

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
В.В. Иванов**

|                            |   |
|----------------------------|---|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>  |
| <b>по дисциплине:</b>      | Физика дефектов в технологии микро и нанoeлектроники  |
| <b>по направлению:</b>     | Электроника и нанoeлектроника   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника<br>Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики<br>кафедра микро- и нанoeлектроники |
| <b>курс:</b>               | 1   |
| <b>квалификация:</b>       | магистр   |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: А.Г. Итальянцев, канд. физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Физика дефектов в технологии микро и нанoeлектроники" предусматривает знакомство слушателей с основными физическими и физико-химическими процессами на поверхности и в объеме монокристаллического кремния.

Задачи курса:

- изложение материала курса по следующим направлениям:
- атомарная структура поверхности Si. Процессы травления и эпитаксиального роста;
- дефекты кристаллической структуры в кремнии;
- физика легирования кремния;
- твердофазные реакции на поверхности Si и сопровождающие их процессы в объеме кристалла;
- диффузия примесных атомов и собственных дефектов;
- процессы в Si при комбинированных воздействиях;
- физика дефектной инженерии;
- слоистые и кремниевые приборы на их основе;
- предоставление картины взаимосвязи процессов в кремнии и причинно-следственных связей, приводящих к целенаправленным и негативным изменениям свойств материала и характеристик приборных структур;
- теоретическая подготовка слушателей курса к самостоятельному решению вопросов, возникающих при разработке новых приборов микроэлектроники.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- теорию физических и физико-химических процессов в монокристаллическом кремнии.

Уметь:

- излагать материалы курса;
- использовать полученные знания при разработке принципов построения и конструкции прибора микроэлектроники и/или к-л технологического процесса.

Владеть:

- методами расчета параметров основных технологических операций: термического окисления, ионной имплантации, температуры и длительности отжига;
- методами теоретической оценки ожидаемых параметров элементов приборной структуры: поверхностного и удельного сопротивления легированных участков, концентрации и подвижности носителей заряда в легированных и индуцированных слоях, ширины ОПЗ, емкости p-n переходов и пр.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Кремний в классе твердых тел
2. Структурные и электрофизические параметры объемного кремния
3. Классификация подсистем кристалла ионные и фанонные подсистемы
4. Электронные подсистемы кремния. Подсистемы дефектов кристалла.
5. Атомарная структура поверхности кремния
6. Атомарная физика химического травления поверхности кремния.
7. Основы теории эпитаксиального роста на поверхности кремния.
8. Классификация дефектов в кремнии
9. Основы радиационной физики кремния. Механизм образования и виды радиационных дефектов
10. Механизмы эволюции подсистемы дефектов. Часть 1
11. Механизмы эволюции подсистемы дефектов. Часть 2
12. Физические основы методов легирования
13. Легирование методом ионная имплантация
14. Диффузия из ограниченных и неограниченных поверхностных источников
15. Теоретические основы твердофазных реакций и сопровождающих их процессов

16. Обобщенная модель генерации собственных точечных дефектов в процессе твердофазных реакций на поверхности кремния
17. Правило формирования фаз в системе с полифазной диаграммой состояния
18. Образование пересыщенных вакансионных растворов в Si при росте силицидов на его поверхности
19. Кинетика роста слоев SiO<sub>2</sub>. Модели генерации неравновесных междоузлий.
20. Комбинированные механизмы диффузии основных примесных атомов в кремнии
21. Радиационно-стимулированная диффузия в кремнии. Распад радиационных кластеров.
22. Стимулированная диффузия в кремнии. Диффузия ускоренная по вакансионному механизму.
23. Стимулированная диффузия в кремнии. Диффузия ускоренная по междоузельному механизму.
24. Влияние встроенных электрических и механических полей на диффузионное перераспределение.
25. Диффузия в потоках собственных дефектов.
26. Фотостимулированная диффузия в кремнии
27. Ионная имплантация в сопровождении лучистой радиации
28. Диффузия примесей в условиях травящейся поверхности кремния
29. Механизм геттерирования собственных дефектов и примесных атомов
30. Распад собственных кластеров при импульсном отжиге кремния
31. Кремний на изоляторе и физические особенности переноса в них. Кремний-германиевые структуры.
32. Потенциальные ямы и двухмерный электронный газ
33. Кремний-сегнетоэлектрические гетероструктуры
34. Обобщение материала курса

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- знакомство слушателей с основными физическими и физико-химическими процессами на поверхности и в объеме монокристаллического кремния.

### Задачи дисциплины

- изложение материала курса по следующим направлениям:
- атомарная структура поверхности Si. Процессы травления и эпитаксиального роста;
- дефекты кристаллической структуры в кремнии;
- физика легирования кремния;
- твердофазные реакции на поверхности Si и сопровождающие их процессы в объеме кристалла;
- диффузия примесных атомов и собственных дефектов;
- процессы в Si при комбинированных воздействиях;
- физика дефектной инженерии;
- слоистые и кремниевые приборы на их основе;
- предоставление картины взаимосвязи процессов в кремнии и причинно-следственных связей, приводящих к целенаправленным и негативным изменениям свойств материала и характеристик приборных структур;
- теоретическая подготовка слушателей курса к самостоятельному решению вопросов, возникающих при разработке новых приборов микроэлектроники.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции  |
|--|--|
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
|  | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели                    |

новые научные результаты

ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- теорию физических и физико-химических процессов в монокристаллическом кремнии.

уметь:

- излагать материалы курса;
- использовать полученные знания при разработке принципов построения и конструкции прибора микроэлектроники и/или к-л технологического процесса.

владеть:

- методами расчета параметров основных технологических операций: термического окисления, ионной имплантации, температуры и длительности отжига;
- методами теоретической оценки ожидаемых параметров элементов приборной структуры: поверхностного и удельного сопротивления легированных участков, концентрации и подвижности носителей заряда в легированных и индуцированных слоях, ширины ОПЗ, емкости p-n переходов и пр.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| №  | Тема (раздел) дисциплины  | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |          |                 |                |
|----|---|---|----------|-----------------|----------------|
|    |   | Лекции  | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1  | Кремний в классе твердых тел  | 1   |          |                 |                |
| 2  | Структурные и электрофизические параметры объемного кремния                           | 1   |          |                 |                |
| 3  | Классификация подсистем кристалла ионные и фанонные подсистемы                        | 1   |          |                 |                |
| 4  | Электронные подсистемы кремния. Подсистемы дефектов кристалла.                        | 1   |          |                 |                |
| 5  | Атомарная структура поверхности кремния   | 1   |          |                 |                |
| 6  | Атомарная физика химического травления поверхности кремния.                           | 1   |          |                 |                |
| 7  | Основы теории эпитаксиального роста на поверхности кремния.                           | 1   |          |                 |                |
| 8  | Классификация дефектов в кремнии  | 1   |          |                 |                |
| 9  | Основы радиационной физики кремния. Механизм образования и виды радиационных дефектов | 1   |          |                 |                |
| 10 | Механизмы эволюции подсистемы дефектов. Часть 1                                       | 1   |          |                 |                |
| 11 | Механизмы эволюции подсистемы дефектов. Часть 2                                       | 1   |          |                 |                |
| 12 | Физические основы методов легирования   | 1   |          |                 |                |
| 13 | Легирование методом ионная имплантация  | 1   |          |                 |                |

|                       |  |        |    |  |    |
|-----------------------|--|--------|----|--|----|
| 14                    | Диффузия из ограниченных и неограниченных поверхностных источников   | 1      |    |  |    |
| 15                    | Теоретические основы твердофазных реакций и сопровождающих их процессов  | 1      |    |  |    |
| 16                    | Обобщенная модель генерации собственных точечных дефектов в процессе твердофазных реакций на поверхности кремния |        |    |  | 3  |
| 17                    | Правило формирования фаз в системе с полифазной диаграммой состояния   |        |    |  | 1  |
| 18                    | Образование пересыщенных вакансионных растворов в Si при росте силицидов на его поверхности                      |        |    |  | 1  |
| 19                    | Кинетика роста слоев SiO <sub>2</sub> . Модели генерации неравновесных междоузлий.                               |        |    |  | 1  |
| 20                    | Комбинированные механизмы диффузии основных примесных атомов в кремнии   |        | 1  |  | 1  |
| 21                    | Радиационно-стимулированная диффузия в кремнии. Распад радиационных кластеров.                                   |        | 1  |  | 2  |
| 22                    | Стимулированная диффузия в кремнии. Диффузия ускоренная по вакансионному механизму.                              |        | 1  |  | 2  |
| 23                    | Стимулированная диффузия в кремнии. Диффузия ускоренная по междоузельному механизму.                             |        | 1  |  | 2  |
| 24                    | Влияние встроенных электрических и механических полей на диффузионное перераспределение.                         |        | 1  |  | 2  |
| 25                    | Диффузия в потоках собственных дефектов.   |        | 1  |  |    |
| 26                    | Фотостимулированная диффузия в кремнии   |        | 1  |  |    |
| 27                    | Ионная имплантация в сопровождении лучистой радиации   |        | 1  |  |    |
| 28                    | Диффузия примесей в условиях травящейся поверхности кремния  |        | 1  |  |    |
| 29                    | Механизм геттерирования собственных дефектов и примесных атомов  |        | 1  |  |    |
| 30                    | Распад собственных кластеров при импульсном отжиге кремния   |        | 1  |  |    |
| 31                    | Кремний на изоляторе и физические особенности переноса в них. Кремний-германиевые структуры.                     |        | 1  |  |    |
| 32                    | Потенциальные ямы и двумерный электронный газ  |        | 1  |  |    |
| 33                    | Кремний-сегнетоэлектрические гетероструктуры   |        | 1  |  |    |
| 34                    | Обобщение материала курса  |        | 1  |  |    |
| Итого часов           |  | 15     | 15 |  | 15 |
| Подготовка к экзамену |  | 0 час. |    |  |    |

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| Общая трудоёмкость | 45 час., 1 зач.ед. |
|--------------------|--------------------|

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Кремний в классе твердых тел

Предмет, структура и особенности курса. Определения – поле и вещество. Структура внешних электронных оболочек атомов. Электроотрицательность. Ковалентная и ионная связь в молекулах. Виды связей в твердых телах.

Металлы, диэлектрики, полупроводники, сегнетоэлектрики, ферромагнетики. Ближний и дальний порядок. Аморфное состояние, поликристаллы, кристаллы. Элементарные и молекулярные полупроводники.

Основные понятия физики твердого тела и полупроводников. Зонная структура в прямом и обратном пространстве. Зона Бриллюэна. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.

Элементарная ячейка кремния и ее параметры.

«Жизненный цикл» кремния – песок, поликремний, монокристалл, пластина, эпитаксиальная структура, чип, прибор микроэлектроники.

##### 2. Структурные и электрофизические параметры объемного кремния

Основные электрические и механические свойства объемного монокристаллического кремния. Зонная структура кремния и ее параметры. Фундаментальная взаимосвязь подвижности электронов и дырок с кривизной энергетических зон. Эффективная масса. Температурные зависимости. Природа энергетических уровней в запрещенной зоне. Мелкие и глубокие уровни легирующих примесей. Глубокие уровни быстродиффундирующих примесей. Уровни, связанные с комплексами дефектов. Природа уровней Тамма. Природа уровней на границах раздела. Понятие о центрах рекомбинации и ловушках. Уровень Ферми. Статистика Максвелла-Больцмана. Электрическая проводимость кремния. Дрейфовая скорость. Сравнение с другими полупроводниками. Понятие о неравновесных процессах. Время релаксации.

##### 3. Классификация подсистем кристалла ионные и фанонные подсистемы

Условные подсистемы монокристаллического кремния. Ионная подсистема. Фононная подсистема. Электронная подсистема. Подсистема дефектов кристалла.

Примеры процессов, в ионной подсистеме. Возникновение областей пространственного заряда в объеме, у поверхности, границ раздела. Уравнение Пуассона. Потенциальные ямы, в том числе двумерные. Внутренние электрические поля. Упругие поля. Дрейф носителей заряда. Дрейф дефектов и примесных атомов.

Примеры процессов в электронной подсистеме. Электрическая проводимость. Оптическое поглощение. Зарядовые состояния примесей и дефектов.

##### 4. Электронные подсистемы кремния. Подсистемы дефектов кристалла.

Примеры процессов в фононной подсистеме. Фононные спектры. Рассеяние носителей заряда на акустических и оптических фононах. Теплопроводность, теплоемкость. Температура Дебая. Тепловое расширение.

Примеры процессов в подсистеме дефектов кристалла. Образование и концентрации термодинамически равновесных дефектов. Состояние подсистемы собственных дефектов при неизотермических термообработках, включая импульсный отжиг. Генерация неравновесных точечных дефектов при радиационном воздействии, при твердофазных реакциях на поверхности кристалла, при различных видах травления с компонентами радиационного и химического воздействия. Понятия об образовании дислокаций, кластеров, комплексов, примесных преципитатов. Определения и влияние на электрофизические параметры.

Примеры процессов, управляемых комбинацией подсистем. Атомарный массоперенос. Механизмы диффузии атомов в идеальной решетке кремния. Радиационно-стимулированная диффузия. Восходящая диффузия. Массоперенос в условиях диффузии и дрейфа в электрических и упругих полях. Диффузия и дрейф носителей заряда. Потоки в p-n переходе. Фото-ЭДС. Тепловая и автоэлектронная эмиссия.

## 5. Атомарная структура поверхности кремния

Атомарные ступени. Изломы на атомарных ступенях. Терассы. Энергия связи атомов в различных положениях на поверхности. Энергия сублимации. Энергия активации адсорбции и десорбции. Сингулярные, вицинальные и несингулярные плоскости в кристаллах кремния.

## 6. Атомарная физика химического травления поверхности кремния.

Прямое травление. Травление с образованием промежуточных фаз. Виды травления. Травление в газовой фазе. Движение атомарных ступеней при травлении. Жидкостное травление. Плазмохимическое и ионно-плазменное травление. Полирующее травление. Селективное травление. Методы металлографии.

## 7. Основы теории эпитаксиального роста на поверхности кремния.

Виды эпитаксии. CVD и MOS-гидридная эпитаксия. Основные этапы процесса эпитаксиального роста. Адсорбция, химические реакции, поверхностная миграция. Движение атомарных ступеней при эпитаксиальном росте. Основы термодинамики эпитаксии.

## 8. Классификация дефектов в кремнии

Точечные дефекты в кремнии – собственные дефекты и примесные атомы. Энергия образования и энергия миграции точечных дефектов.

Комплексы точечных дефектов и их энергетические уровни. А-центры, Е-центры. Термодоноры.

Кластеры точечных дефектов. Примесные преципитаты. Дефекты упаковки. Стержни. Дислокационные петли.

Линейные и винтовые дислокации. Линии скольжения. Дислокации несоответствия.

## 9. Основы радиационной физики кремния. Механизм образования и виды радиационных дефектов

Электронный (неупругий) механизм торможения ускоренных частиц в решетке кремния. Ядерный (упругий) механизм торможения. Распределение имплантированных атомов в решетке. Проецированный пробег. Страгглинг. Скошенность распределения.

Генерация пар Френкеля. Распределение радиационных вакансий и собственных атомов в междоузлиях.

Разупорядоченная область. Радиационный кластер. Механизмы аморфизации кремния при имплантации легких и тяжелых ионов.

## 10. Механизмы эволюции подсистемы дефектов. Часть 1

Ростовые дефекты в кремнии. Генерация собственных междоузлий при термическом окислении кремния. Рост окислительных дефектов упаковки. Квазихимические реакции в кремнии. Модель формирования термодоноров.

## 11. Механизмы эволюции подсистемы дефектов. Часть 2

Модель формирования пересыщенных вакансионных растворов в объеме кремния при твердофазных реакциях на его поверхности.

Модель формирования неравновесных вакансий при стимулированном отборе собственных атомов.

## 12. Физические основы методов легирования

Основы термодинамики твердых растворов. Ретроградный характер зависимости растворимости примесей от температуры. Легатуры. Параметры легирования. Легирование расплава при росте кристаллов. Легирование путем диффузии с поверхности. Легирование методом ионной имплантации.

## 13. Легирование методом ионная имплантация

Основные параметры процесса ионного легирования: тип иона, энергия, доза, температура, плотность тока. Профили распределения имплантированных атомов As, P, Sb, В. Имплантация в открытую поверхность и через маскирующие слои. «Конструирование» профиля примеси. Феноменология роли радиационных дефектов. Постимплантационные отжиги. Изотермический отжиг. Быстрый термический отжиг. Импульсный лазерный отжиг.

## 14. Диффузия из ограниченных и неограниченных поверхностных источников

Методы легирования кремния из силикатных стекол. Стадии легирования. Расчет типовых профилей легирования. Факторы влияния на эффективный коэффициент диффузии примеси.

## 15. Теоретические основы твердофазных реакций и сопровождающих их процессов

Феноменологическая теория. Этапы твердофазной реакции (ТФР). Диффузионная доставка реагентов в зону реакции. Рост пленок с ТФР на границе раздела с кремнием (на внутренней стороне растущей пленки). Рост пленок со стороны открытой поверхности. Основы термодинамики ТФР. Примеры ТФР – образование силицидов, рост нитридов и окислов кремния

## 16. Обобщенная модель генерации собственных точечных дефектов в процессе твердофазных реакций на поверхности кремния

Задача Ламе. Расчет дисбаланса молекулярных объемов размещения и объемов посадки на интерфейсе структуры подложка – пленка. Правило прогноза природы генерируемых собственных точечных дефектов (ТД). Оценка темпа генерации ТД. Оценка степени пересыщения раствора ТД в кремнии под растущими в процессе ТФР пленками. Эффекты в объеме кремния от пересыщенных растворов ТД.

## 17. Правило формирования фаз в системе с полифазной диаграммой состояния

Эмпирические правила определения первой фазы в системах с полифазной диаграммой состояния. Примеры в системе кремний-металл. Вывод правила последовательности образования фаз на основе обобщенной модели. Применения правила фаз к цепочке реакций при образовании силицидов металлов на поверхности кремния.

## 18. Образование пересыщенных вакансионных растворов в Si при росте силицидов на его поверхности

Расчет вакансионных пересыщений в кремнии при формировании силицидов на поверхности кремния. Эффекты вакансионного пересыщения. Размытие примесных профилей. Вытягивание примесей из подложки в эпитаксиальные слои.

## 19. Кинетика роста слоев SiO<sub>2</sub>. Модели генерации неравновесных междоузлий.

Кинетика роста термических окислов на поверхности кремния. Лимитирующие стадии. Кинетика роста на начальных и конечных этапах. Влияние паров воды на кинетику роста. Роль атомов хлора при хлоридном окислении.



Модели генерации собственных междоузлий при термическом окислении кремния. Сопоставление результатов модельных представлений, включая обобщенную модель. Центры нуклеации и уравнение роста окислительных дефектов упаковки.

## 20. Комбинированные механизмы диффузии основных примесных атомов в кремнии

Диффузия по узлам. Диффузия по междоузлиям. Роль собственных атомов и вакансий в диффузии легирующих примесей в кремнии. Эффективный коэффициент диффузии. Механизмы диффузии атомов B, As, P, Sb. Анализ выражения для коэффициента диффузии с точки зрения термодинамики и кинетики. Ускоренная и заторможенная диффузия в пересыщенных твердых растворах вакансий и собственных междоузлий

## 21. Радиационно-стимулированная диффузия в кремнии. Распад радиационных кластеров.

Уравнения диффузии с переменным коэффициентом диффузии, с генерационным и рекомбинационным членом. Диффузия в присутствии радиации. Диффузия, стимулированная по запасенным дефектам.

Распределение компонентов пар Френкеля в ионно-имплантированных слоях. Структура разупорядоченной области и радиационного кластера.

Кластер как источник и сток для собственных дефектов. Понятие кинетически равновесных концентраций собственных дефектов в реальных кристаллах.

## 22. Стимулированная диффузия в кремнии. Диффузия ускоренная по вакансионному механизму.

Диффузионные эффекты в кремнии, пересыщенном по вакансиям. Оценка степени вакансионного пересыщения кремния по опытам с диффузией.

## 23. Стимулированная диффузия в кремнии. Диффузия ускоренная по междоузельному механизму.

Диффузия примесных атомов в кремнии в процессе термического окисления его поверхности. Оценка степени междоузельного пересыщения кремния по опытам с диффузией.

## 24. Влияние встроенных электрических и механических полей на диффузионное перераспределение.

Особенности диффузионного перераспределения примесных атомов в условиях встроенных упругих напряжений и внутренних электрических полей. Уравнение массопереноса с диффузионным и дрейфовым слагаемым. Накопление примесей и точечных дефектов у границ раздела. Коэффициент сегрегации.

## 25. Диффузия в потоках собственных дефектов.

Примеры расчета профилей примеси в ионнолегированных слоях кремния.

## 26. Фотостимулированная диффузия в кремнии

Гипотезы фотостимулированной диффузии в кремнии. Связывающие и антисвязывающие орбитали. Роль света при импульсном отжиге. Фотостимулированная сублимация кремния и ее эффекты.

## 27. Ионная имплантация в сопровождении лучистой радиации

Особенности образования и накопления радиационных дефектов в кремнии при его имплантации с одновременным облучением УФ светом.

## 28. Диффузия примесей в условиях травящейся поверхности кремния

Диффузионное вытягивание Sb при инъекции вакансий с поверхности в объем кристалла. Эффект дальнего действия.

#### 29. Механизм геттерирования собственных дефектов и примесных атомов

Геттерирование быстродиффундирующих примесей в кремнии. Основные этапы геттерирования комплексов и кластеров собственных дефектов. Методы геттерирования и способы формирования геттеров на лицевой и обратной стороне кремниевой подложки.

#### 30. Распад собственных кластеров при импульсном отжиге кремния

Энергия связи частиц в кластере и ее зависимость от кривизны поверхности. Эмиссия и конденсация частиц из (на) кластере. Кинетически равновесные концентрации точечных дефектов. Эффект коалесценции. Критические зародыши. Уравнение распада и роста кластеров в изотермических отжигах. Распад кластеров при неизотермических отжигах. Образование распад твердых растворов при критических скоростях нагрева и охлаждения.

#### 31. Кремний на изоляторе и физические особенности переноса в них. Кремний-германиевые структуры.

Определения и примеры КНИ и Si-Ge структур. Особенности переноса носителей заряда. Вопросы радиационной стойкости.

#### 32. Потенциальные ямы и двумерный электронный газ

Примеры структур с двумерным электронным газом. Квантование энергетических уровней в двумерном канале переноса. Пространственное разделение канала переноса и центров рассеяния носителей заряда. Подвижность носителей в двумерном газе. Квантовые эффекты в двумерном газе. Эффект Шубникова – де Гааза.

#### 33. Кремний-сегнетоэлектрические гетероструктуры

Перспективы прикладного использования нового класса подложек кремниевой микроэлектроники для создания сенсорных MEMS и ячеек ферроэлектрической памяти.

#### 34. Обобщение материала курса

Проводится краткий обзор по теме всех лекционных занятий, даются примеры заданий для промежуточной аттестации, обсуждаются ответы на заданные по тематике курса вопросы.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий [Текст] : в 2 т. : [учеб. пособие для вузов] / [под общ. ред. Ю. Н. Коркишко] .— М. : БИНОМ. Лаб. знаний, 2010 .— (Нанотехнологии) .— Т. 1 : Физико-химические основы технологии микроэлектроники / [Ю. Д. Чистяков, Ю. П. Райнова]. - 2010. - 392 с.

2. Итальянцев А.Г. Генерация вакансий, стимулированная химическим травлением поверхности кристалла. Поверхность, 1991, в.10, с.122-127.
3. С.В. Булярский, В.И. Фистуль. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. Изд. Наука. Физматлит, Москва, 1997, с.352.
4. Вавилов В. С, Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучения на полупроводники. М., 1988. 192 с.

#### Дополнительная литература

1. Основы микроэлектроники [Текст] : [учеб.пособие для вузов] / И. П. Степаненко .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2004 .— 488с.
2. 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.
3. 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.

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

на лекционных и семинарских занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций и семинаров, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций и семинаров;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции или докладчику на семинаре.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|  |   |
|--|---|
| <b>по направлению:</b>   | Электроника и нанoeлектроника   |
| <b>профиль подготовки:</b>   | Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника<br>Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики<br>кафедра микро- и нанoeлектроники |
| <b>курс:</b>   | 1   |
| <b>квалификация:</b>   | магистр   |
| Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет |   |
| <b>Разработчик:</b>  | А.Г. Итальянцев, канд. физ.-мат. наук, профессор  |

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции  |
|---|--|
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
|   | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели                    |
|   | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты             |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика дефектов в технологии микро и нанoeлектроники» обучающийся должен:

### знать:

- теорию физических и физико-химических процессов в монокристаллическом кремнии.

### уметь:

- излагать материалы курса;
- использовать полученные знания при разработке принципов построения и конструкции прибора микроэлектроники и/или к-л технологического процесса.

### владеть:

- методами расчета параметров основных технологических операций: термического окисления, ионной имплантации, температуры и длительности отжига;
- методами теоретической оценки ожидаемых параметров элементов приборной структуры: поверхностного и удельного сопротивления легированных участков, концентрации и подвижности носителей заряда в легированных и индуцированных слоях, ширины ОПЗ, емкости p-n переходов и пр.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Механизмы эволюции подсистемы дефектов.
2. Основы теории эпитаксиального роста на поверхности кремния.
3. Физические основы в методах легирования.
4. Кремний в классе твердых тел.

### Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;

- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;

- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.