

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Беспалов Владимир Александрович  
Должность: Ректор МИЭТ  
Дата подписания: 01.09.2025 15:11:45  
Уникальный программный ключ:  
ef5a4fe6ed0ffdf3f1a49d6ad1b49464dc1bf7354f736

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  
«23» декабря 2020 г.  
М.П.

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Компьютерное моделирование полупроводниковых наноструктур»

Направление подготовки – 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Направленность (профиль) – «Квантовые приборы и нанoeлектроника»

## 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:** Разработка электрических схем и характеристика стандартных ячеек библиотеки

**Трудовые функции:** А/01.6 «Разработка электрических схем стандартных ячеек библиотеки», А/02.6 «Определение основных статических и динамических характеристик стандартных ячеек библиотеки»

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине	Задачи профессиональной деятельности	Индикаторы достижения подкомпетенций
<p>ПК-1.КМППНС «Способен объяснять сущность физических явлений и процессов в полупроводниковых структурах, производить анализ и делать количественные оценки параметров физических процессов»</p>	<p>- анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; - участие в планировании и проведении экспериментов по заданной методике, обработка результатов с применением современных информационных технологий и технических средств;</p>	<p><b>Знания:</b> - элементов языка TCAD; - основ работы в пакетах моделирования ISE TCAD и Sentaurus TCAD; - математических и физических моделей, лежащих в основе моделирующего пакета TCAD; - базовых уравнения для расчёта полупроводниковых устройств; - моделей зонной структуры полупроводника; <b>Умения:</b> - моделировать двухмерный полевой транзистор; - моделировать транспорт носителей; <b>Опыт деятельности:</b> - проведение моделирования полупроводниковых приборов в пакетах ISE TCAD и Sentaurus TCAD;</p>

## 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; Математическое моделирование.

## 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	3	108	-	32	16	60	За

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ и наименование модуля	Контактная работа			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля
	Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)		
1. Особенности работы в моделирующих пакетах TCAD	-	8	4	20	Контроль выполнения индивидуальных практических заданий к лабораторным работам 1-2.
					Защита лабораторных работ 1-2
2. Основные физические и математические модели пакетов TCAD	-	16	8	20	Контроль выполнения индивидуальных практических заданий к лабораторным работам 3-5.
					Защита лабораторных работ 3-5
3. Моделирование с учетом особенностей физических свойств полупроводниковых структур	-	8	4	20	Контроль выполнения индивидуальных практических заданий к лабораторным работам 6-8.
					Защита лабораторных работ 6-8

#### 4.1. Лекционные занятия

Не предусмотрены

#### 4.2. Практические занятия

№ модуля дисциплины	№ практического занятия	Объем занятий (часы)	Наименование занятия
1	1	2	Введение в язык программирования TCAD на примере программы Device Builder, основные компоненты пакета TCAD, моделирование одномерного, двухмерного p-n перехода.
	2	2	Моделирование двухмерного полевого транзистора, использование утилит пакета TCAD для визуализации результатов моделирования, описание структуры полупроводникового устройства с помощью программ MDRAW и SDE, генерация сетки в программе MESH., решение системы дифференциальных уравнений с помощью программы DESSIS, структура командного файла.
2	3-4	4	Математические и физические модели лежащие в основе моделирующего пакета TCAD.
	5-6	4	Базовые уравнения для расчёта полупроводниковых устройств: модели транспорта носителей, дрейфово-диффузионная модель, термодинамическая модель, гидродинамическая модель.
3	7	2	Особенности физических моделей заложенных в пакеты TCAD учитывающие характерные черты полупроводников, включение изменений в физические модели расчета полупроводниковых структур, такие как диоды, полевые транзисторы, биполярные плоскостные транзисторы, тиристоры и приборы с зарядовой связью, полупроводниковые гетероструктуры.
	8	2	Модели зонной структуры полупроводника, туннелирование через барьер Шоттки, туннелирование через гетеропереходы, модели подвижности, модель насыщения скорости в высоком поле, модель рекомбинации Шокли–Рида–Холла, межзонное туннелирование (модель Шенка).

### 4.3. Лабораторные работы

№ модуля дисциплины	№ лабораторной работы	Объем занятий (часы)	Наименование работы
1	1	4	Введение в язык программирования TCAD на примере моделирования 1D-диода с резким и плавным p-n переходом.
	2	4	Изучение особенностей сеточных алгоритмов для моделирования 2D структур, на примере полевого транзистора МОП.
2	3	4	Использование возможностей системы TCAD для моделирования потенциального профиля гетероструктур GaN/AlGaIn.
	4	4	Применение пакета ISE TCAD для расчета 2D и 3D электрических полей со сложной конфигурации электродов.
	5	4	Особенности использования пакета Sentaurus TCAD для моделирования 2D полупроводниковых структур.
3	6	4	Особенности использования пакета Sentaurus TCAD для моделирования 3D полупроводниковых структур.
	7	4	Моделирование транзистора на эпитаксиальной структуре GaAs со стоп – слоем.
	8	4	Моделирование транзисторов на основе структур типа САГИС.

### 4.4. Самостоятельная работа студентов

№ модуля дисциплины	Объем занятий (часы)	Вид СРС
1	8	Работа с учебно-методическими рекомендациями для практических занятий.
	12	Выполнение индивидуального практического задания к лабораторным работам №1-2: требуется разобраться в программных файлах TCAD, необходимых для выполнения лабораторных работ, как задаются элементы электрической цепи, при помощи которой моделируется прибор, где в командных файлах задаются параметры цепи. Обработка результатов моделирования лабораторных работ №1-2
2	4	Работа с учебно-методическими рекомендациями для практических занятий.
	16	Выполнение индивидуального задания к лабораторным работам №3-5: требуется разобраться в программных файлах TCAD, необходимых для

		выполнения лабораторных работ, как задаются элементы электрической цепи, при помощи которой моделируется прибор, где в командных файлах задаются параметры цепи. Обработка результатов моделирования лабораторных работ № 3-5
3	4	Работа с учебно-методическими рекомендациями для практических занятий.
	16	Выполнение индивидуального практического задания к лабораторным работам №6-8: требуется разобраться в программных файлах TCAD, необходимых для выполнения лабораторных работ, как задаются элементы электрической цепи, при помощи которой моделируется прибор, где в командных файлах задаются параметры цепи. Обработка результатов моделирования лабораторных работ № 6-8

#### 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. Методические указания для проведения практических занятий.
2. Методические указания студентам.
3. Список учебной литературы.
4. Описания лабораторных работ 1-2.
5. Список контрольных вопросов для лабораторных работ 1-2.

#### Модуль 2

1. Методические указания для проведения практических занятий.
2. Методические указания студентам.
3. Список учебной литературы.
4. Описания лабораторных работ 3-5.
5. Список контрольных вопросов для лабораторных работ 3-5.

#### Модуль 3

1. Методические указания для проведения практических занятий.
2. Методические указания студентам.
3. Список учебной литературы.
4. Описания лабораторных работ 6-8.
5. Список контрольных вопросов для лабораторных работ 6-8.

### 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

#### Литература:

1. Попков А.Ф. Физические основы магнетизма и спинового транспорта в устройствах магнитной электроники: Учеб. пособие / А. Ф. Попков, М. Н. Журавлев ; Министерст-

- во образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ". - М. : МИЭТ, 2014. - 260 с.
2. Горбачевич А.А. Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов по дисциплине "Физика конденсированного состояния" / А. А. Горбачевич ; М-во образования и науки РФ, МГИЭТ(ТУ). - М. : МИЭТ, 2011. - 32 с.
  3. Шалимова К.В. Физика полупроводников: Учебник / К. В. Шалимова. - 4-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2010. - 400 с.
  4. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: Учеб. пособие / В. И. Старосельский ; [Под ред. Ю.А. Парменова]. - М. : Юрайт : Высшее образование, 2011.
  5. Аплеснин С.С. Основы спинтроники: Учеб. пособие / С. С. Аплеснин. - 2-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2010. - 288 с.
  6. Лабораторный практикум по курсу "Моделирование в среде TCAD". Ч. 2 : Приборно-технологическое моделирование элементов интегральных схем / Е. А. Артамонова [и др.] ; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ"; Под ред. Т.Ю. Крупкиной. - М. : МИЭТ, 2012. - 140 с.
  7. Драгунов В.П. Основы нанозлектроники: Учеб. пособие для вузов / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - М. : Физматкнига : Логос, 2006. - 496 с.
  8. Основы нанозлектроники: Учеб. пособие для вузов / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - Новосибирск : НГТУ, 2004. - 496 с.

#### **Периодические издания**

1. ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ = SEMICONDUCTORS / РАН, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе; Гл. ред. Р.А. Сурис. - 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/](http://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 преаудиторная 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



## 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
Компьютерный класс (ауд. 42126)	Студенческих ПК 26 шт. Преподавательский ПК с мультимедийным оборудованием Доска классная Экран Video Spectra 175x234 LCD-ПРОЕКТОР Epson EMP-G5600 Настенная акустическая система Microlab Solo 4C ПК: Intel Core i5-3570K/8 Cb/250 Gb, Монитор-LCD Iiyama 19	Synopsys Inc
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.КМППНС «Способен объяснять сущность физических явлений и процессов в полупроводниковых структурах, производить анализ и делать количественные оценки параметров физических процессов».

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 семинаров и лабораторных работ обязательно. Дополнительной формой аудиторной работы являются консультации. Консультации проводятся преподавателем по расписанию, заранее согласованному со студентами.

Цель семинаров – обучение базовым знаниям и умениям с частичным охватом материала повышенного уровня. Освоение дисциплины на повышенном уровне в значительной степени осуществляется студентом самостоятельно. Преподаватель предоставляет студентам все необходимые для этого методические материалы, а также проводит для желающих еженедельные консультации. Тема консультации, как правило, повторяет тему семинара, который проводился на неделе, предшествующей консультации. На консультациях обсуждаются задачи повышенного уровня сложности, теоретический материал по теме. Безусловно, во время консультаций можно получить помощь и по всем вопросам базового уровня.

На семинарах, проводимых в диалоговом режиме, студенты получают специальные знания для закрепления предмета посредством разбора и решения модельных задач. 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.

Лабораторные работы проводятся в компьютерном классе с соблюдением техники безопасности. На защите индивидуального практического задания к лабораторной работе студенты предъявляют преподавателю результаты моделирования и отвечают на теоретические вопросы. С учётом качества ответов на теоретические вопросы, а также результатов, которые студент получил после математического моделирования, выставляется оценка за лабораторную работу.

Обязательным условием получения зачёта является защита всех лабораторных работ.

### 11.2. Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости студентов по дисциплине используется накопительная балльная система.

Баллами оцениваются: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре (суммарно 100 баллов). Структура и график контрольных мероприятий доступен в ОРИОКС// URL: <http://orioks.miet.ru/>.

#### РАЗРАБОТЧИКИ:

Доцент каф. КФН, к. ф.-м. н.


Ст. преподаватель каф. КФН



/Корнеев В. И. /

/Широков А. Е./

Рабочая программа дисциплины «Компьютерное моделирование полупроводниковых наноструктур» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», направленности (профилю) «Квантовые приборы и наноэлектроника» разработана на кафедре квантовой физики и наноэлектроники (КФН) и утверждена на заседании кафедры 17 февраля 2020 года, протокол № 12


Заведующий кафедрой КФН  /А. А. Горбацевич/

### ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

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 /