

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

**по дисциплине:** Физико-химические основы процессов легирования и осаждения тонких пленок  
**по направлению:** Электроника и нанoeлектроника  
**профиль подготовки:** Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника  
Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики  
кафедра нанoeлектроники и квантовых компьютеров  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Экзамен

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: В.Ф. Лукичев, д-р физ.-мат. наук, (на удаление) член-корреспондент  
российской академии наук

Программа обсуждена на заседании кафедры нанoeлектроники и квантовых компьютеров 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Физико-химические основы процессов легирования и осаждения тонких пленок" изучает основные представления по методам осаждения тонких пленок в субмикронной технологии интегральных схем (ИС), в частности, магнетронным распылением, электронно-лучевым испарением, ионно-стимулированным осаждением, осаждением в условиях автоионной бомбардировки, молекулярно-пучковой эпитаксией;

Задачи дисциплины:

- Донести базовые знания по основным методам нанесения тонких пленок в современной технологии ИС;
- Дать основные представления по современным методам легирования слоев полупроводников;
- Привить целостный взгляд на современное производство ИС и основные его трудности.

По результатам освоения дисциплины студент должен:

Знать:

Основные методы нанесения тонких пленок в современном производстве ИС и основные методы легирования полупроводниковых слоев.

Уметь:

Оценивать основные параметры полупроводниковых ИС в зависимости от технологических норм и применяемых материалов.

Владеть:

Навыками работы с текущей литературой по специальности и ориентироваться в тенденциях развития технологии современной нанoeлектроники.

Темы и разделы:

1. Техника сверхвысокого вакуума
2. Магнетронное распыление
3. Электронно-лучевое испарение
4. Ионно-стимулированное осаждение
5. Осаждение из газовой фазы
6. Атомно-слоевое нанесение пленок
7. Многоуровневые соединения в КМОП-ультрабольших ИС
8. Проблема высоконадежных контактов к кремнию
9. Молекулярно-пучковая эпитаксия
10. Концепции систем для ионной имплантации
11. Ионные источники
12. Пробег ионов
13. Образование радиационных дефектов
14. Отжиги легированных структур
15. Быстрые отжиги
16. Создание супермелкозалегающих p-n переходов.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

дать основные представления по методам осаждения тонких пленок в субмикронной технологии интегральных схем (ИС), в частности, магнетронным распылением, электронно-лучевым испарением, ионно-стимулированным осаждением, осаждением в условиях автоионной бомбардировки, молекулярно-пучковой эпитаксией;

дать основные представления о многоуровневой металлизации ИС и тенденции перехода от алюминиевой металлизации к медной;

дать основные представления об ионной имплантации в субмикронной технологии микроэлектроники.

### Задачи дисциплины

- Донести базовые знания по основным методам нанесения тонких пленок в современной технологии ИС;
- Дать основные представления по современным методам легирования слоев полупроводников;
- Привить целостный взгляд на современное производство ИС и основные его трудности.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные методы нанесения тонких пленок в современном производстве ИС и основные методы легирования полупроводниковых слоев.

уметь:

Оценивать основные параметры полупроводниковых ИС в зависимости от технологических норм и применяемых материалов.

владеть:

Навыками работы с текущей литературой по специальности и ориентироваться в тенденциях развития технологии современной нанoeлектроники.

## 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение в физико-химические основы процессов легирования и осаждения тонких пленок	15	15		30
2	Молекулярно-пучковая эпитаксия		30		30
Итого часов		15	45		60
Подготовка к экзамену		60 час.			

Общая трудоёмкость	180 час., 4 зач.ед.
--------------------	---------------------

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение в физико-химические основы процессов легирования и осаждения тонких пленок

1. Техника сверхвысокого вакуума
2. Магнетронное распыление
3. Электронно-лучевое испарение
4. Ионно-стимулированное осаждение
5. Осаждение из газовой фазы
6. Атомно-слоевое нанесение пленок
7. Многоуровневые соединения в КМОП-ультрабольших ИС
8. Проблема высоконадежных контактов к кремнию

Семестр: 2 (Весенний)

2. Молекулярно-пучковая эпитаксия

1. Молекулярно-пучковая эпитаксия
2. Концепции систем для ионной имплантации
3. Ионные источники
4. Пробег ионов
5. Образование радиационных дефектов
6. Отжиги легированных структур
7. Быстрые отжиги
8. Создание супермелкозалегающих p-n переходов.

#### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор).

Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

#### 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Х. Риссел, И. Руге. Ионная имплантация. М. Наука, 1983, 362 с.
2. Ченг Л., Плог К. Лучевая эпитаксия и гетероструктуры. (пер. под ред. Ж.И. Алферова) М. Мир, 1989, 600с.

Дополнительная литература

1. Теоретическая физика: в 10 т. Т. 7 : Теория упругости : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— 4-е изд., испр. и доп. — М. : Наука, 1987 .— 248 с.

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://www.itrs.net>
2. <http://www.elibrary.ru>

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, прослушавший курс лекций и семинаров, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении занятий.
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на занятии.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанoeлектроники и квантовых компьютеров
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
	1 (осенний) - Экзамен
	2 (весенний) - Экзамен
<b>Разработчик:</b>	В.Ф. Лукичев, д-р физ.-мат. наук, (на удаление) член-корреспондент российской академии наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физико-химические основы процессов легирования и осаждения тонких пленок» обучающийся должен:

### знать:

Основные методы нанесения тонких пленок в современном производстве ИС и основные методы легирования полупроводниковых слоев.

### уметь:

Оценивать основные параметры полупроводниковых ИС в зависимости от технологических норм и применяемых материалов.

### владеть:

Навыками работы с текущей литературой по специальности и ориентироваться в тенденциях развития технологии современной нанoeлектроники.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В целях проведения текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущего занятия.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену в 9 семестре:

1. Техника сверхвысокого вакуума
2. Магнетронное распыление
3. Электронно-лучевое испарение
4. Ионно-стимулированное осаждение
5. Осаждение из газовой фазы
6. Атомно-слоевое нанесение пленок
7. Многоуровневые соединения в КМОП-ультрабольших ИС
8. Проблема высоконадежных контактов к кремнию

Вопросы к экзамену в 10 семестре.

- 1 Молекулярно-пучковая эпитаксия
2. Концепции систем для ионной имплантации
3. Ионные источники
4. Пробег ионов

5. Образование радиационных дефектов
6. Отжиги легированных структур
7. Быстрые отжиги .
8. Создание супермелкозалегающих p-n переходов.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Техника сверхвысокого вакуума
2. Магнетронное распыление

Пример 2.

- 1 Молекулярно-пучковая эпитаксия
2. Концепции систем для ионной имплантации

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);



- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;

- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать одного часа в устной и (или) письменной форме.