



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «ИГУ»

Кафедра общей и экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета

Н.М. Буднев

«17» апреля 2024 г.



Рабочая программа дисциплины (модуля)

Код дисциплины **Б1.О.10**

Наименование дисциплины (модуля): Физика низкоразмерных структур

Рекомендуется для направления подготовки специальности

03.04.02 Физика «Физика материалов твердотельной электроники и фотоники»

Степень (квалификация) выпускника – магистр.

Форма обучения: очная.

Согласовано с УМК:
физического факультета
Протокол № 42 от «15» апреля 2024 г.

Председатель: д.ф.-м.н., профессор
Н.М. Буднев

Рекомендовано кафедрой:
общей и экспериментальной физики
Протокол № 7
от «26» марта 2024 г.
Зав. кафедрой д.ф.-м.н., профессор
А.А. Гаврилюк

Иркутск 2024 г.

1.1. Цель дисциплины

Целью курса является формирование представлений о физических свойствах электронных системах различной размерности, как влияет понижение размерности на физические явления, и какие новые эффекты при этом появляются.

1.2. Задачи дисциплины

Задачи курса физики низкоразмерных систем состоят в том, чтобы изложить студентам принципиальные понятия физики твердого тела для систем с пониженной размерностью и привить им основы понимания физических процессов, протекающих в этих системах при внешних воздействиях, а также дать элементарные представления об использовании этих явлений в современных областях техники.

1.3. Место дисциплины в системе ВПО.

Преподавание данной дисциплины строится на основе ранее полученных знаний в курсах «Квантовая механика» «Квантовая теория твердых тел», «Физические свойства реальных кристаллов».

1.4. Требования к уровню освоения содержания курса

Понимание места физики низкоразмерных систем в физике твердого тела. Знание основных электронных свойств низкоразмерных систем, эффектов наблюдаемых в этих структурах, а также владение навыками численной оценки величин, характеризующих основные свойства.

Освоение дисциплины необходимо для освоения курсов ” Применение материалов и компонентов для создания электронных устройств ” (код дисциплины Б1.В.ДВ.5.1), “ Современные направления развития физического материаловедения” (код дисциплины Б1.Б.4), “Основы проектирования электронной компонентной базы” (код дисциплины Б3.В.ОД.3).

3. Компетенции (дескрипторы компетенций), формируемые в процессе изучения дисциплины:

Индекс и Наименование компетенции (в соответствии с ФГОС ВО (ВПО))	Признаки проявления компетенции/ дескриптора (ов) в соответствии с уровнем формирования в процессе освоения дисциплины
ПК-4 способностью к организации и проведению экспериментальных исследований с применением	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> -основные сведения о классификации наноразмерных структур, их особенностях; -механизмы переноса электронов в наноразмерных структурах;

<p>современных средств и методов</p>	<p>- технологии, позволяющие формировать приборные структуры нанoeлектроники и их использование при конструировании элементов электронной техники;</p> <p>Уметь:</p> <p>- оценивать пределы применимости классического подхода, роль и важность квантовых эффектов при описании физических процессов в наноразмерных рабочих элементах электронных устройств;</p> <p>-оценивать физические параметры наноразмерных (проводимость, термодинамические функции, дефектообразование) по экспериментальным данным;</p> <p>Владеть:</p> <p>-методами квантово-механического описания простейших квантовых систем, входящих в состав наноразмерных элементов электроники, способами расчетов физических характеристик наноразмерных гетероструктур.</p>
<p>ПК-1</p> <p>готовностью формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач</p>	<p>Знать- основные свойства полупроводниковых, диэлектрических и проводящих материалов; физические и физико - химические основы технологии материалов микро- и нанoeлектроники; иметь представление об особенностях объектов микро- и нанoeлектроники.</p> <p>Уметь: применять методы измерения электрофизических параметров; оценивать пределы применимости квазиклассического подхода, роль и важность квантовых эффектов при описании физических процессов в элементах микро- и нанoeлектроники; в ходе микроминиатюризации последних; обеспечивать адекватный выбор и технологическую реализацию процессов для создания приборов и устройств микро- и нанoeлектроники;</p> <p>Владеть: методами обработки и оценки погрешности измерений электрофизических параметров микроэлектронных элементов; методами квантово - механического описания простейших квантовых систем, входящих в состав элементов микро- и нанoeлектроники; методами экспериментальных исследований параметров и характеристик изделий микро- и нанoeлектроники</p>
<p>ПК-5</p>	<p>Знать- основные свойства полупроводниковых,</p>

<p>способностью делать научно-обоснованные выводы по результату теоретических и экспериментальных исследований, готовить научные публикации и заявки на изобретения</p>	<p>диэлектрических и проводящих материалов; физические и физико-химические основы технологии материалов микро- и нанoeлектроники; иметь представление об особенностях объектов микро- и нанoeлектроники.</p> <p>Уметь: применять методы измерения электрофизических параметров; оценивать пределы применимости квазиклассического подхода, роль и важность квантовых эффектов при описании физических процессов в элементах микро- и нанoeлектроники; в ходе микроминиатюризации последних; обеспечивать адекватный выбор и технологическую реализацию процессов для создания приборов и устройств микро- и нанoeлектроники;</p> <p>Владеть: методами обработки и оценки погрешности измерений электрофизических параметров микроэлектронных элементов; методами квантово - механического описания простейших квантовых систем, входящих в состав элементов микро- и нанoeлектроники; методами экспериментальных исследований параметров и характеристик изделий микро- и нанoeлектроники</p>
---	---

4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения)

Вид учебной работы	Всего часов
Аудиторные занятия (всего)	60
В том числе:	-
Лекции	20
Практические занятия (ПЗ)	40
Контроль самостоятельной работы	8
Самостоятельная работа (всего)	25
В том числе:	-
Реферат (при наличии)	36
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>	
<i>Контрольная работа</i>	8
Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен)	экзамен
Общая трудоемкость	144 часы

5. Содержание дисциплины (модуля).

5.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля). Все разделы и темы нумеруются.

1. Размерное квантование. Размерное квантование энергии электронов. Условия наблюдения квантоворазмерных эффектов. Структуры с низкоразмерным электронным газом. Сверхрешетки. 2. Технология получения квантово-размерных структур. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Газофазная эпитаксия из метал-органических соединений. Нанолитография. Саморганизация квантовых точек и нитей. 3. Носители заряда в низкоразмерных структурах. Плотность состояний в электронных системах с пониженной размерностью. Статистика носителей в низкоразмерных структурах. Переход от дискретного к непрерывному спектру в направлении квантования для систем различной размерности. Квазинизкоразмерные системы. Экранирование 2D, 3D случай. Водородоподобный атом, экситон в 3D, 2D, 1D случае. 4. Оптические свойства квантовых ям. Межзонное поглощение. Межуровневые переходы. Оптическая ионизация квантовых ям. Эффекты деполяризации. 5. Кинетические эффекты в двумерных системах. Время релаксации и подвижность. Механизмы рассеяния. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла. Метрологические применения квантового эффекта Холла. Роль экранирования и крупномасштабных флуктуаций потенциала в Квантовом эффекте Холла. Квантовые интерференционные поправки к проводимости. 6. Свойства квантовых нитей и точек Баллистический транспорт. Баллистическая проводимость нитей. Связь КЭХ с квантованием проводимости в нитях. Кулоновская блокада. 7. Туннельные эффекты Двухбарьерные структуры. Коэффициент прохождения, отражения. Квазистационарные состояния электрона в яме. Энергетическая зависимость резонансного коэффициента прохождения. Влияние магнитного поля на тунелирование. 8. Применение квантово-размерных структур в приборах микро- и наноэлектроники. Лазеры с квантовыми ямами и точками. Оптические модуляторы. Фотоприемники на квантовых ямах. Транзисторы с высокой подвижностью носителя. Приборы на основе баллистического транспорта. Устройства на основе одноэлектронного транзистора.

5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов и тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин (вписываются разработчиком)								
		1	2	3	4	5	6			
1.	Материалы электронной техники									
2.	Методы исследования материалов и структур	1	2	3	4	5	6			

5.3. Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий

№	Наименование	Наименование темы	Виды занятий в часах
---	--------------	-------------------	----------------------

п/п	раздела		Лекц.	ПЗ	СРС, КСР	Всего
1.	1 Классификация технологических процессов МЭ производства.	1.1 Классификация и характеристика основных технологических процессов производства изделий микроэлектроники. Особенности микро- и нанoeлектронной технологии. Тенденции и основные особенности развития современной технологии МЭ. Базовые технологические процессы МЭ		4	14, 1	16
2.	2. Технологические процессы формирования тонкопленочных покрытий	2.1 Общие понятия о пленочных покрытиях, их классификация и характеристика. Методы получения ТПП. 2.2 Физико-химические основы, технология и области применения процессов термического окисления полупроводников. Практические методы получения защитных, сверхтолстых и подзатворных диэлектриков Физико-химические основы, технология и области применения процессов анодного и ионно-плазменного окисления. Технология получения туннельно-тонких окисных пленок. Физико-химические основы и технология эпитаксиального наращивания монокристаллических пленок. Молекулярная эпитаксия.		4	14,1	16
3	3. Технологические процессы легирования полупроводников.	3.1 Физико-химические основы и технология процессов объемного и поверхностного легирования полупроводников. Физика и математика диффузии. Диффузионные источники и методы проведения диффузионных процессов. Одно- и двухстадийные процессы диффузии.		2	7	8
4.	4 Технологические процессы формирования топологии МЭ структур методами локальной микрообработки.	4. Основные понятия и определения, классификация методов локальной микрообработки. Фотолитография, электронолитография, ионолитография и рентгенолитография. Физико-химические основы фотохимических методов обработки. Фоторезисты и их свойства. Технологическая схема процесса фотолитографии. Назначение, физическая сущность и технология основных этапов процесса фотолитографии. Трафаретные и лучевые методы локальной микрообработки: проекционная и контактная оптическая фотолитография, электронолитография.		8	28,2	32

5.	4. Технологические процессы получения межсоединений в МЭ приборах.	5.1 Электропроводность металлов, время релаксации, Уравнение Больцмана. Электропроводность собственных и примесных полупроводников, температурная зависимость. Механизмы рассеяния носителей заряда. 5.2 Классификация методов получения межсоединений в технологии МЭ, их характеристика и области применения. Дискретные методы получения межсоединений. Технология процессов термокомпрессионной, ультразвуковой и электроконтактной микросварки. Интегральные методы получения межсоединений. Физические основы и технология процесса металлизации. Технология получения многослойных структур металл-диэлектрик..		6	21	24
6.	6. Технологические схемы производства МЭ структур..	6.1 Практическая разработка топологии элементов ИМС с микронными и субмикронными размерами. Разработка комплекта фотошаблонов для заданной топологии активных или пассивных компонентов ИМС. Разработка технологических схем производства простейших микро- и нанозлектронных структур с различными методами изоляции. Выбор последовательности технологических процессов и технологических режимов получения металлических, полупроводниковых и диэлектрических слоев		4	14,1	16
Всего:				36	36	72

6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Тема 1 Раздел 1.1	Решение и разбор задач по теме.	4	Контрольная работа.	ПК1
2.	Тема 2 Разделы 2.1-2.2	Решение и разбор задач по теме.	4	Контрольная работа.	ПК4
3.	Тема 3	Решение и разбор	2	Контрольная	ПК4

	Раздел 3.1	задач по теме.		работа.	
4.	Тема 4 Разделы 4.1-4.3	Решение и разбор задач по теме.	8	Контрольная работа.	ПК5
5.	Тема 5 Разделы 5.1-5.3	Решение и разбор задач по теме.	6	Контрольная работа.	ПК5
6.	Тема 6 Разделы 6.1-6.2	Решение и разбор задач по теме.	4	Контрольная работа.	ПК1

7. Примерная тематика заданий для самостоятельной работы (реферат)

1. Принцип пространственного квантования.
 2. Потенциальная как интерферометр для электронов.
 3. Цепочка атомов в беконечноглубокой потенциальной яме.
 4. Переход от дискретного к непрерывному спектру.
 5. Полупроводниковые гетеропереходы.
 6. МДП структуры.
 7. Дельта слои.
 8. Двойная квантовая яма. Сверхрешетки.
 9. Спектр состояний и волновые функции. Конечная прямоугольная яма.
 10. Спектр состояний и волновые функции. Треугольная потенциальная яма.
 11. Спектр состояний и волновые функции. Двойная квантовая яма
 12. . Спектр состояний и волновые функции. Сверхрешетка.
- Технология низкоразмерных полупроводниковых систем
13. Условия для получения хороших гетеропереходов.
 14. Гетеропары химические аналоги.
 15. Гетеропары согласование постоянных решеток.
 16. Молекулярно-лучевая эпитаксия.
 17. Контроль за ростом слоев в установках молекулярно-лучевой эпитаксии.
 18. Газофазная эпитаксия из металлорганических соединений.
 19. Нанолитография.
 20. Типы роста вещества на подложке.
 21. Рост на фатесированных поверхностях.

22. Рост на винциальных гранях.
 23. Рост массива квантовых точек.
Носители заряда в низкоразмерных структурах.
 24. Плотность состояний. Трехмерный случай.
 25. Плотность состояний. Двумерный случай.
 26. Плотность состояний. Одномерный случай.
 27. Статистика носителей заряда.
 28. Связь концентрации и энергии Ферми. Трехмерный случай.
 29. Связь концентрации и энергии Ферми. Двумерный случай.
 30. Связь концентрации и энергии Ферми. Одномерный случай.
 31. Невырожденный случай. Различие для разных размерностей.
 32. Экранирование Трехмерный случай.
 33. Экранирование Двумерный случай.
 34. Осцилляции Фриделя экранирующего потенциала.
 35. Водородоподобный атом. Двумерный случай.
 36. Экситон. Двумерный случай
- Оптические свойства квантовых ям.
37. Прямозонные полупроводники.
 38. Не прямозонные полупроводники.
 39. Вероятность переходов в поле электромагнитной волны.
 40. Межзонное поглощение света. Правила отбора для симметричных ям.
 41. Межзонное поглощение света. Правила отбора для не симметричных ям.
 42. Межуровневые переходы. Правила отбора для симметричных ям.
 43. Межуровневые переходы. Правила отбора для не симметричных ям.
 44. Оптическая ионизация квантовых ям.
 45. Резонансная квантовая яма.
 46. Эффекты деполяризации
- Кинетические эффекты в двумерных системах
47. Время релаксации и подвижность.
 48. Время релаксации. Сравнение 2D и 3D систем.
 49. Рассеяние на ионизованных примесях. Двумерный случай.
 50. Фононное рассеяние. Двумерный случай.
 51. Сплавное рассеяние.
 52. Рассеяние на шероховатостях границы.
 53. Межуровневое рассеяние.

54. Пути улучшения качества гетероструктур.
55. Модулированное легирование.
56. Понятие «баллистического» движения электрона.
57. Скорость электрона на расстояниях меньше длины свободного пробега.
58. Преломление пучка электронов на границе с различными концентрацией носителей.
59. Полное отражение электронов от границы.
Туннельные эффекты.
60. Полевая ионизация одиночной ямы.
61. Двухбарьерные структуры.
62. Резонансное тунелирование.
63. Энергетическая зависимость резонансного коэффициента прохождения
64. Воль-амперная характеристика туннельной структуры.
65. Влияние магнитного поля на тунелирование.
Квантовый эффект Холла.
66. Измерение тензора магнитосопротивления.
67. Связь тензоров проводимости и сопротивления.
68. Движение электронов в магнитном поле. Краевые состояния.
69. Формула Друде для магнитного поля.
70. Обычный эффект Холла.
71. Вид магнитосопротивления (продольного и поперечного) в режиме Квантовый эффект Холла.
72. Уровни Ландау.
73. Вырождение уровней Ландау в двумерном случае.
74. Локализованные и делокализованные состояния в двумерном электронном газе в магнитном поле. Край подвижности.
75. Холловская скорость носителей заряда в условиях частичной локализации.
76. Связь Квантового эффекта Холла и локализации.
77. Экранирование в магнитном поле.
78. Роль крупномасштабных флуктуаций потенциала в Квантовом эффекте Холла.
79. Дробный квантовый эффект Холла.
80. Роль электрон-электронного взаимодействия в дробный квантовый эффект Холла.
Квантовые интерференционные эффекты
81. Время сбоя фазы.
82. Слабая локализация.

83. Параметр понижения размерности для эффектов слабой локализации.
84. Влияние магнитного поля на слабую локализацию.
85. Параметр r_s .
86. Квантовая интерференционная поправка к проводимости за счет Электрон - электронное взаимодействия.
87. Параметр понижения размерности для эффектов электрон-электронного взаимодействия..
88. Влияние магнитного поля на поправки от электрон-электронного взаимодействия. Свойства квантовых нитей и точек.
89. Границы применимости понятия удельного сопротивления.
90. Баллистическая проводимость нитей.
91. Выделение энергии при квантовании проводимости нитей
92. Необходимые условия для наблюдения квантования проводимости нитей.
93. Кулоновская блокада.
94. Требования к структурам для наблюдения кулоновской блокады. Применение квантово-размерных структур в приборах микро- и наноэлектроники.
95. Лазеры с квантовыми ямами и точками
96. Оптические модуляторы
97. Фоточувствительные pn -структуры
98. Фотоприемники на квантовых ямах
99. Лавинные фотодиоды
100. Транзисторы с высокой подвижностью носителей
101. Транзисторы на горячих электронах
102. Резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке
103. Приборы на основе баллистического транспорта
104. Одноэлектронный транзистор
105. Устройства на основе одноэлектронных транзисторов
106. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика **8.**

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля):

Рекомендуемая литература (основная)

1. А.Я. Шик, Л.Г. Бакуев, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков Физика низкоразмерных систем. СПб., 2001.
2. В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер Физика квантовых низкоразмерных структур. М.: Логос, 2000.
3. В.А. Кульбачинский Двумерные, одномерные, нульмерные структуры и

сверхрешетки. Физ.фак МГУ 1998. б) дополнительная литература

1. Дж.М.Мартинес- Дуарт, Р.Дж.Мартин- Палма, Ф. Агулло- Руеда. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. Пер с англ. Техносфера, 2009,368 с.
2. Л.Фостер. Нанотехнологии, наука, инновации и возможности. М., Техносфера, с.348, 2008г.
3. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения. Сборник под редакцией д.т.н., профессора П.П.Мальцева. Москва: Техносфера,2008. – 432с.
4. В.И.Галкин, В.Е.Пелевин. Промышленная электроника и микроэлектроника. Учебное пособие, М. ;Высшая школа, 2006 г. – 350с.
5. Гаврилюк А.А., Зубрицкий С.М., Петров А.Л.. Физика металлов и сплавов. Учебное пособие. Иркутск-2009, 93с.

в) Интернет источники:

научные публикации в реферативных журналах по актуальным проблемам физики магнитных явлений и магнитным материалам электроники Электронные версии журналов: “Физика твердого тела”, “Журнал технической физики”, “Письма в журнал технической физики”, “Физика и техника полупроводников” <http://journals.ioffe.ru>.

www.nanonewsnet.ru – Сайт о нанотехнологиях в России.

www.nanodigest.ru – Интернет журнал о нанотехнологиях

www.nano-info.ru - Сайт о современных достижениях в области микро- и нанотехнологий

www.nanometer.ru – Сайт нанотехнологического сообщества ученых, студентов и любознательных читателей

www.nano-portal.ru - Портал посвящен развитию нанотехнологий

г) базы данных, поисково-справочные и информационные системы:

1. Книгафонд - библиотека онлайн чтения. www.knigafund.ru

2. ЭБС "Издательство Лань" <http://e.lanbook.com/>

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля):

Компьютерные презентации, программа для тестирования.

10. Образовательные технологии:

№ п/п	Виды учебной работы	Образовательные технологии
1.	Лекция	Вводная лекция, информация лекция, лекция с элементами дискуссии, интерактивная лекция (лекция диалог), информационная лекция с элементами обратной связи, информационная лекция с элементами проблемных ситуаций.
3.	Практическое занятие	Занятие – решение задач.

11. Оценочные средства (ОС):

11.1. Текущий контроль осуществляется в устной и письменной форме при выполнении студентами учебных заданий - решении задач и выполнении контрольных работ на протяжении всего курса.

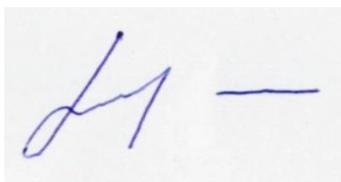
11.2. Рубежный контроль проводится между модулями – тестирование.

11.3. Промежуточный контроль – подготовка реферата по теме из списка заданий для самостоятельной работы.

11.4. Итоговый контроль – экзамен.

Программа составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по профилю подготовки 03.04.02 Физика «Физика материалов твердотельной электроники и фотоники»

Разработчик:



доцент

А.Л.Петров.

Программа рассмотрена на заседании кафедры общей и экспериментальной физики.

«26» марта 2024г.

Протокол № 7 Зав. кафедрой  _____ Гаврилюк А.А. __

Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.