

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных**  
**работников высшей школы по направлению «Наноинженерия» на базе**  
**учебного курса**  
**«Методы литографии в наноинженерии»**

Цель: изучение основных методов и принципов формирования наноразмерных структур различного назначения и факторов, определяющих их качество, с использованием литографических процессов, теоретических законов проекционной оптики и дифракционной теории аберраций, физико-химических основ используемых технологических материалов, принципов работы и динамики развития литографического оборудования, методов повышения разрешающей способности и современных средств моделирования литографического процесса, методов оптимизации типовых параметров литографического процесса с целью повышения его качества. Получение практических навыков работы с новейшими САПР моделирования литографических процессов. Материал курса является основой для изучения других технологических процессов, применяемых при создании наноразмерных структур, в том числе в курсах «Технологии синтеза наноструктур», «Проектирование наносенсоров», «САПР Наносистем» и ряда других, выполнения исследовательской части курсового проекта, курсовых работ по технологии производства ЭВС и подготовки магистерской диссертации.

Категория слушателей: преподаватели, ведущие обучение по программе бакалавра/магистра по направлению «Наноинженерия»

Срок обучения: 36 часа (18 очная, 18 заочная)

Форма обучения: очно-заочная с дистанционным обучением заочной формы

Режим очных занятий: 8 часов в день – 1 неделя с отрывом от работы

**Задачами данного курса** является изучение:

- Методические аспекты преподавания курса в рамках реализации программ подготовки бакалавров/магистров по направлению «Наноинженерия»
- Применения литографического процесса в технологических процессах наноинженерии;
- Разработки маршрутного технологического процесса литографии;
- Основных законов проекционной оптики и дифракционной теории аберраций;
- Принципов формирования оптического изображения и факторов, определяющих его качество;
- Материалов и оборудования литографического процесса;
- Критериев и методов оптимизации литографического процесса;
- Структуры, состава и возможностей САПР моделирования литографических процессов;
- Применения методов повышения разрешающей способности литографии.

**Требования к уровню освоения учебного курса**

Обучаемые должны:

- Знать:
  - Состав и отличительные особенности технологических операций процесса литографии;
  - Параметры и методы контроля качества процесса литографии;

- Основные параметры материалов и оборудования участка литографии;
- Основы применения средств литографического моделирования.
- Уметь:
  - Проектировать тестовые шаблоны характеристики и оптимизации процесса литографии;
  - Создавать и верифицировать модели литографических процессов для оптимизации режимов обработки материалов и работы оборудования;
  - Разрабатывать и аттестовать технологические режимы литографии по параметрам воздушного изображения, глубины фокуса и параметров технологического стека, согласованных с реальной технологической структурой;
- Иметь навыки:
  - Разработки литографических тестовых структур;
  - Планирования и проведения серии экспериментов для определения параметров модели литографического процесса;
  - Использования средств моделирования литографических процессов;
  - Проведения реинжиниринга существующих на предприятии литографических процессов.

Учебный курс «Методы литографии в нанотехнологии» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объемом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены основы методов литографии в нанотехнологии. Теоретическая часть учебного курса состоит из восьми лекций:

### **Лекция 1: Современное состояние и тенденции развития технологических операций проекционной литографии при производстве КМОП СБИС**

Назначение процесса литографии при получении наноразмерных структур. Классификация видов литографических процессов. Виды литографии, использующие шаблоны: контактная литография и литография с зазором. Перспективные направления развития литографии: проекционная литография, рентгенолитография, электроннолучевая литография, ионно-лучевая литография, наноимпринт литография. Сравнительный анализ современных видов литографии.

### **Лекция 2: Используемые материалы и применяемое литографическое оборудование при производстве КМОП СБИС с наноразмерными элементами**

Ознакомление с используемыми в процессе литографии технологическими материалами и оборудованием. Классификация используемых материалов и применяемого оборудования проекционной литографии. Классификация литографического оборудования. Анализ применяемых типов установок для экспонирования резиста. Структурная схема и принцип работы установок экспонирования. Технические характеристики установки пошаговой мультипликации ASML PAS 500/250C. Динамика развития литографического оборудования ведущих мировых фирм производителей. Состав и последовательность технологических операций процесса проекционной литографии, как единственного из видов литографии, обеспечивающего возможность массового производства

### **Лекция 3: Нанесение резиста на поверхность кремневой пластины**

Ознакомление с процессами подготовки поверхности кремниевой пластины и нанесения на нее пленки резиста. Классификация способов подготовки поверхности кремневой пластины. Классификация методов нанесения пленки резиста на кремневую пластину. Физико-химические процессы нанесения пленки резиста на кремневую пластину.

#### **Лекция 4: Формирование в пленке резиста скрытого изображения (экспонирование) по средствам проекционной оптики и его ключевые физические ограничения в части разрешающей способности**

Ознакомление теоретическими основами процесса проекционной литографии, ключевыми параметрами процесса, математической моделью экспонирования, процессом проявления. Физические ограничения проекционной оптики при использовании бинарных шаблонов. Критерий Релея для разрешения проекционной системы (дифракционный предел). Понятия глубины фокуса и контраста изображения проекционной системы. Математическое описание процесса формирования скрытого изображения в пленке резиста. Понятия колебательной кривой дозы вскрытия и отражательной способности резиста при экспонировании. Математическая модель изменения коэффициента отражения от структуры резист-подложка при сложной структуре последней. Проявление скрытого изображения в пленке резиста.

#### **Лекция 5: Основные физико-химические характеристики ДХН-новолачных i-line резистов**

ДХН-резисты. Основные технологические свойства ДХН-резистов. Основные химические свойства и растворимость ДХН-резистов. Добавки, улучшающие свойства ДХН-резистов. Механизмы химических превращений в ДХН-резистах.

#### **Лекция 6: Способы повышения разрешающей способности процесса проекционной литографии**

Ознакомление с методами повышения разрешающей способности проекционной литографии, их особенностями и границами применимости. Применение внеосевого освещения при экспонировании резиста. Классификация типов внеосевого освещения. Аппаратные приемы создания равномерного внеосевого освещения. Применение фазосдвигающих шаблонов. Классификация типов фазосдвигающих шаблонов. Принцип действия и особенности применения фазосдвигающих шаблонов AAPSM и EAPSM типов. Эффекты в EAPSM шаблонах. AAPSM шаблоны. Дополненный PSM. Методы двойного впечатывания скрытого изображения. Варианты технологического процесса проекционной литографии с двойным впечатыванием. Технические ограничения применения методов двойного впечатывания при современном уровне развития техники и технологии. Применение иммерсионных материалов при экспонировании резиста. Применение методов коррекции оптического эффекта близости. Классификация методов коррекции оптического эффекта близости. Метод коррекции оптического эффекта близости, основанный на таблицах правил (RBOPC). Model-based OPC. Rule-based OPC. Разработка базиса правил, описывающего минимально допустимый набор топологических ситуаций, требующих коррекции.

#### **Лекция 7: Критерии оценки качества процесса проекционной литографии**

Построение кривых Боссунга. Понятие процессного окна, как одного из основных критериев оценки качества процесса проекционной литографии. Состав параметров и методы контроля. Контрольные карты.

#### **Лекция 8: Современные системы компьютерного (TCAD) моделирования литографических процессов и тенденции их развития**

Ознакомление с существующими средствами моделирования литографических процессов, их ролью при разработке процессов литографии и используемыми в них математическими моделями. Состояние рынка САПР для электроники. Обзор современных TCAD моделирования литографических процессов. Математическая модель экспонирования

резиста. Закон Бугера - Ламберта – Бера. Закон Бугера - Ламберта – Бера. Теория абсорбции света пленкой резиста. Кинетика экспонирования.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в прохождении студентами лабораторного практикума. Все практические занятия проходят в компьютерном классе с использованием специализированного компьютерного программного обеспечения и мультимедийных средств. В рамках практических занятий по дисциплине "Методы литографии в нанотехнологиях" выполняется задание по разработке блока операций процесса литографии для заданного технологического оборудования и материалов. При выполнении задания проводится оптимизация параметров литографического стека, направленная на повышение качества получаемых микро- и наноразмерных структур.

Основные задания на лабораторный практикум:

- Применение логарифмической кривой дефокусировки для оценки качества воздушного изображения;
- Использование параметра «глубина фокуса» для оценки качества процесса проекционной литографии;
- Выбор оптимальной толщины резиста по колебательным кривым минимального критического размера;
- Оптимизация параметров антиотражающего покрытия по критерию минимума амплитуды стоячих волн в резисте;

### **Методические рекомендации по реализации учебной программы**

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 18 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте [nanolab.iu4.bmstu.ru](http://nanolab.iu4.bmstu.ru). Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

#### **Тестовые вопросы к курсу**

#### **«Методы литографии в нанотехнологиях»**

#### **Лекция 1: Современное состояние и тенденции развития технологических операций проекционной литографии при производстве КМОП СБИС**

1. Для какого типа литографии характерна сложная технология изготовления шаблонов для систем типа SCALPEL?

- А) Наноимпринт литография
- В) Проекционная ЭУФ

- Б) Проекционная электронно-лучевая
- Г) Рентгеновская с зазором

Ответ:

2. Что характерно для проекционной ЭУФ?

- А) Более близкий физический предел по достижимому разрешению

- Б) Сложная технология изготовления шаблонов;

- В) Малая производительность

- Г) Отражательная оптика

Ответ:

3. Какой этап S-FIL импринт литографии следует после нанесения на поверхность подложки жидкого резиста капельным методом

- А) Засветка резиста через прозрачный штамп  
В) Полимеризация резиста (приобретение кислотостойких свойств)  
Ответ:
- Б) Наложение на резист штампа  
Г) Отделение штампа

4. Какой этап следует после прессования штампом, имеющим необходимую топологию
- А) перераспределение жидкого полимера и заполнение им объема, определяемого рельефом штампа  
В) нагрев до температуры, превышающей температуру стеклования  
Ответ:
- Б) нанесение на подложку слой полимера, имеющего подходящую температуру стеклования и молекулярный вес  
Г) охлаждение и отделение штампа

5. Изображение какого размера можно обработать с помощью рентгенолитографии?
- А) до 100 нм  
В) до 10 нм  
Ответ:
- Б) до 1 нм  
Г) до 50 нм

## **Лекция 2: Используемые материалы и применяемое литографическое оборудования при производстве КМОП СБИС с наноразмерными элементами**

1. Какой из способов нанесения пленок резистов представляющих собой вязкие жидкости дает в результате пленки, имеющие слишком большую и сложно контролируемую толщину
- А) пульверизация  
В) окувание  
Ответ:
- Б) центрифугирование  
Г) ни один из способов

2. Какая технологическая операция на участке литографии следует за гидрофобизацией?
- А) Экспонирование (Exposure)  
В) Проявление (Develop)  
Ответ:
- Б) Удаление остатков резиста  
Г) Охлаждение пластины (Chill)

3. Недостатком какого способа нанесения пленок резистов является большая сложность получения тонких равномерных пленок при распылении на неподвижную пластину
- А) пульверизация  
В) окувание  
Ответ:
- Б) центрифугирование  
Г) ни один из способов

4. Какая технологическая операция на участке литографии является частью подготовки поверхности пластины?
- А) Дегидратация (Prebake)  
В) Первая (мягкая) сушка (Softbake)  
Ответ:
- Б) Нанесение пленки резиста (Coat)  
Г) Экспонирование (Exposure)

5. Для какого способа нанесения пленок резистов характерно нанесение определенного количества резиста на быстро вращающуюся пластину с последующим его перераспределением по всей площади пластины за счет центробежных сил
- А) пульверизация  
Б) центрифугирование

В) окунание

Г) ни один из способов

Ответ:

### **Лекция 3: Нанесение резиста на поверхность кремневой пластины**

1. Какой будет толщина пленки резиста при начальной толщине в 1000 мкм и скоростью вращения в 10000 об/мин на стадии растекания резиста?

А) 1.2 мкм

Б) 3.5 мкм

В) 2.8 мкм

Г) 4.2 мкм

Ответ:

2. При какой температуре происходит сушка резиста на горячей плите?

А) 200°C

Б) 400°C

В) 90°C

Г) 450°C

Ответ:

3. На сколько примерно уменьшается концентрация растворителя во время мягкой сушки?

А) 42%

Б) 24%

В) 64%

Г) 12%

Ответ:

4. Что происходит с толщиной пленки при повышении относительной влажности воздуха

А) Увеличивается

Б) Уменьшается

В) Не изменяется

Г) Всё зависит от других факторов

Ответ:

5. До какой величины уменьшается концентрация растворителя в пленке резиста после его нанесения методом центрифугирования

А) 20%

Б) 60%

В) 40%

Г) 80%

Ответ:

### **Лекция 4: Формирование в пленке резиста скрытого изображения (экспонирование)**

**по средствам проекционной оптики и его ключевые физические ограничения в части разрешающей способности**

1. Какой допуск берется на размеры контролируемых элементов для определения глубины фокуса?

А)  $\pm 5\%$

Б)  $\pm 10\%$

В)  $\pm 15\%$

Г)  $\pm 20\%$

Ответ:

2. Какое расстояние между соседними минимумами и максимумами в стоячих волнах по глубине пленки возникает для резистов на основе новолачной смолы?

А) 0.05 мкм

Б) 0.5 мкм

В) 0.005 мкм

Г) 1 мкм

Ответ:

3. При какой температуре проводят постэкспозиционную термообработку (ПЭТ) (Post Exposure Bake, ПЕВ)?

А) 10÷20°C

Б) 40÷50°C

В) 110÷120°C

Г) 80÷90°C

Ответ:

4. При какой температуре проводят окончательную сушку (Hardbake), задубливание?

А) 90÷110°C

Б) 240÷260°C

В) 170÷220°C

Г) 120÷160°C

Ответ:

5. При какой толщине приповерхностного слоя резиста возникает эффект уменьшения концентрации растворителя вблизи поверхности резиста

А) до 100 нм

Б) до 10 нм

В) до 200 нм

Г) до 300 нм

Ответ:

### **Лекция 5: Современные системы компьютерного (TCAD) моделирования литографических процессов и тенденции их развития**

1. Какая концентрация ДХ должна присутствовать в щелочном проявителе, чтобы гидрофильная смола стала нерастворимой?

А) 10%

Б) 15%

В) 20%

Г) 25%

Ответ:

2. В каком диапазоне новолачная смола обладает низкой прозрачностью?

А) 200-300 нм

Б) 100-200 нм

В) 400-500 нм

Г) 300-400 нм

Ответ:

3. При какой температуре могут быть стабилизированы проявители негативных резистов?

А) 100 °C

Б) 200 °C

В) 300 °C

Г) 400 °C

Ответ:

4. Какова чувствительность позитивных ДХН-резистов?

А) 25 мДж/см<sup>2</sup>

Б) 50 мДж/см<sup>2</sup>

В) 75 мДж/см<sup>2</sup>

Г) 100 мДж/см<sup>2</sup>

Ответ:

5. Для каких целей вводят добавку имидазолы

А) Чувствительность

Б) Термостойкость

В) Адгезия

Г) Плазмостойкость

Ответ:

### **Лекция 6: Современные системы компьютерного (TCAD) моделирования литографических процессов и тенденции их развития**

1. До каких размеров снизились значения минимальных размеров элементов КМОП СБИС

А) <0,1 мкм

Б) <0,001 мкм

В) <0,01 мкм

Г) <0,0001 мкм







10. Объясните принцип наноимпринт литографии. Перечислите преимущества и недостатки данного метода.
11. Дайте определение понятия «воздушное изображение».
12. Для чего используется логарифмическая кривая дефокусировки?
13. Какие материалы и оборудование используются в проекционной литографии.
14. Какие типы установок экспонирования вам известны?
15. Перечислите последовательность технологических операций в маршруте проекционной литографии.
16. Какую роль играют процессы термообработок, входящие в состав блока операций литографии?
17. Сформулируйте закон Бугера - Ламберта – Бера.
18. Если более качественный резист требует более низкого минимально приемлемого значения NILS по сравнению с другим резистом, означает ли это, что резист влияет на выбор оптимальной длины волны?
19. В чем заключается подготовка поверхности кремниевой пластины перед нанесением резиста?
20. Перечислите методы нанесения пленки резиста на кремниевую пластину.
21. Расскажите об особенностях физико-химических процессах нанесения пленки резиста центрифугированием.
22. Что такое числовая апертура, глубина фокуса и контраст изображения проекционной системы?
23. Сформулируйте физические ограничения проекционной оптики при использовании бинарных шаблонов. Критерий Релея для разрешения проекционной системы.
24. Что такое колебательная кривая дозы вскрытия и отражательной способности резиста?
25. Опишите процесс проявления скрытого изображения в пленке резиста.
26. Какие параметры метрологии (CD, клин проявления или уход резиста) могут влиять на процессное окно?

**Темы контрольных рефератов по курсу**  
**«Методы литографии в нанотехнологиях»**

1. Применение иммерсионных материалов при экспонировании резиста
2. Виды литографии, использующие шаблоны
3. Материалы и оборудование проекционной литографии
4. Подготовка поверхности и методы нанесения пленки резиста на кремниевую пластину
5. Применение фазосдвигающих шаблонов

**Учебно-тематический план**

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Самостоятельное изучение, дистанционное общение преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.	Самостоятельная работа. Изучение материалов лекционных курсов и подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Методы литографии в нанотехнологиях»	36 ч.	16 ч.	8 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы

1.	Лекция 1: Современное состояние и тенденции развития технологических операций проекционной литографии при производстве КМОП СБИС	3 ч.	1 ч.		
2.	Лекция 2: Используемые материалы и применяемое литографическое оборудования при производстве КМОП СБИС с наноразмерными элементами	2 ч.	1 ч.		
3.	Лекция 3: Нанесение резиста на поверхность кремневой пластины	2 ч.	1 ч.		
4.	Лекция 4: Формирование в пленке резиста скрытого изображения (экспонирование) по средствам проекционной оптики и его ключевые физические ограничения в части разрешающей способности	2 ч.	1 ч.		
5.	Лекция 5: Основные физико-химические характеристики ДНХ-новолачных i-line резистов	2 ч.	1 ч.		
6.	Лекция 6: Способы повышения разрешающей способности процесса проекционной литографии	2 ч.	1 ч.		
7.	Лекция 7: Критерии оценки качества процесса проекционной литографии	2 ч.	1 ч.		

8.	Лекция Современные системы компьютерного (TCAD) моделирования литографических процессов и тенденции их развития	8:	2 ч.	1 ч.		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы		

**Список литературы  
и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 7.**

1. У. Моро Микролитография. Принципы, методы, материалы: в 2-х частях, ч.1: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 605 с., ил.
2. Родионов Ю.А. Литография в производстве интегральных микросхем – М.: издательство Дизайн ПРО, 1998. – 96 с., ил.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: 2-е издание: пер. с англ. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. – 721 с., ил.
4. Валиев К.А. Физика субмикронной литографии — М.: Наука, 1990. – 527 с., ил.
5. Ландсберг Г.С. Оптика. Учебное пособие: Для ВУЗов. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с. – ISBN 5-9221-0314-8.
6. Мартынов В.В., Просий А.Д. Современная технология фотолитографии в производстве СБИС – Зарубежная электронная техника, ОАО ЦНИИ «Электроника» вып. 3-4 (437-438), 2002. – с.18-78.
7. James R. Sheats and Bruce W. Smith Microlithography: Science and Technology. Marcel Dekker, 270 Madison Ave., New York, NY 10016-0602, 1998. – 780 с. – ISBN 0-8247-9953-4. S250.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части  
учебного курса на сайте [nanolab.iu4.bmstu.ru](http://nanolab.iu4.bmstu.ru)**