

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

Утверждаю  
Председатель приемной комиссии  
Ректор  
Д.А.Ендовицкий  
2017г.



**Программа вступительного экзамена в аспирантуру  
по направлению 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи**

**профиль:**

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

## **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 твердого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, 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. 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 Ганна.

Электронно-дырочный ( $p-n$ ) переход. Вольт-амперная характеристика  $p-n$  перехода. Токи носителей заряда в  $p-n$  переходе, квазиуровни Ферми. Генерация и рекомбинация носителей в  $p-n$  переходе. Барьерная и диффузионная емкость. Пробой  $p-n$  перехода: тепловой, лавинный, 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. Сопоставление с  $p-n$  переходом.

Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и ее 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-, акустооптические 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,  $p-n$  – диоды, умножительные и параметрические, лавинно-пролетные, диоды Ганна.

Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные параметры, их зависимость 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-, И<sup>2</sup>Л-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. Операционные усилители.

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

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

Оптроны и оптоэлектронные 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 слоев.

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 расчетные формулы для наиболее важных случаев диффузии.

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

Металлизация. Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы.

Оборудование для получения тонких пленок. Материалы тонкопленочной технологии.

Литография. Фотолитография. 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. М.: Энергия, 1976.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990.
3. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Новосибирск: НГТУ, 2000.
5. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб: «Лань», 2002.
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1998.
7. Алексенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. М.: Радио и связь, 1987.
8. Емельянов В.А. Быстродействующие цифровые КМОП БИС. Минск: Полифакт, 1998.
9. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989.
10. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Под ред. В.И. Стафеева. М.: Радио и связь, 1985.
11. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986.
12. Тришенков М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. М.: Радио и связь, 1992.
13. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. М.: Мир, 1988.
14. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. М.: Радио и связь, 1989.
15. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1983.
16. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. В.Н. Мордковича. М.: Мир, 1988.
17. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. М.: Высш. шк., 1984.
18. Валиев К.А. Физические основы субмикронной фотолитографии. М.: Наука, 1990.

### **Дополнительная**

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.
2. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. М.: Мир, 1984.

3. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.
4. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы, материалы, приборы и их изготовление. М.: Мир, 1985.
5. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
6. Технология СБИС. В 2 кн. / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986.
7. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987.
8. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.

### **Примерные вопросы к экзамену**

1. Общие свойства полупроводников. Структура кристаллов.
2. Основные материалы микроэлектроники.
3. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, 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 емкость  $p-n$  перехода.
12. Пробой  $p-n$  перехода: тепловой, лавинный, 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 контактов.
16. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
17. Зонная диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник и ее 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. Терромагнитные эффекты в полупроводниках.
27. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектрические эффекты. Акустооптические эффекты.
28. Устройство и основные параметры полупроводниковых диодов.
29. Разновидности полупроводниковых диодов: импульсные и выпрямительные диоды, стабилитроны, варикапы, 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 тиристоров.
36. Полевые транзисторы с р-п 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 цифровых 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 и 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 слоев.
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 расчетные формулы для наиболее важных случаев диффузии в полупроводниках.
72. Методы получения электронных и ионных пучков.
73. Ионное легирование.

74. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев.
75. Металлизация ИС.
76. Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме.
77. Ионно-плазменное распыление.
78. Получение тонких пленок методом химического осаждения из газовой фазы.
79. Оборудование для получения тонких пленок.
80. Материалы тонкопленочной 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	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ответ грамотный, полный. Ответы излагаются логично, последовательно и не требуют дополнительных пояснений.</li> <li>2. Демонстрируются глубокие знания дисциплины специальности.</li> <li>3. Даны обоснованные ответы на дополнительные вопросы комиссии</li> <li>4. Ответы хорошо аргументированы, при ответах использованы знания, приобретённые ранее.</li> <li>5. В ответах четко проявляется способность к исследовательской деятельности.</li> </ol>
60 - 79 баллов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ответ грамотный, ответы на поставленные вопросы в билете излагаются систематизировано и последовательно.</li> <li>2. Демонстрируется умение анализировать материал, однако не все выводы носят аргументированный и доказательный характер.</li> <li>3. Материал излагается уверенно, в основном правильно даны все определения и понятия.</li> </ol>

	<p>4. Допущены непринципиальные неточности при выводах и использовании терминов.</p> <p>5. В ответах проявляется определенная способность исследовательской деятельности.</p>
40 - 59 баллов	<p>1. Ответ в целом грамотный, но допускаются нарушения в последовательности изложения при ответе.</p> <p>2. Демонстрируются поверхностные знания дисциплин специальности.</p> <p>3. Имеются затруднения с выводами.</p> <p>4. Определения и понятия даны нечётко.</p> <p>5. Навыки исследовательской деятельности представлены слабо.</p>
0 - 39 баллов	<p>1. Ответ неграмотный с принципиальными ошибками. Материал излагается непоследовательно, сбивчиво, не представляет определенной системы знаний по дисциплине.</p> <p>2. Не даны ответы на дополнительные вопросы комиссии.</p> <p>3. Допущены грубые ошибки в определениях и понятиях.</p> <p>4. Отсутствуют навыки исследовательской деятельности.</p>

Программа вступительного испытания одобрена решением Ученого совета физического факультета (протокол №2 от 03.03.2017)