

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ**  
**УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**  
**(ТУСУР)**



УТВЕРЖДАЮ  
 Директор департамента образования

Документ подписан электронной подписью  
 Сертификат: 1с6сfa0a-52a6-4f49-aef0-5584d3fd4820  
 Владелец: Троян Павел Ефимович  
 Действителен: с 19.01.2016 по 16.09.2019

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Технология кремниевой наноэлектроники**

Уровень образования: **высшее образование - магистратура**  
 Направление подготовки / специальность: **11.04.04 Электроника и наноэлектроника**  
 Направленность (профиль) / специализация: **Твердотельная электроника**  
 Форма обучения: **очная**  
 Факультет: **ФЭТ, Факультет электронной техники**  
 Кафедра: **ФЭ, Кафедра физической электроники**  
 Курс: **1**  
 Семестр: **1, 2**  
 Учебный план набора 2018 года

Распределение рабочего времени

| № | Виды учебной деятельности    | 1 семестр | 2 семестр | Всего | Единицы |
|---|------------------------------|-----------|-----------|-------|---------|
| 1 | Лекции                       | 26        |           | 26    | часов   |
| 2 | Практические занятия         | 18        |           | 18    | часов   |
| 3 | Курсовая работа (проект)     |           | 16        | 16    | часов   |
| 4 | Всего аудиторных занятий     | 44        | 16        | 60    | часов   |
| 5 | Из них в интерактивной форме | 14        |           | 14    | часов   |
| 6 | Самостоятельная работа       | 64        | 92        | 156   | часов   |
| 7 | Всего (без экзамена)         | 108       | 108       | 216   | часов   |
| 8 | Подготовка и сдача экзамена  | 36        |           | 36    | часов   |
| 9 | Общая трудоемкость           | 144       | 108       | 252   | часов   |
|   |                              | 4.0       | 3.0       | 7.0   | З.Е.    |

Экзамен: 1 семестр

Курсовая работа (проект): 2 семестр

Томск 2018

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рабочая программа дисциплины составлена с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки (специальности) 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, утвержденного 30.10.2014 года, рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФЭ «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_.

Разработчик:

профессор кафедра ФЭ \_\_\_\_\_ Т. И. Данилина

Заведующий обеспечивающей каф.  
ФЭ

\_\_\_\_\_ П. Е. Троян

Рабочая программа дисциплины согласована с факультетом и выпускающей кафедрой:

Декан ФЭТ \_\_\_\_\_ А. И. Воронин

Заведующий выпускающей каф.  
ФЭ

\_\_\_\_\_ П. Е. Троян

Эксперты:

Доцент кафедры физической электроники (ФЭ)

\_\_\_\_\_ И. А. Чистоедова

Профессор кафедры физической электроники (ФЭ)

\_\_\_\_\_ С. В. Смирнов

## 1. Цели и задачи дисциплины

### 1.1. Цели дисциплины

сформировать представление о явлениях и процессах, на которых основаны технологии микро и наноэлектроники.

### 1.2. Задачи дисциплины

- Изучение технологии создания структур кремниевой наноэлектроники с учетом технологичности и экономической эффективности технологических процессов;
- Формирование способности к организации и проведению экспериментальных исследований изделий кремниевой наноэлектроники с применением современных средств и методов.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Технология кремниевой наноэлектроники» (Б1.В.ОД.1) относится к блоку 1 (вариативная часть).

Предшествующими дисциплинами, формирующими начальные знания, являются: Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники, Гетероструктурные полупроводниковые приборы, Научно-исследовательская работа (рассред.), Технология кремниевой наноэлектроники.

Последующими дисциплинами являются: Интегральные схемы СВЧ-диапазона, Испытание и контроль изделий электронной техники, Методы математического моделирования, Проектирование и технология электронной компонентной базы, Технология арсенид-галлиевой гетероструктурной электроники, Физические основы надежности изделий твердотельной электроники, Технология кремниевой наноэлектроники.

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- ПК-4 способностью к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов;
  - ПК-13 готовностью обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов;
- В результате изучения дисциплины обучающийся должен:
- **знать** - физические и химические принципы, лежащие в основе технических процессов кремниевой наноэлектроники; - базовые маршруты создания приборов кремниевой наноэлектроники; - принципы разработки технологических маршрутов наноразмерных интегральных схем;
  - **уметь** разрабатывать наноразмерные кремниевые интегральные схемы и технологические маршруты их изготовления
  - **владеть** - навыками разработки базовых технологических процессов; - умением разрабатывать технологическую документацию на процессы и маршруты

## 4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7.0 зачетных единицы и представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Трудоемкость дисциплины

| Виды учебной деятельности        | Всего часов | Семестры  |           |
|----------------------------------|-------------|-----------|-----------|
|                                  |             | 1 семестр | 2 семестр |
| Аудиторные занятия (всего)       | 60          | 44        | 16        |
| Лекции                           | 26          | 26        |           |
| Практические занятия             | 18          | 18        |           |
| Курсовая работа (проект)         | 16          |           | 16        |
| Из них в интерактивной форме     | 14          | 14        |           |
| Самостоятельная работа (всего)   | 156         | 64        | 92        |
| Подготовка к контрольным работам | 26          | 26        |           |

|   |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|
| Выполнение курсового проекта (работы)         | 92  |     | 92  |
| Проработка лекционного материала              | 6   | 6   |     |
| Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 32  | 32  |     |
| Всего (без экзамена)                          | 216 | 108 | 108 |
| Подготовка и сдача экзамена                   | 36  | 36  |     |
| Общая трудоемкость, ч                         | 252 | 144 | 108 |
| Зачетные Единицы                              | 7.0 | 4.0 | 3.0 |

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Разделы дисциплины и виды занятий приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Разделы дисциплины и виды занятий

| Названия разделов дисциплины  | Лек., ч | Прак. зан., ч | Сам. раб., ч | Курс. раб., ч | Всего часов (без экзамена) | Формируемые компетенции |
|---|---------|---------------|--------------|---------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 семестр   |         |               |              |               |                            |                         |
| 1 Особенности масштабирования МОП-транзисторов  | 2       | 0             | 8            | 0             | 10                         | ПК-13, ПК-4             |
| 2 Методы улучшения характеристик МОП- транзисторов  | 4       | 6             | 8            | 0             | 18                         | ПК-13, ПК-4             |
| 3 Субмикронная литография   | 4       | 4             | 8            | 0             | 16                         | ПК-13, ПК-4             |
| 4 Методы травления и осаждения в технологии кремниевой наноэлектроники                          | 4       | 0             | 8            | 0             | 12                         | ПК-13, ПК-4             |
| 5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем | 2       | 2             | 8            | 0             | 12                         | ПК-13, ПК-4             |
| 6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов                                      | 2       | 2             | 8            | 0             | 12                         | ПК-13, ПК-4             |
| 7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем                                 | 4       | 4             | 16           | 0             | 24                         | ПК-13, ПК-4             |
| 8 Технологические маршруты изготовления СБИС  | 4       | 0             | 0            | 0             | 4                          | ПК-13, ПК-4             |
| Итого за семестр  | 26      | 18            | 64           | 0             | 108                        |                         |
| 2 семестр   |         |               |              |               |                            |                         |
| 9 Получение заданий на курсовой проект  | 0       | 0             | 4            | 16            | 4                          | ПК-13, ПК-4             |
| 10 Анализ литературы по теме курсового проекта  | 0       | 0             | 16           |               | 16                         | ПК-13, ПК-4             |
| 11 Анализ актуальности, научной и практической значимости                                       | 0       | 0             | 10           |               | 10                         | ПК-13, ПК-4             |
| 12 Выполнение необходимых расчетов  | 0       | 0             | 20           |               | 20                         | ПК-13, ПК-4             |

|                                      |    |    |     |    |     |             |
|--------------------------------------|----|----|-----|----|-----|-------------|
| по проекту                           |    |    |     |    |     |             |
| 13 Анализ полученных результатов     | 0  | 0  | 15  |    | 15  | ПК-13, ПК-4 |
| 14 Выполнение графических материалов | 0  | 0  | 12  |    | 12  | ПК-13, ПК-4 |
| 15 Оформление курсового проекта      | 0  | 0  | 15  |    | 15  | ПК-13, ПК-4 |
| Итого за семестр                     | 0  | 0  | 92  | 16 | 108 |             |
| Итого                                | 26 | 18 | 156 | 16 | 216 |             |

### 5.2. Содержание разделов дисциплины (по лекциям)

Содержание разделов дисциплин (по лекциям) приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Содержание разделов дисциплин (по лекциям)

| Названия разделов   | Содержание разделов дисциплины по лекциям  | Трудоемкость,<br>ч | Формируемые компетенции |
|---|--|--------------------|-------------------------|
| 1 семестр   |  |                    |                         |
| 1 Особенности масштабирования МОП-транзисторов  | Особенности масштабирования МОП-транзисторов. Физические ограничения микроминиатюризации   | 2                  | ПК-13, ПК-4             |
|   | Итого  | 2                  |                         |
| 2 Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов   | Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. Перспективные структуры для дальнейшего повышения быстродействия МОП-транзисторов. КНИ-структуры. SIMOX, Smart Cut технологии. Основные проблемы при разработке наноразмерных МОП-транзисторов. Формирование супермелкозалегающих p-n-переходов | 4                  | ПК-13, ПК-4             |
|   | Итого  | 4                  |                         |
| 3 Субмикронная литография   | Проекционная литография, электронно-лучевая и ионная литография  | 4                  | ПК-13, ПК-4             |
|   | Итого  | 4                  |                         |
| 4 Методы травления и осаждения в технологии кремниевой наноэлектроники                          | Вакуумно-плазменные методы травления и осаждения   | 4                  | ПК-13, ПК-4             |
|   | Итого  | 4                  |                         |
| 5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем | Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем. Анализ процесса подзатворного окисления и свойств оксида кремния. Улучшение характеристик подзатворных окислов методом нитрирования. High-k диэлектрики   | 2                  | ПК-13, ПК-4             |
|   | Итого  | 2                  |                         |
| 6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов                                      | Формирование поликремниевых затворов для наноразмерных МОП-транзисторов. Легирование поликремния. Формирование затворов p+- и r+-типов осаждением легированных слоев поликрем-   | 2                  | ПК-13, ПК-4             |

|   |  |    |             |
|---|--|----|-------------|
|   | ния. Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП- транзисторов. Формирование затворов по самосовмещенной технологии  |    |             |
|   | Итого  | 2  |             |
| 7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем | Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем. Особенности медной разводки. Двойной дамасский процесс. Технологический маршрут. Электрохимическое осаждение меди | 4  | ПК-13, ПК-4 |
|   | Итого  | 4  |             |
| 8 Технологические маршруты изготовления СБИС                    | FEOL-процессы. BEOL-процессы. Планаризация микрорельефа. Внутриуровневая и межуровневая разводка   | 4  | ПК-13, ПК-4 |
|   | Итого  | 4  |             |
| Итого за семестр  |  | 26 |             |
| Итого   |  | 26 |             |

### 5.3. Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Разделы дисциплины и междисциплинарные связи

| Наименование дисциплин  | № разделов данной дисциплины, для которых необходимо изучение обеспечивающих и обеспечиваемых дисциплин |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|   | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| <b>Предшествующие дисциплины</b>                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 1 Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники | +   | + | + |   |   |   |   |   |   | +  | +  | +  |    |    |    |
| 2 Гетероструктурные полупроводниковые приборы                   |   | + |   | + | + | + | + | + | + | +  | +  |    | +  |    |    |
| 3 Научно-исследовательская работа (рассред.)                    | +   | + | + | + | + | + | + | + | + | +  | +  | +  | +  | +  | +  |
| 4 Технология кремниевой наноэлектроники                         | +   | + | + | + | + | + | + | + | + | +  | +  | +  | +  | +  | +  |
| <b>Последующие дисциплины</b>                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 1 Интегральные схемы СВЧ-диапазона                              | +   | + | + | + |   |   | + | + | + |    | +  | +  | +  | +  |    |
| 2 Испытание и контроль изделий электронной тех-                 |   | + | + | + |   |   |   | + | + |    |    |    |    |    |    |

|  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ники   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3 Методы математического моделирования                           |   | + | + | + |   | + | + | + |   |   |   | + | + |   |   |
| 4 Проектирование и технология электронной компонентной базы      | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 5 Технология арсенид-галлиевой гетероструктурной электроники     |   |   | + | + |   |   |   | + |   |   |   |   |   |   |   |
| 6 Физические основы надежности изделий твердотельной электроники |   | + | + | + | + |   | + |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7 Технология кремниевой нанoeлектроники                          |   |   |   |   |   |   |   |   | + | + | + | + | + | + | + |

#### 5.4. Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий представлено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

| Компетенции | Виды занятий |            |                  |           | Формы контроля   |
|-------------|--------------|------------|------------------|-----------|--|
|             | Лек.         | Прак. зан. | Курс. раб. (пр.) | Сам. раб. |  |
| ПК-4        | +            | +          | +                | +         | Контрольная работа, Экзамен, Защита отчета, Защита курсовых проектов (работ), Тест, Отчет по курсовой работе, Отчет по практическому занятию |
| ПК-13       | +            | +          | +                | +         | Контрольная работа, Экзамен, Защита отчета, Защита курсовых проектов (работ), Тест, Отчет по курсовой работе, Отчет по практическому занятию |

#### 6. Интерактивные методы и формы организации обучения

Технологии интерактивного обучения при разных формах занятий приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технологии интерактивного обучения при разных формах занятий

| Методы | Интерактивные практические занятия, ч | Интерактивные лекции, ч | Всего, ч |
|--------|---------------------------------------|-------------------------|----------|
|--------|---------------------------------------|-------------------------|----------|

| 1 семестр   |   |   |    |
|---|---|---|----|
| Презентации с использованием видеофильмов с обсуждением |   | 1 | 1  |
| Мозговой штурм  | 2 | 2 | 4  |
| Исследовательский метод                                 | 4 |   | 4  |
| Презентации с использованием слайдов с обсуждением      |   | 5 | 5  |
| Итого за семестр:                                       | 6 | 8 | 14 |
| 2 семестр   |   |   |    |
| Итого за семестр:                                       | 0 | 0 | 0  |
| Итого   | 6 | 8 | 14 |

### 7. Лабораторные работы

Не предусмотрено РУП.

### 8. Практические занятия (семинары)

Наименование практических занятий (семинаров) приведено в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Наименование практических занятий (семинаров)

| Названия разделов   | Наименование практических занятий (семинаров)   | Трудоемкость,<br>ч | Формируемые компетенции |
|---|---|--------------------|-------------------------|
| 1 семестр   |   |                    |                         |
| 2 Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов   | Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. КНИ - структуры. SIMAX технологии. Получение супермелкозалагающих p-n-переходов. | 6                  | ПК-13,<br>ПК-4          |
|   | Итого   | 6                  |                         |
| 3 Субмикронная литография   | Разрешающая способность проекционной, электронно-лучевой и ионной литографии  | 4                  | ПК-13,<br>ПК-4          |
|   | Итого   | 4                  |                         |
| 5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем | Атомно-слоевое осаждение high-k диэлектриков  | 2                  | ПК-13,<br>ПК-4          |
|   | Итого   | 2                  |                         |
| 6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов                                      | Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов  | 2                  | ПК-13,<br>ПК-4          |
|   | Итого   | 2                  |                         |
| 7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем                                 | Разработка технологических маршрутов наноразмерных КМОП ИС  | 4                  | ПК-13,<br>ПК-4          |
|   | Итого   | 4                  |                         |
| Итого за семестр  |   | 18                 |                         |



|       |    |  |
|-------|----|--|
| Итого | 18 |  |
|-------|----|--|

### 9. Самостоятельная работа

Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции представлены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции

| Названия разделов   | Виды самостоятельной работы                   | Трудоемкость,<br>ч | Формируемые компетенции | Формы контроля  |
|---|---|--------------------|-------------------------|---|
| 1 семестр   |   |                    |                         |   |
| 1 Особенности масштабирования МОП-транзисторов  | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 2                  | ПК-13, ПК-4             | Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Подготовка к контрольным работам              | 6                  |                         |   |
|   | Итого   | 8                  |                         |   |
| 2 Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов   | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 4                  | ПК-13, ПК-4             | Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Подготовка к контрольным работам              | 4                  |                         |   |
|   | Итого   | 8                  |                         |   |
| 3 Субмикронная литография   | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 4                  | ПК-13, ПК-4             | Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Подготовка к контрольным работам              | 4                  |                         |   |
|   | Итого   | 8                  |                         |   |
| 4 Методы травления и осаждения в технологии кремниевой нанозлектроники                          | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 2                  | ПК-13, ПК-4             | Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Подготовка к контрольным работам              | 6                  |                         |   |
|   | Итого   | 8                  |                         |   |
| 5 Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 6                  | ПК-13, ПК-4             | Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Подготовка к контрольным работам              | 2                  |                         |   |
|   | Итого   | 8                  |                         |   |
| 6 Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов                                      | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 4                  | ПК-13, ПК-4             | Контрольная работа, Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Подготовка к контрольным работам              | 4                  |                         |   |

|   |   |     |             |   |
|---|---|-----|-------------|---|
|   | ным работам                                   |     |             |   |
|   | Итого   | 8   |             |   |
| 7 Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 10  | ПК-13, ПК-4 | Отчет по практическому занятию, Тест, Экзамен |
|   | Проработка лекционного материала              | 6   |             |   |
|   | Итого   | 16  |             |   |
| Итого за семестр  |   | 64  |             |   |
|   | Подготовка и сдача экзамена                   | 36  |             | Экзамен                                       |
| <b>2 семестр</b>  |   |     |             |   |
| 9 Получение заданий на курсовой проект                          | Выполнение курсового проекта (работы)         | 4   | ПК-13, ПК-4 | Отчет по курсовой работе, Тест                |
|   | Итого   | 4   |             |   |
| 10 Анализ литературы по теме курсового проекта                  | Выполнение курсового проекта (работы)         | 16  | ПК-13, ПК-4 | Отчет по курсовой работе, Тест                |
|   | Итого   | 16  |             |   |
| 11 Анализ актуальности, научной и практической значимости       | Выполнение курсового проекта (работы)         | 10  | ПК-13, ПК-4 | Отчет по курсовой работе, Тест                |
|   | Итого   | 10  |             |   |
| 12 Выполнение необходимых расчетов по проекту                   | Выполнение курсового проекта (работы)         | 20  | ПК-13, ПК-4 | Отчет по курсовой работе, Тест                |
|   | Итого   | 20  |             |   |
| 13 Анализ полученных результатов                                | Выполнение курсового проекта (работы)         | 15  | ПК-13, ПК-4 | Отчет по курсовой работе, Тест                |
|   | Итого   | 15  |             |   |
| 14 Выполнение графических материалов                            | Выполнение курсового проекта (работы)         | 12  | ПК-13, ПК-4 | Отчет по курсовой работе, Тест                |
|   | Итого   | 12  |             |   |
| 15 Оформление курсового проекта                                 | Выполнение курсового проекта (работы)         | 15  | ПК-13, ПК-4 | Защита курсовых проектов (работ), Тест        |
|   | Итого   | 15  |             |   |
| Итого за семестр  |   | 92  |             |   |
| Итого   |   | 192 |             |   |

### **10. Курсовая работа (проект)**

Трудоемкость аудиторных занятий и формируемые компетенции в рамках выполнения курсовой работы (проекта) представлены таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Трудоемкость аудиторных занятий и формируемые компетенции в рамках выполнения курсовой работы (проекта)

| Наименование аудиторных занятий   | Трудоемкость,<br>ч | Формируемые<br>компетенции |
|---|--------------------|----------------------------|
| 2 семестр   |                    |                            |
| Методы улучшения характеристик МОП- транзисторов;   | 4                  | ПК-13, ПК-4                |
| Субмикронная литография   | 2                  |                            |
| Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП интегральных микросхем | 4                  |                            |
| Формирование затворов для наноразмерных МОП-транзисторов                                      | 2                  |                            |
| Особенности формирования наноразмерных КМОП интегральных схем                                 | 4                  |                            |
| Итого за семестр  | 16                 |                            |

### 10.1. Темы курсовых работ (проектов)

Примерная тематика курсовых работ (проектов):

- 1. Ионное легирование стенок и дна тренчей для создания конденсаторов в ИС
- 2. Получение мелкозалегающих p-n переходов с помощью ионов бора различных масс
- 3. Синтез структур кремний на изоляторе: SIMOX
- 4. Технология КМОП-схемы с легированными областями
- 5. Синтез структур кремний на изоляторе: Smart Cut
- 6. Сканирующая ионная литография
- 7. Анизотропное глубокое травление кремния с большим аспектным числом
- 8. Формирование силицидных пленок путем ионной имплантации
- 9. Инженерия затворов в технологии МОП-СБИС с субмикронными размерами
- 10. Разработка технологии изготовления КМОП-СБИС с ретроградным распределением примеси в канале
- 11. Формирование СБИС на основе гетероструктур SiGe с помощью ионной имплантации
- 12. Формирование супермелкозалегающих p-n переходов с помощью наклонной ионной имплантации в технологии МОП-СБИС
- 13. Применение ионной имплантации в технологии МОП-СБИС для управления пороговым напряжением
- 14. Проблемы металлизации в технологии СБИС
- 15. Инженерия затвора в технологии МОП-СБИС с субмикронными размерами
- 16. Разработка технологии МОП-СБИС с LDD областями и самосовмещением
- 17. Формирование гетеробиполярного транзистора с базой p-SiGe с помощью ионной имплантации
- 18. Формирование элементов наноэлектроники с субмикронными размерами с помощью пучковых технологий

### 11. Рейтинговая система для оценки успеваемости обучающихся

#### 11.1. Балльные оценки для элементов контроля

Таблица 11.1 – Балльные оценки для элементов контроля

| Элементы учебной | Максимальный | Максимальный | Максимальный | Всего за |
|------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
|------------------|--------------|--------------|--------------|----------|

| деятельности                     | балл на 1-ую КТ с начала семестра | балл за период между 1КТ и 2КТ | балл за период между 2КТ и на конец семестра | семестр |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|---------|
| <b>1 семестр</b>                 |                                   |                                |  |         |
| Контрольная работа               | 6                                 | 6                              |  | 12      |
| Отчет по практическому занятию   | 20                                | 10                             | 10   | 40      |
| Тест                             | 6                                 | 6                              | 6  | 18      |
| Итого максимум за период         | 32                                | 22                             | 16   | 70      |
| Экзамен                          |                                   |                                |  | 30      |
| Нарастающим итогом               | 32                                | 54                             | 70   | 100     |
| <b>2 семестр</b>                 |                                   |                                |  |         |
| Защита курсовых проектов (работ) |                                   |                                | 40   | 40      |
| Отчет по курсовой работе         | 20                                | 20                             | 20   | 60      |
| Итого максимум за период         | 20                                | 20                             | 60   | 100     |
| Нарастающим итогом               | 20                                | 40                             | 100  | 100     |

### 11.2. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Пересчет баллов в оценки за контрольные точки представлен в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

| Баллы на дату контрольной точки                       | Оценка |
|---|--------|
| ≥ 90% от максимальной суммы баллов на дату КТ         | 5      |
| От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ | 4      |
| От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ | 3      |
| < 60% от максимальной суммы баллов на дату КТ         | 2      |

### 11.3. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку представлен в таблице 11.3.

Таблица 11.3 – Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

| Оценка (ГОС)                         | Итоговая сумма баллов, учитывает успешно сданный экзамен | Оценка (ECTS)           |
|--------------------------------------|--|-------------------------|
| 5 (отлично) (зачтено)                | 90 - 100   | A (отлично)             |
| 4 (хорошо) (зачтено)                 | 85 - 89  | B (очень хорошо)        |
|                                      | 75 - 84  | C (хорошо)              |
|                                      | 70 - 74  | D (удовлетворительно)   |
| 65 - 69                              |  |                         |
| 3 (удовлетворительно) (зачтено)      | 60 - 64  | E (посредственно)       |
|                                      | Ниже 60 баллов   | F (неудовлетворительно) |
| 2 (неудовлетворительно) (не зачтено) |  |                         |

## **12. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **12.1. Основная литература**

1. Технология кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие / Анищенко Е. В., Данилина Т. И., Кагадей В. А. - 2011. 263 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/552>, дата обращения: 05.06.2018.

### **12.2. Дополнительная литература**

1. Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.]; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск: ТУСУР, 2005. - 316 с. (103.) (наличие в библиотеке ТУСУР - 103 экз.)

2. Курносоев А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высшая школа, 1986. - 367 с. (20) (наличие в библиотеке ТУСУР - 20 экз.)

3. Данилина Т.И., Смирнов С.В. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС. Учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2000. - 140 с. (52) (наличие в библиотеке ТУСУР - 52 экз.)

4. Технология кремниевой наноэлектроники : учеб. пособие / Т.И. Данилина, В.А. Кагадей, Е.В. Анищенко. - 2-е изд. - Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. - 319 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 37 экз.)

### **12.3. Учебно-методические пособия**

#### **12.3.1. Обязательные учебно-методические пособия**

1. Технология кремниевой наноэлектроники: Методические указания по выполнению курсового проекта / Данилина Т. И. - 2017. 45 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6844>, дата обращения: 05.06.2018.

2. Технология кремниевой наноэлектроники: Практико-ориентированное учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / Данилина Т. И. - 2017. 61 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6845>, дата обращения: 05.06.2018.

#### **12.3.2. Учебно-методические пособия для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов**

Учебно-методические материалы для самостоятельной и аудиторной работы обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предоставляются в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

##### **Для лиц с нарушениями зрения:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме увеличенным шрифтом.

##### **Для лиц с нарушениями слуха:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

##### **Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

### **12.4. Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

1. eLIBRARY.RU - [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

## **13. Материально-техническое обеспечение дисциплины и требуемое программное обеспечение**

### **13.1. Общие требования к материально-техническому и программному обеспечению дисциплины**

#### **13.1.1. Материально-техническое и программное обеспечение для лекционных занятий**

Для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации используется учебная аудитория с количеством по-

садочных мест не менее 22-24, оборудованная доской и стандартной учебной мебелью. Имеются демонстрационное оборудование и учебно-наглядные пособия, обеспечивающие тематические иллюстрации по лекционным разделам дисциплины.

### **13.1.2. Материально-техническое и программное обеспечение для практических занятий**

Учебная аудитория

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 117 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Установка совмещения и экспонирования ЩА-310;
- Установка для нанесения фоторезиста;
- Электронный микроскоп УЭМВ-100К;
- Дистиллятор воды;
- Лабораторное оборудование и приборы: микроскоп МБС-9, микроскоп стерео МС-1, микроинтерферометр МИИ-4, химическая посуда, реактивы;
- Учебная доска;
- Проектор;
- Ноутбук;
- Экран для проектора;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:

- Windows XP

### **13.1.3. Материально-техническое и программное обеспечение для самостоятельной работы**

Для самостоятельной работы используются учебные аудитории (компьютерные классы), расположенные по адресам:

- 634050, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 40, 233 ауд.;
- 634045, Томская область, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146, 201 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 47, 126 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 207 ауд.

Состав оборудования:

- учебная мебель;
- компьютеры класса не ниже ПЭВМ INTEL Celeron D336 2.8ГГц. - 5 шт.;
- компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.

Перечень программного обеспечения:

- Microsoft Windows;
- OpenOffice;
- Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
- 7-Zip;
- Google Chrome.

### **13.2. Материально-техническое обеспечение дисциплины для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов**

Освоение дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья и инвалидами осуществляется с использованием средств обучения общего и специального назначения.

При занятиях с обучающимися с нарушениями слуха предусмотрено использование звуко-

усиливающей аппаратуры, мультимедийных средств и других технических средств приема/передачи учебной информации в доступных формах, мобильной системы преподавания для обучающихся с инвалидностью, портативной индукционной системы. Учебная аудитория, в которой занимаются обучающиеся с нарушением слуха, оборудована компьютерной техникой, аудиотехникой, видеотехникой, электронной доской, мультимедийной системой.

При занятиях с обучающимися с нарушениями зрения предусмотрено использование в лекционных и учебных аудиториях возможности просмотра удаленных объектов (например, текста на доске или слайда на экране) при помощи видеоувеличителей для комфортного просмотра.

При занятиях с обучающимися с нарушениями опорно-двигательного аппарата используются альтернативные устройства ввода информации и другие технические средства приема/передачи учебной информации в доступных формах, мобильной системы обучения для людей с инвалидностью.

#### **14. Оценочные материалы и методические рекомендации по организации изучения дисциплины**

##### **14.1. Содержание оценочных материалов и методические рекомендации**

Для оценки степени сформированности и уровня освоения закрепленных за дисциплиной компетенций используются оценочные материалы в составе:

###### **14.1.1. Тестовые задания**

1. Почему разрешающая способность электронно-лучевой литографии выше, чем оптической фотолитографии?

- а) энергия электронов меньше, чем энергия фотонов;
- б) длина волны излучения для ускоренных электронов меньше, чем длина волны УФ-излучения;
- в) длина волны для ускоренных электронов больше, чем длина волны УФ-излучения.
- г) энергия электронов больше, чем энергия фотонов.

2. Чем обусловлен размерный эффект близости в ЭЛЛ?

- а) уширением электронного пучка за счет рассеяния электронов;
  - б) уменьшением диаметра электронного луча;
  - в) увеличением расстояния между линиями.
  - г) увеличением диаметра электронного пучка
3. Выбрать расстояние между линиями шириной  $b_{\min}$  при экспонировании резиста электронным лучом диаметром  $d_{\min}$ : а – расстояние между линиями.

- а)  $a=(b_{\min}-d_{\min})$ ;
- б)  $a>(b_{\min}-d_{\min})$ ;
- в)  $a=1/2 (b_{\min}-d_{\min})$ .
- г)  $a = 2 (b_{\min}-d_{\min})$

4. Выбрать рекомендуемый диапазон толщины резиста в ЭЛЛ, исходя из технико-экономических соображений...

- а) (5 – 20) нм;
- б) (50 – 100) нм;
- в) более 100 нм.
- г) менее 5 нм.

5. Указать причину, по которой для ионной имплантации бора используют тяжелые молекулы, содержащие бор...

- а) увеличение энергии ионов бора;
- б) увеличение  $x_{p-n}$ ;
- в) уменьшение  $x_{p-n}$ .
- г) уменьшение энергии ионов бора.

6. Как надо изменить параметры ионной имплантации при получении заданного  $x_{p-n}$ , если заменить моноион бора на кластерный ион, состоящий из 50 атомов бора?

- а) дозу уменьшить в 50 раз, а энергию кластера увеличить в 50 раз;
- б) дозу увеличить в 50 раз, а энергию кластера уменьшить в 50 раз;
- в) энергию и дозу уменьшить в 50 раз.

г) энергию и дозу увеличить в 50 раз.

7. Определить дозу ионов кислорода при формировании захороненного слоя  $\text{SiO}_2$  по SIMOX-технологии при атомной плотности кремния  $N_0$  и при проецированном пробеге ионов кислорода  $R_p$ .

- а)  $Q=2 \cdot N_0 \cdot R_p$ ;
- б)  $Q=N_0 \cdot R_p$ ;
- в)  $Q=1/2 \cdot N_0 \cdot R_p$ .
- г)  $Q=4 N_0 R_p$

8. Толщина отсеченного слоя кремния в КНИ структурах, сформированных по SIMOX-технологии, определяется концентрацией кислорода в Si, которая должна быть...

- а) равна или больше  $N_0$ ;
- б) равна или меньше  $N_0$ ;
- в) равна  $N_0$ .
- г) равна  $2N_0$

9. Какую концентрацию германия надо обеспечить при формировании слоя  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  в МОП-транзисторах с целью создания напряженного кремния для канала? Подложка – кремний с атомной плотностью  $N_0$ .

- а) равную  $0,7 \cdot N_0$ ;
- б) равную  $0,3 \cdot N_0$ ;
- в) равную  $0,3/0,7 \cdot N_0$ .
- г) равную  $0,7/0,3$

10. Время экспонирования одного элемента разложения в ЭЛЛ будет меньше, если...

- а) выбрать резист с более высокой чувствительностью  $S_0$ ;
- б) сфокусировать луч до меньшего размера  $d_{\min}$ ;
- в) уменьшить яркость источника электронов  $B$ .
- г) выбрать резист с более низкой чувствительностью

11. Как связана минимальная ширина экспонируемой линии  $b_{\min}$  с диаметром сфокусированного электронного луча  $d_{\min}$  с учетом бокового рассеяния электронов  $\Delta y$ ?

- а)  $b_{\min}=d_{\min}+\Delta y$ ;
- б)  $b_{\min}=d_{\min}+2\Delta y$ ;
- в)  $b_{\min}=d_{\min}+1/2 \Delta y$ .
- г)  $b_{\min}=d_{\min}+4\Delta y$ .

12. Как следует выбирать параметры для установки ЭЛЛ  $I_0$ ,  $U_0$ , если требуется обеспечить высокую разрешающую способность?

- а) уменьшать  $I_0$ , увеличивать  $U_0$ .
- б) увеличивать  $I_0$ , уменьшать  $U_0$ .
- в) увеличивать  $I_0$ , увеличивать  $U_0$ .
- г) увеличить  $I_0$ , не меняя  $U_0$ .

13. Чему будет равна глубина хр-п для перехода база-коллектор, если база сформирована ионной имплантацией бора с проецированным пробегом 37,5 нм и максимальной концентрацией в базе  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ? Коллектор сформирован эпитаксией с концентрацией  $N_k=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

- а) 35 нм;
- б) 50 нм;
- в) 95 нм.
- г) 115 нм.

14. Ионно-лучевое травление является результатом...

- а) физического распыления ионами инертных газов в высоком вакууме;
- б) физического распыления и химической реакции;
- в) травлением за счет радикалов.
- г) физического распыления ионами инертных газов в плазме.

15. ПХТ является результатом...

- а) физического распыления в условиях газового разряда ионами инертных газов;
- б) травления ХАЧ в условиях воздействия плазмы;
- в) физического распыления ионами инертных газов в условиях высокого вакуума.



г) физического распыления ионами инертного газа в плазме.

16. Степень анизотропии травления рабочего слоя определяется следующим образом...

а)  $V_B/V_\Gamma$  ;

б)  $V_\Gamma/V_B$  ;

в)  $V_{пл}/V_{подл}$  .

где  $V_B$ ,  $V_\Gamma$  – соответственно скорости травления рабочего слоя в вертикальном и горизонтальном направлениях;  $V_{пл}$ ,  $V_{подл}$  – соответственно скорости травления пленки и подложки.

г)  $V_{подл}/V_{пл}$ .

17. Чему равна селективность травления, если скорость травления маски в два раза больше скорости травления подложки?

а) 0,5;

б) 1;

в) 1,5.

г) 2

18. Какой получится размер линии в пленке толщиной 0,5 мкм в результате анизотропного травления с  $A=10$ , если размер маски 0,5 мкм?

а) 0,5;

б) 0,4;

в) 0,6.

г) 0,7

19. Для обеспечения высокой разрешающей способности ионно-лучевого травления необходима маски:

а) с высоким коэффициентом распыления материала маски;

б) с низким коэффициентом распыления материала маски;

в) коэффициент распыления не влияет

г) с переменным коэффициентом распыления

20. Для обеспечения высокой разрешающей способности боковые стенки маски должны быть ...

а) вертикальными;

б) горизонтальными;

в) под углом  $45^\circ$ .

г) под углом 60 градусов.

#### 14.1.2. Экзаменационные вопросы

Вариант 1

1. Рассмотреть возможность уменьшения глубины залегания p-n перехода за счет аморфизации приповерхностных слоев кремния.

2. Сравнение электронной и ионной литографии.

Вариант 2

1. Объяснить появление эффекта близости. Исследовать влияние толщины резиста на получение малых экспонируемых областей при их близком взаимном расположении.

2. Оценить глубину залегания p-n перехода при легировании моноионами бора и кластерными ионами

Вариант 3

1. Применение ионного легирования для самосовмещения затвора с областями стока-истока в МДП-транзисторах.

2. Формирование подзатворных диэлектриков в технологии наноразмерных КМОП-интегральных схем.

Вариант 4

1. Субмикронная фотолитография.

2. Формирование силицидных пленок с помощью ионной имплантации.

Вариант 5

1. Технология электронно-лучевой литографии. Время экспонирования.

2. Транзисторы с каналом на основе напряженного кремния и SiGe

#### Вариант 6

1. Рассмотреть возможность управления профилем распределения примеси и глубиной залегания хр-п при ионном легировании.
2. Технология анизотропного травления для формирования «тренчей».

#### Вариант 7

1. Рассмотреть боковое рассеяние ионов и его влияние на распределение примеси при ионной имплантации через окно заданного размера. Сформулировать условие, когда боковое рассеяние следует учитывать.
2. Оценить требуемую анизотропию травления пленки для реактивного ионно-лучевого травления с точностью 20 % при  $vm=1$  мкм.

#### Вариант 8

1. Рассмотреть возможность формирования структуры с однородным распределением примеси для элементов памяти на основе аморфного кремния.
2. Анизотропия и селективность травления при ионно-лучевом травлении глубоких профилей.

#### Вариант 9

1. Атомно-слоевое осаждение пленок.
2. Проблемы межуровневой изоляции в технологии СБИС.

#### Вариант 10

1. Рассмотреть формирование LDD областей в технологии МОП СБИС и предусмотреть одновременное самосовмещение областей истока - стока с затвором.
2. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.

#### Вариант 11

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность ЭЛЛ и ионно-лучевой литографии.
2. Плазмохимическое травление (ПХТ). Достоинства и недостатки по сравнению с ионно-лучевым травлением.

#### Вариант 12

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ ( $I_0$ ,  $U_0$ ) для обеспечения высокой разрешающей способности.
2. Рассмотреть возможность применения ионной имплантации для формирования каналов МОП-транзисторов с ретроградным распределением примеси

#### Вариант 13

1. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей истока-стока с концентрацией более  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> и глубиной хр-п менее 10 нм.
2. Как следует выбирать ток пучка электронов  $I_0$  при ЭЛЛ?

#### Вариант 14

1. Сравнить методы экспонирования резиста (проекционная ФЛ и электронно-лучевая литография) и рекомендовать наиболее подходящий метод для получения размеров менее 65 нм с учетом технико-экономических соображений.
2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации в SIMOX-технологии для получения заданной толщины отсеченного слоя Si и SiO<sub>2</sub>.

#### Вариант 15

1. Представить технологию изготовления биполярного транзистора с помощью ионной имплантации для формирования базы и эмиттера. Коллектор - эпитаксиальный слой. Представить распределение примеси для n-p-n транзистора.
2. На какую глубину dП можно протравить подложку через маску толщиной dМ при ионном травлении.

### 14.1.3. Темы контрольных работ

#### Вариант 1

1. Почему разрешающая способность электронной литографии выше, чем оптической?
2. Объяснить, зачем при ионной имплантации ионов бора используют тяжелые молекулы, содержащие бор.

#### Вариант 2

1. Как получается рисунок при последовательной ЭЛЛ?

2. Представить распределение бора по глубине при ионной имплантации моноионов бора и кластерных ионов при одинаковом ускоряющем напряжении и дозе облучения на установке. Кластер состоит из 50 атомов.

Вариант 3

1. Рассмотреть взаимосвязь между минимальной шириной экспонируемой линии и диаметром сфокусированного луча.

2. Рассчитать параметры ионной имплантации для молекулы  $B_{10}H_{14}$ , если энергия моноионов бора составляет 0,1 кэВ, а доза облучения –  $5 \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>.

Вариант 4

1. Объяснить влияние энергии электронов на разрешающую способность ЭЛЛ.

2. Как изменится хр-п, если для легирования бором вместо моноиона бора взять молекулярный ион  $B_{18}H_{22}$ , при прочих равных условиях.

Вариант 5

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ ( $I_0$ ,  $U_0$ ), если требуется обеспечить требуемую разрешающую способность?

2. Как надо изменить параметры ионной имплантации при получении заданного хр-п,  $N_{max}$ ,  $N_{исх}$ , если заменить моноионы бора на молекулярный ион  $B_{18}H_{22}$ .

Вариант 6

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность проекционной и ЭЛЛ.

2. Объяснить, зачем делается предварительная аморфизация приповерхностного слоя кремния при формировании супермелкозалегающих р-п переходов.

Вариант 7

1. Объяснить, к чему приведет увеличение тока в пучке  $I_0$  при ЭЛЛ?

2. Объяснить, какое необходимо получить распределение кислорода при формировании захороненного слоя  $SiO_2$  по SIMOX-технологии.

Вариант 8

1. Объяснить, из каких соображений следует выбирать материал и конструкцию катода для установки ЭЛЛ?

2. Объяснить, как рассчитать дозу кислорода, которая потребуется для формирования стехиометрического слоя  $SiO_2$  по SIMOX-технологии.

Вариант 9

1. Сравнить методы экспонирования резиста (проекционная ФЛ и электронно-лучевая литография) и рекомендовать наиболее подходящий метод для получения размеров менее 20 нм с учетом технико-экономических соображений.

2. Представить распределение примеси кислорода по глубине в SIMOX-технологии для получения заданной толщины отсеченного слоя Si и  $SiO_2$

Вариант 10

1. Из каких соображений следует выбирать ток пучка  $I_0$  при ЭЛЛ?

2. Объяснить, при решении каких задач используется ионная имплантация в кремний через слой  $SiO_2$  и представить распределение примеси для двух толщин  $SiO_2$ .

Вариант 11

1. Каким образом выбрать установку ЭЛЛ для получения заданного размера  $b_{min}$ ?

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования низколегированных областей истока-стока МОП-транзисторов (LDD-области).

Вариант 12

1. Объяснить влияние толщины резиста на разрешающую способность электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии.

2. Обосновать выбор технологии ионной имплантации для формирования каналов с ретроградным распределением примеси. Представить требуемое распределение примеси в канале.

Вариант 13

1. Как следует выбирать параметры установки ЭЛЛ ( $I_0$ ,  $U_0$ ) для обеспечения высокой разрешающей способности?

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования областей истока-стока с концентрацией более  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> и глубиной хр-п менее 10 нм. Предложить практическую реализацию.

Вариант 14

1. Как изменится диаметр электронного пучка на подложке, если необходимо увеличить ток с  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  А?

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования металлического затвора из силицида металла CoSi<sub>2</sub>.

Вариант 15

1. Объяснить, при каких условиях необходимо в ЭЛЛ учитывать явления дифракции.

2. Обосновать выбор параметров ионной имплантации для формирования в канале МОП-транзистора слоя Si<sub>0,7</sub> Ge<sub>0,3</sub> с целью создания напряженного кремния для канала.

Вариант 16

1. Объяснить, какую выбрать энергию электронов 100 кэВ или 10 кэВ с целью уменьшения эффекта рассеяния электронов в слое резиста.

2. Объяснить необходимость формирования низколегированных LDD-областей в МОП-транзисторах с помощью ионной имплантации.

#### 14.1.4. Вопросы для подготовки к практическим занятиям, семинарам

Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов. КНИ - структуры. SIMAX технологии. Получение супермелкозалагающих р-п-переходов.

Разрешающая способность проекционной, электронно-лучевой и ионной литографии

Атомно-слоевое осаждение high-k диэлектриков

Силицидная технология формирования затворов наноразмерных МОП-транзисторов

Разработка технологических маршрутов наноразмерных КМОП ИС

#### 14.1.5. Темы курсовых проектов (работ)

1. Ионное легирование стенок и дна тренчей для создания конденсаторов в ИС

2. Получение мелкозалагающих р-п переходов с помощью ионов бора различных масс

3. Синтез структур кремний на изоляторе: SIMOX

4. Технология КМОП-схемы с легированными областями

5. Синтез структур кремний на изоляторе: Smart Cut

6. Сканирующая ионная литография

7. Анизотропное глубокое травление кремния с большим аспектным числом

8. Формирование силицидных пленок путем ионной имплантации

9. Инженерия затворов в технологии МОП-СБИС с субмикронными размерами

10. Разработка технологии изготовления КМОП-СБИС с ретроградным распределением примеси в канале

#### 14.2. Требования к оценочным материалам для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предусмотрены дополнительные оценочные материалы, перечень которых указан в таблице 14.

Таблица 14 – Дополнительные материалы оценивания для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

| Категории обучающихся | Виды дополнительных оценочных материалов                                       | Формы контроля и оценки результатов обучения    |
|-----------------------|--|---|
| С нарушениями слуха   | Тесты, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету, контрольные работы | Преимущественно письменная проверка             |
| С нарушениями зрения  | Собеседование по вопросам к зачету, опрос по терминам                          | Преимущественно устная проверка (индивидуально) |
| С нарушениями опорно- | Решение дистанционных тестов, контрольные работы, письменные                   | Преимущественно дистанционными методами         |

|   |   |   |
|---|---|---|
| двигательного аппарата                        | самостоятельные работы, вопросы к зачету  |   |
| С ограничениями по общемедицинским показаниям | Тесты, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету, контрольные работы, устные ответы | Преимущественно проверка методами исходя из состояния обучающегося на момент проверки |

### **14.3. Методические рекомендации по оценочным материалам для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов**

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предусматривается доступная форма предоставления заданий оценочных средств, а именно:

- в печатной форме;
- в печатной форме с увеличенным шрифтом;
- в форме электронного документа;
- методом чтения ассистентом задания вслух;
- предоставление задания с использованием сурдоперевода.

Лицам с ограниченными возможностями здоровья и инвалидам увеличивается время на подготовку ответов на контрольные вопросы. Для таких обучающихся предусматривается доступная форма предоставления ответов на задания, а именно:

- письменно на бумаге;
- набор ответов на компьютере;
- набор ответов с использованием услуг ассистента;
- представление ответов устно.

Процедура оценивания результатов обучения лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

#### **Для лиц с нарушениями зрения:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме увеличенным шрифтом.

#### **Для лиц с нарушениями слуха:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

#### **Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

При необходимости для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов процедура оценивания результатов обучения может проводиться в несколько этапов.