

**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**  
**«Нанопфизика и наноэлектроника»**

Уровень высшего образования  
**Подготовка кадров высшей квалификации**

Научная специальность  
**1.3.11. Физика полупроводников**

Программа подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
**Физика полупроводников**

Форма обучения  
**Очная**

Нижегород  
2025 год

## **1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина «Нанофизика и нанoeлектроника» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

### **Цель дисциплины –**

Целями освоения дисциплины " Нанoeлектроника " являются следующие.

- Изучение физических основ элементов и приборов нанoeлектроники, принципов их построения, механизмов токопереноса, физических и технологических ограничений пределов уменьшения размеров, возможности увеличения частотного предела быстродействия.
- Формирование у обучающихся умений и навыков, необходимых для оптимизации физических процессов и конструкции приборов нанoeлектроники.
- Получение углубленного профессионального образования по физике и идеологии электронной компонентной базы, обеспечивающего возможность быстрого и самостоятельного приобретения новых знаний, необходимых для успешной профессиональной деятельности в области микро- и нанoeлектроники.

## **2. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

Выпускник, освоивший программу, должен

### **Знать:**

- основные результаты теоретических и экспериментальных исследований в области нанoeлектроники
- базовую информацию, современную научную, техническую и патентную литературу в области нанoeлектроники.

### **Уметь:**

- применять знания теоретических и экспериментальных исследований в области нанoeлектроники
- критически оценивать, анализировать, применять базовую информацию, современную научную, техническую и патентную литературу и пополнять научные знания в области нанoeлектроники.

### **Владеть:**

- методологией теоретических и экспериментальных исследований в области нанoeлектроники

## **3. Структура и содержание дисциплины.**

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа – 36 часов), 36 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	Консультации	Всего	
1. Введение	4	2				2	2
2. Параметры быстродействия, усиления, энергии переключения транзисторов	4	2				2	2
3. Принципиальные физические и технологические ограничения.	8	4				4	4
4. Гетероструктурные транзисторы	8	4				4	4
5. Аналоговые транзисторы	8	4				4	4
6. Транзисторы на квантовых эффектах	8	4				4	4
7. Одноэлектроника	8	4				4	4
8. Углеродные нанотрубки	8	4				4	4
9. Спинтроника	8	4				4	4
10. Электроника на основе эффекта Джозефсона	8	4				4	4
Промежуточная аттестация:	зачет						
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	<b>36</b>

Таблица 3

## Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Введение	Основные параметры качества и тенденции развития элементов наноэлектроники. Проблемы, связанные с проектированием и моделированием элементов и приборов наноструктур.	Лекции, практические занятия	Зачёт
2.	Параметры быстродействия, усиления, энергии переключения транзисторов	Параметры быстродействия биполярных транзисторов (БТ), усиление на высоких частотах, усиление по мощности, время задержки переключения.	Лекции, практические занятия	Зачёт

		Параметры быстродействия полевых транзисторов (ПТ), усиление на высоких частотах, максимальная частота генерации, время задержки переключения. ПТ и БТ как вентили логических схем. Время задержки и энергия переключения.		
3.	Принципиальные физические и технологические ограничения	Технологические ограничения. Горизонтальные или планарные ограничения. Вертикальные ограничения. Физические ограничения.	Лекции, практические занятия	Зачёт
4.	Гетероструктурные транзисторы	Гетероструктурные ПТ. Селективное легирование. 2D-электронный газ. Реализации ГСЛ-ПТ. Гетероструктурные БТ. Транзисторы на горячих электронах.	Лекции, практические занятия	Зачёт
5.	Аналоговые транзисторы	Аналоговые транзисторы со статической индукцией, проницаемой базой, с металлической базой.	Лекции, практические занятия	Зачёт
6.	Транзисторы на квантовых эффектах	Резонансно-туннельные диод и транзистор. Транзисторы с квантовой структурой двойного барьера (ДБКС). ПТ с резонансным туннелированием. Структуры со сверхрешёткой. Эффект Ааронова-Бома. Транзисторы с квантовой интерференцией электронных волн.	Лекции	Зачёт
7.	Одноэлектроника	Физические основы дискретного туннелирования. Реализация одноэлектронных схем. Атомный уровень одноэлектроники.	Лекции, практические занятия	Зачёт
8.	Углеродные нанотрубки	Получение углеродных нанотрубок (УНТ). УНТ как квантовые проволоки, проводимость УНТ. Манипуляции с УНТ в атомно-силовом микроскопе. ПТ на УНТ.	Лекции, практические занятия	Зачёт
9.	Спинтроника	Спиновые инжекция и аккумуляция. Гигантское магнитосопротивление. Спиновый клапан. Спиновый транзистор на горячих электронах.	Лекции, практические занятия	Зачёт
10.	Электроника на основе эффекта Джозефсона	Стационарный и не стационарный эффекты Джозефсона. СКВИД. Электроника на основе переходов	Лекции, практические занятия	Зачёт

		Джозефсона. Максимальное быстродействие.		
--	--	------------------------------------------	--	--

#### **4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

Во время самостоятельной работы аспиранты приобретают практические навыки проведения анализа и систематизации информации, связанной с исследованием нанoeлектронных приборов, строить физико-математические модели наноразмерных элементов. Самостоятельная работа аспирантов обеспечивается учебно-методическими пособиями, учебной и научной литературой.

*Осуществляется подготовка к зачёту по вопросам*

1. Основные параметры качества и тенденции развития элементов нанoeлектроники.
2. Какие максимальные частоты переключения достижимы в гомоструктурных полевых, биполярных транзисторах? Насколько эффективным является переход к наноразмерным масштабам структур?
3. Основные принципиальные физические и технологические ограничения размеров гомоструктурных транзисторов.
4. Какие полезные новые качества появляются в гетероструктурном варианте транзисторов. Почему при этом можно дальше продвинуться в нанометровый масштаб размеров элементов и увеличить быстродействие.
5. Какие полезные качества двумерного электронного газа электронов можно использовать в приборах нанoeлектроники?
6. Что означает горячие электроны, как они возникают и позволяют увеличить быстродействие БТ?
7. Прокомментируйте сходство аналоговых транзисторов с вакуумным триодом и возможность в твердотельном варианте достигнуть большего быстродействия.
8. Какие полезные качества квантовой структуры с двойным барьером лежат в основе резонансно-туннельных структур?
9. При каких условиях возможна квантовая интерференция электронных волн в эффекте Ааронова-Бома, как ею можно управлять?
10. При каких условиях проявляется кулоновская блокада туннелирования, что ограничивает скорость дискретного туннелирования?
11. Какие качества углеродных нанотрубок позволяют считать их перспективными структурами для создания ПТ на их основе?
12. Зачем нужен слой антиферромагнетика в спиновом клапане?
13. Какое полезное дополнительное качество даёт спиновая поляризация в транзисторе на горячих электронах?
14. Чем определяется максимальное быстродействие приборов на эффекте Джозефсона?

#### **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***

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<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***

15. Основные параметры качества и тенденции развития элементов нанoeлектроники.
16. Какие максимальные частоты переключения достижимы в гомоструктурных полевых, биполярных транзисторах? Насколько эффективным является переход к наноразмерным масштабам структур?
17. Основные принципиальные физические и технологические ограничения размеров гомоструктурных транзисторов.
18. Какие полезные новые качества появляются в гетероструктурном варианте транзисторов. Почему при этом можно дальше продвинуться в нанометровый масштаб размеров элементов и увеличить быстродействие.
19. Какие полезные качества двумерного электронного газа электронов можно использовать в приборах нанoeлектроники?
20. Что означает горячие электроны, как они возникают и позволяют увеличить быстродействие БТ?
21. Прокомментируйте сходство аналоговых транзисторов с вакуумным триодом и возможность в твердотельном варианте достигнуть большего быстродействия.
22. Какие полезные качества квантовой структуры с двойным барьером лежат в основе резонансно-туннельных структур?

23. При каких условиях возможна квантовая интерференция электронных волн в эффекте Ааронова-Бома, как ею можно управлять?
24. При каких условиях проявляется кулоновская блокада туннелирования, что ограничивает скорость дискретного туннелирования?
25. Какие качества углеродных нанотрубок позволяют считать их перспективными структурами для создания ПТ на их основе?
26. Зачем нужен слой антиферромагнетика в спиновом клапане?
27. Какое полезное дополнительное качество даёт спиновая поляризация в транзисторе на горячих электронах?
28. Чем определяется максимальное быстродействие приборов на эффекте Джозефсона?

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

а) основная литература:

1. Пожела Ю. К. Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс, Мокслас, 1989, 264с. <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.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](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Pozela.djvu)
2. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники, Новосибирск, Изд. НГТУ, 2000, 332 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](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Dragunov.pdf)
3. Демиховский В. Я., Вугальтер Г. А., Физика квантовых низкоразмерных структур, М., Логос, 2000, 248 с.
4. Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Стогней О. В., Новые направления физического материаловедения, Воронеж, Изд. ВГУ, 2000, 286 с.
5. Щука А. А. Наноэлектроника. 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](http://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Shuka.pdf)

б) дополнительная литература:

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, М., Мир, 1984, т.1,2.  
<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://phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Sze_2.djvu)  
<http://www.ph4s.ru/books/poluprov/zi-fizikapolupr.rar>
2. Гуляев Ю. В., Сандомирский В. Б., Суханов А. А., Ткач Ю. А., Тенденции развития микроэлектроники, УФН, т.144, в.3, с.475-495, 1984.
3. Кульбачинский В. А. Структуры малой размерности в полупроводниках, М., Изд. МГУ, 1998.
4. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки, УФН, т.167, в.9, 1997.

5. Демидов Е. С., Аттосекундная высокотемпературная одноэлектроника на атомах переходных элементов, Письма в ЖЭТФ, Т.71, В.9, С.513–518, 2000.
6. Дудкин В. И., Пахомов Л. Н., Квантовая электроника. Приборы и их применение: Учеб. Пособие, М., Техносфера, 2006., 423с.
7. Ю. А. Данилов, Е. С. Демидов, Ю. Н. Дроздов и др./Свойства слоёв GaSb:Mn, полученных осаждением из лазерной плазмы //ФТП **39**, 8 (2005).
8. Yu. A. Danilov, E. S. Demidov, Yu. N. Drozdov et al., J. Magn. Magn. Mater. **300**, e24 (2006).
9. Е. С. Демидов, Ю. А. Данилов, В. В. Подольский, В. П. Лесников, М. В. Сапожников, А. И. Сучков/ Ферромагнетизм в эпитаксиальных слоях германия и кремния, пересыщенных примесями марганца и железа// Письма в ЖЭТФ, 2006, Т. 75, В. 11, С. 673-675.
10. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии // Электронная промышленность. – 1993, № 10, с. 8.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы :

1. Пакет компьютерных аналитических и графических вычислений для персонального компьютера. Допускается применение сред Wolfram Mathematica или любых иных компьютерных ресурсов аналогичного назначения.
2. Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом [www.eqworld.ipmnet.ru](http://www.eqworld.ipmnet.ru)

<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://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.twirpx.com)

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

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;

- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;

- лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;

- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

ресурсам.

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 (ы) проф. \_\_\_\_\_Демидов Е. С

Рецензент (ы) \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой проф. \_\_\_\_\_Павлов Д.А.

**Программа одобрена** на заседании методической комиссии физического факультета от \_\_\_\_\_2022 года, протокол № б/н