


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматике и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(ИАПУ ДВО РАН)

«СОГЛАСОВАНО»

Заместитель директора по научно-образовательной деятельности, ученый секретарь, к.т.н., доцент

 С.Б. Змеу

«29» декабря 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИАПУ ДВО РАН
член-корреспондент РАН

 Р.В. Ромашко

«29» декабря 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)

Физика и технология квантовых приборов

**Группа научных специальностей 1.3. – «Физические науки»,
научная специальность «Физика полупроводников»**

Основная образовательная программа «Физика полупроводников»

Форма подготовки (очная)

Междисциплинарная кафедра подготовки кадров высшей квалификации (МК ПКВК) ИАПУ ДВО РАН

курс 2 семестр 4
лекции 18 час. / 0.5 з.е.
практические занятия – 18 час. / 0.5 з.е.
лабораторные работы – нет
всего часов аудиторной нагрузки 36 (час.) / 1.0 з.е.
самостоятельная работа 20 (час.) / 0.56 з.е.
контрольные работы 2
курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены.
зачет 4 семестр
экзамен _____ семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации и срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий обучающихся, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021 № 951.

Рабочая программа обсуждена на заседании МК ПКВК ИАПУ ДВО РАН, протокол № 3 от «17» ноября 2021 г.

Заведующий кафедрой: д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин

Составитель (ли): д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин.

Оборотная сторона титульного листа РПУД

I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от «___» _____ 20__ г. № _____

Заведующий кафедрой _____
(подпись) (И.О. Фамилия)

II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от «___» _____ 20__ г. № _____

Заведующий кафедрой _____
(подпись) (И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Физика и технология квантовых приборов» предназначена для аспирантов, обучающихся по основной образовательной программе «Физика полупроводников» и входит в число дисциплин по выбору вариативной части учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по группе научных специальностей 1.3. – «Физические науки» и научной специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» и учебный план подготовки аспирантов по научной специальности «Физика полупроводников».

Цель курса: подготовка аспирантов в области физики сверхбыстродействующих приборов, понимающих физические и технологические аспекты разработки и технологического воплощения гетеропереходных транзисторов, включая транзисторы на горячих носителях и транзисторы на квантовых эффектах, а также перспективы их использования для разработки сверхбыстродействующих интегральных схем.

Задачи:

1. Способствовать освоению аспирантами дополнительных разделов курса «Физика полупроводников и низкоразмерных структур», включая целостное представление о физике процессов бесстолкновительного (баллистического переноса) в транзисторных структурах, а также - представление о взаимосвязи электронной структуры гетеропереходов, условий квантования электронного газа, толщины и легирования слоев транзисторных слоев, использования двойных туннельных барьеров с квантовой ямой при построении гетероструктурных транзисторов, в том числе транзисторов на квантовых эффектах.

2. Формирование компетенций, соответствующих направлению подготовки по группе специальностей «Физические науки».

Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины.

Универсальные компетенции:

- УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях,

Общепрофессиональные компетенции:

- ОПК-1. Способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области физики полупроводников с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Профессиональные компетенции:

- ПК-1. Способность строить новейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования

- ПК-2. Способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик низкоразмерных структур, в том числе различного функционального назначения

Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения:

-знать:

- понятийный аппарат квантовой механики, для более полного и точного понимания формирования электронной структуры систем с пониженной размерностью (квантовых ям, квантовых проволок, квантовых точек и сверхрешеток на их основе);
- целостное представление о физике процессов бесстолкновительного (баллистического переноса) в транзисторных структурах и его влиянии на быстродействие приборов;
- природу взаимосвязи электронной структуры гетеропереходов, условий квантования электронного газа, толщины и легирования слоев транзисторных слоев, использования двойных туннельных барьеров с квантовой ямой при построении гетероструктурных транзисторов, в том числе транзисторов на квантовых эффектах;
- основные методы создания полупроводниковых гетероструктур для создания сверхбыстродействующих транзисторов;
- основные методы исследования функциональных свойств транзисторных структур;
- современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в области физики полупроводниковых приборов.

Уметь:

- выбирать модели, необходимые для описания физических процессов, протекающих полупроводниковых гетероструктурах;

- критически оценивать область применимости выбранных моделей для описания физических процессов, протекающих при создании полупроводниковых гетероструктур;
- обосновано выбирать методы формирования полупроводниковых гетероструктур с заданными параметрами;
- выбирать и применять методы исследования функциональных свойств полупроводниковых гетероструктур.

• **СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 часов)**

1. Полевые и биполярные гетероструктурные транзисторы (5 часов)

Гетероструктурные полевые транзисторы. Гетеропереход. Селективное легирование. Двумерный электронный газ. Полевые транзисторы на гетероструктурах AlGaAs/GaAs с селективным легированием. Обратные и многоканальные структуры. Гетероструктурные биполярные транзисторы (ГСБТ). Гетероэмиттер. База и коллектор. Гетероструктурные биполярные транзисторы на AlGaAs/GaAs. ГСБТ на GaInAs/InP, GaInAsP/InP. Транзисторы с гетеропереходами из GaAs/Si, Ge/Si, α -Si/Si.

2. Транзисторы на горячих электронах (4 часа)

Транзисторы с баллистической инжекцией электронов. Спектроскопия горячих электронов. Баллистические транзисторы с планарно-легированными барьерами. Баллистические транзисторы с гетероструктурными барьерами. Транзисторы с переносом заряда в пространстве.

3. Аналоговые транзисторы (3 часа)

Транзисторы со статической индукцией. Транзисторы с проницаемой базой. Транзисторы с металлической базой.

4. Транзисторы на квантовых эффектах (3 часа)

Туннелирование и размерное квантование. Резонансное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой и сверхрешетку. Транзисторы с резонансным туннелированием (биполярные и полевые).

5. Транзисторы и интегральные микросхемы с наивысшим быстродействием (3 часа)

Транзисторы с наивысшим быстродействием. Интегральные микросхемы на сверхбыстродействующих транзисторах.

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ (18 часов)

Тема 1. Построение гетеропереходов в модели Андерсона (2 часа).

Тема 2. Принцип селективного легирования. Двумерный электронный и дырочный газы. (4 часа).

Тема 3. Расчет параметров гетероструктурных полевых транзисторов (3 часа).

Тема 4. Расчет параметров гетероструктурных биполярных транзисторов (3 часа).

Тема 5. Расчет параметров транзисторов на горячих электронах (3 часа).

Тема 6. Построение зонных диаграмм транзисторов на квантовых эффектах (3 часа).

КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

Формы и методы для текущего контроля: контрольные работы по разделам дисциплины.

Контрольные работы

Контрольная работа №1. Гетероструктурные полевые, биполярные и униполярные транзисторы.

1. Какие типы гетеропереходов бывают. Нарисуйте зонные диаграммы всех типов.
2. Какие преимущества дают гетеропереходы в биполярных гетероструктурных транзисторах?
3. Можно ли поменять местами эмиттер и коллектор в гетероструктурном биполярном транзисторе?
4. Какие существуют способы повышения барьера для дырок в р-п-р гетероструктурном биполярном транзисторе?
5. Для чего используется встроенное электрическое поле в базовой области гетероструктурного биполярного транзистора, и каким способом оно создается?
6. Для чего использовали принцип селективного легирования в транзисторных структурах? Приведите примеры.
7. Каковы основные режимы работы полевых транзисторов с селективным легированием?
8. В чем состоит роль спейсера в полевом транзисторе с селективным легированием?
9. Чем отличаются обратные и многоканальные структуры полевых транзисторов с селективным легированием?

10. Каковы основные недостатки полевых транзисторов с селективным легированием?
11. Что такое униполярный транзистор, каков принцип его работы?
12. Как реализуется баллистический транспорт носителей в полупроводниках и при каких условиях?
13. Перечислите типы транзисторов на горячих носителях.
14. Какова основная причина потерь энергии горячими носителями в базе баллистического транзистора?
15. Как реализован спектрометр горячих электронов и какую информацию он дает?
16. Устройство и принцип действия баллистического транзистора с планарно-легированными барьерами.
17. Какие типы баллистических транзисторов с гетероструктурными барьерами могут быть построены? Обозначьте их отличия.
18. Каков принцип действия транзисторов с переносом заряда в пространстве?
19. Какие типы транзисторов с переносом заряда в пространстве существуют? В чем отличия в их планарной структуре?
20. В чем сходство и в чем различие между эффектом Ганна и эффектом переноса заряда в пространстве?

Контрольная работа №2. Транзисторы на квантовых эффектах.

1. Размерное квантование в гетеросистеме и квантово-механическое отражение на барьере.
2. Вероятность туннелирования через одиночный барьер.
3. Квантование электронных состояний в одномерной потенциальной яме с бесконечными барьерами.
4. Зонная структура сверхрешетки, осцилляции Блоха и условия их наблюдения.
5. Резонансное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой и сверхрешеткой.
6. Последовательное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой и сверхрешеткой.
7. Механизм прохождения тока в диоде с двойным барьером и квантовой ямой.
8. Отрицательное дифференциальное сопротивление в диоде с двойным барьером и квантовой ямой и его зависимость от частоты.

9. Сравните сверхрешетки и диоды с двойным барьером и квантовой ямой (ДБКС-диоды).
10. Структура и свойства транзисторов с ДБКС-эмиттером.
11. Формирование, структура и свойства биполярных транзисторов с ДБКС-эмиттером.
12. Биполярный транзистор с ДБКС структурой в базе: механизм транспорта носителей.
13. Как влияет толщина квантовой ямы в ДБКС структуре на вольт-амперные характеристики?
14. Что такое Штарк-эффект транзисторы и как они работают?
15. Полевой транзистор с резонансным туннелированием: формирование, структура и свойства.
16. Логические вентили на приборах с резонансным туннелированием: механизм работы, функциональные возможности.
17. Транзисторы с параллельными квантовыми ямами-каналами – концепция трехуровневого перехода.
18. Транзисторы с наивысшим быстродействием: как реализовать наивысшие значения параметров быстродействия?
19. Нетранзисторные пути создания сверхбыстродействующих устройств.

ПЕРЕЧЕНЬ ТИПОВЫХ ВОПРОСОВ К ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОМУ ЗАЧЕТУ

1. Спектроскопия горячих электронов.
2. Селективное легирование. Двумерный электронный газ.
3. Баллистические транзисторы с планарно-легированными барьерами.
4. Транзисторы на квантовых эффектах: резонансное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой и сверхрешетку.
5. Стационарная дрейфовая скорость, междолинный перебор, эффект убегания электронов.
6. Баллистические транзисторы с гетероструктурными барьерами: транзистор с двумерной базой, туннельный транзистор на горячих электронах.
7. Всплеск дрейфовой скорости в длинных и коротких структурах, баллистический пролет.
8. Транзисторы с ДБКС-эмиттером.
9. Гетеропереход: основные условия формирования, типы гетеропереходов,

разрывы зон, резкие и варизонные гетеропереходы.

10. Квантово-размерные структуры: квантовые проволоки и квантовые точки. Материалы с распределенными квантовыми точками.
11. Транзисторы на горячих электронах: транзисторы с баллистической инжекцией электронов.
12. Полевые транзисторы на гетероструктурах с селективным легированием (ПТ ГСЛ): прямая, обратная и многоканальные структуры, нормально открытые и нормально закрытые структуры, достоинства и недостатки ПТ ГСЛ.
13. Гетероструктурные биполярные транзисторы: гетероземиттер, база и коллектор.
14. Аналоговые транзисторы: транзисторы с проникаемой и металлической базами.
15. Гетероструктурные биполярные транзисторы: транзисторы на структуре AlGaAs/GaAs.
16. Баллистические транзисторы с гетероструктурными барьерами: БЭТ с варизонным эмиттером, транзистор с индуцированной базой.
17. Биполярные транзисторы с резонансным туннелированием.
18. Полевые транзисторы с резонансным туннелированием.
19. Транзисторы с наивысшим быстродействием: современные и перспективные.
20. Интегральные схемы на быстродействующих транзисторах.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов [Электронный ресурс]/ Лебедев А.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.— 488 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12950>. — ЭБС «IPRbooks»
2. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. Учеб. пособие. Москва. Изд. дом Юрайт, 2011 – 463 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984, 567 с.
4. Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур. Учебное пособие. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347 с.
<http://window.edu.ru/resource/346/63346>
5. Лысенко А.П. Биполярные транзисторы: Учебное пособие. - М.: МИЭМ, 2006. - 76 с. <http://window.edu.ru/resource/860/55860>

Дополнительная литература

1. Щелкачѳв Н.М., Фоминов Я.В. Электрический ток в наноструктурах: кулоновская блокада и квантовые точечные контакты: Учебно-методическое пособие. - М.: МФТИ, 2010. - 39 с. <http://window.edu.ru/resource/539/73539>
2. Дорохин М.В., Данилов Ю.А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. - 81 с.
<http://window.edu.ru/resource/006/74006>
3. Борисенко С.И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 115 с.
<http://window.edu.ru/resource/927/73927>
4. Агеев О.А., Федотов А.А., Смирнов В.А. Методы формирования структур элементов наноэлектроники и наносистемной техники: Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. - 72 с. <http://window.edu.ru/resource/948/73948>
5. Громов Д.Г. Металлизация ультрабольших интегральных схем: учебное пособие / Д.Г. Громов, А.И. Мочалов, А.Д. Сулимин, В.И. Шевяков. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 277 с.: ил. <http://window.edu.ru/resource/591/64591>
6. Лапшинов Б.А. Технология литографических процессов. Учебное пособие. - Московский государственный институт электроники и математики. - М., 2011. - 95 с. <http://window.edu.ru/resource/498/78498>
7. Вдовичев С.Н. Современные методы высоковакуумного напыления и плазменной обработки тонкопленочных металлических структур. Электронное учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. - 60 с. <http://window.edu.ru/resource/357/79357>
8. Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е. Физические основы наноэлектроники: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с.
<http://window.edu.ru/resource/415/73415>
9. Поляков В.И., Стародубцев Э.В. Проектирование гибридных тонкопленочных интегральных микросхем: учебное пособие по дисциплине "Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ" - СПб.: НИУ ИТМО, 2013. - 80 с. <http://window.edu.ru/resource/042/79042>
10. Григорьев Ф.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники: Учебное пособие / Московский государственный институт электроники и математики. - М. 2003. - 48 с.
<http://window.edu.ru/resource/784/76784>