

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

УТВЕРЖДАЮ  
ИО Директора  
С.А.Никитов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

**ПРОГРАММА**

вступительных испытаний поступающих на обучение по программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

по специальной дисциплине

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ: 11.06.01 ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

**НАПРАВЛЕННОСТЬ: 05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника на квантовых эффектах**

Форма проведения вступительных испытаний.

Вступительные испытания проводятся в устной форме. Для подготовки ответов поступающий использует экзаменационные листы.

ЗАВ.ОАДС \_\_\_\_\_  
(подпись)

д.ф.-м.н. Кузнецова И.Е.  
(фамилия)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2014 года.

# ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ и ПРИБОРОВ МИКРО- и НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

## 1. Основы физики твердого тела

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. Основы теории симметрии кристаллов. Решетки Браве. Обратные решетки. Ячейка Вигнера-Зейтца. Возникновение энергетических зон. Зонная структура полупроводников, диэлектриков, металлов. Ширина запрещенной зоны. Работа выхода. 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.

## 2. Физика полупроводникового кремния

Кристаллографические, электрофизические, физические, тепловые и механические характеристики идеального кристалла кремния. Сравнительные характеристики с другими полупроводниками. 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. 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.

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.

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 Гамма. 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.

Электрическая проводимость полупроводника. Подвижность носителей заряда. Механизмы рассеяния носителей заряда и температурная зависимость подвижности при различных видах рассеяния. Температурная зависимость электрической проводимости. 9.5

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.

Равновесное и неравновесное состояния p-n перехода. Область пространственного заряда в p-n переходе. Диффузионная и барьерная емкости. Омические переходы. Барьер Шоттки. Зонные диаграммы. Уравнение Пуассона. Диффузионная и барьерная емкости переходов. ВАХ выпрямляющего перехода.

Эффект поля в МДП структуре. Уравнения продольной проводимости. Потенциальные ямы. Двухмерный электронный газ. Квантовый запрет рассеяния носителей заряда. Туннельные токи. Спин ориентированные токи

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.

### **3. Физические основы технологии кремниевой микроэлектроники**

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).

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. 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.

Физические основы травления. Условия селективного и полирующего жидкостного травления кремния. Газовое химическое травление. Принципы плазмо-химического и реактивного травления. Условия обеспечения высокого аспектного соотношения.

Современные методы фото- и электронной литографии. Принцип формирования изображений с помощью шаблонов с фазовой коррекцией. Стримминг.

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. 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.

### **4. Приборы микро- и нанoeлектроники и физические явления в их основе**

Микро- и нанoeлектроника. 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.

Физические основы флэш-памяти. Резистивная, магниторезистивная, сегнетоэлектрическая память. Режимы записи, хранения и считывания.

Пьезоэлектроника и МЕМС технологии. Акселерометры, вибрационные гироскопы, актюаторы, датчики физических величин.

Свето- и фотодиоды. Приборы с зарядовой связью. Приборы радиофотоники и нанофотоники. Гетероинтегрированная электроника.

## 5. Методы исследований и метрологического обеспечения

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. Измерение толщин слоев методами профилометрии, интерферометрии и эллипсометрии. Методы исследования электрической проводимости полупроводников. Одно- и четырех-зондовый метод. Метод измерения потерь на вихревых токах.

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 C-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.

ИК спектроскопия. Вторичная ионная масс-спектрометрия. Метод резерфордовского обратного рассеяния при анализе радиационных повреждений кристалла.

## 6. Задачи и среды компьютерного моделирования

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.

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.

Пакет MATLAB. Компонент MATLAB Simulink. Возможности Symbolic Toolbox. Интерполяция данных высокоуровневыми средствами MATLAB. PDE Toolbox. Пакеты конечно-элементного моделирования: COMSOL multiphysics, AnSYS. Квантово-химическое моделирование в программе HyperChem.

## Список литературы

### *Основная литература*

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.

*Дополнительная литература*

1. Ravi K.V., Varker C.J. Oxidation – induced stacking fault in silicon. I. Nucleation phenomenon. J. Appl. Phys., 1974, v.45, N1, p.263-271.
2. Hu S.M. Formation of staking faults and enhanced diffusion in the oxidation of silicon. J. Appl. Phys., 1974, v.45, N4, p.1567-1573.
3. Fair R.B. Oxidation, impurity diffusion and defect growth in silicon – an overview. J. Electrochem. Sos., 1981, v.128, N6, p. 1360-1368.
4. Miin-Ron-Lin A. The growth of OSF and point defects generation at Si-SiO<sub>2</sub> interface during thermal oxidation of silicon. J. Electrochem. Sos., 1981, v.128, N5, p. 1121-1130.
5. Murarka S.P. Role of point defects in the growth of of the oxidation – induced stacking faults in silicon. Phys. Rev. B, 1977, v.16, N6, p.2849-2857.
6. S.M. Hu. Appl. Phys. Lett. Point defect generation and enhanced diffuusion in silicon due to tantalum silicide overlayers. 1987, v.51, N5, p. 308.
7. Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н. Трансформация размеров кластеров собственных точечных дефектов в полупроводниках. Физика и техника полупроводников, 1983, т.17, в.2, с.217-222.
8. Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н. Эмиссионная модель аннигиляции агломератов точечных дефектов в условиях быстрого нагрева кристалла. Журнал технической физики, 1983, т.53, в.5, с.937-939.
9. Итальянцев А.Г., Кузнецов А.Ю., Пантелеев В.А. Экзоэлектронная эмиссия с поверхности кремния, стимулированная образованием силицидов металлов. Эффект дальнего действия. Письма в Журнал технической физики, т.15, вып.11, 1989, с.27-30.
10. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Возможный механизм высокоэффективного ускорения перестройки и рекомбинации точечных дефектов в полупроводниках действием ионизирующего воздействия. ФТП, 1982, т.16, в.7, с. 1322.
11. Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н., Темпер Э.М. О роли атермических процессов в импульсном отжиге ионно-имплантированных слоев кремния. Физика и техника полупроводников, в.5, 1984, с.928-930.
12. Ерохин Ю.Н., Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н. Новый механизм ионизационно-стимулированного воздействия на радиационные дефекты в имплантированных полупроводниках. Письма в Журнал технической физики, 1988, т.14, в. 9, с.835-838.
13. В.Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. В кн.: Радиационная физика полупроводников, 1979, изд. «Наукова думка», Киев, с. 225.
14. И. М. Лифшиц, В. В. Слезов. О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов. ЖЭТФ, 1958, в. 35(2), с. 479-492.
15. Дж. Хастед. Физика атомных столкновений. Изд. Мир, 1965, с.482.
16. Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н. Ускоренный распад кластеров собственных точечных дефектов при импульсном нагреве кристалла. Препринт ИПТМ АН СССР.
17. Итальянцев А.Г. Эффекты в кремнии, обусловленные химическими реакциями на его поверхности. В сб.: «Кремний – 2008», Черногловка, 2008, с.159.
18. Enisherlova K.L., Italyantsev A.G., Tkacheva T.M., The termodynamical model of the internal guttering in Si. “Silicon 2008”, Czech Republic, 2008, с.257-269.