

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники

Уровень высшего образования  
Магистратура

---

Направление подготовки / специальность  
11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника

---

Направленность образовательной программы  
Твердотельная электроника и нанoeлектроника

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.06 Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники относится к обязательной части образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
УК-1: Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1: Знает методы системного и критического анализа; методики разработки стратегии действий для выявления и решения проблемной ситуации УК-1.2: Уменет применять методы системного подхода и критического анализа проблемных ситуаций; разрабатывать стратегию действий, принимать конкретные решения для ее реализации УК-1.3: Владение методологией системного и критического анализа проблемных ситуаций; - методиками постановки цели, определения способов ее достижения, разработки стратегий действий	УК-1.1: Знание аналитических методов и стратегических подходов применяемых к решению проблем современной электроники и нанoeлектроники.  УК-1.2: Умение планировать конкретные действия по устранению проблем, возникающих в ходе разработки и производства компонент электронной базы.  УК-1.3: Владение аналитическими и стратегическими подходами к устранению проблем, возникающих в ходе разработки и производства компонент электронной базы.	Допуск к лабораторной работе	Экзамен: Контрольные вопросы
ОПК-2: Способен применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы	ОПК-2.1: Знает методы синтеза и исследования моделей ОПК-2.2: Умеет адекватно ставить задачи исследования и оптимизации сложных объектов на основе методов математического моделирования	ОПК-2.1: Знание методов физико-математического моделирования, применяемых к электронным компонентам.  ОПК-2.2: Умение адекватно ставить задачи исследования и	Отчет по лабораторным работам	Экзамен: Контрольные вопросы

	ОПК-2.3: Владеет навыками методологического анализа научного исследования и его результатов	оптимизации сложных объектов электроники и наноэлектроники на основе методов физико-математического моделирования.  ОПК-2.3: Владение навыками методологического анализа результатов научного исследования в области электроники и наноэлектроники.		
ОПК-3: Способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач	ОПК-3.1: Знает принципы построения локальных и глобальных компьютерных сетей, основы Интернет-технологий, типовые процедуры применения проблемно-ориентированных прикладных программных средств в дисциплинах профессионального цикла и профессиональной сфере деятельности ОПК-3.2: Умеет использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности научной и образовательной сфер деятельности ОПК-3.3: Владеет методами математического моделирования приборов и технологических процессов с использованием современных	ОПК-3.1: Знание методов информационных и компьютерных технологий, применяемых в образовательном процессе и в сфере производства компонент электроники и наноэлектроники.  ОПК-3.2: Умение использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций, способствующие повышению эффективности научной и образовательной сфер деятельности в области электроники и наноэлектроники.  ОПК-3.3: Владение методами компьютерного и физико-математического моделирования элементов электроники и наноэлектроники с использованием современных информационных технологий.	Коллоквиум	Экзамен: Контрольные вопросы
ОПК ОС-5: Способность проводить	ОПК ОС-5.1: Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические	ОПК ОС-5.1: Знание основ процессов в области физики	Коллоквиум	Экзамен: Доклад-презентация

инновационную научно-исследовательскую деятельность с применением фундаментальных знаний о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учетом современных тенденций развития нанотехнологий	свойства систем с пониженной размерностью ОПК ОС-5.2: Знает современные тенденции развития нанотехнологий и умеет учитывать их в своей профессиональной деятельности ОПК ОС-5.3: Способен проводить инновационную научно-исследовательскую деятельность с применением фундаментальных знаний о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учетом современных тенденций развития нанотехнологий	полупроводников, конденсированного состояния, низкоразмерных структур.  ОПК ОС-5.2: Умение осуществлять научно-исследовательскую с применением фундаментальных знаний, самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области систем с пониженной размерностью и анализировать их результаты  ОПК ОС-5.3: Владение современными методами исследований с использованием информационных технологий, способностями анализа и оценки научной информации с применением фундаментальных знаний о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учетом современных тенденций развития нанотехнологий		
---	---	---	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>4</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>58</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b>
	<b>Экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
1. Введение. Кремний – основа электроники и нанoeлектроники.	14	4		4	10
2. Методы получения тонких плёнок и слоёв кремния.	18	2	8	10	8
3. Структура кремния.	18	2	8	10	8
4. Структура, свойства, получение, применение плёнок и слоёв кремния.	18	2	8	10	8
5. КНИ-технология как основа интегральной микроэлектроники.	18	2	8	10	8
6. Технология КНС как разновидность КНИ-технологии.	10	2		2	8
7. Эволюция интегральных схем. Закон Мура.	10	2		2	8
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	16	32	50	58

### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Кремний – основа электроники и нанoeлектроники.  
Основные этапы производства кремния. Получение технического кремния. Получение полупроводникового кремния. Метод водородного восстановления трихлорсилана. Очистка трихлорсилана. Восстановление очищенного трихлорсилана. Получение поликристаллических стержней кремния из моносилана SiH<sub>4</sub>. Производство монокристаллов кремния. Оборудование для выращивания слитков. Метод Чохральского. Легирование монокристаллов кремния. Обработка слитков. Метод бестигельной зонной плавки. Дефекты монокристаллического кремния. Основные фоновые примеси. Производство кремния в России и за рубежом. Этапы кремниевой технологии.
2. Методы получения тонких плёнок и слоёв кремния.  
Газофазная эпитаксия кремния. Установка Эпиквар. Молекулярнолучевое осаждение и эпитаксия кремния. Установка сублимационной эпитаксии кремния. Структурные модификации кремния (a-Si, nc-Si, por-Si, mc-Si, poly-Si, c-Si). Плазмохимическое ВЧ-разложение силана.
3. Структура кремния.  
Структура атома: заполнение электронных оболочек и гибридизация валентных состояний. Структурный тип алмаза. Пространственная и точечная симметрия. Описание структурного типа в терминах плотнейшей упаковки. Структура поверхности кремния. Реконструкция и методы её наблюдения. Типы поверхностной реконструкции кремния. Примеси на поверхности кремния.
4. Структура, свойства, получение, применение плёнок и слоёв кремния.  
Плёнки поликристаллического кремния. Плёнки микрокристаллического кремния. Плёнки аморфного кремния. Пористый кремний.
5. КНИ-технология как основа интегральной микроэлектроники.

Принцип работы кремниевого МОП-транзистора. Комплиментарная пара МОП-транзисторов в планарном исполнении на объёмном кремнии и на структуре КНИ. Разновидности технологии «кремний на изоляторе». Диэлектрическая изоляция (DI) кремния. Структуры «кремний на сапфире» как разновидность КНИ-структур. Технологии SIMOX, BESOI, UNIBONDTM, SmartCutTM, ELTRAN.

6. Технология КНС как разновидность КНИ-технологии.

Структурные аспекты проблемы КНС (кремний на сапфире). Микродвойники и дефекты упаковки на гетерогранице. Автолегирование алюминием. Термонапряжения. Газофазная гетероэпитаксия кремния на сапфире. Установка Эпиквар. Недостатки метода газофазного осаждения. Ультратонкий кремний на сапфире - UTSi®. Применение метода ионной имплантации и твердофазной рекристаллизации для снижения дефектности КНС-структур. Молекулярно-лучевая гетероэпитаксия КНС. Пути развития КМОП КНС-технологии.

7. Эволюция интегральных схем. Закон Мура.

Размер транзисторов. Длина канала. Степень интеграции. Производительность. Размер пластин. Полевой нанотранзистор поколения 10 нм: основные черты. Развитие нанолитографии. Экстремальный ультрафиолет. Напряжённый кремний. Технология создания одноосного и двухосного напряжения в канале. Диэлектрики с большой диэлектрической проницаемостью (high- k). Многоуровневая металлизация. Диэлектрики с малой диэлектрической проницаемостью (low-k). Пути развития кремниевой КМОП-технологии.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Для обеспечения самостоятельной работы обучающихся используются:

- электронный курс "Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники".

Иные учебно-методические материалы: Самостоятельная работа студентов включает активное изучение лекционного материала, основной и вспомогательной учебной литературы, а также соответствующих разделов учебных и учебно-методических пособий, перечень которых приведен в п.6 настоящей рабочей программы дисциплины.

Основной целью самостоятельной работы является подготовка к выполнению лабораторных работ (практических занятий), анализ результатов, полученных в ходе выполнения лабораторных работ, а также решение задач, заданных преподавателем для самостоятельного разбора.

В случае отклонения студента от графика учебного процесса по какой-либо причине, в рамках самостоятельной работы может выделяться время на выполнение той части лабораторной работы, по которой имеет место отставание обучающегося от графика.

Для проведения самостоятельной работы обучающимся предоставляются свободные аудитории, доступ к компьютерной технике и, в случае необходимости, доступ к исследовательскому оборудованию, перечень которого приведен в п.7 настоящей рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п.5.

#### **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

## **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции УК-1:**

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ.

#### **Перечень лабораторных работ (4 на выбор)**

1. Рассеяние ускоренных электронов на атомной структуре. Д.А. Павлов.
2. Получение многослойных оптических покрытий методом электронно-лучевого испарения. А.В. Ершов.
3. Измерение энергетических параметров излучения полупроводниковых лазерных диодов с помощью измерителя Lab Max-Тор. Н.В. Дикарева.
4. Определение основных параметров полупроводникового инжекционного лазера с квантовыми ямами. С.М. Некоркин.
5. Ионное легирование кремния. В.В. Карзанов, Д.С. Королев.
6. Распределение примесных атомов при ионно-лучевом легировании полупроводников. Д.И. Тетельбаум.
7. Фотолюминесценция слоев диоксида кремния с ионно-синтезированными нанокристаллами кремния. А.Н. Михайлов.
8. Электронный парамагнитный резонанс в твёрдых телах. В.В. Карзанов
9. Измерение толщины и оптических констант тонких диэлектрических слоев методом эллипсометрии. К.В. Сидоренко.
- 10.Эпитаксиальное наращивание слоев кремния методом сублимации в вакууме. В.Г. Шенгуров.
- 11.Метод сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния с газовым источником германия. В.Г. Шенгуров, С.А. Денисов.
- 12.Изучение дефектов кристаллического строения в пленках кремния, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией. В.Г. Шенгуров.
- 13.Получение первого СЗМ изображения. Обработка и представление результатов эксперимента. А.В. Круглов.
- 14.Исследование поверхности твердых тел методом сканирующей туннельной микроскопии. А.В. Круглов.
- 15.Исследование поверхности твёрдых тел методом атомно-силовой. А.В. Круглов.
- 16.Артефакты сканирующей зондовой микроскопии. А.В. Круглов.
- 17.Сканирующая зондовая литография. А.В. Круглов.
- 18.Атомно-силовая микроскопия нано- и микрокристаллических металлов, и сплавов. А.В. Круглов.
- 19.Атомно-силовая микроскопия самоорганизованных полупроводниковых наноструктур. А.В. Круглов.
- 20.Обработка, численная характеристика СЗМ изображений и представление результатов эксперимента (на основе программного пакета SPMLab). А.В. Круглов.
- 21.Рентгеновский фазовый анализ поликристаллических материалов. П.В. Андреев.
- 22.Рентгеновский анализ поликристаллических материалов. В.Н. Трушин.

- 23.Рентгеновский анализ поликристаллических материалов. Часть 2. Проведение количественного анализа. В.Н. Трушин.
- 24.Получение диэлектрических слоёв методом ВЧ-магнетронного распыления. Ю.И. Чигиринский.
- 25.Фотолюминесценция полупроводниковых сверхрешёток. З.Ф. Красильник.
- 26.Комбинационное рассеяние света в гетероструктурах Ge/GeSi. Л.В. Гавриленко
- 27.Излучательные характеристики р-п перехода. Л.В. Красильникова.
- 28.Измерение диаграммы направленности излучения полупроводникового лазера. С.М. Некоркин.
- 29.Малоугловая рентгенография кристаллических и аморфных материалов. Т.А. Грачева.

**Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ на все контрольные вопросы
не зачтено	Не подготовлен ответ на контрольный вопрос

**5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:**

План-отчет лабораторного практикума

магистранта 1-го курса

---

(Ф.И.О.)

№	Название работы	Отметка руководителя о выполнении
1		
2		
3		
4		



Магистрант \_\_\_\_\_  
подпись И.О. ФАМИЛИЯ

Научный руководитель, \_\_\_\_\_  
уч. степень, должность подпись И.О. ФАМИЛИЯ

**Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Выполнено задание лабораторной работы и представлен рукописный отчет
не зачтено	Не выполнено задание лабораторной работы или не представлен рукописный отчет

**5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Коллоквиум) для оценки сформированности компетенции ОПК-3:**

Вопросы для оценки компетенции ОПК-3:

**Вопрос 1.**

Комплементарная пара МОП-транзисторов это ...

**Варианты ответа:**

1. ... два транзистора, одинаковые по абсолютным значениям параметров, но имеющие разные типы проводимостей.
2. ... два транзистора, разные по абсолютным значениям параметров, но имеющие одинаковые типы проводимостей.
3. ... два транзистора, разные по абсолютным значениям параметров и имеющие разные типы проводимостей.
4. ... два транзистора, одинаковые по абсолютным значениям параметров и имеющие одинаковые типы проводимостей.

**Вопрос 2.**

Оборудование для ... эпитаксии является наиболее производительным.

**Варианты ответа:**

1. ... жидкофазной
2. ... молекулярно-лучевой
3. ... газофазной
4. ... сублимационной

**Вопрос 3.**

Наиболее качественные слои в КНС получают на ... сапфира.

**Варианты ответа:**

1. ... С-срезе
2. ... R-срезе
3. ... X-срезе

4. ... Т-срезе

**Вопрос 4.**

К одномерным дефектам слитков кремния относятся ...

**Варианты ответа:**

1. ... дислокации
2. ... поверхность
3. ... микродвойники
4. ... примесный атом

**Вопрос 5.**

К разновидностям КНИ-технологии не относится ...

**Варианты ответа:**

1. ... UNIBOND™-процесс
2. ... SmartCut™-процесс
3. ... ELTRAN-процесс
4. ... ELTAV-процесс

**Вопрос 6.**

Современный закон Мура гласит ...

**Варианты ответа:**

1. ... число транзисторов на кристалле микропроцессора будет увеличиваться в 1,5 раза каждые 2 года.
2. ... число транзисторов на кристалле микропроцессора будет увеличиваться в 2 раза каждые 4 года.
3. ... число транзисторов на кристалле микропроцессора будет увеличиваться в 2 раза каждые 3 года число транзисторов на кристалле микропроцессора будет увеличиваться в 2 раза каждые 3 года число транзисторов на кристалле микропроцессора будет увеличиваться в 2 раза каждые 2 года.
4. ... число транзисторов на кристалле микропроцессора будет увеличиваться в 2 раза каждые 2 года.

**5.1.4 Типовые задания (оценочное средство - Коллоквиум) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5:**

**Вопрос 7.**

Ширина запрещённой зоны кремния при температуре 300 К составляет ... электронвольт.

**Варианты ответа:**

1. ... 1,12
2. ... 0,66
3. ... 1,43
4. ... 0,87

**Вопрос 8.**

Кремневые слитки диаметром 450 мм позволяет получить ...

**Варианты ответа:**

1. ... метод Чохральского.

2. ... метод безтигельной зонной плавки.
3. ... метод тигельной зонной плавки.
4. ... индукционный метод.

**Вопрос 9.**

При безтигельной зонной плавке легирование происходит ...

**Варианты ответа:**

1. ... за счёт добавления примеси в расплав.
2. ... за счёт добавления примеси в атмосферу.
3. ... на отдельном этапе.
4. ... до начала процесса.

**Вопрос 10.**

Кремневые пластины ... имеют только один базовый срез.

**Варианты ответа:**

1. ... ориентации (100) и n-типа проводимости
2. ... ориентации (100) и p-типа проводимости
3. ... ориентации (111) и n-типа проводимости
4. ... ориентации (111) и p-типа проводимости

**Вопрос 11.**

В методе Чохральского легирование происходит ...

**Варианты ответа:**

1. за счёт добавления примеси в атмосферу.
2. за счёт добавления примеси в расплав.
3. до начала процесса.
4. на отдельном этапе.

**Вопрос 12.**

Кристаллическая структура кремния относится к структурному типу ...

**Варианты ответа:**

1. ... сфалерита.
2. ... меди.
3. ... алмаза.
4. ... магния.

**Вопрос 13.**

Кремний растёт на сапфире по механизму ...

**Варианты ответа:**

1. ... Вольмера-Вебера.
2. ... Странского-Крастанова.

3. ... Франка-ван-дер-Мерве.

4. ... Вольтера-Кранова.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Коллоквиум)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Правильный вариант ответа на вопрос коллоквиума - 5 баллов
не зачтено	Неправильный вариант ответа на вопрос коллоквиума - 0 баллов

### 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков.	При решении стандартных задач не	Имеется минимальный набор	Продемонстрированы базовые	Продемонстрированы базовые	Продемонстрированы навыки	Продемонстрирован творческий

	Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	подход к решению нестандартных задач
--	--	--	--	---	---	--	--------------------------------------

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции УК-1

1. Кремний. Основные этапы производства кремния. Получение технического кремния.
2. Получение полупроводникового кремния. Метод водородного восстановления трихлорсилана. Очистка трихлорсилана. Восстановление очищенного трихлорсилана.
3. Получение поликристаллических стержней кремния из моносилана  $\text{SiH}_4$ .
4. Производство монокристаллов кремния. Оборудование для выращивания слитков. Метод Чохральского.
5. Легирование монокристаллов кремния. Обработка слитков.
6. Метод бестигельной зонной плавки.

7. Дефекты монокристаллического кремния. Основные фоновые примеси.
8. Производство кремния в России и за рубежом.
9. Этапы кремниевой технологии.
10. Методы получения тонких плёнок и слоёв кремния.
11. Газофазная эпитаксия кремния. Установка Эпиквар.
12. Молекулярно-лучевое осаждение и эпитаксия кремния. Установка сублимационной эпитаксии кремния.
13. Структурные модификации кремния (a-Si, nc-Si, por-Si, mc-Si, poly-Si, c-Si)
14. Плазмохимическое ВЧ-разложение силана.

### **5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

1. Структура кремния. Структура атома: заполнение электронных оболочек и гибридизация валентных состояний.
2. Структурный тип алмаза. Пространственная и точечная симметрия. Описание структурного типа в терминах плотнейшей упаковки.
3. Структура поверхности кремния. Реконструкция и методы её наблюдения.
4. Типы поверхностной реконструкции кремния. Примеси на поверхности кремния.
5. Плёнки поликристаллического кремния. Структура. Получение. Свойства. Применение.
6. Плёнки микрокристаллического кремния. Структура. Получение. Свойства. Применение.
7. Плёнки аморфного кремния. Структура. Получение. Свойства. Применение.
8. Пористый кремний. Структура. Получение. Свойства. Применение.
9. Принцип работы кремниевого МОП-транзистора. Комплементарная пара МОП-транзисторов в планарном исполнении на объёмном кремнии и на структуре КНИ.
10. Разновидности технологии «кремний на изоляторе».
11. Диэлектрическая изоляция (DI) кремния.
12. Структуры «кремний на сапфире» как разновидность КНИ-структур.
13. SIMOX-технология как разновидность КНИ-технологии.
14. BESOI-технология как разновидность КНИ-технологии.

### **5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-3**

1. UNIBONDTM-процесс как разновидность КНИ-технологии.
2. SmartCutTM-процесс как разновидность КНИ-технологии.
3. ELTRAN-процесс как разновидность КНИ-технологии.
4. Структурные аспекты проблемы КНС (кремний на сапфире). Микродвойники и дефекты упаковки на гетерогранице. Автолегирование алюминием. Термонапряжения.

5. Газофазная гетероэпитаксия кремния на сапфир. Установка Эпиквар. Недостатки метода газофазного осаждения.
6. Ультратонкий кремний на сапфире - UTSi®. Применение метода ионной имплантации и твердофазной рекристаллизации для снижения дефектности КНС-структур.
7. Молекулярно-лучевая гетероэпитаксия КНС.
8. Пути развития КМОП КНС-технологии.
9. Эволюция интегральных схем. Закон Мура. Размер транзисторов. Длина канала. Степень интеграции. Производительность. Размер пластин.
10. Полевой нанотранзистор поколения 10 нм: основные черты.
11. Развитие нанолитографии. Экстремальный ультрафиолет.
12. Напряжённый кремний. Технология создания одноосного и двухосного напряжения в канале.
13. Диэлектрики с большой диэлектрической проницаемостью (high-k).
14. Многоуровневая металлизация. Диэлектрики с малой диэлектрической проницаемостью (low-k).
15. Пути развития кремниевой КМОП-технологии.

#### **Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)**

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна

Оценка	Критерии оценивания
	только с комиссией.

### 5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Доклад-презентация) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5

Ответ на два экзаменационных вопроса выданных магистранту накануне в форме билета будет необходимо сформировать в виде двойной презентации. При этом предполагается использовать лекции, литературу и интернет.

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Доклад-презентация)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:



1. Шука А. А. Нанoeлектроника : учебник / А. А. Шука ; под общей редакцией А. С. Сигова. - Москва : Юрайт, 2023. - 297 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-9916-8280-0. - Текст : электронный // ЭБС "Юрайт"., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=847604&idb=0>.
2. Нанотехнологии в электронике. Выпуск 2 / Чаплыгин Ю.А. - Москва : Техносфера, 2013., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=645430&idb=0>.
3. Драгунов В. П. Нанoeлектроника в 2 ч. Часть 2 : учебное пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - 3-е изд. ; испр. и доп. - Москва : Юрайт, 2023. - 235 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-05171-1. - Текст : электронный // ЭБС "Юрайт"., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=839474&idb=0>.
4. Пул Ч. Нанотехнологии : учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки "Нанотехнологии" / пер. с англ. под ред. Ю. И. Головина ; доп. В. В. Лучинина. - 2-е, доп. изд. - М. : Техносфера, 2005. - 336 с. - (Мир материалов и технологий ; 6 - 03). - ISBN 5-94836-021-0 : 275.00., 1 экз.
5. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. / Гусев А.И. - Москва : Физматлит, 2009., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=634721&idb=0>.

#### Дополнительная литература:

1. Пожела Юрас Карлович. Физика быстродействующих транзисторов = Physics of High-Speed Transistors : монография / [АН ЛитССР, Ин-т физики полупроводников]. - Вильнюс : Мокслас, 1989. - 261, [2] с. : ил. - ISBN 5-420-00688-X (в пер.) : 4.10., 2 экз.
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. [Кн.] 1 / пер. с англ. В. А. Гергеля, В. В. Ракитина ; под ред. Р. А. Суриса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир , 1984. - 455 с. : ил. - 2.20., 16 экз.
3. Технология СБИС : в 2 кн. [Кн.] 1 / пер. с англ. под ред. Ю. Д. Чистякова ; пер. кн. В. М. Звероловлева [и др.]. - М. : Мир, 1986. - 404 с. : ил. - 3.00., 2 экз.

#### Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

##### а) основная литература:

1. Шука А.А. Нанoeлектроника.- М.: Физматкнига, 2007.- 464 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=268268&idb=0>  
<https://www.studentlibrary.ru/ru/book/ISBN9785001017301.html>  
<https://e.lanbook.com/book/84102#authors>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Shuka.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Shuka.pdf)
2. Нанотехнологии в электронике. Вып. 2. /Под ред. Ю.А. Чаплыгина.- М: Техносфера, 2013.- 688 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/Web/SearchResult/ToPage/1>  
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948363530.html>  
[http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=468347&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=468347&sr=1)  
[http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1916864#1](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1916864#1)  
[https://e.lanbook.com/book/76156#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/76156#book_name)  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Chaplygin.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Chaplygin.pdf)
3. Драгунов В.П., Неизвестный В.А., Гридчин В.А. Нанoeлектроника. В 2 ч.: Учеб. пособие.- 3-е изд., исп. и доп.- М.: Издательство Юрайт, 2017.- 285+235 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=582007&idb=0>

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Dragunov.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Dragunov.pdf)

4. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии.-М.: Техносфера, 2005.- 336 с.

[http://www.studmed.ru/pul-ch-ouens-f-nanotehnologii\\_867d164417f.html#](http://www.studmed.ru/pul-ch-ouens-f-nanotehnologii_867d164417f.html#)

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Poole.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Poole.pdf)

5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.- М.:Физматлит, 2005.- 416 с.

<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922105828.html>

[https://e.lanbook.com/book/2173#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/2173#book_name)

[http://www.studmed.ru/gusev-ai-nanomaterialy-nanostruktury-nanotehnologii\\_4b031795a83.html#](http://www.studmed.ru/gusev-ai-nanomaterialy-nanostruktury-nanotehnologii_4b031795a83.html#)

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Gusev.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Gusev.pdf)

#### б) дополнительная литература:

1. Уайтсайдс Дж., Эйглер Д., Андерс Р. и др. Нанотехнология в ближайшем десятилетии.

Прогноз направления исследований.- М.: Мир, 2002.- 292 с. [http://www.studmed.ru/uaytsayds-dzh-eygler-d-anders-r-i-dr-nanotehnologiya-v-blizhayshe-desyatiletii-prognoz-napravleniya-issledovaniy\\_48f69e2c231.html](http://www.studmed.ru/uaytsayds-dzh-eygler-d-anders-r-i-dr-nanotehnologiya-v-blizhayshe-desyatiletii-prognoz-napravleniya-issledovaniy_48f69e2c231.html)

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Whitesides.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Whitesides.pdf)

2. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике /Отв. ред. А.Л. Асеев.-Новосибирск:

Изд. СО РАН, 2004.- 368 с.

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Aseev.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Aseev.pdf)

3. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов.- Вильнюс: Мокслас, 1989.- 264 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=318062&idb=0>

[http://www.studmed.ru/pozhela-yu-yucene-v-fizika-sverhbystrodeystvuyuschih-tranzistorov\\_c4118a4028f.html](http://www.studmed.ru/pozhela-yu-yucene-v-fizika-sverhbystrodeystvuyuschih-tranzistorov_c4118a4028f.html)

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Pozela.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Pozela.djvu)

4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.- М.: Мир, 1984.-Т. 1.-

456 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=324623&idb=0>

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Size\\_2.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Size_2.djvu)

5. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. /Под ред. С. Зи.- М.: Мир, 1986.-404 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=319056&idb=0>

[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=VLSI\\_Technology\\_1.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=VLSI_Technology_1.pdf)

#### в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ

<http://studentlibrary.ru> - Студенческая электронная библиотека

<https://biblio-online.ru/> - Электронная библиотека Юрайт

<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»

<http://biblioclub.ru> – Университетская библиотека ONLINE

<http://spen.phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ

<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов

<http://www.rfbr.ru> – Библиотека РФФИ

### 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Помещения

представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Для проведения занятий по дисциплине (чтение лекций и контроль самостоятельной работы, проведение лабораторного практикума) используется: учебная аудитория, оснащенная видеопроектором и аудио системой; технологическая лаборатория, оснащенная вакуумными установками для эпитаксиального наращивания марки ВУП-4; электронографическая лаборатория на базе электронографа ЭМР – 102; лаборатория электронной микроскопии, включающая просвечивающие электронные микроскопы ЭМВ – 100ЛМ, JEM-2100F; лаборатория сканирующей зондовой микроскопии на базе сканирующего зондового микроскопа NanoEducator. Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Рецензент(ы): Демидов Евгений Сергеевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.