

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от «02» декабря 2024 г.
№ 10

Рабочая программа дисциплины
«Актуальные проблемы современной электроники и
наноэлектроники»

Уровень высшего образования
Подготовка кадров высшей квалификации

Научная специальность
1.3.8. Физика конденсированного состояния

Программа подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Физика конденсированного состояния

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2025 год

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники» относится к вариативной части ОПОП, является факультативной дисциплиной и изучается на 2 году обучения в 3 семестре.

Целью освоения дисциплины «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники» является изучение передовых достижений, основных направлений, тенденций, перспектив и проблем развития современной электроники и нанoeлектроники для выработки навыков оценки новизны исследований и разработок и для освоения новых методологических подходов к решению задач в области профессиональной полупроводниковой электроники.

3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет всего - 36 часа, из которых 18 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 18 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

| Наименование раздела дисциплины | Всего, часов | В том числе | | | | |
|--|--------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-------|--|
| | | Контактная работа, часов | | | | Самостоятельная работа обучающегося, часов |
| | | Занятия лекционного типа | Занятия семинарского типа | Занятия лабораторного типа | Всего | |
| Введение. Кремний – основа электроники и нанoeлектроники | 16 | 4 | | | 4 | 12 |
| Методы получения тонких плёнок и слоёв кремния. | 23 | 2 | | 9 | 11 | 12 |
| Структура кремния. | 23 | 2 | | 9 | 11 | 12 |
| Структура, свойства, получение, применение плёнок и слоёв кремния. | 23 | 2 | | 9 | 11 | 12 |
| КНИ-технология как основа интегральной микроэлектроники. | 23 | 2 | | 9 | 11 | 12 |
| Технология КНС как разновидность КНИ-технологии. | 14 | 2 | | | 2 | 12 |
| Эволюция интегральных схем. Закон Мура. | 14 | 2 | | | 2 | 12 |

| | | | | | | |
|---|-----|----|--|----|----|----|
| Текущий контроль | 6 | 2 | | | 2 | 4 |
| ВСЕГО | 142 | 18 | | 36 | 54 | 88 |
| Промежуточная аттестация по дисциплине зачет | | | | | | |

Таблица 3

Содержание дисциплины

| № п/п | Наименование раздела дисциплины | Содержание раздела | Форма проведения занятия | Форма текущего контроля |
|-------|---|---|------------------------------|--|
| 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 ₄ . 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. | Лекции | Контроль посещаемости |
| 2 | Методы получения тонких плёнок и слоёв кремния. | Газофазная эпитаксия кремния. Установка Эпиквар. Молекулярно-лучевое 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. | Лекции, лабораторные работы. | Контроль посещаемости, прием и проверка отчетов по лабораторным работам. |

| | | | | |
|---|--|---|------------------------------|--|
| 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. | Лекции, лабораторные работы. | Контроль посещаемости, прием и проверка отчетов по лабораторным работам. |
| 4 | Структура, свойства, получение, применение плёнок и слоёв кремния. | Плёнки поликристаллического кремния. Плёнки микрокристаллического кремния. Плёнки аморфного кремния. Пористый кремний. | Лекции, лабораторные работы. | Контроль посещаемости, прием и проверка отчетов по лабораторным работам. |
| 5 | КНИ-технология как основа интегральной микроэлектроники. | Принцип работы кремниевого МОП-транзистора. Комплементарная 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. | Лекции, лабораторные работы. | Контроль посещаемости, прием и проверка отчетов по лабораторным работам. |
| 6 | Технология КНС как разновидность КНИ-технологии. | Структурные аспекты проблемы КНС (кремний на сапфире). Микродвойники и дефекты упаковки на гетерогранице. Автолегирование алюминием. Термонапряжения. Газофазная гетероэпипаксия кремния на сапфир. Установка Эпиквар. Недостатки метода газофазного осаждения. Ультратонкий кремний на сапфире - UTSi®. Применение | Лекции | Контроль посещаемости |

| | | | | |
|---|---|---|--------|-----------------------|
| | | метода ионной им-плантации 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. | Лекции | Контроль посещаемости |

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа подразумевает использование рекомендованных Интернет-ресурсов, т.е. изучение основной и дополнительной литературы по курсу.

Перечень рекомендованной литературы и Интернет-ресурсов приведен в 7-м разделе данной программы. Контроль самостоятельной работы обучающихся, при условии 100% посещаемости, происходит в форме коллективного обсуждения тематики разделов дисциплины во время лекций, а промежуточная аттестация (зачет) предполагает проведение экспресс анализа уровня освоения компетенций в форме коллоквиума, тестовые вопросы которого выведены из текста данной рабочей программы в приложение фонда оценочных средств (ФОС). Там же подробно описана и процедура оценивания результатов.

Помимо вышеперечисленных форм контроля и промежуточной аттестации имеется также перечень контрольных вопросов, применяемых в форме устного зачета.

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

| Оценка | Уровень подготовленности, характеризующий оценкой |
|-------------------|--|
| <i>Зачтено</i> | владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях. |
| <i>Не зачтено</i> | непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях. |

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

Вопросы для контроля

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 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.
15. Структура кремния. Структура атома: заполнение электронных оболочек и гибридизация валентных состояний.
16. Структурный тип алмаза. Пространственная и точечная симметрия. Описание структурного типа в терминах плотнейшей упаковки.
17. Структура поверхности кремния. Реконструкция и методы её наблюдения.
18. Типы поверхностной реконструкции кремния. Примеси на поверхности кремния.
19. Плёнки поликристаллического кремния. Структура. Получение. Свойства. Применение.
20. Плёнки микрокристаллического кремния. Структура. Получение. Свойства. Применение.
21. Плёнки аморфного кремния. Структура. Получение. Свойства. Применение.
22. Пористый кремний. Структура. Получение. Свойства. Применение.
23. Принцип работы кремниевого МОП-транзистора. Комплементарная пара МОП-транзисторов в планарном исполнении на объёмном кремнии и на структуре КНИ.
24. Разновидности технологии «кремний на изоляторе».
25. Диэлектрическая изоляция (DI) кремния.
26. Структуры «кремний на сапфире» как разновидность КНИ-структур.
27. SIMOX-технология как разновидность КНИ-технологии.
28. BESOI-технология как разновидность КНИ-технологии.
29. UNIBONDTM-процесс как разновидность КНИ-технологии.
30. SmartCutTM-процесс как разновидность КНИ-технологии.
31. ELTRAN-процесс как разновидность КНИ-технологии.
32. Структурные аспекты проблемы КНС (кремний на сапфире). Микродвойники и дефекты упаковки на гетерогранице. Автолегирование алюминием. Термонапряжения.
33. Газофазная гетероэпитаксия кремния на сапфир. Установка Эпиквар. Недостатки метода газофазного осаждения.
34. Ультратонкий кремний на сапфире - UTSi[®]. Применение метода ионной имплантации и твердофазной рекристаллизации для снижения дефектности КНС-структур.
35. Молекулярно-лучевая гетероэпитаксия КНС.
36. Пути развития КМОП КНС-технологии.
37. Эволюция интегральных схем. Закон Мура. Размер транзисторов. Длина канала. Степень интеграции. Производительность. Размер пластин.
38. Полевой нанотранзистор поколения 10 нм: основные черты.
39. Развитие нанолитографии. Экстремальный ультрафиолет.
40. Напряжённый кремний. Технология создания одноосного и двухосного напряжения в канале.
41. Диэлектрики с большой диэлектрической проницаемостью (high-k).
42. Многоуровневая металлизация. Диэлектрики с малой диэлектрической проницаемостью (low-k).
43. Пути развития кремниевой КМОП-технологии.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

а) основная литература

1. Шука А.А. Нанoeлектроника.- М.: Физматкнига, 2007.- 464 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135625395&DB=1>

- <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785996310555.html>
<https://biblio-online.ru/viewer/C8153254-ABAC-446C-A57B-5DF248ED0164#page/1>
<https://e.lanbook.com/book/84102#authors>
http://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://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=1&IdField=134796559&DB=1>
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948363530.html>
http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=468347&sr=1
http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1916864#1
https://e.lanbook.com/book/76156#book_name
http://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://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135533257&DB=1>
<https://biblio-online.ru/viewer/72F450AA-7472-41DF-89F3-06FC66EFB254#page/1>
<https://biblio-online.ru/viewer/0491672E-6A76-4D5A-853E-15CAA2DC1631#page/1>
http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Dragunov.pdf
Пул Ч., Оуенс Ф. Нанотехнологии.-М.: Техносфера, 2005.- 336 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135588355&DB=1>
http://www.studmed.ru/pul-ch-ouens-f-nanotehnologii_867d164417f.html#
http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Poole.pdf
4. 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
http://www.studmed.ru/gusev-ai-nanomaterialy-nanostruktury-nanotehnologii_4b031795a83.html#
http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Gusev.pdf
5. Физика твёрдого тела: Лабораторный практикум. Учебное пособие. В 2 т. /Под ред. проф. А.Ф. Хохлова. Том 1. Методы получения твёрдых тел и исследования их структуры. -М: Высш. шк., 2001.-364 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=42524>

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-blizhayshem-desyatiletii-prognoz-napravleniya-issledovaniy_48f69e2c231.html
<http://www.twirpx.com/file/546397/>
2. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике /Отв. ред. А.Л. Асеев.- Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004.- 368 с.
http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Aseev.pdf
3. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов.- Вильнюс: Мокслас, 1989.- 264 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135585316&DB=1>
http://www.studmed.ru/pozhela-yu-yucene-v-fizika-sverhbystrodeystvuyuschih-tranzistorov_c4118a4028f.html
<http://www.twirpx.com/file/125487/>
http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Pozela.djvu
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.- М.: Мир, 1984.-Т. 1.-456 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/catalog.php?Index=0&IdField=135407373&DB=1>

http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Sze_2.djvu
<http://www.ph4s.ru/books/poluprov/zi-fizikapolupr.rar>

5. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. /Под ред. С. Зи.- М.: Мир, 1986.-404 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/searchext.php?Type=2&Action=1>
<http://www.twirpx.com/file/71292/>
<http://www.twirpx.com/file/71306/>
http://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
<http://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»
<http://biblioclub.ru> – Университетская библиотека ONLINE
<http://phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ
<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов
<http://www.twirpx.com> - Общедоступный сайт www.twirpx.com
<http://www.rfbr.ru> – Библиотека РФФИ.

2. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения занятий по дисциплине (чтение лекций и контроль самостоятельной работы) необходима аудитория, оснащенная видеопроектором и аудио системой.

Технологическая лаборатория: Вакуумные установки для эпитаксиального наращивания марки ВУП-4.

Электроннографическая лаборатория: Электронограф ЭМР-102.

Лаборатория электронной микроскопии: Просвечивающие электронные микроскопы ЭМВ – 100ЛМ, JEM-2100F

Лаборатория Сканирующей зондовой микроскопии: Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор проф. Д.А. Павлов

Рецензент проф. Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

д.ф.-м.н. профессор

_____ Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ 2022 года, протокол № б/н