

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Беспалов Владимир Александрович

Должность: Ректор МИЭТ

Дата подписания: 01.09.2023 15:29:40

Уникальный программный ключ:

ef5a4fe6ed0ffdf3f1a49d6ad1b49464dc1bf7354f736d76e8f0bea802b8d802

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

«14» декабря 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Физика наноразмерных полупроводниковых структур»

Направление подготовки - 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»

Направленность (профиль) – «Проектирование и технология устройств интегральной микроэлектроники»

Москва 2020

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательных программ:

Компетенция ПК-2. «Способен определять цели, осуществлять постановку задач проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения, подготавливать технические задания на выполнение проектных работ» сформулирована на основе профессионального стандарта 40.040 «Инженер в области разработки цифровых библиотек стандартных ячеек и сложнофункциональных блоков»

Обобщенная трудовая функция Д «Разработка электрических схем, характеристика сложнофункциональных блоков (СФ-блоков)»

Трудовая функция Д/01.7 «Разработка электрической принципиальной схемы СФ-блока»

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине	Задачи профессиональной деятельности	Индикаторы достижения компетенций/подкомпетенций
ПК-2.ФНРППС Способен исследовать характеристики наноразмерных КМОП-приборов	определение цели, постановка задач проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения	Знает: - физику работы основных существующих и перспективных в будущем наноразмерных КМОП-приборов, возможности их дальнейшей миниатюризации, принципы и ограничения масштабирования, получения предельных параметров, пути дальнейшего развития и совершенствования существующих КМОП-наноструктур. - основные физические процессы в наноразмерных КМОП-транзисторах, математическое описание этих явлений, позволяющее проводить их моделирование. - достижения отечественной и зарубежной науки и техники в области разработки перспективных наноразмерных КМОП-структур. Умеет: - обоснованно выбирать математические модели и их параметры для описания физических процессов в

		наноразмерных КМОП-структурах. - применять полученные знания для объяснения принципов работы приборов и устройств кремниевой нанoeлектроники. Опыт деятельности: - по оценке возможности практической реализации наноразмерных КМОП приборов с предельно малыми размерами и современных тенденциях развития альтернативных конструктивно-технологических решений.
--	--	--

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

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

Входные требования - для успешного освоения дисциплины студент должен обладать компетенциями в следующих областях:

математика - дифференциальные уравнения, теория вероятностей и математическая статистика, уравнения математической физики;

физика - общая физика, квантовая механика и статистическая физика, физика твердого тела и полупроводников (кристаллография, зонная теория твердого тела, эффект поля);

физика полупроводниковых приборов (твердотельная электроника) – *p-n* переходы, полевые и биполярные приборы;

технология и маршруты создания интегральных схем.

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)		
1	1	144	4	16	-	16	76	Экз. (36)

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ и наименование модуля	Контактная работа			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля
	Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия		
М1. Принципы, ограничения и компромиссы масштабирования КМОП структур	4	2	-	4	Опрос
				2	Выступление на практическом занятии
М2. Расчет параметров и ВАХ nano-КМОП транзисторов	4	4	-	4	Опрос
				4	Выступление на практическом занятии
М3. Методы улучшения качества nano-КМОП транзисторов	4	10	-	4	Опрос
				4	Тест (рубежный контроль)
				10	Выступление на практическом занятии
М4. Перспективные nano-КМОП структуры	4	-	-	4	Опрос
				4	Тест (рубежный контроль)
				36	Контроль выполнения и сдача практического задания

4.1. Лекционные занятия

№ модуля дисциплины	№ лекции	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
М1	1	2	Основные тенденции развития нанoeлектроники. Закон Мура. Эволюция КМОП-транзистора. Основные проблемы миниатюризации. Проблема тепловыделения и отвода тепла. Проблемы при миниатюризации межсоединений.
	2	2	Принципы и ограничения масштабирования МОПТ. Методы масштабирования. Тенденции и компромиссы масштабирования. Перспективы масштабирования.
М2	3	2	Электростатика МОП-структуры. Пороговое напряжение. Плотность электронов в канале как функция поверхностного потенциала. Контроль порогового напряжения за счет профиля легирования подложки и работы выхода материала затвора. Полная емкость МОП-структуры. Учет падения напряжения в затворе и инверсионном слое.
	4	2	Вольтамперные характеристики МОПТ. Подпороговый размах напряжения. Простейшая модель ВАХ МОПТ. Механизмы насыщения тока канала. ВАХ МОП-транзистора с учетом насыщения дрейфовой скорости.
М3	5	2	Короткоканальные эффекты в МОПТ. Универсальная зависимость подвижности от эффективного электрического поля. Физические процессы в канале МОПТ. Повышение подвижности с помощью технологии напряженного кремния.
	6	2	Короткоканальные эффекты и электростатическое качество. Оптимизация структуры стока и истока. Эффект модуляции длины канала. Эффекты сильных электрических полей. Моделирование максимальных электрических полей в канале. Горячие носители. Методы борьбы с горячими носителями.
М4	7	2	Транзисторы технологии «кремний на изоляторе». Преимущества и различные конфигурации КНИ МОПТ. Физические процессы в КНИ МОПТ. Моделирование транзисторов КНИ технологий.
	8	2	Перспективные МОПТ с предельно малыми размерами. Совершенный МОПТ. Многозатворные МОПТ. Баллистический МОПТ. Токи утечки в нанoeлектронных структурах. Проблемы использования «high-K» диэлектриков. Разброс пороговых напряжений на одном чипе.

4.2. Практические занятия

№ модуля дисциплины	практического	Объем занятий (часы)	Краткое содержание
МЗ	1	2	Аналитический расчет короткоканального эффекта в МОПТ. Метод решения. Анализ короткоканального спада порогового напряжения. Короткоканальный подпороговый наклон и чувствительность к подложке.
МЗ	2	2	Метод трансформации. Расчет SCE и DIBL. Влияние глубины перехода. Влияние ККЭ на подпороговый размах. Правила «хорошего проектирования». Модель MASTAR.
М1	3	2	Масштабирование МОПТ. Методы масштабирования. Ограничения и проблемы масштабирования. Немасштабируемые явления.
М2	4	2	Проектирование КМОП. Пороговое напряжение. Подпороговый ток и статическая мощность рассеяния. Рабочий ток и быстродействие МОПТ. Тенденции изменения напряжения питания и порогового напряжения.
М2	5	2	Пороговое напряжение и профиль канала. Требования и тенденции профиля канала. Выбор порогового напряжения. Дельта-легирование. Контрлегирование канала. Латерально неоднородное легирование канала.
МЗ	6	2	Механические напряжения в полупроводниках. Использование напряженного кремния в МДП-транзисторах и КМОП-структурах. Способы введения напряжений в область канала МДПТ. Влияние напряжений на подвижность электронов и дырок. Влияние ориентации поверхности подложки и направления тянущего поля в канале относительно направления напряжения.
МЗ	7	2	Длина канала МОПТ. Физический смысл эффективной длины канала. Экстракция эффективной длины канала. Поверхностное удельное сопротивление в короткоканальных приборах. Влияние ККЭ.
МЗ	8	2	Паразитные элементы МОП транзисторов и КМОП схем. Сопротивление сток-исток. Паразитные емкости. R и C межсоединения. Масштабирование межсоединений.

4.3. Лабораторные работы

Не предусмотрены

4.4. Самостоятельная работа студентов

№ модуля дисциплины	Объем занятий (часы)	Вид СРС
M1	8	Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к лекциям. Контрольные вопросы к лекции №1,2. Получение задания на подготовку реферата (презентации). Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к практическим занятиям. Выполнение заданий на СРС к ПЗ № 3,4,5,6,7,8.
M2	18	Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к лекциям. Контрольные вопросы к лекции №3,4. Подбор литературы, перевод источников, написание реферата (презентации). Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к практическим занятиям. Задание на СРС и подготовка к интерактивному ПЗ № 1,2
M3	24	Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к лекциям. Контрольные вопросы к лекции №5,6. Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к практическим занятиям. Подготовка к рубежному контролю.
M4	18	Работа с рекомендованной литературой в соответствии с методическими указаниями к лекциям. Контрольные вопросы к лекции №7,8. Подготовка к рубежному контролю.
M1-3	8	Контрольные вопросы и задание на СРС к лекциям №1-8, ДЗ к ПЗ № 1-8, предъявление реферата (презентации).
M1-4	36	Выполнение практического 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, <http://orioks.miet.ru/>):

Методические указания студентам по изучению дисциплины «Физика наноразмерных полупроводниковых структур».

Модуль 1 Принципы, ограничения и компромиссы масштабирования КМОП структур

✓ Методические указания студентам по изучению дисциплины «Физика наноразмерных полупроводниковых структур».

- ✓ Тесты, вопросы для контроля усвоения модуля 1, контрольные вопросы к экзамену.
- Модуль 2** Расчет параметров и ВАХ nano-KMOП транзисторов
- ✓ Методические указания студентам по изучению дисциплины «Физика наноразмерных полупроводниковых структур».
 - ✓ Тесты, вопросы для контроля усвоения модуля 2, контрольные вопросы к экзамену.
- Модуль 3** Методы улучшения качества nano-KMOП транзисторов
- ✓ Методические указания студентам по изучению дисциплины «Физика наноразмерных полупроводниковых структур».
 - ✓ Тесты, вопросы для контроля усвоения модуля 3, контрольные вопросы к экзамену.
- Модуль 4** Перспективные nano-KMOП структуры
- ✓ Методические указания студентам по изучению дисциплины «Физика наноразмерных полупроводниковых структур».
 - ✓ Тесты, вопросы для контроля усвоения модуля 4, контрольные вопросы к экзамену.

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Литература

1. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : Учеб. пособие / В.И. Старосельский; [Под ред. Ю.А. Парменова]. - М. : Юрайт : Высшее образование, 2009. - 463 с.
2. Нанотехнологии в электронике. Вып. 2 / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - М. : Техносфера, 2013. - 688 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов = Physics of semiconductor devices / S.M. Sze. - Second edition - Bell laboratories, incorporated murray Hill, New Jersey : В 2-х кн.: Пер. с англ. Кн. 1 / С. Зи. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир, 1984. - 456 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов = Physics of semiconductor devices / S.M. Sze - Second edition - Bell laboratories, incorporated murray Hill, New Jersey : В 2-х кн.: Пер. с англ. Кн. 2 / С. Зи. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир, 1984.
5. Sakurai Takayasu. Fully-Depleted SOI CMOS Circuits and Technology for Ultralow-Power Applications / Sakurai Takayasu, Matsuzawa Akira, Douseki Takakuni. - Springer, 2006. - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-29218-2> (дата обращения: 19.09.2020)
6. Sverdlov V. Strain-Induced Effects in Advanced MOSFETs / V. Sverdlov. - Springer, 2011. - (Computational Microelectronics). - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-7091-0382-1> (дата обращения: 25.09.2020).
7. Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications / T. Ohba; Yosi Shacham-Diamand, Tetsuya Osaka, Madhav Datta, Takayuki Ohba, Editors. - Springer, 2009. - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-95868-2> (дата обращения: 27.09.2020).
8. Planar Double-Gate Transistor : From Technology to Circuit / Amara Amara, Olivier Rozeau, Editors. - Springer, 2009. - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-9341-8> (дата обращения: 27.09.2020)
9. Compact Modeling : Principles, Techniques and Applications / Gennady Gildenblat, Editors. - : Springer, 2010. - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-8614-3> (дата обращения: 27.09.2020)

10. FinFETs and Other Multi-Gate Transistors / Jean-Pierre Colinge, Editors. - Springer, 2008. - (Series on Integrated Circuits and Systems). - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-71752-4> (дата обращения: 27.09.2020)
11. El-Kareh B. Silicon Devices and Process Integration : Deep Submicron and Nano-Scale Technologies / B. El-Kareh. - Springer, 2009. - URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-69010-0> (дата обращения: 27.09.2020)
12. More than Moore : Creating High Value Micro/Nanoelectronics Systems / Guo Qi Zhang, Alfred Roosmalen, Editors. - Springer, 2009. - URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-75593-9> (дата обращения: 27.09.2020)
13. Predictive Technology Model for Robust Nanoelectronic Design / Cao Yu. - Springer, 2011. - URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-0445-3> (дата обращения: 27.09.2020)
14. Into The Nano Era : Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS / H.R. Huff, Editors. - Springer, 2009. - (Springer Series in Materials Science. Vol. 106). - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-74559-4> (дата обращения: 27.09.2020)
15. Leakage in Nanometer CMOS Technologies / Siva G. Narendra, Anantha Chandrakasan, Editors. - : Springer, 2006. - (Series on Integrated Circuits and Systems). - URL : <http://link.springer.com/book/10.1007/0-387-28133-9> (дата обращения: 27.09.2020)

Периодические издания

1. IEEE Transactions on Electron Devices. - USA : IEEE, [б.г.]. - URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=16> (дата обращения: 14.06.2020). - Режим доступа: по подписке МИЭТ
2. IEEE Electron Device Letters. - USA : IEEE, 1980. - URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=55> (дата обращения: 14.06.2020). - Режим доступа: по подписке МИЭТ
3. Известия вузов. Электроника : Научно-технический журнал / М-во образования и науки РФ; МИЭТ; Гл. ред. Ю.А. Чаплыгин. - М. : МИЭТ, 1996 - .
4. Нано- и микросистемная техника : ежемес. междисциплинарный теорет. и приклад. науч.-техн. журн. / РАН, Отделение информационных технологий и вычислительных систем. - М. : Новые технологии : Нано-микросистемная техника, 1999 - .
5. Микроэлектроника / РАН. - М. : ИКЦ Академкнига, 1972 - . - URL: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7900 (дата обращения: 30.09.2020). - Режим доступа: для зарегистрир. пользователей
6. Semiconductors = Физика и техника полупроводников. - Springer, [1997] - . - URL: <http://link.springer.com/journal/11453> (дата обращения: 14.06.2020)

7. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

1. eLIBRARY.RU : Научная электронная библиотека : сайт. - Москва, 2000 - . - URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp> (дата обращения: 30.09.2020). - Режим доступа: для зарегистрир. пользователей
2. SCOPUS : Библиографическая и реферативная база данных научной периодики : сайт. - URL: www.scopus.com/ (дата обращения: 30.09.2020). - Режим доступа: для авториз. пользователей МИЭТ

3. КонсультантПлюс : законодательство РФ: кодексы, ...: сайт. – Москва, 1997-2021. – URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 06.12.2020)
4. IEEE/IET Electronic Library (IEL) = IEEE Xplore : электронная библиотека. - USA ; UK, 1998 - . - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (дата обращения: 28.10.2020). - Режим доступа: из локальной сети НИУ МИЭТ в рамках проекта "Национальная подписка"

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В ходе реализации обучения используется смешанное обучение, сочетающее традиционные формы аудиторных занятий и взаимодействие в электронной образовательной среде.

В процессе обучения при проведении занятий и для самостоятельной работы используются **внутренние электронные ресурсы** (видеолекции, текстовые материалы лекций и практических занятий, указания к выполнению индивидуальных заданий, тестирование в электронной информационно-образовательной среды ОРИОКС <http://orioks.miet.ru>, а также **внешние электронные ресурсы**: <http://link.springer.com/book/> в электронной библиотеке МИЭТ.

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

Дисциплина может быть реализована в дистанционном формате. При дистанционном обучении проводятся online лекции и практические занятия по Skype и Zoom. Применение данных технологий позволяет осуществлять при необходимости более оперативное взаимодействие преподавателя и студента.

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений 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
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 от 7 версии и выше, Microsoft Office Professional Plus или Open Office, браузер (Firefox, Google Chrome); Acrobat reader DC

10. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ

ФОС по компетенции/подкомпетенции ПК-2.ФНРППС Способен исследовать характеристики наноразмерных КМОП-приборов.

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

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

11.1. Особенности организации процесса обучения

Изучение дисциплины состоит из контактной и самостоятельной работы. Основной формой контактной работы являются лекции и практические занятия. Их посещение обязательно. Дополнительно проводятся аудиторные или онлайн консультации. Их посещение необязательно. В течении семестра студент должен подготовить реферат на заданную тему, а также выполнить практическое задание, проверяющее способность ориентироваться в возможностях практической реализации наноразмерных КМОП приборов с предельно малыми размерами.

В самостоятельной работе рекомендуется использовать учебно-методические материалы, размещенные на сайте МИЭТ (<http://orioks.miet.ru/>), учебную литературу, ресурсы сети Интернет.

11.2. Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости студентов по дисциплине используется балльная накопительная система.

Баллами оцениваются: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре, активность в семестре (до 50 баллов) и сдача экзамена (50 баллов). По сумме баллов выставляется итоговая оценка по предмету.

Структура и график контрольных мероприятий доступен в ОРИОКС, <http://orioks.miet.ru/>).

Разработчик:

Профессор, к.т.н.



/ Ю.А. Парменов /

Рабочая программа дисциплины «Физика наноразмерных полупроводниковых структур» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» по направленности (профилю) «Проектирование и технология устройств интегральной наноэлектроники» разработана на кафедре ИЭМС и утверждена на заседании кафедры
26.11 2020 года, протокол № 5

Заведующий кафедрой  / Ю.А. Чаплыгин /

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 /