магнитной силовой линии, м;

d_{cp} – средний диаметр образца, м;

S – сечение кольца, м².

В данной работе: $n = 44$ витка; $d_{внеш} = 30$ мм; $d_{внутр} = 20$ мм; толщина кольца $h = 6$ мм.

Величина активного сопротивления находится из формулы:

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R_c}. \quad (3.12)$$

Величина электропроводности находится из формулы:

$$\sigma = \frac{l_{cp}}{S \cdot R_c}. \quad (3.13)$$

3. Экспериментальная установка

Для выполнения данной работы применяется установка, состоящая из образца (ферритового кольца с измерительной обмоткой), измерителя LCR, нагревателя с источником питания и термопары.

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой.

Порядок работы:

1. Собрать установку.
2. Подать на нагреватель напряжение не более 30 В и ток порядка 3 А.

3. Измерения проводятся на трех частотах – 1; 10 и 100 кГц при измерительном напряжении 0,1 В на измерителе LCR.

4. Через каждые 10 градусов записывать значения индуктивности катушки и добротности. Возле точки Кюри, когда значение индуктивности начинает расти медленнее, данные следует записывать через каждые 5 градусов.

5. Повторить п.п. 3 – 4 до резкого уменьшения индуктивности и добротности, после чего зафиксировать еще 4 значения добротности и индуктивности.

6. По полученным данным построить необходимые зависимости в соответствии с заданием на работу.

5. Задание на работу

1. Рассчитать и построить температурную зависимость магнитной проницаемости для трех частот.

2. Определить температуру Кюри.

3. Рассчитать и построить зависимость $\ln(1/R_c) = f(1/T)$ для трех частот.

4. Определить энергию активацию прыжковой проводимости для трех частот.

5. Рассчитать и построить температурную зависимость электропроводности для трех частот.

6. Рассчитать и построить температурную зависимость концентрации донорных центров для трех частот.

7. Рассчитать и построить температурную зависимость времени релаксации для трех частот.

8. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое точка Кюри?

2. Начертите и объясните схему установки.

3. Почему добротность образца уменьшается с ростом температуры?

4. Что такое энергия активации электропроводности?

5. Что такое прыжковая проводимость?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

1. Цель работы

Изучить методику экспериментального определения ширины запрещенной зоны полупроводников, энергии активации примеси и концентрации носителей заряда на основе температурной зависимости электропроводности.

2. Теоретическая часть

С точки зрения статистической физики свободные носители в полупроводнике рассматриваются как идеальный газ, подчиняющийся статистике Ферми-Дирака. Функция распределения Ферми-Дирака имеет вид:

$$f(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) \right]^{-1}, \quad (4.1)$$

где E_F – уровень Ферми.

Эта функция выражает вероятность того, что состояние с энергией E занято электроном при температуре T .

Рассмотрим температурную зависимость электропроводности на примере электронного полупроводника с концентрацией доноров N_D , расположенных на глубине ΔE_D ниже зоны проводимости. Выберем в качестве начала отсчета дно зоны проводимости E_C , полагая $E_C = 0$. В отсутствие вырождения из условия электронейтральности следует, что уровень Ферми определяется выражением:

$$E_F = kT \ln \left[\frac{N_C}{2N_D} + \sqrt{\left(\frac{N_C}{2N_D}\right)^2 + \frac{N_C}{\beta N_D} \exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right)} \right], \quad (4.2)$$

где k – постоянная Больцмана;

T – температура;

N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости:

$$N_C = 2 \left(\frac{m_n^* kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2},$$

где m_n^* – эффективная масса электрона;

\hbar – приведенная постоянная Планка;

$\beta = \frac{1}{2}$ – фактор вырождения донорного уровня.

Случай низких температур:

Условию низких температур соответствует неравенство:

$$\exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \geq \frac{N_C}{N_D}. \quad (4.3)$$

При этом условии из (4.2) находим:

$$E_F = \frac{\Delta E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{\beta N_D}\right). \quad (4.4)$$

Отсюда следует, что при $T = 0$ уровень Ферми расположен посередине между дном зоны проводимости и уровнем доноров. С ростом температуры при условии $N_C < \beta N_D$ уровень E_F вновь равен $\frac{\Delta E_D}{2}$. Этому состоянию соответствует концентрация электронов:

$$n = (\beta N_C N_D)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right). \quad (4.5)$$

Проводимость полупроводника равна:

$$\sigma_n = e\mu_n n = e\mu_n (\beta N_C N_D)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right).$$

Если пренебречь температурной зависимостью подвижности и плотности состояний N_C , то:

$$\sigma_n = \text{const} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right). \quad (4.6)$$

Случай высоких температур:

При высоких температурах справедливо неравенство:

$$\exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \leq \frac{N_C}{N_D}.$$

Этому условию соответствует положение уровня E_F

$$E_F = kT \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.7)$$

и концентрация электронов:

$$n = N_D.$$

Последнее условие означает, что все доноры ионизованы, и проводимость не зависит от температуры. Это состояние будет сохраняться до тех пор, пока температура не достигнет значения, при котором начнется переход электронов из валентной зоны. Когда концентрация электронно-дырочных пар будет больше N_D , уровень Ферми будет определяться выражением для собственного полупроводника:

$$E_F = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right), \quad (4.8)$$

а концентрация электронов:

$$n = n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp \left(-\frac{\Delta E_g}{2kT} \right), \quad (4.9)$$

где ΔE_g – ширина запрещенной зоны;

m_p^* – эффективная масса дырок;

N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне:

$$N_V = 2 \left(\frac{m_p^* kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}.$$

Таким образом, при высоких температурах проводимость определяется:

$$\sigma_i = n_i e (\mu_n + \mu_p) = e (\mu_n + \mu_p) (N_C N_V)^{1/2} \exp \left(-\frac{\Delta E_g}{2kT} \right). \quad (4.10)$$

Пренебрегая слабой температурной зависимостью подвижностей и плотностей состояний, получим:

$$\sigma_i = const \exp \left(-\frac{\Delta E_g}{2kT} \right). \quad (4.11)$$

Логарифмируя выражения (4.6) и (4.11), получим:

$$\ln \sigma_n = const - \frac{\Delta E_D}{2kT}, \quad (4.12)$$

$$\ln \sigma_i = const - \frac{\Delta E_g}{2kT}. \quad (4.13)$$

Следовательно, зависимости $\ln \sigma_n \approx \frac{1}{T}$ и $\ln \sigma_i \approx \frac{1}{T}$ есть прямые линии с наклонами, которые определяют энергию активации доноров (уравнение (4.12)) и ширину запрещенной зоны (уравнение (4.13)). Из (4.12) и (4.13) находим:

$$\Delta E_D = 2k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{\sigma_n(T_1)}{\sigma_n(T_2)}, \quad (4.14)$$

$$\Delta E_g = 2k \frac{T'_1 T'_2}{T'_1 - T'_2} \ln \frac{\sigma_i(T'_1)}{\sigma_i(T'_2)}, \quad (4.15)$$

Зависимость электропроводности от обратной температуры $\frac{1}{T}$ имеет вид, показанный на рисунке 4.1.

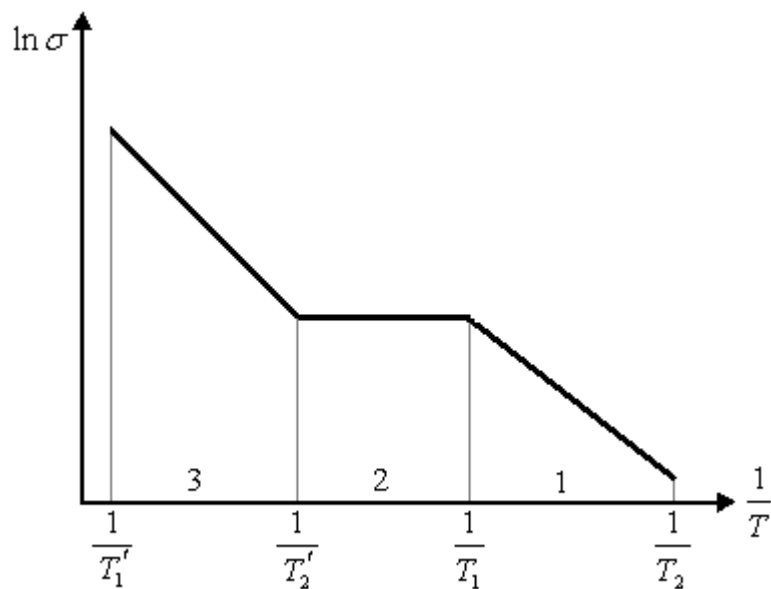


Рисунок 4.1 – Температурная зависимость электропроводности:

- 1 – участок примесной проводимости; 2 – участок истощения примесей;
3 – участок собственной проводимости

В (4.14) и (4.15) температуры T_1 , T_2 и T'_1 , T'_2 соответствуют двум произвольным (например, крайним) точкам температурного диапазона измерения электропроводности, как показано на рисунке 4.1.

3. Экспериментальная установка

Внешний вид и схема экспериментальной установки *3B Scientific Physyiscs* показаны на рисунке 4.2. Кристалл полупроводника помещается в печь, которая питается от сети через автотрансформатор.



Термокамера

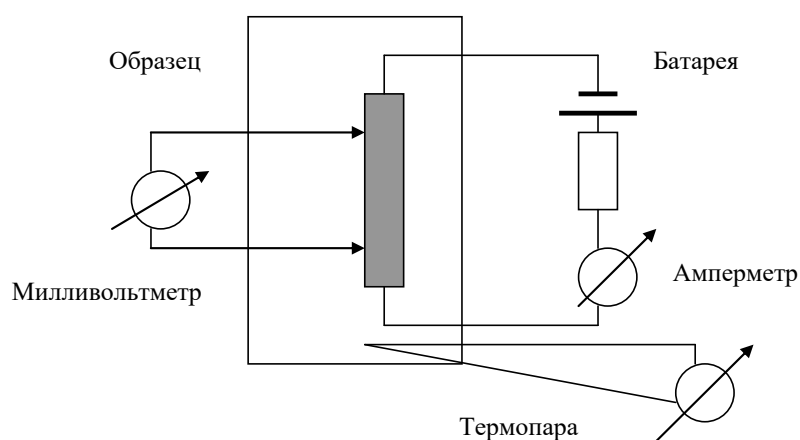


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема установки

Через образец (рисунок 4.3) размером 20 x 10 x 1 мм от батареи пропускается ток I . При этом на образце появляется разность потенциалов U . Следовательно, проводимость равна

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{S}, \quad (4.16)$$

где S – площадь поперечного сечения образца;

L – длина образца.

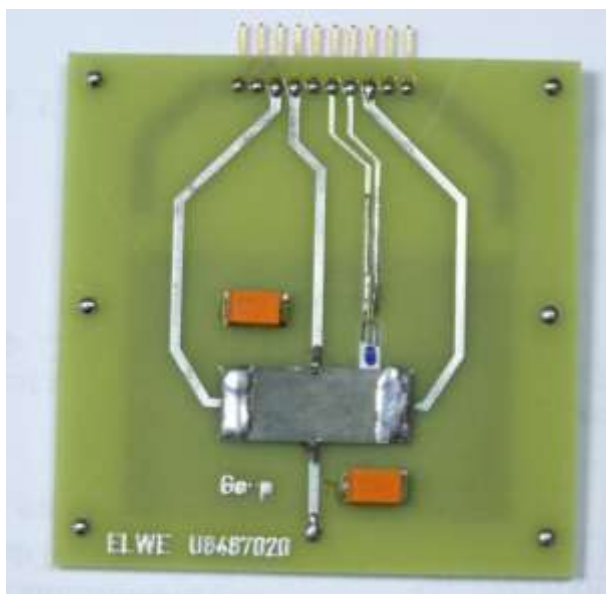


Рисунок 4.3 – Внешний вид исследуемого образца

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Включить блок U3300 в сеть и установить на нем напряжение 9 В, при этом должна загореться индикация на панели управления.
2. Нажать кнопку I_p и ручкой I_k установить измерительный ток в пределах 5 – 20 мА.
3. Нажать кнопку T_p и записать температуру образца.
4. Нажать кнопку U_H и удерживать её в течении 2 с, пока не загорится лампочка U_p . Записать падение напряжения на образце.
5. Ручкой OFF-170 С установить нагрев образца и, дождавшись повышения температуры на 5 градусов, повторить п.п. 3 – 4.
6. Измерения температуры проводить до 120 °С через 5 °С.

5. Задание на работу

1. Снять и построить зависимость электропроводности от температуры – $\sigma(T)$.
2. Построить теоретическую и экспериментальную зависимости $\ln\sigma\left(\frac{1}{T}\right)$ (на одном графике).
3. Из построенных зависимостей определить энергию активации примеси.
4. Из построенных зависимостей определить ширину запрещенной зоны полупроводника.
5. Построить зависимости $n(T)$ и $\ln n\left(\frac{1}{T}\right)$ для участков примесной и собственной проводимостей.
6. Построить теоретическую и экспериментальную зависимости подвижности носителей заряда от температуры (на одном графике).
7. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Каков энергетический спектр электронов в полупроводнике?
2. Что такое эффективная плотность состояний?
3. Что характеризует уровень Ферми?
4. Каков физический смысл условия $n = N_D$ в электронном полупроводнике?
5. Изобразить графически температурную зависимость уровня Ферми в электронном, дырочном и собственном полупроводнике.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПО КРАЮ СОБСТВЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ»

1. Цель работы

Изучение принципа работы спектрофотометра USB2000, определение спектра поглощения твердых тел в видимом диапазоне длин волн и определение ширины запрещенной зоны полупроводников.

2. Теоретическая часть

Оптические коэффициенты

Оптические явления включают в себя весьма широкий круг процессов, протекающих в кристаллах при их взаимодействии с электромагнитным излучением в оптическом диапазоне длин волн. Если на кристалл падает внешнее световое электромагнитное излучение, характеризуемое длиной волны λ и интенсивностью $I_0(\lambda)$, то исследуя интенсивность $I_R(\lambda)$ отраженного света или $I_T(\lambda)$ прошедшего через образец света, можно изучать процессы, происходящие в кристалле под действием падающего на него света. Для характеристики зависимостей $I_R(\lambda)$ и $I_T(\lambda)$ введены следующие оптические коэффициенты (рисунок 5.1).

Коэффициент отражения $R(\lambda)$, определяемый соотношением:

$$R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)}, \quad (5.1)$$

характеризует долю отраженного от кристалла света и является величиной безразмерной, выражаемой часто в процентах.

Коэффициент пропускания $T(\lambda)$, определяемый соотношением:

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)}, \quad (5.2)$$

характеризует долю прошедшего через образец света и является величиной безразмерной, также выражаемой часто в процентах. Для нахождения величины интенсивности прошедшего через образец света $I_T(\lambda)$, необходимо знать, какая доля света

пройдет через освещаемую поверхность полупроводника (с учетом отражения от этой поверхности), какая доля света дойдет внутри образца до поверхности, противоположной освещаемой (с учетом поглощения света в объеме образца), и, наконец, какая доля света выйдет из образца (с учетом внутреннего отражения от поверхности, противоположной освещаемой).

Коэффициент поглощения $\alpha(\lambda)$, определяемый законом Бугера–Ламберта:

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda)(1 - R) \exp(-\alpha x), \quad (5.3)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{x} \operatorname{Ln} \left[\frac{I_0(\lambda)(1 - R)}{I_x(\lambda)} \right], \quad (5.4)$$

характеризует интенсивность света, поглощенного в образце с единичной толщиной. Исходя из экспоненциального вида закона ослабления интенсивности света (5.3) на глубине x образца можно интерпретировать величину α как вероятность поглощения фотона на единице толщины образца, а величину α^{-1} как среднюю длину свободного пробега фотона в образце. Величина $(1 - R)$ в соотношениях (5.3) и (5.4) характеризует долю света, прошедшего через освещаемую поверхность образца с учетом коэффициента отражения R . Коэффициент поглощения α имеет размерность обратной длины и измеряется в см^{-1} .

Для определения коэффициента поглощения нужно измерить интенсивности света, падающего на образец I_0 и прошедшего сквозь образец I_T . Для подсчета величины I_T с учетом соображений, приведенных выше, имеется формула:

$$I_T = T \cdot I_0 = \frac{I_0(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)}. \quad (5.5)$$

Пояснения к выводу формулы (5.5) можно найти на рисунке 5.1. Если αx велико, то вторым членом в знаменателе можно пренебречь и тогда:

$$I_T \approx I_0(1 - R)^2 \exp(-\alpha x). \quad (5.6)$$

Получаем, что:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{x} \operatorname{Ln} \left[\frac{I_0(1 - R)^2}{I_T} \right]. \quad (5.7)$$

Если коэффициент R неизвестен, то можно найти α , измеряя пропускание двух образцов различной толщины x_1 и x_2 . Тогда:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \operatorname{Ln} \left(\frac{I_{T1}}{I_{T2}} \right). \quad (5.8)$$

Спектральные зависимости R , α от длины волны, от частоты или от энергии квантов падающего света называются соответственно спектрами отражения или спектрами поглощения света для данного полупроводника.

Так как и отражение, и поглощение света объясняются общими процессами взаимодействия света со средой кристалла, то коэффициенты отражения и поглощения света должны быть связаны между собой. Эта связь будет понятна, если мы введем комплексную диэлектрическую проницаемость и комплексный показатель преломления света:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2, \quad (5.9)$$

$$n = \tilde{n} - ik. \quad (5.10)$$

Комплексные величины ε и n , в отличие от обычных, характеризуют взаимодействие электромагнитной волны со средой кристалла, в которой частично поглощается световая энергия.

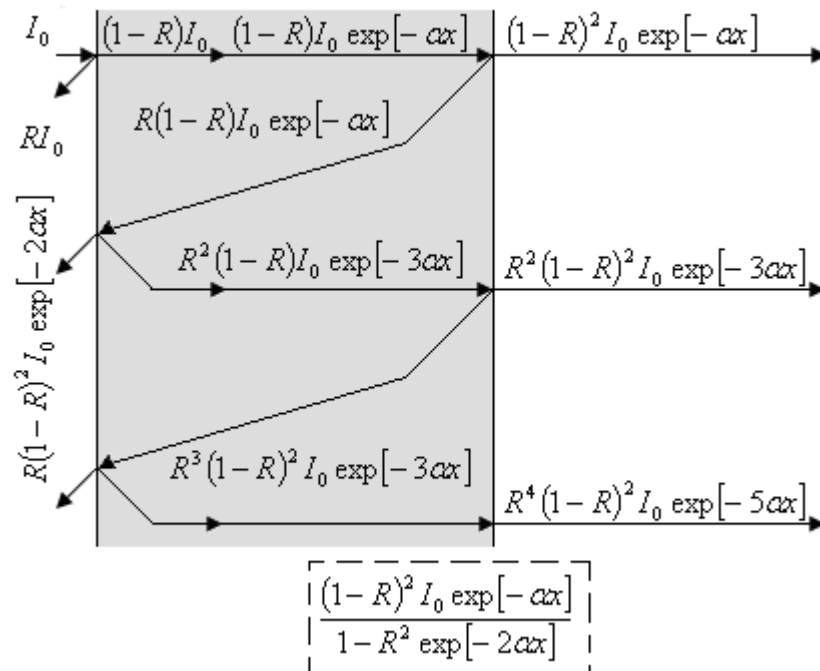


Рисунок 5.1 – Энергетические потоки в системе с многократным внешним и внутренним отражением

Показатель преломления определяется как отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде кристалла, а именно:

$$n = c/V. \quad (5.11)$$

Величина k характеризует поглощение света средой кристалла и называется показателем поглощения, или коэффициентом экстинкции.

Величины k и α связаны между собой соотношением:

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi\nu k}{c} = 4\pi k n. \quad (5.12)$$

Из общего курса физики известна связь диэлектрической проницаемости и показателя преломления n :

$$n = \sqrt{\varepsilon}. \quad (5.13)$$

Коэффициент отражения R можно выразить через n и k :

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (5.14)$$

Формула (5.14) непосредственно связывает коэффициенты отражения R и поглощения α , если подставить в неё выражение k из уравнения (5.12). Если поглощение весьма мало, то коэффициент отражения выражается классической зависимостью:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}. \quad (5.15)$$

При больших значениях показателя преломления ($n \gg 1$) происходит почти полное отражение $R \approx 1$. Если наоборот, поглощение велико и $k \gg n$, то также $R \approx 1$ и происходит почти полное отражение. Именно этому второму случаю соответствует обычно наблюдаемый зеркальный блеск металлов и многих полупроводников, так как коэффициент поглощения этих материалов в видимой области спектра очень высокий ($\alpha > 10^4 \text{ см}^{-1}$).

Особенности спектральных зависимостей оптических коэффициентов $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ и $\alpha(\lambda)$ в разных областях спектра объясняются различными механизмами взаимодействия световой волны со средой кристалла и главным образом различными механизмами поглощения энергии световой волны кристаллом. Поэтому теория оптических явлений развита применительно к анализу спектров поглощения света. Однако

при больших значениях коэффициента поглощения α , как это видно из формулы (5.6), значение интенсивности прошедшего света очень мало и для того, чтобы определить его требуются измерения на очень тонких образцах (достаточно указать, что для $\alpha \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$ приходится использовать образцы с толщиной $d = 10^{-4} \text{ см}^{-1} = 1 \text{ мкм}$). В этом случае растут экспериментальные погрешности как за счет ошибки измерения толщины образца, так и за счет увеличивающегося влияния качества обработки поверхности образца.

Основные механизмы поглощения света в полупроводниках

Пусть величина $\alpha_i(\omega)$ имеет смысл вероятности поглощения фотона с частотой ω на единице толщины образца при действии некоторого i -того механизма поглощения и все механизмы поглощения действуют независимо друг от друга, тогда полная вероятность поглощения будет выражаться следующим образом:

$$\alpha(\omega) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(\omega). \quad (5.16)$$

Таким образом, в данном спектральном интервале следует учитывать механизмы поглощения, дающие наибольший вклад, т. е. имеющие наибольшее значение величины $\alpha_i(\omega)$. В различных спектральных интервалах можно выделить преобладающие механизмы поглощения.

Поскольку поглощение света связано с переходом энергии фотонов в другие виды энергии в кристаллах, то естественно классифицировать механизмы поглощения следующим образом:

- 1) собственное или фундаментальное поглощение, связанное с электронными переходами между разрешенными зонами энергии;
- 2) поглощение свободными носителями заряда, связанное с электронными (или дырочными) переходами внутри соответствующих разрешенных зон или между подзонами разрешенных зон;
- 3) примесное поглощение, связанное с электронными (или дырочными) переходами между разрешенными зонами и примесными уровнями в запрещенной зоне;
- 4) межпримесное поглощение, связанное с электронными (или дырочными) пе-

переходами между примесными состояниями в запрещенной зоне;

5) экситонное поглощение, связанное с созданием или распадом экситонных состояний;

6) фононное поглощение, связанное с поглощением энергии световой волны колебаниями атомов решетки и рождением в решетке при этом новых фононов;

7) плазменное поглощение, связанное с поглощением энергии световой волны электронно-дырочной плазмой и приводящее к переходу плазмы в более высокие квантованные состояния.

Следует отметить, что почти все механизмы оптического поглощения, связанные с различными электронными (или дырочными) переходами, сопровождаются поглощением или испусканием фононов. Необходимость участия фононов в процессах поглощения света, связанных с электронными (или дырочными) переходами, обусловлена требованием выполнения закона сохранения импульса. Это связано с тем, что большое изменение импульса электронов (или дырок) при некоторых переходах, не может быть вызвано обычно малыми импульсами поглощаемых в этих переходах фотонов и требует участия фононов, которые могут иметь достаточно большой импульс. Таким образом, в механизмах поглощения 1 – 5 мы часто имеем дело с комбинированным поглощением, в котором участвуют, как электроны и дырки, так и фононы.

Электронные переходы, соответствующие механизмам поглощения 1 – 5, изображены на рисунке 5.2. На рисунке электронные и дырочные переходы изображены в k -пространстве.

Собственное поглощение света показано переходами 1 и 1а. Переходы 1 идут без существенного изменения волнового вектора электронов, и поэтому такое поглощение получило название прямого собственного поглощения. Переходы 1а идут с существенным изменением волнового вектора электронов (это изменение в германии и кремнии должно составлять величину порядка размеров зоны Бриллюэна, т. е. $\Delta k \approx 10^8 \text{ см}^{-1}$), и поэтому такое поглощение получило название непрямого собственного поглощения. В непрямом собственном поглощении обязательно участвуют фононы. Из рассмотрения переходов 1 – 1а ясно, что собственное поглощение невоз-

можно при энергиях квантов $\hbar\omega_{\text{фотон}} < \Delta E_g$. Поэтому спектр собственного поглощения должен иметь спад, называемый краем собственного поглощения, в области частот фотонов $\omega \leq \Delta E_g/\hbar$.

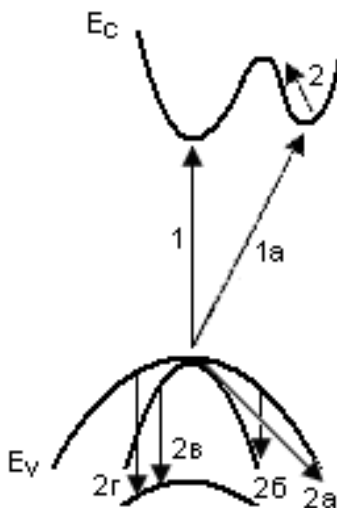


Рисунок 5.2 – Электронные переходы в k-пространстве при оптическом поглощении: 1 – прямое собственное поглощение; 1а – не прямое собственное поглощение; 2 и 2а – внутризонное поглощение свободными электронами и дырками; 2б, 2в и 2г – селективное поглощение свободными дырками

Переходы 2, 2а, 2б, 2в, 2г, показанные на рисунке 5.2, происходят при поглощении световой энергии свободными носителями заряда в разрешенных зонах. Внутризонные переходы 2 и 2а идут с изменением волнового вектора, что также требует участия фононов. Спектральная зависимость коэффициента поглощения для внутризонных переходов электронов и дырок имеет вид монотонной кривой и такое поглощение получило название неселективного (неизбирательного) поглощения свободными носителями. Селективное поглощение свободными носителями может идти без участия фононов и быть прямым. Исследования показывают, что вклад поглощения свободными носителями сильно возрастает в инфракрасной области спектра.

Собственное поглощение при прямых переходах

Если при поглощении полупроводником кванта излучения имеет место возбуждение электронов из валентной зоны в зону проводимости, то такое поглощение называют собственным или фундаментальным. При изучении собственного поглощения полупроводника следует учитывать строение его энергетических зон. Известные в настоящее время полупроводники в соответствии с конфигурацией энергетических зон можно разделить на два основных вида. У первого из них минимум энергии в зоне проводимости, характеризуемый волновым вектором \dot{k}_{min} , и максимум энергии в валентной зоне, определяемый волновым вектором \dot{k}_{max} , расположены в одной и той же точке зоны Бриллюэна (обычно в точке $\dot{k} = 0$). Другими словами, у этих полупроводников $\dot{k}_{min} = \dot{k}_{max}$ (рисунок 5.2). В качестве примера полупроводника с таким построением зон можно указать антимонид индия.

У второго вида веществ экстремумы зоны проводимости и валентной зоны находятся при различных \dot{k} , так что в этом случае $\dot{k}_{min} \neq \dot{k}_{max}$. К последнему типу веществ относится большинство полупроводников, в том числе германий и кремний.

Переходы электронов через запрещенную зону будут происходить прежде всего между энергетическими состояниями, соответствующими максимуму валентной зоны и минимуму зоны проводимости, т. е. при значениях квазиимпульса p или волнового вектора \dot{k} , близких к нулю, как это показано на рисунке 5.2.

При взаимодействии электронов с фотонами должны выполняться два закона: закон сохранения энергии и закон сохранения импульса. Если электрон до взаимодействия с фотоном, имеющим энергию $\hbar\omega$ и импульс $\hbar\dot{k}_\phi$, обладал энергией E и квазиимпульсом p , а после взаимодействия имел соответственно E' и p' , то эти законы запишутся в виде:

$$E' = E + \hbar\omega, \quad (5.17)$$

$$p' = p + \hbar\dot{k}'_\phi. \quad (5.18)$$

Импульс фотона $\hbar\dot{k}$ очень мал по сравнению с квазиимпульсом электрона, так как длина волны света λ_ϕ составляет $10^{-1} \div 10^{-5}$ см, а длина волны электрона в кристалле при энергии электрона, соответствующей 300 К, равна примерно $5 \cdot 10^{-7}$ см. В связи с этим импульсом фотона можно пренебречь, поэтому:

$$p' = p \quad (5.19)$$

$$k'' = k'. \quad (5.20)$$

Соотношение (5.19) или (5.20), называемое правилом отбора для электронных переходов, показывает, что в процессе взаимодействия электрона кристалла с полем излучения возможны только такие переходы, при которых волновой вектор электрона сохраняется. Эти переходы получили название вертикальных, или прямых, переходов.

Рассмотрим собственное поглощение при прямых межзонных переходах для полупроводника, у которого зона проводимости и валентная зона обладают сферической симметрией. Будем полагать, что валентная зона целиком занята электронами, а зона проводимости полностью свободна. Это условие справедливо для нелегированных полупроводников при $0 K$.

Согласно рисунку 5.2 каждому начальному состоянию E в валентной зоне при поглощении кванта света с энергией $\hbar\omega$ отвечает такое конечное состояние E' в зоне проводимости, что выполняется выражение (5.17).

В случае зон сферической симметрии:

$$E'_n = E_C + \frac{\hbar^2 k'^2}{2m_n^*}; \quad E'_p = E_V - \frac{\hbar^2 k'^2}{2m_p^*}, \quad (5.21)$$

поэтому:

$$\hbar\omega - \Delta E_g = \frac{\hbar^2 k'^2}{2m_n^*}, \quad (5.22)$$

где m^* – приведенная масса электрона или дырки, определяемая соотношением:

$$1/m^* = 1/m_n^* + 1/m_p^*. \quad (5.23)$$

Коэффициент поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ обратно пропорционален длине свободного пробега фотона l_ϕ , которая в свою очередь определяется скоростью движения фотона v_ϕ и временем его свободного пробега τ_ϕ . Следовательно:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{l}{l_\phi} = \frac{l}{v_\phi \tau_\phi} = g(\hbar\omega) \frac{n}{c}, \quad (5.24)$$

где $g(\hbar\omega) = 1/\tau_\phi$ – вероятность поглощения фотона в единицу времени;

$v_\phi = c/n$ – скорость движения фотона в веществе;

n – показатель преломления вещества (действительная часть показателя);
 c – скорость света в вакууме.

Количество поглощенных в единицу времени квантов света с энергией, лежащей в интервале от $\hbar\omega$ до $\hbar(\omega + d\omega)$, пропорционально вероятности перехода электронов $P(\hbar\omega)$, числу квантовых состояний в валентной зоне в интервале энергии $|dE|$:

$$g(\hbar\omega)d(\hbar\omega) = 2P(\hbar\omega)N(E)|dE|, \quad (5.25)$$

где коэффициент 2 учитывает два возможных направления поляризации света, N – плотность квантовых состояний в валентной зоне.

Поэтому:

$$g(\hbar\omega) = \frac{(2m^*)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} P(\hbar\omega) [\hbar\omega - \Delta E_g]^{1/2}. \quad (5.26)$$

Для прямых разрешенных переходов с сохранением квазиимпульса вероятность перехода $P(\hbar\omega)$ не зависит от энергии фотона. С учетом этого коэффициента собственного поглощения для прямых разрешенных переходов выражается формулой:

$$\begin{cases} \alpha = A(\hbar\omega - \Delta E_g)^{1/2}, & \hbar\omega > \Delta E_g, \\ \alpha = 0, & \hbar\omega < \Delta E_g \end{cases}, \quad (5.27)$$

где

$$A = \pi q^2 \frac{[2m_n^* m_p^* / (m_n^* + m_p^*)]^{3/2}}{\hbar^2 c m_n^* \varepsilon n}. \quad (5.28)$$

Соотношение (5.27) справедливо в ограниченном интервале изменения $(\hbar\omega - \Delta E_g)$. Как следует из рисунка 5.3, α^2 линейно зависит от $\hbar\omega$ в некотором интервале. Продолжение этой прямой до пересечения с осью абсцисс позволяет определить ширину запрещенной зоны ΔE_g для прямых разрешенных переходов.

Из (5.27) следует, что для прямых переходов не должно иметь место поглощение квантов с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны. В силу этого край собственного поглощения со стороны длинных волн (или малых энергий) должен быть очень резким.

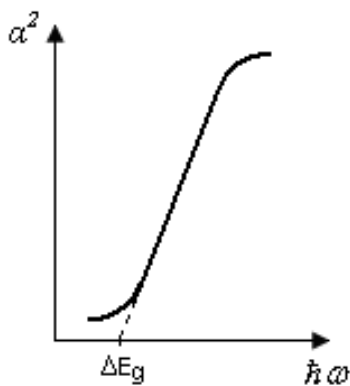


Рисунок 5.3 – Зависимость квадрата коэффициента поглощения при прямых разрешенных переходах

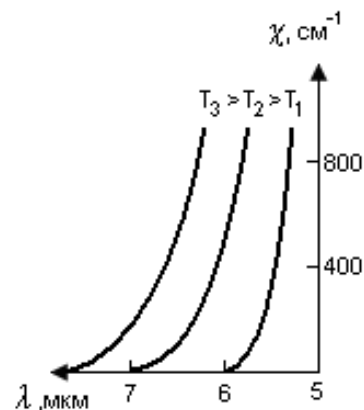


Рисунок 5.4 – Спектр собственного поглощения InS

Действительно, как следует из рисунка 5.4, у очень чистого монокристалла антимонида индия, имеющего непараболические зоны, наблюдается крутой рост поглощения.

Методика измерения собственного поглощения твердых тел

Коэффициент поглощения α рассчитывается по данным измерений прозрачности (коэффициента пропускания) образца:

$$T = (1 - R)^2 \frac{1 + (\lambda a / 4\pi n)^2}{\exp(\alpha d) - R^2 \exp(-\alpha d)}, \quad (5.29)$$

где n – показатель преломления материала, d – толщина пленки.

В области прозрачности от $(1-R)/(1+R)$ до 10% для пропускания получается более простая формула:

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (5.30)$$

Когда $T < 10\%$, формула приобретает вид:

$$T = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d), \quad (5.31)$$

откуда:

$$\alpha = \frac{1}{d} \text{Ln} \left(\frac{(1 - R)^2}{T} \right). \quad (5.32)$$

Для определения типа оптических переходов и ширины запрещенной зоны необходимо построить зависимость $\alpha^{1/2} = f(\hbar\omega)$ и $\alpha^2 = f(\hbar\omega)$. Спрямление одной из этих зависимостей укажет на тип оптического перехода, а экстраполяция прямой к $\alpha=0$ даст величину ΔE_g . Объектами исследований являются монокристаллы GaAs и Si. Измерения проводятся на спектрометре USB2000.

3. Экспериментальная установка USB2000

Для выполнения данной работы используется спектрометр USB2000 (рисунок 5.5).

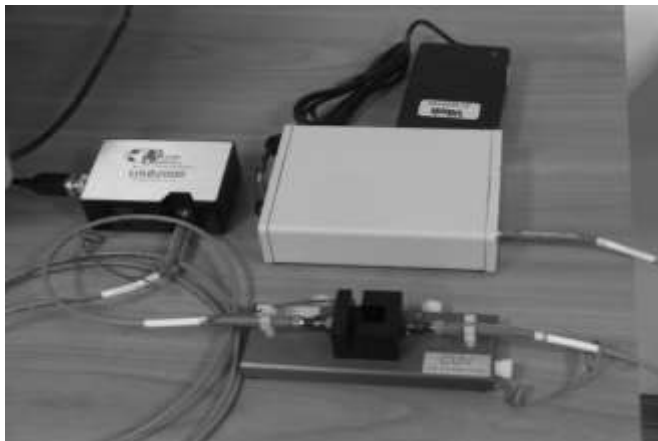


Рисунок 5.5 – Спектрометр USB2000

Спектрометр USB2000 служит для измерения коэффициента пропускания (T) исследуемого образца в зависимости от длины волны света (λ). Коэффициент пропускания измеряется в процентах и определяется следующим образом:

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \cdot 100\%, \quad (5.33)$$

где $I_0(\lambda)$ – интенсивность потока монохроматического излучения, падающего на измеряемый образец;

$I(\lambda)$ – интенсивность потока излучения, прошедшего через измеряемый образец.

Рассмотрим принцип действия спектрометра. В монохроматический поток излучения (получаемой в оптической части прибора) на данной длине волны λ поочередно вводятся контрольный и измеряемый образцы. За контрольный образец при-

нимается воздух и чистая кварцевая подложка (на такие же подложки нанесены исследуемые пленки). При этом считается, что коэффициент пропускания контрольного образца равен 100% . После введения контрольного образца, стрелка измерительного прибора устанавливается на 100% регулировкой ширины щели спектрометра. Далее в поток излучения вводится измеряемый образец, и стрелка прибора отклоняется пропорционально изменению светового потока. Величина коэффициента пропускания отсчитывается по шкале, отградуированной в процентах пропускания.

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Снять спектральную зависимость коэффициента пропускания $T(\lambda)$ для полупроводникового образца в диапазоне длин волн $320 - 900$ нм, причем в диапазоне $320 - 500$ нм с шагом 20 нм, а от $500 - 900$ нм с шагом 10 нм. Построить зависимость $T(\lambda)$.

2. По краю поглощения на спектральной зависимости $T(\lambda)$ оценить ширину запрещенной зоны полупроводника.

3. Найти спектральную зависимость коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ в диапазоне длин волн $350 - 700$ нм.

4. Построить зависимость $\alpha(\lambda)$ и экстраполируя линейную часть зависимости на ось длин волн по краю поглощения Урбаха, определить λ (граничная) поглощения и определить ширину запрещенной зоны полупроводника E_g .

5. Построить зависимость $\alpha^2(\lambda) = f(h\nu)$. Оценить наличие линейного участка и межзонного оптического перехода. Экстраполируя линейную зависимость на ось абсцисс при $\alpha^2(\lambda) = 0$ определить ширину запрещенной зоны полупроводника E_g .

6. Построить зависимость $\ln\alpha(\lambda)$ от $\ln(h\nu - E_g)$ и определить наклон линейной зависимости. По величине коэффициента наклона сделать вывод о разрешенном прямом или запрещенном оптическом переходе в полупроводнике.

5. Задание на работу

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

2. Тщательно изучить инструкции и порядок работы на спектрометре USB2000.

3. Используя спектрометр USB2000, провести измерения зависимостей $T = f(\lambda)$ для образцов полупроводников.

4. Построить зависимости $(\alpha\hbar\omega)^{1/2} = f(\hbar\omega)$.

5. Из полученных графиков определить оптическую ширину запрещенной зоны (E_g) исследуемых образцов.

6. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

6. Контрольные вопросы

1. В чем состоит закон Бугера-Ламберта?

2. Каков физический смысл коэффициента поглощения?

3. Виды оптического поглощения в полупроводниках.

4. Прямые переходы. Диаграмма взаимодействия и законы сохранения для прямых переходов.

5. Непрямые переходы. Диаграмма взаимодействия и законы сохранения для непрямых переходов.

6. Форма края собственного поглощения при прямых переходах.

7. Форма края собственного поглощения при непрямых переходах.

8. Как влияют экситоны на спектр поглощения полупроводника при непрямых переходах?

9. Как определить тип оптических переходов в полупроводнике?

10. Как из измерений пропускания рассчитать коэффициент поглощения?

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется в электронном виде согласно требованиям ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

2. Содержание отчета

Обязательными элементами отчета являются:

1) титульный лист, содержащий название вуза, кафедры, название и номер лабораторной работы, наименование дисциплины, по которой выполнена работа, № группы и ФИО студентов, входящих в подгруппу, дату исполнения, ФИО преподавателя, год;

2) основная часть, к которой относятся цель работы, лабораторное задание, полученные по работе результаты, оформляемые в табличном, графическом или другом виде, ответы на контрольные вопросы;

3) выводы по результатам работы, которые являются важной частью отчета и подлежат защите.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Основная литература

1. Физика конденсированного состояния: учебное пособие для вузов / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 294 с.

2. Дополнительная литература

1. Смирнов С. В. Физика твердого тела: учебное пособие. – Томск, ТГУ, 2003. – 276 с.

2. Физика твердого тела. Под редакцией Верещагина И. К. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с.

3. Протасов Ю. С., Чувашев С. Н. Твердотельная электроника. – Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с.

4. Чупрунов Е. В. Кристаллография: Учебник для вузов / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фадеев. – М.: Физматлит, 2000. – 496 с.

5. Гуртов В. А., Осауленко Р. Н. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / ред.: Л. А. Алешина. – М.: Техносфера, 2007. – 518 с.

6. Павлов П. В. Физика твердого тела: Учебник для вузов / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2000. – 496 с.