

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА  
ПО КОНКУРСНОЙ ГРУППЕ  
«ФЭФМ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СИСТЕМЫ СВЯЗИ»  
ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В АСПИРАНТУРУ**

**Вопросы по выпускной квалификационной работе (магистратура или специалитет)**

1. Основные положения.
2. Новизна.
3. Актуальность.

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

1. Агрегатные состояния вещества. Тепловое движение молекул в газах, жидкостях и твердых телах. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Активные материалы: ферромагнетики, сегнето- и пьезоэлектрики, магнитострикторы, мультиферроики. Аморфное, поликристаллическое и кристаллическое состояние твердых тел.
2. Основы теории симметрии кристаллов. Решетки Браве. Обратные решетки. Ячейка Вигнера-Зейтца. Возникновение энергетических зон. Зонная структура полупроводников, диэлектриков, металлов. Ширина запрещенной зоны. Работа выхода.
3. Плотность энергетических состояний. Заполнение энергетических состояний в соответствии с распределениями Ферми-Дирака, Максвелла-Больцмана. Уровень Ферми. Зона Бриллюэна. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Эффективная масса электронов и дырок. Алгоритмы построения зонных диаграмм для слоистых структур из материалов с различной шириной запрещенной зоны и работой выхода. Потенциальные ямы.
4. Кристаллографические, электрофизические, физические, тепловые и механические характеристики идеального кристалла кремния. Сравнительные характеристики с другими полупроводниками.
5. Методы роста кристаллов кремния. Дефекты кристаллической структуры в кремнии. Точечные собственные и примесные, линейные, плоские и объемные дефекты. Происхождение дефектов: ростовые, термические, радиационные, радиационно-термические. Дислокации. Комплексы дефектов. Кластеры дефектов и примесные преципитаты.
6. Теория диффузионно-лимитированного роста и распада кластеров и преципитатов. Явление коалесценции. Теория Лифшица-Слезова. Радиационные дефекты в кремнии: пары Френкеля, кластеры и разупорядоченные области. Радиационно-термические дефекты в ионно-легированном кремнии. Окислительные дефекты упаковки.
7. Понятие сингулярной, несингулярной, вицинальной поверхности кубических кристаллов. Атомарные ступени и изломы на них. Элементарные процессы на поверхности: адсорбция, десорбция, поверхностная диффузия атомов, образование поверхностных вакансий. Собственные насыщенные пары.
8. Природа энергетических уровней в запрещенной зоне. Легирующие примеси. Понятие об амфотерных примесях. Кислород и углерод в кремнии. Термодоноры. Быстродиффундирующие примеси в кремнии. Поверхностные уровни. Уровни Тамма. Поверхностные состояния на границах раздела. Концентрация электронов и дырок и уровень Ферми в собственном полупроводнике. Концентрация электронов и дырок в полупроводниках n и p типа проводимости в зависимости от уровня легирования и температуры. Температура истощения примеси. Статистика электронов и дырок в компенсированных полупроводниках. Уравнение электронейтральности.
9. Электрическая проводимость полупроводника. Подвижность носителей заряда. Механизмы рассеяния носителей заряда и температурная зависимость подвижности

- при различных видах рассеяния. Температурная зависимость электрической проводимости.
10. Неравновесное состояние подсистемы носителей заряда. Время жизни неосновных носителей заряда. Механизмы рекомбинации носителей заряда. Прямая рекомбинация, механизм Шокли-Рида. Поверхностная рекомбинация. Время жизни при комбинированных механизмах релаксации неравновесного состояния. Уравнение для неравновесной концентрации носителей заряда.
  11. Равновесное и неравновесное состояния р-п перехода. Область пространственного заряда в р-п переходе. Диффузионная и барьерная емкости. Омические переходы. Барьер Шоттки. Зонные диаграммы. Уравнение Пуассона. Диффузионная и барьерная емкости переходов. ВАХ выпрямляющего перехода.
  12. Эффект поля в МДП структуре. Уравнения продольной проводимости. Потенциальные ямы. Двухмерный электронный газ. Квантовые запрет рассеяния носителей заряда. Туннельные токи. Спин ориентированные ток.
  13. Термоэлектрические эффекты в кремнии. Поглощение света в полупроводниках. Фото-эдс в кремнии. Фото- и катодопроводимость. Явление излучательной рекомбинации. Физические задачи и принципы радиофотоники и нанофотоники. Плазмоны.
  14. Методы формирования слоев. Вакуумное напыление. Катодное и магнетронное напыление. Осаждение из газовой фазы. Эпитаксиальный рост. Принципы молекулярной и атомарной эпитаксии. Твердофазный рост слоев: оксидов и нитридов кремния, силицидов металлов. Диффузионно-лимитируемые теории твердофазного роста. Ионный синтез слоев и трехмерных включений новой фазы. КНИ структуры. Метод smart-cut. Низкотемпературное соединение кремниевых пластин (Bouding).
  15. Физические основы легирования. 1 Механизмы диффузии примесных атомов в кремнии. Уравнения диффузии из ограниченного и неограниченного источника. Функция ошибок. Ионная имплантация. Теория пробегов. Основные параметры имплантации. Профили распределения примесных атомов.
  16. Методы отжига ионно-имплантированных слоев. Эффект обратного отжига. Уравнения диффузии в условиях неравновесных собственных точечных дефектов. Ускоренная и заторможенная диффузия. Радиационно-стимулированная диффузия в ионно-имплантированных структурах. Эффекты дальнего действия в радиационной физике.
  17. Физические основы травления. Условия селективного и полирующего жидкостного травления кремния. Газовое химическое травление. Принципы плазмохимического и реактивного травления. Условия обеспечения высокого аспектного соотношения.
  18. Современные методы фото- и электронной литографии. Принцип формирования изображений с помощью шаблонов с фазовой коррекцией. Стримминг.
  19. Физические основы радиационной стойкости. Виды и источники радиационного воздействия. Гамма излучение. Корпускулярные потоки протонов, нейтронов, осколков тяжелых ядер. Состав космического излучения. Радиационные явления в подсистеме электронов и атомов кристаллов.
  20. Механизмы деградации приборных структур. Тиристорный эффект, короткие замыкания, образование кластеров и комплексов дефектов, глубоких уровней, накопление заряда и ловушек в диэлектриках и на границах раздела фаз. Методы повышения радиационной стойкости. Исходные материалы и КНИ структуры. Геттеры. Трансмутационно легированный кремний. Топологические охранные кольца. Управление встроенными зарядами в диэлектриках. Схемотехнические решения. Резервирование.
  21. Микро- и наноэлектроника. Виды полевых транзисторов. МОП и КМОП транзисторы. Биполярные Si и SiGe транзисторы. Методы повышения подвижности в канале полевого транзистора. Полевой транзистор с вертикальным каналом. Транзисторы с трехмерным затвором. НЕМТ структуры.

22. Физические основы флэш-памяти. Резистивная, магниторезистивная, сегнетоэлектрическая память. Режимы записи, хранения и считывания.
23. Пьезоэлектроника и МЕМС технологии. Акселерометры, вибрационные гироскопы, актюаторы, датчики физических величин.
24. Свето- и фотодиоды. Приборы с зарядовой связью. Приборы радиофотоники и нанофотоники. Гетероинтегрированная электроника.
25. Исследования методами растровой электронной микроскопии. Исследования методами просвечивающей и атомно-силовой микроскопией. Металлографические методы исследования дефектов структуры кристалла. Декорирование дефектов примесными атомами. Селективные травители. Дифрактометрия.
26. Измерение толщин слоев методами профилометрии, интерферометрии и эллипсометрии. Методы исследования электрической проводимости полупроводников. Одно- и четырех-зондовый метод. Метод измерения потерь на вихревых токах.
27. Методы исследования электрофизических параметров полупроводников и структур. Методы измерения времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей заряда. Фольт-фарадные методы исследования МДП структур. ВЧ и НЧ С-V характеристика МДП структуры. Методы измерения концентрации носителей заряда в полупроводнике. Оценка подвижности носителей заряда при измерении эффекта Холла. DLTS метод контроля глубоких уровней в полупроводнике.
28. ИК спектроскопия. Вторичная ионная масс-спектроскопия. Метод Резерфордского обратного рассеяния при анализе радиационных повреждений кристалла.
29. Определения аппроксимации, сходимости и устойчивости численного метода. Жесткие и нежесткие задачи (с примерами), явные и неявные методы. Методы решения систем линейных уравнений с разреженными матрицами. Триангуляция Делоне и диаграммы Вороного. Адаптивные сетки в задачах гидродинамики.
30. Метод конечных элементов. Методы граничных и объемных элементов. Клеточно-автоматные модели пространственно-распределенных систем. Блочный поворотный механизм Марголуза. Метод функций Грина в теоретической физике и его применение при моделировании фотолитографии. Метод «частиц-в-ячейке» (particles-in-cell). Генетические алгоритмы их применение в задачах топологического проектирования СБИС. Элементы научной визуализации (принципы Тафта) и Data Mining.

#### **Раздел «Квантовая электроника»**

31. Оптические и безызлучательные переходы в квантовых системах. Спонтанное и вынужденное излучения. Энергетические состояния и квантовые переходы в атомных системах: атомные, молекулярные и ионные газы, ионы, центры окраски и красители в диэлектрических средах, оптические переходы в полупроводниках.
32. Ширина и форма спектральных линий. Механизмы однородного и неоднородного уширения линий в газах и твердых телах, времена поперечной и продольной релаксаций. Инверсия населенностей энергетических состояний. Коэффициент усиления лазерной среды. Принципы создания инверсной населенности. Насыщение, поглощение и усиление света. Искажения контуров спектральных линий, эффект «выжигания дыр» в неоднородно уширенных линиях.
33. Мазер на пучке молекул аммиака. Квантовый парамагнитный усилитель СВЧ.
34. Газовые лазеры: газоразрядные (атомные, ионные, молекулярные, на парах металлов), фотодиссоционные, химические, газодинамические, электроионизационные, эксимерные. Особенности кольцевых газовых лазеров.
35. Лазеры на твердых активных средах – стеклах, кристаллах, активированных волоконных материалах. Лазеры на кристаллах семейства гранатов с неодимом.
36. Полупроводниковые инжекционные лазеры, лазеры на гетероструктурах, лазеры на квантово-размерных структурах.
37. Лазерные усилители (бегущей волны, многопроходовые).

38. Преобразователи частоты излучения и перестраиваемые лазеры: генераторы оптических гармоник, суммарных и разностных частот; лазеры на растворах органических соединений (красителей); комбинационные преобразователи и лазеры (на ВКР); параметрические усилители и генераторы света; перестраиваемые полупроводниковые лазеры; лазеры на  $F$ -центрах. Лазеры на свободных электронах.
39. Объемные резонаторы СВЧ. Оптические резонаторы; основные типы открытых резонаторов: плоскопараллельные, конфокальные, устойчивые, неустойчивые, кольцевые. Типы колебаний, собственные частоты, добротность оптических резонаторов. Методы селекций продольных и поперечных типов колебаний. Пространственные и угловые характеристики излучения лазеров.
40. Активные среды с однородно-уширенной линией, кинетические уравнения, уравнения переноса. Анализ кинетики одномодового генератора. Взаимодействие различных типов колебаний. Роль насыщения и неоднородности накачки. Конкуренция мод, многомодовый режим. Пички в лазерах. Динамика полупроводниковых лазеров и газовых лазеров с доплеровской линией. Шумы излучения. Методы стабилизации интенсивности и частоты излучения лазеров.
41. Модуляция добротности. Время нарастания и длительность импульса генерации. Электрооптические, магнитооптические, оптико-механические, акустооптические и другие модуляторы добротности. Просветляющиеся фильтры. Генерация серии импульсов. Метод синхронизации мод, полоса синхронизации и параметры импульсов. Управление параметрами импульсов, схемы модуляции добротности. Методы генерации сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов света.
42. Преобразование частоты лазерного излучения, генерация гармоник и комбинационных частот, параметрическое усиление и параметрическая генерация света. Вынужденные рассеяния: Мандельштама-Бриллюена (ВРМБ), комбинационное (рамановское, ВКР), Рэлеевское. Самофокусировка. Оптический пробой в газах и твердых телах. Оптическая прочность (поверхностная и объемная) элементов лазера. Обращение волнового фронта методами нелинейной оптики. Активная спектроскопия комбинационного рассеяния.
43. Мощность (непрерывная, импульсная, средняя) лазерного излучения, энергия импульса излучения. Распределение излучения в ближней и дальней зонах, угловая расходимость. Когерентность (пространственная, временная). Поляризация, спектр мод резонатора (продольные и поперечные моды). Стабильность (кратковременная и долговременная, амплитудная и частотная). Шумы излучения, параметры модуляции лазеров. Методы измерения перечисленных параметров лазерного излучения.
44. Лазерные затворы. Дефлекторы и модуляторы лазерного излучения. Ячейки Керра, Поккельса, Фарадея, акустооптические. Принцип работы, методы расчета, синхронизация внешним сигналом. Пространственно-временные модуляторы света. Адаптивные зеркала. Оптические, в т.ч. управляемые фильтры.
45. Источники питания твердотельных лазеров. Импульсные и непрерывные лампы накачки (типы, предельные и типовые мощности, методы поджига); разрядники (вакуумные, высокого давления, воздушные); методы управления и синхронизации. Источники питания газоразрядных лазеров. Методы предионизации. Электроионизационный метод (принцип, требования к электронному пучку, системе питания). Электроразрядные высокопоточные источники накачки (принцип работы, условия применимости). ВЧ-накачка газовых лазеров. Особенности источников питания инжекционных полупроводниковых лазеров. Накачка твердотельных лазеров световыми и лазерными полупроводниковыми диодами.
46. Методы получения и обработки активных лазерных стекол и кристаллов. Методы выращивания и обработки нелинейно-оптических, электрооптических и акустооптических кристаллов. Технологические принципы создания сложных

- полупроводниковых и оптических структур (методы вакуумного напыления, эпитаксии, ионной имплантации и др.). Методы очистки газовых активных сред.
47. Выбор оптической схемы, типа резонатора, оптических развязок, материалов (пропускание, однородность, оптическая плотность, точность обработки), элементов управления. Выбор источников накачки и параметров системы питания. Обеспечение вибро- и удароустойчивости. Конструктивные принципы стабилизации основных параметров и обеспечения работы лазера в широком диапазоне температур. Системы теплоотвода и охлаждения активных элементов.
  48. Оптические методы записи, воспроизведения, хранения и обработки информации. Оптическая, в т.ч. волоконная, связь. Оптическая локация и лазерная дальнометрия. Лазерная технология и обработка материалов. Дистанционное зондирование окружающей среды. Лазерная медицина. Голография, интерферометрия. Спектроскопия. Лазерная гироскопия. Стандарты частоты. Управляемый лазерный термоядерный синтез. Лазерная химия. Метрология, измерительная техника.

### Литература

#### **К разделу «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»**

1. Вопросы радиационной технологии полупроводников. Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 294 с.
2. К. Ту, Дж. Майер. Образование силицидов. В кн. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции. Изд. Мир, Москва, 1982, 576 с.
3. Italyantsev A.G. Solid-phase reaction on silicon surface. Accompanying processes. J. Appl. Phys., 1996, v. 79 (5), p.2369-2375.
4. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. Под ред. М.К. Шейкмана, изд. Мир, Москва, 1977, с. 467.
5. Итальянцев А.Г. Генерация вакансий, стимулированная химическим травлением поверхности кристалла. Поверхность, 1991, в.10, с.122-127.
6. С.В. Булярский, В.И. Фистуль. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. Изд. Наука. Физматлит, Москва, 1997, с.352.
7. Гегузин Я.Е., Кагановский Ю.С. Диффузионные процессы на поверхности кристалла. Изд. Энергоатомиздат, Москва, 1984, с. 123.
8. Вавилов В. С, Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучения на полупроводники. М., 1988. 192 с.
9. А. Зеегер, Х. Фелл, В. Франк. Точечные дефекты в твердых телах, под ред. Б. И. Болтакса, 1979, изд. «Мир», Москва, с. 164.
10. В.Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. В кн.: Радиационная физика полупроводников, 1979, изд. «Наукова думка», Киев, с. 225.
11. Дж. Хастед. Физика атомных столкновений. Изд. Мир, 1965, с.482.

#### **К разделу «Квантовая электроника»**

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
2. О. Звелто Принципы лазеров. М.: Мир, 1990.
3. Л.В. Тарасов Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981.
4. Н.В. Карлов Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1988.
5. Г.М.Зверев, Ю.Д. Гуляев Лазеры на кристаллах и их применение. М.: Радио и связь, 1994.
6. Н.И. Коротеев, И.Л. Шумай Физика мощного лазерного излучения. М.: Наука, 1991.
7. П.Г. Елисеев Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983.

8. Й. Херман, Б. Вильгельм Лазеры сверхкоротких световых импульсов. М.: Мир, 1986.
9. Ю.А. Ананьев Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990.
10. И.Р. Шен Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
11. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / Под ред. А.Ф. Котюка. М.: Радио и связь, 1981.
12. Л.Н. Магдич, В.Д. Молчанов Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978.
13. В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов Прикладная нелинейная оптика. М.: Радио и связь, 1982.
14. А.Н. Пихтин Оптическая и квантовая электроника. Учебник. М.: Высш. шк., 2001.