

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Беспалов Владимир Александрович
Должность: Ректор МИЭТ
Дата подписания: 01.09.2023 15:02:19
Уникальный программный ключ:
ef5a4fe6ed0ffdf3f1a49d6ad1b49464dc1bf7354f736876c810de882188b502

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе

И.Г. Игнатова
2020 г.
МП 

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
«Наноэлектроника»

Направление подготовки – 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
Направленность (профиль) – «Интегральная электроника и наноэлектроника»

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательных программ:

Компетенция ПК- 1 «Способен строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования» сформулирована на основе следующих профессиональных стандартов:

40.040 «Инженер в области разработки цифровых библиотек стандартных ячеек и сложнофункциональных блоков»

Обобщенная трудовая функция: А «Разработка электрических схем и характеристика стандартных ячеек библиотеки»

Трудовые функции: А/01.6 «Разработка электрических схем стандартных ячеек библиотеки»

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине	Задачи профессиональной деятельности	Индикаторы достижения подкомпетенций
ПК-1.НЭ «Способен строить и использовать квантовомеханические и классические модели описания элементов нанoeлектроники на основе полупроводниковых гетероструктур, туннельных структур, молекулярных и сверхпроводниковых систем»	<ul style="list-style-type: none">– анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования;– математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования;	Знания: <ul style="list-style-type: none">– определение гетероструктуры, типов гетероструктур, их применение в нанoeлектронике;– метода огибающей волновой функции для описания электронных состояний в гетероструктурах;– мезоскопических и квантовых явлений в наноразмерных структурах: наночастицах, нанокластерах, наноконтактах и нанопроволоках;– технологии молекулярно-пучковой эпитаксии для формирования гетероструктур, механизмов формирования пленок в молекулярно-лучевой эпитаксии, методики ионного травления, ионной микроскопии;– принципов сверхпроводниковой электроники, элементная база сверхпроводниковой электроники, перспективы развития;

		<p>Умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – рассчитывать параметры квантовых систем, необходимые для использования их в приборах и изделиях наноэлектроники; – выполнять оценку параметров мезоскопических систем; <p>Опыт деятельности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – решения практико-ориентированных задач наноэлектроники: расчёта параметров реальных мезоскопических систем, оценки параметров гетероструктур с целью использования их в лазерах;
--	--	---

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина входит в часть, формируемую участниками образовательных отношений Блока 1 «Дисциплины (модули)» образовательной программы.

Для её освоения требуются знания, умения и опыт деятельности, приобретаемые студентами при изучении следующих дисциплин: Математический анализ; Физика. Электричество и магнетизм; Физика. Атомная физика и строение вещества; Теория вероятностей и математическая статистика, Дифференциальные уравнения, Квантовая механика, Статистическая физика, Физические основы электроники, Физика конденсированного состояния.

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Курс	Семестр	Общая трудоёмкость (ЗЕ)	Общая трудоёмкость (часы)	Контактная работа			Самостоятельная работа (часы)	Промежуточная аттестация
				Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)		
4	7	5	180	32	16	16	80	Экз (36)

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ и наименование модуля	Контактная работа			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля
	Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)		
1. Нанoeлектроника	32	-	16	64	Опросы 1-4 Контроль решения практико-ориентированных задач.
2. Лабораторный практикум	-	16	-	16	Контроль, выполнение и защита лабораторных работ.

4.1. Лекционные занятия

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
1. Нанoeлектроника	1	2	Введение в нанoeлектронику. Основные разделы (направления) дорожной карты по электронике (Roadmap). Закон Мура. Представление информация в физических системах и какие физические величины и объекты можно использовать для кодирования информации. Гетеропереход и гетероструктура.
	2	2	Полупроводниковые гетероструктуры.
	3	2	Инженерия зонной структуры. Полупроводниковые гетероструктуры. Метод огибающей.
	4	2	Структуры с пониженной размерностью.
	5	2	Резонансное туннелирование и сверхрешетки, эпитаксиальные технологии.
	6	2	Квантовый эффект Холла.
	7	2	Механизмы целочисленного квантового эффекта Холла. Дробный квантовый эффект Холла.
	8	2	Квантовый эффект Холла и топологические эффекты в физике конденсированного состояния.
	9	2	Одноэлектроника. Кулоновская блокада туннелирования.
	10	2	Одноэлектронный транзистор и другие приборы на одноэлектронном туннелировании.

	11	2	Cross-bar архитектура. 3D интегральные микросхемы. Мемристоры.
	12	2	Молекулярная электроника.
	13	2	Доменные границы в полиацетилене. Солитоны. Носители спина без заряда, носители заряда без спина. Солитон как ненасыщенная связь и радикалы в химии. Поляроны в полиацетилене. Фуллерены, графен и нанотрубки. Перспектива создания полевых транзисторов на основе графена и парадокс Клейна. Способы создания запрещенной зоны в графене.
	14	2	Нанопластика, наноплазмоника и нанооптика.
	15-16	4	Перспективные направления – ДНК-компьютинг, квантовые интерференционные транзисторы. Квантовые эффекты в метрологии.

4.2. Практические занятия

№ модуля дисциплины	№ практического занятия	Объем занятий (часы)	Наименование занятия
1. Нанотроника	1	2	Решение задачи об определении числа квантовых состояний частицы в квантовой яме.
	2	2	Метод матриц распространения.
	3	2	Правило Вегарда.
	4	4	Классический и квантовый эффекты Холла.
	5	2	Одноэлектронное туннелирование.
	6	2	Мемристивность.
	7	2	Нахождение энергетического спектра графена, точка Дирака.
	8	2	Джозефсоновский переход.

4.3. Лабораторные работы

№ модуля дисциплины	№ лабораторной работы	Объем занятий (часы)	Наименование работы
2	1	4	Влияние параметров потока реагентов на скорость молекулярно-лучевой эпитаксии с аммиачным источником азота.
	2	4	Исследование механизмов формирования пленок в молекулярно-лучевой эпитаксии.

	3	4	Измерение скорости травления и получение минимально возможного реза фокусированным ионным пучком в зависимости от исследуемого материала.
	4	4	Получение максимального разрешения при сканировании в зависимости от основных параметров ионной микроскопии.

4.4. Самостоятельная работа студентов

№ модуля дисциплины	Объем занятий (часы)	Вид СРС
1	13	Работа с конспектом лекций.
	18	Работа с профессиональными базами данных научных статей: поиск информации по темам лекций.
	25	Решение практико-ориентированных задач.
	8	Подготовка к опросам 1-4
2	11	Изучение по источникам в профессиональных базах данных физики процессов, исследуемых в лабораторных работах, вывод формул из описания лабораторных работ, написание краткого конспекта основных теоретических сведений.
	3	Обработка полученных в лабораторном исследовании данных в виде массивов данных, таблиц и т.д.
	2	Подготовка отчёта по лабораторным работам

4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Не предусмотрены

5. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Учебно-методическое обеспечение для самостоятельной работы студентов в составе УМК дисциплины (ОРИОКС, <http://orioks.miet.ru/>):

Модуль 1

1. Теоретический материал по тематике лекций и семинарских заданий.
2. Методические указания студентам.
3. Список вопросов к опросам 1-4.
4. Список учебной литературы.

Модуль 2 «Лабораторный практикум»

1. Описания лабораторных работ
2. Список контрольных вопросов

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Литература:

1. Шука А.А. Нанoeлектроника : Учеб. пособие / А.А. Шука; Под ред. А.С. Сигова. - 3-е изд. - М. : Бинoм. Лаборатория знаний, 2015. - 344 с. - (Нанотехнологии). - URL: <https://e.lanbook.com/book/84102> (дата обращения: 16.11.2020).
2. Нанoeлектроника Ч. 1 : Введение в нанoeлектронику / Под ред. А.А. Орликовского. - М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 720 с.
3. Нанoeлектроника : теория и практика : Учебник / В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А. Уткина, А.Л. Данилюк. - 4-е изд., электронное. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. - 369 с. - (Учебник для высшей школы). - URL: <https://e.lanbook.com/book/84103> (дата обращения: 15.12.2020).

Периодические издания:

1. ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ = SEMICONDUCTORS / РАН, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе; Гл. ред. Р.А. Суpис. - СПб. : Наука, 1967 - . - URL: <http://journals.ioffe.ru/ftp/> (дата обращения: 20.10.2020). - Режим доступа: свободный.
2. УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК : Научный журнал / Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Редакция журнала УФН. - М. : РАН, 1918 - . - URL:<http://ufn.ru/> (дата обращения: 20.10.2020). - Режим доступа: свободный
3. ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ : Научный журнал / РАН, Ин-т физических проблем им. П.Л. Капицы. - М. : РАН, Наука, 1873 - . - URL:<http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index> (дата обращения: 20.10.2020). - Режим доступа: свободный
4. ПИСЬМА В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ = JETP Letters / Российская академия наук, Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН. - М. : ИКЦ Академкнига, 1965 - . - URL: <http://www.jetpletters.ac.ru/> (дата обращения: 20.10.2020). - Режим доступа: свободный
5. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS / American Institute of Physics. - USA : AIP, [б.г.]. - URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap> (дата обращения: 20.10.2020). - Режим доступа: по подписке МИЭТ.

7. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

1. NSM Archive. Characteristics and Properties = Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства: Электронный архив / webmaster Алексей Толмачев // ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН : [сайт]. - Москва, 1998-2001. - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html> (дата обращения: 27.11.2020).
2. SCOPUS : Библиографическая и реферативная база данных научной периодики : сайт. - URL: www.scopus.com/ (дата обращения: 27.11.2020). - Режим доступа: для авториз. пользователей МИЭТ
3. Web of Science [v.5.35]: сайт. - URL: <http://apps.webofknowledge.com> (дата обращения: 27.11.2020).

4. ФИПС : Информационно-поисковая система: сайт. - Москва, 2009 - . - URL: <https://www1.fips.ru/elektronnye-servisy/informatsionno-poiskovaya-sistema/index.php> (дата обращения: 27.11.2020)
5. MATLAB : [раздел сайта] // MathWorks : [сайт]. - 1994-2020. - URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html> (дата обращения: 27.11.2020)
6. WebCSD // The Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC) : [сайт]. - URL: <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/> (дата обращения: 27.11.2020). - Режим доступа: для авториз. пользователей МИЭТ
7. APS Physics: [сайт] / American Physical Society Sites. - URL: <https://www.aps.org/> (дата обращения: 20.10.2020). – Режим доступа: свободный.

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Освоение образовательной программы обеспечивается ресурсами электронной информационно-образовательной среды ОРИОКС <http://orioks.miet.ru>.

В ходе реализации обучения используются технологии смешанного обучения.

Применяется модель смешанного обучения «перевернутый класс». Учебный процесс начинается с постановки проблемного задания, для выполнения которого студент должен самостоятельно ознакомиться с материалом, размещенным в электронной среде. В аудитории проверяются и дополняются полученные знания с помощью дискуссий и решения практических задач. Работа поводится по следующей схеме: СРС (онлайновая предаудиторная работа с использованием внешнего или внутреннего ресурса) - аудиторная работа (семинар с представлением и обсуждением выполненной работы, решение практических задач с опорой на результаты самостоятельной работы) - обратная связь с обсуждением и подведением итогов.

Для взаимодействия студентов с преподавателем используются сервисы обратной связи: ОРИОКС «Домашние задания», электронная почта преподавателя, zoom-консультации.

В процессе обучения при проведении занятий и для самостоятельной работы используются внутренние электронные ресурсы в системе ОРИОКС.

Также используются **внешние электронные ресурсы:**

Лекция 1 Введение в нанoeлектронику. Основные разделы (направления) дорожной карты по электронике (Roadmap). Закон Мура. Представление информация в физических системах и какие физические величины и объекты можно использовать для кодирования информации. Гетеропереход и гетероструктура.

<https://youtu.be/ZtNtBc7OyPI>

Лекция 2 Полупроводниковые гетероструктуры

<https://youtu.be/g4vOsD6AyQU>

Лекция 3 Инженерия зонной структуры. Полупроводниковые гетероструктуры. Метод огибающей.

<https://youtu.be/ZmRThg2mNzY>

Лекция 4 Структуры с пониженной размерностью.

<https://youtu.be/M0jQowr14zM>

Лекция 5 Резонансное туннелирование и сверхрешетки, эпитаксиальные технологии.

<https://youtu.be/cq2YQVZNdCs>

Лекция 6 Квантовый эффект Холла.

<https://youtu.be/Ml8ziXBLzOA>

Лекция 7 Механизмы целочисленного квантового эффекта Холла. Дробный квантовый эффект Холла.

https://youtu.be/MoOAUjftP_Q

Лекция 8 Квантовый эффект Холла и топологические эффекты в физике конденсированного состояния.

<https://youtu.be/vMVQFxnbfmc>

Лекция 9 Одноэлектроника. Кулоновская блокада туннелирования.

<https://youtu.be/JF3gJe1cqC4>

Лекция 10 Одноэлектронный транзистор и другие приборы на одноэлектронном туннелировании.

<https://youtu.be/BvK2-7Qf8rM>

Лекция 11 Cross-bar архитектура. 3D интегральные микросхемы. Мемристоры.

<https://youtu.be/tMDd-OGhIeg>

Лекция 12 Молекулярная электроника.

<https://www.youtube.com/watch?v=e1pL4HmBiak>

Лекция 13 Доменные границы в полиацетилене. Носители спина без заряда, носители заряда без спина. Солитон как ненасыщенная связь и радикалы в химии. Поляроны в полиацетилене. Фуллерены, графен и нанотрубки. Перспектива создания полевых транзисторов на основе графена и парадокс Клейна.

<https://youtu.be/ziGvGqYuDlg>

Лекция 14 Нанопотоника, наноплазмоника и нанооптика.

<https://youtu.be/lFg9LsKTS40>

Лекция 15 Перспективные направления – ДНК-компьютинг, квантовые интерференционные транзисторы. Квантовые эффекты в метрологии.

<https://www.youtube.com/watch?v=TBUKhgDwRnY>

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы	Перечень программного обеспечения
Учебная аудитория	Мультимедийное оборудование	Операционная система Microsoft Windows от 7 версии и выше, Microsoft Office Professional Plus или Open Office, браузер (Firefox, Google Chrome); Acrobat reader DC
Лаборатория физики конденсирован-	Источник питания Agilent E3634A.	Операционная система Microsoft Windows от 7 версии и

ного состояния (ауд. 4130)	Вольтметр Agilent 34411A. Вольтметр Agilent 34405A. Источник питания Agilent E6545A. Источник питания Agilent E6545A. Осциллограф четырехканальный цифр.запом. Agilent DSO6054A.	выше, Microsoft Office Professional Plus или Open Office, браузер (Firefox, Google Chrome); Acrobat reader DC
Помещение для самостоятельной работы обучающихся	Компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду МИЭТ	Операционная система Microsoft Windows от 7 версии и выше, Microsoft Office Professional Plus или Open Office, браузер (Firefox, Google Chrome); Acrobat reader DC

10. ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ/ПОДКОМПЕТЕНЦИЙ

ФОС по подкомпетенции ПК-1.НЭ «Способен строить и использовать квантовомеханические и классические модели описания элементов нанoeлектроники на основе полупроводниковых гетероструктур, туннельных структур, молекулярных и сверхпроводниковых систем».

Фонд оценочных средств представлен отдельным документом и размещен в составе УМК дисциплины электронной информационной образовательной среды ОРИОКС// URL: <http://orioks.miet.ru/>.

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

11.1. Особенности организации процесса обучения

Посещение лекций, семинаров и лабораторных работ обязательно.

Дополнительной формой аудиторной работы являются консультации. Консультации проводятся лектором по расписанию, заранее согласованному со студентами.

Цель лекций, семинаров – обучение базовым знаниям и умениям с частичным охватом материала повышенного уровня. Освоение дисциплины на повышенном уровне в значительной степени осуществляется студентом самостоятельно. Лектор предоставляет студентам все необходимые для этого методические материалы, а также проводит для желающих еженедельные консультации. Тема консультации, как правило, повторяет тему лекции, которая читалась на неделе, предшествующей консультации. На консультациях обсуждаются задачи повышенного уровня сложности. На семинарах, проводимых в диалоговом режиме, студенты получают специальные знания для закрепления предмета. Каждая задача представляет собой миниатюрную исследовательскую проблему, а процесс её решения моделирует научно-исследовательскую работу. Как показывает практика, наибольшую трудность при решении представляет формализация условия, т. е. перевод информации с русского языка на язык математических законов, формул и отношений. В данном случае, для облегчения поиска ответа необходимо научить студентов отбрасывать

несущественные детали условия, пользоваться упрощенными моделями и схемами, опираться на известные физические законы.

На лабораторных работах студенты знакомятся с особенностями процесса выращивания гетероструктур с применением методов молекулярно-лучевой эпитаксии, процессами ионного травления и ионной микроскопией. Лабораторные работы выполняются не в учебных лабораториях, а в лабораториях, занятых изготовлением полупроводниковых структур, на основе которых создаются реально действующие приборы и устройства нанoeлектроники. При выполнении лабораторных работ в таких лабораториях студенты знакомятся с правилами техники безопасности, технологическим оборудованием в лабораториях, с технологическими операциями, которые можно выполнить на этом оборудовании, с особенностями работы на этом оборудовании. При выполнении лабораторной работы студент сначала должен пройти допуск, при котором проверяется его готовность к выполнению работы.

После проведения работы студенты проводят обработку полученных результатов и их анализ, на основе которого формулируются выводы. Затем осуществляется защита выполненной работы (индивидуально или в составе группы) и проставляется зачет по лабораторной работе. Защита включает предоставление отчета по работе, оформленного в соответствии с требованиями, изложенными в описании к работе, обоснование полученных результатов и сделанных выводов, а также ответы на контрольные вопросы.

Лабораторные работы проводятся в интерактивном режиме при работе в малых группах и диалоге с преподавателем с разбором конкретных ситуаций в процессе выполнения исследований и при защите полученных результатов.

Контроль решенных практико-ориентированных задач осуществляется на семинарах.

11.2. Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости студентов по дисциплине используется накопительная балльная система.

Баллами оценивается: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре (в сумме 48 баллов), активность в семестре (12 баллов) и сдача экзамена (40 баллов). Структура и сроки сдачи контрольных мероприятий доступны в журнале успеваемости в ОРИОКС, <http://orioks.miet.ru/>

РАЗРАБОТЧИКИ:

Профессор каф. КФН, д. ф.-м. н.  / А. А. Горбацевич /

Ст. преподаватель  / А. Е. Широков /

Рабочая программа дисциплины «Нанoeлектроника» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», направленности (профилю) «Интегральная электроника и нанoeлектроника» разработана на кафедре квантовой физики и нанoeлектроники (КФН) и утверждена на заседании кафедры 17 декабря 2020 года, протокол № 12

Заведующий кафедрой КФН  /А. А. Горбацевич/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рабочая программа согласована с выпускающей кафедрой ИЭМС

Заведующий кафедрой ИЭМС  / Ю. А. Чаплыгин/

Рабочая программа согласована с Центром подготовки к аккредитации и независимой оценки качества

Начальник АНОК  / И.М. Никулина /

Рабочая программа согласована с библиотекой МИЭТ

Директор библиотеки  / Т.П. Филиппова /