

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Д.А. Ендовицкий

21.10.2022



**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
ПО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ – ПРО-
ГРАММЕ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ КАДРОВ
В АСПИРАНТУРЕ
ПО ГРУППЕ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь
(физический факультет)**

Воронеж
2022

Научная специальность: 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Общие свойства полупроводников. Структура кристаллов. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs и др. Поликристаллические и аморфные полупроводники.

Зонная теория твёрдого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках и диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Электроны и дырки. Эффективная масса электрона. Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные примеси.

Основы статистической физики. Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах и их температурные зависимости. Распределение Максвелла-Больцмана. Вырожденные и невырожденные полупроводники.

Рекомбинация носителей заряда. Рекомбинация «зона-зона» и рекомбинация через примеси и дефекты. Теория рекомбинации Шокли-Рида. Диффузионная длина и время жизни носителей заряда. Поверхностная рекомбинация.

Электропроводность полупроводников. Носители заряда в слабом электрическом поле. Подвижность электронов и дырок. Диффузия и дрейф носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Носители заряда в сильном электрическом поле. Горячие электроны. Лавинное умножение в полупроводниках. Электрические домены и токовые шнуры. Эффект Гана.

Электронно-дырочный $p-n$ -переход. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода. Токи носителей заряда в $p-n$ -переходе, квазиуровни Ферми. Генерация и рекомбинация носителей заряда в $p-n$ -переходе. Барьерная и диффузионная ёмкости. Пробой $p-n$ -перехода: тепловой, лавинный и туннельный.

Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными $p-n$ -переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора.

Контакт металл-полупроводник. Теория Шоттки. Вольт-амперная характеристика. Омический контакт. Сопоставления с $p-n$ -переходом.

Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и её изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.

Гетероструктуры. Зонная диаграмма гетеро- $p-n$ -перехода. Коэффициент инжекции. Суперинжекция. Одинарные и двойные гетероструктуры. Варизонные структуры.

Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение излучения: собственное и примесное, экситонное и на свободных носителях. Фотопроводимость. Спектральная характеристика. Фотовольтаический эффект в $p-n$ -переходе.

Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустические эффекты. Поверхностные акустические волны.

РАЗДЕЛ 2. ПРИБОРЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Полупроводниковые диоды. Устройство и основные параметры. Выпрямительные и импульсные диоды. Варикапы. Стабилитроны и защитные диоды. Туннельные диоды. Диоды СВЧ: детекторные и смесительные, диоды Шоттки, *pin*-диоды, умножительные и параметрические, лавинно-пролётные, диода Ганна.

Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные параметры, их зависимости от температуры. Частотные и импульсные характеристики.

Тиристоры и их разновидности. Основные параметры.

Полевые транзисторы. Принцип действия, основные параметры. Полевые транзисторы с *p-n*-переходом, с барьером Шоттки. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами *p*- и *n*-типов.

Полупроводниковые интегральные схемы. Транзисторы, диоды и другие элементы в интегральном исполнении. Межэлементная изоляция. ИС, БИС, СБИС. Классификация микросхем по конструктивно-технологическому принципу: МОП- и КМОП-ИС; биполярные ТТЛ- ЭСЛ-, И²Л-ИС; Би-КМОП; «кремний-на-изоляторе» («кремний-на-сапфире»)-ИС; GaAs-ИС на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ).

Микросхемотехника. Цифровые и аналоговые ИС. Базовые логические элементы ТТЛ-, ЭСЛ-, МОП, КМОП-, ПТШ-ИС. Операционные усилители.

Фотоприёмники: фото-резисторы, -диоды, -транзисторы, -матрицы. Основные параметры и характеристики. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Солнечные батареи: на монокристаллическом и аморфном кремнии, на поликристаллических плёнках, с гетероструктурами.

Светодиоды, параметры и характеристики. Суперяркие светодиоды. Светодиодные дисплеи. Полимерные светодиоды (общее представление). Полупроводниковые лазеры (общее представление).

Оптроны и оптронные ИС.

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Планарная технология – общая схема техпроцесса. Групповая обработка. Минимальный топологический размер (МТР) – основной показатель уровня технологии. Степень интеграции ИС. Динамика МТР и степени интеграции, закон Мура.

Изготовление полупроводниковых пластин. Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка, полировка пластин.

Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.

Эпитаксия. Методы эпитаксиального выращивания кремния. Методы контроля качества эпитаксиальных слоёв.

Создание диэлектрических покрытий на кремнии. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников. Структура окисла на кремнии. Перераспределение примеси при термическом окислении кремния.

Диффузия в полупроводниках. Физические основы процесса диффузии. Основные уравнения. Граничные условия и расчётные формулы для наиболее важных случаев диффузии.

Электронно-ионная технология. Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов. Плазмохимические и плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоёв.

Металлизация. Получение тонких плёнок химическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы. Оборудование для получения тонких плёнок. Материалы тонкоплёночной технологии.

Литография. Основные типы оборудования для фотолитографии. Проекционная фотолитография, Электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление.

Структуры элементов полупроводниковых ИС. Методы изоляции элементов. Технология структур «кремний-на-изоляторе». Структура и свойства элементов ИС.

Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Корпуса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы герметизации. Бескорпусные приборы. Методы отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах.

Рекомендуемая литература

Основная

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учебник / К.В. Шалимова .— Москва : Лань, 2010 .— 390 с. // Издательство «Лань» : электронно-библиотечная система. — URL : <http://e.lanbook.com>
2. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники / Н.С. Легостаев .— Томск : Эль Контент, 2012. — 184 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников : учеб. пособие / А.И. Ансельм .— Москва : Лань, 2008 .— 618 с. // Издательство «Лань» : Электронно-библиотечная система. — URL : <http://e.lanbook.com>
4. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики : учеб. пособие / А. И. Ансельм .— Москва : Лань, 2007 .— 423 с. // Издательство «Лань» : электронно-библиотечная система. — URL : <http://e.lanbook.com>
5. Аверченков О.Е. Интегральные операционные усилители и их применение. Учебное пособие по курсу «Схемотехника ЭВМ» / О.Е. Аверченков .— Москва : ДМК Пресс, 2012 .— 87 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
6. Никитин В.А. Схемотехника интегральных схем ТТЛ, ТТЛШ и КМОП / В.А. Никитин .— Москва : МИФИ, 2010 .— 64 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
7. Наумкина Л.Г. Цифровая схемотехника / Л.Г. Наумкина .— Москва : Московский государственный горный университет, 2008 .— 309 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
8. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце ; Шенк К. — 12-е изд. — Москва : ДМК Пресс, 2008 .— 828 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
9. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники / Н.С. Легостаев .— Томск : Эль Контент, 2012 .— 184 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
10. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. 2 / Л.Н. Орликов .— Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012 .— 101 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>
11. Антоненко, С.В. Технология тонких пленок / С.В. Антоненко .— Москва : МИФИ, 2008 .— 104 с. // Электронно-библиотечная система. — URL : <http://biblioclub.ru>

Дополнительная

1. Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения = The Physics of semiconductors. An introduction including nanophysics and applications / М. Грундман ; [пер.с англ. : И.В. Ванюшина и др.] ; под ред. В.А. Гергеля .— 2-е изд. — Москва : Физматлит, 2012 .— 771 с.
2. Ю П. Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона. – М.: Физматлит, 2002. – 560 с.
3. Алексенко А.Г. Основы микросхемотехники / А.Г. Алексенко. – М. : ЛБЗ, 2002. – 448 с.
4. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника / Е.П. Угрюмов- СПб. : БХВ- Санкт-Петербург, 2004. - 800 с.
5. Красников Г.Я. Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС / Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев .- М. : Техносфера, 2003 .- 383 с.
6. Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых и диэлектрических приборов / Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков . - СПб. : Лань, 2002 .— 422 с.
7. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники / И.П.Степаненко. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 488 с.
8. Герасименко Н.Н. Кремний - материал наноэлектроники / Н. Герасименко, Ю. Пархоменко . - М. : Техносфера, 2007 . - 351 с.

Примерные вопросы к экзамену

1. Общие свойства полупроводников. Структура кристаллов.
2. Основные материалы микроэлектроники.
3. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках и диэлектриках.
4. Собственные и примесные полупроводники.
5. Статистика электронов в полупроводниках. Функция распределения Ферми-Дирака.
6. Температурная зависимость концентрации электронов и дырок в полупроводнике.
7. Рекомбинация носителей заряда. Виды рекомбинации.
8. Электропроводность полупроводников. Подвижность электронов и дырок.
9. Носители заряда в сильном электрическом поле.
10. Электронно-дырочный $p-n$ -переход.
11. Барьерная и диффузионная ёмкости $p-n$ -перехода.
12. Пробой $p-n$ -перехода: тепловой, лавинный и туннельный.
13. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными $p-n$ -переходами. Инжекция носителей и перенос носителей через базу.
14. Коэффициент усиления транзистора.
15. Контакт металл-полупроводник. Формирование омического и выпрямляющего контакта.
16. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
17. Зонная диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник и её изменение при приложении напряжения.

18. Структура металл-диэлектрик-полупроводник: роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.
19. Зонная диаграмма гетеро- $p-n$ -перехода. Суперинжекция.
20. Виды гетероструктур: одинарные, двойные, варизонные.
21. Механизмы поглощения излучения в полупроводниках.
22. Фотопроводимость.
23. Фотовольтаический эффект в $p-n$ -переходе.
24. Термоэлектрические явления в полупроводниках.
25. Эффект Холла.
26. Термомагнитные эффекты в полупроводниках.
27. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектрические эффекты. Акустооптические эффекты.
28. Устройство и основные параметры полупроводниковых диодов.
29. Разновидности полупроводниковых диодов: выпрямительные и импульсные диоды; варикапы; стабилитроны; туннельные диоды.
30. Диоды СВЧ.
31. Принцип действия и основные параметры биполярного транзистора.
32. Температурные зависимости основных параметров биполярного транзистора.
33. Частотные и импульсные характеристики биполярного транзистора.
34. Принцип действия и основные параметры тиристора.
35. Разновидности тириستоров.
36. Полевые транзисторы с $p-n$ -переходом: принцип действия, основные параметры.
37. Полевые транзисторы с барьером Шоттки: принцип действия, основные параметры.
38. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами p - и n -типов: принцип действия, основные параметры.
39. Интегральные полупроводниковые резисторы.
40. Интегральные полупроводниковые конденсаторы.
41. Особенности транзисторов и диодов в интегральном исполнении.
42. Межэлементная изоляция в интегральных схемах.
43. Классификация микросхем по конструктивно-технологическому принципу.
44. Базовые логические элементы биполярных ИС.
45. Базовые логические элементы МОП, КМОП- и БиКМОП цифровых ИС.
46. Базовые блоки аналоговой микросхемотехники: операционный усилитель.
47. Фоторезисторы: принцип работы, основные параметры, схемы включения.
48. Фотодиоды и фототранзисторы: принцип работы и основные параметры.
49. Фоточувствительные КМОП-матрицы.
50. Фоточувствительные ПЗС-матрицы.
51. Солнечные батареи.
52. Светодиоды принцип работы, основные параметры.
53. Разновидности светодиодов.
54. Применение светодиодов.
55. Принцип работы полупроводниковых лазеров.
56. Оптроны: назначение, разновидности, основные параметры.
57. Оптоэлектронные ИС.
58. Планарная технология: общая схема техпроцесса.
59. Степень интеграции ИС. Закон Мура.
60. Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников.

61. Ориентированная резка, шлифовка, полировка полупроводниковых пластин.
62. Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия.
63. Химико-механическая полировка.
64. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.
65. Методы эпитаксиального выращивания кремния.
66. Методы контроля качества эпитаксиальных слоёв.
67. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников.
68. Структура окисла на кремнии.
69. Перераспределение примеси при термическом окислении кремния.
70. Физические основы процесса диффузии в полупроводниках. Основные уравнения.
71. Граничные условия и расчётные формулы для наиболее важных случаев диффузии.
72. Методы получения электронных и ионных пучков.
73. Ионное легирование.
74. Плазмохимические и плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоёв.
75. Металлизация ИС.
76. Получение тонких плёнок химическим испарением в вакууме.
77. Ионно-плазменное распыление.
78. Получение тонких плёнок методом химического осаждения из газовой фазы.
79. Оборудование для получения тонких плёнок.
80. Материалы тонкоплёночной технологии.
81. Основные принципы фотолитографии.
82. Разновидности литографических процессов: проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография.
83. Основные типы оборудования для фотолитографии.
84. Фотошаблоны и их изготовление.
85. Технология структур «кремний-на-изоляторе».
86. Корпуса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.
87. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.
88. Бескорпусные приборы.
89. Методы отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах.

Критерии оценки знаний претендентов на поступление в аспирантуру

Вступительное испытание оценивает знания в области соответствующей научной дисциплины, навыки и способности поступающих, необходимые для обучения по программам аспирантуры, реализуемых направлением 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи. Экзамен включает ответы на три теоретических вопроса по темам программы вступительных испытаний в аспирантуру по соответствующему профилю. Вопросы являются равнозначными по сложности. Уровень знаний поступающего оценивается по 100-балльной системе.

Критерии оценивания результатов ответа по уровням (оценкам)

Оценка	Критерии
80-100 баллов	1. Ответ грамотный, полный. Ответы излагаются логично, последовательно и не требуют дополнительных пояснений.

	<ol style="list-style-type: none"> 2. Демонстрируются глубокие знания дисциплин специальности. 3. Даны обоснованные ответы на дополнительные вопросы. 4. Ответы хорошо аргументированы, при ответах использованы знания, приобретённые ранее. 5. В ответах чётко проявляется способность к исследовательской деятельности.
60-79 баллов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ответ грамотный, ответы на поставленные вопросы в билете излагаются систематизировано и последовательно. 2. Демонстрируется умение анализировать материал, однако не все выводы носят аргументированный и доказательный характер. 3. Материал излагается уверенно, в основном правильно даны все определения и понятия. 4. Допущены не принципиальные неточности при выводах и использовании терминов. 5. В ответах проявляется определённая способность к исследовательской деятельности.
30-59 баллов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ответ в целом грамотный, но допускаются нарушения в последовательности изложения при ответе. 2. Демонстрируется поверхностные знания дисциплин специальности. 3. Имеются затруднения с выводами. 4. Определения и понятия даны нечётко. 5. Навыки исследовательской деятельности представлены слабо.
0-29 баллов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ответ неграмотный с принципиальными ошибками. 2. Материал излагается непоследовательно, сбивчиво, не представляет определённой системы знаний по дисциплине. 3. Не даны ответы на дополнительные вопросы комиссии. 4. Допущены грубые ошибки в определениях и понятиях. 5. Отсутствуют навыки исследовательской деятельности.

Программа вступительного испытания одобрена решением Учёного совета физического факультета (протокол 29.09.2022 №7)