

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники  
и наноэлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению контрольных и курсовых работ  
по дисциплине  
«Физика конденсированного состояния»  
для студентов направления 210100.62  
«Электроника и наноэлектроника»  
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)  
заочной формы обучения

Воронеж 2013

Составитель канд. техн. наук Е.П. Новокрещенова

УДК 539.2 (07)

Методические указания к выполнению контрольных и курсовых работ по дисциплине «Физика конденсированного состояния» для студентов направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») заочной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е.П. Новокрещенова. Воронеж, 2013. 26 с.

Методические указания содержат общие положения о порядке выполнения контрольных и курсовых работ по дисциплине «Физика конденсированного состояния» для студентов направления 210100.62, варианты контрольных работ и примерный перечень тем курсовых работ. Приведен библиографический список.

Предназначены для студентов второго и третьего курсов заочной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD 2007 и содержатся в файле Контр. зо ФКС.doc.

Табл. 20. Библиогр.: 9 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Т.В. Свистова

Ответственный за выпуск зав. кафедрой  
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. Выбор вариантов и порядок выполнения контрольных работ

Контрольная работа включает в себя решение восьми задач. Студенты выбирают задачи по номеру варианта, соответствующему двум последним цифрам шифра студента (в некоторых задачах – по последней цифре). **Шифром является номер зачетной книжки студента.** Все задачи снабжены методическими указаниями, в которых приведены основные формулы, необходимые для решения.

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради, на обложке которой указывается название дисциплины, фамилия, имя, отчество студента, учебный шифр, номер группы, домашний адрес, номера решаемых задач.

Решения задач сопровождаются краткими пояснениями с указанием формул, численными расчетами результатов с приведением размерностей определяемых величин, в конце приводится ответ. При необходимости решение сопровождается поясняющими рисунками.

## 1.2. Порядок выполнения курсовой работы

Тематика курсовых работ соответствует основным разделам дисциплины «Физика конденсированного состояния». Студенты сами выбирают тему курсовой работы из списка, предлагаемого преподавателем, или предлагают свою тему. Примерный перечень тем курсовых работ приведен в третьей части данных методических указаний. По каждой теме приводится рекомендуемая литература с указанием соответствующих страниц. Тема курсовой работы согласовывается с руководителем курсовой работы и утверждается на заседании кафедры полупроводниковой электроники.

Каждый студент получает индивидуальное задание по курсовой работе. Задание составляется руководителями курсовой работы. Оно определяет содержание основной части и отдельных разделов курсовой работы, включающие перечень теоретических вопросов, подлежащих рассмотрению.

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки. Пояснительная записка объемом 20 – 25 страниц формата А4 включает следующие разделы:

- титульный лист установленной формы;
- задание руководителя;
- замечания руководителя;
- содержание (с указанием страниц);
- введение;
- основная часть, включающая теоретическую часть с изложением основных теоретических положений работы, экспериментальную часть, если она присутствует в работе, расчетную часть, если она присутствует в работе);
- заключение;
- список литературы.

Теоретическая часть содержит 3 – 4 вопроса, в которых рассматриваются теоретические аспекты работы. Излагаемый материал иллюстрируется графиками, чертежами, рисунками, таблицами. В тексте приводятся необходимые формулы и ссылки на используемую литературу.

Оформление курсовой работы должно соответствовать действующему в университете стандарту.

Выполнение курсовой работы контролируется руководителем. Полностью законченную работу студенты сдают на проверку не позднее, чем за 3 дня до срока защиты. Руководитель делает замечания и отмечает ошибки, после устранения которых студент допускается к защите курсовой работы.

Защита курсовой работы проводится перед комиссией. Студент в течение 5 – 7 минут докладывает основное содержание работы, после чего отвечает на вопросы комиссии. Курсовая работа оценивается по четырехбалльной системе

## 2. ЗАДАЧИ

**Задача 1, а.** В кубической кристаллической решетке построить плоскости с индексами Миллера ( $hkl$ ).

Таблица 1

Номер варианта		$(hkl)$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	
0, 2, 4, 6, 8	1	$(121)$ и $(\bar{1}\bar{2}1)$
0, 2, 4, 6, 8	4	$(013)$ и $(0\bar{1}\bar{3})$
0, 2, 4, 6, 8	7	$(021)$ и $(0\bar{2}\bar{1})$
0, 2, 4, 6, 8	0	$(102)$ и $(1\bar{0}\bar{2})$
1, 3, 5, 7, 9	1	$(103)$ и $(1\bar{0}\bar{3})$
1, 3, 5, 7, 9	4	$(113)$ и $(\bar{1}\bar{1}3)$
1, 3, 5, 7, 9	7	$(110)$ и $(\bar{1}\bar{1}0)$
1, 3, 5, 7, 9	0	$(210)$ и $(\bar{2}\bar{1}0)$

### Указания

Определение индексов Миллера смотрите в [1, С. 22 – 27 и 4, С. 16 – 17; 10, С. 10 - 18].

**Задача 1, б.** Определить индексы Миллера плоскости, отсекающей на осях кубической решетки отрезки  $A$ ,  $B$  и  $C$  ( $a$  – период решетки).

Таблица 2

Номер варианта		$A$	$B$	$C$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра			
0, 2, 4, 6, 8	2	$1a$	$3a$	$5a$
0, 2, 4, 6, 8	5	$2a$	$-3a$	$1a$
0, 2, 4, 6, 8	8	$-1a$	$-2a$	$3a$
1, 3, 5, 7, 9	2	$\infty$	$1a$	$2a$
1, 3, 5, 7, 9	5	$-1a$	$\infty$	$3a$
1, 3, 5, 7, 9	8	$2a$	$-1a$	$\infty$

*Указания*

Смотрите указания к задаче 1,  $a$ .

**Задача 1,  $b$ .** Определить наименьшие отрезки, отсекаемые на осях кубической решетки плоскостью  $(hkl)$ , и изобразить эту плоскость графически.

Таблица 3

Номер варианта		$(hkl)$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	
0, 2, 4, 6, 8	3	$(\bar{1}32)$
0, 2, 4, 6, 8	6	$(01\bar{2})$
0, 2, 4, 6, 8	9	$(0\bar{2}\bar{1})$
1, 3, 5, 7, 9	3	$(\bar{1}02)$
1, 3, 5, 7, 9	6	$(\bar{2}01)$
1, 3, 5, 7, 9	9	$(\bar{3}10)$

*Указания*

Смотрите указания к задаче 1,  $a$ .

**Задача 2, а.** Из узла кубической решетки типа, заданного в варианте, записать направления на ближайшие атомы элементарной ячейки.

Таблица 4

Номер варианта	Тип решетки
Последняя цифра шифра	
1	Типа алмаза
4	Простая (примитивная)
7	ГЦК
0	ОЦК

*Указания*

Смотрите указания к задаче 1, а.

**Задача 2, б.** Изобразить направления  $[hkl]$  в кубической решетке.

Таблица 5

Номер варианта		$[hkl]$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	
0, 2, 4, 6, 8	2	$[10\bar{2}]$ и $[102]$
0, 2, 4, 6, 8	5	$[\bar{1}23]$ и $[123]$
0, 2, 4, 6, 8	8	$[21\bar{1}]$ и $[211]$
1, 3, 5, 7, 9	2	$[12\bar{2}]$ и $[122]$
1, 3, 5, 7, 9	5	$[01\bar{3}]$ и $[013]$
1, 3, 5, 7, 9	8	$[\bar{2}\bar{1}0]$ и $[210]$

*Указания*

Смотрите указания к задаче 1, а.

**Задача 2, в.** Записать индексы направления прямой, проходящей через узлы  $[[hkl]]$  кубической решетки.

Таблица 6

Номер варианта		Координаты узлов
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра	
0, 2, 4, 6, 8	3	$[[0\bar{1}0]]$ и $[[\bar{2}00]]$
0, 2, 4, 6, 8	6	$[[100]]$ и $[[1\bar{1}0]]$
0, 2, 4, 6, 8	9	$[[00\bar{2}]]$ и $[[0\bar{1}0]]$
1, 3, 5, 7, 9	3	$[[\bar{1}00]]$ и $[[0\bar{1}0]]$
1, 3, 5, 7, 9	6	$[[020]]$ и $[[00\bar{1}]]$
1, 3, 5, 7, 9	9	$[[010]]$ и $[[2\bar{2}0]]$

*Указания*

Смотрите указания к задаче 1, а.

**Задача 3.** Рассчитать плотность упаковки для приведенных решеток.

Таблица 7

Номер варианта	Тип решетки
Последняя цифра шифра	
1, 5, 9	Типа алмаза
2, 6, 0	Простая кубическая
3, 7	ОЦК
4, 8	ГЦК



### Указания

Плотность упаковки  $F$  – относительная доля объема кристаллической решетки, заполненного атомами. В расчете на элементарную ячейку с ребром  $a$

$$F = Z \cdot \frac{V_{am}}{V_{яч}},$$

где  $Z$  – количество атомов, приходящихся на элементарную ячейку;  $V_{am}$  – объем одного атома;  $V_{яч}$  – объем элементарной ячейки;  $V = a^3$ .

Объем атома

$$V_{am} = \frac{4}{3} \pi r^3,$$

где  $r$  – атомный радиус.

$Z$  можно рассчитать по формуле

$$Z = N_i + \frac{1}{2} N_f + \frac{1}{4} N_d + \frac{1}{8} N_a,$$

где  $N_i$  – число атомов внутри ячейки;  $N_f$  – число атомов на ее гранях;  $N_d$  – число атомов на ребрах;  $N_a$  – число атомов в вершинах ячейки.

Считая, что в решетке атомы плотно прилегают друг к другу, кратчайшее межатомное расстояние равно  $2r$ . Межатомное расстояние для каждого типа решетки нужно выразить через период решетки  $a$ .

Элементарные ячейки кристаллических решеток приведены в [10, С. 28 – 32].

**Задача 4.** Рассчитать равновесную концентрацию вакансий и дефектов по Френкелю в кремнии и германии при заданной температуре  $T$ , если энергия образования вакансий в кремнии – 2,3 эВ, в германии – 2 эВ; энергия образования дефектов по Френкелю в кремнии – 4,2 эВ, в германии – 3,6 эВ.

Таблица 8

Номер варианта		Материал	Тип дефектов	$T$ , К
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра			
0, 2, 4, 6, 8	1	Si	вакансии	300
0, 2, 4, 6, 8	2	Si	вакансии	500
0, 2, 4, 6, 8	3	Si	вакансии	800
0, 2, 4, 6, 8	4	Si	вакансии	900
0, 2, 4, 6, 8	5	Si	вакансии	1000
0, 2, 4, 6, 8	6	Si	по Френкелю	300
0, 2, 4, 6, 8	7	Si	по Френкелю	500
0, 2, 4, 6, 8	8	Si	по Френкелю	800
0, 2, 4, 6, 8	9	Si	по Френкелю	900
0, 2, 4, 6, 8	0	Si	по Френкелю	1000
1, 3, 5, 7, 9	1	Ge	вакансии	300
1, 3, 5, 7, 9	2	Ge	вакансии	500
1, 3, 5, 7, 9	3	Ge	вакансии	800
1, 3, 5, 7, 9	4	Ge	вакансии	900
1, 3, 5, 7, 9	5	Ge	вакансии	930
1, 3, 5, 7, 9	6	Ge	по Френкелю	300
1, 3, 5, 7, 9	7	Ge	по Френкелю	500
1, 3, 5, 7, 9	8	Ge	по Френкелю	800
1, 3, 5, 7, 9	9	Ge	по Френкелю	900
1, 3, 5, 7, 9	0	Ge	по Френкелю	930

### Указания

Равновесная концентрация вакансий  $n_v$  рассчитывается по формуле

$$n_v = N \cdot \exp\left(-\frac{E_v}{kT}\right),$$

где  $N$  – концентрация собственных атомов;  $E_v$  – энергия образования вакансии;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура в градусах Кельвина.

Для решения задачи удобно использовать постоянную Больцмана, выраженную в  $\left[\frac{\text{эВ}}{\text{К}}\right]$ :  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ .

Равновесная концентрация дефектов по Френкелю  $n_\phi$  рассчитывается по формуле

$$n_\phi = \sqrt{N \cdot N'} \cdot \exp\left(-\frac{E_\phi}{2kT}\right),$$

где  $E_\phi$  – энергия образования дефектов по Френкелю;  $N$  – концентрация собственных атомов;  $N'$  – концентрация междоузлий.

Считая  $N' \approx N$ , формулу для  $n_\phi$  можно упростить:

$$n_\phi = N \cdot \exp\left(-\frac{E_\phi}{2kT}\right).$$

Концентрация собственных атомов может быть рассчитана как число атомов в элементарной ячейке  $Z$ , деленное на объем ячейки. Формула для расчета  $Z$  приведена в предыдущей задаче. Так как кремний и германий кристаллизуются в структуру алмаза, число атомов внутри элементарной ячейки равно  $N_i = 4$ , число атомов на ее гранях  $N_f = 6$ , атомов на ребрах нет:  $N_d = 0$ , число атомов в вершинах  $N_a = 8$ .

Тогда

$$Z = 4 + \frac{1}{2} \cdot 6 + \frac{1}{8} \cdot 8 = 8.$$

Объем элементарной ячейки  $V_{яч} = a^3$ , где  $a$  – период решетки. Для кремния  $a = 5,43 \text{ \AA}$ , для германия  $a = 5,66 \text{ \AA}$ .

$$N = \frac{8}{a^3}.$$

**Задача 5.** Вычислить удельную электропроводность собственного полупроводника при температуре  $T$ , если известно, что ширина его запрещенной зоны  $E_g$ , а проводимость при 300 К равна  $\sigma$ . Температурной зависимостью подвижности носителей заряда можно пренебречь.

Таблица 9

Номер варианта	$T, \text{ К}$	$E_g, \text{ эВ}$	$\sigma, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
Последняя цифра шифра			
1	500	1	1
2	700	1	1
3	900	1	1
4	500	1,4	0,1
5	700	1,4	0,1
6	900	1,4	0,1
7	1000	1,4	0,1
8	500	0,7	10
9	700	0,7	10
0	900	0,7	10

### Указания

Удельная электропроводность  $\sigma$  собственного полупроводника

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p), \quad (2.1)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n_i$  – концентрация собственных носителей заряда;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок.

$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi k}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} = \text{const} \cdot T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}},$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Запишем  $\sigma$  для температур  $T$  и 300 К и возьмем их отношение:

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_{300}} = \frac{en_i(T)(\mu_n^T + \mu_p^T)}{en_i(300)(\mu_n^{300} + \mu_p^{300})}.$$

Пренебрегая зависимостью подвижности от температуры, получим

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_{300}} = \frac{n_i(T)}{n_i(300)} = \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{300} \right)}.$$

Постоянная Больцмана  $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

$$\sigma_T = \sigma_{300} \cdot \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k} \left( \frac{1}{300} - \frac{1}{T} \right)}.$$

**Задача 6, а.** Вычислить концентрацию свободных электронов и дырок в собственном полупроводнике, если известны их подвижности  $\mu_n$  и  $\mu_p$  и удельное сопротивление  $\rho_i$ .

Таблица 10

Номер варианта		Полупроводник	$\mu_n,$ м <sup>2</sup> /(В·с)	$\mu_p,$ м <sup>2</sup> /(В·с)	$\rho_i,$ Ом·м
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра				
0, 2, 4, 6, 8	1	Кремний	0,135	0,05	$2 \cdot 10^{-3}$
0, 2, 4, 6, 8	2	Германий	0,39	0,19	0,47
0, 2, 4, 6, 8	3	Антимонид галлия GaSb	0,4	0,14	10

*Указания*

Концентрация свободных электронов и дырок  $n_i$  определяется из формулы (2.1), в которой удельную электропроводность  $\sigma$  следует выразить через удельное сопротивление.

**Задача 6, б.** Определить удельное сопротивление полупроводника  $n$ -типа, если концентрация электронов проводимости в нем равна  $n$ , а их подвижность  $\mu_n$ .

Таблица 11

Номер варианта		$n, \text{м}^{-3}$	$\mu_n, \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
0, 2, 4, 6, 8	4	$10^{22}$	0,5
0, 2, 4, 6, 8	5	$2 \cdot 10^{20}$	0,2

*Указания*

Удельное сопротивление

$$\rho = \frac{1}{en\mu_n}$$

**Задача 6, в.** При напряженности электрического поля  $E$  плотность тока через полупроводник  $j$ . Определить концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность равна  $\mu_n$ . Дырочной составляющей тока пренебречь.

Таблица 12

Номер варианта		$E, \text{В/м}$	$j, \text{А/м}^2$	$\mu_n, \text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра			
0, 2, 4, 6, 8	6	100	$6 \cdot 10^4$	0,375
0, 2, 4, 6, 8	7	20	$2 \cdot 10^3$	0,375
0, 2, 4, 6, 8	8	50	$10^4$	0,2
0, 2, 4, 6, 8	9	10	$6 \cdot 10^4$	0,1
0, 2, 4, 6, 8	0	100	$2 \cdot 10^3$	0,2

*Указания*

Для решения задачи воспользоваться законом Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma \cdot E, \quad (2.2)$$

где  $\sigma$  – проводимость.

Проводимость электронного полупроводника

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n, \quad (2.3)$$

где  $n$  – концентрация электронов.

**Задача 6, г.** Определить ток через образец полупроводника  $n$ -типа прямоугольной формы  $l \times b \times h = 5 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ , если вдоль образца приложено напряжение 10 В. Концентрация электронов в полупроводнике  $n$ , а их подвижность  $\mu_n$ .

Таблица 13

Номер варианта		$n, \text{ м}^{-3}$	$\mu_n, \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
1, 3, 5, 7, 9	1	$10^{21}$	0,14
1, 3, 5, 7, 9	2	$10^{21}$	0,4
1, 3, 5, 7, 9	3	$3 \cdot 10^{22}$	0,14
1, 3, 5, 7, 9	4	$3 \cdot 10^{22}$	0,4

#### Указания

Воспользоваться законом Ома в дифференциальной форме (2.2) и формулой для проводимости  $\sigma$  (2.3) из указаний к задаче 6, в. Рассчитать напряженность электрического поля  $E$  через приложенное напряжение  $U$  и длину образца  $l$ . Ток выразить через плотность тока  $j$  и площадь поперечного сечения образца  $S = bh$ .

**Задача 6, д.** Через кристалл кремния  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho$  пропускают электрический ток плотностью  $j$ . За какое время электроны проходят расстояние 10 мкм, если их подвижность  $0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ?



Таблица 14

Номер варианта		$\rho$ , Ом·м	$j$ , мА/см <sup>2</sup>
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
1, 3, 5, 7, 9	5	0,1	200
1, 3, 5, 7, 9	6	0,2	20
1, 3, 5, 7, 9	7	1	100
1, 3, 5, 7, 9	8	3	40
1, 3, 5, 7, 9	9	8	80
1, 3, 5, 7, 9	0	10	30

*Указания*

По определению подвижности носителей заряда  $\mu$  как скорости дрейфа  $v$  в электрическом поле единичной напряженности  $E$  следует формула

$$\mu = \frac{v}{E},$$

из которой можно найти скорость движения электронов

$$v = \mu \cdot E, \quad (2.4)$$

Напряженность  $E$  рассчитывается по закону Ома в дифференциальной форме (2.2) из указаний к задаче 6, в.

**Задача 7, а.** Плоский прямоугольный образец фосфида индия с удельным сопротивлением  $\rho$  и подвижностью электронов  $\mu_n = 0,4 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  помещен в магнитное поле с индукцией 1 Тл., вектор которой перпендикулярен плоскости кристалла. Вдоль образца пропускается ток  $I$ . Определить силу Лоренца, действующую на электроны, если площадь поперечного сечения образца  $S$ .

Таблица 15

Номер варианта		$\rho$ , Ом·м	$I$ , мА	$S$ , мм <sup>2</sup>
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра			
0, 2, 4, 6, 8	1	$2 \cdot 10^{-3}$	20	2
0, 2, 4, 6, 8	2	$10^{-2}$	10	3
0, 2, 4, 6, 8	3	$10^{-3}$	30	5
0, 2, 4, 6, 8	4	$2 \cdot 10^{-2}$	5	3
0, 2, 4, 6, 8	5	$5 \cdot 10^{-3}$	40	6
0, 2, 4, 6, 8	6	$5 \cdot 10^{-2}$	7	4
0, 2, 4, 6, 8	7	$3 \cdot 10^{-3}$	12	1
0, 2, 4, 6, 8	8	$4 \cdot 10^{-2}$	15	2

*Указания*

Сила Лоренца  $F$ , действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , равна

$$\vec{F} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}],$$

или в скалярном выражении с учетом заряда электрона:

$$F = e \cdot v \cdot B.$$

Скорость электрона можно определить через его подвижность и напряженность электрического поля  $E$  по формуле (2.4) из указаний к задаче 6, *д*.

Напряженность электрического поля связана с плотностью тока и удельным сопротивлением законом Ома в дифференциальной форме (2.2) из указаний к задаче 6, *в*:

$$j = \sigma \cdot E = \frac{E}{\rho}. \quad (2.5)$$

Плотность тока определяется через величину тока  $I$  и площадь поперечного сечения  $S$ .

**Задача 7, б.** Образец арсенида галлия с удельным сопротивлением  $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$  Ом·м характеризуется коэффициентом Холла  $R_H = 3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Кл, Определить:

а) напряженность холловского поля, возникающего при пропускании через образец тока плотностью  $j$  и воздействии магнитного поля с индукцией  $B$ ;

б) напряженность внешнего электрического поля для создания заданной плотности тока.

Таблица 16

Номер варианта		$j$ , мА/мм <sup>2</sup>	$B$ , Тл
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
0, 2, 4, 6, 8	9	10	2
0, 2, 4, 6, 8	0	25	0,5
1, 3, 5, 7, 9	1	15	3
1, 3, 5, 7, 9	2	20	0,2

*Указания*

Величина холловского напряжения  $U_H$  определяется по формуле

$$U_H = R_H \cdot j \cdot B \cdot b, \quad (2.6)$$

где  $b$  – ширина образца. Тогда напряженность холловского поля  $E_H$

$$E_H = \frac{U_H}{b}.$$

Напряженность внешнего электрического поля определяется из закона Ома в дифференциальной форме через удельное сопротивление и плотность тока по формуле (2.5) из указаний к задаче 7, а.

**Задача 7, в.** Определить подвижность и концентрацию электронов в кремнии *n*-типа, удельное сопротивление которого  $\rho$ , а коэффициент Холла  $R_H$ .

Таблица 17

Номер варианта		$\rho$ , Ом·м	$R_H$ , м <sup>3</sup> /Кл
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
1, 3, 5, 7, 9	3	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
1, 3, 5, 7, 9	4	$10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
1, 3, 5, 7, 9	5	$10^{-2}$	$10^{-4}$
1, 3, 5, 7, 9	6	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$

*Указания*

Коэффициент Холла для полупроводника *n*-типа равен

$$R_H = -\frac{1}{en},$$

где  $n$  – концентрация электронов.

Подвижность носителей определяется через удельное сопротивление и концентрацию электронов.

**Задача 7, 2.** Установлено, что при некоторой температуре в полупроводнике эдс Холла обращается в нуль. Определить, какая доля электрического тока через образец при этой температуре переносится дырками, если отношение подвижности электронов к подвижности дырок равно  $\mu_n/\mu_p$ .

Таблица 18

Номер варианта		Материал полупроводника	$\mu_n/\mu_p$
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
1, 3, 5, 7, 9	7	Антимонид индия InSb	100
1, 3, 5, 7, 9	8	Германий	2

*Указания*

Эдс Холла определяется формулой (2.6) из указаний к задаче 7, б. Равенство нулю эдс возможно, если равен нулю коэффициент Холла  $R_H$ . Такой случай реализуется в полупроводнике с двумя типами носителей заряда, для которого

$$R_H = \frac{A}{e} \cdot \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2},$$

где  $A$  – константа, зависящая от механизма рассеяния носителей;  $n$  и  $p$  – концентрации электронов и дырок, при равенстве нулю числителя. Отсюда можно получить отношение концентраций  $n/p$ .

Ток в полупроводнике с двумя типами носителей переносится как электронами, так и дырками:

$$j_n = en\mu_n E;$$

$$j_p = e\rho\mu_p E,$$

где  $j_n$  и  $j_p$  – плотности токов;  $E$  – напряженность электрического поля.

Полный ток

$$j = j_n + j_p = eE(n\mu_n + p\mu_p).$$

Доля тока, переносимого дырками:

$$\frac{j_p}{j_n + j_p} = \frac{p\mu_p}{n\mu_n + p\mu_p} = \frac{1}{\frac{n}{p} \cdot \frac{\mu_n}{\mu_p} + 1}.$$

**Задача 7, д.** Вычислить, при каком соотношении концентраций электронов и дырок в полупроводнике эдс Холла обращается в нуль, если их подвижности равны  $\mu_n$  и  $\mu_p$ .

Таблица 19

Номер варианта		Материал полупроводника	$\mu_n,$ м <sup>2</sup> /(В·с)	$\mu_p,$ м <sup>2</sup> /(В·с)
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра			
1, 3, 5, 7, 9	9	Кремний	0,14	0,05
1, 3, 5, 7, 9	0	Арсенид галлия GaAs	0,95	0,045

*Указания*

Смотрите указания к предыдущей задаче (7, з).

**Задача 8.** Вычислить минимальную длину световой волны при 300 К, для которой оптически прозрачны полупровод-

ники, имеющие ширину запрещенной зоны  $E_g$ , Как изменится эта длина с понижением температуры?

Таблица 20

Номер варианта		Полупроводник	$E_g$ , эВ
Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра		
0, 2, 4, 6, 8	1	Ge	0,66
0, 2, 4, 6, 8	2	Si	1,12
0, 2, 4, 6, 8	3	GaAs	1,43
0, 2, 4, 6, 8	4	CdS	2,53
0, 2, 4, 6, 8	5	ZnS	3,67
0, 2, 4, 6, 8	6	AlP	2,45
0, 2, 4, 6, 8	7	GaP	2,26
0, 2, 4, 6, 8	8	InP	1,35
0, 2, 4, 6, 8	9	AlAs	2,16
0, 2, 4, 6, 8	0	InAs	0,36
1, 3, 5, 7, 9	1	AlSb	1,58
1, 3, 5, 7, 9	2	GaSb	0,72
1, 3, 5, 7, 9	3	InSb	0,18
1, 3, 5, 7, 9	4	ZnSe	2,73
1, 3, 5, 7, 9	5	CdSe	1,85
1, 3, 5, 7, 9	6	ZnTe	2,23
1, 3, 5, 7, 9	7	CdTe	1,51
1, 3, 5, 7, 9	8	PbS	0,39
1, 3, 5, 7, 9	9	PbSe	0,27
1, 3, 5, 7, 9	0	PbTe	0,32

### Указания

Полупроводники оптически прозрачны, если энергия кванта света  $E$  меньше ширины запрещенной зоны полупроводника

$$E < E_g.$$

Длина световой волны  $\lambda$  связана с энергией кванта света  $E$  соотношением

$$\lambda = \frac{hc}{E},$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света.

Для расчетов удобно пользоваться формулой

$$\lambda[\text{мкм}] = \frac{1,24}{E[\text{эВ}]}.$$

Покажем, что это справедливо:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{E[\text{Дж}]} [\text{м}] = \frac{0,1986 \cdot 10^{-24}}{1,6 \cdot 10^{-19} E[\text{эВ}]} [\text{м}] = \\ &= \frac{1,24 \cdot 10^{-6}}{E[\text{эВ}]} [\text{м}] = \frac{1,24}{E[\text{эВ}]} [\text{мкм}]. \end{aligned}$$



### 3. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ КУРСОВЫХ РАБОТ

1. Основные типы кристаллических структур полупроводников [1, С. 44 – 47; 3, С. 89 – 98; 10, С. 18 - 33].

2. Основные типы кристаллических структур твердых тел [1, С. 18 – 21, 41 – 53; 3, С. 85 – 98, С. 18 - 33].

3. Виды химической связи. Энергия связи кристаллических решеток. [1, С. 83 – 114; 3, С. 268 – 283, 292 – 298, 304, 318 – 321; 4, С. 9 – 15, 10, С. 5 -9].

4. Структурные дефекты кристаллов [1, С. 115 – 147; 3, С. 103 – 113; 10, С. 14 -15].

5. Механические свойства твердых тел [1, С. 148 – 175].

6. Тепловые свойства твердых тел [1, С. 201 – 240; 2, С. 96 – 104].

7. Металлы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения зонной теории твердого тела [1, С. 253 – 257, 281 – 283; 2, С. 29 – 36, 48 – 50; 4, С. 19 – 26].

8. Зонная структура твердого тела. Приближение сильной связи [1, С. 273 – 276; 2, С. 36 – 42].

9. Зонная структура твердого тела. Приближение слабой связи [1, С. 277 – 281].

10. Статистика носителей заряда в полупроводниках [1, С. 305 – 311, 313 – 314; 2, С. 105 – 143; 4, С. 91 – 100].

11. Механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках [1, С. 311 – 312, 314 – 316; 2, С. 144 – 169; 4, С. 101 – 104, 106 – 111].

12. Электропроводность полупроводников [1, С. 303 – 316; 2, С. 11 – 28, 173 – 175; 4, С. 90 – 98].

13. Температурная зависимость электропроводности полупроводников [1, С. 303 – 316; 2, С. 26 – 29, 180 – 181; 4, С. 104 – 106].

14. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в полупроводниках [1, С. 314 – 316; 2, С. 176 – 180; 4, С. 101 – 104].

15. Диффузия в твердых телах. Законы Фика [1, С. 241 – 252; 3, С. 382 – 390, 393 – 395].
16. Использование диффузионных процессов в технологии полупроводниковых приборов [1, С. 249 – 253].
17. Неравновесные носители заряда [2, С. 221 – 254; 4, С. 106 – 111].
18. Механизмы рекомбинации носителей заряда [2, С. 221 – 248; 4, С. 106 – 111].
19. Термоэлектрические явления в полупроводниках [2, С. 195 – 203; 4, С. 122 – 123].
20. Эффект Холла [1, С. 325 – 328; 2, С. 181 – 185; 4, С. 123 – 126].
21. Магниторезистивный эффект [2, С. 190 – 195].
22. Оптические свойства твердых тел [1, С. 438 – 554; 2, С. 323 – 405; 4, С. 111 – 121].
23. Механизмы оптического поглощения [1, С. 441 – 448; 2, С. 321 – 358; 4, С. 111 – 115].
24. Фотолюминесценция твердых тел [1, С. 448 – 455; 2, С. 359 – 377; 4, С. 119 – 122].
25. Фотопроводимость полупроводников [2, С. 383 – 405; 4, С. 116 – 119].
26. Контакты металл – полупроводник [2, С. 266 – 287].
27.  $P - n$  переход [2, С. 266 – 272, 288 – 300].
28. Диэлектрические свойства твердых тел [1, С. 329 – 360; 4, С. 182 – 224].
29. Механизмы поляризации диэлектриков [1, С. 329 – 346; 4, С. 182 – 193].
30. Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики [1, С. 351 – 358; 4, С. 261 – 278].
31. Магнитные свойства твердых тел [1, С. 361 – 397; 4, С. 296 – 325].
32. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм [1, С. 376 – 397; 4, С. 300 – 316].

33. Ферромагнетики и их свойства [1, С. 376 – 397; 4, С. 300 – 316].
34. Явление сверхпроводимости [1, С. 399 – 437; 4, С. 63 – 70].
35. Высокотемпературная сверхпроводимость [1, С. 415 – 421].
36. Физика поверхности полупроводников, поверхностный потенциал [2. С. 301 – 322].
37. Виды точечных дефектов и их термодинамика [1, С. 115 – 123].
38. Индексы Миллера плоскостей и направлений [ 1, С. 22 -27].

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Павлов П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. М.: Высш. шк., 2002 .
2. . Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. М.: Высш. шк., 1985.
3. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников / Б.Ф. Ормонт. М.: Высш. шк., 1986.
4. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. / В.В. Пасынков, В.С.Сорокин. СПб.: Лань, 2004
5. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. М.: Наука, 1990.
6. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. СПб.: Лань, 2003 .
7. Физические методы исследования материалов твердотельной электроники / С.И. Рембеза, Б.М. Синельников, Е.С. Рембеза, Н.И. Каргин. Ставрополь: СевКавГТУ, 2002.

8. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль. М.: Высш. шк., 1984

9. Широкозонные полупроводники / под ред. Ю.Г. Шре-тер СПб.: Наука, 2001

10. Новокрещенова Е.П. Введение в материаловедение полупроводников: учеб. пособие / Е.П. Новокрещенова. Воро-неж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технически университет», 2010. 180 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению контрольных и курсовых работ  
по дисциплине  
«Физика конденсированного состояния»  
для студентов направления 210100.62  
«Электроника и наноэлектроника»  
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)  
заочной формы обучения

Составитель Новокрещенова Елена Павловна

В авторской редакции

Компьютерный набор Е.П.Новокрещеновой

Подписано к изданию 30.10.2013.

Уч.-изд. л. 1,6

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14