

Институт физики микроструктур РАН —  
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИФМ РАН

\_\_\_\_\_ З.Ф.Красильник

"11" апреля 2016 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**Основы полупроводниковой технологии**

Направление подготовки

*11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»*

Направленность (профиль) программы

*05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»*

Квалификация (степень) выпускника

*исследователь - преподаватель, исследователь*

Форма обучения

*очная*

Нижний Новгород

2016

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Основы полупроводниковой технологии» является обязательной дисциплиной вариативной части программы 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики и математики, ряда разделов теоретической физики (электродинамика, статистическая физика), физики твердого тела, твердотельной электроники. Данный курс является базой для выполнения аспирантами исследований в области технологии полупроводниковых наноструктур.

Дисциплина изучается на 1 курсе (1 семестр).

### Целями освоения дисциплины являются:

- ознакомление аспирантов с уровнем развития современной полупроводниковой технологией, используемыми методами и подходами, с основными проблемами и задачами, стоящими на пути дальнейшего развития полупроводниковой микро и наноэлектроники;
- формирование у аспирантов компетенций программы 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах», в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

## 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть следующими компетенциями результатами обучения по дисциплине:

Код компетенции	Результаты освоения ООП Содержание компетенций	Перечень результатов планируемых обучения по дисциплине
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	<b>ЗНАТЬ:</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях. <b>УМЕТЬ:</b> проводить анализ литературных данных в рамках поставленной исследовательской (практической, образовательной) задачи, выявлять основные вопросы и проблемы, существующие в современной науке; при решении исследовательских и

		<p>практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b>  навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p>
<p><b>ОПК-1</b></p>	<p>владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b>  теоретические основы организации научно-исследовательской деятельности;  методы сбора информации для решения поставленных исследовательских задач;  методы анализа данных, необходимых для проведения конкретного исследования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b>  выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования  планировать, организовывать и проводить научно-исследовательские и производственно-технические исследования с применением современной аппаратуры, оборудования и компьютерных технологий;  самостоятельно выполнять теоретические, экспериментальные и вычислительные физические исследования при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b>  навыками поиска (в том числе с использованием информационных</p>

		<p>систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований;</p> <p>навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов;</p> <p>навыками работы на современной аппаратуре и оборудовании для выполнения физических исследований;</p> <p>способностью самостоятельно с применением современных компьютерных технологий; анализировать, обобщать и систематизировать результаты физических работ.</p>
<b>ПК-1</b>	<p>способность самостоятельно проводить научные исследования в области твердотельной электроники и применять полученные результаты для решения практических задач</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области твердотельной электроники.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области твердотельной электроники.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области твердотельной электроники и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.</p>
<b>ПК-2</b>	<p>способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> Базовые законы современной физики и их взаимосвязь, тенденции развития физики в обозримой перспективе, основные проблемы, стоящие перед современной физикой, а также предлагаемые средства их решения.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> понимать суть явлений и</p>

		<p>процессов, изучаемых физикой.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>
<b>ПК-3</b>	<p>способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области твердотельной электроники.</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b></p> <p>основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b></p> <p>выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>навыками сбора, обработки, анализа и систематизации научных данных;</p> <p>навыками статистического анализа экспериментальных данных;</p> <p>навыками аналитических и численных аппроксимаций функций.</p>

**3. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам занятий) и на самостоятельную работу обучающихся**

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 3 зачетных единиц (ЗЕ), 108 часов.

**3.1. Объем дисциплины по видам учебных занятий (в часах)**

<b>Вид учебной работы</b>	<b>Всего часов</b>
Общая трудоемкость дисциплины	108
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего)	36
Аудиторная работа (всего):	36
в том числе:	
Лекции	18
Практические занятия	18
Самостоятельная работа обучающихся (всего)	72
<b>Вид итогового контроля</b>	<b>Зачет</b>

### 3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)

№	Раздел дисциплины	Всего	Контактная работа		Самостоятельная работа
			Лекционные занятия	Практические занятия	
1	Основные тенденции и проблемы развития электроники	24	4	4	16
2	Основные материалы современной полупроводниковой микро и нанoeлектроники	24	4	4	16
3	Основные этапы формирования микросхем	24	4	4	16
4	Использование SiGe гетероструктур в современной микро- и нанoeлектроники	18	3	3	12
5	Новые материалы полупроводниковой микроэлектроники	18	3	3	12
<b>Дисциплина в целом</b>		<b>108</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>

### 3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

№	Наименование раздела дисциплины	Содержание
1	Основные тенденции и проблемы развития электроники	История развития полупроводниковой технологии, ее современный уровень развития, основные физические проблемы, стоящие на пути ее развития и предлагаемые пути их решения.
2	Основные материалы современной полупроводниковой микро и нанoeлектроники	Параметры, достоинства и недостатки основных материалов микроэлектроники. Сравнительный анализ физических свойств различных полупроводников. Получение монокристаллов полупроводников и проводниковых подложек.
3	Основные этапы формирования микросхем	Окисление полупроводников. Применение диэлектрических пленок в технологии интегральных схем. Жидкостное и плазмо-химическое травление. Методы осаждения диэлектрических и металлических пленок. Оптическая, рентгеновская и электронная литографии. Диффузионное легирование полупроводников. Ионная имплантация. Эпитаксия и проблемы эпитаксии полупроводниковых гетероструктур. Типовой технологический маршрут формирования интегральных схем на основе кремния.
4	Использование SiGe гетероструктур в	Физические основы использования SiGe гетероструктур для увеличения быстродействия кремниевых полевых и

	современной микро- и нанoeлектроники	биполярных транзисторов. Особенности формирования SiGe гетероструктур. Применение SiGe гетероструктур в кремниевой оптоэлектронике.
5	Новые материалы полупроводниковой микроэлектроники	Краткая характеристика новых полупроводниковых материалов, используемых в полупроводниковой технологии. Преимущества этих материалов по сравнению с ранее используемыми полупроводниками. Проблемы на пути использования новых материалов.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

#### 4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Аспиранты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, подготовку семинаров, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, аспиранты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классах экспертов и специалистов в области современных задач полупроводниковой технологии.

#### 5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

В курсе запланировано на самостоятельную работу аспирантов 72 часа (67 % общего объема). Самостоятельная работа аспирантов является одним из видов учебных занятий, выполняется по заданию преподавателя индивидуально и без его непосредственного участия. Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних задач с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится при подготовке к зачету по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

## **6. Фонд оценочных средств по дисциплине**

### ***6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы***

1. Основные материалы современной полупроводниковой микро и нанoeлектроники. Получение монокристаллических слитков кремния методом безтигельной зонной плавки и методом Чохральского.
2. Подготовка полупроводниковых пластин. Кинетика жидкостного травления полупроводников. Основные параметры пластин.
3. Методы получения диэлектрических пленок. Термическое окисление. Кинетика термического окисления кремния. Осаждение диэлектрических пленок из газовой фазы.
4. Методы формирования топологии микросхем. Оптическая, электронно-лучевая и рентгеновская литографии. Достоинства и ограничения различных литографических методик.
5. Методы травления в современных полупроводниковых технологиях. Достоинства и недостатки различных методов.
6. Диффузионное легирование полупроводников. Профили распределения легирующей примеси. Методы проведения диффузии. Основные примеси, используемые для легирования Si.
7. Маскирующие свойства диэлектрических слоев. Ионное легирование полупроводников. Ядерная и электронная тормозные способности. Распределение примеси при ионной имплантации. Радиационные дефекты.
8. Основные представления о методе молекулярно-пучковой эпитаксии. Вакуумные условия, необходимые для проведения МПЭ.
9. Механизмы эпитаксиального роста. Основные процессы, происходящие на ростовой поверхности при эпитаксии.
10. Эпитаксия из газовых и металлоорганических соединений. Методы контроля параметров тонких пленок при эпитаксии.
11. Особенности эпитаксии гетероструктур. Пластическая и упругая релаксация упругих напряжений. Критическая толщина. Получение буферных слоев. Процессы самоорганизации.
12. Использование SiGe гетероструктур в современной микроэлектронике. Гетероструктурные биполярные транзисторы.
13. Увеличение подвижности носителей заряда в Si/SiGe гетероструктурах. Проблемы роста напряженных Si/Ge гетероструктур.
14. Новые материалы в полупроводниковых технологиях: их достоинства, основные проблемы, связанные с их использованием и пути их решения.



15. Тенденции и проблемы развития современной микро и наноэлектроники.

**6.2. Описание шкал оценивания**

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания изученного материала;
- способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовки</b>
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
Хорошо	В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.
Удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний,

	<p>допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>

## 7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

### а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том V. «Статистическая физика. Часть 1». М.: Наука. 1976.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., курс "Теоретическая физика", Том X. «Физическая кинетика». М.: Наука. 1979.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г., «Физика полупроводников». М.: Наука 1977.
4. Учебник по курсу «Технология СБИС» (<http://sbis.karelia.ru/>).

### б) дополнительная литература:

1. Ансельм А.И., «Введение в теорию полупроводников». М.: Наука 1978.
2. Ю П., Кардона М., «Основы физики полупроводников». М. Физматлит 2002.
3. Зеегер К., «Физика полупроводников», М.: Мир 1977.
4. Барыбин А.А. «Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы». М.: Физматлит, 2006
5. Успехи физических наук (<https://ufn.ru/ru/>)
6. Reviews of Modern Physics (RMP) (<https://journals.aps.org/rmp/>)
7. Physical Review B (PRB) (<https://journals.aps.org/prb/>)
8. Semiconductor Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/journal/0268-1242>)
9. Физика и техника полупроводников (<http://journals.ioffe.ru/journals/2>)
10. International Technology Roadmap for Semiconductors (<http://public.itrs.net/>).
11. Journal of Crystal Growth (<https://www.journals.elsevier.com/journal-of-crystal-growth>)
12. Thin Solid Films (<https://www.journals.elsevier.com/thin-solid-films>)

в) факультативная литература

1. Jain S.C. and Willander M., «Silicon-Germanium strained layers and heterostructures». – Semiconductors and Semimetals V.74, Elsevier, 2003.
2. З.Ю. Готра, «Справочник по технологии микрoeлектронных устройств». М.: Радио и связь 1991.
3. И.А. Малышева, «Технология производства интегральных микросхем», М.: Радио и связь 1991.
4. «Арсенид галлия. Получения, свойства и применение», под ред. Ф.П. Кесаманлы и Д.Н. Наследова, Наука, 1973.
5. «Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры». Под редакцией Л. Ченга и К. Плога, «Мир», 1989.
6. «Технология тонких пленок», Справочник под редакцией Л. Майссела и Р. Гленга, «Советское радио», 1977.
7. А.А. Барыбин, В.Г. Сидоров, «Физико-технологические основы электроники», Издательство «Лань», 2001.
8. «Технология СБИС» тт. 1–2. Под ред. С.М. Зи. М.: Мир, 1986.
9. Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, «Элементы сверхбольших интегральных схем». М.: Радио и связь, 1986.
10. У. Тилл, Дж. Лаксон, «Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление». М.: Мир, 1985.
11. И. Броудай, Дж. Мерей, «Физические основы микротехнологии». М.: Мир, 1985.
12. Я. Таури. «Основы технологии СБИС». М.: Радио и связь. 1985.
13. Р. Маллер, Т. Кейминс. «Элементы интегральных схем». М.: 1989.
14. М. Ватанабэ, К. Асада, К. Кани, Т. Оцуки. «Проектирование СБИС». М.: Мир, 1988.
15. С.М. Зи. «Физика полупроводниковых приборов». М.: Энергия, 1973.
16. А.Г. Алексеенко, И.И. Шагурин. «Микросхемотехника». М.: Радио и связь, 1982.
17. «Введение в фотолитографию». Под ред. В.П. Лаврищева М.: Энергия, 1977.
18. А.И. Курносков, В.В. Юдин. «Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем». М.: Высш. шк., 1979.
19. «Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников». Под ред. Б.Д. Луфт. М.: Радио и связь, 1982.
20. «Электронно-лучевая технология в изготовлении микрoeлектронных приборов». Под ред. Дж.Р. Брюэра. М.: Радио и связь. 1984.

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Использование программного обеспечения:

1. Microsoft Office Word.
2. Microsoft Office Excel.
3. Microsoft Office Power Point.
4. Free Origin Viewer

## **9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей аспиранты имеют возможность работать за компьютером с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

### **Составитель:**

Новиков А.В., к.ф.-м.н., зав. лабораторией молекулярно-пучковой эпитаксии кремний-германиевых структур отдела физики полупроводников ИФМ РАН

### **Рецензент:**

Аладышкин А.Ю., к.ф.-м.н., с.н.с. отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН