

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Факультет нано- и биомедицинских технологий

УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по учебно-методической работе,  
профессор

Е.Л. Елина

« 31 »

08

2016 г.



**Рабочая программа дисциплины**

Основы математического моделирования в твердотельной электронике

Направление подготовки бакалавриата

11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Профиль подготовки бакалавриата

«Приборы микро- и наноэлектроники, методы измерения микро- и наносистем»

Квалификация (степень) выпускника

Бакалавр

Форма обучения

очная

Саратов,  
2016

### **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 дисциплинам по выбору вариативной части блока 1 «Дисциплины (модули)» ООП бакалавриата и изучается студентами дневного отделения факультета nano- и биомедицинских технологий СГУ, обучающимися по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», в течение 8 учебного семестра. Материал дисциплины опирается на ранее приобретенные студентами знания, умения и навыки, полученные в процессе освоения дисциплин «Математика», «Введение в общую физику», «Механика и молекулярная физика», «Математический анализ», «Введение в специальность», «Инженерная графика», «Компьютерная графика», «Принципы расширения стандартных прикладных программ», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Информатика: средства и методы защиты информации», «Термодинамика», «Ядерная физика, физика атома и конденсированного состояния», «Электронные свойства кристаллов», «Физика полупроводников», «Квантовая механика», «Кристаллография и кристаллофизика», «Электродинамика сплошных сред» и находится в тесной взаимосвязи с изучаемыми в этом же семестре дисциплинами «Твердотельная электроника», «Микроэлектроника и наноэлектроника», «Квантовая и оптическая электроника».

### **3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» формируются следующие компетенции: ОК-7, ОПК-2..

ОК-7. Способность к самоорганизации и самообразованию.



ОПК-2. Способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат.

В результате освоения дисциплины обучающийся студент должен:

- знать основные модельные представления твердотельной электроники, основные принципы математического моделирования процессов и систем твердотельной электроники;
- уметь строить и анализировать математические модели основных физических и технологических процессов твердотельной электроники;
- владеть 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 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	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	
1.	Введение.	8	1,2	4			5	
2.	Численное решение систем линейных алгебраических уравнений.	8	3,4	4	5		5	Выполнение и отчет по 1 лаб. работе
3.	Численное решение систем нелинейных уравнений.	8	5,6	4			6	
4.	Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений.	8	7,8	4	5		6	Выполнение и отчет по 2 лаб. работе
5.	Численное решение дифференциальных уравнений с частными производными.	8	9,10	3			6	Контрольная работа
6.	Электродинамические модели твердотельной электроники.	8	10,11	3	5		5	Выполнение и отчет по 3 лаб. работе
7.	Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах.	8	12,13	4	5		5	Выполнение и отчет по 4 лаб. работе
8.	Математическое моделирование работы полупроводниковых приборов в электронных схемах.	8	14	2	5		5	Выполнение и отчет по 5 лаб. работе
9.	Модели технологии твердотельной электроники.	8	15	2	5		5	Выполнение и отчет по 6 лаб. работе
	Итого:	8		30	30		48	Зачет



## 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.).



### **Перечень лабораторных 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 лабораторных работ имеются на кафедре физики полупроводников и выдаются студентам при проведении лабораторных занятий.

### **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 лабораторных занятий выполняются численные эксперименты на ЭВМ в компьютерном классе.

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, лабораторным 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 лабораторным работам тщательно изучать описание работы, задавать уточняющие вопросы преподавателю и дежурному инженеру, иметь отдельную тетрадь по лабораторному практикуму, 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 зачета.

### **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. 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	20	0	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**

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

### **Практические занятия**

Не предусмотрены

### **Самостоятельная работа**

Качество подготовки к лекционным и лабораторным 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 зачета.

При проведении промежуточной аттестации в форме зачета:  
ответ на «зачтено» оценивается от 24 до 40 баллов;  
ответ на «не зачтено» оценивается от 0 до 23 баллов;

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

Пересчет полученной студентом суммы баллов по дисциплине «Основы математического моделирования в твердотельной электронике» в зачёт осуществляется в соответствии с Таблицей 2.

Таблица 2. Таблица пересчета полученной студентом суммы баллов по дисциплине в зачет.

60 баллов и более	«зачтено»
меньше 60 баллов	«не зачтено»



## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература:

1. 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. **Гриф МО РФ** (в ЗНБ СГУ 109 экз.)
2. Численные методы: учебное пособие / Н. Н. Калиткин ; под ред. А. А. Самарского. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. - 586, [6] с. **Гриф НМС МО РФ** (в ЗНБ СГУ 53 экз.)
3. 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.)

### б) дополнительная 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. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем [**Электронный ресурс**] : учебное пособие / М. Н. Петров, Г. В. Гудков. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2011. - 463 с. - ЭБС «ЛАНЬ» **включена в заказ**
3. 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.)
4. Ращиков 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. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник. - 4-е изд., стер. - СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. - 390 с. (в ЗНБ СГУ 43 экз.)
6. 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](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648). - ЭБС "ЛАНЬ".
7. Самарский А. А. Введение в численные методы : учеб. пособие для вузов. - 5-е изд., стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2009. - 288 с. (в ЗНБ СГУ 46 экз.)
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 26 экз.)
9. Основы компьютерного моделирования наносистем [**Электронный ресурс**] / И. М. Ибрагимов, Ю. Ф. Назаров [и др.]. - Москва : Лань, 2010. - 376 с. - ЭБС "ЛАНЬ"
10. 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. **Гриф НМС МО РФ** (в ЗНБ СГУ 10 экз.)



11. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 496 с. **Гриф МО РФ** (в ЗНБ СГУ 5 экз.), 2003 (13 экз.)
12. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 336 с. (в ЗНБ СГУ 30 экз.)
13. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с. (в ЗНБ СГУ 35 экз.)

*Легко*

в) 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. Турчак Л.И. Основы численных методов. – М.: Наука, 2005. – 320 с.
6. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2007. – 408 с. (в ЗНБ СГУ 2 экз.)
7. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высш. школа, 1986. – 367 с.
8. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высш. школа, 1984. – 288 с.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. – М.: Мир, 1984. Кн. 1. – 456 с. Кн. 2. – 456 с.
10. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 672 с. (в ЗНБ СГУ 1 экз.)
11. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНЕ. – М.: Мир, 1977. – 584 с.
12. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.

г) 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>
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» и профилем «Приборы микро- и наноэлектроники, методы измерения микро- и наносистем».

Автор, профессор  Михайлов А.И.

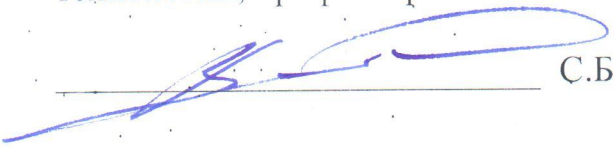
Программа разработана в 2011 г. (одобрена на заседании кафедры физики полупроводников от 1 февраля 2011 г., протокол № 7).

Программа актуализирована в 2016 г. (одобрена на заседании кафедры физики полупроводников от 28 марта 2016 г., протокол № 9).

Зав. кафедрой физики полупроводников,  
профессор

 А.И. Михайлов

Декан факультета нано- и биомедицинских  
технологий, профессор

 С.Б. Вениг