Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Беспалов Владимир Александрович
Должность: Ректор МИЭТ
Дата подписания: 05.02.2025 12:02:28
Уникальный программный ключ:
ef5a4fe6ed0ffdf3f1a49d6ad1b49464dc1bf7354f736d75b8b0ed3828b8d6d2

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
_____А.Г. Балашов
«13» сентября 2024 г.
М.П.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Математическое моделирование приборных структур»

Направление подготовки – 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»
Направленность (профиль) – «Программные средства САПР сверхбольших интегральных схем и систем на кристалле»

Программа разработана в Передовой инженерной школе
«Средства проектирования и производства электронной компонентной базы»

Москва 2024 г.

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательной програмым:

Компетенция ПК-2 «Способен проводить анализ и тестирование характеристик программных продуктов и/или аппаратных средств» сформулирована на основе профессионально стандарта 06.015 «Специалист по информационным системам».
Обобщенная трудовая функция: D – «Управление работами по сопровождению и проектами создания (модификации) ИС, автоматизирующих задачи организационного управления и бизнес-процессы»
Трудовая функция: D/16.7 – «Организационное и технологическое обеспечение проектирования и дизайна ИС»

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине	**Задачи профессиональной деятельности**	**Индикаторы достижения компетенций/подкомпетенций**
ПК-2.ММП Способен анализировать математические модели приборов с использованием САПР	Разработка и исследование математических моделей приборов с использованием САПР, анализ результатов моделирования	***Знания***: современных методов моделирования изделий микро- и наноэлектроники ***Умения***: анализировать и разрабатывать математические модели приборов в САПР Synopsys Quantum ATK ***Опыт***: моделирования изделий микро- и наноэлектроники в САПР Synopsys Quantum ATK

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

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

Входные требования к дисциплине – необходимы компетенции в области математического моделирования приборных структур наноэлектроники с использованием информационных систем.

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)		
2	3	3	108	16	32	-	60	Зачет

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ и наименование модуля	Контактная работа			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля
	Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)		
Модуль 1. Атомистический подход к моделированию наноустройств и тенденции их масштабирования.	6	4	-	12	Сдача лабораторных работ
Модуль 2. Элементная компонентная база современной наноэлектроники: мемристоры, МЭМС-/НЭМС-приборы и квантовые нано-сенсоры.	6	8	-	12	Сдача лабораторных работ

№ и наименование модуля	Контактная работа			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля
	Лекции (часы)	Лабораторные работы (часы)	Практические занятия (часы)		
Модуль 3. Квантовые вычисления и спинтроника: проектирование с использованием САПР Synopsys Quantum ATK.	4	4	-	12	Сдача лабораторных работ
Модуль 1-3	-	-	-	4	Выполнение и сдача практико-ориентированного задания

4.1. Лекционные занятия

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
1	1	2	Название лекции: Развитие современных методов нанолитографии. Содержание лекции: 1. Существующие и новые литографические методы формирования микро- и наноструктур: проекционная (контактная/бесконтактная) фотолитография, иммерсионная фотолитография в глубоком ультрафиолете (DUV), нанолитография в экстремальном ультрафиолете (EUV), рентгеновская нанолитография. 2. Понятие топологической нормы проектирования. Дифракция по типу Френеля и Фраунгофера, критерий Релея. Предельное разрешение литографии, глубина фокуса и числовая апертура. 3. Эволюция источников экспонирующего излучения: ртутные дуговые лампы, эксимерные лазеры, импульсные источники (лазерная плазма), рентгеновское излучение (плазма/синхротрон). 4. Аннулярное (внеосевое) освещение, фазосдвигающие фотошаблоны, коррекция эффекта близости (OPC). 5. Переход от архитектуры фон Неймана к квантовым и природоподобным технологиям: достижение суб-10 нм разрешения. 6. Введение в Synopsys Quantum ATK: моделирование наноустройств на проектных нормах от 100 нм и ниже.
	2	2	Название лекции: Современные тенденции масштабирования КМОП транзисторов. Наноэлектроника: переход к суб-10-нм проектным

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
			нормам. Содержание лекции: 1. Введение: технико-экономический закон Мура и эмпирический закон масштабирования Деннарда. Эволюция КМОП транзисторов. Приближение к атомарному масштабу в нанолитографии. 2. Принцип работы полевого КМОП транзистора (физико-математическая модель). 3. Тенденции масштабирования проектных норм: технологии MOSFET, Fin-FET, GAA-FET. 4. Современные суб-45 нм КМОП-транзисторы: GMT (Gate pitch-Metal pitch-Tiers) и LMC (Logic-Memory-interConnects) метрика. 5. Поколение GAA-FET транзисторов: переход к уровню 2 нм (Nanosheet GAA-FET, Forksheet GAA-FET, CFET). 6. Проблемы дальнейшего масштабирования КМОП транзисторов: принцип Ландауэра и правило Куми. 7. За пределами КМОП (beyond CMOS): эпоха квантовых и природоподобных технологий (одноэлектронные транзисторы, вакуумные нанотранзисторы, нейроморфная спинтроника).
	3	2	Название лекции: Моделирование наноэлектронных устройств: атомистический подход на базе программного пакета Synopsys Quantum ATK. Содержание лекции: 1. Электрон, волновая функция и атомные орбитали. 2. Уравнение Шрёдингера для молекулы. 3. Уравнение Шрёдингера и приближение Борна-Оппенгеймера для молекулярных систем. 4. Принцип Паули и метод Хартри-Фока. 5. Модель Томаса-Ферми/Томаса-Ферми-Дирака. 6. Теоремы Хоэнберга-Кона. 7. Теория функционала плотности (DFT-метод). 8. Уравнение Кона-Шэма. 9. Quantum ATK: описание возможностей программного пакета. 10. Примеры расчётов в Quantum ATK на базе атомистического подхода.
2	4	2	Название лекции: Мемристоры: переход к нейроморфным вычислениям и новой архитектуре компьютерных систем. Содержание лекции: 1. Наноэлектроника: перспективы перехода к нейроморфной архитектуре. 2. Нейроморфная реализация: электронные нейроны и синапсы. 3. Описание принципа работы мемристора как базового элемента для создания синапсов в нейроморфной ЭКБ. 4. Классы мемристоров: Red-Ox (Hewlett-Packard) мемристоры, мемристоры на изменении фазового состояния, органические мемристоры, мемристоры на чисто электронных эффектах

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
			(ферроэлектрический и спинтронный мемристор). 5. Применение Quantum ATK для решения нейроморфных задач.
	5	2	Название лекции: Технология МЭМС и НЭМС устройств для будущих применений. Содержание лекции: 1. Определение МЭМС. 2. Технологии создания МЭМС: микромеханическая обработка, мембранная МЭМС технология, процесс LIGA (рентгеновская литография). 3. Семейство МЭМС устройств: МЭМС сенсоры (гироскопы, акселерометры, магнетометры, гироскопы, датчики давления) и МЭМС актюаторы (электростатические, электротермические, пьезоэлектрические, электромагнитные, на сплавах с памятью формы). 4. Разновидности матриц микрозеркал (DMD). 5. Датчики силы (пьезоэлектрические, емкостные). 6. Микро- и наноинжекторы, МЭМС клапаны. 7. Гибкая МЭМС/НЭМС электроника. 8. Последние достижения МЭМС технологий: сверхкомпактная микроскопия высокого разрешения и биомедицинские датчики.
	6	2	Название лекции: Квантовые нано-сенсоры: современное состояние и пути развития. Содержание лекции: 1. Кубит: единица измерения информации в квантовых сенсорах. 2. Квантовый сенсор: критерии для квантовой системы, разновидности и области применения. 3. Квантовые сенсоры (группа 1): квантовые и атомные часы, гравиметры, градиометры на холодных атомах. 4. Квантовые сенсоры (группа 2): квантовые магнитометры на NV-центрах, квантовые СКВИД-магнитометры. 5. Квантовые сенсоры (группа 3): детекторы одиночных фотонов – лавинные фотодиоды и кремниевые фотоумножители.
3	7	2	Название лекции: Основы квантовых вычислений и квантовый компьютер. Содержание лекции: 1. Понятие квантовых вычислений и кубита. 2. Свойства и операции с кубитами для квантовых вычислений. 3. Квантовые вентили: однокубитные операции (вентили Паули X, Y, Z; вентили H, S, T, P, $S^{\dagger}$, $T^{\dagger}$, U1, U2, U3, R_X, R_Y, R_Z, I). 4. Квантовые вентили: двухкубитные операции (вентили CNOT, CZ, SWAP, TOFF). 5. Квантовые схемы. 6. Алгоритмы квантовых вычислений: алгоритм Шора, алгоритм Залки-Визнера, алгоритм Гровера, алгоритм Дойча-Йожи, алгоритм Абрамса-Ллойда, алгоритм Китаева. 7. Коррекция квантовых ошибок.

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
			8. Квантовые компьютеры: критерий Ди Винченцо. 9. Современные технологии для создания квантовых компьютеров. 10. Разновидности элементной базы квантовых компьютеров: сверхпроводящие Джозефсоновские переходы, ионы в квантовых ловушках, оптические элементы, топологические кубиты. 11. Квантовые вычисления на примере IBM Quantum Experience.
	8	2	Название лекции: Спинтроника – новый путь развития наноэлектроники. Содержание лекции: 1. Понятие спина электрона и спин-поляризованный транспорт. 2. Новые технологии за пределами закона Мура. 2. Магниторезистивные эффекты спинтроники для магнитометрии: AMR, GMR, TMR, GMI. 3. Спин-поляризованный перенос вращательного момента (STT): описание эффекта в магнитных гетероструктурах. 4. Спин-орбитальный перенос вращательного момента (SOT): описание эффекта в магнитных гетероструктурах. 5. Типы спинтронных устройств: память (MRAM, STT-MRAM, SOT-MRAM), микроволновые генераторы/детекторы, спиновые диоды. 6. Нейроморфная спинтроника. 7. Развитие спинтроники: текущий уровень и будущие разработки.

4.2. Практические занятия

Не предусмотрены

4.3. Лабораторные работы

№ модуля дисциплины	№ лабораторной работы	Объем занятий (часы)	Наименование работы
1	1	4	Введение в атомистическое моделирование на базе Synopsys QATK: интерфейс программы и основные модули. Расчёт электронного транспорта в структуре Zn-ZnO-Zn.
2	2	4	Атомистическое моделирование кремниевого p-n перехода на основе различных квантово-механических подходов: полуэмпирического метода Слейтера-Костера, обобщенного градиентного приближения (GGA) и мета-обобщенного градиентного приближения (MGGA).
	3	4	Атомистическое моделирование кремниевого полевого

№ модуля дисциплины	№ лабораторной работы	Объем занятий (часы)	Наименование работы
			транзистора с нанопроволокой (Gate-All-Around). Расчёт зонной структуры Si (на базе решателей DFT-GGA, DFT-MGGA и расширенного метода Хюккеля), анализ вариации проводимости транзистора с напряжением на затворе.
3	4	4	Атомистическое моделирование спинового транспорта в структуре магнитного туннельного перехода Fe-MgO-Fe. Расчёт коэффициента прохождения и плотности электронных состояний для различной конфигурации спинов, оценка величины туннельного магниторезистивного эффекта и амплитуды переносимого электронами спинового вращательного момента.

4.4. Самостоятельная работа студентов

№ модуля дисциплины	Объем занятий (часы)	Вид СРС
1	6	Изучение учебно-методических материалов по атомистическому моделированию приборов наноэлектроники
	6	Подготовка к лабораторным работам
2	6	Изучение учебно-методических материалов по атомистическому моделированию приборов наноэлектроники
	6	Подготовка к лабораторным работам
3	6	Изучение учебно-методических материалов по атомистическому моделированию приборов наноэлектроники
	6	Подготовка к лабораторным работам
1-3	4	Выполнение и сдача практико-ориентированного задания

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// URL: , http://orioks.miet.ru/):

- Сценарий по дисциплине
- Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ

- Ссылки на литературу по всей дисциплине
- Варианты практико-ориентированного задания
- Варианты заданий для дифференцированного зачета.

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Литература

1 QuantumATK: An Integrated Platform of Electronic and Atomic-Scale Modelling Tools / S. Smidstrup, T. Markussen, P. Vancraeyveld, al. et. - Текст : электронный // Journal of Physics: Condensed Matter. - [б.м.] : IOP Publishing, 1989 - . - 32 (2020). - DOI: https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007 (дата обращения: 10.12.2024). - Режим доступа: открытый.

2 Королев М.А. (Автор МИЭТ, ИЭМС). Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева ; Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - 4-е изд., электронное. - М. : Бином. Лаборатория знаний, 2020. - 400 с. - URL: https://e.lanbook.com/book/151589 (дата обращения: 11.10.2024). - ISBN 978-5-00101-814-8

3 Королев М.А. (Автор МИЭТ, ИЭМС). Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 2. Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования / М.А. Королев, др.] [и ; Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. - 422 с. - Изд. выполнено в рамках инновац. образоват. программы МИЭТ "Соврем. проф. образование для рос. инновац. системы в области электроники". - ISBN 978-5-94774-583-2; 978-5-94774-585-6 : 164-45; 265-00, 1000 экз.

4 Бутырская, Е. В. Компьютерная химия**:** основы теории и работа с программами Gaussian и GaussView / Е. В. Бутырская. - Москва : СОЛОН-Пресс, 2011. - 224 с. - (Библиотека студента). - URL: https://e.lanbook.com/book/13803 (дата обращения: 10.12.2024). - ISBN 978-5-91359-095-4. - Текст : электронный.

Нормативная литература

Не требуется

Периодические издания

1 ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЭЛЕКТРОНИКА [Текст] : Научно-технический журнал / М-во образования и науки РФ; МИЭТ; Гл. ред. Ю.А. Чаплыгин. - М. : МИЭТ, 1996 -. -

7. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

1. IEEE/IET Electronic Library (IEL) [Электронный ресурс] = IEEE Xplore : Электронная библиотека. - USA ; UK, 1998-. - URL: https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp (дата обращения : 10.01.2024). - Режим доступа: из локальной сети НИУ МИЭТ в рамках проекта «Национальная подписка»
2. Лань : Электронно-библиотечная система Издательства Лань. - СПб., 2011-. - URL: https://e.lanbook.com (дата обращения: 10.01.2024). - Режим доступа: для авторизированных пользователей МИЭТ
3. Юрайт : Электронно-библиотечная система : образовательная платформа. - Москва, 2013 - . - URL: https://urait.ru/ (дата обращения : 10.01.2024); Режим доступа: для авторизированных пользователей МИЭТ.
4. eLIBRARY.RU : Научная электронная библиотека: сайт. - Москва, 2000 -. - URL: https://www.elibrary.ru/defaultx.asp (дата обращения: 10.01.2024). - Режим доступа: для зарегистрированных пользователей

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В ходе реализации дисциплины используется **смешанное обучение**, в основе которого лежит интеграция технологий традиционного и электронного освоения компетенций, в частности за счет использования онлайн тестирования, взаимодействие со студентами в электронной образовательной среде.

Освоение образовательной программы обеспечивается ресурсами электронной информационно-образовательной среды ОРИОКС.

Для взаимодействия студентов с преподавателем используются сервисы обратной связи: раздел ОРИОКС «Домашние задания», электронная почта, сервисы видеоконференцсвязи, социальные сети.

В процессе обучения при проведении занятий и для самостоятельной работы используются **внутренние электронные ресурсы** в формах тестирования в ОРИОКС и MOODLe.

При проведении занятий и для самостоятельной работы используются **внешние электронные ресурсы** в формах:

внешних онлайн-курсов: https://teach-in.ru/course/quantum-chemistry, https://www.udemy.com/course/quantum-atk-software-learning-from-atom-to-device/, https://www.coursera.org/learn/density-functional-theory, ,

электронных компонентов сервисов: https://docs.quantumatk.com/tutorials, https://forum.quantumatk.com/, https://www.youtube.com/@SynopsysQuantumATK.

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	Компьютер с мультимедийным оборудованием	Win pro от 7, Microsoft Office Professional Plus или Open Office, браузер (Firefox, Google Crome); Acrobat reader DC
Лаборатория	Компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду МИЭТ.	ОС Linux, Win pro от 7; Python v. 2.7 и выше; Microsoft Visual Studio; браузер (Firefox, Google Chrome); Acrobat reader DC Synopsys Quantum ATK
Помещение для самостоятельной работы	Компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду МИЭТ	Операционная система Microsoft Windows Microsoft Office браузер Acrobat reader DC

10. ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ/ПОДКОМПЕТЕНЦИЙ

ФОС по компетенции/подкомпетенции **ПК-2.ММП** «Способен анализировать математические модели приборов с использованием САПР».

Фонды оценочных средств представлены отдельными документами и размещены 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

Материал представлен в форме трех. модулей. В первом модуле рассматривается атомистический подход к моделированию наноустройств на базе САПР Synopsys Quantum ATK и описываются основные тенденции их масштабирования с применением различных литографических методов. Во втором модуле изучается элементная компонентная база современной наноэлектроники: мемристоры, МЭМС-/НЭМС-приборы и квантовые нано-

сенсоры. В третьем модуле рассматриваются квантовые вычисления и спинтронные приборы, а также их проектирование с использованием САПР Synopsys Quantum ATK.

Защита лабораторной работы проходит посредством проверки выполнения студентом всех задач лабораторного практикума и соответствующих знаний студента в области атомистического моделирования на базе САПР Synopsys Quantum ATK. Защита состоит из демонстрации студентом результатов моделирования в рамках лабораторной работы и ответа на уточняющие вопросы преподавателя.

Для закрепления полученных знаний и в качестве практической составляющей подготовки студентов, ими выполняются самостоятельные индивидуальные работы по тематике лабораторных работ. Самостоятельные работы могут проходить как аудиторно (в аудиториях для самостоятельной подготовки), так и дома. Самостоятельные работы включают в себя прохождение дополнительных лабораторных практикумов по освоению САПР Synopsys Quantum ATK, но без помощи преподавателя и выполняются каждым студентом индивидуально.

Критерием оценки самостоятельных работ является совокупность данных, реализованных и продемонстрированных в каждом конкретном случае.

Полученные знания на лекциях, а также на лабораторных работах, используются студентами при выполнении индивидуального задания, а также написании выпускных квалификационных работ. Опыт, полученный студентами при выполнении лабораторных работ, несомненно, пригодится при работе по специальности.

11.2. Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости студентов по дисциплине используется накопительная балльная система.

Баллами оцениваются: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре (в сумме 70 баллов) и сдача зачета (30 баллов).

По сумме баллов выставляется итоговая оценка по предмету. Структура и график контрольных мероприятий доступен в ОРИОКС// URL: http://orioks.miet.ru/.

РАЗРАБОТЧИКИ:

Доцент Института ИнЭл, к.ф.- м.н. _____/Г.Д. Дёмин/

Рабочая программа дисциплины «Математическое моделирование приборных структур» по направлению подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», направленность (профиль) «Программные средства САПР сверхбольших интегральных схем и систем на кристалле» разработана в Институте ИнЭл и утверждена на заседании Ученого совета Института ИнЭл 06.09 2024 года, протокол № 1

Директор Института ИнЭл _____/В.В. Лосев/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рабочая программа согласована с Передовой инженерной школой

Директор ПИШ _____ /А.Л. Переверзев /

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/