

**Минобрнауки России**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**  
**им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
**(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)**

**ПРОГРАММА**

кандидатского экзамена по специальности

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

(физико-математические науки)

Москва, 2021

## **I. Общие положения**

Настоящая программа предназначена для аспирантов и лиц, прикрепленных для сдачи кандидатских экзаменов без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и содержит требования к кандидатскому экзамену по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах». Программа разработана на основе типовой программы-минимум кандидатского экзамена по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», утвержденной Министерством образования и науки Российской Федерации.

## **II. Содержание кандидатского экзамена**

На кандидатский экзамен выносятся следующий перечень разделов и вопросов.

### ***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 непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фотолюминесценция. 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.

### ***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,  $pn$  – 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.

### *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.

### ***Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и наноэлектроники***

Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и наноэлектроники. 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.

### ***Радиоэлектронные компоненты***

Физические явления, определяющие электропроводность толстопленочных резистивных материалов.

Толстопленочные 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)

***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 однокубитовые и двухкубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

**III. Список рекомендуемой литературы для подготовки к кандидатскому экзамену**

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976.
3. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.
4. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. М.: Мир, 1984.
5. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника / Под ред. Н.Д. Федорова. М.: Радио и связь, 1998.
6. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Л.: Энергоатомиздат, 1986. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1998.
7. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы, материалы, приборы и их изготовление. М.: Мир, 1985.

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. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986. Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. М.: Радио и связь, 1992.
11. Технология СБИС. В 2 кн. / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986.
12. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1983.
13. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. М.: Радио и связь, 1987.
14. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.
15. Валиев К.А. Физические основы субмикронной фотолитографии. М.: Наука, 1990.
16. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
17. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов / Под ред. Д. Миллера. М.: Радио и связь, 1989.
18. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высшая школа, 1989.
19. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. М.: Мир, 1988.
20. Козырь И.Я. Качество и надежность интегральных микросхем. М.: Высш. шк., 1987.
21. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС / В.Г. Домрачев, П.П. Мальцев, И.В. Новаченко, С.Н. Пономарев. М.: Энергоатомиздат, 1992.
22. Алексенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. М.: Радио и связь, 1987.
23. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. М.: Радио и связь, 1989.
24. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. М.: РХД, 2001.
25. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Новосибирск: НГТУ, 2000.
26. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. В.Н. Мордковича. М.: Мир, 1988.
27. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб: «Лань», 2002.
28. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. М.: Высш. шк., 1984.

#### **IV. Критерии выставления оценок на кандидатском экзамене**

Оценка знаний производится по **пятибалльной шкале**.

Оценка **«отлично»** выставляется за обстоятельный и глубокий ответ на два вопроса из разных тематических разделов. Аспирант/экстерн грамотно использует научную терминологию, демонстрирует знание источников, выявляет основные тенденции и проблемы, свободно



ориентируется в материале, относящемся к предмету.

Оценка **«хорошо»** предполагает правильные и достаточно полные ответы на два вопроса из разных тематических разделов, отсутствие грубых ошибок и упущений, если одновременно допущены отдельные ошибки и у аспиранта/экстерна возникли затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется при недостаточно полном ответе на основные вопросы, при наличии пробелов в знаниях, а также если у аспиранта/экстерна возникли серьёзные затруднения при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется в случае отсутствия необходимых для ответа теоретических знаний.