

Физический факультет



Согласовано, декан ФФ  
 Блинов В.Е.

подпись

2022г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**(кандидатский экзамен по специальности)**

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Научная специальность: 1.3 Физические науки

Направленность (профиль): Физика полупроводников

Форма обучения: очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)					
		Контактная работа обучающихся с преподавателем				Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем				
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
По выбору	36				12	16	6					2
Всего 36 часов / 1 зачетная единица, в т.ч. - контактная работа 14 часов												

Разработчики:

д.ф.-м.н., ак. РАН А.В. Латышев

д.ф.-м.н., В.Л. Альперович

к.ф.-м.н., А.В. Ненашев

Заведующий кафедрой ФПП ФФ

д.ф.-м.н., ак. РАН А.В. Латышев

Ответственный за образовательную программу:

д.ф.-м.н., проф. С.В. Цыбуля

## Оглавление

Аннотация .....	3
Введение .....	4
1. Результаты освоения дисциплины .....	4
2. Трудоемкость дисциплины по видам учебных занятий .....	4
3. Содержание дисциплины .....	5
4. Перечень учебно-методических материалов, необходимых для изучения дисциплины (модуля) .....	5
5. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины (модуля) .....	5
6. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....	6
7. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю) .....	6
Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов освоения дисциплины (оценочные материалы) .....	10

### Аннотация

Рабочая программа дисциплины (кандидатский экзамен по специальности) Физика полупроводников реализуется на физическом факультете как элективная дисциплина в рамках научной специальности 1.3 Физические науки Направленность (профиль) Физика полупроводников и разработана в соответствии с паспортом научной специальности Физика полупроводников, Порядком прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечнем и федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, сроками освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов).

Настоящая программа знакомит аспирантов с последними научными достижениями в области физики полупроводников и подготовки к презентации собственных научных результатов перед квалифицированной аудиторией.

Для начала обучения данной дисциплине необходима базовая подготовка в рамках программ бакалавриата и магистратуры.

Цель курса:

- подготовить аспирантов к сдаче кандидатского экзамена в рамках научной специальности Физика полупроводников.

Задачи курса:

- научить критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности;

- сформировать у аспирантов навыки культуры работы с научными литературными источниками в целях решения поставленных задач;

- развить навыки анализа полученных численных оценок, навыков их верификации по существующим данным.

Результат освоения дисциплины:

- знание профессиональных сведений о способах верификации полученных оценок при решении реальных научных задач;

- умение анализировать условия поставленной задачи и применять нужный метод решения;

- сдача кандидатского экзамена по специальности.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: консультации в период занятий, самостоятельная работа обучающегося.

Общий объем дисциплины – 1 зачетная единица (36 часов).

Форма промежуточной аттестации – кандидатский экзамен.

## Введение

Рабочая программа кандидатского экзамена Физика полупроводников реализуется на физическом факультете как элективная дисциплина в рамках научной специальности 1.3 Физические науки Направленность (профиль) Физика полупроводников и разработана в соответствии с паспортом научной специальности Физика полупроводников, Порядком прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечнем, и федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, сроками освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов).

Настоящая программа знакомит аспирантов с последними научными достижениями в области физики полупроводников и подготовки к презентации собственных научных результатов перед квалифицированной аудиторией.

Для начала обучения данной дисциплине необходима базовая подготовка в рамках программ бакалавриата и магистратуры.

Цель курса:

- подготовить аспирантов к сдаче кандидатского экзамена в рамках научной специальности Физика полупроводников.

Задачи курса:

- научить критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности;

- сформировать у аспирантов навыки культуры работы с научными литературными источниками в целях решения поставленных задач;

- развить навыки анализа полученных численных оценок, навыков их верификации по существующим данным.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: консультации в период занятий, самостоятельная работа обучающегося.

Общий объем дисциплины – 1 зачетная единица (36 часов).

Форма промежуточной аттестации – кандидатский экзамен.

## 1. Результаты освоения дисциплины

Результат освоения дисциплины:

- знание профессиональных сведений о способах верификации полученных оценок при решении реальных научных задач;

- умение анализировать условия поставленной задачи и применять нужный метод решения;

- сдача кандидатского экзамена по специальности.

## 2. Трудоемкость дисциплины по видам учебных занятий

Трудоемкость дисциплины – 1 з.е. (36 ч)

Форма промежуточной аттестации: кандидатский экзамен

№	Вид деятельности	Количество часов
1.	Консультации в период занятий, ч	12
2.	Занятия в контактной форме, ч., из них	14
3.	аудиторных занятий, ч	-
4.	в электронной форме, ч	-
5.	консультаций, час.	12
6.	промежуточная аттестация, ч	2
7.	Самостоятельная работа, ч	22

8.	Всего, ч	36
----	----------	----

### 3. Содержание дисциплины

#### Консультации в период занятий (12 ч)

Наименование темы и их содержание	Объем, час
Физика полупроводников	4
Кристаллофизика	4
Оптические явления в полупроводниках	4

#### Самостоятельная работа студентов (22 ч)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	2
Подготовка к контрольной работе	2
Выполнение домашнего задания в рамках портфолио	4
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	3
Подготовка презентации доклада	2
Подготовка реферата	3
Подготовка к кандидатскому экзамену	6

### 4. Перечень учебно-методических материалов, необходимых для изучения дисциплины

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: [Учеб. пособие для физ. спец. вузов] / А.И. Ансельм 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука., 1978. 615 с. (32 экз.)
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979. (17 экз)
3. Методы получения и свойства нанобъектов: учебное пособие: [для студентов, обучающихся по специальности "Нанотехнологии" / Н.И. Минько, В.В. Строкова, И.В. Жерновский, В.М. Нарцев]. Москва: Флинта: Наука, 2009. 162. (5 экз)
4. Валиев К.А. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К. А. Валиев, А. В. Раков Москва: Радио и связь, 1984, 350 с. (2 экз)
5. Нанoeлектроника / [К.А. Валиев, В.В. Вьюрков, В.А. Гридчин и др.]; под ред. акад. А.А. Орликовского Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009-24 см. (Электроника в техническом университете, Прикладная электроника / под общ. ред. И.Б. Федорова)
6. Плазменная технология в производстве СБИС / [Толливер Д., Новицки Р., Хесс Д. и др.]; под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна; пер. с англ. Ю.М. Золотарева, В.В. Юдина; под ред. Е.С. Машковой Москва: Мир, 1987 469 с. (2 экз)
7. Моро У. Микролитография: принципы, методы, материалы: в 2 ч. Ч.1. / У. Моро; пер. с англ. под ред. Р.Х. Тимерова; с предисл. К.А. Валиева М: Мир, 1990 606 с.: ил.; 22 см. ISBN 5-03-001716-X. 91 экз)
9. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / [Л. Эсаки, Б.А. Джойс, Р. Хекингботтом и др.]; под ред. Л. Ченга, К Плога; пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева Москва: Мир, 1989 582 с. : ил. ; 21 см. ISBN 5-03-000737-7. (2 экз)

### 5. Перечень учебных изданий, необходимых для освоения дисциплины (модуля)

10. Брагинский Л. С. , Магарилл Л. И., Махмудиан М. М., Погосов А. Г. , Чаплик А. В. , Энтин М. В. Сборник задач по теории твердого тела: учебное пособие: [для студентов 4-6 курсов Физ. фак. НГУ специальностей "Физика конденсированных сред", "Физика полупроводников", "Физика низких температур", "Квантовая оптика" ] / Л.С. Брагинский,

Л.И. Магарилл, М.М. Махмудиан [и др.]; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. физики полупроводников Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2013, 121 с.: ил.; 20 см. ISBN 978-5-4437-0199-8 (11 экз)

11. А. В. Ненашев, В. Л. Альперович. Колебания кристаллической решетки: учебное пособие: [для студентов и аспирантов физических специальностей вузов] / А.В. Ненашев, В.Л. Альперович; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. Новосибирск : Редакционно-издательский центр НГУ, 2015 98 с. : ил. ; 20 см. ISBN 978-5-4437-0417-3. (16 экз)

12. Займан Дж. Физика твердого тела [Электронный ресурс] Электрон. дан. Ижевск: Регуляр. и хаотич. динамика, 2002. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM):

13. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: [учебник: для студентов естественнонаучных и инженерных факультетов вузов] / Ч. Киттель; пер. с англ. под общ. ред. А.А. Гусева Изд. 2-е, стер Москва: Альянс, 2013. 791 с. (7экз)

## **6. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации;

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся;

3. Лаборатории ИФП СО РАН и НГУ, где аспиранты осуществляют научно-исследовательскую практику с целью подготовки научно-квалификационной работы (диссертации).

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины;

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для аспирантов из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **7. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)**

Перечень результатов освоения дисциплины представлен в разделе 1.

### ***7.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине***

#### ***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль включает контроль посещаемости обучающимися консультаций в период занятий, оценку их активности в ходе дискуссий, представление доклада по тематике, связанной с выполнением научной работы обучающегося, и проверку заданий для самостоятельного решения.

### ***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация проводится в форме кандидатского экзамена по специальности. Требования разработаны в соответствии со следующими документами:

- паспорт научной специальности Физика полупроводников,
- Порядок прикрепления лиц для сдачи кандидатских экзаменов, сдачи кандидатских экзаменов и их перечень,
- федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов).

Для приема кандидатского экзамена создается комиссия по приему кандидатских экзаменов (экзаменационная комиссия), состав которой утверждается приказом ректора НГУ. Состав экзаменационной комиссии формируется из числа научно-педагогических работников (в том числе работающих по совместительству) НГУ в количестве не более 5 человек, и включает в себя председателя, заместителя председателя и членов экзаменационной комиссии. В состав экзаменационной комиссии могут включаться научно-педагогические работники других организаций.

Для оценивания знаний обучающегося в рамках проведения кандидатского экзамена используются следующие оценочные средства:

1. Портфолио - целевая подборка работ обучающегося, раскрывающая его индивидуальные образовательные достижения, в том числе:
  - доклад по тематике, связанной с выполнением научной работы обучающегося.
2. Экзаменационный билет - комплекс вопросов и задач, разработанных в соответствии с паспортом научной специальности Физика полупроводников.

Кандидатский экзамен проводится экзаменационной комиссией по билетам (программам), утверждаемым деканом физического факультета НГУ. Для подготовки экзаменуемый использует листы ответа, которые хранятся в деле обучающегося вместе с протоколом экзамена.

В случае неявки экзаменуемого на кандидатский экзамен по уважительной причине (при наличии подтверждающих документов) он может быть допущен приказом ректора к сдаче кандидатского экзамена в течение текущего периода промежуточной аттестации. В случае получения неудовлетворительной оценки пересдача кандидатского экзамена в течение текущего периода промежуточной аттестации не допускается. Пересдача кандидатского экзамена с положительной оценки на другую положительную оценку не допускается.

Оценка уровня знаний экзаменуемого определяется экзаменационными комиссиями по пятибалльной шкале: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка выставляется простым большинством голосов членов экзаменационной комиссии. При равенстве голосов решающей считается оценка председателя. Экзаменуемый может быть в двухдневный срок подана апелляция ректору о несогласии с решением экзаменационной комиссии. Экзаменационная комиссия по приему кандидатского экзамена по специальной дисциплине правомочна принимать кандидатский экзамен по специальной дисциплине, если в ее заседании участвуют не менее 3 специалистов, имеющих ученую степень кандидата или доктора наук по научной специальности, соответствующей специальной дисциплине, в том числе не менее одного доктора наук. Решение экзаменационной комиссии оформляется протоколом, в котором указываются, в том числе, код и наименование научной специальности, по которой сдавались кандидатские экзамены; шифр и наименование направленности (профиля) по которой подготавливается диссертация.

## Описание критериев и шкал оценивания результатов освоения дисциплины

Таблица 7.1 Результаты освоения дисциплины

Результат освоения дисциплины	Оценочное средство
- знание профессиональных сведений о способах верификации полученных оценок при решении реальных научных задач	Портфолио Кандидатский экзамен
- умение анализировать условия поставленной задачи и применять нужный метод решения	Портфолио Кандидатский экзамен

Таблица 7.2 Критерии оценивания результатов освоения дисциплины

Критерии оценивания результатов освоения дисциплины	Шкала оценивания
<p><b><u>Доклады и выступления</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– знает актуальные исследования и критически анализирует результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности,</li> <li>– умеет ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования,</li> <li>– знает возможные направления профессиональной самореализации,</li> <li>- владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</li> <li>– точность и полнота выделения, классификации и систематизации основного смыслообразующего компонента из источников и литературы.</li> </ul> <p>В докладах и выступлениях обучающийся мог допустить принципиальные неточности.</p> <p><b><u>Решение типовых задач:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– умеет определять и применять современные научные методы при решении практических задач,</li> <li>– точность ответа, отсутствие ошибок.</li> </ul> <p><b><u>Кандидатский экзамен:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– демонстрирует углубленные знания базовых понятий, моделей, гипотез и концепций, свободно владеет всеми основными разделами современной физики полупроводников,</li> <li>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</li> <li>– наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.</li> </ul> <p>При изложении ответа на вопрос(ы) экзаменационного билета обучающийся мог допустить принципиальные неточности.</p>	<i>Отлично</i>
<p><b><u>Доклады и выступления</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– знает актуальные исследования и критически анализирует результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности,</li> <li>– умеет ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к</li> </ul>	<i>Хорошо</i>



<p>профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– знает возможные направления профессиональной самореализации,</li> <li>- владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</li> <li>– точность и полнота выделения, классификации и систематизации основного смыслообразующего компонента из источников и литературы.</li> </ul> <p>В докладах и выступлениях обучающийся мог допустить неточности, не влияющие на суть доклада.</p> <p><b><u>Решение типовых задач:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– умеет определять и применять современные научные методы при решении практических задач,</li> <li>– точность ответа, непринципиальные ошибки.</li> </ul> <p><b><u>Кандидатский экзамен:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– демонстрирует в основном углубленные знания базовых понятий, моделей, гипотез и концепций, свободно владеет всеми основными разделами современной физики полупроводников,</li> <li>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</li> <li>– допускает незначительные ошибки при ответах на дополнительные вопросы.</li> </ul> <p>При изложении ответа на вопрос(ы) экзаменационного билета обучающийся мог допустить незначительные неточности.</p>	
<p><b><u>Доклады и выступления</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– не знает направления актуальных исследований, не составляет анализ результатов предшественников и современных достижений в области физики в применении к профессиональной области деятельности,</li> <li>– затрудняется в постановке задач научно-исследовательской деятельности,</li> <li>– затрудняется в выборе возможных направлений профессиональной самореализации,</li> <li>- ограниченно владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</li> </ul> <p>В докладах и выступлениях обучающийся допускает неточности влияющие на суть доклада.</p> <p><b><u>Решение типовых задач:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– затрудняется в определении и применении современных научных методов при решении практических задач,</li> <li>– при решении задач допускает принципиальные ошибки.</li> </ul> <p><b><u>Кандидатский экзамен:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– демонстрирует общие знания базовых понятий и моделей в профессиональной области, критичных для понимания основных явлений и экспериментов, но допускает существенные ошибки по содержанию рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов,</li> <li>– затрудняется в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</li> <li>– допускает значительные ошибки при ответах на дополнительные вопросы.</li> </ul>	<p><i>Удовлетворительно</i></p>

<p><b><u>Доклады и выступления</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие теоретического и фактического материала, подкрепленного ссылками на научную литературу и источники,</li> <li>– затрудняется в постановке задач научно-исследовательской деятельности,</li> <li>– затрудняется в выборе возможных направлений профессиональной самореализации,</li> <li>- не владеет приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач,</li> <li>– неподготовленность докладов и выступлений на основе предварительного изучения литературы по темам, неучастие в коллективных обсуждениях в ходе практического (семинарского) занятия.</li> </ul> <p><b><u>Решение типовых задач современной физики полупроводников:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– затрудняется в определении и применении современных научных методов при решении практических задач,</li> <li>– при решении задач допускает многочисленные ошибки.</li> </ul> <p><b><u>Кандидатский экзамен:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– демонстрирует общие знания базовых понятий и моделей в профессиональной области, критичных для понимания основных явлений и экспериментов, но допускает существенные ошибки по содержанию рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов,</li> <li>– затрудняется в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,</li> <li>– не отвечает на дополнительные вопросы.</li> </ul>	<p><i>Неудовлетво- рительно</i></p>
---	---

**Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов освоения дисциплины (оценочные материалы)**

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям РПД, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

***I. Примерная тематика докладов***

***Тема. Физика полупроводников***

1. Экспериментальные методы изучения колебаний решетки: поглощение и комбинационное рассеяние света, рассеяние нейтронов.
2. Движение электронов и дырок во внешних полях. Определение эффективных масс из циклотронного резонанса.
3. Поверхностные и контактные явления в полупроводниках. Работа выхода и электронное сродство. Методы определения работы выхода.
4. Кинетические явления в полупроводниках: проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС. Механизмы рассеяния носителей заряда: рассеяние на заряженных примесях, акустических и оптических фононах.
5. Электронный транспорт в низкоразмерных структурах: квантование кондактанса в квантовых проволоках, эффект Шубникова-де Гааза в двумерном электронном газе, квантовый эффект Холла.
6. Полупроводниковые гетеропереходы. Энергетические зонные диаграммы гетеропереходов. Применения гетеропереходов в микро- и оптоэлектронике.

***Тема. Кристаллофизика***

1. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов. Типы сил связи в твердых телах: ковалентная, ионная и металлическая связь.

2. Методы структурного анализа кристаллических полупроводников. Рентгеновский и электронографический анализ.
3. Методы выращивания объемных монокристаллов и эпитаксиальных пленок. Молекулярно-лучевая и металлоорганическая эпитаксия.
4. Атомные процессы на поверхности полупроводников при молекулярно-лучевой эпитаксии.
5. Методы изучения состава и структуры поверхности: дифракция быстрых и медленных электронов, эллипсометрия, сканирующая туннельная микроскопия, отражательная электронная микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

### ***Тема. Оптические явления в полупроводниках***

1. Механизмы поглощения света в полупроводниках: межзонные оптические переходы в прямозонных и непрямозонных полупроводниках, экситонное поглощение, поглощение света на фононах, на свободных носителях заряда и на примесях.
2. Оптические явления во внешних электрическом и магнитном полях.
3. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами: межзонное поглощение, экситонные эффекты. Квантовый эффект Штарка.
4. Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры. Белые светодиоды на основе соединений AlGaIn-InGaIn.
5. Внешний фотоэффект. Полупроводниковые фотоэммитеры с отрицательным электронным средством

## ***II. Контрольные вопросы и задания по разделам***

### ***Тема. Кристаллофизика***

1. Вычислить относительную долю пространства (коэффициент упаковки), заполненного сферами, в следующих структурах: простая кубическая структура; объемноцентрированная и гранецентрированная структуры; структура алмаза.
2. Определить в элементарной ячейке алмаза, сфалерита и вюрцита координаты всех атомов базиса.
3. Найдите в элементарной ячейке алмаза:
  - а) координаты всех тетраэдрических междуузлий;
  - б) координаты всех гексагональных междуузлий.
 Пояснение: тетраэдрическим (гексагональным) междуузлем называется точка, расстояние от которой до четырёх (шести) ближайших узлов решетки одинаково.
4. Рассчитайте плотность оборванных связей для нереконструированных граней (100), (110) и (111) идеального кристалла кремния.

### ***Тема. Оптические явления в полупроводниках***

#### ***Раздел I. Феноменологическое описание оптических свойств кристаллов***

- Какой вид имеет тензор диэлектрической проницаемости в кристаллах кубической симметрии?
- В чём заключается классическая модель дисперсии оптических характеристик (модель Лоренца)?
- Возможна ли генерация второй гармоники в кремнии; в арсениде галлия? Ответить на тот же вопрос, но для третьей гармоники.
- Найти выражение для толщины и показателя преломления антиотражающего покрытия линзы с показателем преломления  $N$ .
- Нарисовать графики коэффициентов отражения от угла падения для света, линейно поляризованного в плоскости падения и перпендикулярно плоскости падения.
- Дать качественное объяснение явлению Брюстера.

- Как изменится состояние поляризации света, линейно поляризованного под произвольным углом к плоскости падения, при отражении от прозрачной среды?
- В чем состоят преимущества метода эллипсометрии по сравнению с измерением интенсивности отраженного света?

## *Раздел 2. Механизмы поглощения света в полупроводниках.*

- Объяснить на языке зонных диаграмм механизмы межзонного поглощения света в арсениде галлия и в кремнии.
- Найти энергию связи основного состояния экситона в арсениде галлия.
- Нарисовать качественно график зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов для прямозонного полупроводника с учётом кулоновского взаимодействия электронов и дырок. Сравнить со спектром поглощения без учета кулоновского взаимодействия.
- Проиллюстрировать оптические переходы в экситонные состояния на зонной диаграмме (энергия – квазиимпульс). Как модифицируется эта диаграмма с учетом поляритонных эффектов?
- Сравнить поглощение света на фонах в арсениде галлия и в кремнии.
- При каких условиях поглощение света на свободных носителях заряда может быть описано классической моделью Друде?
- В каком спектральном диапазоне металлы хорошо отражают свет? Почему?
- Почему разные металлы (например, медь и серебро) имеют разный цвет?
- Насколько применима модель Лоренца для описания различных механизмов поглощения света в полупроводниках?
- Нарисовать (качественно) спектр поглощения прямозонного полупроводника в широком спектральном диапазоне (от энергий фотонов  $\sim 1$  мэВ до 100 эВ) с учетом изученных нами механизмов поглощения.
- Проиллюстрировать на зонных диаграммах изменение энергетического спектра прямозонного полупроводника и межзонных оптических переходов при изотропном и одноосном давлении.
- Как влияет температура на край собственного поглощения?
- Возможны ли линейный и квадратичный электрооптические эффекты в кремнии; в арсениде галлия?
- В чем состоит эффект Франца-Келдыша? Проиллюстрировать ответ на зонной диаграмме энергия – координата. Почему период осцилляций Франца-Келдыша уменьшается при увеличении энергии фотонов? Дать качественное объяснение.
- В чем состоит эффект Фарадея? Дать качественное объяснение этого эффекта.
- Сформулировать критерий наблюдения циклотронного резонанса. Дать качественное объяснение этого критерия на классическом и на квантовом языках.
- Нарисовать энергетическую зависимость электронной плотности состояний и спектр поглощения полупроводника в квантующем магнитном поле. Как влияет кулоновское взаимодействие электронов и дырок на спектр поглощения?
- Нарисовать (качественно) графики зависимостей плотности состояний от энергии электронов для различных концентраций доноров в GaAs в диапазоне от  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> до  $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.
- Чем определяется форма спектров поглощения и фотолюминесценции в сильнолегированных полупроводниках *p*- и *n*-типа?
- Нарисовать (качественно) зонные диаграммы и спектры поглощения сильнолегированного некомпенсированного и компенсированного полупроводников.
- В чём состоит сходство и различия в атомной структуре и оптических свойствах кристаллических и некристаллических полупроводников?

- Нарисовать спектры поглощения кристаллического и неупорядоченного (аморфного) полупроводника.

### *Раздел 3. Явления с участием неравновесных носителей заряда.*

- От каких параметров полупроводника зависит величина баллистического фототока?
- Нарисовать графики зависимостей фотопроводимости (ФП) от времени при прямоугольном импульсе света достаточно большой длительности (превышающей характерные времена нарастания и спада ФП).
- Выразить величину фото-ЭДС в р-п переходе, измеряемой в режиме "холостого хода", через фототок короткого замыкания.
- Выразить квантовый выход фотолюминисценции через времена излучательной и безизлучательной рекомбинации электронов.
- В чем состоят основные преимущества полупроводниковых лазеров на двойных гетероструктурах по сравнению с лазерами на обычном р-п переходе?
- Сформулировать и объяснить законы фотоэффекта.
- Нарисовать зонную диаграмму полупроводника с положительным и с эффективным отрицательным электронным средством. Сопоставить величину и спектры фотоэмиссии из таких полупроводников.

### *Раздел 4. Оптические явления в полупроводниковых микроструктурах.*

- Нарисовать (качественно) графики зависимостей электронной плотности состояний от энергии для трехмерной, двумерной, одномерной и "нульмерной" систем.
- Нарисовать (качественно) спектры межзонного поглощения в квантовой яме. Сопоставить влияние кулоновского взаимодействия электронов и дырок на спектры собственного поглощения в объемном полупроводнике и в квантовой яме.
- Нарисовать схему фотоприёмника на межподзонных переходах в структурах с квантовыми ямами. Каким нужно выбирать энергетическое положение подзон размерного квантования (относительно барьера), чтобы увеличить: (а) вероятность оптических переходов между подзонами; (б) увеличить эффективность сбора электронов, возбужденных светом из нижней подзоны в верхнюю?
- Нарисовать (качественно) графики энергетических зависимостей электронной плотности состояний в квантовых ямах и композиционных сверхрешетках.
- Сверхрешетки какого типа – первого или второго, больше подходят для создания светоизлучающих приборов и фотоприёмников? Пояснить ответ на зонной диаграмме.

### *Раздел 5. Оптические методы исследования полупроводников.*

- Чем определяется ширина линий поглощения и излучения при оптических переходах примесь-зона?
- Как определить температуру образца в эксперименте по комбинационному рассеянию света в кристалле?
- На чем основана возможность определения скорости поверхностной рекомбинации по спектрам фототока полупроводниковых структур?
- Нарисовать схему эксперимента по электропоглощению полупроводника и объяснить, как эта схема работает.
- На чем основана поверхностная чувствительность метода анизотропного отражения поляризованного света?
- Нарисовать и объяснить схему эксперимента по рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии.
- На чем основана поверхностная чувствительность метода фотоэмиссионной спектроскопии?

- Перечислить возможности фотоэмиссионной спектроскопии по исследованию состава и электронной структуры объема и поверхности кристаллов.

### **Тема. Физика полупроводников**

#### Раздел 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников

- Описать атомную структуру кремния и германия.
- Описать атомную структуру арсенида галлия.
- Перечислить все элементы симметрии куба.
- Чем замечательна ячейка Вигнера-Зейтца?
- Выбрать векторы основных трансляций и элементарную (примитивную) ячейку в двумерной решётке, состоящей из равносторонних треугольников. Показать, что этот выбор неоднозначен. Найти ячейку Вигнера-Зейтца для данной решётки.
- Как можно получить полупроводниковый кристалл с высоким удельным сопротивлением ("полуизолирующий")?
- Оценить размер волновой функции электрона, связанного на мелком доноре в GaAs.
- Есть ли оптические фононы в арсениде галлия? В кремнии? От чего зависит наличие или отсутствие оптических ветвей в спектре колебаний кристалла?
- Сопоставить характер движения атомов для длинноволновых акустических и оптических колебаний.
- Нарисовать (качественно) законы дисперсии акустических и оптических ветвей колебаний в одномерной цепочке и в трехмерном кристалле.
- В чём заключаются особенности фононов, волновой вектор которых соответствует краю зоны Бриллюэна?

#### Раздел 2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

- Имеется коробка, в которой попеременно лежат образцы  $p$ - и  $n$ -типов. Какими экспериментальными методами можно воспользоваться, чтобы рассортировать образцы по типу проводимости? Какой метод, на ваш взгляд, - самый простой, и как его реализовать?
- Какова ширина запрещённой зоны  $E_g$  в Ge, Si, GaAs и GaN (в электрон-вольтах)? Какой длине волны  $\lambda$  (в микронах) электромагнитного излучения соответствует порог собственного поглощения в этих полупроводниках?

#### Раздел 3. Основы зонной теории и статистика носителей заряда в полупроводниках

- В чём состоят методы сильной и слабой связи?
- Чем определяется ширина разрешенной зоны в методе сильной связи?
- Чем определяется ширина запрещённой зоны в методе слабой связи?
- В чём сходство и различие между импульсом и квазиимпульсом электрона в кристалле?
- Чему равно произведение концентраций свободных электронов и дырок  $n \cdot p$  в невырожденном полупроводнике?
- Выразить энергию Ферми через концентрацию электронов в вырожденном полупроводнике при низкой температуре.
- Как получаются вырожденные полупроводники, в которых концентрация электронов  $n$  в зоне проводимости при низких температурах не зависит от температуры  $T$ ? На первый взгляд, при понижении температуры электроны должны связываться на донорах, и концентрация свободных электронов должна стремиться к нулю  $n \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow 0$ .

- Нарисовать зависимость положения уровня Ферми от температуры в некомпенсированном и частично компенсированном полупроводнике *n*-типа (привязать график к зонной диаграмме).

#### Раздел 4. Неравновесные явления в полупроводниках

- Нарисовать график зависимости дрейфовой скорости электронов от электрического поля (качественно).
- Как зависит время релаксации импульса от энергии электронов при рассеянии (а) на заряженных примесях; (б) на деформационном потенциале акустических фононов; (в) на поляризационном потенциале оптических фононов (в полярных полупроводниках типа GaAs)? Нарисовать графики (качественно).
- Как зависит подвижность электронов от температуры? Нарисовать графики (качественно) для двух образцов полупроводника с различной концентрацией заряженных примесей.
- В образце действуют два механизма рассеяния: на ионизированных примесях и на фононах. Если бы действовал только первый механизм рассеяния, то подвижность была бы  $\mu_1=800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , в случае действия только второго механизма –  $\mu_2=200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Чему равна (приблизительно) подвижность с учётом обоих механизмов рассеяния?
- Нарисовать на зонной диаграмме полупроводника *p*-типа (энергия-координата) графики зависимостей квазиуровней Ферми электронов и дырок от координаты при неоднородном освещении (левая половина полупроводника в темноте, правая – освещена).
- Выразить произведение концентраций электронов и дырок в неравновесных условиях через квазиуровни Ферми.
- Нарисовать графики зависимости величины фотопроводимости от времени при периодическом включении и выключении освещения для трёх случаев: (а) период много больше времени жизни; (б) период много меньше времени жизни; (в) период сравним с временем жизни.

#### Раздел 5. Свойства поверхности и контактов полупроводниковых структур

- Объяснить на качественном уровне природу поверхностных состояний.
- Нарисовать графики распределения заряда, поля и потенциала вблизи поверхности для случаев обеднения, обогащения и инверсии в полупроводниках *n*- и *p*-типа.
- Объяснить, в чём заключается эффект поля.
- Нарисовать графики распределения заряда, поля и потенциала (зонную диаграмму) *p-n* перехода и барьера Шоттки. Пояснить происхождение зарядов.
- Рассмотреть зонную диаграмму *p-n* перехода при обратном и прямом смещениях. Написать выражение и нарисовать график вольт-амперной характеристики *p-n* перехода. Объяснить микроскопическую природу тока насыщения *p-n* перехода.
- Изложить алгоритм построения зонной диаграммы гетероперехода между двумя полупроводниками с различной шириной запрещённой зоны. Нарисовать диаграмму *p-AlGaAs/p-GaAs* гетероперехода без заряда на гетерогранице. Пояснить качественно, как заряд на границе изменит вид зонной диаграммы гетероперехода.
- Нарисовать зонную диаграмму варизонного полупроводника, например *p-Al<sub>x</sub>Ga<sub>(1-x)</sub>As* с составом *x*, увеличивающимся слева направо.

#### Раздел 6. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках

- Объяснить на языке зонных диаграмм механизмы межзонного поглощения света в арсениде галлия и в кремнии.

- Нарисовать качественно график зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов для прямозонного полупроводника с учётом кулоновского взаимодействия электронов и дырок.
- Сравнить поглощение света на фононах в арсениде галлия и в кремнии.
- В чём заключается классическая модель дисперсии оптических характеристик (модель Лоренца)? Насколько применима модель Лоренца для описания различных механизмов поглощения света в полупроводниках?
- При каких условиях поглощение света на свободных носителях заряда может быть описано классической моделью Друде?
- Сравнить работу светодиода и лазера.
- В чем состоят основные преимущества полупроводниковых лазеров на двойных гетероструктурах по сравнению с лазерами на обычном  $p-n$  переходе?
- Чем определяется ширина линий поглощения и излучения при переходах примесью-зона?
- Нарисовать графики зависимостей фотопроводимости (ФП) от времени при прямоугольном импульсе света достаточно большой длительности (превышающей характерные времена нарастания и спада ФП).

#### Раздел 7. Полупроводниковые структуры пониженной размерности

- Нарисовать (качественно) графики зависимостей электронной плотности состояний от энергии для трехмерной, двумерной, одномерной и "нульмерной" систем.
- Сверхрешётки какого типа - первого или второго - больше подходят для создания светоизлучающих приборов и фотоприёмников? Пояснить ответ на зонной диаграмме.
- Нарисовать плотность состояний в зависимости от энергии электронов в квантующем магнитном поле. Объяснить, почему в металле или в вырожденном полупроводнике при изменении магнитного поля возникают периодические по  $1/H$  осцилляции величины магнетосопротивления (эффект Шубникова-де Гааза) и других физических свойств?
- Нарисовать схему фотоприёмника на межподзонных переходах в структурах с квантовыми ямами. Каким нужно выбирать энергетическое положение подзон размерного квантования (относительно барьера), чтобы увеличить: (а) вероятность оптических переходов между подзонами; (б) увеличить эффективность сбора электронов, возбужденных светом из нижней подзоны в верхнюю?

#### Раздел 8. Сильнолегированные и некристаллические полупроводники

- Нарисовать (качественно) графики зависимостей плотности состояний от энергии электронов для различных концентраций доноров в GaAs в диапазоне от  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  до  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .
- Чем определяется форма спектров поглощения и фотолюминесценции в сильнолегированных полупроводниках  $p$ - и  $n$ -типа?
- В чём состоят сходства и различия в структуре и электронных свойствах кристаллических и некристаллических полупроводников?
- Нарисовать (качественно) спектры межзонного поглощения кристаллического и аморфного полупроводников.

### **III. Задачи для самостоятельного решения**

#### **Тема. Кристаллофизика**



1. Вычислить относительную долю пространства (коэффициент упаковки), заполненного сферами, в следующих структурах: простая кубическая структура; объёмноцентрированная и гранецентрированная структуры; структура алмаза.
2. Определить в элементарной ячейке алмаза, сфалерита и вюрцита координаты всех атомов базиса.
3. Найдите в элементарной ячейке алмаза:
  - а) координаты всех тетраэдрических междуузлий;
  - б) координаты всех гексагональных междуузлий.
 Пояснение: тетраэдрическим (гексагональным) междуузлием называется точка, расстояние от которой до четырёх (шести) ближайших узлов решетки одинаково.
4. Рассчитайте плотность оборванных связей для нереконструированных граней (100), (110) и (111) идеального кристалла кремния.
5. Какие плоскости являются плоскостями спайности в структуре алмаза, сфалерита, вюрцита? Почему?
 Пояснение: плоскостью спайности называется плоскость, по которой кристалл раскалывается легче всего.
6. Провести индцирование граней (определить индексы) гексагонального кристалла в системе координат:
  - а)- трёхосной,
  - б) - четырёхосной
7. Осколок разбившейся пластины GaAs имеет форму равностороннего треугольника. Какова ориентация пластины?
8. На подложке кремния (001) изготовлена монослойная сверхрешетка Si/Ge. Постройте элементарную ячейку этой сверхрешетки. Имеет ли данная структура центр инверсии?
 Пояснение: сверхрешеткой  $(A)_n(B)_m\{hkl\}$  называется кристалл, в котором  $n$  атомных слоёв  $\{hkl\}$  построены из атомов А, а следующие  $m$  атомных слоёв  $\{hkl\}$  – из атомов В, затем опять идут  $n$  атомных слоёв А и т.д. При  $m=n=1$  сверхрешетка называется монослойной.

### **Тема. Оптические явления в полупроводниках**

1. В модели Лоренца найти действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости сплошной среды, состоящей из осцилляторов с резонансной частотой  $\omega_0$ . Построить графики зависимостей показателя преломления  $n(\omega)$  и показателя поглощения  $\kappa(\omega)$  в окрестности резонанса. Рассмотреть случай нескольких резонансов. Объяснить физический смысл ситуации с  $n < 1$ , когда фазовая скорость волны превышает скорость света.
2. Дана поляроидная пластинка. Определить экспериментально направление, соответствующее пропусканию линейно-поляризованного света. Калиброванного поляризатора под рукой нет.
3. Найти энергии электронов, рожденных светом с энергией фотонов  $E=1,57$  эВ в GaAs при межзонных переходах из зон тяжелых и легких дырок. Ширина запрещенной зоны GaAs  $E_g=1,52$  эВ, эффективная масса электронов  $m_e=0,067m_0$ , тяжелых и легких дырок  $m_{hh}=0,55m_0$  и  $m_{lh}=0,086m_0$ , соответственно.
4. Оценить ширину полосы поглощения, обусловленного переходом с основного состояния водородоподобного примесного центра в зону проводимости GaAs. Диэлектрическая проницаемость GaAs  $\epsilon=12,9$ . Сопоставить ширину линий примесного поглощения и излучения.
5. Оценить величину ЭДС Дембера при освещении поверхности  $p$ -GaAs сильно поглощаемым светом с интенсивностью  $10^{15}$  фотонов/см<sup>2</sup>·с. Концентрация и подвижность дырок равны  $p=10^{14}$  см<sup>-3</sup> и  $\mu_p=400$  см<sup>2</sup>/В·с, соответственно. Диффузионная длина электронов  $L=10$  мкм.
6. Нарисовать (качественно) спектральные зависимости фототока в эпитаксиальной структуре  $p$ -Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/ $p$ -GaAs/ $n$ -GaAs при нулевой и конечной скорости рекомбинации



полупроводников. Литографические методы создания полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, эффективных масс, подвижности и концентрации свободных носителей заряда, времени жизни неосновных носителей.

### **Колебания решетки**

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания.

Квантование колебаний. Фононы. Теплоёмкость кристаллической решетки.

Экспериментальные методы изучения колебаний решетки: поглощение и комбинационное рассеяние света, рассеяние нейтронов.

### **Основы зонной теории полупроводников**

Переход от дискретных атомных уровней к энергетическим зонам в кристаллах. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла; теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Образование разрешенных и запрещенных зон в приближениях сильно и слабо связанных электронов. Закон дисперсии, эффективная масса, изоэнергетические поверхности. Плотность состояний.

Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Энергетические зоны в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного резонанса.

Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Водородоподобные доноры и акцепторы. Глубокие примесные уровни.

### **Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках**

Функция распределения электронов. Металлы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения зонной теории. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях.

Определение положения уровня Ферми из уравнения электронейтральности. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках.

### **Поверхностные и контактные явления в полупроводниках**

Работа выхода и электронное сродство. Поверхностные электронные состояния. Изгиб зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. обедненные и обогащенные слои пространственного заряда. Контакт металл-полупроводник. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.

Энергетическая диаграмма p-n перехода. Диффузионный и дрейфовый токи в p-n переходе. Вольт-амперная характеристика p-n перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в p-n переходе. Туннельный диод. Биполярный транзистор.

Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники. Структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Инверсионные слои в МДП-структурах. Полевой транзистор.

### **Кинетические явления в полупроводниках**

Характер движения носителей заряда в полупроводниках. Диффузия и дрейф. Тепловая и дрейфовая скорости. Коэффициент диффузии и подвижность, их связь со средним временем между столкновениями. Соотношение Эйнштейна. Основные

кинетические явления: проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС. Кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения электронов во внешних полях.

Механизмы рассеяния носителей заряда: рассеяние на заряженных примесях, акустических и оптических фононах. Явления в сильных электрических полях: насыщение дрейфовой скорости, отрицательная дифференциальная проводимость, эффект Ганна. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

### **Низкоразмерные полупроводниковые структуры**

Размерное квантование. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в двумерных (квантовые ямы), одномерных (квантовые проволоки) и нульмерных (квантовые точки) низкоразмерных структурах. Создание полупроводниковых низкоразмерных структур на основе гетеропереходов: квантовые ямы, сверхрешетки, полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов.

Электронный транспорт в низкоразмерных структурах: квантование кондактанса в квантовых проволоках, эффект Шубникова-де Гааза в двумерном электронном газе. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

### **Оптические явления в полупроводниках**

Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент поглощения. Механизмы поглощения света в полупроводниках: межзонные оптические переходы в прямозонных и непрямозонных полупроводниках, экситонное поглощение, поглощение света на фононах, на свободных носителях заряда и на примесях. Оптические явления во внешних электрическом и магнитном полях.

Оптические явления в структурах с квантовыми ямами: межзонное поглощение, экситонные эффекты. Квантовый эффект Штарка.

### **Явления с участием неравновесных носителей заряда**

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Времена жизни. Механизмы излучательной и безызлучательной рекомбинации: межзонная рекомбинация, рекомбинация через уровни примесей и дефектов, Оже-рекомбинация. Диффузия неравновесных носителей заряда. Длина диффузии.

Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры. Внутренний фотоэффект. Фотопроводимость и фотоэдс. Полупроводниковые фотоприёмники: фотоспротивления и фотодиоды. Солнечные элементы. Внешний фотоэффект. Полупроводниковые фотоэмиттеры с отрицательным электронным средством.

### **4.3 Примерный перечень вопросов кандидатского экзамена**

1. Перечислить все элементы симметрии куба.
2. Выбрать векторы основных трансляций и элементарную (примитивную) ячейку в двумерной решетке, состоящей из равносторонних треугольников. Показать, что этот выбор неоднозначен. Найти ячейку Вигнера-Зейтца для данной решетки. Чем замечательна ячейка Вигнера-Зейтца?
3. Описать атомную структуру кремния. Нарисовать кристаллографическую элементарную ячейку.
4. Описать атомную структуру арсенида галлия.
5. Как можно получить полупроводниковый кристалл с высоким удельным сопротивлением ("полуизолирующий")?
6. Оценить размер волновой функции электрона, связанного на мелком доноре в GaAs.
7. Имеется коробка, в которой попеременно лежат образцы p- и n-типов. Какими экспериментальными методами можно воспользоваться, чтобы рассортировать образцы

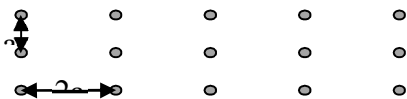
- по типу проводимости? Какой метод, на ваш взгляд, самый простой и как его реализовать?
8. Какова ширина запрещённой зоны  $E_g$  в Ge, Si, GaAs и GaN (в электрон-вольтах)? Какой длине волны  $\lambda$  (в микронах) электромагнитного излучения соответствует порог собственного поглощения в этих полупроводниках?
  9. В чем состоят методы сильной и слабой связи?
  10. Чем определяется ширина разрешенной зоны в методе сильной связи?
  11. Чем определяется ширина запрещённой зоны в методе слабой связи?
  12. В чем сходство и различие между импульсом и квазиимпульсом электрона в кристалле?
  13. Чему равно произведение концентраций свободных электронов и дырок  $n \cdot p$  в невырожденном полупроводнике?
  14. Выразить энергию Ферми через концентрацию электронов в вырожденном полупроводнике при низкой температуре.
  15. Как получают вырожденные полупроводники, в которых концентрация электронов  $n$  в зоне проводимости при низких температурах не зависит от температуры  $T$ ? На первый взгляд, при понижении температуры электроны должны связываться на донорах, и концентрация свободных электронов должна стремиться к нулю  $n \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow 0$ .
  16. Нарисовать зависимость положения уровня Ферми от температуры в некомпенсированном и частично компенсированном полупроводнике  $n$ -типа (привязать к зонной диаграмме).
  17. Нарисовать график зависимости дрейфовой скорости электронов от электрического поля (качественно).
  18. Как зависит время релаксации импульса от энергии электронов при рассеянии (а) на заряженных примесях; (б) на деформационном потенциале акустических фононов (в) на поляризационном потенциале оптических фононов (в полярных полупроводниках типа GaAs)? Нарисовать графики (качественно).
  19. Как зависит подвижность электронов от температуры? Нарисовать графики (качественно) для двух образцов полупроводника с различной концентрацией заряженных примесей.
  20. В образце действуют два механизма рассеяния: на ионизированных примесях и на фононах. Если бы действовал только первый механизм рассеяния, то подвижность была бы  $800 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ , в случае действия только второго механизма –  $200 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ . Чему равна подвижность с учётом обоих механизмов рассеяния?
  21. Нарисовать на зонной диаграмме полупроводника  $p$ -типа (энергия-координата) графики изменения квазиуровней Ферми электронов и дырок с координатой при неоднородном освещении (левая половина полупроводника в темноте, правая – освещена).
  22. Выразить произведение концентраций электронов и дырок в неравновесных условиях через квазиуровни Ферми.
  23. Нарисовать графики зависимости величины фотопроводимости от времени при периодическом включении и выключении освещения для трёх случаев: (а) период много больше времени жизни; (б) период много меньше времени жизни; (в) период сравним с временем жизни.

#### 4.4 Перечень примерных задач к кандидатскому экзамену

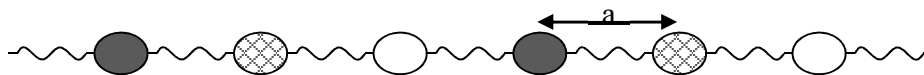
1. Рассчитать следующие параметры кристаллического кремния:
  - а) число атомов, содержащихся в кубической ("кристаллографической") элементарной ячейке;

- б) расстояние между атомными ядрами соседних атомов, полагая, что длина ребра кубической элементарной ячейки кремния  $a_0 = 0.543$  нм;  
 в) объем наименьшей ("примитивной") элементарной ячейки (в единицах объема кубической ячейки);  
 г) число атомов, приходящихся на единицу площади в кристаллических плоскостях (100), (111) и (110).

2. Имеется ли центр симметрии в кристаллической решётке (а) кремния, (б) арсенида галлия? Если имеется, то найдите его.  
 3. Для изображённой здесь двумерной решётки нарисуйте ячейку Вигнера-Зейтца, обратную решётку и зону Бриллюэна.



4. Изобразите (качественно) закон дисперсии продольных колебаний одномерной цепочки, состоящей из атомов трёх типов:



Считать, что массы атомов разных типов близки друг к другу, но не равны.

5. Нарисуйте законы дисперсии электронов и дырок для Вашего любимого полупроводника.  
 6. Найдите эффективную плотность состояний зоны проводимости ( $N_c$ ) в арсениде галлия ( $m_e^* = 0.067 m_0$ , где  $m_0$  — масса электрона в вакууме) при температуре 100 К, если известно, что для материала с  $m_e^* = m_0$  при  $T = 300$  К  $N_c = 2.5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.  
 7. Оцените энергию залегания мелких водородоподобных уровней донорного типа в GaAs. Сравните полученные значения с шириной запрещённой зоны и тепловой энергией  $kT$  ( $T = 300$  К).  
 8. Для арсенида галлия (GaAs) оцените, при какой минимальной концентрации доноров станут заметны эффекты, связанные с перекрытием электронных оболочек соседних примесей. Эффективная масса электронов в зоне проводимости  $m_e^* = 0.067 \cdot m_0$ , где  $m_0$  — масса электрона в вакууме.  
 9. Найти температурный интервал, в котором концентрация электронов в кремнии с точностью не хуже 10% равна концентрации введённой примеси. Полупроводник легирован фосфором  $N_d = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, энергия залегания донорного уровня  $\epsilon_d = 45$  мэВ.  
 10. Арсенид галлия легирован мелкой водородоподобной примесью. Нарисуйте (качественно) зависимость  $\log n$  от  $1/T$ , где  $n$  — концентрация электронов в зоне проводимости,  $T$  — температура, для концентраций примеси  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Оцените значения температур, соответствующих изломам нарисованной вами ломаной линии.  
 11. В кристалле GaAs содержится амфотерная примесь Ge. Концентрация германия в узлах галлия  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>, в узлах мышьяка  $6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

а) Найдите концентрацию электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне при температуре 300 К.

б) Что произойдёт с концентрациями дырок и электронов, если в этом кристалле создать глубокие донорные уровни, расположенные в середине запрещённой зоны, с концентрацией  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ?

Энергия ионизации донорного уровня Ge в GaAs — 6 мэВ, акцепторного уровня Ge — 30 мэВ, ширина запрещённой зоны GaAs 1,42 эВ, эффективная масса электронов  $0,067 \cdot m_0$ , эффективная масса плотности состояний в валентной зоне  $0,53 \cdot m_0$  ( $m_0$  — масса электрона в вакууме). Фактором вырождения примесных уровней пренебречь.

*Примечание.* Можно воспользоваться тем, что для материала с  $m_e^* = m_0$  при  $T=300\text{К}$   $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

12. В зоне проводимости арсенида галлия n-типа при  $T=300 \text{ К}$  имеются электроны с концентрацией  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Какова концентрация электронов в L-долине зоны проводимости?

(L-долина в GaAs находится на 0,29 эВ выше Г-долины; эффективная масса плотности состояний в L-долине —  $0,85 \cdot m_0$ , в Г-долине —  $0,067 \cdot m_0$ .)

13. Для кремниевого p-n перехода с уровнями легирования  $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в n-типе,  $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в p-типе:

а) нарисуйте зонную диаграмму в несмещённом состоянии;

б) нарисуйте зонную диаграмму при обратном смещении 1 В;

в) во сколько раз (приблизительно) изменится ширина области обеднения при приложении обратного смещения 1 В (по сравнению с несмещённым состоянием)?

г) какая часть области обеднения приходится на p-область, и какая — на n-область?

Ширина запрещённой зоны кремния  $\approx 1 \text{ эВ}$ .

14. Нарисовать зонную диаграмму в масштабе и вычислить толщину слоя обеднения идеального барьера Шоттки металл-кремний, предполагая, что работа выхода металла равна 4,75 эВ, электронное сродство кремния — 4,05 эВ. Кремний легирован донорами с концентрацией

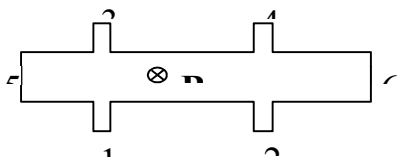
а)  $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;

б)  $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Сравнить толщину с длиной свободного пробега и тепловой длиной волны де Бройля.

15. Вычислить толщину приповерхностной области пространственного заряда (в мкм) и концентрацию поверхностных зарядов (в  $\text{см}^{-2}$ ) для области обеднения n-GaAs с концентрацией доноров  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , если известно, что величина поверхностного изгиба зон составляет  $\phi_s = 1 \text{ эВ}$ .

16 Для GaAs рассчитать среднюю тепловую скорость электронов, среднюю длину и время свободного пробега и тепловую длину волны де Бройля. Температура комнатная. Подвижность электронов равна  $9400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .



17. Измерения на холловском мостике при магнитном поле  $B = 0,01 \text{ Тл}$ , температуре 300 К и токе  $I_{5 \rightarrow 6} = 10 \text{ мА}$  дали следующие показания:

$U_{12} \equiv \phi_1 - \phi_2 = 500 \text{ мВ}$ ,

$$U_{13} \equiv \varphi_1 - \varphi_3 = 0,15 \text{ мВ.}$$

Найдите концентрацию (в  $\text{см}^{-3}$ ), подвижность (в  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) и коэффициент диффузии (в  $\text{см}^2/\text{с}$ ) основных носителей, а также их знак. Расстояние между контактами 1 и 2 — 1 см, между 1 и 3 — 0,2 см, толщина пластины 0,04 см. Холловский фактор считать равным 1.

18. Рассчитать пороговую длину волны излучения, вызывающего генерацию электрон-дырочных пар в Si, Ge и GaAs. Определить, к какому диапазону на шкале электромагнитных волн относятся данные длины волн. Изобразить переходы на дисперсионных зависимостях.
19. Оценить величину фотоэдс, возникающую на разомкнутых концах  $p$ - $n$  кремниевого перехода при равномерном по площади освещении монохроматическим световым потоком  $I = 10^{12}$  фотонов/ $(\text{см}^2\cdot\text{с})$ , падающим перпендикулярно плоскости перехода и вызывающим рождение электрон-дырочных пар. Коэффициент поглощения света  $\alpha = 10^2 \text{ см}^{-1}$ , толщина освещаемой  $n$ -области  $d_n = 3 \text{ мкм}$ , толщина  $p$ -области  $d_p = 1 \text{ мм}$ . Уровень легирования  $p$ -области  $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $n$ -области —  $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Коэффициент диффузии и время жизни электронов в  $p$ -области равны  $D_n = 25 \text{ см}^2/\text{с}$  и  $\tau_n = 0,1 \text{ мс}$ , соответственно.
20. Квантовая яма представляет собой слой арсенида галлия толщиной 25 нм, окруженный сверху и снизу твердым раствором  $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ .
- а) Найдите наименьшую энергию электрона в этой квантовой яме, приняв за начало отсчета энергии край зоны проводимости в объемном арсениде галлия. Яму считать глубокой. Эффективная масса электронов в арсениде галлия  $0,067 \cdot m_0$ .
- б) Нарисуйте зависимость плотности состояний от энергии в диапазоне энергий 0–0,1 эВ. Проставить все необходимые цифры на осях.
- в) Нарисуйте (качественно) закон дисперсии электронов в квантовой яме в том же диапазоне энергий.
- г) Эту квантовую яму заполнили электронами с концентрацией  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ . При каких температурах электронный газ будет невырожденным? При каких — сильно вырожденным?
21. Через полупроводниковый образец ( $n$  – типа) сечением  $1 \text{ мм}^2$  и длиной 1 см течет ток 1 ампер. Найти скорость дрейфа и тепловую скорость электронов. Температура  $T = 300 \text{ К}$ , эффективная масса электронов  $m^* = m_0$  ( $m_0$  – масса электрона в вакууме), концентрация электронов  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Чему равна выделяемая в образце мощность, если среднее время релаксации импульса равно  $10^{-10} \text{ с}$ ?