

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

 Драгунов В.К.

« 16 » июня 2015 г.

Программа аспирантуры

Направление 16.06.01 Физико-технические науки и технологии

Направленность (специальность) 01.04.10 Физика полупроводников

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины по выбору

«Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ДВ.2.2

Всего: 108 часов

Семестр 3, в том числе

6 часов – контактная работа,
84 часа – самостоятельная работа,
18 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 16.06.01 Физико-технологические науки и технологии, утвержденного приказом министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 № 882, и паспорта специальности 01.04.10 Физика полупроводников, номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является углубленное изучение физических основ и разновидностей полупроводниковых приборов, их принципа действия, основных параметров и характеристик, области применения

Задачи дисциплины являются:

- развитие способности учитывать физические основы работы полупроводниковых приборов и интегральных схем, применяемых в приборах и устройствах электроники и наноэлектроники, современные тенденции развития электроники;
- освоение способности строить физические и математические модели полупроводниковых приборов и интегральных схем, а также использовать программные средства их компьютерного моделирования;
- развитие способности аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем.

В процессе освоения дисциплины **формируются следующие компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении

исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

- способность самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств (ОПК-3);
- способность анализировать состояние научной проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников (ПК-2);
- способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики полупроводников и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-3).

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

Знать:

- особенности приборов и интегральных схем на основе различных полупроводников и современные достижения в данной области с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников, информационных технологий (ПК-2).

Уметь:

- критически анализировать и оценивать современные научные достижения в области физики полупроводниковых приборов и интегральных схем (УК-1);

- рассчитывать параметры и характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств (ОПК-3);

- применять методы расчета и моделирования полупроводниковых приборов и интегральных схем с помощью современной аппаратуры и информационных технологий, с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-3);

- собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по полупроводниковым приборам и интегральным схемам (ПК-2).

Владеть:

- приемами и методами оценки параметров и характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств (ОПК-3);

- навыками работы с информационными базами данных и поиском информации о свойствах полупроводниковых приборов и интегральных схем (ПК-3).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Основные понятия

Суть полупроводниковой электроники – управление сопротивлением слоев полупроводниковых структур. Два способа управления: токовый и полевой; типы приборов, реализующие эти два способа.

2. Электронно-дырочные переходы

Характерные длины и времена в физике полупроводников и полупроводниковых приборов. Понятие о квазинейтральности. Условие возникновения pn -перехода и его свойства (потенциальный барьер, электрическое поле pn -перехода, емкость pn -перехода, ВАХ pn -перехода).

Генерация и рекомбинация в области пространственного заряда pn -перехода.
Лавинное умножение, критерий лавинного пробоя pn -перехода.

3. Полупроводниковые диоды

Статическая ВАХ диодной структуры при высоком и низком уровнях инжекции в базовом слое. Понятие о различных режимах переноса носителей заряда в базовом слое диода. Диффузионная емкость диода. Лавинный пробой диодной структуры. Фаска, причины ее введения в конструкцию полупроводниковой структуры. Эквивалентная схема диода в случае малого сигнала. Переходные процессы в диодах. Время установления включенного состояния в диодной структуре. Процесс обратного восстановления диода (процесс Лэкса). Послеинжекционная ЭДС (процесс Госсика). Методы определения времени жизни носителей заряда в базовом слое диода.

4. Контакты металл-полупроводник

Зонная диаграмма контакта металл-полупроводник. Выпрямительные свойства контакта металл-полупроводник. Силы изображения и эффект Шоттки. Статическая ВАХ диода Шоттки. Омические контакты. Структура омических контактов и их особенности.

5. Биполярные транзисторы

Режимы работы биполярных транзисторов. Схемы включения транзисторов. Статические характеристики биполярных транзисторов. Модель Эберса – Молла. Входные и выходные статические характеристики транзистора с общей базой, коэффициент передачи эмиттерного тока. Эффект Эрли и его влияние на коэффициент передачи эмиттерного тока. Входные и выходные статические характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером, коэффициент передачи базового тока. Пробой транзистора в схеме с общим эмиттером. Эффект Кирка и эффект Вебстера, их влияние на коэффициент переноса тока через базовый слой транзистора. Эффект отеснения эмиттерного тока в транзисторах. Модель Гуммеля –

Пуна. Зависимость коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером от коллекторного тока.

Транзистор как четырехполюсник. Смешанная h - система параметров транзистора в схемах с общей базой и с общим эмиттером. Связь h – параметров транзистора со статическими параметрами транзистора в схемах с общей базой и с общим эмиттером. Нестационарные процессы в транзисторах в схеме с общей базой. Постоянная нарастания коэффициента передачи эмиттерного тока. Задержка нарастания коллекторного тока и ее связь с параметрами транзисторной структуры.

Нестационарные процессы в транзисторах в схеме с общим эмиттером. Постоянная нарастания коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером.

Частотные свойства транзистора. Граничная частота транзистора в схеме с общей базой, предельная частота коэффициента усиления по току транзистора в схеме с общим эмиттером.

6. Тиристоры

Двухтранзисторная модель работы тиристора. ВАХ тиристора в выключенном состоянии. Параметры, характеризующие точку переключения тиристора. Шунтировка эмиттерного перехода тиристора. ВАХ тиристора при обратном смещении. Понятие о критическом заряде включения Q_{crit} . Эффект dU/dt . Эффект dI/dt . Время выключения тиристора. Предельное значение коэффициента запираения двухоперационных тиристоров.

7. Полевые транзисторы

Полевые транзисторы с управляющим $p\text{-}n$ -переходом (JFET). СИТ – транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим барьером Шоттки (MESFET). Полевые транзисторы с управляющей МОП структурой (MOSFET). Биполярные транзисторы, управляемые с помощью МОП структур (IGBT).

Тепловые свойства полупроводниковых приборов. Понятие об области безопасной работы полупроводниковых приборов.

8. Классификация интегральных схем

Классификация интегральных схем по элементной базе, полупроводниковому материалу, технологии и схемотопологическим решениям. Основные базовые элементы и компоненты полупроводниковых интегральных схем.

Общие положения математической формулировки задач моделирования физических процессов в элементах интегральных схем. Фундаментальные уравнения физических процессов в объеме полупроводниковой структуры. Кинетическое уравнение Больцмана, основные приближения и допущения в моделях элементов ИС. Представление о физикотопологическом и схемотехническом уровнях моделирования ИС.

9. Элементы биполярных ИС

Элементы биполярных ИС, структурные и топологические варианты реализации элементов. Физические процессы в транзисторных структурах. Электрические модели биполярного транзистора.

Интегральные соотношения для зарядов в биполярном транзисторе. Параметры модели Гуммеля-Пуна для интегрального биполярного транзистора.

10 Описание эффектов высокого уровня инжекции

Описание эффектов высокого уровня инжекции, эффекта Эрли в зарядоуправляемой модели транзистора. Передаточная характеристика при низком и высоком уровнях инжекции в областях транзисторной структуры. Время пролета носителей через базу при произвольном профиле легирования базы и уровне инжекции. Эффект Вебстера в биполярном интегральном транзисторе.

Эффекты высокого уровня инжекции в коллекторе. Эффекты квазинасыщения, Кирка. Эффекты сильного легирования. Обобщенное выражение для токов и коэффициента передачи тока интегральных биполярных транзисторов. Многоэмиттерный интегральный транзистор,

коэффициент передачи по току в инверсном режиме и способы его регулирования. Модели сопротивления базы интегрального транзистора. Интегральные транзисторы с диодом Шоттки, латеральные транзисторы (с боковой инжекцией).

11. Пассивные элементы интегральных схем

Пассивные элементы биполярных интегральных схем: резисторы, конденсаторы и индуктивности. Физические процессы, конструкции и модели. Методы расчета и проектирования. Паразитные явления в пассивных элементах ИС.

12. Модели биполярных элементов

Транзисторы, диоды, стабилитроны. Модели биполярных элементов и представления о методах идентификации параметров. Методы проектирования элементов биполярных ИС.

Новые физические проблемы описания физических процессов и моделирования элементов биполярных ИС. Параметры и характеристики субмикронных транзисторов.

13. ИС на основе полевых транзисторов

ИС на основе полевых транзисторов с управляющим p-n переходом. Модель полевого транзистора с произвольным профилем легирования канала.

Элементы ИС с МОП - структурой. Полевые транзисторы для МОП ИС. Модель МДП транзистора. Подпороговые характеристики МДП транзисторов. Эффекты сильного поля в канале МДП транзисторов. Короткоканальные эффекты в МДП транзисторах. Подпороговые токи, эффект модуляции барьера истока стоковым напряжением, изменение порогового напряжения. Умножение носителей и зарядка окисла в МДП транзисторах. Инжекционный пробой. Эффект «защелки» (тиристорный эффект) в КМОП ИС, методы его подавления. Масштабная миниатюризация

в МДП ИС и ее пределы. Эффекты горячих носителей в короткоканальных МДП приборах и методы подавления этих эффектов.

14. Особенности полевых транзисторов на основе широкозонных полупроводников

Особенности ИС на основе GaAs. Барьер Шоттки. Инжекция неосновных носителей. Полевые транзисторы с гетеропереходами. Основные типы конструкций. Нелинейные резисторы в ИС на основе GaAs.

Особенности полевых транзисторов на основе широкозонных полупроводников (GaAs, SiC, AlGaN) по сравнению с транзисторами на основе кремния (Si). Модель двух областей, модель с полностью насыщенной скоростью.

15. Проблемы элементной базы аналоговых ИС

Проблемы элементной базы аналоговых ИС, интегральных схем ЦАП-АЦП. Методы экспериментального исследования элементов ИС на стадии разработки и производства. Принципы и приемы разработки тестовых структур элементов, узлов и микросистем. Представления об автоматизированных системах экспериментальных исследований элементов тестовых структур.

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины: 1 семестр – дифференцированный зачет.

Вопросы для самоконтроля и для проведения зачета

1. Генерация и рекомбинация носителей заряда
2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.
3. Концентрация носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках в условиях термодинамического равновесия
4. Уравнение электронейтральности
5. Процессы переноса носителей заряда в полупроводниках

6. Влияние электрического поля на объемную и поверхностную электропроводность полупроводников

7. Неравновесное состояние полупроводника

8. Диффузионные и дрейфовые токи

9. Неравновесные носители в электрическом поле

10. Уравнение непрерывности тока

11. Барьер на границе металла с полупроводником (барьер Шоттки)

12. Контакт электронного и дырочного полупроводников

13. Изотипные и анизотипные гетеропереходы

14. МДП-структура

15. Вольтамперная характеристика p-n-перехода

16. Влияние генерационно-рекомбинационных процессов

17. Пробой pn-перехода

18. Переходные процессы в полупроводниковых диодах

19. Выпрямление на полупроводниковом диоде. Характеристическое сопротивление диода. Эксплуатационные параметры диода, влияние на них температуры.

20. Классификация полупроводниковых диодов

21. Туннельные диоды. Энергетические диаграммы для различных смещений

22. Обращенные диоды

23. Диоды с барьером Шоттки

24. Биполярные транзисторы

25. Включение транзистора по схеме с общей базой. Распределение концентрации неосновных носителей в базе транзистора для различных режимов (нормальный усилительный, инверсный, насыщение и отсечки).

26. Статические ВАХ транзистора по схеме с ОБ. Коэффициент передачи по току, коэффициент инжекции, коэффициент переноса.

27. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером. Статические ВАХ транзистора по схеме с ОЭ. Усиление по току. Сравнение выходного сопротивления в схеме с ОБ и с ОЭ.

28. Дифференциальные параметры биполярного транзистора.
29. Температурная зависимость параметров биполярного транзистора
30. Эквивалентные схемы. Формулы Эберса-Молла.
31. Параметры модели Гуммеля-Пуна для интегрального биполярного транзистора.
32. Эффект Эрли
33. Эффект Вебстера в биполярном интегральном транзисторе.
34. Эффекты квазинасыщения, Кирка.
35. Интегральные транзисторы с диодом Шоттки, латеральные транзисторы (с боковой инжекцией)
36. Пассивные элементы биполярных интегральных схем - резисторы, конденсаторы и индуктивности.
37. Параметры и характеристики субмикронных транзисторов
38. Тиристоры. Принцип действия тиристора, вольтамперная характеристика, эквивалентная схема. Энергетические диаграммы. Коэффициенты усиления тиристора. Симисторы.
39. Униполярные транзисторы. Особенности физических процессов в полевых транзисторах, классификация и система обозначений.
40. Полевые транзисторы с управляющим электронно-дырочным переходом, принцип действия, вольтамперная характеристика.
41. Модель полевого транзистора с произвольным профилем легирования канала.
42. МДП структура. Область пространственного заряда. Явления обогащения, обеднения, и инверсии на границе раздела.
43. МДП-транзистор с индуцированным и встроенным каналом. Структура и принцип действия, выходные вольт-амперные характеристики. Схемы включения МДП-транзистора.
44. Модель МДП транзистора.
45. Подпороговые характеристики МДП транзисторов
46. Эффекты сильного поля в канале МДП транзисторов.
47. Короткоканальные эффекты в МДП транзисторах.

48. Подпороговые токи, эффект модуляции барьера истока стоковым напряжением, изменение порогового напряжения.
49. Умножение носителей и зарядка окисла в МДП транзисторах. Инжекционный пробой.
50. Эффект “защелки“ (тиристорный эффект) в КМОП ИС, методы его подавления.
51. Масштабная миниатюризация в МДП ИС и ее пределы.
52. Эффекты горячих носителей в короткоканальных МДП приборах и методы подавления этих эффектов.
53. Особенности ИС на основе GaAs.
54. Силовые полупроводниковые приборы. Устройство и особенности работы
55. Полевые транзисторы с гетеропереходами.
56. Физика элементов статической памяти на основе структур металл-диэлектрик-(диэлектрик)-полупроводник.
57. ВАХ MOSFET в статическом режиме
58. Устройство и особенности работы IGBT. ВАХ IGBT в статическом режиме

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Шалимова К.В. /Физика полупроводников. СПб.: изд-во Лань. 2010. 384 с. ISBN 978-5-8114-09228-8.
2. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учебное пособие для вузов по направлению 210100 "Электроника и микроэлектроника" / В. И. Старосельский . – М. : Юрайт, 2011 . – 463 с. – (Основы наук) . - ISBN 978-5-9916-0808-4 . .
3. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок – “Лань “, 2008. ISBN 978-5-8114-0766-8
4. Гуртов В.А. Твердотельная электроника : учеб. пособие / В. А. Гуртов. - 3-е изд., доп. - М. : Техносфера, 2008. - 512 с. - ISBN 978-5-94836-187-1:
5. Коваленко А.А. Основы микроэлектроники. – М.: ИЦ «Академия», 2008. ISBN 978-5-7695-7040-7.

Дополнительная литература:

6. Sze S.M., Kwok Kwok Ng Physics of semiconductor devices John Wiley and Sons, 2007 – 815 p.
7. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с. ISBN 978-5-9221- 0995-6.
8. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. – СПб.: Лань, 2008. ISBN 978-5-8114-0866-5.
9. Королёв, М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Электронный ресурс] : в 2 ч. Ч. 1 / М. А. Королёв, Т.Ю. Крупкина, М. А. Ревелева ; М. А. Королёв [и др.] ; под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю. А. Чаплыгина. - 2-е изд. (эл.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 397 с. : ил. - ISBN 978-5-9963-0912-2 (Ч. 1), ISBN 978-5-94774-583-2