

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
А.С. Батурин**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Технология и оборудование литографических процессов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и наноэлектроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: А.В. Шишлянников, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры микро- и наноэлектроники 03.03.2023

## Аннотация

Курс "Технология и оборудование литографических процессов" предусматривает изучение технологических процессов и оборудования фотолитографических процессов, формирование специальных знаний в области технологии фотолитографии, о физических и химических особенностях материалов, применяемых в технологии литографии.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- формирование специальных знаний в области технологии литографии, о физических и химических особенностях материалов, применяемых в технологии литографии, основах проведения технологических и контрольно-измерительных операций литографии, о физических и технических принципах конструктивного исполнения технологического оборудования, используемого в литографических процессах.

#### Задачи дисциплины

- рассмотрение принципов и методов выполнения операций, составляющих технологический процесс литографии;
- рассмотрение физических и химических особенностей основных материалов, применяемых в технологии литографии;
- рассмотрение основных этапов технологического процесса фотолитографии;
- рассмотрение основных принципов формирования изображения в фоторезистной маске;
- рассмотрение принципов моделирования литографического процесса с учетом каждого отдельно взятого этапа;
- рассмотрение перспектив развития технологии;
- рассмотрение принципов и методов выполнения операций, составляющих технологический процесс литографии;
- рассмотрение физических и химических особенностей основных материалов, применяемых в технологии литографии.

### 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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	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:

- сущность процессов литографии;
- методы проведения технологических процессов;
- перспективы развития технологии литографии.

уметь:

- выполнять основные процессы фотолитографии;
- выполнять и корректировать режимы процессов;
- проводить оптимальный подбор технологических режимов процессов.

владеть:

- первичными навыками разработки технологических операций фотолитографии;
- первичными навыками работы на технологическом оборудовании;
- основными методами анализа оценки качества технологических операций и технологических процессов.

#### 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	Вводное занятие		2		1
2	Позитивные фоторезисты		2		1
3	Негативные фоторезисты		2		1
4	Подготовка поверхности пластин и нанесение резистных пленок		2		1
5	Предэкспозиционная сушка резистных пленок		2		1
6	Фотолитография		2		1
7	Проявление изображения в резисте		2		1
8	Сушка резистных пленок после проявления (задубливание)		2		1
9	Процессы нанесения и взрывная литография		2		1
10	Удаление фоторезистов		2		1
11	Контроль технологических процессов		2		1
12	Оптические параметры фоторезиста (параметры Дилла)		2		1
13	Моделирование проявления фоторезиста		2		1
14	Другие виды литографий		2		1
15	Перспективы развития технологии		2		1
Итого часов			30		15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

###### 1. Вводное занятие

Технология и материалы литографии. Стоимость литографического процесса и технологическое оборудование. Международная технологическая дорожная карта для полупроводникового производства. Закон Мура. Место фотолитографии в современной технологии.

## 2. Позитивные фоторезисты

Диазохиноновые фоторезисты, их фотохимические свойства и растворимость, механизмы химических превращений, срок хранения и контроль качества, экспонирование. ПММА (полиметилметакрилат).

## 3. Негативные фоторезисты

Состав и свойства негативных фоторезистов, чувствительность и контрастность, экспонирование. Фотополимеризация.

## 4. Подготовка поверхности пластин и нанесение резистных пленок

Очистка поверхности пластин. Причины и механизмы загрязнения и их последствия. Удаление загрязнений. Центрифугирование. Другие методы нанесения резистных покрытий.

## 5. Предэкспозиционная сушка резистных пленок

Кинетика процессов сушки. Физические процессы при сушке. Оборудование и технология сушки.

## 6. Фотолитография

Основы оптики. Контактная литография. Проекционная литография. Совмещение. Фотошаблоны.

## 7. Проявление изображения в резисте

Основные механизмы. Проявление позитивных и негативных резистов. Проявление резистов на практике.

## 8. Сушка резистных пленок после проявления (задубливание)

Физико-химические процессы при задубливании. Химические реакции при задубливании. Практическое применение задубливания.

## 9. Процессы нанесения и взрывная литография

Однослойные, двухслойные, трехслойные фоторезисты и перенос изображения в них. Взрывная (lift-off) литография. Практическое использование многослойных фоторезистов.

## 10. Удаление фоторезистов

Жидкофазное удаление резиста. Удаление резиста в водных растворах (кислотные, щелочные). Газофазное удаление резиста. Кинетика удаления резиста.

## 11. Контроль технологических процессов

Автоматизация литографического процесса. Контроль резистных материалов, контроль обработки резиста (экспонирование, проявление).

## 12. Оптические параметры фоторезиста (параметры Дилла)

Моделирование оптической литографии. Поглощение излучения фоторезистом. Кинетика экспозиции. Методы измерения параметров Дилла (Dill). Термическое разложение при обжиге. Сушка после экспонирования.

### 13. Моделирование проявления фоторезиста

Кинетическая модель проявления. Усовершенствованная кинетическая модель проявления. Поверхностное ингибирование. Модель диффузии растворителя. Уравнение Фудзиты-Дулиттла.

### 14. Другие виды литографий

Электронно-лучевая литография, технология процесса. Эффект электронной близости. Ионная литография. Иммерсионная литография. Литография в глубоком ультрафиолете.

### 15. Перспективы развития технологии

Многолучевая электронная технология. Безмасочная литография. Безрезистная технология. Дополнительные материалы.

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

Необходимое оборудование для занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. В двух частях. Часть 1. Москва: Издательство «Мир». Редакция литературы по электронике, 1990.
2. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. В двух частях. Часть 2. Москва: Издательство «Мир». Редакция литературы по электронике, 1990.
3. Оптические технологии микро- и нанoeлектроники, Я.И. Точицкий, 2010, Минск, РИВШ.
4. Б.А. Лапшинов. Технология литографических процессов. Учебное пособие – Московский государственный институт электроники и математики. М., 2011.–95 с.

### Дополнительная литература

1. Нанoeлектроника: учеб. пособие для вузов / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова .— 2-е изд. — М. : БИНОМ. Лаб. знаний, 2012 .— 342 с.
2. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – Томск: В-Спектр, 2011. – 263 с.

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

Не используются

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

Не предусмотрено.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и нанoeлектроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	А.В. Шишлянников, канд. физ.-мат. 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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	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 «Технология и оборудование литографических процессов» обучающийся должен:

### знать:

- сущность процессов литографии;
- методы проведения технологических процессов;
- перспективы развития технологии литографии.

### уметь:

- выполнять основные процессы фотолитографии;
- выполнять и корректировать режимы процессов;
- проводить оптимальный подбор технологических режимов процессов.

### владеть:

- первичными навыками разработки технологических операций фотолитографии;
- первичными навыками работы на технологическом оборудовании;
- основными методами анализа оценки качества технологических операций и технологических процессов.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

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

1. Привести основные параметры фоторезистов.
2. Перечислить основные этапы создания рисунка на поверхности пластины с помощью фотолитографии.
3. Основные отличия позитивных и негативных фоторезистов.
4. Привести типы дефектов слоя фоторезиста.
5. Чем определяется пространственное разрешение проекционной литографии?
6. Иммерсионная фотолитография, ее преимущества.
7. Контраст и чувствительность резиста.
8. Основной недостаток электронно-лучевой литографии для широкого промышленного применения.



## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Оценка за семестр выставляется по результатам устного дифференцированного зачета. Опрос студента не должен превышать 40 минут.