

№ 2306

И.М. Анфимов
С.П. Кобелева
И.В. Щемеров

Физика конденсированного состояния

Электронная структура твердых тел

Лабораторный практикум

№ 2306

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра полупроводниковой электроники
и физики полупроводников

И.М. Анфимов
С.П. Кобелева
И.В. Щемеров

Физика конденсированного состояния

Электронная структура твердых тел

Лабораторный практикум



Москва 2014

УДК 621.315
А73

Рецензенты:
канд. физ.-мат. наук *М.Д. Малинкович*;
д-р физ.-мат. наук, проф. *А.М. Глезер*
(ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)

Анфимов, И.М.

А73 Физика конденсированного состояния : электронная структура твердых тел : лаб. практикум / И.М. Анфимов, С.П. Кобелева, И.В. Щемеров. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2014. – 76 с.
ISBN 978-5-87623-724-8

В лабораторном практикуме рассматриваются методы измерения удельного электросопротивления, типа электропроводности, концентрации и подвижности свободных носителей заряда. Анализируются методы управления этими параметрами на основе зонной теории электронного строения кристаллических твердых тел и квантовой статистики.

Предназначен для студентов металлургических специальностей по курсу «Физика конденсированного состояния» («Электронная структура твердых тел»).

УДК 621.315

ISBN 978-5-87623-724-8

© И.М. Анфимов,
С.П. Кобелева,
И.В. Щемеров,
2014

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1. Измерение удельного электрического сопротивления полупроводников двухзондовым методом	4
Лабораторная работа 2. Измерение удельного электрического сопротивления полупроводниковых материалов четырехзондовым методом с линейным расположением зондов	19
Лабораторная работа 3. Измерение параметров полупроводника по эффекту Холла	41
Лабораторная работа 4. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда по спаду фотопроводимости бесконтактным СВЧ методом	59

Лабораторная работа 1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДВУХЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ

(4 часа)

1.1. Цель работы

Определение распределения удельного сопротивления по длине образца двухзондовым методом. Измерения проводятся при комнатной температуре.

1.2. Теоретическое введение

Характеристика удельного электрического сопротивления полупроводников

Фундаментальным экспериментальным законом, устанавливающим связь приложенного к проводящему образцу напряжения U с протекающим в результате этого током I , является экспериментальный закон Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.1)$$

где R – электросопротивление; является константой для данного образца.

Электросопротивление R зависит от геометрической формы и размеров образца и характеристики материала – удельного электросопротивления ρ . Для однородного образца правильной геометрической формы длиной L и площадью поперечного сечения S

$$R = \rho \frac{L}{S}. \quad (1.2)$$

Выражая для этого случая интегральные характеристики U и I через дифференциальные j (плотность тока) и E (напряженность электрического поля), получаем закон Ома в дифференциальной форме:

$$j = \frac{I}{S}; \quad (1.3)$$

$$E = \frac{U}{L}; \quad (1.4)$$

$$j = \frac{E}{\rho} = \sigma E, \quad (1.5)$$

где σ – удельная электропроводность вещества.

В свою очередь, σ определяется концентрацией свободных носителей зарядов (СНЗ) n и их подвижностью μ :

$$\sigma = en\mu; \quad (1.6)$$

$$\mu = \frac{v_{др}}{E}, \quad (1.7)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $v_{др}$ – средняя дрейфовая скорость движения электрона под действием электрического поля.

Существует два класса кристаллических материалов, поведение σ в которых существенно отличается: проводники (этот класс называется также металлами) и полупроводники. В металлах σ – константа, которая приводится в справочных материалах, в полупроводниках σ зависит от примесного состава, кристаллического совершенства материала и внешних факторов – освещения, радиации, влажности и др. Эти материалы имеют также совершенно разный характер температурной зависимости этого параметра. Формула (1.6) описывает электропроводность металлов, в которых свободными носителями зарядов являются электроны. В полупроводниках существует два типа СНЗ: электроны с концентрацией n и дырки с концентрацией p , поэтому электропроводность полупроводников описывается формулой

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p. \quad (1.8)$$

Концентрация свободных носителей заряда

Основой для понимания физических процессов в твердом теле, в частности электрических явлений, является зонная теория электронных спектров, базирующаяся на квантовомеханических представ-

лениях. Концентрация свободных электронов – это концентрация занятых квантовомеханических состояний в зоне проводимости, а концентрация дырок – концентрация незаполненных состояний в валентной зоне. При температуре 0 К в полупроводнике свободных носителей заряда нет, в то время как концентрация электронов в металле практически не зависит от температуры и составляет величину порядка концентрации атомов металла в единице объема ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$). В полупроводниковых материалах СНЗ появляются за счет термической генерации (за счет энергии кристаллической решетки):

1) перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости (в этом случае создаются одинаковые концентрации электронов и дырок $n = p = n_i$);

2) перехода электронов из валентной зоны на уровень акцепторной примеси E_a , при этом создаются свободные дырки;

3) перехода электронов с уровня донорной примеси E_d в зону проводимости (создаются свободные электроны).

Верхний предел концентрации СНЗ при комнатной температуре в полупроводниках определяется пределом растворимости легирующих примесей ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$), нижний предел определяется собственной концентрацией СНЗ (n_i).

Важнейшим параметром проводящего материала, однозначно связанным с концентрацией неравновесных носителей заряда (ННЗ), является уровень Ферми F . Для невырожденного материала

$$n = N_c \exp\left(\frac{-(E_c - F)}{kT}\right), p = N_v \exp\left(\frac{-(F - E_v)}{kT}\right), \quad (1.9)$$

где k – константа Больцмана; N_c (N_v) – плотность состояний на дне зоны проводимости (потолке валентной зоны), зависящая от температуры и эффективной массы соответствующих СНЗ:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_{dn}^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 4,82 \cdot 10^{15} \left(\frac{m_{dn}^*}{m} \right)^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}} = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_{dn}^*}{m} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}};$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_{dp}^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 4,82 \cdot 10^{15} \left(\frac{m_{dp}^*}{m} \right)^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}} = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_{dp}^*}{m} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1.10)$$

где m_{dn}^* – эффективная масса плотности состояний электронов;

m_{dp}^* – эффективная масса плотности состояний дырок.