

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Физика наноструктур
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.Г. Тиходеев, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры лазерных систем и структурированных материалов 04.06.2020

Аннотация

В современной физике конденсированного состояния исследование наноструктур является одним из самых интересных и приоритетных направлений. Это объясняется не только фундаментальностью их физических свойств, но и практической важностью этих свойств для создания новых устройств электроники, новых методов хранения, обработки и передачи информации и изображений, новых технологий обработки и создания новых материалов с необычными свойствами.

Настоящий курс является вводным. Будут объяснены основные понятия, использующиеся в этой области. Проиллюстрированы экспериментальные методы изготовления и исследования наноструктур. Приведены примеры теоретических расчетов, включая численные. В частности, студенты получают практические навыки в использовании таких матричных методов для решения уравнений Шредингера в приближении огибающих для гетероструктур как метод матрицы переноса и матрицы рассеяния. Особое внимание будет уделено описанию резонансных состояний электронов (резонансов Фано).

Основное внимание в курсе будет уделено полупроводниковым наноструктурам, их электронным и оптическим свойствам, методам их исследования и изготовления, основным приборам на их основе. Однако будут рассмотрены и смежные вопросы: методы манипулирования одиночными атомами и молекулами с помощью сканирующего туннельного микроскопа; свойства наноструктурированных фотонных кристаллов; плазмоны в наноструктурированных металлах; метаматериалы.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

освоение студентами фундаментальных знаний в области физики наноструктур, овладение методами теоретических расчетов и экспериментальными методами исследования наноструктур, а также пониманием способов их практического применения.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики наноструктур как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов основным принципам и подходам области физики наноструктур и освоение основных теоретических методов, применимых в этой области физики;
- формирование правильных теоретических подходов к выполнению исследований студентами в области физики наноструктур в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики и математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в твердых телах;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- работать на современном экспериментальном оборудовании;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
- математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий**

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Возникновение нанофизики и ее задачи	2			2
2	Классификация наноструктур, самые общие свойства	2			2
3	Полупроводниковые сверхрешетки. Блоховские осцилляции в сверхрешетках	2			2
4	Полупроводниковые квантовые ямы, квантовые нити и точки	2			2
5	Технологии изготовления наноструктур	2			2
6	Электронные возбуждения в полупроводниковых наноструктурах	2			2
7	Матричные методы решения уравнения Шредингера для огибающих: матрица переноса и матрица рассеяния	2			2

8	Резонансные состояния в открытых системах, резонансы Фано	2			2
9	Оптические свойства полупроводниковых наноструктур. Экситоны в наноструктурах	2			2
10	Локализационное и диэлектрическое усиление экситонов в наноструктурах	2			2
11	Полупроводниковые микрорезонаторы с активными квантовыми ямами, поляритонные эффекты	2			2
12	Приборы наноэлектроники	2			2
13	Фотонные кристаллы, в том числе с оптически активными наноструктурами (полупроводниковыми и металлическими)	2			2
14	Резонансные состояния в фотонно-кристаллических слоях. Локализованные и делокализованные плазмоны. Метаматериалы.	2			2
15	Зондовые методы исследования поверхностей твердых тел и адсорбированных молекул. Спектроскопия неупругого туннелирования. Наномоторы	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Возникновение нанофизики и ее задачи

Вводная лекция. Гордон Мур и его закон экспоненциального развития. Ричард Фейнман как отец нанофизики. Полупроводниковые гетероструктуры: от идей (Герберт Кремер, квазиэлектрическое поле и двойная гетероструктура) до практической реализации (лазер на двойной гетероструктуре, Жорес Алферов).

2. Классификация наноструктур, самые общие свойства

Полупроводниковые гетеропереходы 1-го и 2-го рода. Согласованные и напряженные гетеропереходы. Полупроводниковые сверхрешетки, квантовые ямы, нити и точки.

3. Полупроводниковые сверхрешетки. Блоховские осцилляции в сверхрешетках

Сверхрешетки и электронные минизоны. Блоховские осцилляции и невозможность их осуществить в объемных материалах. Идея сверхрешетки Л.В.Келдыша. Практическая реализация сверхрешеток.

4. Полупроводниковые квантовые ямы квантовые нити и точки

Пространственная локализация электронов и дырок в квантовых ямах, нитях и точках. Зависимость электронной плотности состояний от размерности квантовой локализации.

5. Технологии изготовления наноструктур

Молекулярно-лучевая эпитаксия. Жидкостная и газовая эпитаксия. Дельта-легирование. Самоорганизация квантовых точек в напряженных гетероструктурах. Методы нанолитографии. Принц-технология.

6. Электронные возбуждения в полупроводниковых наноструктурах

Метод эффективной массы, связь эффективной массы с шириной запрещенной зоны. Квантовое туннелирование.

7. Матричные методы решения уравнения Шредингера для огибающих: матрица переноса и матрица рассеяния

Решение уравнения Шредингера методом матрицы переноса. Расчет амплитуд вероятностей рассеяния и прохождения. Квантовые эффекты надбарьерного отражения и резонансного туннелирования. Решение уравнения Шредингера методом матрицы рассеяния.

8. Резонансные состояния в открытых системах, резонансы Фано

Приближенное описание резонансных состояний (резонансов Фано) методом линеаризации частотной зависимости матрицы рассеяния. Расчет резонансных энергий, ширин уровней, собственных резонансных волновых функций.

9. Оптические свойства полупроводниковых наноструктур. Экситоны в наноструктурах

Оптические свойства полупроводниковых наноструктур. Экситоны в наноструктурах

Взаимодействие электронов в гетероструктурах с электромагнитным полем. Правила запрета для межзонных и межподзонных переходов. Спектры поглощения и плотности состояний. Кулоновские корреляции в спектрах поглощения и экситоны, водородоподобные связанные состояния электронов и дырок.

10. Локализационное и диэлектрическое усиление экситонов в наноструктурах

Водородоподобные связанные состояния электронов и дырок в гетероструктурах пониженной размерности. Усиление экситонов за счет квантовой локализации. Экситоны в гетероструктурах с сильно различающимися диэлектрическими восприимчивостями слоев. Заряды изображения, потенциал Рытовой-Келдыша, диэлектрическое усиление экситонов. Примеры.

11. Полупроводниковые микрорезонаторы с активными квантовыми ямами, поляритонные эффекты

Брэгговское зеркало, брэгговский микрорезонатор, брэгговский микрорезонатор с квантовой ямой. Расчеты оптических спектров пропускания методом матрицы переноса и матрицы рассеяния. Экситон-поляритоны как легкие бозоны. Бозе-конденсация экситон-поляритонов.

12. Приборы наноэлектроники

Туннельный диод. Детектор ИК на межподзонных переходах. Транзистор с высокой электронной подвижностью. Светодиод и лазер с двойной гетероструктурой. Квантовый каскадный лазер.

13. Фотонные кристаллы, в том числе с оптически активными наноструктурами (полупроводниковыми и металлическими)

От кристаллов для электронов к периодически-модулированным фотонным структурам. Фотонные кристаллы и фотонно-кристаллические слои. Фотонная стоп-зона и запрещенная зона.

14. Резонансные состояния в фотонно-кристаллических слоях. Локализованные и делокализованные плазмоны. Метаматериалы.

Оптические резонансы в фотонно-кристаллических слоях. Примеры: квазиволноводные моды и их дисперсионные зависимости. Резонансы Ми в плазмонных наночастицах. Образование распространяющихся (делокализованных) плазмон-поляритонов.

15. Зондовые методы исследования поверхностей твердых тел и адсорбированных молекул. Спектроскопия неупругого туннелирования. Наномоторы

Сканирующий туннельный микроскоп. Силовой сканирующий микроскоп. Микроскоп ближнего поля. Спектроскопия неупругого электронного туннелирования. Манипулирование адсорбированными молекулами с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Наномоторы

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Грундман М. «Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения». Москва, Физматлит, 2012 (пер. с английского). 771 с
2. Питер Ю., Мануэль Кардона «Основы физики полупроводников», Москва, Физматлит, 2002 (пер. с английского)

Дополнительная литература

1. Ж.И. Алферов «Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии», Нобелевская лекция, 2000 г. <http://ufn.ru/ru/articles/2002/9/e/>
2. Г. Крёмер «Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам», Нобелевская лекция, 2000 г. <http://ufn.ru/ru/articles/2002/9/f/>
3. Дж. С. Килби «Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем», , Нобелевская лекция, 2000 г. <http://ufn.ru/ru/articles/2002/9/g/>
4. K. Sakoda “Optical properties of Photonic Crystals”, Springer, 2001
5. E.L.Ivchenko and G.E. Pikus “Superlattices and Other Heterostructures”, Springer, 1997

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Пакет программирования Матлаб

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	С.Г. Тиходеев, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика наноструктур» обучающийся должен:

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики и математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в твердых телах;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- работать на современном экспериментальном оборудовании;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
- математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

1. Что такое квазиэлектрическое поле и чем оно отличается от электрического поля. Методы создания квазиэлектрического поля.
2. Описать основные типы гетероструктур (по составу, характеру скачков и перекрытия зон, свойствам кристаллических решеток гетеропар)

3. Что такое размерное квантование. Описать основные типы наноструктур.
4. Основные методы изготовления наноструктур.
5. Метод огибающих для описания электронных свойств гетероструктур. Эффективная масса. Однозонное и многозонное приближения. Граничные условия в методе огибающих.
6. Метод матриц переноса и основные квантовые эффекты в наноструктурах: размерное квантование и туннелирование.
7. Матрица рассеяния и ее свойства.
8. Описать механизм возникновения минизон в сверхрешетке
9. Упругое и неупругое туннелирование электронов.
10. Упругое туннелирование через резонансные состояния.
11. Принцип работы транзистора с высокой подвижностью носителей.
12. Диод Исаки, резонансный туннельный диод.
13. Что такое неупругая туннельная спектроскопия.
14. Основные механизмы управления перемещением, десорбцией, химическими реакциями одиночных адсорбированных атомов и молекул при помощи сканирующего туннельного микроскопа.
15. Взаимодействие полупроводниковых наноструктур с электромагнитными полями. Электронная плотность состояний квантово-размерных систем, правила отбора для межзонных и межподзонных переходов.
16. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах: эффекты размерного квантования, роль температуры.
17. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах: эффект диэлектрического усиления.
18. Что такое фотолюминисценция и как она может использоваться для изучения свойств квантовых наноструктур.
19. Принцип работы полупроводникового лазера на двойной гетероструктуре.
20. Принцип работы полупроводникового лазера с горизонтальным резонатором с распределенной обратной связью.
21. Принцип работы полупроводникового лазера с вертикальным резонатором.
22. Принцип работы каскадного лазера
23. Планарный микрорезонатор на Брэгговских зеркалах.
24. Экситонный поляритон в планарном полупроводниковом микрорезонаторе.
25. Основные свойства фотонных кристаллов.
26. Что такое поляритонный кристалл.
27. Частотная дисперсия диэлектрической проницаемости металла в модели Друде и Друде-Лоренца.
28. Поверхностные плазмоны на границе металл/диэлектрик.
29. Как возбудить поверхностный плазмон в металле.
30. Локализованные плазмоны в металлических наночастицах.
31. Плазмон-поляритоны в модулированных металлических слоях.
32. Что такое метаматериалы.
33. Что такое линза Веселаго.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов

1. Типы гетеропереходов и наноструктур. Гетеропереходы I и II рода
2. Метод огибающих для описания электронных свойств полупроводниковых наноструктур.
3. Метод матриц переноса и рассеяния для решения уравнения Шредингера
4. Экситоны в объемном полупроводнике и наноструктурах пониженной размерности
5. Полупроводниковый микрорезонатор: резонаторная мода
6. Туннельный диод
7. Транзистор с высокой подвижностью электронов
8. Светодиод на двойной гетероструктуре
9. Квантовый каскадный лазер

Примеры контрольных заданий

1. Рассчитать зависимость коэффициентов пропускания и отражения электрона $t(E)$ и $r(E)$ от энергии электрона для гетероструктуры, состоящей из барьерного слоя толщины l порядка 5-10 нм и с разрывом зон (высотой барьера) U порядка 100 мэВ. Исследовать диапазон энергий $0 < E < U$. Эффективные массы материалов гетероструктуры могут быть различными. (Характерная эффективная масса электронов порядка $0.07m_e$, m_e - масса свободного электрона).
2. Надбарьерное отражение. То же, что в задаче 1, но для диапазона энергий $E > U > 0$.
3. Резонансное туннелирование через структуру с двумя барьерами. Рассчитать зависимость коэффициентов пропускания и отражения электрона $t(E)$ и $r(E)$ от энергии электрона для гетероструктуры, состоящей из двух барьерных слоев толщины l порядка 5-10 нм и с разрывом зон (высотой барьера) U порядка 100 мэВ, разделенных квантовой ямой ширины L (порядка l). Пусть для простоты материалы квантовой ямы и входного и выходного полубесконечных слоев одинаковы. Исследовать особенно внимательно диапазон энергий $0 < E < U$, где возможно резонансное туннелирование. Эффективные массы материалов гетероструктуры могут быть различными. (Метод матрицы переноса).
4. Резонансное туннелирование через структуру с тремя барьерами. То же, что в задаче 3, но с тремя барьерами.
5. Дискретные уровни в квантовой яме (КЯ). Рассчитать энергии уровней и соответствующие волновые функции электронов в гетероструктуре, состоящей из ямного слоя ширины L (порядка 5-10 нм), окруженной полубесконечными барьерными слоями с разрывом зон (высотой барьера) U порядка 100 мэВ. Эффективные массы материалов гетероструктуры могут быть различными.
6. Дискретные уровни в двойной квантовой яме (ДКЯ). То же, что в задаче 5, но с двумя одинаковыми ямными слоями, разделенными барьерным слоем конечной толщины l (порядка 5 нм).
7. Резонансные уровни в КЯ, окруженной симметричными барьерами конечной ширины. Рассчитать энергии уровней и соответствующие волновые функции электронов в гетероструктуре, состоящей из ямного слоя ширины L (порядка 5-10 нм), окруженной одинаковыми барьерными слоями с разрывом зон (высотой барьера) U (порядка 100 мэВ) толщины l (порядка 5 нм) и полубесконечными слоями ямного материала. Эффективные массы материалов гетероструктуры могут быть различными.
8. Резонансные уровни в ДКЯ, окруженной симметричными барьерами конечной ширины. То же, что в задаче 7, но для структуры с двойной квантовой ямой.
9. Брэгговское зеркало. Рассчитать спектры отражения и пропускания брэгговского зеркала, состоящего из N пар $l/4$ слоев GaAs/AlAs.
Пусть диэлектрическая проницаемость GaAs (AlAs) равна 12 (9), а центральная частота стоп-зоны соответствует энергии фотона 1 эВ.
Как велико должно быть число брэгговских пар N , чтобы коэффициент отражения в центре стоп-зоны превосходил $R=0.9999$?
10. Брэгговский микрорезонатор. Рассчитать спектры отражения и пропускания брэгговского микрорезонатора, состоящего из двух зеркал с N парами $l/4$ слоев GaAs/AlAs и резонаторного GaAs или AlAs l -слоя.
Пусть резонансная частота соответствует энергии фотона 1 эВ.
Как велико должно быть число брэгговских пар N , чтобы добротность микрорезонатора была $Q=10000$?
11. Брэгговский микрорезонатор с экситон-поляритоном. Рассчитать спектры отражения и пропускания брэгговского микрорезонатора, состоящего из двух зеркал с N парами $l/4$ слоев GaAs/AlAs, резонаторного GaAs l -слоя с 10-nm квантовой ямой InGaAs посередине l -слоя.
Диэлектрическая проницаемость квантовой ямы имеет экситонный резонанс, $\epsilon(E) = \epsilon_0[1 + 2E_0D/(E^2 - E_2 - iEG)]$, $E = \hbar\omega$ - частота света, E_0 - экситонный резонанс, D - экситонное продольно-поперечное расщепление, G - ширина экситонного резонанса. Расчеты провести, например, с $[\epsilon_0, E_0, D, G] = [12, 1 \text{ эВ}, 1 \text{ меВ}, 0]$ и $[12, 1 \text{ эВ}, 1 \text{ меВ}, 0.1 \text{ меВ}]$ и сравнить то, что получилось.
12. Брэгговский микрорезонатор с экситон-поляритоном. Рассчитать спектры отражения и пропускания брэгговского микрорезонатора, состоящего из двух зеркал с N парами $l/4$ слоев GaAs/AlAs, резонаторного AlAs l -слоя с 10-nm квантовой ямой GaAs посередине l -слоя.
Куда нужно поместить квантовую яму для того, чтобы получить ненулевое экситон-поляритонное расщепление? Как усилить это расщепление?

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Полупроводниковые гетеропереходы. Квазиэлектрическое поле.
2. Фотонные кристаллы и поляритонные кристаллы

Билет 2.

1. Гетеропереходы I и II рода
2. Сканирующая туннельная спектроскопия

Билет 3.

1. Туннелирование электронов и дырок в наноструктурах и резонансные состояния.
2. Транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT)

Билет 4.

1. Экситоны в объемном полупроводнике и наноструктурах пониженной размерности
2. Резонансный туннельный диод

Билет 5.

1. Квазидвумерный электронный газ в полевом транзисторе на гетеропереходе.
2. Светодиоды и лазеры на квантовых наноструктурах

Билет 6.

1. Полупроводниковый микрорезонатор с квантовой ямой: экситонные поляритоны
2. Квантовый каскадный лазер

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.