

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных**  
**работников высшей школы по направлению**  
**«Методы обработки и формирования структур с прецизионным**  
**позиционированием (нанолиитография, нанообработка, нанопечать,**  
**наноструйная техника и другое)»**  
**на базе учебного курса**  
**«Введение в электронно-лучевую литографию»**

Цель: изучение физических принципов технологии и основных этапов формирования наноструктур с помощью электронно-лучевой литографии.

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 24 часа

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с физическими принципами технологии и основными этапами формирования наноструктур с помощью электронно-лучевой литографии.

### **Требования к уровню освоения учебного курса**

Преподаватели должны:

- Знать:
  - область применения электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) для формирования структур с прецизионным позиционированием;
  - физические принципы работы ЭЛЛ;
  - устройство электронно-лучевого литографа;
  - стратегии ЭЛЛ.
- Иметь навыки:
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения ЭЛЛ;
  - включать приобретенные знания о ЭЛЛ в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
  - переносить полученных знания о ЭЛЛ на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.
- Иметь представление:
  - о взаимодействии ускоренного пучка электронов с веществом;
  - об электронные резистах и их характеристиках;
  - об основных этапах цикла электронно-лучевой литографии;
  - о предельном разрешении ЭЛЛ;

Научные работники должны:

- 1.Знать:
  - область применения ЭЛЛ для формирования структур с прецизионным позиционированием;
  - физические принципы работы ЭЛЛ;
  - устройство электронно-лучевого литографа;
  - взаимодействие ускоренного пучка электронов с веществом;
- 2.Иметь навыки:
  - использования ЭЛЛ для формирования структур с прецизионным позиционированием;
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения ЭЛЛ для формирования структур с прецизионным позиционированием;

- планирования и проведения исследований и экспериментов с использованием ЭЛЛ для формирования структур с прецизионным позиционированием;
- генерировать новые плодотворные научно-технические и инновационные идеи с использованием ЭЛЛ;
- переносить полученные знания о применении ЭЛЛ для формирования структур с прецизионным позиционированием на смежные предметные области и к использованию этих знаний для создания новых объектов техники и технологии и для инновационной деятельности;
- 3. Иметь представление:
  - о предельном разрешении ЭЛЛ;
  - об электронных резистах и их характеристиках;
  - об основных этапах цикла электронно-лучевой литографии;

Учебный курс «Введение в электронно-лучевую литографию» 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 физико-техническом институте.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы технологии электронно-лучевой литографии, взаимодействия электронного пучка с твердым телом, общее устройство электронно-литографических систем, основные факторы определяющие пределы разрешения метода, методы компенсации эффекта близости, а также основные этапы формирования функциональных слоев методом электронно-лучевой литографии

Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций:

Лекция 1: Общее устройство электронно-литографической системы

Электронная пушка. Типы катодов. Кроссовер. Система бланкирования луча. Генератор изображений. Разрешение электронно-лучевой системы.

Лекция 2: Взаимодействие ускоренного пучка электронов с веществом

Понятие рассеяния. Общая формула для сечения рассеяния. Длина свободного пробега. Упругое рассеяние. Рассеяние в кулоновском поле ядра. Формула Резерфорда для сечения упругого рассеяния. Зависимость сечения упругого рассеяния от атомного номера материала мишени и энергии электрона. Неупругое рассеяние. Механизмы неупругого рассеяния электрона в твердом теле. Приближение непрерывных потерь Г. Бете. Обратно отраженные электроны. Коэффициент обратного отражения и его зависимость от типа мишени и энергии электрона. Область взаимодействия электронного пучка с мишенью. Вторичные электроны. Монте-Карло моделирование процессов рассеяния

Лекция 3: Электронные резисты и их характеристики

Понятие электронного резиста. Движение ускоренных электронов в системе «резист-подложка». Первичный пучок с гауссовым распределением плотности тока. Уширение первичного пучка в резисте из-за малоуглового упругого рассеяния. Влияние обратно отраженных электронов. Пространственное распределение поглощенной в резисте энергии. Типы электронных резистов. Позитивный и негативный резист. Доза, проявление, контраст чувствительность резиста. Зависимость чувствительности резиста от ускоряющего напряжения и температуры. Эффект близости и методы его минимизации и компенсации.

Лекция 4: Стратегии электронно-лучевой литографии

Режимы работы элементов электронного литографа. Режимы движения стола. Экспонирование лучом круглого сечения с гауссовым распределением плотности тока и лучом с изменяемой формой. Растровое и векторное сканирование лучом круглого



- А) механический  
В) электростатический

- Б) электромагнитный  
Г) отражательный

1.5. Порядок размера пятна вследствие дифракции электронного пучка с энергией 25 кэВ и углом схождения 1 мрад?

- А) 10 нм  
В) 1000 нм

- Б) 10 Å  
Г) 100 нм

### Лекция 2: Взаимодействие пучка ускоренных электронов с веществом

2.1. Какова размерность сечения рассеяния?

- А) см  
В) см<sup>2</sup>

- Б) г/моль  
Г) кэВ/см

2.2. Порядок длины пробега электрона между упругими столкновениями в алюминии при  $30 < E_{\text{кин}} < 50$  кэВ?

- А) 0,1 мкм  
В) 10 мкм

- Б) 10 нм  
Г) 1 нм

2.3. Как изменится длина пробега электрона между упругими столкновениями, если его энергия увеличится в 2 раза?

- А) Увеличится в 4 раза  
В) Увеличится в 8 раз

- Б) Уменьшится в 2 раза  
Г) Не изменится

2.4. Как изменится скорость потери энергии электроном в результате неупругого рассеяния, если атомный номер мишени увеличится?

- А) Зависит от начального значения Z  
В) Увеличится

- Б) Не изменится  
Г) Уменьшится

2.5. Почему эффективность генерации вторичных электронов выше у обратно отраженных?

- А) Из-за меньшего угла выхода из мишени  
В) Верно А и Б

- Б) Из-за их меньшей энергии  
Г) Нет верных

### Лекция 3: Электронные резисты и их характеристики

3.1. Распределение плотности тока в гауссовом пучке электронов, имеет вид?

А)  $j(r) = \frac{I_0}{\pi\alpha_0} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha_0^2}\right)$

Б)  $j(r) = \frac{I_0}{\pi\alpha_0^2} \cdot \ln\left(-\frac{r^2}{\alpha_0^2}\right)$

В)  $j(r) = \frac{I_0}{\pi\alpha_0^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha_0^2}\right)$

Г)  $j(r) = \frac{I_0}{\pi\alpha_0^2} \cdot \text{ctg}^2\left(-\frac{r^2}{\alpha_0^2}\right)$

3.2. Порядок размера области выхода обратно отраженных электронов при энергии

первичных  $20 < E < 30$  кэВ

А) 1 мкм

Б) 100 мкм

В) 10 мкм

Г) 10 нм

3.3. Формула контраста резиста имеет вид ( $D_1$  – доза полного проявления,  $D_0$  – доза начала проявления)?

А)  $\gamma = \frac{1}{\cos(D_1 / D_0)}$

Б)  $\gamma = \frac{1}{\log_{10}(D_1 / D_0)}$

В)  $\gamma = \log_{10}(D_0 / D_1)$

Г)  $\gamma = \log_{10}(D_1 / D_0) - 1$

3.4. Как приблизительно изменится доза полного проявления резиста при уменьшении ускоряющего напряжения в 2 раза?

А) Не изменится

Б) Увеличится в 2 раза

В) Уменьшится в 2 раза

Г) Уменьшится в 4 раза

3.5. Каким уравнением адекватно моделируется поглощенная резистом доза при критическом размере деталей меньшем, чем область рассеяния первичных электронов?

А)  $D(x, y) = \iint I(x - x', y - y') T(x', y') dx' dy'$

Б)

$D(x, y) = T(x, y) + \eta \iint I_2(x - x', y - y') T(x', y') dx' dy'$

В)  $D(x, y) = (1 + \eta) \cdot T(x, y)$

Г) Все вышеперечисленное

#### Лекция 4: Стратегии электронно-лучевой литографии.

4.1. При векторном сканировании гауссовым пучком луч движется ?

А) По спирали от центра поля сканирования

Б) По всему полю экспонирования

В) Только по контуру структуры

Г) Только в пределах структуры

4.2. Преимуществом режима пучка с изменяемой формой является?

А) Высокая скорость экспонирования

Б) Простота реализации

В) Высокое разрешение

Г) Отсутствие эффекта близости

4.3. При векторном сканировании луч бланкируется при?

А) При выходе луча за пределы структуры

Б) При переходе к следующему элементу разбивки структуры

В) При входе луча в пределы структуры

Г) Только в конце экспонирования

4.4. В стратегии с гауссовым пучком и векторным сканированием во время экспозиции доза регулируется ?

А) Изменением тока пучка

Б) Изменением размера пучка

В) Изменением шага экспонирования

Г) Временем экспозиции луча в точке

4.5. В стратегии с гауссовым пучком и векторным сканированием доза для площади рассчитывается по формуле?

$$A) D_A = \frac{I \cdot T_{\text{dwell}}}{S^2}$$

$$B) D_A = \frac{I^2 \cdot T_{\text{dwell}}}{S^2}$$

$$B) D_A = \frac{I \cdot T_{\text{dwell}}}{S}$$

$$Г) D_A = \frac{I}{S^2}$$

### Лекция 5: Основные этапы цикла электронно-лучевой литографии

5.1. Толщина наносимого резиста должна быть?

A) Больше высоты рельефа подложки

Б) Равна высоте рельефа подложки

В) Меньше высоты рельефа подложки

Г) Несущественно

5.2. Как зависит разрешение резиста от его толщины ?

A) Выше при большей толщине

Б) Не зависит от толщины

В) Выше при меньшей толщине

Г) Максимально при толщине равной минимальному размеру структуры

5.3. Зависимость толщины резиста от скорости вращения при центрифугировании имеет вид?

$$A) d = \frac{v^b}{t^* \sqrt{\omega}}$$

$$B) d = \frac{v^b \sqrt{\omega}}{t^*}$$

$$B) d = \frac{v}{\sqrt{\omega}}$$

$$Г) d = v \sqrt{\omega}$$

5.4. Требования на допуск при совмещении обычно составляют?

A) 5 нм

Б) 1/2 минимального размера структуры

В) 1/3 – 1/5 минимального размера структуры

Г) равны минимальному размеру структуры

5.5. Для успешного формирования функционального слоя методом травления необходим?

A) Положительный профиль стенок окон проявления

Б) Отрицательный профиль стенок окон проявления

В) Ступенчатый профиль стенок окон проявления

Г) Вертикальный профиль стенок окон проявления

### **Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 35 вопросов**

1. Каковы отличительные особенности литографической системы от РЭМ?
2. Для чего нужен цилиндр Венельта в электронной пушке?
3. Характерный размер кроссовера для вольфрамового катода?
4. В чем преимущество автоэмиссионных катодов по сравнению с термоэмиссионными?
5. Почему бланкер использует электростатическое отклонение луча?
6. Как связана разрядность генератора изображений и разрешение литографа?
7. Почему рассеяние электрона в поле ядра считается упругим?

8. Как объяснить из общих соображений зависимость сечения упруго рассеяния на угол  $\theta$  от атомного номера материала мишени и энергии электрона?
9. Какова характерная длина свободного пробега электрона с энергией 30 кэВ между упругими рассеяниями в органических веществах?
10. Какова характерная длина свободного пробега электрона с энергией 30 кэВ между упругими рассеяниями в кремнии?
11. Сколько эВ примерно теряет электрон при неупругом взаимодействии с одним атомом мишени?
12. Как изменяется количество упругих рассеяний на угол  $2-3^\circ$  по мере движения электрона в мишени?
13. Почему коэффициент обратного отражения практически не зависит от энергии электрона?
14. Характерная длина пробега вторичных электронов?
15. Какова основная особенность моделирования электронных траекторий методом Монте-Карло?
16. Из-за чего уширяется электронный луч в резисте?
17. Характерная область рассеяния обратно отраженных от кремниевой подложки электронов при 25 кВ?
18. Почему относительный вклад обратно отраженных электронов в поглощенную резистом энергию больше чем коэффициент отражения?
19. Какой тип резиста следует выбрать, если нужно открыть малую часть подложки?
20. Какие электроны в основном ответственны за экспонирование резиста?
21. Как связаны разрешение и толщина резиста?
22. Почему для 3D-литографии важен низкий контраст резиста?
23. Какова причина эффекта близости?
24. Почему можно минимизировать эффект близости используя низкие ускоряющие напряжения?
25. Как будет выглядеть проявленный квадрат микронных размеров без коррекции эффекта близости?
26. В чем основная идея метода модуляции дозы?
27. Как происходит экспонирование структуры при векторном сканировании?
28. С помощью какого параметра регулируется доза при экспонировании гауссовым пучком?
29. Какой метод экспонирования быстрее, по меандру или по линиям?
30. Какой ток нужно выставить при экспонировании площадных элементов в резисте чувствительностью  $200 \text{ мкКл/см}^2$  если шаг экспонирования 10 нм, время экспозиции в точке 3.3 мкс?
31. Как можно нанести тонкий слой резиста на подложку?
32. Как должны соотноситься толщина резиста и критического размера элементов, создаваемого функционального слоя?
33. Как зависит форма островка контаминации от астигматизма?
34. Почему для «взрывной» литографии важен отрицательный профиль проявления резист?
35. Какой метод предэкспозиционной термообработки является оптимальным?

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего

учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

**Темы контрольных рефератов по курсу**  
**«Введение в электронно-лучевую литографию»**

1. История развития электронно-лучевой литографии
2. Применения электронной литографии в нанoeлектронике
3. Обзор статей по методам создания голограмм с помощью электронной литографии
4. Обзор статей по Монте-Карло моделированию рассеяния электронов
5. Процессы неупругого рассеяния электронного пучка в твердом теле
6. Методы определения параметров электронных резистов
7. Моделирование процессов проявления электронных резистов
8. Обзор современных растровых электронных литографов
9. Обзор статей по методам коррекции эффекта близости
10. Обзор коммерчески доступных электронных резистов и их характеристик

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Введение в электронно-лучевую литографию»	24 ч.	10 ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)  Реферат
1.	Лекция 1: Общее устройство литографической системы		2 ч.	0,25 ч.		
2.	Лекция 2: Взаимодействие ускоренного пучка электронов с веществом		2 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3: Электронные резисты и их характеристики		2 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4: Стратегии электронно-лучевой литографии		2 ч.	0,25 ч.		
5.	Лекция 5: Основные этапы цикла электронно-лучевой литографии		2 ч.	0,25 ч.		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы (электронная зачётка)	Реферат	

**Список литературы (основной и дополнительной),  
а также других видов учебно-методологических материалов и пособий,  
необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных  
дисков и др.).**

**Список литературы**



**и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 5.**

1. *Голдстей Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лившин Э.* Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. — М.: Мир, 1984.
2. SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication Volume 1: Microlithography
3. *Алехин А. П.* Физико-химические основы субмикронной технологии: учебное пособие. – М.: МФТИ, 2007
4. *Князев М. А.* Исследование процессов 3-D структурирования в электронной литографии: диссертационная работа. – ИПТМ РАН, 2007
5. *V.V. Aristov, A.A. Svintsov and S.I. Zaitsev* Guaranteed accuracy of the method of ‘simple’ compensation in electron lithography. // Microelectronic Engineering 11 (1990) 641-644