

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Институт физики

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института физики,
профессор

С.Б. Вениг

2021 г.



Рабочая программа дисциплины
**«Основы математического моделирования в твердотельной
электронике»**

Направление подготовки бакалавриата
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Профиль подготовки бакалавриата
«Физика и технология твердотельных электронных»
микро- и наноструктур»

Квалификация (степень) выпускника
Бакалавр

Форма обучения
очная

Саратов,
2021

Статус	ФИО	Подпись	Дата
Преподаватель-разработчик	Михайлов А.И.		20.10.2021
Председатель НМК	Скрипаль Ан.В.		22.10.2021
Заведующий кафедрой	Михайлов А.И.		20.10.2021
Специалист Учебно-управления			

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» является формирование у студентов комплекса знаний и умений построения и анализа математических моделей основных физических и технологических процессов твердотельной электроники, детальное изучение наиболее часто применяемых численных методов и овладение навыками их практического применения.

Задачами освоения дисциплины являются:

- освоение основных принципов математического моделирования процессов и систем;
- изучение численных методов, наиболее часто применяемых для решения математических задач твердотельной электроники;
- изучение и систематизация основных модельных представлений твердотельной электроники;
- овладение навыками формулировки прикладных математических задач, алгоритмизации и программирования, численного анализа математических моделей твердотельной электроники.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений, блока 1 «Дисциплины (модули)» учебного плана ООП бакалавриата и изучается студентами очной формы обучения Института физики СГУ, обучающимися по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» по профилю «Физика и технология твердотельных электронных микро- и наноструктур» в течение 8 учебного семестра. Материал дисциплины опирается на ранее приобретенные студентами знания, умения и владения, полученные в процессе освоения дисциплин «Введение в математические основы физики», «Математический анализ и ТФКП», «Аналитическая геометрия и линейная алгебра», «Теория вероятностей и математическая статистика», «Дифференциальные уравнения», «Механика», «Молекулярная физика», «Введение в специальность», «Электричество и магнетизм», «Квантовая механика», «Неорганическая химия», «Инженерная графика», «Компьютерная графика», «Кристаллография и кристаллофизика», «Физика полупроводников», «Электродинамика сплошных сред», «Технология материалов и структур электроники», «Физические основы твердотельной электроники», «Физика приборов на квантовых эффектах», «Введение в информационные технологии», «Оптические и электронные свойства материалов», «ЭВМ в физическом практикуме», «Компьютер в физической лаборатории», «Вычислительные методы в физике полупроводников», «Вычислительная практика» и подготавливает студентов к изучению в 8 семестре таких дисциплин, как «Твердотельная электроника», «Микроэлектроника и наноэлектроника», «Квантовая и оптическая электроника», а также ряда преддипломной практики.

3. Результаты обучения по дисциплине

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
ПК-1. Способен проводить математическую обработку результатов измерений с учетом аппаратных характеристик и условий измерений по данным протоколов измерений и вносить информацию в базы данных.	1.1_Б. ПК-1. Способен обрабатывать результаты измерений в соответствии с калибровочными параметрами аппаратуры и условиями измерений.	Знать: <ul style="list-style-type: none">▪ основные способы математической обработки теоретических и экспериментальных исследований и результатов измерений;▪ основные модельные представления твердотель-

		<p>ной электроники, основные принципы математического моделирования процессов и систем твердотельной электроники.</p> <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ проводить математическую обработку теоретических и экспериментальных исследований и результатов измерений; ▪ строить и анализировать математические модели основных физических и технологических процессов твердотельной электроники. <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ навыками математической обработки теоретических и экспериментальных исследований и результатов измерений; ▪ численными методами, наиболее часто применяемыми для решения математических задач твердотельной электроники; ▪ навыками формулировки прикладных математических задач, алгоритмизации и программирования, численного анализа математических моделей твердотельной электроники.
--	--	--

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						СР С	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)
			Лек	Лаб		Пр				
				Общая трудоемкость	Из них – практическая подготовка	Общая трудоемкость	Из них – практическая подготовка			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1.	Введение.	1	4			4		6		
2.	Численное решение систем линейных алгебраических уравнений.	1	4			4		5	Выполнение и отчет по 1 лаб. работе	

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)		
			Лек	Лаб		Пр				СРС
				Общая трудоемкость	Из них – практическая подготовка	Общая трудоемкость	Из них – практическая подготовка			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
3.	Численное решение систем нелинейных уравнений.	1	4			4		5		
4.	Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений.	8	4			4		5	Выполнение и отчет по 2 лаб. работе	
5.	Численное решение дифференциальных уравнений с частными производными.	8	4			4		5	Контрольная работа	
6.	Электродинамические модели твердотельной электроники.	8	4			4		5	Выполнение и отчет по 3 лаб. работе	
7.	Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах.	8	3			3		5	Выполнение и отчет по 4 лаб. работе	
8.	Математическое моделирование работы полупроводниковых приборов в электронных схемах.	8	3			3		5	Выполнение и отчет по 5 лаб. работе	
9.	Модели технологии твердотельной электроники.	8	2			2		5	Выполнение и отчет по 6 лаб. работе	
	Промежуточная аттестация, 36 час.	8							Экзамен	
	Итого:		32			32		44		
	Общая трудоемкость дисциплины		144							

Содержание дисциплины

1. Введение. Основные понятия и определения. Роль математики в современном мире и, в частности, в современном естествознании и технике. Значение ЭВМ для практического применения численных методов. Математическая модель и математическое моделирование. Четыре этапа математического моделирования. Общий вид блок-схемы алгоритма математического моделирования. Типы математических моделей (феноменологические, асимптотические, модели ансамблей). Детерминистические и стохастические модели. Математическое моделирование в твердотельной электронике; задачи твердотельной электроники, решаемые с помощью математического моделирования. Основные модельные представления твердотельной электроники.
2. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. Прямые и итерационные методы. Метод Гаусса. Метод прогонки. Уточнение решения как итерационный процесс. Общая блок-схема итерационных методов. Итерационный метод Гаусса–Зейделя. Сравнение метода Гаусса и метода Гаусса–Зейделя.
3. Численное решение систем нелинейных уравнений. Проблема нахождения нулевого приближения. Метод простых итераций. Методы спуска. Метод покоординатного спуска.
4. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Задача Коши и краевая задача. Метод Эйлера и его модификации. Метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Метод Рунге для повышения точности численного решения. Задача Коши для ОДУ высших

порядков и для систем ОДУ. Краевые задачи для ОДУ. Метод стрельбы. Метод конечных разностей для краевых задач.

5. Численное решение дифференциальных уравнений с частными производными (ДУЧП). Суть разностных схем для ДУЧП. Аппроксимация, сходимость и устойчивость разностной схемы. Разностные схемы для уравнений переноса, волнового уравнения, уравнения теплопроводности (диффузии), уравнения Пуассона (Лапласа).
6. Электродинамические модели твердотельной электроники. Уравнения электромагнитного поля в дифференциальной и интегральной форме и их особенности в приложении к задачам твердотельной электроники. Квазистационарное приближение.
7. Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Метод кинетического уравнения Больцмана. Гидродинамическое и локально-полевое приближение. Основные уравнения теории полупроводниковых приборов. Уравнение непрерывности и уравнение Пуассона. Граничные условия. Материальные соотношения для полупроводниковых сред (концентрации электронов и дырок, плотности электронного и дырочного токов, модели процессов генерации и рекомбинации, подвижности носителей заряда и т.п.).
8. Математическое моделирование работы полупроводниковых приборов в электронных схемах. Эквивалентные схемы полупроводниковых приборов. Уравнение Кирхгофа для анализа электронных схем с полупроводниковыми приборами.
9. Модели технологии твердотельной электроники. Математические модели основных технологических процессов (ионное легирование, диффузия примесей, термическое окисление, эпитаксия и др.).

5. Образовательные технологии, применяемые при освоении дисциплины

При реализации различных видов учебной работы (лекции, лабораторные занятия, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемное обучение;
- исследовательские методы в обучении;
- дискуссии.

Лекционные занятия проводятся в основном в традиционной форме. При проведении лекций занятий активно используются ПК и мультимедийный проектор.

При проведении практических занятий выполняются численные эксперименты на ЭВМ в компьютерном классе.

Перечень практических работ

1. Численное моделирование хода потенциала в контакте металла с полупроводником.
2. Математическое моделирование динамики горячих электронов в Ge в сильных постоянном и СВЧ электрических полях.
3. Построение сплайн-аппроксимации поле-скоростной характеристики n-GaAs.
4. Математическое моделирование процесса одномерной диффузии легирующей примеси из источника бесконечной мощности.
5. Математическое моделирование работы полупроводникового диода в колебательном контуре.
6. Математическое моделирование работы выпрямителя на полупроводниковом диоде.

Описания всех перечисленных практических работ имеются на кафедре физики полупроводников и выдаются студентам при проведении практических занятий.

Самостоятельная внеаудиторная работа студентов по дисциплине проводится в течение всего учебного семестра и заключается в чтении и изучении литературы, подготовке к лекциям, практическим занятиям, работе в компьютерном классе или библиотеке.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определяется главной целью (миссией) программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием дисциплины, и в целом в учебном процессе они должны составлять не менее 50 % аудиторных занятий. Занятия лекционного типа для соответствующих групп студентов не могут составлять более 50 % аудиторных занятий.

Условия обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья:

- предоставление инвалидам по зрению или слабовидящим возможностей использовать крупноформатные наглядные материалы;
- проведение индивидуальных коррекционных консультаций для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья;
- использование индивидуальных графиков обучения и индивидуальных консультаций;
- использование дистанционных образовательных технологий.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Самостоятельная работа студентов по дисциплине проводится в течение всего семестра и заключается в чтении и изучении литературы, подготовке к лекциям, практическим занятиям, к контрольной работе, в выполнении заданий лектора.

Рекомендуется:

- для качественного усвоения материала лекций разбирать вопросы, изложенные в каждой очередной лекции, до следующей, по непонятым деталям консультироваться у лектора, читать соответствующую литературу;
- при подготовке к выполнению и отчетам по практическим работам тщательно изучать описание работы, задавать уточняющие вопросы преподавателю и дежурному инженеру, иметь отдельную тетрадь по практическим занятиям, для выполнения заданий и оформления отчетов;
- при подготовке к контрольной работе пользоваться лекциями и рекомендованной литературой.

В ходе изучения дисциплины в часы лекционных занятий студенты выполняют контрольную работу.

При подготовке к контрольной работе необходимо использовать материал прочитанных лекций.

Контрольная работа.

Вариант А. Численные методы решения ОДУ.

Вариант Б. Шаблоны для численного решения основных уравнений математической физики.

При выполнении данной контрольной работы студент должен продемонстрировать знания численных методов решения ОДУ и принципов построения шаблонов и соответствующих алгоритмов численного решения основных уравнений математической физики.

Результаты выполнения контрольной работы учитываются при проведении промежуточной аттестации студентов.

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

Контрольные вопросы для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

1. Математическая модель и математическое моделирование. Четыре этапа математического моделирования.
2. Общий вид блок-схемы алгоритма математического моделирования. Типы математических моделей.

3. Задачи твердотельной электроники, решаемые с помощью математического моделирования. Основные модельные представления твердотельной электроники.
4. Метод Гаусса.
5. Метод прогонки.
6. Итерационный метод Гаусса–Зейделя.
7. Сравнение метода Гаусса и метода Гаусса–Зейделя.
8. Численное решение систем нелинейных уравнений. Проблема нахождения нулевого приближения. Метод простых итераций.
9. Методы спуска. Метод покоординатного спуска.
10. Численное решение ОДУ. Задача Коши и краевая задача. Метод Эйлера и его модификации.
11. Метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Метод Рунге для повышения точности численного решения. Задача Коши для ОДУ высших порядков и для систем ОДУ.
12. Краевые задачи для ОДУ. Метод стрельбы. Метод конечных разностей для краевых задач.
13. Суть разностных схем для дифференциальных уравнений с частными производными. Аппроксимация, сходимость и устойчивость разностной схемы.
14. Разностные схемы для уравнений переноса, волнового уравнения, уравнения теплопроводности (диффузии), уравнения Пуассона (Лапласа).
15. Уравнения электромагнитного поля и их особенности в приложении к задачам твердотельной электроники. Квазистационарное приближение.
16. Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Метод кинетического уравнения Больцмана. Гидродинамическое и локально-полевое приближение.
17. Основные уравнения теории полупроводниковых приборов. Уравнение непрерывности и уравнение Пуассона. Граничные условия.
18. Материальные соотношения для полупроводниковых сред (концентрации электронов и дырок, плотности электронного и дырочного токов, модели процессов генерации и рекомбинации, подвижности носителей заряда и т.п.).
19. Математическое моделирование работы полупроводниковых приборов в электронных схемах. Эквивалентные схемы полупроводниковых приборов. Уравнение Кирхгофа для анализа электронных схем с полупроводниковыми приборами.
20. Математические модели основных технологических процессов твердотельной электроники (ионное легирование, диффузия примесей, термическое окисление, эпитаксия и др.).

7. Данные для учета успеваемости студентов в БАРС

Таблица 1.1. Таблица максимальных баллов по видам учебной деятельности.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Семестр	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Самостоятельная работа	Автоматизированное тестирование	Другие виды учебной деятельности	Промежуточная аттестация	Итого
8	20	0	20	20	0	0	40	100

Программа оценивания учебной деятельности студента

8 семестр

Лекции

Посещаемость, активность работы в аудитории, правильность ответов при опросах, качество выполнения заданий лектора – от 0 до 20 баллов.

Лабораторные занятия

Не предусмотрены

Практические занятия

Посещаемость, отчёты по практическим работам – от 0 до 20 баллов.

Самостоятельная работа

Качество подготовки к лекционным и практическим занятиям, активность на занятиях, качество выполнения контрольной работы – от 0 до 20 баллов.

Автоматизированное тестирование

Не предусмотрено

Другие виды учебной деятельности

Не предусмотрены

Промежуточная аттестация по дисциплине «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» оценивается от 0 до 40 баллов и проводится в форме *экзамена*.

При проведении промежуточной аттестации в форме экзамена:

ответ на «отлично» оценивается от 35 до 40 баллов;

ответ на «хорошо» оценивается от 28 до 34 баллов;

ответ на «удовлетворительно» оценивается от 20 до 27 баллов;

ответ на «неудовлетворительно» оценивается от 0 до 19 баллов.

Таким образом, максимально возможная сумма баллов за все виды учебной деятельности студента в 8 семестре по дисциплине «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» составляет **100** баллов.

Таблица 2.2. Таблица пересчета полученной студентом суммы баллов по дисциплине в оценку.

86 - 100 баллов	«отлично»
70 - 85 баллов	«хорошо»
50 – 69 баллов	«удовлетворительно»
0 - 49 баллов	«неудовлетворительно»

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) литература:

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с. (в ЗНБ СГУ 12 экз.)
2. Бордовский Г.А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д.Р. Физические основы математического моделирования: учеб. пособие для студентов физ.-мат. специальностей вузов. - М. : Академия, 2005. - 315 с. (в ЗНБ СГУ 103 экз.)
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г. М. Численные методы: учеб. пособие; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. - 6-е изд. - М. : БИНОМ. Лаб. знаний, 2008. - 636 с. (в ЗНБ СГУ 110 экз.)
4. Рашиков В.И., Рошаль А.С. Численные методы решения физических задач: Учебное пособие. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2005. – 204 с. (в ЗНБ СГУ 11 экз.)

5. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. - 9-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2009. – 480 с. (в ЗНБ СГУ 134 экз.)
 6. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник. – 4-е изд., стер. - СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. - 390 с. (в ЗНБ СГУ 32 экз.)
 7. Шалимова К. В. Физика полупроводников [**Электронный ресурс**]: учебник. - 4-е изд., стер. - СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. – 390 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648. – ЭБС "ЛАНЬ".
 8. Ибрагимов И.М., Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. Основы компьютерного моделирования наносистем: Учебное пособие. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. – 376 с. (в ЗНБ СГУ 25 экз.)
 9. Формалев В.Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы: учеб. пособие; под ред. А.И. Кибзуна. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 398, [2] с. : (в ЗНБ СГУ 10 экз.)
 10. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с. (в ЗНБ СГУ 13 экз.)
 11. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 336 с. (в ЗНБ СГУ 30 экз.)
 12. Основы физики полупроводников [**Электронный ресурс**]: учебное пособие/ Зегря Г.Г., Перель В.И. –Электрон. текстовые данные. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 336 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12941>. – ЭБС IPR books.
 13. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с. (в ЗНБ СГУ 35 экз.)
 14. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов [**Электронный ресурс**]. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 488 с. – Режим доступа: ЭБС IPRbooks.
 15. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2007. – 408 с. (в ЗНБ СГУ 2 экз.)
- б) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:
1. Windows XP Prof
 2. Антивирус Касперского 6.0 для Windows Workstations
 3. Microsoft Office профессиональный 2010
 4. MathCad 14.0
 5. Каталог образовательных Интернет-ресурсов. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/window/>
 6. Зональная научная библиотека им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. – Режим доступа: <http://library.sgu.ru/>

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Занятия по дисциплине «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» проводятся в аудиториях, оснащенных компьютерной техникой, проекторами, измерительными приборами, лабораторным оборудованием, наглядными демонстрационными материалами, плакатами, соответствующих действующим санитарным и противопожарным нормам, а также требованиям техники безопасности при проведении учебных и научно-производственных работ.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Физика и технология твердотельных электронных микро- и наноструктур».

Автор: Михайлов А.И.

Программа разработана в 2019 г. и одобрена на заседании кафедры физики полупроводников 30 октября 2019 г., протокол № 3.

Программа актуализирована в 2021 г. и одобрена на заседании кафедры физики полупроводников от 20 октября 2021 года, протокол № 2.

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендуемая литература:

1. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / Под ред. П.В. Трусова. – М.: Логос, 2005. – 440 с.
2. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику: Учеб. пособие: Для вузов. – М.: Изд-во Моск. физ.-тех. ин-та, 1994. – 528 с.
3. Носов Ю.Р., Петросянц К.О., Шилин В.А. Математические модели элементов интегральной электроники. – М.: Сов. радио, 1976. - 304 с.
4. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. – М.: Мир, 1974. – 392 с.
5. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
6. Турчак Л.И. Основы численных методов. – М.: Наука, 2005. – 320 с.
7. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 2005. – 288 с.
8. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высш. школа, 1986. – 367 с.
9. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высш. школа, 1984. – 288 с.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. – М.: Мир, 1984. Кн. 1. – 456 с. Кн. 2. – 456 с.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 672 с. (в ЗНБ СГУ 1 экз.)
12. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНЕ. – М.: Мир, 1977. – 584 с.
13. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.