

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от" " _____ 2024 г. №

Рабочая программа дисциплины
«Твердотельная электроника»

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Программа аспирантуры
2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»
Научная специальность
11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2024 год

1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Твердотельная электроника» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 3 семестре.

Цель дисциплины –

" Твердотельная электроника " являются следующие.

- Изучение физических основ твердотельной электроники.
- Формирование у студентов умений и навыков, необходимых для оптимизации параметров и конструкции приборов наноэлектроники.
- Получение углубленного профессионального образования по электронной компонентной базе, обеспечивающего возможность быстрого и самостоятельного приобретения новых знаний, необходимых для успешной профессиональной деятельности в области микро- и наноэлектроники.
- Выработка систематического подхода к анализу работы твердотельных устройств в различных режимах.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

Знать:

- основные методы исследования электрических свойств изделий активных элементов электроники.
- Знать современные тенденции развития твердотельных активных элементов электроники.
- физические явления, на которых основана работа современных активных элементов твердотельной электроники.

Уметь:

- делать выбор наиболее подходящих методов исследования активных элементов электроники.
- находить необходимую информацию по вопросам развития твердотельных активных элементов электроники, применять базовую информацию, современную научную, техническую и патентную литературу.
- делать количественные оценки важнейших параметров активных элементов твердотельной электроники.

Владеть:

- практическими навыками по применению современных методов исследования в области активных элементов твердотельной электроники.
- методами поиска, обработки и представления информации об аналоговых элементах электроники, пополнять научные знания в областях твердотельной электроники, радиокомпонентов, микро- и наноэлектроники, приборов на квантовых эффектах.
- навыками разрабатывать новые модели физических процессов в области физики и электроники твердотельных материалов, которые могут быть положены в основу новых технических процессов твердотельной электроники, микро- и наноэлектроники, приборов на квантовых эффектах.

3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа – 36 часов), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Полупроводниковые диоды	12	6				6	6
2. Биполярные транзисторы	16	8				8	8
Полевые транзисторы	16	8				8	8
Полупроводниковые приборы на квантовых эффектах	28	14				14	14
Итого	72	36				36	36

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля *
1	Полупроводниковые диоды	<p>Полупроводник во внешнем электрическом поле. Дебаевская длина экранирования. Работа выхода. Контакт двух металлов разной природы. Контакт металл-полупроводник. Эффект Шоттки. Диодная и диффузионная модели ВАХ.</p> <p>Контакты двух полупроводников n-n⁺ и p-p⁺. Физика p-n-переходов: энергетическая диаграмма, контактная разность потенциалов, концентрация неосновных носителей заряда у границы, распределение электрического поля и потенциала в p-n-переходе, барьерная емкость. Полупроводниковые гетеропереходы.</p> <p>Понятие полупроводникового диода. Распределение носителей в базе диода с p-n-переходом. ВАХ диода. Анализ решений для случаев тонкой и толстой базы диода. Влияние процессов генерации и рекомбинации носителей в p-n-переходе на ВАХ диода. Расчет переменных токов и полной проводимости диода с p-n-переходом; диффузионная емкость. Механизмы пробоя диодов. Процессы в диодах при больших прямых токах. Шумы в диодах.</p>	лекции	экзамен

		Переходные процессы в диодах. Основные типы диодов и технологические способы их создания. Диоды специального назначения: варикапы, туннельные диоды, ЛПД, фотодиоды, светодиоды, инжекционные лазеры. Диоды и лазеры на гетеропереходах.		
2	Биполярные транзисторы	<p>Понятие о биполярном транзисторе как о полупроводниковой структуре с 2-я взаимодействующими р-п-переходами. Основные режимы работы транзистора, распределение неосновных носителей в транзисторе при разных режимах. Основные схемы включения транзистора. Значения постоянных токов и напряжений в транзисторе в активном режиме. Статические характеристики транзисторов. Связь между параметрами статических характеристик транзистора со свойствами исходного полупроводника и геометрией транзисторной структуры. Системы малосигнальных параметров; h-параметры как наиболее удобная система. Эквивалентные схемы (формальная и физическая), параметры эквивалентных схем. Частотные характеристики транзисторов, их связь со свойствами исходного полупроводника и геометрией транзисторной структуры. Шумы в транзисторах. Особенности СВЧ-транзисторов. Работа транзисторов на импульсах. Параметры быстродействия биполярных транзисторов, усиление на высоких частотах, усиление по мощности, время задержки переключения. Основные типы биполярных транзисторов и технологические способы их создания. Транзисторы на гетеропереходах.</p>	лекции	экзамен
3	Полевые транзисторы	<p>Принцип действия полевого транзистора с управляющим р-п-переходом, основные режимы работы. Статические характеристики и их параметры. Расчет статических характеристик полевого транзистора. Система малосигнальных у-параметров. Эквивалентные схемы полевого транзистора (формальная и малосигнальная).</p> <p>Энергетическая диаграмма МДП-структуры. Емкость МДП-структуры, CV-характеристики. Статические характеристики МДП-транзисторов. Основные виды МДП-транзисторов, их сравнение с полевым транзистором на р-п-переходе. Параметры</p>	лекции	экзамен

		быстродействия полевых транзисторов, усиление на высоких частотах, максимальная частота генерации, время задержки переключения. КМОП-транзисторы. Приборы с зарядовой связью. Энергонезависимая память на МДП-структурах. Гетероструктурные полевые транзисторы.		
4	Полупроводниковые приборы на квантовых эффектах	Селективное легирование. 2D- электронный газ. Реализации ГСЛ-ПТ. Транзисторы на горячих электронах. Одноэлектроника. Квантовые ямы и квантовые точки. Светоизлучающие и светоприемные устройства на квантовых ямах и точках. Резонансно-туннельные диод и транзистор. Транзисторы с квантовой структурой двойного барьера (ДБКС). ПТ с резонансным туннелированием. Структуры со сверхрешёткой. Эффект Ааронова-Бома. Транзисторы с квантовой интерференцией электронных волн. Полевой транзистор на углеродных нанотрубках.	лекции	экзамен

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа аспирантов выполняется в следующих видах: в читальном зале библиотеки, в учебных лабораториях, компьютерных классах и в домашних условиях, с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к ресурсам Интернет.

Самостоятельная работа аспирантов обеспечивается учебно-методическими пособиями, учебной и научной литературой.

Осуществляется подготовка к экзамену по вопросам

1. Резкий $p-n$ -переход при ненулевом смещении: распределение электрического поля потенциала и заряда, высота барьера, зонная диаграмма. Инжекция и экстракция носителей заряда. Сравнение с плавным $p-n$ -переходом.
2. Статическая ВАХ идеального диода. Распределение носителей в базе диода.
3. Полное сопротивление диода на переменном сигнале. Диффузионная емкость. Эквивалентные схемы диода.
4. Барьерная емкость. Зависимость барьерной емкости $p-n$ -перехода от напряжения смещения (случаи резкого и плавного переходов). Варикапы.
5. Основные механизмы пробоя диодов.
6. Работа диода при высоком уровне инжекции.
7. Переходные процессы в диодах.
8. Туннельный диод: принцип работы, эквивалентная схема, частотные ограничения.
9. Лавинно-пролетные диоды и диоды Ганна.
10. Плоский биполярный транзистор: принцип работы, токи в транзисторе, зонная диаграмма.
11. Статические характеристики транзистора в схеме с общей базой. Влияние на них температуры.
12. Статические характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером. Влияние на них температуры.
13. Анализ работы транзистора на малом переменном сигнале. Системы малосигнальных параметров.
14. Т-образная эквивалентная схема транзистора. Связь параметров эквивалентной схемы с физическими параметрами транзистора.
15. Частотные свойства транзисторов. Граничная частота передачи тока базы и предельная частота генерации. Шумы в транзисторах.

16. Импульсные свойства транзисторов (схемы ОБ и ОЭ).
17. Тиристор: ВАХ, принцип работы, зонные диаграммы.
18. Полевой транзистор с управляющим р–n–переходом: принцип работы, статические характеристики. Разновидности полевых транзисторов. Сравнение с МДП-транзистором.
19. Гетеропереходы: зонные диаграммы, распределение поля и потенциала, высота барьера. ВАХ гетероперехода (модель термоэлектронной эмиссии). Применение гетеропереходов в приборах.
20. Идеальный контакт металл–полупроводник: характеристики контакта, зонные диаграммы, диодная и диффузионная модели ВАХ.
21. Реальные контакты металл–полупроводник: эффект Шоттки, роль граничных состояний. Диоды Шоттки. Омические контакты.
22. Идеальные МДП–структуры: зонные диаграммы, зависимость заряда в полупроводнике от поверхностного потенциала. CV–характеристики идеальных и реальных МДП–структур. Роль частоты при регистрации CV–характеристик.
23. Принципы работы приборов с зарядовой связью.
24. Фоторезисторы.
25. Фотодиоды. Фотодиодный и фотогальванический режимы включения.
26. Полупроводниковые лазеры и светодиоды. Лазеры и светодиоды на квантовых ямах и квантовых точках.
27. Основные виды и типы микросхем, их основные параметры. Программируемые логические интегральные схемы.
28. Основные явления, на которых строится сверхпроводящая электроника. Принцип действия сквида. Предел быстрогодействия.
29. Основные параметры качества и тенденции развития элементов нанoeлектроники.
30. Максимальные частоты переключения в гомоструктурных полевых, биполярных транзисторах. Насколько эффективным является переход к наноразмерным масштабам структур? Основные принципиальные физические и технологические ограничения размеров гомоструктурных транзисторов.
31. Новые качества в гетероструктурном варианте транзисторов. Почему при этом можно дальше продвинуться в нанометровый масштаб размеров элементов и увеличить быстродействие?
32. Полезные качества двумерного электронного газа электронов в приборах нанoeлектроники.
33. Горячие электроны. Как они возникают и позволяют увеличить быстродействие БТ?
34. Резонансно-туннельные структуры с двойным барьером.
35. Квантовая интерференция электронных волн в эффекте Ааронова-Бома, как ею можно управлять?
36. Кулоновская блокада туннелирования, что ограничивает скорость дискретного туннелирования?
37. Углеродные нанотрубки. Какие качества углеродных нанотрубок позволяют считать их перспективными структурами для создания ПТ на их основе?
38. Графен. Перспективы создания активных приборов на графене.
39. Принцип действия спинового клапана. Зачем нужен слой антиферромагнетика в спиновом клапане?
40. Спиновая инжекция. Какое полезное дополнительное качество даёт спиновая поляризация в транзисторе на горячих электронах?

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,

- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

1. Резкий $p-n$ -переход при ненулевом смещении: распределение электрического поля потенциала и заряда, высота барьера, зонная диаграмма. Инжекция и экстракция носителей заряда. Сравнение с плавным $p-n$ -переходом.
2. Статическая ВАХ идеального диода. Распределение носителей в базе диода.
3. Полное сопротивление диода на переменном сигнале. Диффузионная емкость. Эквивалентные схемы диода.
4. Барьерная емкость. Зависимость барьерной емкости $p-n$ -перехода от напряжения смещения (случаи резкого и плавного переходов). Варикапы.
5. Основные механизмы пробоя диодов.
6. Работа диода при высоком уровне инжекции.
7. Переходные процессы в диодах.
8. Туннельный диод: принцип работы, эквивалентная схема, частотные ограничения.
9. Лавинно-пролетные диоды и диоды Ганна.
10. Плоский биполярный транзистор: принцип работы, токи в транзисторе, зонная диаграмма.
11. Статические характеристики транзистора в схеме с общей базой. Влияние на них температуры.
12. Статические характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером. Влияние на них температуры.
13. Анализ работы транзистора на малом переменном сигнале. Системы малосигнальных параметров.
14. Т-образная эквивалентная схема транзистора. Связь параметров эквивалентной схемы с физическими параметрами транзистора.
15. Частотные свойства транзисторов. Граничная частота передачи тока базы и предельная частота генерации. Шумы в транзисторах.
16. Импульсные свойства транзисторов (схемы ОБ и ОЭ).
17. Тиристор: ВАХ, принцип работы, зонные диаграммы.
18. Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом: принцип работы, статические характеристики. Разновидности полевых транзисторов. Сравнение с МДП-транзистором.
19. Гетеропереходы: зонные диаграммы, распределение поля и потенциала, высота барьера. ВАХ гетероперехода (модель термоэлектронной эмиссии). Применение гетеропереходов в приборах.
20. Идеальный контакт металл-полупроводник: характеристики контакта, зонные диаграммы, диодная и диффузионная модели ВАХ.
21. Реальные контакты металл-полупроводник: эффект Шоттки, роль граничных состояний. Диоды Шоттки. Омические контакты.
22. Идеальные МДП-структуры: зонные диаграммы, зависимость заряда в полупроводнике от поверхностного потенциала. CV-характеристики идеальных и реальных МДП-структур. Роль частоты при регистрации CV-характеристик.

23. Принципы работы приборов с зарядовой связью.
24. Фоторезисторы.
25. Фотодиоды. Фотодиодный и фотогальванический режимы включения.
26. Полупроводниковые лазеры и светодиоды. Лазеры и светодиоды на квантовых ямах и квантовых точках.
27. Основные виды и типы микросхем, их основные параметры. Программируемые логические интегральные схемы.
28. Основные явления, на которых строится сверхпроводящая электроника. Принцип действия сквида. Предел быстродействия.
29. Основные параметры качества и тенденции развития элементов нанoeлектроники.
30. Максимальные частоты переключения в гомоструктурных полевых, биполярных транзисторах. Насколько эффективным является переход к наноразмерным масштабам структур? Основные принципиальные физические и технологические ограничения размеров гомоструктурных транзисторов.
31. Новые качества в гетероструктурном варианте транзисторов. Почему при этом можно дальше продвинуться в нанометровый масштаб размеров элементов и увеличить быстродействие?
32. Полезные качества двумерного электронного газа электронов в приборах нанoeлектроники.
33. Горячие электроны. Как они возникают и позволяют увеличить быстродействие БТ?
34. Резонансно-туннельные структуры с двойным барьером.
35. Квантовая интерференция электронных волн в эффекте Ааронова-Бома, как ею можно управлять?
36. Кулоновская блокада туннелирования, что ограничивает скорость дискретного туннелирования?
37. Углеродные нанотрубки. Какие качества углеродных нанотрубок позволяют считать их перспективными структурами для создания ПТ на их основе?
38. Графен. Перспективы создания активных приборов на графене.
39. Принцип действия спинового клапана. Зачем нужен слой антиферромагнетика в спиновом клапане?
40. Спиновая инжекция. Какое полезное дополнительное качество даёт спиновая поляризация в транзисторе на горячих электронах?

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

а) основная литература:

1. В.А.Гуртов. Твердотельная электроника. – М.: Техносфера, 2005.
2. В.В.Пасынков, Л.К.Чиркин, А.Д.Шинков. Полупроводниковые приборы.- М.: ВШ, 1987; М.: ВШ, 2003.
3. И.М.Викулин, В.И.Стафеев. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов. Радио, 1990.
4. И.П.Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - М.: Энергия, 1990.
5. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов, т.1, 2. - М.: Мир, 1984.
6. Ю.Пожела. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Моклас, 1989.
7. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы нанoeлектроники. – Новосибирск: изд. НГТУ, 2000.
8. Демиховский В. Я., Вугальтер Г. А., Физика квантовых низкоразмерных структур.- М.: Логос, 2000.
9. Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Стогней О. В., Новые направления физического материаловедения.- Воронеж: изд. ВГУ, 2000.
10. Щука А. А. Нанoeлектроника.- М.: Физматкнига, 2007.
11. Бурбаева Н.В., Днепровская Т.С. Сборник задач по полупроводниковой электронике.- М.: Физматлит, 2004.
12. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. М.6Радио и связь, 1991.

б) дополнительная литература:

1. Гуляев Ю. В., Сандомирский В. Б., Суханов А. А., Ткач Ю. А. Тенденции развития микроэлектроники// УФН, 1984, т.144, в.3, с.475-495.
2. Кульбачинский В. А. Структуры малой размерности в полупроводниках.- М.: изд. МГУ, 1998.
3. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки.// УФН, 1997, т.167, в.9.
4. Демидов Е. С., Аттосекундная высокотемпературная одноэлектроника на атомах переходных элементов.// Письма в ЖЭТФ, 2000, т.71, В.9, С.513–518,.
5. Дудкин В. И., Пахомов Л. Н., Квантовая электроника. Приборы и их применение. - М.: Техносфера, 2006.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы :

Пакет компьютерных аналитических и графических вычислений для персонального компьютера. Допускается применение сред Wolfram Mathematica или любых иных компьютерных ресурсов аналогичного назначения.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
 - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
 - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
 - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор (ы) доцент _____ Карзанов В.В.

Рецензент (ы) _____

Заведующий кафедрой проф. _____ Павлов Д.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ 2022 года, протокол № б/н