



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

В.А. Тупик

*Шоня* 2022 г.



**ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ –  
ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ  
КАДРОВ В АСПИРАНТУРЕ**

Группа научных специальностей: 2.2. «Электроника, фотоника, приборостроение и  
связь»

2.2.3. «Технология и оборудование для производства материалов и приборов  
электронной техники»

**Форма обучения: очная**

**Срок обучения: 4 года**

**Факультет: ФЭЛ**

**Выпускающая кафедра: МНЭ**

Санкт-Петербург

2022

## СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Обеспечивающий факультет: ФЭЛ  
Обеспечивающая кафедра: МНЭ

Курс 4  
Семестр 8

### Виды занятий

Лекции  
Самостоятельная работа

### Вид промежуточной аттестации

Экзамен (семестр) 8

Разработчик



Мошников В. А.

Зав. каф. МНЭ



Лучинин В. В.

Заведующий ОДА



Тумаркин А. В.

## **АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Технология и оборудование для производства материалов  
и приборов электронной техники»**

Дисциплина формирует знание в области методов синтеза, структуро- и формообразования при нанесении, удалении и модифицировании материалов неорганической и органической природы с микро- и наноразмерным разрешением, включая элементы аппаратного, метрологического и информационного обеспечения процессов, направленных на создание систем с прогнозируемыми и новыми свойствами, обусловленными проявлением микро и наномасштабных факторов.

### **SUBJECT SUMMARY**

**«Technology and equipment for the production of materials and electronic devices»**

The course covers synthesis, structuring and shaping methods for applying, removing and modifying materials of inorganic and organic nature with micro- and nanoscale resolution, including elements of hardware, metrological and information support of processes aimed at creating systems with predictable and new properties due to the impact of micro and nanoscale factors.

### **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Формирование системы знаний, навыков и умений в процессе освоения совокупности методов и способов, обеспечивающих создание микро и наносистем на основе материалов неорганической и органической природы.
2. Рассмотрение вопросов структуро- и формообразования, направленных на синтез объектов с новыми свойствами, обусловленными проявлением наномасштабных факторов.
3. Формирование мультидисциплинарных знаний, обеспечивающих возможность реализации научно-исследовательской и межотраслевой инженерно-производственной деятельности.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **Введение.**

Возникновение и развитие микро- и нанотехнологии. История появления материаловедческо-технологического базиса и основных организационных принципов.

### **Тема 1. Производственная чистота, гигиена и безопасность.**

Чистые помещения: классификация производственных помещений по чистоте воздушной среды и микроклимату, источники загрязнений, способы обеспечения и поддержания чистоты. Вакуум: глубина вакуума, средства откачки и методы контроля. Технологические среды: чистота материалов, воды, газовых сред и жидкостей. Аппаратура и элементы газовых и жидкостных систем. Базовые операции очистки жидких и газообразных сред. Очистка поверхности пластин. Безопасность работы в чистых помещениях: токсичные, взрывоопасные и пожароопасные среды. Утилизация отходов.

### **Тема 2. Оборудование и методы нанесения вещества.**

Оборудование и методы нанесения вещества в вакууме из молекулярных пучков: вакуум-термическое и электронно-лучевое испарение, молекулярно-лучевая эпитаксия. Оборудование и методы ионно-плазменного осаждения: катодное, магнетронное, реактивное распыление; ионно- и плазмохимическое осаждение. Оборудование и методы осаждения из газовой фазы: получение поликристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния, оксида и нитрида кремния; пиролитическое осаждение металлов; газофазная эпитаксия кремния, бинарных и многокомпонентных соединений; газофазные методы молекулярной химической сборки. Оборудование и методы осаждения из жидкой фазы: жидкофазная эпитаксия, электрохимическое осаждение слоев, нанесение моно- и мультислоев органических веществ методом Ленгмюра-Блоджетт. Золь-гель технология.

### **Тема 3. Оборудование и методы удаления вещества.**

Шлифование и полирование пластин. Электрохимическая, ультразвуковая и электроэрозионная обработки. Механическое, лазерное и электронно-лучевое скрайбирование. Вакуум-термическое травление. Процессы химического травления: механизмы травления; оборудование, методы и среды для жидкостного и газового травления; локальное и анизотропное ориентационно-чувствительное травление; маскирующие, «жертвенные» и «стоп»-слои. Электрохимическое травление, получение пористого кремния. Ионно-плазменное травление: оборудование, методы и механизмы травления; ионно-лучевое, плазмохимическое, реактивное ионно-плазменное, ионно-химическое травление.

### **Тема 4. Оборудование и методы модифицирования вещества.**

Оборудование и методы окисления в газовой и жидких средах: термическое сухое и влажное окисление, электрохимическое окисление, теоретические модели окисления. Окисление и нитрирование в плазме. Диффузия примесей: распределение примесей при диффузии, стадии загонки и разгонки примесей, оборудование и методы диффузии из газообразных, жидких и твердых источников. Ионная имплантация: распределение примесей, оборудование и методы ионной имплантации. Высокоэнергетические сильноточные процессы ионной имплантации: окисление, нитрирование, протонирование, радиационно-стимулированная диффузия, химический синтез. Имплантография: жидкометаллические источники ионов, ионно-полевая эмиссия. Низкоэнергетическая ионная имплантация методом погружения в плазму. Активация процессов при ионном легировании и химическом синтезе: термический и корпускулярно-лучевой отжиг.

## **Тема 5. Литографические процессы.**

Классификация базовых методов литографии: фото-, рентгено- и ионолитография. Литографический цикл: резисты и способы их нанесения, позитивные, негативные, жидкие и сухие резисты; методы повышения адгезии, плазmostойкости; планаризация, предэкспозиционная обработка, проявление и сушка. Фотошаблоны. Аппаратура и способы совмещения и экспонирования. Пространственное разрешение. Эволюция процессов экспонирования: высокоэффективные источники дальнего ультрафиолета, оптическая литография с фазовым сдвигом, стереолитография, электроно-, ионо-, рентгенолитография. Литография с использованием синхротронного излучения. Объемная субмикронная литография.

## **Тема 6. Нанотехнологии.**

Методы неравновесного синтеза наночастиц и нанокomпозитов. Квазиравновесные методы формирования нанослоевых и наноструктурированных композиций. Методы наноразмерной обработки и наномодификации материалов. Основы нанотехнологии биоорганических веществ.

## **Тема 7. 2D и 3D печатные технологии.**

3D аддитивные микроразмерные технологии. Технологии 2D трафаретной и рулонной печати. Технологии 2D каплеструйной печати. Спрей технологии. Технология локального лазерного модифицирования поверхности (3D MID).

## **Тема 8. Технологии 2D и 3D сборки.**

Система на кристалле, система в корпусе. Технология сборки перевернутым кристаллом (Flip-Chip). Стековая (этажерочная сборка кристаллов). Твердофазное сращивание кристаллов: термическое, плазменное, анодная стимуляция. Проволочный монтаж: термокомпрессия, лазерная и ультрозвуковая сварки. Процессы сборки кристаллов в корпус. Синтеринг.

## **Тема 9. Интенсификация и интеграция процессов микро- и нанотехнологии.**

Физико-технологические и экономические ограничения миниатюризации и интеграции. Нетермические методы активации физико-химических процессов: локальность, избирательность, скорость протекания процессов. Активация процессов полем и излучением: электрически стимулированная эпитаксия; фото- и СВЧ-стимулированные процессы осаждения, окисления и травления. Туннельно-полевое модифицирование поверхности: квантово-механические принципы локального переноса заряда, энергии, массы; технология атомно-молекулярного массопереноса и модифицирования с наноразрешением. Базовые принципы интеграции процессов: аппаратурная и топохимическая интеграция. Самоформирование: интеграция физико-химических процессов на основе анизотропии, маски дифференциального действия, принцип матрица. Интегрированные технологические кластерные комплексы: мини-фабрики, нанотехнологические комплексы на основе туннельно-полевого массопереноса и модифицирования. Системный подход к управлению качеством продукции: ЕСТД и её применение, структура и функции АСУТП, оптимизация контрольно-измерительных операций.

## **Тема 10. Системный подход к процессам микро- и нанотехнологии.**

Системная модель технологического процесса: объект, воздействие, процесс. Классификация процессов микро- и нанотехнологии по физико-химической сущности: механический, термический, химический, корпускулярно-полевой; виду процесса: нанесение, удаление, модифицирование; характеру протекания процессов: тотальный, локальный, селективный, избирательный, анизотропный; способу активации: тепло, излучение, поле. Виды термического и корпускулярно-лучевого воздействий: резистивный, лучистый и индукционный нагрев, электронные и лазерные пучки, плазма и ионные пучки. Каталитические свойства поверхности и атомно-силовое воздействие.

**Заключение.**

Построение технологических процессов на основе оптимального сочетания принципов управления, самоформирования, самоорганизации: адаптивный синтез микроэлектронных структур, самосогласованные цепи технологических операций. Атомно-молекулярная инженерия.

В случае, если дисциплина реализуется в группах с малой численностью, занятия по отдельным разделам могут проходить в виде установочной лекций, выдачи и объяснения задания по теме, а текущий контроль может проходить в виде представления и защиты аспирантом выполненного задания.

Общие рекомендации по выполнению индивидуальных заданий доступны для аспиранта в печатном или электронном виде (на сайте Университета), либо аспирант может получить рекомендации у преподавателя, отвечающего за дисциплину, в часы консультаций. Задание формулируется с учетом тематики диссертационного исследования аспиранта в рамках изучаемой дисциплины.

## **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Методические рекомендации по реализации дисциплины**

#### **Методические рекомендации преподавателям:**

Перед началом преподавания дисциплины преподавателю необходимо:

- знать цели и задачи преподавания дисциплины;
- представлять, какие знания, умения и навыки должен приобрести аспирант в процессе изучения данной дисциплины;
- четко понимать, в формировании каких результатов освоения программы аспирантуры участвует дисциплина.

Если учебным планом по дисциплине предусмотрен экзамен, его рекомендуется проводить в форме индивидуальной беседы с аспирантом по вопросам, сформулированным в фондах оценочных средств дисциплины, используя вопросы из различных разделов дисциплины, обеспечив тем самым более полную проверку знаний аспиранта.

В своей деятельности преподаватель должен руководствоваться локальными нормативными актами, регламентирующими образовательную деятельность по образовательным программам подготовки кадров высшей квалификации в университете.

#### **Методические рекомендации по самостоятельной работе аспирантов:**

Изучение каждой дисциплины должно сопровождаться самостоятельной работой аспиранта с рекомендованными преподавателями литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет по всем разделам дисциплины.

Ряд вопросов, подлежащих изучению в составе дисциплины, достаточно хорошо проработаны в учебной литературе, представлены в научных трудах, сборниках трудов, статьях, в сети Интернет. Эти вопросы могут быть переданы аспирантам на самостоятельное изучение. Такая работа строится на основе подготовленных преподавателем заданий с перечнем вопросов, на которые обучающийся должен найти ответы в процессе самостоятельного изучения. Самостоятельно

могут изучаться как целые темы, так и отдельные вопросы в составе обозначенных преподавателем, но не полностью раскрытых им тем. Для закрепления материала ведется конспектирование, готовятся рефераты, эссе или делаются доклады. Степень освоения самостоятельно изученных материалов обязательно проверяется контрольными мероприятиями с использованием фонда оценочных средств по дисциплине.

Особое место требуется уделить консультированию, как одной из форм обучения и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и аспирантами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятельности, которые указывают путь решения проблемы.

**Перечень основной и дополнительной учебной литературы,  
необходимой для освоения дисциплины**

№	Название, библиографическое описание	К-во экз. в библ. (на каф.)
1	Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. Учебное пособие. - М.: Высшая школа, 1990. - 423 с.: ил.	50
2	Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. Введение в процессы интегральных микро и нанотехнологий. Том 1, Том2. Учебное пособие. - М.: Бином, 2010-2011. - 320 с., 340с.: ил.	5
3	А.А. Борисов, В.А. Буробин. Обзор современных технологий гетерогенной интеграции многокомпонентных соединений АЗБ5 и кремниевых КМОП интегральных микросхем.-М. :Техносфера,2020.-255с.	3

**Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины**

№	Электронный адрес
1	<a href="http://infotechlib.narod.ru">http://infotechlib.narod.ru</a>
2	<a href="http://ru.wikipedia.org">http://ru.wikipedia.org</a>

Информационные технологии (операционные системы, программное обеспечение общего и специализированного назначения, а также информационные справочные системы) и материально-техническая база, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, соответствуют федеральным государственным требованиям.

Конкретные формы и процедуры текущего контроля знаний и промежуточной аттестации, включая перечень экзаменационных вопросов (Приложение 1), а также методические указания для обучающихся по самостоятельной работе при освоении дисциплин доводятся до сведения обучающихся на первом занятии.

**Список экзаменационных вопросов по дисциплине  
«Технология и оборудование для производства материалов  
и приборов электронной техники»**

1. Классификация процессов микро и нанотехнологии по физико-химической сущности: механический, термический, химический, корпускулярный, полевой.
2. Принципы и структуро- формообразование: маски, матрицы, селективности, самоформирование, самоорганизация.
3. Методы активации физико-химических процессов: резистивный, лучистый, индукционный нагрев.
4. Виды корпускулярно-лучевого воздействия: электронные, лазерные и ионные пучки.
5. Маскирующие, жертвенные и стоп-слои в процессах микро- и нанотехнологии.
6. Атомно молекулярная эпитаксия.
7. Газофазные методы осаждения и молекулярно-химической сборки.
8. Золь-гель технология нанокompозитов.
9. Капсулирование наночастиц, органо-неорганический интерфейс.
10. Процессы травления: вакуумно-термическое, газовое жидкостное, ионно-лучевое, ионно-плазменное, ионно-химическое, плазмо-химическое, лазерное, электронно-лучевое.
11. Термическое, электрохимическое и плазменное окисление.
12. Диффузионные процессы в планарной технологии.
13. Ионное окисление, нитрирование, протонизация.
14. Литографические процессы: фото-, электроно-, ионолитография.
15. Литография рентгеновским и синхротронным излучением.
16. Инпринт литография.
17. 3D аддитивные технологии.
18. 2D каплеструйные печатные технологии.
19. Спрей и ролл-ролл технологии.
20. 3D лазерное модифицирование поверхности (3D MID технологии).