

**Министерство науки и высшего образования РФ**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)**

**Кафедра физической электроники**

**С.В. Смирнов, И.А. Чистоедова**

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И  
СТРУКТУР ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Учебно-методическое пособие  
по аудиторным практическим занятиям и  
самостоятельной работе*

**ТОМСК - 2023**

Рецензент:

д.т.н., профессор кафедры физики Бурдовицын В.А.

**Смирнов С.В., Чистоедова И.А.**

Методы исследований материалов и структур электроники:  
Учебно-методическое пособие. – Томск: Томский государственный  
университет систем управления и радиоэлектроники, 2023. – 53 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов  
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,  
направления 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная  
техника».

© Смирнов С.В., Чистоедова И.А., 2023

© Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники, 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>2 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ</b> .....	5
2.1 Расчет удельного сопротивления и концентрации носителей заряда .....	5
2.2 Определение концентрации и подвижности носителей заряда методом Холла .....	7
2.3 Определение удельного сопротивления и концентрации носителей заряда методом Ван дер Пау .....	11
2.4 Определение удельного сопротивления эпитаксиальных структур четырехзондовым методом .....	12
2.5 Определение концентрации свободных носителей заряда методом вольт-фарадных характеристик .....	13
2.7 Определение эффективной массы .....	14
2.8 Оптические свойства кристаллов .....	15
2.9 Определение концентрации носителей методом ИК-эллипсометрии.....	17
2.10 Просветляющие покрытия .....	18
2.11 Отражение поляризованного света .....	19
2.12 Люминесценция .....	20
2.13 Эллипсометрия.....	21
2.14 Рентгеновские методы исследования кристаллической структуры.....	21
2.15 Методы обратного резерфордского рассеяния и масс-спектропии вторичных ионов .....	24
<b>3 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ</b> .....	27
<b>4 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ</b> .....	31
<b>5 АУДИТОРНАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА</b> .....	46
<b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА</b> .....	48
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b> .....	49
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</b> .....	50
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3</b> .....	51
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4</b> .....	52

## **1 ВВЕДЕНИЕ**

Данное учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов по дисциплинам «Методы исследования материалов и структур электроники», «Методы анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем», «Методы диагностики и анализа микро- и наноструктур». Содержит варианты индивидуальных заданий для аудиторных практических занятий, тестовые задания, варианты домашних индивидуальных заданий и варианты контрольной работы, проводимой в аудитории. Индивидуальные задания представляют собой комплексные задания по всем разделам лекционного курса с элементами самостоятельного поиска материала. В приложениях приведены справочные данные.

## 2 ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

### 2.1 Расчет удельного сопротивления и концентрации носителей заряда

1. Образец кремния, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при 300 К, характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление  $5 \text{ Ом см}$ ,  $\mu_n = 1600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Определите концентрацию электронов и дырок. Помните, что  $p = n_i^2$

2. Цилиндр из кремния полупроводника диаметром 1 мм и длиной 10 см при комнатной температуре имел электрическое сопротивление 1 МОм, при нагреве до  $100^\circ\text{C}$  его сопротивление уменьшилось в 10 раз. Найдите концентрацию и подвижность электронов в полупроводнике, предполагая, что положение уровня Ферми и подвижность не зависят от температуры. Вкладом дырочной проводимости пренебречь.

3. Образец кремния, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при 300 К, характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление  $5 \text{ Ом см}$ ,  $\mu_n = 1600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Определите положение уровня Ферми. Помните, что  $p = n_i^2$

4. Рассчитайте вклад в электропроводность электронной и дырочной составляющих проводимости в кремнии при 300К и 400К соответственно. Определите температурный коэффициент сопротивления. Найдите среднее время релаксации, среднюю дрейфовую скорость и длину свободного пробега электронов, при напряженности поля  $10 \text{ В/см}$ .

5. Образец германия, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при 300 К, характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление  $1 \text{ Ом см}$ ,  $\mu_n = 3800 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 1800 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Определите концентрацию электронов и дырок. Помните, что  $np = n_i^2$

6. Цилиндр из германия диаметром 1 мм и длиной 10 см при комнатной температуре имел электрическое сопротивление 10 МОм, при нагреве до 100°C его сопротивление уменьшилось в 100 раз. Найдите концентрацию и подвижность электронов в полупроводнике, предполагая, что положение уровня Ферми не зависит от температуры. Вкладом дырочной проводимости пренебречь.

7. Образец германия, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при 300 К, характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление 1 Ом см,  $\mu_n = 3800 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 1800 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Определите положение уровня Ферми. Помните, что  $np = n_i^2$

8. Рассчитайте вклад в электропроводность электронной и дырочной составляющих проводимости в германии при 300К и 400К соответственно. Найдите среднее время релаксации, среднюю дрейфовую скорость и длину свободного пробега электронов, при напряженности поля 10 В/см.

9. Образец арсенида галлия n-типа, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при 300 К, характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление 5 Ом см,  $\mu_n = 8600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Определите концентрацию электронов и дырок. Помните, что  $np = n_i^2$

10. Рассчитайте вклад в электропроводность электронной и дырочной составляющих проводимости в арсениде галлия при 300К и 400К соответственно. Во сколько раз изменятся результаты расчета, если принять во внимание температурную зависимость положения уровня Ферми. Найдите среднее время релаксации, среднюю дрейфовую скорость и длину свободного пробега электронов, при напряженности поля 10 В/см.

11. Образец арсенида галлия, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при 300 К,

характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление  $5 \text{ Ом см}$ ,  $\mu_n = 8600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Определите положение уровня Ферми. Помните, что  $p = n_i^2$

12. Найдите электрическое сопротивление цилиндра из германия диаметром  $1 \text{ мм}$  и длиной  $10 \text{ см}$  при  $300 \text{ К}$  и  $400 \text{ К}$ . Найдите среднее время релаксации, среднюю дрейфовую скорость и длину свободного пробега электронов, при напряженности поля  $10 \text{ В/см}$ .

13. Образец кремния n-типа, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при  $300 \text{ К}$ , характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление  $5 \text{ Ом см}$ ,  $\mu_n = 1600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Во сколько раз изменится его удельное сопротивление при  $500 \text{ К}$ , если ширина запрещенной зоны  $1,16 \text{ эВ}$ .

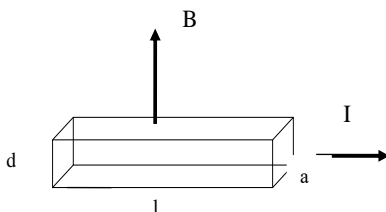
14. Найдите электрическое сопротивление цилиндра из германия диаметром  $1 \text{ мм}$  и длиной  $10 \text{ см}$  при  $300 \text{ К}$  и  $400 \text{ К}$ . Найдите среднее время релаксации, среднюю дрейфовую скорость и длину свободного пробега электронов, при напряженности поля  $10 \text{ В/см}$ .

15. Образец арсенида галлия, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при  $300 \text{ К}$ , характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление  $5 \text{ Ом см}$ ,  $\mu_n = 8600 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p = 500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ ,  $N_c = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Во сколько раз изменится его удельное сопротивление при  $500 \text{ К}$ , если ширина запрещенной зоны  $1,46 \text{ эВ}$ .

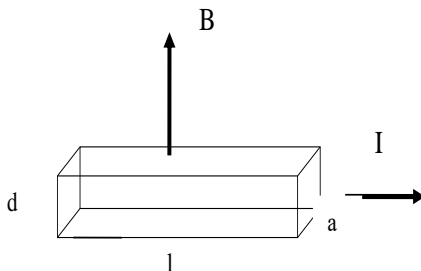
## 2.2 Определение концентрации и подвижности носителей заряда методом Холла

1. В эксперименте по изучению эффекту Холла, проведенном с образцом кремния получены следующие данные:  $l = 1 \text{ см}$ ;  $d = 0,1 \text{ см}$ ;  $a = 0,2 \text{ см}$ ;  $I = 5 \text{ мА}$ ;  $B = 1 \text{ Тл}$ ;  $U = 0,245 \text{ В}$  (в направлении тока);  $U_H = 2 \text{ мВ}$ . Считая, что рассеяние

носителей происходит на LA фонах, определите: а) тип полупроводника; б) концентрацию основных носителей; в) холловскую подвижность носителей, постоянную Холла.



2. В эксперименте по изучению эффекту Холла, проведенном с образцом кремния получены следующие данные:  $l=2,5$  см;  $d=50$  мкм;  $a=0,25$  мм;  $I=2$  мА;  $B=0,5$  Тл;  $U=0,245$  В (в направлении тока);  $U_H=-1,25$  мВ. Считая, что холл-фактор  $r_H=1,18$ , определите: а) тип полупроводника; б) концентрацию основных носителей; холловскую подвижность носителей.

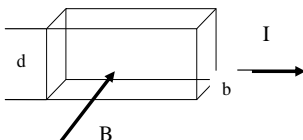


3. Имеется образец германия с поперечным сечением  $0,1 \times 0,2$  см и концентрацией легирующей примеси фосфора  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. вдоль образца протекает ток  $0,6$  А. Перпендикулярно току действует магнитное поле с  $B=0,5$  Тл. Вычислите напряжение и коэффициент Холла между контактами к узким сторонам поверхности образца, при  $300$  К и  $100$  К.

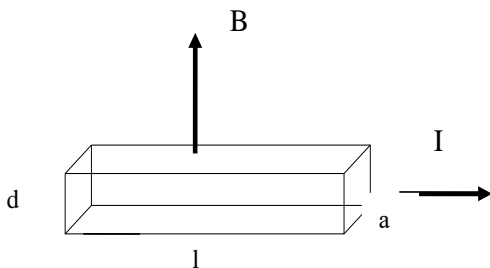


4. Имеется образец кремния с поперечным сечением  $0,1 \times 0,2$  см и концентрацией легирующей примеси бора  $10^{15}$   $\text{см}^{-3}$ . вдоль образца протекает ток  $0,2$  А. Перпендикулярно току действует магнитное поле с  $B=1$  Тл. Вычислите напряжение и коэффициент Холла между контактами к узким сторонам поверхности образца, при  $300$  К и  $100$  К.

5. Определите знак, концентрацию и подвижность носителей заряда, в полупроводнике, обладающем сопротивлением  $338$  Ом. При токе  $50$  мА и магнитной индукции  $0,1$  Тл,  $U_H=200$  мВ. Размеры образца  $b=0,1$  мм,  $d=5$  мм.

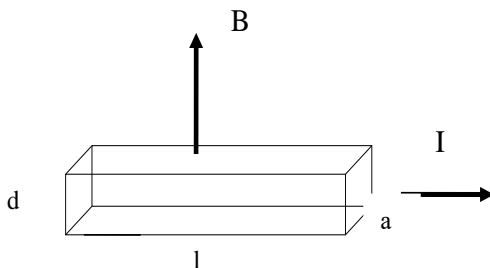


6. В эксперименте по изучению эффекту Холла, проведенном с образцом германия при  $l=2,5$  мм;  $d=0,05$  мм;  $a=0,25$  мм;  $I=2$  мА;  $B=0,5$  Тл; получены следующие данные:  $U=85$  мВ (в направлении тока);  $U_H=-1,25$  мВ. Считая, что холл-фактор  $r_H=1,18$ , определите: а) тип полупроводника; б) концентрацию основных носителей; холловскую подвижность носителей.

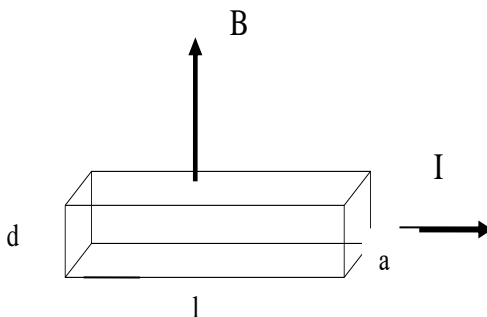


7. В эксперименте по изучению эффекту Холла, проведенном с образцом арсенида галлия при  $l=2$  мм;  $d=0,1$  мм;  $a=0,25$  мм;  $I=2$  мА;  $B=1$  Тл; получены следующие

данные:  $U=85$  мВ (в направлении тока):  $U_H=-4,25$  мВ. Считая, что холл-фактор  $r_H=1,18$ , определите: а) тип полупроводника; б) концентрацию основных носителей; холловскую подвижность носителей.



8. В эксперименте по изучению эффекту Холла, проведенном с образцом кремния получены следующие данные:  $l=2,5$  см;  $d=50$  мкм;  $a=0,25$  мм;  $I=2$  мА;  $B=0,5$  Тл;  $U=0,245$  В (в направлении тока):  $U_H=-1,25$  мВ. Считая, что холл-фактор  $r_H=1,18$ , определите: а) тип полупроводника; б) концентрацию основных носителей; холловскую подвижность носителей.



9. Определите термо эдс, концентрацию, подвижность электронов в германии n-типа, для которого, при некоторых условиях и при 300 К, удельное сопротивление равно  $0,01$  Ом м и  $R_H=7 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/Кл,  $r_H=1,15$ . Определите также концентрацию носителей заряда.

10. Определите термо эдс, концентрацию подвижность электронов в германии p-типа, для которого, при некоторых

условиях и при 300К, электропроводность равна 10 Ом м и  $R_H=7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$ ,  $r_H=1,18$ . Определите также концентрацию носителей заряда.

11. Имеется образец арсенида галлия с поперечным сечением 0,1x0,2 см и концентрацией легирующей примеси (кремния)  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . вдоль образца протекает ток 1 А. Перпендикулярно току действует магнитное поле с  $B=1,5 \text{ Тл}$ . Вычислите напряжение Холла и коэффициент Холла между контактами к узким сторонам поверхности образца, при 300 К и 100 К.

### 2.3 Определение удельного сопротивления и концентрации носителей заряда методом Ван дер Пау

1. При измерении удельного сопротивления прямоугольного образца методом Ван дер Пау (рис. 2.1) ток  $I$  подводится через контакты 1 и 4, а падение напряжения  $U_{2-3}$  измеряют между зондами 2 и 3. Затем геометрию измерений меняют: через зонды 1 и 2 пропускают ток  $I$ , а между другой парой зондов (3 и 4) измеряют падение напряжения  $U_{3-4}$ . найти удельное сопротивление образца. Найти удельное сопротивление образца.

Варианты заданий приведены в таблице 2.1

Значения поправочного коэффициента  $L(\times 10^{-4})$  для случая размещения зондов, как на рисунке 2.1 представлено в Приложение 2

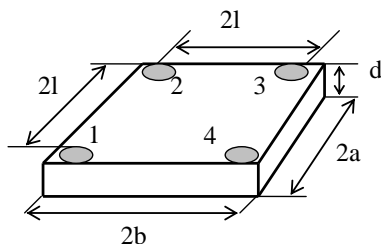


Рисунок 2.1 — Размещение зондов в планарном варианте метода Ван дер Пау

2. На этом же образце, при том же токе проведено измерение напряжения Холла при  $B_z=0,5$  Тл, которое имело величину на контактах 4-3 при пропускании тока, через контакты 1-2 15 мВ. А при токе на контактах 2-3 падение напряжения на контактах 1-4 14 мВ. Определите концентрацию носителей заряда и их подвижность.

Таблица 2.1- Варианты заданий по теме 2.3

№	Геометрические размеры образца				Параметры измерений		
	2a, мм	2l, мм	2b, мм	d, мм	I, мА	$U_{2-3}$ , В	$U_{3-4}$ , В
1	3	2	3	0,1	1	1	1,2
2	8	4	4	0,2	1	1,2	1,4
3	4	4	8	0,1	1	2	2,2
4	8	4	12	0,3	1	1,8	2
5	3	2	3	0,2	1	1	1,2
6	3	2	3	0,3	1	1,2	1,4
7	8	4	4	0,1	1	2,0	2,2
8	4	4	8	0,3	1	1,8	2,0
9	3	2	3	0,2	1	1,4	1,8
10	8	4	12	0,1	1	1,4	1,6

#### 2.4 Определение удельного сопротивления эпитаксиальных структур четырехзондовым методом

1. При измерении удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом двух эпитаксиальных структур на полуизолирующей подложке при измерительном токе 1 мА получены следующие падения напряжения на измерительных контактах 2,2 мВ и 4,4 мВ. Найдите удельное сопротивление и толщину эпитаксиальных структур.

2. Эпитаксиальная структура толщиной 10 мкм нанесена на подложку толщиной 200 мкм с удельным сопротивлением 1 Ом см. При измерительном токе 1 мА получено падения напряжения на измерительных контактах 2,2 мВ и 4,4 мВ. Найдите удельное сопротивление эпитаксиальной структуры.

3. На две подложки из арсенида галлия  $n$ -типа толщиной 200 мкм и 300 мкм и одинаковой концентрацией примеси нанесены тонкие эпитаксиальные пленки арсенида галлия  $n$ -типа одинаковой толщины и концентрацией примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . При измерении удельного сопротивления 4-х зондовым методом установлено, что отношение  $U_{2-3}$  к  $I_{1-4}$  для одного образца равно 0,26 Ом, а для другого 0,24 Ом. Определите толщину пленки и электропроводность материала подложки.

## 2.5 Определение концентрации свободных носителей заряда методом вольт-фарадных характеристик

1. При измерении концентрации свободных носителей в кремнии методом вольт-фарадных характеристик установлено, что при изменении напряжения от -5 до -10 В емкость барьера Шоттки изменяется от 400 пФ до 100 пФ. Определите концентрацию свободных носителей, если диаметр барьера равен 1 мм.

2. При измерении концентрации свободных носителей в кристалле арсенида галлия методом вольт-фарадных характеристик установлено, что при изменении напряжения от -5 до -10 В емкость барьера Шоттки изменяется от 300 пФ до 10 пФ. Определите концентрацию свободных носителей, если диаметр барьера равен 1 мм.

3. При измерении концентрации свободных носителей в кристалле арсенида галлия методом вольт-фарадных характеристик установлено, что при изменении напряжения от -10 до -100 В емкость барьера Шоттки изменяется от 200

пФ до 1 пФ. Определите профиль распределения концентрации свободных носителей, если диаметр барьера равен 1 мм.

4. При измерении концентрации свободных носителей в кристалле кремния методом вольт-фарадных характеристик установлено, что при изменении напряжения от -10 до -100 В емкость барьера Шоттки изменяется от 200 пФ до 10 пФ. Определите профиль распределения концентрации свободных носителей, если диаметр барьера равен 1 мм.

## 2.7 Определение эффективной массы

1. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $V=0,1$  Вб/м<sup>2</sup>, а максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1,4 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>. Найдите эффективную плотность состояний в зоне проводимости.

2. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $V=0,1$  Вб/м<sup>2</sup>, при этом  $N_c=10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Найдите резонансную частоту.

3. В эксперименте по циклотронному резонансу максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1,8 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup> при  $N_c=10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Найдите  $V$ .

4. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $V=0,1$  Вб/м<sup>2</sup>, а максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1,4 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>. Найдите радиус орбиты электрона при его скорости  $3 \cdot 10^4$  м/с.

5. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $V=0,2$  Вб/м<sup>2</sup>, а максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1,2 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>. Найдите  $N_c$ .

6. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $V=0,2$  Вб/м<sup>2</sup>,  $N_c=10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Найдите резонансную частоту.

7. В эксперименте по циклотронному резонансу максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1,3 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup> при  $N_c=10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Найдите  $V$ .

8. В эксперименте по циклотронному резонансу  $B=0,1$  Вб/м<sup>2</sup>, а максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1,4 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>. Найдите радиус орбиты электрона при его скорости  $3 \cdot 10^4$  м/с.

9. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $B=0,15$  Вб/м<sup>2</sup>, а максимальное поглощение обнаружено при  $\nu=1 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>. Найдите  $N_c$ .

## 2.8 Оптические свойства кристаллов

1. Совершенный кристалл GaAs толщиной 1 мм освещается при 0 К фотонами с энергией 1,2 эВ ( $\alpha = 10$  см<sup>-1</sup>). Поток света прошедший сквозь кристалл составляет  $10^{20}$  фотон/см<sup>2</sup>·с. Найти величину потока света проходящего сквозь кристалл.

2. Совершенный кристалл кремния толщиной 1 мм освещается при 0 К фотонами с энергией 1 эВ ( $\alpha = 10$  см<sup>-1</sup>). Поток света прошедший сквозь кристалл составляет 1 Дж/см<sup>2</sup>. Найти величину потока света падающего на кристалл.

3. Совершенный кристалл германия толщиной 1 мм освещается при 0 К фотонами с энергией 0,5 эВ ( $\alpha = 10$  см<sup>-1</sup>). Поток света прошедший сквозь кристалл составляет 1 Дж/см<sup>2</sup>. Найти величину потока света падающего на кристалл.

4. Совершенный кристалл GaAs толщиной 1 мм освещается при 0 К фотонами с энергией 1,2 эВ ( $\alpha = 10$  см<sup>-1</sup>). Поток света прошедший сквозь кристалл составляет  $10^{20}$  фотон/см<sup>2</sup>·с. Найти величину потока света падающего на кристалл.

5. Совершенный кристалл Ge толщиной 1 мм освещается при 0 К фотонами с энергией 0,82 эВ ( $\alpha = 10$  см<sup>-1</sup>). Поток света составляет  $10^{18}$  фотон/см<sup>2</sup>·с. Найти величину потока света проходящего сквозь кристалл. Найдите коэффициент экстинкции в Ge.

6. Определите коэффициент отражения поверхностью образца Ge удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  излучения длиной волны  $1 \text{ мкм}$  при  $300$  и  $400 \text{ К}$ . Для определения  $k$  использовать зависимость  $k = f(\sigma)$ .

7. Используя зависимость  $\alpha = f(\sigma)$ , найти коэффициент пропускания и коэффициент отражения излучения длиной волны  $1 \text{ мкм}$  образца германия толщиной  $1 \text{ см}$  собственной проводимости при  $300$  и  $400 \text{ К}$ .

8. Совершенный кристалл Si толщиной  $1 \text{ мм}$  освещается при  $0 \text{ К}$  фотонами с энергией  $1,2 \text{ эВ}$  ( $\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$ ). Поток света составляет  $10^{20}$  фотон/ $\text{см}^2\cdot\text{с}$ . Найти величину потока света проходящего сквозь кристалл. Найдите коэффициент экстинции.

9. Определите коэффициент отражения поверхностью образца Si удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  излучения длиной волны  $1 \text{ мкм}$  при  $300$  и  $500 \text{ К}$ . Для определения  $k$  использовать зависимость  $k = f(\sigma)$ .

10. Используя зависимость  $\alpha = f(\sigma)$ , найти коэффициент пропускания излучения длиной волны  $1 \text{ мкм}$  образца кремния толщиной  $1 \text{ см}$ .

11. Совершенный кристалл Ge толщиной  $1 \text{ мм}$  освещается при  $0 \text{ К}$  фотонами с энергией  $0,82 \text{ эВ}$  ( $\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$ ). Поток света составляет  $10^{18}$  фотон/ $\text{см}^2\cdot\text{с}$ . Найти величину потока света проходящего сквозь кристалл.

12. Используя зависимость  $\alpha = f(\sigma)$ , найти коэффициент пропускания излучения длиной волны  $0,6 \text{ мкм}$  образца кремния толщиной  $1 \text{ см}$  собственной проводимости при  $300$  и  $600 \text{ К}$ .

13. Определите коэффициент отражения поверхностью образца GaAs удельным сопротивлением  $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  излучения длиной волны  $1 \text{ мкм}$  при  $300$  и  $500 \text{ К}$ . Для определения  $k$  использовать зависимость  $k = f(\sigma)$ .



## 2.9 Определение концентрации носителей методом ИК-эллипсометрии

1. Образец германия *n*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1000 \text{ см}^{-1}$  равен 20 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

2. Образец кремния *p*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 2000 \text{ см}^{-1}$  равен 50 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

3. Образец арсенида галлия *n*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1500 \text{ см}^{-1}$  равен 40 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

4. Образец германия *p*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 2000 \text{ см}^{-1}$  равен 50 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

5. Образец кремния *n*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1000 \text{ см}^{-1}$  равен 20 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

6. Образец арсенида галлия *p*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1000 \text{ см}^{-1}$  равен 20 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

7. Образец германия *n*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1500 \text{ см}^{-1}$  равен 30 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

8. Образец кремния *p*-типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1000 \text{ см}^{-1}$  равен 30 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

9. Образец арсенида галлия  $n$ -типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 2000 \text{ см}^{-1}$  равен 30 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

10. Образец германия  $p$ -типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 2000 \text{ см}^{-1}$  равен 20 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

11. Образец арсенида галлия  $p$ -типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1500 \text{ см}^{-1}$  равен 40 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

12. Образец кремния  $n$ -типа толщиной 1 мм покрыт слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 2000 \text{ см}^{-1}$  равен 45 %. Найдите концентрацию носителей заряда.  $T=300 \text{ К}$ .

## 2.10 Просветляющие покрытия

1. Дана система подложка  $\text{Si}$  и нанесенный на нее слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,25 мкм. Найти длину волны, при которой будет наблюдаться минимум отражения от системы пленка-подложка.

2. Дана система подложка  $\text{Ge}$  и нанесенный на нее слой  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  толщиной 0,25 мкм. Найти длину волны, при которой будет наблюдаться минимум отражения от системы пленка-подложка.

3. На поверхность  $\text{Si}$  нанесена тонкая пленка  $\text{SiO}_2$ . В результате в системе получен минимум коэффициента отражения на длине волны 1 мкм. Найти толщину пленки.

4. На поверхность  $\text{Ge}$  нанесена тонкая пленка  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . В результате в системе получен минимум коэффициента отражения на длине волны 1 мкм. Найти толщину пленки.

5. На поверхность стекла ( $n=1,56$ ) нанесен слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной  $0,25$  мкм. Найти длину волны, при которой наблюдается максимум коэффициента отражения.

6. На поверхность сапфира ( $n=1,76$ ) нанесен слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной  $0,25$  мкм. Найти длину волны, при которой наблюдается максимум коэффициента отражения.

7. Дана система подложка Si, первый слой  $\text{SiO}_2$  и второй слой. Какой показатель преломления должен иметь второй слой для обеспечения минимума отражения от системы?

## 2.11 Отражение поляризованного света

1. На пластину из кремния толщиной  $1$  см нормально падает плоскополяризованный свет длиной волны  $1$  мкм. Через пластину в этом случае проходит  $20\%$  света. Нужно определить коэффициент отражения этого же света при двух ориентациях вектора поляризации - параллельно плоскости падения света и нормально к плоскости падения, при углах падения  $40^\circ$  и  $60^\circ$ .

2. На пластину из арсенида галлия толщиной  $1$  см нормально падает плоскополяризованный свет длиной волны  $10$  мкм. Через пластину в этом случае проходит  $10\%$  света. Нужно определить коэффициент отражения этого же света при двух ориентациях вектора поляризации - параллельно плоскости падения света и нормально к плоскости падения, при углах падения  $40^\circ$  и  $60^\circ$ .

3. На пластину из германия толщиной  $1$  см нормально падает плоскополяризованный свет длиной волны  $5$  мкм. Через пластину в этом случае проходит  $5\%$  света. Нужно определить коэффициент отражения этого же света при двух ориентациях вектора поляризации - параллельно плоскости падения света и нормально к плоскости падения, при углах падения  $40^\circ$  и  $60^\circ$ .

4. На пластину из кремния толщиной 1 см нормально падает плоскополяризованный свет длиной волны 10 мкм. Через пластину в этом случае проходит 15% света. Нужно определить коэффициент отражения этого же света при двух ориентациях вектора поляризации: параллельно плоскости падения света и нормально к плоскости падения, при углах падения  $40^\circ$  и  $60^\circ$ .

## 2.12 Люминесценция

1. Пластина из кремния ( $n=4$ ,  $k=0,21$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается излучением He-Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

2. Пластина из германия ( $n=5,7$ ,  $k=0,8$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается излучением He-Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

3. Пластина из полупроводника GaSb ( $n=5$ ,  $k=0,82$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается излучением He - Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

4. Пластина из полупроводника InAs ( $n=3,86$ ,  $k=0,8$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается излучением He - Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

5. Пластина из полупроводника InSb ( $n=4,4$ ,  $k=2$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается излучением He - Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

6. Пластина из полупроводника GaAs ( $n=3,86$ ,  $k=0,27$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается

излучением He - Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

7. Пластина из полупроводника GaP ( $n=3,34$ ,  $k=0,01$ ) собственной проводимости толщиной  $0,1 \text{ мм}$  освещается излучением He - Ne лазера с плотностью энергии  $0,1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

### 2.13 Эллипсометрия

1. Построить зависимость  $\psi = f(n_3)$  для  $n_3 = 1 \div 4$  ( $\theta_i = 45^\circ$ ).

2. Построить зависимость  $\psi = f(\theta_i)$  если  $\theta_i = 45 \div 70^\circ$  для  $\text{SiO}_2$  ( $n = 1,46$ ).

3. Построить зависимость  $\psi = f(n_3)$  для  $n_3 = 1 \div 4$  ( $\theta_i = 60^\circ$ ).

4. Построить зависимость  $\psi = f(\theta_i)$  если  $\theta_i = 45 \div 70^\circ$  для Si ( $n = 3,8$ ).

5. Построить зависимость  $\psi = f(\theta_i)$  если  $\theta_i = 45 \div 70^\circ$  для воды ( $n = 1$ ).

### 2.14 Рентгеновские методы исследования кристаллической структуры

1. Для рентгеноструктурного анализа Cu используется излучение  $K_\alpha$  Fe (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- Длину волны рентгеновского излучения;
- Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- Межплоскостное расстояние.

2. Для рентгеноструктурного анализа Al используется излучение  $K_{\alpha}$  Cr (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- a. Длину волны рентгеновского излучения;
- b. Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c. Межплоскостное расстояние.

3. Для рентгеноструктурного анализа Au используется излучение  $K_{\alpha}$  Co (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- a. Длину волны рентгеновского излучения;
- b. Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c. Межплоскостное расстояние.

4. Для рентгеноструктурного анализа Mo используется излучение  $K_{\alpha}$  Ni (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- a. Длину волны рентгеновского излучения;
- b. Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c. Межплоскостное расстояние.

5. Для рентгеноструктурного анализа Ni используется излучение  $K_{\alpha}$  Cu (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- a. Длину волны рентгеновского излучения;
- b. Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c. Межплоскостное расстояние.

6. Для рентгеноструктурного анализа Ag используется излучение  $K_{\alpha}$  Mo (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- a. Длину волны рентгеновского излучения;
- b. Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c. Межплоскостное расстояние.

7. Для рентгеноструктурного анализа Pt используется излучение  $K_{\alpha}$  Ag (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

- a. Длину волны рентгеновского излучения;
- b. Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c. Межплоскостное расстояние.

8. Найти углы отражения от плоскостей [100], [110], [111] кристалла марганца, соответствующие дифракционным максимумам 1 – ого порядка для характеристического рентгеновского излучения Cu;

а) учитывая, что интенсивность дифракционного максимума зависит от плотности заполнения плоскости атомами, определите относительную интенсивность максимума для указанных плоскостей;

б) графически изобразите вид дифрактограммы в координатах интенсивность-угол отражения.

9. Найти углы отражения от плоскостей [100], [110], [111] кристалла Na, соответствующие дифракционным максимумам 1 – ого порядка для характеристического рентгеновского излучения Cr.

а) учитывая, что интенсивность дифракционного максимума зависит от плотности заполнения плоскости атомами, определите относительную интенсивность максимума для указанных плоскостей;

б) графически изобразите вид дифрактограммы в координатах интенсивность-угол отражения.

10. Найти углы отражения от плоскостей [100], [110], [111] кристалла Cr, соответствующие дифракционным максимумам 1 – ого порядка для характеристического рентгеновского излучения Cu.

а) учитывая, что интенсивность дифракционного максимума зависит от плотности заполнения плоскости атомами, определите относительную интенсивность максимума для указанных плоскостей;

б) графически изобразите вид дифрактограммы в координатах интенсивность-угол отражения.

11. Найти углы отражения от плоскостей [100], [110], [111] кристалла Au, соответствующие дифракционным максимумам 1 – ого порядка для характеристического рентгеновского излучения Co.

а) учитывая, что интенсивность дифракционного максимума зависит от плотности заполнения плоскости атомами, определите относительную интенсивность максимума для указанных плоскостей;

б) графически изобразите вид дифрактограммы в координатах интенсивность-угол отражения.

12. Найти углы отражения от плоскостей [100], [110], [111] кристалла Nb, соответствующие дифракционным максимумам 1 – ого порядка для характеристического рентгеновского излучения Ni.

а) учитывая, что интенсивность дифракционного максимума зависит от плотности заполнения плоскости атомами, определите относительную интенсивность максимума для указанных плоскостей;

б) графически изобразите вид дифрактограммы в координатах интенсивность-угол отражения.

## **2.15 Методы обратного резерфордского рассеяния и масс-спектропии вторичных ионов**

1. Статический масс-анализатор. Радиус траектории ионов 1 м. Магнитная индукция в зазоре 0,54 Тл. Найти ускоряющие напряжения для всех видов ионов ацетилена, напряжение ионизации 100 В.

2. Статический масс-анализатор. Радиус траектории ионов 1 м. Магнитная индукция в зазоре 0,54 Тл. Найти ускоряющие напряжения для всех видов ионов воздуха, напряжение ионизации 100 В.

3. Статический масс-анализатор. Радиус траектории ионов 1 м. Магнитная индукция в зазоре 0,54 Тл. Найти ускоряющие напряжения для всех видов ионов ацетона, напряжение ионизации 100 В.

4. Статический масс-анализатор. Радиус траектории ионов 1 м. Магнитная индукция в зазоре 0,54 Тл. Найти ускоряющие напряжения для всех видов ионов GaAs, напряжение ионизации 100 В.

5. Статический масс-анализатор. Радиус траектории ионов 1 м. Магнитная индукция в зазоре 0,54 Тл. Найти ускоряющие напряжения для всех видов ионов Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, напряжение ионизации 100 В.



6. Статический масс-анализатор. Радиус траектории ионов 1 м. Магнитная индукция в зазоре 0,54 Тл. Найти ускоряющие напряжения для всех видов ионов  $\text{SiO}_2$ , напряжение ионизации 100 В.

7. В методе Резерфордского рассеяния пленка никеля бомбардируется ионами  ${}^4\text{He}$  энергией 1 МэВ. Определите энергию отраженных от передней плоскости ионов под углом  $45^\circ$ .

8. В методе Резерфордского рассеяния пленка золота бомбардируется ионами  $\text{Ar}$  энергией 1 МэВ. Определите энергию отраженных от передней плоскости ионов под углом  $30^\circ$ .

9. В методе Резерфордского рассеяния пленка хрома бомбардируется ионами  ${}^4\text{He}$  энергией 0,5 МэВ. Определите энергию отраженных от передней плоскости ионов под углом  $45^\circ$ .

10. В методе Резерфордского рассеяния энергия отраженных от передней плоскости пленки никеля ионов  $\text{He}$  под углом  $45^\circ$  имеет величину 0,5 МэВ. Определите начальную энергию ионов  $\text{He}$ .

11. В методе Резерфордского рассеяния энергия отраженных от передней плоскости пленки золота ионов  $\text{Ar}$  под углом  $45^\circ$  имеет величину 0,5 МэВ. Определите начальную энергию ионов  $\text{Ar}$ .

12. В методе Резерфордского рассеяния энергия отраженных от передней плоскости пленки хрома ионов  $\text{Ar}$  под углом  $45^\circ$  имеет величину 0,5 МэВ. Определите начальную энергию ионов  $\text{Ar}$ .

13. Найдите разрешающую способность масс-спектрометра, необходимую для отделения линии  ${}^{28}\text{Si}^+$  от линии мешающего иона  ${}^{56}\text{Fe}^{2+}$ .

14. Найдите разрешающую способность масс-спектрометра, необходимую для отделения линии  ${}^{69}\text{Ga}^+$  от линии мешающего иона  ${}^{75}\text{As}^{2+}$ .

15. Найдите разрешающую способность масс-спектрометра, необходимую для отделения линии  $^{115}\text{In}^+$  от линии мешающего иона  $^{121}\text{Sb}^{2+}$ .

16. Найдите разрешающую способность масс-спектрометра, необходимую для отделения линии  $^{69}\text{Ga}^+$  от линии мешающего иона  $^{30}\text{P}^{2+}$ .

### 3 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

#### Вариант 1

Разработать фотоприемное устройство для спектрометрии. Представить принципиальную оптическую и электрическую схемы устройства. Рассчитать режимы работы элементов и погрешность измерений.

*Исходные данные:*

1. Спектральный диапазон 0,2 – 1 мкм.
2. Рабочая температура 30°C.
3. Частота модуляции 100-1000 Гц.

#### Вариант 2

Разработать фотоприемное устройство для спектрометрии. Представить принципиальную оптическую и электрическую схемы устройства. Рассчитать режимы работы элементов и погрешность измерений.

*Исходные данные:*

1. Спектральный диапазон 1 – 3 мкм.
2. Рабочая температура -30°C.

#### Вариант 3

Метод исследования оптических свойств тонких слоев SiO<sub>2</sub> в инфракрасной области спектра. Представить принципиальную оптическую, электрическую и монтажную схемы устройства. Разработать технологию изготовления элементов схемы. Рассчитать режимы работы элементов.

*Исходные данные:*

1. Спектральный диапазон 0,4-2 мкм.
2. Плотность мощности излучения 103 Вт/см<sup>2</sup>:
3. Длительность импульсов 0,1-10 с;
4. Диаметр обрабатываемого изделия 100 мм.

#### Вариант 4

Исследование МДП наноструктур методом вольт - фарадных характеристик. Представить анализ устройства. Привести электрическую схему. Представить монтажную схему. Разработать технологию изготовления элементов схемы. Рассчитать режимы работы элементов.

*Исходные данные*

1. Передатчик – полупроводниковый лазер.
2. Приемник – кремниевый фотодиод.
3. Длина линии 1 км.
4. Скорость передачи информации .
5. Рабочая частота 1 ГГц.

#### Вариант 5

Разработать устройство для лазерной эллипсометрии. Представить анализ устройства. Привести принципиальную оптическую и электрическую схемы. Рассчитать режимы работы элементов. Рассчитать погрешность измерений.

*Исходные данные:*

1. Длина волны лазерного излучения 623 нм;
2. Частота следования импульсов 10 Гц;
3. Рабочее поле диаметром не менее 40 мм;
4. Плотность энергии 1 Дж/см<sup>2</sup>.

#### Вариант 6

Разработать устройство для рамановской спектроскопии. Представить анализ устройства. Привести принципиальную оптическую и электрическую схемы. Представить монтажную схему. Представить схему последовательности формирования приборов. Разработать технологию изготовления элементов схемы. Рассчитать режимы работы элементов.

*Исходные данные:*

1. Кремниевая ПЗС матрица, 2048 пикселей.
2. Диодный лазер длина волны 532 нм, и мощность 150 мВт.

Дополнительная литература:

1. Барба Д.Ф. Приборы с зарядовой связью. – М., Мир, 1982 – 240 с.
2. Воронов и др. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью – современная элементная база фотонных систем. Электронная промышленность, 2003, № 2.

#### Вариант 7

Устройство для оптической спектроскопии. Представить анализ устройства. Привести принципиальную оптическую и электрическую схемы. Представить монтажную схему. Разработать технологию изготовления элементов схемы. Рассчитать режимы работы элементов. Рассчитать погрешность измерений.

*Исходные данные:*

1. Спектральный диапазон 0,2 – 1 мкм.
2. Рабочая температура 30°C.
3. Фотоприемник Кремниевая ПЗС линейка 2048 пикселей.

#### Вариант 8

Исследование гранулометрического состава нанопорошков люминофора.

#### Вариант 9

Исследование полупроводниковых наногетероструктур GaN.

#### Вариант 10

Исследование многослойных тонкопленочных наноструктур металл-SiO<sub>2</sub>-металл.

#### Вариант 11

Исследование гранулометрического состава нанопорошков люминофора.

Вариант 12

Оценка погрешности измерений параметров  
нанообъектов методом растровой электронной микроскопии.

Вариант 13

Оценка погрешности измерений параметров  
нанообъектов методом ИК Фурье-спектроскопии.

Вариант 14

Оценка погрешности измерений параметров  
нанообъектов методом Рамановской спектроскопии.

Вариант 15

Оценка погрешности измерений параметров  
нанообъектов методом спектральной эллипсометрии.



6. Условие интерференции Лауэ?

- а)  $(\cos\theta - \sin\theta) = m\lambda$ ;                      б)  $2d\sin\theta = m\lambda$ ;  
в)  $a(\cos\theta - \cos\theta^1) = m\lambda$ ;                г)  $d(\sin\theta - \sin\theta^1) = m\lambda$ .

7. Какие физические явления в кристаллах обусловлены ангармоническими эффектами?

- а) теплоемкость и теплота плавления;  
б) теплопроводность и тепловое расширение;  
в) электропроводность и электрическое сопротивление;  
г) прочность и пластичность.

8. Что такое коэффициент линейного теплового расширения:

- а)  $\alpha = \Delta\ell/\ell$ ;                                      б)  $\alpha = (\Delta\ell/\ell)(1/\Delta T)$ ;  
в)  $\alpha = \Delta\ell/\ell T$ ;                                    г)  $\alpha = (\ell/\Delta\ell)(1/T)$ ;

9. Закон распространения тепла Фурье:

- а)  $Q = -\lambda \text{grad} T$ ;                                б)  $Q = \lambda(T_1 - T_2)$ ;  
в)  $Q = \lambda(d^2T/dx^2)$ ;                              г)  $Q = C_v \text{grad} T$ .

10. Какой формулой Дебай установил связь теплопроводности с теплоемкостью?

- а)  $\lambda = C_v T$ ;                                        б)  $\lambda = C_v dT/dx$ ;  
в)  $\lambda = dC_v/dT$ ;                                    г)  $\lambda = (1/3)v_{зв} C_v l_{св}$ .

11. Как математически формулируется закон Видемана-Франца?

- а)  $(\lambda/\sigma) = LT$ ;                                    б)  $(\lambda \cdot \sigma) = LT$ ;  
в)  $(\lambda/\sigma) = LdT$ ;                                г)  $(\lambda/\sigma) = kT$ .



12. Какую зависимость используют для определения глубины уровня залегания примеси в запрещенной зоне:

- а) зависимость  $E_F=f(T)$ ;
- б) зависимость  $n=f(T)$ ;
- в) зависимость  $\ln n=f(1/T)$ ;
- г) зависимость  $\ln N_d=f(T)$ .

13. Сколько участков различной крутизны содержит зависимость  $\ln n =f(1/T)$  для полупроводника с одним типом легирующей примеси:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.

14. Что является качественной мерой рассеяния носителей:

- а) длина свободного пробега носителей между столкновениями;
- б) эффективное сечение рассеяния;
- в) концентрация рассеивающих центров;
- г) дифференциальное сечение рассеяния.

15. При рассеянии электронов на колебаниях решетки их подвижность с ростом температуры:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) не изменяется.

16. При рассеянии электронов на ионах примеси их подвижность с ростом температуры:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) не изменяется.

17. С увеличением степени легирования подвижность электронов и дырок:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) не изменяется.

18. С увеличением температуры от  $0^{\circ}\text{K}$  до комнатной подвижность электронов и дырок:

- а) сначала уменьшается пропорционально  $T^{3/2}$ , а затем увеличивается пропорционально  $T^{-3/2}$ ;
- б) сначала увеличивается пропорционально  $T^{3/2}$ , а затем увеличивается пропорционально  $T^{-3/2}$ ;
- в) сначала увеличивается пропорционально  $T^{3/2}$ , а затем уменьшается пропорционально  $T^{-3/2}$ ;
- г) не изменяется.

19. Чем определяется вероятность рассеяния электронов:

- а) эффективной массой;
- б) зарядом электрона;
- в) временем релаксации;
- г) эффективным сечением, концентрацией центров рассеяния, энергией электронов.

20. Чьё имя носит эффект возникновения термо-ЭДС на контакте двух твердых тел, при наличии разности температур:

- а) Джоуля-Ленца;
- б) Пельтье;
- в) Томсона;
- г) Зеебека.

21. Чьё имя носит эффект охлаждения контакта двух твердых тел, при протекании через контакт тока:

- а) Джоуля-Ленца;                      б) Пельтье;  
в) Томсона;                                г) Зеебека.

22. Чьё имя носит эффект нагрева твердых тел, при протекании через них электрического тока:

- а) Джоуля-Ленца;                      б) Пельтье;  
в) Томсона;                                г) Зеебека.

23. Тип полупроводника определяют по знаку термо-ЭДС холодного конца спая полупроводника с металлом. Для полупроводника n-типа знак ЭДС холодного конца:

- а) положительный;  
б) отрицательный;  
в) переменный.

24. Между коэффициентом термо-ЭДС  $\alpha$  и коэффициентом Пельтье  $\Pi$  существует связь в виде:

- а)  $\Pi = \alpha Q$ ;                                б)  $\Pi = \alpha T$ ;  
в)  $\Pi = \alpha I$ ;                                г)  $\Pi = \alpha \text{grad} T$ .

25. От каких параметров электронного полупроводника зависит  $\alpha$  (коэффициент термо-ЭДС).

- а) от эффективной плотности состояний в зоне проводимости, концентрации электронов и типа рассеяния;  
б) от концентрации и подвижности электронов, от температуры;  
в) от типа рассеяния и температуры;  
г) от концентрации дырок и их подвижности.

26. Как называется группа эффектов, возникающих в полупроводнике при совместном воздействии на них электрического и магнитного полей:

- а) термомагнитные;
- б) термоэлектрические
- в) гальваномагнитные;
- г) тензорезистивные.

27. К какому типу эффектов относится эффект Холла:

- а) продольным и четным;
- б) продольным и нечетным;
- в) поперечным и нечетным;
- г) поперечным и четным.

28. Какой формулой определяется ЭДС Холла:

- а)  $E_{\text{Холл}} = (1/en)j_n B$ ;
- б)  $E_{\text{Холл}} = (1/en)UI$ ;
- в)  $E_{\text{Холл}} = (\mu/en)IB$ ;
- г)  $E_{\text{Холл}} = enj_n B$ .

29. Каким выражением определяется постоянная Холла  $R_x$  для собственного полупроводника:

- а)  $R_x = -A/ne$ ;
- б)  $R_x = A/pe$ ;
- в)  $R_x = (A/n_i e) [(\mu_p - \mu_n) / (\mu_p + \mu_n)]$  ;
- г)  $R_x = -A [(\mu_p - \mu_n) / (\mu_p + \mu_n)]$ .

30. Если ток  $I$  в образце в виде прямоугольного параллелепипеда протекает слева направо, а магнитное поле  $B$  направлено перпендикулярно току (к нам), то куда будут отклоняться электроны и дырки?

- а) электроны на нижнюю грань, дырки на верхнюю грань;
- б) электроны и дырки на верхнюю грань;
- в) электроны и дырки на нижнюю грань;



35. Что называют эффектом поля?

- а) явление изменения заряда поверхности полупроводника;
- б) явление изменения подвижности носителей заряда в полупроводнике под действием электрического поля;
- в) явление изменения проводимости полупроводника под действием внешнего электрического поля;
- г) явление изменения знака проводимости полупроводника.

36. Что характеризует коэффициент поглощения:

- а) интенсивность света прошедшего через образец;
- б) интенсивность света, поглощенного в образце с единичной толщиной;
- в) интенсивность света, поглощенного в образце в единицу времени;
- г) интенсивность света вошедшего в образец.

37. Как записывается закон Бугера-Ламберта?

- а)  $I(x) = (1-R)\exp(-\alpha x)$ ;
- б)  $I(x) = \exp(-\alpha x)$ ;
- в)  $I(x) = I_0(1-R)\exp(-\alpha x)$ ;
- г)  $I(x) = I_0(1-R)$ .

38. Как записывается закон Бера?

- а)  $I(x) = (1-R)\exp(-kcx)$ ;
- б)  $I(x) = \exp(-kcx)$ ;
- в)  $I(x) = I_0(1-R)\exp(-kcx)$ ;
- г)  $I(x) = I_0(1-R)$ .

39. Что такое оптическая плотность кристалла?

- а)  $D = I_x/I_0$ ;
- б)  $D = \lg(I_x/I_0)$ ;
- в)  $D = I_0/I_x$ ;
- г)  $D = \lg(I_0/I_x)$ .

40. Какова природа появления полос в УФ спектрах поглощения кристаллов:

- а) изменение колебательной энергии молекул;
- б) переходы между внешними электронными состояниями;
- в) изменение энергетического состояния ядер;
- г) переходы между внутренними электронными состояниями.

41. Какова природа появления полос в ИК-спектрах поглощения кристаллов:

- а) изменение колебательной энергии молекул;
- б) переходы между внешними электронными состояниями;
- в) изменение энергетического состояния ядер;
- г) переходы между внутренними электронными состояниями.

42. Какова природа появления полос в рентгеновских спектрах поглощения кристаллов:

- а) изменение колебательной энергии молекул;
- б) переходы между внешними электронными состояниями;
- в) изменение энергетического состояния ядер;
- г) переходы между внутренними электронными состояниями.

43. Как называются колебания атомов в молекуле, при которых изменяется только длина связи:

- а) веерные;
- б) крутильные;
- в) деформационные;
- г) валентные.





49. Что такое «химический сдвиг» в методе РФЭС?

- а) разность между энергией фотонов и энергией электронов;
- б) разность энергий связи электронов исследуемого вещества и эталонного образца;
- в) разность между кинетической и потенциальной энергией электронов в исследуемом образце;
- г) изменение кинетической энергии при изменении энергии фотонов.

50. Сколько электронов участвует в ОЖЕ-процессе:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.

51. Какой зависимостью связаны коэффициент поглощения и ширина запрещенной зоны:

- а)  $\alpha = A(\Delta E_g)^{1/2}$ ;
- б)  $\alpha = A(h\nu)^{1/2}$ ;
- в)  $\alpha = A(h\nu - \Delta E_g)^{1/2}$ ;
- г)  $\alpha = A(h\nu + \Delta E_g)^{1/2}$ .

52. Что такое правило отбора для электронных переходов:

- а)  $p^1 = p, k^1 = k$ ;
- б)  $h\nu = \Delta E_g$ ;
- в)  $E = h\nu$ ;
- г)  $h\nu = \Delta E_g + \hbar^2 k^2 / 2m_n^*$ .

53. Как называется поглощение света, связанное с электронными переходами внутри разрешенных зон?

- а) фундаментальное поглощение;
- б) поглощение свободными электронами;
- в) экситонное поглощение;
- г) примесное поглощение.

54. В какую сторону смещается край полосы собственного поглощения Ge и GaAs при повышении температуры?

- а) сторону длинных волн;
- б) в сторону коротких длин волн;
- в) сначала длинных, а затем коротких длин волн;
- г) остается на месте.

55. Что такое люминесценция:

- а) тепловое излучение твердых тел;
- б) отражение и преломление твердым телом света;
- в) свечение твердых тел при протекании через них электрического тока;
- г) избыточное над тепловым, свечение твердых тел.

56. Какое излучение называется спонтанным излучением.

- а) излучение, которое совершается без внешнего воздействия;
- б) излучение, которое совершается при внешнем воздействии;
- в) излучение, которое существует длительное время без внешнего воздействия;
- г) излучение, которое поглощается телом при внешнем воздействии.

57. В чем принципиальное отличие лазерного от люминесцентного излучения:

- а) в интенсивности излучения;
- б) в длине волны излучения;
- в) в пространственной распределенности излучения;
- г) в когерентности излучения.

58. Что такое фотопроводимость?

- а) проводимость, обусловленная высокой концентрацией, вводимых в полупроводник извне, фотонов;
- б) проводимость полупроводника, обусловленная его нагревом оптическим излучением;
- в) добавочная проводимость, обусловленная носителями заряда, созданными оптической генерацией;
- г) уменьшение проводимости полупроводника, обусловленная поглощением квантов света.

59. Что называют квантовым выходом фотоэффекта:

- а) число электронов, образуемых одним поглощенным фотоном;
- б) число пар носителей заряда, образуемых одним поглощенным фотоном;
- в) число пар носителей заряда, образуемых падающими на полупроводник фотонами;
- г) число дырок, образуемых одним поглощенным фотоном.

60. Что такое удельная фоточувствительность полупроводника  $S_{\phi}$ :

- а) произведение фотопроводимости на интенсивность света;
- б) отношение фотопроводимости к интенсивности света;
- в) отношение интенсивности света к величине фотопроводимости;
- г) число пар носителей заряда, образуемых падающими на полупроводник фотонами.

61. Что называют эффектом Дембера:

а) воздействие на полупроводник фотонами;  
б) эдс, возникающая в освещенном полупроводнике,  
в) эдс, возникающая в освещенном полупроводнике,  
вследствие различия в коэффициентах диффузии электронов  
и дырок.

62. Что такое тормозное рентгеновское излучение:

а) излучение, возникающее за счет торможения  
фотонов в веществе;  
б) излучение, обусловленное потерей энергии  
ускоренного электрона при его движении в веществе;  
в) рентгеновское излучение, выходящее из вещества;  
г) излучение, обусловленное переходами электронов с  
заполненных оболочек на свободную.

63. Что такое характеристическое рентгеновское  
излучение:

а) излучение, возникающее за счет торможения  
фотонов в веществе;  
б) излучение, обусловленное потерей энергии  
ускоренного электрона при его движении в веществе;  
в) рентгеновское излучение, выходящее из вещества;  
г) излучение, обусловленное переходами электронов с  
заполненных оболочек на свободные.

64. От каких параметров зависит интенсивность  
тормозного рентгеновского излучения:

а) от первичной энергии электрона и атомного номера  
материала анода;  
б) от энергии ускоренного электрона;  
в) от удельной плотности материала анода;  
г) от электронной структуры материала анода.

65. Какое свойство рентгеновского излучения используется для определения кристаллической структуры материалов:

- а) поглощение излучения веществом;
- б) фотоэффект;
- в) дифракция рентгеновского излучения в кристалле;
- г) рассеяние свободными электронами.

66. Каким методом исследуется концентрация элементов в тонких пленках:

- а) дифракция электронов;
- б) резерфордовское обратное рассеяние;
- в) фотоэлектронная спектроскопия;
- г) электронная оже-спектроскопия.

67. Какой метод позволяет определить энергию химической связи:

- а) дифракция электронов;
- б) резерфордовское обратное рассеяние;
- в) фотоэлектронная спектроскопия;
- г) электронная оже-спектроскопия.

68. Какой метод позволяет определить распределение элементов по толщине пленки:

- а) дифракция быстрых и медленных электронов;
- б) резерфордовское обратное рассеяние;
- в) фотоэлектронная и ИК-спектроскопия;
- г) электронная оже-спектроскопия и масс-спектрометрия вторичных ионов.

## 5 АУДИТОРНАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

### Вариант 1

1. Совершенный кристалл GaAs толщиной в 1 мм освещается при 0 К фотонами с энергией 1,2 эВ ( $\alpha=10 \text{ см}^{-1}$ ). Поток света составляет  $10^{20}$  фотон/см<sup>2</sup>с. Найти величину потока света проходящего сквозь кристалл.

2. Измерение сопротивления методом Ван дер Пау. Размеры образца:  $2a=3\text{мм}$ ,  $2l=2 \text{ мм}$ ,  $d=0,1 \text{ мм}$ ,  $2b=3 \text{ мм}$ . Измерительный ток 1 мА. Падение напряжения на контактах 4-3 при пропускании тока через контакты 1-2 составляет 1 В. А при токе на контактах 2-3 падение напряжения на контактах 1-4 составляет 1,2 В. Найти удельное сопротивление образца.

3. Пластина из полупроводника GaSb ( $n=5$ ,  $k=0,82$ ) собственной проводимости толщиной 0,1 мм освещается излучением He - Ne лазера с плотностью энергии 0,1 Дж·см<sup>-2</sup>. Определите длину волны и интенсивность люминесценции при 300 К.

### Вариант 2

1. Образец германия n-типа толщиной 1 мм покрыт слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 1 мкм. Коэффициент пропускания этого образца ИК-излучение  $\nu = 1500 \text{ см}^{-1}$  равен 30 %. Найдите концентрацию носителей заряда. T=300 К.

2. На пластину из кремния толщиной 1 см нормально падает плоскополяризованный свет длиной волны 10 мкм. Через пластину в этом случае проходит 15% света. Нужно определить коэффициент отражения этого же света при двух ориентациях вектора поляризации: а) параллельно плоскости падения света; б) нормально к плоскости падения; при углах падения 40° и 60°.

3. Для рентгеноструктурного анализа Au используется излучение K<sub>α</sub> Co (постоянная экранирования  $\sigma = 1,13$ ). Найти:

а) Длину волны рентгеновского излучения;

- b) Углы отражения от плоскостей [111], [220], [311];
- c) Межплоскостное расстояние.

Вариант 3

1. На поверхность Si нанесена тонкая пленка SiO<sub>2</sub>. В результате в системе получен минимум коэффициента отражения на длине волны 1 мкм. Найти толщину пленки.

2. В конкретном эксперименте по циклотронному резонансу  $V=0,1 \text{ Вб/м}^2$ , при этом  $N_c=10^{10} \text{ см}^{-1}$ . Найдите резонансную частоту.

3. В методе Резерфордского рассеяния энергия отраженных от передней плоскости пленки хрома ионов Ar под углом 45° имеет величину 0,5 МэВ. Определите начальную энергию ионов Ar.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Методы исследования материалов и структур электроники: учеб. пособие / С.В.Смирнов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 171 с.
2. Пентин Ю.А. Физические методы исследования в химии / Ю.А.Пентин, Л.В. Вилков. – М.: Мир, 2003. – 683 с.
3. Фелдман Л. Основы анализа поверхности и тонких пленок / Л. Фелдман, Д. Майер. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
4. Вудраф Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
5. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / под ред. Д. Бриггса, М.П.Сиха. – М.: Мир, 1987. – 600 с.
6. Карпасюк В.К. Современные физические методы исследования материалов / В.К. Карпасюк. – Астрахань: Изд-во АПИ, 1994. – 232 с.
7. Физика твердого тела. Физические свойства твердых тел / под ред. А.Ф.Хохлова. Т.2. – М.: Высшая школа, 2002. – 484 с.
8. Драго Р. Физические методы в химии: в 2 т. / Р. Драго. – М.: Мир, 1981.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Основные физические постоянные

Постоянные	Символ	Значение	Единицы СИ
Элементарный заряд	$e$	1,6	$10^{-19}$ Кл
Число Авогадро	$N_A$	6,02	$10^{23}$ моль $^{-1}$
Масса покоя электрона	$m_e$	9,1	$10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	$h$	6,62	$10^{-34}$ Джс
Атомная единица массы	<i>а.е.м.</i>	1,66	$10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R$	8,3	Дж · моль $^{-1}$ град $^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	1,38	$10^{-23}$ Дж · град $^{-1}$
Первый радиус Бора	$a_0$	5,29	$10^{-11}$ м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	$\varepsilon_0$	8,85	$10^{-12}$ Ф · м $^{-1}$

### СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}; 1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,83 \cdot 10^{-20} \text{ кал}$$

$$1 \text{ м} = 10^{10} \text{ \AA} = 10^9 \text{ нм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^3 \text{ мм} = 10^2 \text{ см}$$

$$\text{Заряд электрона } e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГС} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\text{Газовая постоянная } R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} =$$

$$1,987 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**Значения коэффициентов  $L(\times 10^{-4})$  для случая размещения зондов, как на рис.2.1**

<i>b/l</i>	<i>a/l</i>							
	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
1,0	2206	3488	5044	5611	5785	5836	5851	5854
1,6	730	1265	2118	2594	2829	2939	2990	3013
2,0	699	998	1608	1954	2141	2242	2296	2325
2,8	554	883	1309	1504	1600	1655	1690	1713
3,0	553	877	1285	1460	1539	1584	1612	1632

**Значения коэффициентов  $k$  для случая размещения зондов, как на рисунке 2.1 (прямоугольный образец)**

<i>b/l</i>	<i>a/l</i>							
	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
1,0	1	1	1	1	1	1	1	1
1,6	1	0,86	0,7	0,61	0,57	0,555	0,545	0,54
2,0	1	0,83	0,61	0,5	0,43	0,4	0,389	0,39
2,8	1	0,81	0,555	0,4	0,32	0,27	0,24	0,225

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Излучательная рекомбинация при 300 К

Вещество	$E_g$ , эВ	$n_i$ , $10^{14}$ $\text{см}^{-3}$	$B$ , $10^{-12}$ $\text{см}^3/\text{с}$	$\tau$ (собств.)	$\tau^*$ , мкс
Si	1,08	0,00015	0,002	4,6 ч	2500
Ge	0,66	0,24	0,034	0,61 с	150
GaSb	0,71	0,043	13	0,009 с	0,37
InAs	0,31	16	21	15 мкс	0,24
InSb	0,18	200	40	0,62 мкс	0,12
PbS	0,41	7,1	48	15 мкс	0,21
PbTe	0,32	40	52	2,4 мкс	0,19
PbSe	0,29	62	40	2,0 мкс	0,25
GaP	2,25		0,003		3000
GaAs	1,45		0,01	0,2	2000

Примечание: \* - для концентрации основных носителей  $10^{17} \text{ см}^{-3}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Физические параметры важнейших полупроводников

Параметр		Обозначение	Si	Ge	GaAs	InSb	4H-SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	300 К	$E_g$	1,12	0,66	1,43	0,18	3,0	3,44
	0 К		1,21	0,80	1,56	0,23	3,1	3,50
Подвижность при 300 К, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	электронов	$\mu_n$	1500	3900	8500	78000	650	8500
	дырок	$\mu_p$	600	1900	400	1700	300	400
Эффективная масса, $m^*/m_0$	электронов	$m_{dn}^*$	1,08	0,56	0,068	0,013	0,60	0,19
	дырок	$m_{dp}^*$	0,56	0,35	0,45	0,6	1,0	0,60
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, $\text{см}^{-3}$	T = 300 К	$N_C$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$3,7 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{19}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
Эффективная плотность состояний в валентной	T = 300 К	$N_V$	$1,02 \cdot 10^{19}$	$6,11 \cdot 10^{17}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$1,16 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1,2 \cdot 10^{19}$

Параметр		Обозначение	Si	Ge	GaAs	InSb	4H-SiC	GaN
зоне, см <sup>-3</sup>								
Диэлектрическая постоянная		$\epsilon$	11,8	16,0	13,2	17,7	10,2	12,2
Собственная концентрация носителей, см <sup>-3</sup>	T = 300 K	$n_i$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-10}$
Время жизни носителей, с		$\tau$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$		
Показатель преломления		$n$	3,44	4,0	3,4	3,75	2,6	2,4
Температурный коэффициент		$\alpha$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$5,59 \cdot 10^{-6}$
Постоянная решетки, нм		$a, b, c$	5,43	5,65	5,65	6,48	0,308(a) 1,511(c)	0,318(a) 0,5166(c)
Температура плавления, °C		$T$	1415	936	1238	525	2830	2530

