

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников
высшей школы по направлению

“ _____ ”

на базе учебного курса
"Физика наносистем"

(наименование учебного курса)

Цель – дать знания по физическим свойствам и показать особенности поведения носителей заряда в низкоразмерных полупроводниковых структурах (квантовых ямах, одномерных проводниках, квантовых точках, сверхрешетках), продемонстрировать последние достижения и открытия в этой области, технологию получения и применения низкоразмерных структур

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 36 часов

Форма обучения с частичным отрывом от работы, дистанционно- очная

Режим занятий 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с физическими свойствами полупроводниковых низкоразмерных структур. В курсе последовательно излагаются теоретические и экспериментальные данные по двумерным структурам, полупроводниковым сверхрешеткам, квантовым одномерным проводникам и точкам. Эти низкоразмерные структуры широко освещаются в специальной литературе и англоязычных монографиях. В предлагаемом курсе последовательно излагаются основы размерного квантования, материалы по сверхрешеткам и их применению. Рассматриваются электронный спектр и основные механизмы проводимости в двумерных и одномерных структурах, их зависимость от размеров, методов и параметров легирования. Описаны физические свойства квантовых точек. Приводятся систематические данные по анизотропии проводимости, оптическим свойствам однослойных и многослойных структур с квантовыми нитями и квантовыми точками. Описывается их энергетический спектр, транспортные свойства, практическое использование. В настоящее время начинается широкое применение низкоразмерных объектов в медицине и биологии.

Требования к уровню освоения учебного курса.

Преподаватели должны:

- **Знать:** физику полупроводников, физику конденсированного состояния вещества, квантовую механику в приложении к наноразмерным системам. Основные принципы размерного квантования и свойств низкоразмерных полупроводниковых структур.
- **Иметь** навыки: работы с измерительной аппаратурой (цифровые амперметры, вольтметры и источники тока др.), электронной растровой микроскопией, молекулярно-лучевой эпитаксией.
- **Иметь** представление: о международных системах единиц, размерном квантовании, особенностях физических законов в наносистемах; оптических, транспортных свойствах наносистем; квантовании в магнитном поле в низкоразмерных системах.

Научные работники должны:

- **1.Знать:** физику конденсированного состояния вещества и квантовую механику применительно к наносистемам. Основные принципы размерного квантования и свойств низкоразмерных полупроводниковых структур.
- **2.Иметь навыки:** работы с простейшей измерительной аппаратурой (цифровые амперметры, вольтметры и источники тока др.), электронной растровой микроскопией, молекулярно-лучевой эпитаксией.
- **3.Иметь представление:** о размерном квантовании, особенностях физических законов в наносистемах; оптических, транспортных свойствах наносистем; квантовании энергии в магнитном поле.

Учебный курс «Физика наносистем» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в НИЯУ МИФИ.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы размерного квантования, основных физических свойств низкоразмерных полупроводниковых структур. Рассматриваются транспортные и оптические свойства полупроводниковых сверхрешеток, двумерных (гетероструктур и квантовых ям) одномерных (квантовых проводников) и нульмерных (квантовых точек) структур. Рассматриваются также особенности квантования энергетического спектра электронов в низкоразмерных структурах в сильном магнитном поле. В курс включены последние достижения в этой области, отмеченные Нобелевскими премиями по физике.

Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций:

Лекция 1: Размерное квантование.

Размерное квантование, энергетический спектр двумерных электронов. Решение уравнения Шредингера в приближении треугольного и прямоугольного потенциала. Плотность электронных состояний в трехмерном, двумерном, одномерном и нульмерном случаях. Расчет полного числа электронов при размерном квантовании. Распределение электронов в r -пространстве при размерном квантовании. Переход металл-диэлектрик в нанокристаллах. Одномерный кристалл, модель Кронига-Пенни. Инверсионные слои в МДП структурах, гетероструктуры, квантовые ямы. Молекулярно-лучевая эпитаксия и технология получения полупроводниковых сверхрешеток и гетероструктур. Процессы на поверхности во время роста. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

Лекция 2: Свойства двумерных электронов.

Экранирование в 3D в 2D и в квази-2D случаях. 3D плазмоны, 2D плазмоны, 2D магнетоплазмоны и краевые магнетоплазмоны. Квантование энергии электронов в магнитном поле. Особенности осцилляций магнетосопротивления в двумерных системах. Целочисленный квантовый эффект Холла. Метрологические приложения целочисленного квантового эффекта Холла. Многочастичные эффекты, дробный квантовый эффект Холла.

Лекция 3: Полупроводниковые сверхрешетки.

Классификация полупроводниковых сверхрешеток. Композиционные сверхрешетки. Легированные сверхрешетки, структура потенциала сверхрешеток. Типы легирования сверхрешеток. Энергетический спектр сверхрешетки. Минизоны в сверхрешетках. Управление зонным спектром на примере сверхрешетки GaAs/GaAlAs. Влияние biaxialных напряжений на энергетический спектр напряженных сверхрешеток без учета и с учетом внутреннего пьезоэффекта. Оптические свойства сверхрешеток.

Внутризонные переходы. Межзонные переходы. Проводимость сверхрешеток вдоль оси и перпендикулярно оси, туннелирование, отрицательная дифференциальная проводимость.

Лекция 4: Квантовые одномерные проводники.

Методы формирования квантовых одномерных проводников. Квантование энергии в узких двумерных проводниках при отсутствии магнитного поля. Квантование энергии в узких двумерных проводниках в магнитном поле. Поперечные моды.

Баллистический транспорт, сопротивление баллистического проводника. Квантовые интерференционные эффекты в одномерных проводниках.

Лекция 5: Квантовые точки.

Методы получения полупроводниковых квантовых точек. Эпитаксиальный рост квантовых точек с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии. Квантовые точки - искусственные атомы. Особенности квантования энергетического спектра электронов в квантовых точках. Оптические свойства квантовых точек. Практические применения квантовых точек.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в изучении принципов работы молекулярно-лучевой эпитаксии и проведении измерений электрофизических параметров гетероструктур АШВУ.

Лабораторная работа №1: Ознакомление с работой установки молекулярно-лучевой эпитаксии. Элементы технологии молекулярно-лучевой эпитаксии. Оборудование - МЛЭ Riber 21 T.

Лабораторная работа №2: Измерение электрофизических характеристик гетероструктур АШВУ.

3.Количество часов, отводимых на дистанционные и очные части учебных курсов (учебного курса), другие различные виды занятий.

Дистанционные учебные курсы – 16 часов

Очные учебные курсы – 14 часов

Самостоятельная работа – 6 часов

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится 16 и 14 часов соответственно.

Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу

«Физика наносистем»

Лекция 1: Размерное квантование

1. При каких размерах полупроводника проявляется размерное квантование?
А) При размере меньше одного микрона Б) При размере меньше одного нанометра
В) Когда размер становится больше длины волны де-Бройля электрона Г) Когда размер становится меньше длины волны де-Бройля электрона

Ответ:

2. Как зависит энергия электрона от ширины квантовой ямы?
А) Вообще не зависит Б) увеличивается линейно с увеличением ширины квантовой ямы
В) Увеличивается обратно пропорционально квадрату ширины квантовой ямы с уменьшением последней Г) Уменьшается линейно с уменьшением ширины квантовой ямы

Ответ:

3. Как зависит электронная плотность состояний от энергии в одномерных проводниках?
А) Квадратично Б) Обратно пропорционально
В) Линейно Г) обратно пропорционально корню квадратному от энергии

Ответ:

4. От чего зависит проводимость инверсионного слоя на поверхности полупроводника?
А) От напряжения сток-исток Б) От толщины окисла на поверхности
В) От напряжения затвора Г) От всего выше перечисленного

Ответ:

Лекция 2: Свойства двумерных электронов

1. Как зависит длина экранирования от плотности электронных состояний в 2D случае?
А) Линейно Б) Обратно пропорционально
В) Экспоненциально Г) Квадратично

Ответ:

2. Чем определяется плазменная частота?
А) Эффективной массой электрона Б) Диэлектрической проницаемостью материала
В) Концентрацией электронов Г) Всеми этими параметрами

Ответ:

3. Какой величиной магнитного поля B определяется период осцилляций магнетосопротивления двумерных электронов?
А) Параллельной к слою составляющей магнитного поля Б) Перпендикулярной к слою составляющей магнитного поля
В) Полной величиной магнитного поля Г) Половиной полной величины магнитного поля

Ответ:

4. В каких полупроводниковых структурах наблюдается квантовый эффект Холла?
А) В гетероструктурах Б) В квантовых ямах
В) В сверхрешетках Г) Во всех перечисленных структурах

Ответ:

5. Чем определяется квант сопротивления?

- А) Постоянной Планка
В) Постоянной Планка деленной на квадрат заряда электрона
Ответ:
- Б) Зарядом электрона
Г) Зарядом электрона деленным на квадрат постоянной Планка

Лекция 3: Полупроводниковые сверхрешетки

1. Чем определяется ширина минизоны композиционной сверхрешетки?
А) шириной барьера
В) Эффективной массой электрона
Ответ:
- Б) Шириной квантовой ямы
Г) Периодом сврхрешетки
2. Биаксиальное напряжение в ямах сверхрешетки $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{Al}_{0,33}\text{In}_{0,67}\text{As}$ (барьеры)?
А) Смещает потолок валентной зоны легких дырок вверх, тяжелых дырок - вниз
В) Смещает потолок валентной зоны легких дырок вниз, тяжелых дырок - вверх
Ответ:
- Б) Не изменяет положение краев зон
Г) Смещает потолок валентной зоны одинаково для тяжелых и легких дырок
3. Энергия размерного квантования в легированной сверхрешетке определяется?
А) Уровнем легирования
В) Плазменной частотой
Ответ:
- Б) Циклотронной частотой
Г) Отношением плазменной и циклотронной частот
4. Дифференциальная проводимость сверхрешетки вдоль её оси с ростом приложенного напряжения ?
А) Не изменяется
В) Уменьшается
Ответ:
- Б) Увеличивается
Г) Осциллирует
5. Легированные сверхрешетки создаются ?
А) Последовательным планарным легированием донорной и акцепторной примесью одного полупроводника
В) Последовательным планарным легированием донорной примесью с увеличивающимся уровнем одного полупроводника
Ответ:
- Б) Чередованием двух разных полупроводников с донорным легированием
Г) Чередованием двух разных полупроводников с акцепторным легированием

Лекция 4: Квантовые одномерные проводники

Методы формирования квантовых одномерных проводников. Квантование энергии в узких двумерных проводниках при отсутствии магнитного поля. Квантование энергии в узких двумерных проводниках в магнитном поле. Поперечные моды. Баллистический транспорт, сопротивление баллистического проводника. Квантовые интерференционные эффекты в одномерных проводниках.

1. Сопротивление баллистического проводника?
А) Обратно пропорционально его длине
В) Прямо пропорционально квадрату его длины
Ответ:
- Б) Не зависит от его длины
Г) Прямо пропорционально его длине

Ответ:

2. Сопротивление баллистического проводника возникает?

- А) Из-за рассеяния электронов на примесях в нем
Б) Из-за рассеяния электронов на поверхности проводника
В) В контактах на конце проводника
Г) Из-за рассеяния электронов друг на друге

Ответ:

3. Сопротивление узкого двумерного проводника с отверстием в перпендикулярном магнитном поле осциллирует с периодом, который определяется?

- А) Квантом магнитного потока
Б) Постоянной тонкой структуры
В) Постоянной Клитцинга
Г) Постоянной Планка

Ответ:

4. Направление скорости электрона в узком двумерном проводнике?

- А) Не зависит от его координаты
Б) Зависит только от величины координаты
В) Зависит от величины и знака координаты
Г) Зависит только от знака координаты

Ответ:

Лекция 5: Квантовые точки

1. Квантово-размерные уровни энергии в квантовой точке определяются ?

- А) Упругими напряжениями в решетке квантовой точки
Б) Размерами квантовой точки
В) Материалом квантовой точки
Г) Всеми этими параметрами

Ответ:

2. Как изменяется энергия излучения из квантовой точки при увеличении ее размеров?

- А) Не зависит от размеров
Б) Уменьшается с ростом размера
В) Увеличивается с ростом размера
Г) Вначале увеличивается, а затем уменьшается

Ответ:

3. Если на уровне размерного квантования в многоуровневой квантовой точке есть один электрон, то второму электрону для вхождения в квантовую точку ?

- А) Требуется в 2 раза меньшая энергия по сравнению с первым
Б) Требуется большая энергия по сравнению с первым
В) Требуется такая же энергия
Г)

Ответ:

4. При параболическом ограничивающем потенциале, на каком расстоянии находятся уровни размерного квантования?

- А) Расстояние между ними растет как квадрат номера уровня
Б) Расстояние между ними увеличивается линейно с ростом номера уровня
В) Расстояние между ними уменьшается с ростом номера
Г) Расстояние между ними не зависит от их номера

Ответ:

По 5 контрольных вопросов на каждую лекцию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Лекция

1. Какие процессы происходят на поверхности структуры во время эпитаксиального роста?
2. Какие соединения можно использовать при газофазном эпитаксиальном росте пленок?
3. Каковы физические причины роста энергии электрона при уменьшении ширины квантовой ямы ?
4. Какие типы гетероструктур существуют?
5. Как создается инверсионный проводящий слой на поверхности полупроводника?

2 Лекция

1. Чем отличается закон дисперсии двумерных плазмонов от трехмерных?
2. При каких условиях возможно наблюдение квантовых осцилляционных эффектов?
3. Как применяется целочисленный квантовый эффект Холла в метрологии?
4. Какие дроби наблюдаются в дробном квантовом эффекте Холла?
5. Как из частоты осцилляций магнетосопротивления получить концентрацию двумерных электронов?

3 Лекция

1. Какие типы сверхрешеток существуют?
2. Как образуются минизоны в сверхрешетках?
3. Как можно управлять энергетическим спектром сверхрешетки?
4. Что такое отрицательная дифференциальная проводимость сверхрешетки?
5. Как изменяется энергетический спектр сверхрешетки под влиянием биаксиальных напряжений.

4 Лекция

1. Какие известны методы формирования полупроводниковых одномерных проводников?
2. Что такое поперечная мода?
3. При каких условиях возможно наблюдение баллистической проводимости?
4. Как зависит сопротивление канала полевого транзистора от его ширины?
5. Как измерить квант магнитного потока?

5 Лекция

1. Методы формирования полупроводниковых квантовых точек.
2. Как можно уменьшить дисперсию квантовых точек по размерам?
3. В чем отличие оптического излучения из квантовых точек и массивного полупроводника?
4. Почему часто называют квантовые точки искусственными атомами?
5. Основные направления применения квантовых точек.

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

Темы рефератов:

- 1) Размерное квантование в прямоугольной и треугольной квантовой яме.
- 2) Целочисленный квантовый эффект Холла, его практическое использование.
- 3) Энергетический спектр сверхрешеток, управление им и практическое использование сверхрешеток.
- 4) Квантовые эффекты в одномерных проводниках.
- 5) Получение и применение квантовых точек.

4.2. Учебно-тематический план.

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	“Физика наносистем”	36	16	6	14	
1.	Лекция 1: Размерное квантование					
2.	Лекция 2: Свойства двумерных электронов					1. Тесты для самотестирования
3.	Лекция 3: Полупроводников					2. Контрольные вопросы (электронная

5.	ые сверхрешетки				зачётка)
	Лекция 4: Квантовые одномерные проводники				
	Лекция 5: Квантовые точки				
Итоговый контроль		1. Тесты для самотестирован ия	2. Контрольные вопросы (электронная зачётка)	3. Реферат	Реферат

4.3.Список литературы (основной и дополнительной), а также других видов учебно-методологических материалов и пособий, необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных дисков и др.).

Основная литература

1. Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский – «Квазичастицы в физике конденсированного состояния вещества», М., Физматлит, 632 стр. (2005,2007).
2. В.А. Кульбачинский - Двумерные, одномерные, нульмерные структуры и сверхрешетки - физ.-фак. МГУ, 163 с. (1998).
3. Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн - Электронные свойства двумерных систем - М. Мир 530 с. (1982).
4. Л.Ченг, К. Плог - Молекулярно-лучевая эпитаксия - М, Мир (1989).
5. М.А. Херман - Полупроводниковые сверхрешетки - М, Мир 210 с. (1979).

Дополнительная литература

1. В.А. Кульбачинский – Полупроводниковые квантовые точки – Соросовский образовательный журнал, Т.7, №4, стр. 98-104 (2001).
2. С. Гирвин - Квантовый эффект Холла – г. Ижевск, Ин-т компьютерных исследований, 156 стр., 2003 г.
3. Э.И. Рашба, В.Б. Тимофеев – Квантовый эффект Холла - ФТП, Т.20, №6, 977 (1986).
4. К.Ф. Клитцинг, Квантованный эффект Холла, УФН, Т.150, №1, с.107-126.
5. Й. Имри – Введение в мезоскопическую физику – М., Физматлит, 304 стр., 2002 г.

6. В.И. Ильин, С.Ф. Музсихин, А.Я.Шик – Варизонные полупроводники и гетероструктуры – С.Петербург, Наука, 100 стр., 2000 г.
7. А.П. Силин – Поупроводниковые сверхрешетки - УФН, Т.147, №3, 485 (1985).
8. УФН, Т.170, №3 (2000). (Нобелевские лекции по физике) Р.Б. Лафлин - Дробное квантование, стр. 292-303; Х.Штермер - Дробный квантовый эффект Холла, стр. 304-319; Д.Цуи - Соотношение беспорядка и взаимодействия в двумерном электронном газе, помещенном в сильное магнитное поле, стр.320-325.

Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса на сайте www.nanoobr.ru