

**Акционерное общество  
«Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и  
информационных систем»**

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального директора  
по науке

  
А.А. Романов  
«18» мая 2018 г.

**ПРОГРАММА  
кандидатского экзамена**

**Направление подготовки:**

11.06.01. Электроника, радиотехника и системы связи

**Направленность:**

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

Всего на подготовку: 36 часов

## СОДЕРЖАНИЕ

### АННОТАЦИЯ

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: физика полупроводников и полупроводниковых приборов; технология полупроводниковых приборов и интегральных схем; микросхемотехника; контроль качества и надежность полупроводниковых приборов; радиокомпоненты, а также обзорно-обобщающие работы по новым достижениям в области оптоэлектроники, акустоэлектроники, наноэлектроники и приборов на квантовых эффектах.

### ТЕМЫ

**Тема 1.** Физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

Общие свойства полупроводников. Природа химической связи. Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в кристаллах. 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. Экситоны. 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. Критерий вырождения электронного газа. 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. Взаимодействие с фононами, примесными атомами, дефектами. Подвижность электронов и дырок. Условие электронейтральности. 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.

Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках. Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона.

Электронно-дырочный ( $p-n$ ) переход. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда. 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. Частотные и импульсные свойства. 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. Закон Бугера. Красная граница поглощения. Фотопроводимость. Спектральная характеристика. Фотовольтаический эффект в  $p-n$  переходе. Эффекты, вызываемые поглощением высокоэнергетического ядерного излучения в полупроводниках.

Излучение полупроводников. Прямые и не прямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фото- люминесценция. Спектры излучения. Правило Стокса, антистоксова люминесценция. Квантовый выход. Вывод излучения из полупроводников.

Лазерный эффект в полупроводниках. Индуцированное (стимулированное) излучение. Оптический резонатор, усиление и генерация света. Пороговый ток.

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

## **Тема 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-пролетные, диоды Ганна. Полупроводниковые датчики ядерных излучений.

Полупроводниковые транзисторы

Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные параметры, их зависимость от температуры. Частотные и импульсные характеристики. Диффузионно-дрейфовые транзисторы. Мощные транзисторы, в том числе СВЧ. Транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

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.

Шумы в транзисторах.

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)

Многослойные (объемные) ИС. Интеграция на пластине. Микросистемы (общее представление).

Микросхемотехника. Цифровые и аналоговые ИС. Базовые логические элементы: ТТЛ, ЭСЛ, МОП, КМОП, ПТШ. Микропроцессоры. Полупроводниковые ЗУ. Программируемые логические матрицы. Базовые матричные кристаллы. ЦАП – АЦП. Сигнальные микропроцессоры. ВИП и стабилизаторы напряжения. Операционные усилители. Специфика интегральных СВЧ-устройств.

Оптоэлектроника.

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

Полупроводниковые лазеры (общее представление).

Светодиоды, параметры и характеристики. Суперяркие светодиоды. ИК-излучатели. Светодиодные дисплеи. Полимерные светодиоды (общее представление).

Оптроны и оптоэлектронные ИС.

Оптические дисковые и голографические ЗУ. Волоконнооптические линии связи. Элементы оптической вычислительной техники. Интегральная оптика.

Акустоэлектроника и акустооптика. Физические основы взаимодействия акустической волны с электронами твердого тела и взаимодействия оптических и акустических волн в твердых телах и жидкостях. Основные материалы акустоэлектроники и акустооптики и устройства на их основе для обработки аналоговых сигналов.

Магнитоэлектроника, криоэлектроника, твердотельные датчики (общее представление).

Краткий очерк истории твердотельных приборов и микроэлектроники. Даты важнейших открытий и изобретений. Ученые, внесшие вклад в развитие твердотельной микроэлектроники и примыкающих к ней областей.

### **Тема 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. Перспективы развития планарной технологии. Гибридная технология. Микросборки и БИС на подложках.

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. Распределение примесей в эпитаксиальных слоях. Дефекты эпитаксиальных пленок. Получение эпитаксиальных гетеропереходов. Выращивание эпитаксиальных пленок  $A^3B^5$ . Оборудование для эпитаксиального выращивания пленок. Сравнение газотранспортной, жидкофазной, МОС-гидридной и молекулярной эпитаксии.

Создание диэлектрических покрытий на кремнии. Термодинамика процесса окисления кремния. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников. Структура окисла на кремнии. Перераспределение примеси при термическом окислении кремния. Формирование диэлектрических пленок методами осаждения из металлоорганических соединений.

Зарядовое состояние системы полупроводник—диэлектрик; факторы, влияющие на величину и знак заряда в системе. Связь параметров полупроводниковых приборов и ИС с зарядовым состоянием системы кремний—окисел.

Диффузия в полупроводниках. Физические основы процесса диффузии. Основные уравнения. Граничные условия и расчетные формулы для наиболее важных случаев диффузии. Методы проведения диффузионных процессов. Структурные схемы диффузионных печей. Особенности диффузии в соединениях  $A^3B^5$ .

Электронно-ионная технология. Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Дефекты, вносимые электронно-ионной обработкой, их устранение. Конструктивные схемы ионных имплантеров и оборудования для электронно-ионной и ионно-химической обработки.

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. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.

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.

**Тема 4.** Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники.

Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и нанoeлектроники. Методики построения физических и математических моделей. Двух- и трехмерное моделирование. Примеры моделей транзисторов, элементов микросхем. Системы моделирования и автоматизированного проектирования (общее представление). Испытание изделий на устойчивость к воздействию внешних факторов: механических, климатических, радиационных, Виды испытаний: приемосдаточные, периодические, квалификационные. Особенности поведения полупроводниковых приборов и микросхем при различных видах радиационных и космических воздействий. Методы повышения радиационной стойкости приборов.

Основные положения, понятия и определения современной теории надежности. Статистические методы оценки и прогнозирования показателей надежности и долговечности. Физика причин отказов полупроводниковых приборов и микросхем. Катастрофические (внезапные) и деградационные (постепенные) отказы. Методы выявления потенциально ненадежных приборов и микросхем. Ускоренные испытания и имитационные методы испытаний.

**Тема 5.** Радиоэлектронные компоненты. Физические явления, определяющие электропроводность толсто пленочных резистивных материалов.

Толсто пленочные резисторы.

Основные типы постоянных и переменных резисторов.

Физические явления, определяющие емкостные свойства конденсаторов.

Типы, параметры и конструкции конденсаторов постоянной и переменной емкости.

Физические основы работы линий задержек на поверхностных акустических волнах.

Полупроводниковые термо- и фототранзисторы, позисторы, варисторы, болометры (общее представление)

**Тема 6.** Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах. Размерное квантование в гетероструктурах. Примеры структур с размерно-квантованным энергетическим спектром: квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Сверхрешетки. Туннелирование на одиночном барьере. Двухбарьерная структура. Резонансно-туннельные диод и транзистор. Эффект Джозефсона.

Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах. Модулированное легирование. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Гетеропереходный биполярный транзистор.

Квантовый эффект Холла. Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле. Квантование холловского сопротивления двумерного электронного газа в магнитном поле. Дробный квантовый эффект Холла.

Одноэлектроника. Квантование кулоновской энергии в мезоскопических системах. Явление кулоновской блокады при туннелировании через переходы с малой емкостью. Одноэлектронные транзисторы и схемы на их основе.

Представления об элементной базе квантовых компьютерах – кубитах. Свойства кубита. Управление эволюцией кубита. Элементарные одно-кубитовые и двухкубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

### Рекомендуемая литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников – СПб.: изд. Лань. 2010.
2. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие – М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009. – (Основы наук).
3. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. – М.: Высшая школа, 2001.
4. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
5. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учебное пособие для вузов по направлению 010700 "Физика" и специальности 010701 "Физика" / В. А. Гуртов. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2005.
6. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 7-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2003.
7. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2007.
8. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Основы наноэлектроники – Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004.
9. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов, ч.1 и 2, – М.: Мир. 1984.
10. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых знаний. 2003.
11. Берикашвили, В. Ш. Твердотельная электроника и микроэлектроника: учебное пособие / В. Ш. Берикашвили, С. А. Воробьев. – М.: МГОУ, 2010.
12. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры: учебное пособие / А.Н. Чеканов. – М.: КНОРУС, 2012.
13. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – М.: РХД, 2001.
14. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника (в 2-х книгах) – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015г.

### Дополнительная литература

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977.
2. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. – М.: Высш. шк., 1986.
3. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. – М.: Мир, 1984.
4. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника / Под ред. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1998.
5. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1990.
6. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1998.
8. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы, материалы, приборы и их изготовление. – М.: Мир, 1985.
9. Емельянов В.А. Быстродействующие цифровые КМОП БИС. Минск: Полифакт, 1998.

10. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989.
11. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Под ред. В.И. Стафеева. – М.: Радио и связь, 1985.
12. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука, 1986
13. Тришенков М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. – М.: Радио и связь, 1992.
14. Технология СБИС. В 2 кн. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986.
15. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1983.
16. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987.
17. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989.
18. Валиев К.А. Физические основы субмикронной фотолитографии. – М.: Наука, 1990.
19. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. – М.: Мир, 1985.
20. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов / Под ред. Д. Миллера. М.: Радио и связь, 1989.
21. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая школа, 1989.
22. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. – М.: Мир, 1988.
23. Козырь И.Я. Качество и надежность интегральных микросхем. – М.: Высш. шк., 1987.
24. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС / В.Г. Домрачев, П.П. Мальцев, И.В. Новаченко, С.Н. Пономарев. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
25. Алексенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. – М.: Радио и связь, 1987.
26. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. – М.: Радио и связь, 1989.
27. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. В.Н. Мордковича. – М.: Мир, 1988.
28. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. М.: Высш. шк., 1984.

Заведующий аспирантурой



А.А. Пальянов