

Министерство образования РФ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

---

**Компьютерное моделирование  
физических свойств  
материалов микроэлектроники**

Методические указания  
к лабораторным работам

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2002

УДК 539.2(076)

Компьютерное моделирование физических свойств материалов микроэлектроники: Методические указания к лабораторным работам / Сост.: М. Ф. Ситникова, К. А. Титков. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 24 с.

Изложены основы анализа физических явлений, используемых в микроэлектронике. Лабораторные работы по курсу "Физические основы микроэлектроники" проводятся методом моделирования физических явлений с помощью программы MCAD.

Предназначены для студентов ФРТ и ОФ, обучающихся по специальности 200800.

Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний

© СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2002

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

**Цель работы:** исследование статистических свойств собственных нормальных колебаний решетки (фононных состояний); изучение функции плотности фононных состояний (мод нормальных колебаний решетки); исследование температурной зависимости теплоемкости решетки.

#### Содержание работы

В работе исследуется температурная зависимость теплоемкости решетки по приближенной теории Дебая.

Теплоемкость при постоянном объеме представляет собой термодинамическую величину, определяемую выражением:

$$C_V = \left. \frac{\partial \bar{E}}{\partial T} \right|_{V=\text{const}},$$

где  $\bar{E}$  – средняя энергия системы.

Нормальные колебания решетки являются независимыми, если для данного твердого тела справедливо гармоническое приближение и можно считать применимым закон Гука. Энергия колебаний решетки является квантованной величиной. Квант энергии упругой волны называется фононом.

Средняя энергия системы фононов при заданной температуре может быть определена исходя из общих соотношений для квантовых статистических систем:

$$\bar{E} = 3 \cdot \int_0^{\omega_D} f(\omega) \cdot D(\omega) \cdot \hbar \omega \, d\omega,$$
$$f(\omega) = \frac{1}{\left( \exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1 \right)},$$

где  $f(\omega)$  – функция распределения Планка;  $D(\omega)$  – плотность мод нормальных колебаний (число мод на единичный интервал частот);  $\hbar \omega$  – энергия фонона;

$\hbar$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана. Множитель 3 связан с учетом трех возможных типов поляризации фононов.

В континуальном (дебаевском) приближении скорость звука считается постоянной. Плотность  $D(\omega)$  мод каждого типа поляризации для кубического кристалла на единицу объема в рассматриваемом приближении определяется выражением:

$$D(\omega) = \frac{\omega^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot v^3},$$

где  $v$  – скорость звука.

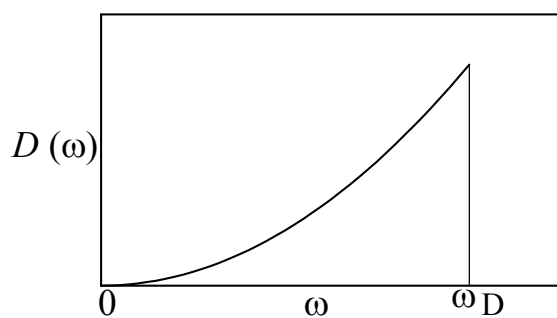


Рис. 1.1

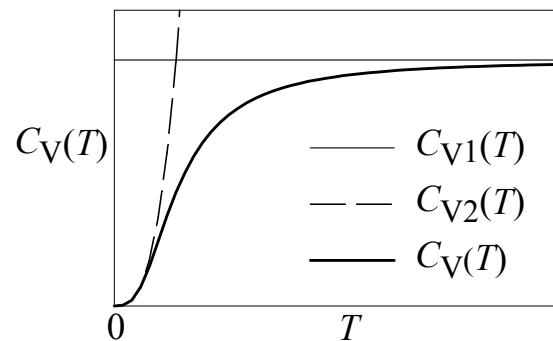


Рис. 1.2

Максимальная (дебаевская) частота, на которой обрывается непрерывный спектр (рис. 1.1), связана с параметром решетки  $a$  и определяется соотношением:

$$\omega_D = \frac{\pi \cdot v}{a}.$$

Выражение для теплоемкости кристаллической решетки определяется следующим интегралом (для одного моля):

$$C_V = 9 \cdot R \cdot \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \cdot \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx, \quad x = \frac{\hbar \cdot \omega_D}{k \cdot T},$$

где  $R = N_A k$  – универсальная газовая постоянная;  $N_A$  – постоянная Авогадро;  $\Theta_D$  – температура Дебая:

$$\Theta_D = \frac{\hbar \cdot \omega_D}{k}.$$

Приведенные далее соотношения позволяют определить теплоемкость кристаллической решетки в двух предельных случаях:  $T \gg \Theta_D$  и  $T \ll \Theta_D$  соответственно (рис. 1.2):

$$C_{V1} = 3 \cdot R; \quad (1.1)$$

$$C_{V2} = \frac{12}{5} \pi^4 \cdot R \cdot \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3. \quad (1.2)$$

### **Задания на лабораторную работу**

1. Оцените влияние скорости звука на плотность мод нормальных колебаний.
2. Проанализируйте изменение дебаевской частоты в зависимости от изменения скорости звука и параметра  $a$  кристаллической решетки.
3. Изучите вид температурной зависимости теплоемкости решетки. Исследуйте на нескольких примерах влияние температуры Дебая на данную зависимость.

### **Контрольные вопросы**

1. Основываясь на материалах лекционного курса и результатах проделанной работы, объясните наблюдаемый вид зависимости  $D(\omega)$  в дебаевском приближении.
2. Ответьте, как и почему влияет изменение скорости звука и параметра кристаллической решетки  $a$  на величины  $\omega_D$  и  $\Theta_D$ ?
3. Объясните, как изменятся скорость звука и  $\omega_D$  в анизотропном кристалле.
4. Практически оцените значение температуры и границы её диапазонов, в пределах которых возможно применение приближенных формул (1.1) и (1.2). Дайте простое физическое объяснение наблюдаемому виду зависимости  $C_V(T)$  в этих диапазонах.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

**Цель работы:** исследование статистических свойств электронного газа в твердых телах, выбор и использование необходимой для заданных условий статистики при описании свойств электронов в твердых телах.

#### Содержание работы

В работе исследуется температурная зависимость функции распределения и связанное с этим изменение распределения носителей заряда по энергии в твердом теле.

Для характеристики состояния большого числа частиц в твердом теле используют классические и квантовые статистические распределения, которые позволяют рассчитать основные макроскопические наблюдаемые свойства твердого тела.

Состояние электронного газа в твердом теле может быть вырожденным, т. е. описываться распределением Ферми–Дирака

$$f(E_n) = \frac{1}{\left( \exp\left( \frac{E_n - E_F(T)}{kT} \right) + 1 \right)},$$

или невырожденным и описываться распределением Больцмана

$$f(E_n) = A \cdot \exp\left( -\frac{E_n}{kT} \right),$$

где  $f(E_n)$  - среднее число частиц в состоянии с энергией  $E_n$  при температуре  $T$ ;  $E_F(T)$  - энергия Ферми;  $k$  - постоянная Больцмана.

Функция распределения Ферми–Дирака описывает вероятность того, что в состоянии теплового равновесия при температуре  $T$  состояние с энергией  $E_n$  занято фермионом, т. е. частицей с полуцелым спином (в единицах  $\hbar = h/2\pi$ ). Фермионы подчиняются принципу Паули, и в данном квантовом состоянии системы фермионов не может находиться более одной

частицы. На рис. 2.1 показана функция Ферми-Дирака для различных температур.

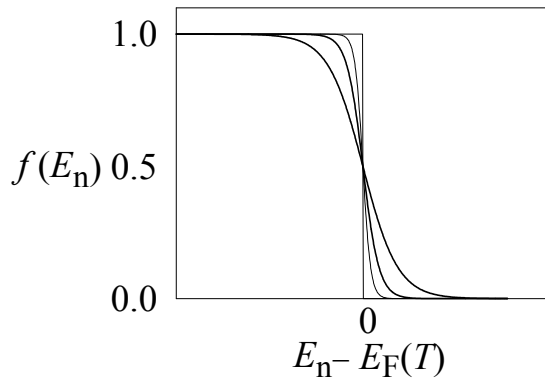


Рис. 2.1

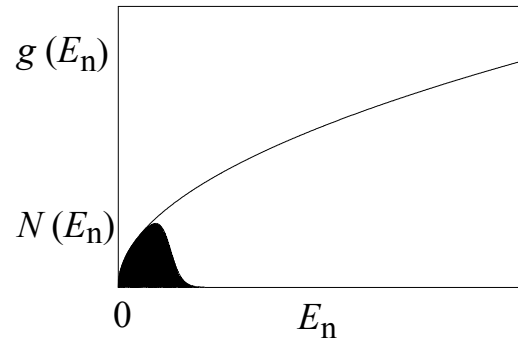


Рис. 2.2

Для вырожденного электронного газа зависимость  $E_F(T)$  описывается следующим образом:

$$E_F(T) = E_{F0} \cdot \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{k \cdot T}{E_{F0}} \right)^2 \right],$$

для невырожденного:

$$E_F(T) = k \cdot T \cdot \ln \left[ \frac{h^3 \cdot n_0}{2(2 \cdot m'' \cdot \pi \cdot k \cdot T)^{1.5}} \right],$$

где  $n_0$  - концентрация носителей заряда;  $m''$  - эффективная масса носителей заряда;  $E_{F0}$  - энергия Ферми при  $T = 0$  К.

Функция распределения Ферми-Дирака определяется следующим образом:

$$f(E_n) = \frac{\Delta N(E_n)}{\Delta g_n},$$

где  $\Delta N(E_n)$  - число частиц с энергией в интервале от  $E_n$  до  $E_n + \Delta E_n$ ;  $\Delta g_n$  - число квантовых состояний в этом интервале энергий (рис. 2.2).

Величина  $E_F$  является функцией температуры; для электронного газа в твердом теле величина  $E_F$  в каждой конкретной задаче определяется из условия постоянства полного числа электронов в системе или в общем случае из условия электронейтральности.

Для оценки степени вырождения электронного газа используется критерий вырождения  $E_F > kT$ , при котором электронный газ вырожден. При

условии  $E_F \ll kT$  в квантовой функции распределения Ферми-Дирака можно пренебречь единицей в знаменателе, и эта функция переходит в классическую функцию распределения Больцмана

### **Задания на лабораторную работу**

1. Оцените степень вырождения электронного газа для заданных параметров твердого тела.

2. Проанализируйте изменение функции распределения Ферми-Дирака при различных температурах ( $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ) и при неизменных значениях концентрации  $n_0$  и эффективной массы  $m^*$  носителей заряда, в том числе:

а) повторите п. 1 для каждого значения температуры;

б) определите изменение положения уровня Ферми при изменении температуры.

Температуру необходимо выбрать таким образом, чтобы обеспечить изучение как вырожденного, так и невырожденного электронного газа.

3. Исследуйте распределение носителей заряда по энергиям для различных температур ( $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ).

4. На 2-3 примерах исследуйте влияние параметров твердого тела на изменение функции распределения Ферми-Дирака и распределения носителей заряда по энергиям при фиксированной температуре.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем принципиально различаются функции распределения для вырожденного и невырожденного электронного газа?

2. Как влияет изменение температуры на положение уровня Ферми и вид функции распределения? (Параметры твердого тела фиксированы.) Дайте физическое объяснение этим процессам.

3. Как влияет изменение эффективной массы на положение уровня Ферми и вид функции распределения? (Температура фиксирована.) Объясните физический смысл эффективной массы.

4. Концентрации носителей заряда для двух тел равны, соответственно,  $n_0$  и  $8 \cdot n_0$ . При каком соотношении между эффективными массами положение



уровня Ферми в обоих телах будет одинаково?

5. В чем проявляется влияние изменения температуры на плотность занятых энергетических состояний носителей заряда?

### **Лабораторная работа № 3**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ**

**Цель работы:** исследование зависимости электропроводности и теплопроводности металлов от температуры и частоты.

### **Содержание работы**

В работе исследуются два механизма рассеяния электронов в металле и связанная с ними температурная зависимость электро- и теплопроводности металлов, а также зависимость электропроводности от частоты переменного электрического поля.

Электропроводность при заданной концентрации электронов  $n_0$  с эффективной массой  $m^*$  определяется выражением

$$\sigma = \frac{e^2 n_0 \tau}{m^*}, \quad (3.1)$$

где  $\tau$  - время свободного пробега электрона (время релаксации).

Процессы рассеяния электронов в твердом теле можно подразделить на несколько видов, из которых в данной работе рассматриваются два: рассеяние электронов на фононах и рассеяние электронов на дефектах.

Рассеяние электронов на фононах по-разному зависит от температуры. При высоких температурах  $T \gg \Theta_D$  (температура Дебая) процесс рассеяния носит упругий характер, и средняя длина свободного пробега  $\lambda(T)$  определяется простой приближенной формулой (рис. 3.1):

$$\lambda_1(T) = 50 \frac{T_{пл}}{T} a, \quad (3.2)$$

где  $T_{пл}$  - температура плавления,  $a$  - параметр решетки материала.

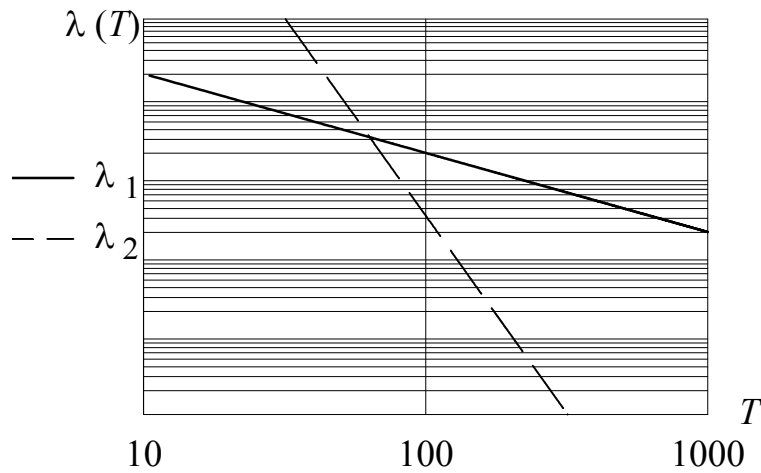


Рис. 3.1

При  $T \ll \Theta_D$  характер рассеяния становится неупругим и  $\lambda(T)$  имеет вид

$$\lambda_2(T) = 0.1 \frac{T_{\text{пл}}}{\Theta_D} a \left( \frac{\Theta_D}{T} \right)^5. \quad (3.3)$$

Соотношения (3.2), (3.3) позволяют приблизительно оценить длину свободного пробега, определяемую рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки. Время свободного пробега электронов в металле  $\tau_f(T)$ :

$$\tau_f(T) = \frac{\lambda(T)}{v_F}, \quad v_F = \frac{h^3 \sqrt{3\pi^2 n_0}}{2\pi m''},$$

где  $v_F$  - скорость Ферми,  $h$  - постоянная Планка.

Приведенные соотношения позволяют определить электропроводность металла в двух предельных случаях:  $T \gg \Theta_D$  и  $T \ll \Theta_D$ . Общее выражение для электропроводности, справедливое во всем температурном диапазоне, дается следующими соотношениями:

$$\sigma(T)^{-1} = \rho(T) = 4\Re \cdot \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^5 \mathcal{J}_5 \left( \frac{\Theta_D}{T} \right), \quad (3.4)$$

$$\mathcal{J}_5(x) = \int_0^x \frac{z^5 dz}{(e^z - 1)(1 - e^{-z})}, \quad (3.5)$$

где  $\Re$  - приведенное идеальное сопротивление, включающее в себя формулу Блоха, температурную зависимость идеального удивительной точностью.

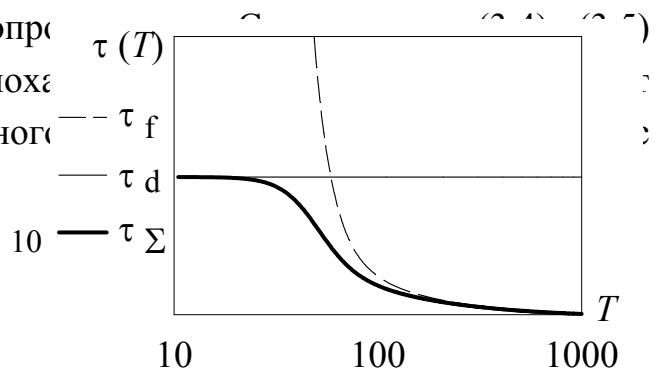


Рис. 3.2

Время релаксации при рассеянии электронов на дефектах структуры в металле  $\tau_d$  не зависит от температуры. Результирующее время релаксации  $\tau_\Sigma$  при учете обоих механизмов рассеяния определяется правилом Маттиссена (рис. 3.2):

$$\frac{1}{\tau_\Sigma(T)} = \frac{1}{\tau_f(T)} + \frac{1}{\tau_d}. \quad (3.6)$$

Теплопроводность  $k(T)$  металла может быть определена на основе закона Видемана-Франца, который справедлив при высоких температурах ( $T \gg \Theta_D$ ), а также при температурах столь низких, что рассеяние стационарными дефектами становится преобладающим:

$$\frac{k(T)}{\sigma(T)} = L_0 T; \quad L_0 = \frac{1}{3} \left( \frac{\pi k}{e} \right)^2, \quad (3.7)$$

где  $L_0$  - число Лоренца.

На рис. 3.3 представлены зависимости  $\sigma(T)$  и  $k(T)$  для металла различной степени очистки (стрелкой обозначен сдвиг кривых при увеличении концентрации дефектов в металле).

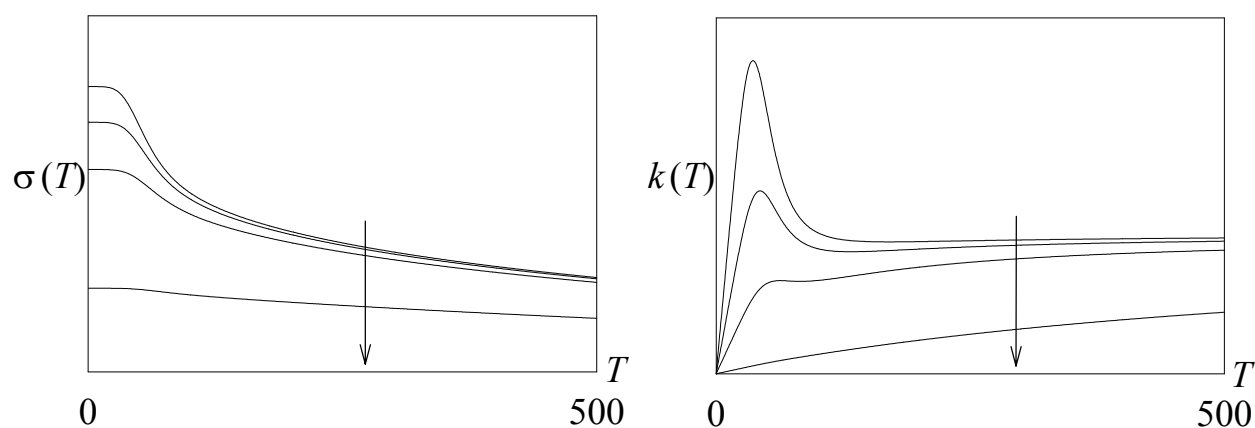


Рис. 3.3

Электропроводность твердых тел как функция частоты  $\omega$  переменного электрического поля определяется выражением

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma(0)}{1 + \omega^2 \tau^2},$$

где  $\sigma(0)$  определяется выражением (3.1).

## **Задания на лабораторную работу**

1. Исследуйте температурную зависимость длины свободного пробега в металле, обусловленную электрон-фононным рассеянием, для различных веществ.
2. На нескольких примерах проанализируйте влияние дефектов на результирующее время релаксации.
3. Исследуйте влияние различных механизмов рассеяния на электро- и теплопроводность металла.
4. Проанализируйте влияние изменения частоты переменного электрического поля на изменение электропроводности металла.

## **Контрольные вопросы**

1. Как влияют параметры  $T_{пл}$  и  $\Theta_D$  на изменение длины свободного пробега при изменении температуры?
2. Как влияет изменение эффективной массы на время релаксации для электрон-фононного рассеяния? Как вы можете объяснить данную зависимость?
3. Как изменяется результирующее время релаксации с ростом времени релаксации для рассеяния на дефектах? Объясните физический смысл правила Маттиссена.
4. Основываясь на (3.1), (3.6), (3.7), объясните наблюдаемый ход зависимостей электро- и теплопроводности металла от температуры. Оцените границы применимости рассчитанных зависимостей.
5. Как влияет степень очистки металла на вид зависимости электро- и теплопроводности металла от температуры?
6. При какой частоте переменного электрического поля электропроводность металлического образца уменьшается в два раза?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

**Цель работы:** исследование зависимости электропроводности пленок от толщины образца и параметра зернистости пленки.

#### Содержание работы

В работе исследуется зависимость электропроводности металлической пленки от толщины пленки и размера кристаллита.

При толщине металлической пленки, соизмеримой со средней длиной свободного пробега, границы пленки накладывают ограничение на движение электронов проводимости. Возникающие при этом физические эффекты называются классическими размерными эффектами. Различают зеркальное и диффузное отражение электронов от границ поверхности. Коэффициент зеркальности  $p$  определяется отношением зеркально отраженных электронов к полному числу электронов, падающих на поверхность.

Электропроводность тонкой пленки как функция толщины определяется следующим интегральным выражением:

$$\frac{\sigma_{\text{пл}}}{\sigma_{\text{беск}}} = \frac{\rho_{\text{беск}}}{\rho_{\text{пл}}} = 1 - \frac{3}{2\gamma}(1-p) \cdot \int_1^{\infty} \left( \frac{1}{a^3} - \frac{1}{a^5} \right) \frac{1 - e^{-\gamma a}}{1 - p \cdot e^{-\gamma a}} da.$$

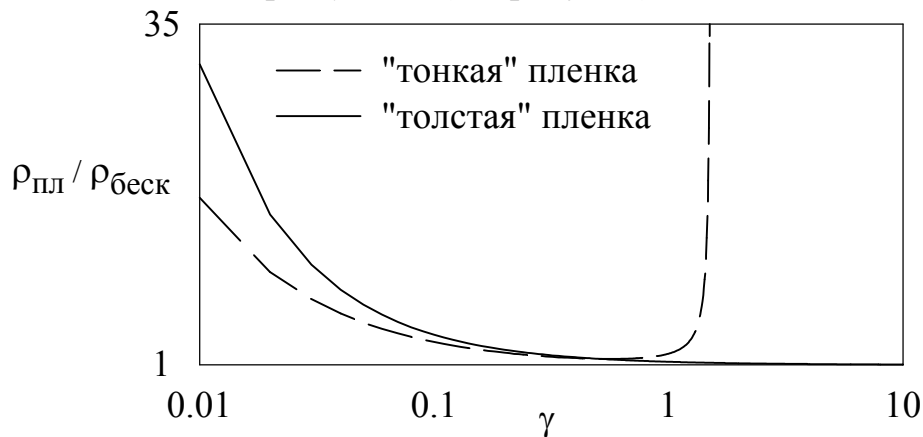
На практике для расчета электропроводности как функции толщины используют выражения

$$\frac{\sigma_{\text{беск}}}{\sigma_{\text{пл}}} = \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{беск}}} = 1 + \frac{3}{8\gamma}(1-p), \quad \gamma > 1, p < 1;$$

$$\frac{\sigma_{\text{беск}}}{\sigma_{\text{пл}}} = \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{беск}}} = \frac{4}{3\gamma(0.423 - \ln(\gamma))} \frac{(1-p)}{(1+p)}, \quad \gamma \ll 1, p < 1,$$

где  $\sigma_{\text{пл}}$  и  $\sigma_{\text{беск}}$  - электропроводности пленки и объемного образца соответственно;  $\rho_{\text{пл}}$  и  $\rho_{\text{беск}}$  - удельные сопротивления пленки и объемного образца соответственно;  $\gamma$  - отношение толщины образца  $d$  к средней длине свободного пробега в объемном образце  $\lambda$ . При  $p = 0$  размерных эффектов

нет. Отметим, что последнее из приведенных соотношений справедливо лишь для малых значений  $p$  и  $\gamma < 0.1$  (см. рисунок).



Зернистость пленки является причиной изменения её электропроводности. Для зернистых пленок влияние размеров зерна (кристаллита)  $D$  на сопротивление пленки дается выражением

$$\frac{\rho_{\text{беск}}}{\rho_{\text{пов}}} = 3 \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{2} \alpha + \alpha^2 - \alpha^3 \ln \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right),$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий степень зернистости пленки:

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} \frac{p}{1-p}.$$

### Задания на лабораторную работу

1. Исследуйте на нескольких примерах влияние зеркальности поверхности пленки на электропроводность. В том числе рассмотрите случаи полностью зеркального и полностью диффузного отражений. Случаи "толстой" и "тонкой" пленок рассмотреть отдельно.

2. На 2-3 примерах исследуйте влияние размеров кристаллита  $D$  на сопротивление пленки при фиксированном значении зеркальности поверхности.

3. При фиксированном значении размера кристаллита  $D$  исследуйте на нескольких примерах влияние зеркальности поверхности на электропроводность.

## Контрольные вопросы

1. Как можно определить границы применимости моделей "толстой" и "тонкой" пленок?
2. Как влияет зеркальность поверхности на электропроводность пленки? Дайте физическое объяснение этой зависимости.
3. Как влияет размер кристаллита  $D$  на сопротивление пленки? (Длина свободного пробега фиксирована.) Как можно объяснить данную зависимость?
4. При постоянном размере кристаллита  $D$  у пленок различная зеркальность поверхности  $p$ . Какой характер имеет при этом зависимость сопротивления от зеркальности  $p$ ? Почему?

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Цель работы:** исследование температурной зависимости концентрации носителей заряда в полупроводниках; исследование электропроводности полупроводников.

### Содержание работы

В работе исследуются температурные зависимости энергии Ферми в собственном полупроводнике, концентрации носителей заряда в собственном и примесном (донорном) полупроводниках и связанное с этим изменение электропроводности полупроводников.

Температурная зависимость положения уровня Ферми может быть найдена из решения уравнения электронейтральности с использованием выражений для концентрации носителей заряда в твердом теле. Для собственного невырожденного полупроводника эта зависимость имеет вид

$$E_F(T) = \frac{1}{2} E_G + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p''}{m_n''}\right), \quad (5.1)$$

где  $E_F(T)$  - энергия Ферми при температуре  $T$ ;  $E_G$  - ширина запрещенной зоны;  $k$  - постоянная Больцмана;  $m''_p$ ,  $m''_n$  - эффективные массы дырок и электронов соответственно.

Концентрации электронов  $n(T)$  и дырок  $p(T)$  при температуре  $T$  в собственном невырожденном полупроводнике определяются выражениями:

$$n_0(T) = 2 \left( \frac{2\pi m''_n kT}{h^2} \right)^{1.5} \exp \left( \frac{E_F(T) - E_G}{kT} \right); \quad (5.2)$$

$$p_0(T) = 2 \left( \frac{2\pi m''_p kT}{h^2} \right)^{1.5} \exp \left( -\frac{E_F(T)}{kT} \right), \quad (5.3)$$

где  $h$  - постоянная Планка.

Для примесного (донорного) полупроводника концентрация электронов в области примесной проводимости  $n_d(T)$  дается выражением:

$$n_d(T) = \frac{2N_d}{1 + \sqrt{1 + \left( 8N_d / 2 \left( \frac{2\pi m''_p kT}{h^2} \right)^{1.5} \right) \cdot e^{\frac{E_g}{kT}}}},$$

где  $N_d$  - концентрация донорной примеси;  $E_g$  - энергия активации примеси.

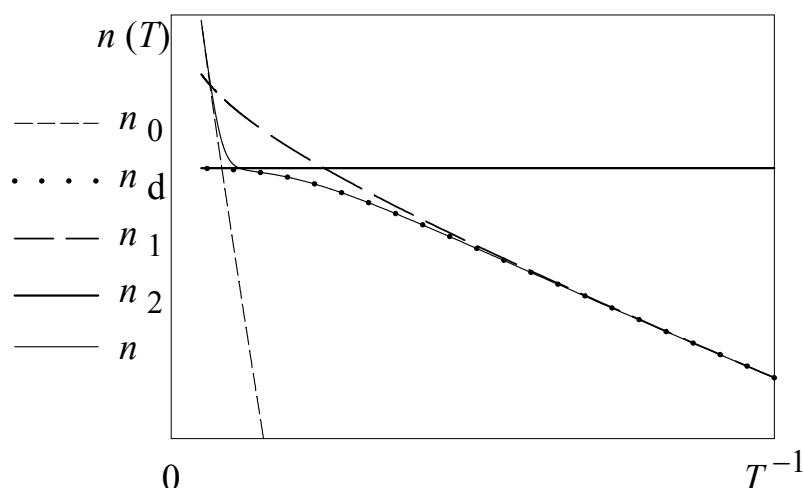
Справедливы следующие аппроксимационные формулы:

$$n_1(T) = \sqrt{\frac{1}{2} N_d \left( \frac{2\pi m''_n kT}{h^2} \right)^{1.5}} \cdot e^{\frac{-E_g}{2kT}}; \quad (5.4)$$

$$n_2(T) = N_d. \quad (5.5)$$

Выражение (5.4) справедливо в области возрастания примесной электропроводности, (5.5) - в области истощения примеси. На рисунке в логарифмическом масштабе приведены представленные ранее зависимости, а также температурная зависимость полной концентрации электронов для донорного полупроводника.





Электропроводность полупроводников с концентрацией электронов  $n(T)$  и дырок  $p(T)$  и с подвижностью электронов и дырок, соответственно,  $\mu_n(T)$  и  $\mu_p(T)$  определяется как  $\sigma(T) = en(T)\mu_n(T) + ep(T)\mu_p(T)$ .

Аппроксимационные зависимости  $\mu_n(T)$  и  $\mu_p(T)$  имеют вид

$$\mu_n(T) \cong 13 \cdot 10^{-2} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2};$$

$$\mu_p(T) \cong 5 \cdot 10^{-2} \left( \frac{T}{300} \right)^{-2.7}.$$

### Задания на лабораторную работу

1. Проанализируйте изменение энергии Ферми в собственном полупроводнике при нескольких соотношениях эффективных масс электронов и дырок.

2. Исследуйте зависимость концентрации носителей заряда от температуры в собственном полупроводнике для полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

3. На нескольких примерах исследуйте влияние примеси на температурную зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике.

4. На 2-3 примерах исследуйте зависимость электропроводности примесного (донорного) полупроводника от температуры.

## Контрольные вопросы

1. При каком соотношении эффективных масс электронов и дырок положение уровня Ферми в собственном полупроводнике не зависит от температуры?

2. Каким образом влияет изменение ширины запрещенной зоны на концентрацию носителей заряда в собственном полупроводнике для одной и той же температуры? Дайте физическое объяснение этой зависимости.

3. Как, используя выражения (5.1) - (5.3), доказать справедливость следующего соотношения:

$$n(T) = p(T) = 2 \left( \frac{2\pi kT}{2h} \right)^{1.5} \cdot (m_n'' m_p'')^{1.5} e^{-\frac{E_G}{2kT}} ?$$

4. Как влияет изменение концентрации примеси на концентрацию носителей заряда в полупроводнике? (Энергия активации примеси фиксирована.) Объясните причины этой зависимости.

5. Каким образом влияет изменение энергии активации примеси на концентрацию носителей заряда в полупроводнике? (Концентрация примеси фиксирована.)

6. Объясните физический смысл подвижности электронов и дырок?

## Лабораторная работа № 6

### ИЗУЧЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПЛАНАРНОЙ МИКРОСТРУКТУРЕ

**Цель работы:** изучение теоретических вольт-амперных характеристик (ВАХ) контакта металл-полупроводник и контакта электронного и дырочного полупроводников.

### Содержание работы

В работе изучаются ВАХ контакта металл-полупроводник и контакта электронного и дырочного полупроводников.

Теоретическая вольт-амперная характеристика контакта металл-полупроводник и контакта электронного и дырочного полупроводников имеет вид (см. рисунок):

$$j(U) = j_S \cdot \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right),$$

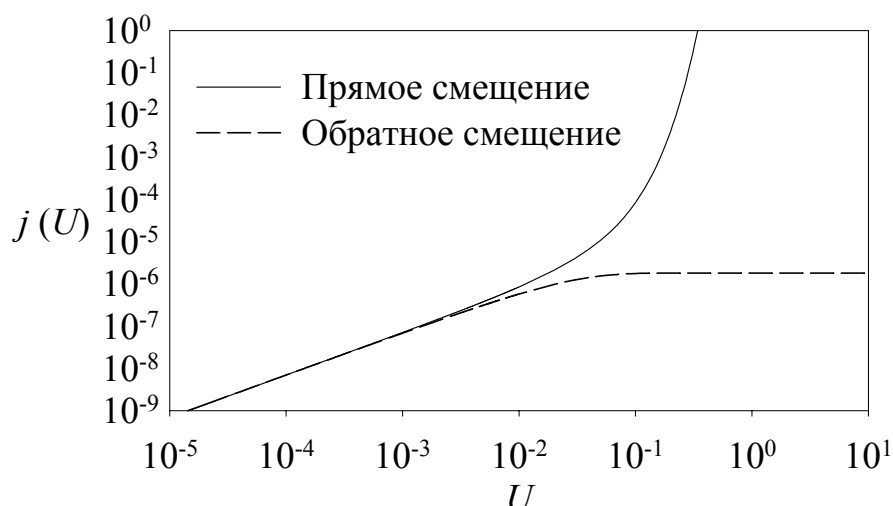
где  $e$  - заряд электрон;  $j_S$  - плотность тока насыщения. Для контакта металл-полупроводник - плотность тока насыщения можно представить в виде

$$j_S = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}, \quad A = \frac{4\pi e m_e k^2}{h^3}$$

где  $\phi$  - контактная разность потенциалов,  $m_e$  - масса электрона.

Для контакта электронного и дырочного полупроводников плотность тока насыщения можно представить в виде

$$j_S = 4 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \cdot (m''_n m''_p)^{1.5} e^{-\frac{E_G}{kT}} \cdot \left( N_a^{-1} \sqrt{\frac{D_n(T)}{\tau_n}} + N_d^{-1} \sqrt{\frac{D_p(T)}{\tau_p}} \right),$$



где  $E_G$  - ширина запрещенной зоны;  $m''_p$ ,  $m''_n$  - эффективные массы дырок и электронов соответственно;  $N_d$ ,  $N_a$  - концентрация донорной и акцепторной примеси соответственно;  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  - время жизни неосновных носителей заряда;  $D_n(T)$ ,  $D_p(T)$  - коэффициенты диффузии электронов и дырок, которые

определяются через подвижность соответствующих носителей заряда  $\mu_n$  и  $\mu_p$  из соотношения Эйнштейна:

$$D_n = \frac{\mu_n}{e} kT, \quad D_p = \frac{\mu_p}{e} kT.$$

### **Задания на лабораторную работу**

1. Проанализируйте ВАХ контакта металл–полупроводник и контакта электронного и дырочного полупроводников. Сравните характеристики.

2. Исследуйте влияние контактной разности потенциалов на ВАХ контакта металл – полупроводник.

3. Для контакта электронного и дырочного полупроводников исследуйте влияние на ВАХ следующих параметров:

- а) концентрации донорной и акцепторной примесей;
- б) подвижности носителей заряда;
- в) времени жизни неосновных носителей заряда;
- г) ширины запрещенной зоны.

4. Для исследуемых типов контактов оцените влияние температуры на вид ВАХ и на плотность тока насыщения.

### **Контрольные вопросы**

1. Основываясь на материалах лекционного курса и результатах проделанной работы, объясните физический смысл плотности тока насыщения.

2. Чем принципиально различаются ВАХ для контакта металл-полупроводник и контакта электронного и дырочного полупроводников?

3. Как влияет изменение температуры на плотность тока насыщения? На какое значение должна измениться начальная температура контакта ( $T=300$  К), чтобы плотность тока насыщения возросла (уменьшилась) на порядок? (Прочие величины считать постоянными.)

4. Как влияют указанные в п. 3 задания параметры электронного и дырочного полупроводников на плотность тока насыщения? На какие значения должны

быть изменены начальные значения параметров, чтобы величина плотности тока насыщения возросла (уменьшилась):

- а) в 2 раза;
- б) на порядок?

### **Список рекомендуемой литературы**

- Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1979.
- Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. - М.: Наука, 1978.
- Горбачев В. В., Спицина Л. Г. Физика полупроводников и металлов. - М.: Металлургия, 1981.
- Шалимова К. В. Физика полупроводников. - М.: Энергия, 1976.
- Фистуль В. И. Введение в физику полупроводников. - М.: Высш. шк., 1975.
- Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. - М.: Мир, 1971.
- Ансельм А. И. Основы статистической физики и термодинамики. - М.: Наука, 1973.
- Исихара А. Статистическая физика. - М.: Мир, 1973.
- Чопра К. Л. Электрические явления в тонких пленках. - М.: Мир, 1972.
- Вендик О. Г., Вендик И. Б. Электроника твердого тела / ЛЭТИ. Л., 1975.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Фундаментальные постоянные

/		
1	$e$	$1.60219 \cdot 10^{-19}$
2	$-$ ( )	$1.60219 \cdot 10^{-19}$
3	$m_e$	$9.109534 \cdot 10^{-31}$
4	$h$	$6.626176 \cdot 10^{-34}$ .
5	$N_A$	$6.022045 \cdot 10^{23}$ -1
6	$k$	$1.3806 \cdot 10^{-23}$ /
7	$R$	$8.314$ /( . )

### Некоторые свойства элементов

		$\text{Å}$	$\text{°C}$		
			( D)	( $T_F \cdot 10^{-4}$ )	( $T$ )
Na	22.9	4.23	158	3.75	371
C	12.011	3.57	2230	—	4300
Al	26.98	4.05	428	13.49	933
Si	28.08	5.43	645	—	1693
Cr	51.96	2.88	630	—	2130
Fe	55.84	2.87	470	13.0	1808
Cu	63.54	3.61	343	8.12	1356
Ge	72.5	5.66	374	—	1211
Nb	92.91	3.38	275	6.18	2741
Ag	107.87	4.09	225	6.36	1234
In	114.82	4.59	108	9.98	429.8
Sn	118.6	5.32	200	11.64	505
Sb	121.7	4.51	211	12.7	904
Cs	132.9	6.05	38	1.83	302
W	183.8	3.16	400	—	3683
Au	196.9	4.08	165	6.39	1337
Pb	207.2	4.95	105	10.87	601
Bi	208.9	4.75	119	54	544.5
Mg	24.3	3.2	400	8.27	922

### Свойства полупроводников

							χ
	$E_G$ (0 K),	$E_G$ (300 K),	$m_n'' / m_e$	$m_p'' / m_e$	$\mu_n$ , 2. -1. -1	$\mu_p$ , 2. -1. -1	
Si	1.166	1.11	$m_l$ 0.98 $m_t$ 0.19	$m_p''$ 0.5 $m_p''$ 0.16	1350	480	4.83
Ge	0.74	0.67	$m_l$ 1.58 $m_t$ 0.082	$m_p''$ 0.3 $m_p''$ 0.04	3900	1900	4.80
GaAs	1.52	1.43	0.07	$m_p''$ 0.5 $m_p''$ 0.12	8600	400	4.71
GaSb	0.81	0.69	0.045	0.39	4000	650	4.76
InAs	0.43	0.36	0.028	0.33	30000	240	4.90
InSb	0.235	0.17	0.0133	$m_p''$ 0.6 $m_p''$ 0.012	76000	5000 (78 K)	4.75
InP	1.42	1.28	0.07	0.4	4000	650	4.45
AlSb	1.6	1.6	0.11	0.39	50	400	4.86

## Содержание

Лабораторная работа № 1. Исследование теплоемкости кристаллической решетки.....	3
Лабораторная работа № 2. Исследование статистических свойств электронного газа в твердых телах.....	6
Лабораторная работа № 3. Исследование электропроводности и теплопроводности металлов.....	9
Лабораторная работа № 4. Исследование электропроводности тонких пленок.....	13
Лабораторная работа № 5. Исследование электропроводности полупроводников.....	15
Лабораторная работа № 6. Изучение контактных явлений в планарной микроструктуре.....	18
Список рекомендуемой литературы.....	21
Приложения.....	22

Редактор И. Г. Скачек

---

Подписано к печати	Формат 60×84 $\frac{1}{16}$ .	Бумага офсетная.
Печать офсетная.	Усл. печ. л. 1,39.	Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 300 экз.		Заказ

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5