

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по УР

И.Г. Игнатова

июль

2022г.

ПРОГРАММА ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
«СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И
ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»

Москва – 2022г.

1. Цель реализации программы

Цель программы – формирование профессиональных компетенций в области исследования материалов и процессов литографии с использованием синхротронного излучения (СИ)

2. Характеристика профессиональной деятельности и (или) квалификации

Область профессиональной деятельности: технология производства и исследования материалов, компонентов, электронных приборов, устройств, установок вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой, оптической, микро- и нанoeлектроники различного функционального назначения.

Вид экономической деятельности: обрабатывающие производства;

Укрупненная группа специальностей: 28.00.00 «Нанотехнологии и материалы», 22.00.00 «Технологии материалов»

Квалификация: отсутствует

3. Требования к результатам обучения

В результате освоения программы повышения квалификации у обучающихся должны быть сформированы следующие профессиональные компетенции:

Компетенция 1: Способен выбрать метод исследования материалов с использованием СИ, определять режимы измерений, осуществлять подготовку образцов, обрабатывать и интерпретировать полученные результаты.

В результате освоение данной программы обучающийся должен:

Знать:

- природу СИ, теоретические основы процессов его генерации и основные характеристики излучения;
- принципы построения и функционирования аппаратно-технологических комплексов СИ, экспериментальные возможности и особенности эксплуатации устройств, использующих СИ;
- метрологический потенциал методов измерения на основе СИ
- методы исследования материалов с использованием СИ и особенности их применения

Уметь:

- обосновать выбор метода и режимов измерения (исследования), осуществить планирование эксперимента;

- подготовить объект исследования в соответствии с требованиями к проведению измерений с использованием СИ;
- обработать результаты синхротронных измерений материалов

Иметь практический опыт: интерпретации результатов измерений, учитывая возможности и ограничения СИ.

Компетенция 2: Способен выбирать технологические параметры и режимы реализации процесса литографии с использованием СИ (СИ-литографии) и оценивать результаты переноса изображения топологического рисунка.

В результате освоения данной программы обучающийся должен:

Знать:

- природу и механизм взаимодействия СИ с веществом;
- принципы построения и функциональные возможности литографических комплексов, использующих источники синхротронного излучения;
- теоретические аспекты микролитографии с использованием СИ

Уметь:

- выбирать резисты, шаблоны, режимы экспонирования, реагенты и условия проявления в зависимости от задач, решаемых средствами микролитографии с использованием СИ;

Иметь практический опыт: оценки результатов формирования микроизображений с использованием СИ-литографии.

4. Содержание программы

**Учебный план
программы повышения квалификации
«СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И
ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»**

Категория слушателей – инженеры, бакалавры, магистры, аспиранты, научные сотрудники в области материаловедения и технологии материалов.

Срок обучения – 76 часов

Форма обучения – очная, очно/заочная с использованием дистанционных технологий.

№ п/п	Наименование разделов / модулей	Всего, час	В том числе			Образова тельные технологи и, в том числе ЭО и (или) ДОТ
			Аудиторных		Самост оятельн ая работа	
			Лекции	Практичес кие и лаборатор ные занятия		
1.	Модуль I Синхротронное излучение: генерация и основные характеристики	30	18	4	8	ЭО, ДОТ
2.	Модуль II Методы исследования материалов с использованием СИ	26	12	6	8	ЭО, ДОТ
3.	Модуль III Использование СИ в технологии микроэлектроники	16	10	2	4	ДОТ
	Всего	72				
Итоговая аттестация			4			
Итого:			76			

**Учебно-тематический план
программы повышения квалификации
«СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И
ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»**

№ п/п	Наименование тем разделов / модулей	Всего, час	В том числе			Образова тельные технологи и, в том числе ЭО и (или) ДОТ
			Аудиторных		Самост оятельн ая работа	
			Лекции	Практичес кие и лаборатор ные занятия		
1	Модуль I Синхротронное излучение: генерация и основные	30	18	4	8	ЭО, ДОТ

	характеристики					
1.1	Общие сведения о синхротронном излучении	3	2	-	1	
1.2	Источники СИ	6	4	-	2	
1.3	Характеристики СИ	6	4	-	2	
1.4	Вставные магнитные устройства для генерации СИ.	7	4	2	1	
1.5	Оборудование каналов СИ	8	4	2	2	
2	Модуль II Методы исследования материалов с использованием СИ	26	12	6	8	ЭО, ДОТ
2.1	Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом	6	2	2	2	
2.2	Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решетке.	4	2	-	2	
2.3	Факторы, влияющие на интенсивность рентгеновских максимумов	4	2	-	2	
2.4	Рентгеноструктурный анализ с использованием СИ	6	2	2	2	
2.5	Спектральные методы анализа с использованием СИ	2	2	-	-	
2.6	EXAFS и XANES – спектроскопия	4	2	2	-	
3	Модуль III Использование СИ в технологии микроэлектроники	16	10	2	4	ДОТ
3.1	Чистые производственные помещения в производстве микроэлектроники	4	2	-	2	
3.2	Особые требования к участку микролитографии	4	2	2	-	
3.3	Виды литографии. Типы установок литографии на СИ Формирование рисунка	4	2	-	2	

3.4	Применение СИ в производстве шаблонов Контроль технологических этапов микролитографии	2	2	-	-	
3.5	Перспективы использования СИ в технологии микроэлектроники	2	2	-	-	
	Всего	72				
Итоговая аттестация		4				
Итого:		76				

Календарный учебный график

Календарный учебный график составляется в форме расписания занятий при наборе группы и прилагается к программе повышения квалификации.

Учебная программа повышения квалификации

«СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»

1. Модуль I. Синхротронное излучение: генерация и основные характеристики (30 часов)

Тема 1.1. Общие сведения о синхротронном излучении.

Исторические аспекты открытия синхротронного излучения (СИ). Отличительные особенности СИ и связанные с ними возможности, направления и перспективы его практического использования. Основные положения Федеральной программы развития синхротронных и нейтронных исследований на 2019-2027 годы (комплексы синхротронных исследований «мегасайенс» в Национальном проекте «Наука» 2018). Требования к компетентностному профилю специалистов в области синхротронных исследований.

Тема 1.2. Источники СИ.

Движение зарядов в электромагнитном поле. Особенности движения релятивистских заряженных частиц. Диаграммы направленности электромагнитного излучения при разных условиях движения зарядов. Ускорители заряженных частиц - фазотрон, циклотрон, бетатрон, синхрофазотрон. Принципиальное устройство синхротрона. Поворотные магниты. СИ как паразитное магнитотормозное излучение.

Накопительные кольца – источники 2-го поколения. Ускорительные системы. Автофазировка и образование электронных сгустков (банчей). Синхротронные колебания и область захвата. Бетатронные колебания и система жесткой электромагнитной фокусировки (магнитная структура синхротрона). Релятивистский эффект Доплера.

Тема 1.3. Характеристики СИ

Основные характеристики электромагнитного излучения. Связь параметров СИ с условиями движения зарядов. Свойства СИ из поворотных магнитов. Характеристики СИ: освещенность, интенсивность, яркость, спектр, спектральная мощность, полный поток фотонов, угловое распределение, спектральная яркость источника, поляризация, временная (импульсная) структура. Эмиттанс электронного пучка. Критическая частота, критическая длина волны и критическая энергия синхротронного спектра.

Тема 1.4. Вставные магнитные устройства для генерации СИ.

Генерация излучения зарядами в переменном магнитном поле. Физическая концепция Гинзбурга В.Л. Ондулятор. Свойства ондуляторного излучения. Вигглер. Шифтер. Сравнительная характеристика СИ из поворотных магнитов и ондуляторного излучения. Источники СИ 3-го поколения. Рентгеновские лазеры на свободных электронах – источники СИ 4-го поколения. Вынужденное когерентное СИ.

Тема 1.5 Оборудование каналов СИ.

Обустройство каналов вывода пучков СИ. Особенности эксплуатации рентгеновской оптики с пучками СИ. Средства контроля и диагностики пучков СИ. Детекторы рентгеновского излучения, их типы и основные характеристики. Ионизационные и полупроводниковые детекторы. Сцинтилляционные счетчики. Координатные детекторы. Телевизионные детекторы. Учет мертвого времени детектора. Устройства для управления пучками СИ: заслонки, коллиматоры, мониторы пучков рентгеновских лучей, монохроматоры, кристалл-спектрометры, рентгеновские зеркала и др. Вакуумный ультрафиолетовый спектрометр (ВУФ–спектрометр) Установка фотоэлектронной спектроскопии. Экспериментальные станции. Международные центры синхротронных исследований.

Перечень практических занятий

Номер темы	Наименование практического занятия	Кол-во часов
1.4.	Вигглеры. Ондуляторы. Возможности и преимущества. Расчет яркости.	2
1.5.	Выбор средств контроля и диагностики пучков СИ.	2

Модуль II. Методы исследования материалов с использованием СИ (26 часов).

Тема 2.1. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Источники рентгеновского излучения для исследования материалов. Рентгеновский спектр. Механизмы возникновения сплошного и характеристических спектров. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом (поглощение, упругое и неупругое рассеяние).

Тема 2.2. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решетке.

Обратная решетка. Дифракция рентгеновских лучей на одномерной и трехмерной кристаллической решетке. Уравнение Лауэ, уравнение Вульфа-Брэгга. Сфера Эвальда.

Тема 2.3. Факторы, влияющие на интенсивность рентгеновских максимумов.

Факторы, влияющие на интенсивность рентгеновских максимумов (структурный, фактор поляризации, фактор Лоренца, фактор повторяемости, фактор Дебая, фактор абсорбции).

Тема 2.4. Рентгеноструктурный анализ с использованием СИ.

Основы метода рентгеноструктурного анализа, область применения, ограничения. Способы расшифровки рентгенограмм. Особенности рентгеноструктурного анализа с использованием СИ.

Тема 2.5. Спектральные методы анализа с использованием СИ.

Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (РФС), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (УФ-ФЭС/ЭСХА), УФ-фотоэлектронная спектроскопия. Физические основы, виды спектров, область применения.

Тема 2.6. EXAFS и XANES – спектроскопия.

Физические основы. Эксклюзивные возможности. Виды спектров. Интерпретация спектров. Примеры применения. Исследование кристаллических и аморфных материалов. Дальняя тонкая структура рентгеновских спектров поглощения. Примеры спектров.

Перечень практических занятий

Номер темы	Наименование практического занятия	Кол-во часов
2.1.	Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Расчет защитных экранов	2
2.4	Расшифровка рентгенограммы от поликристаллического образца.	2
2.6.	Интерпретация EXAFS- и XANES спектров.	2

Модуль III. Использование СИ в технологии микроэлектроники (16 часов).

Тема 3.1 Чистые производственные помещения в производстве микроэлектроники. Действующие международные и российские стандарты по классам чистых помещений в соответствии с требованиями производственного процесса. Технические характеристики ЧПП, классы чистоты, температура, влажность, другие параметры.

Тема 3.2 Особые требования к участку микролитографии. Конструктивные решения, зонирование, организация воздухообмена, возвратные шахты и др. Методы и приборы контроля параметров ЧПП.

Тема 3.3 Виды литографии. Типы установок литографии на СИ. Формирование рисунка.

Литография контактная и проекционная. Фотолитография, ионная литография, электронно-лучевая, рентгеновская, литография на синхротронном излучении. Сравнительный анализ возможностей и ограничений. Позитивные радиационные резисты. Негативные радиационные резисты. Подготовка поверхности и нанесение резистивных пленок. Предэкспозиционная термообработка резистивных пленок. Радиационное экспонирование. Проявление изображений в резисте. Удаление резиста. Безрезистная технология.

Тема 3.4 Применение СИ в производстве шаблонов. Контроль технологических этапов микролитографии.

Особенности шаблонов для рентгенолитографии. Требования к материалу шаблона (малый коэффициент поглощения в области мягкого рентгеновского излучения, термостойкость, неплоскостность, шероховатость, стабильность). Метки совмещения.

Тема 3.5 Перспективы использования СИ в технологии микроэлектроники.

LIGA –технологии. Базовые принципы. Основные технологические этапы. Принципы построения LIGA- станций. Достоинства, недостатки, перспективы развития.

Перечень практических занятий

Номер темы	Наименование практического занятия	Кол-во часов
3.2	Расчет параметров воздухообмена на участке микролитографии	2

5. Материально-технические условия реализации программы

Наименование специализированных аудиторий кабинетов, лабораторий	Вид занятия	Наименование оборудования, программного обеспечения
Учебная аудитория для проведения семинаров и лабораторных работ	Практические занятия	Компьютер с ПО и возможностью подключения к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду МИЭТ, беспроводная клавиатура + мышь, Проектор MS Office 2007/2010, Internet Explorer/Chrome, MS Visio

6. Учебно-методическое обеспечение программы

1. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ / Под ред. Л.А. Асланова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 672 с.
2. Михалин В.В. Синхротронное излучение в спектроскопии. Учеб. пособие. – М.: МГУ, 2007. – 160 с.
3. Кулипанов Г.Н. Синхротронное излучение, история и применение – ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера – URL:
http://xray-optics.ucoz.ru/articles/History_and_usage_of_SR.pdf
4. Тернов И.М. Синхротронное излучение / Успехи физических наук, 1995, Том 165, № 4, с 439-456
5. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. В 2-х частях. Часть 1. М.: Издательство «Мир». Редакция литературы по электронике, 1990. – 605 с.
6. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. В 2-х частях. Часть 2. М.: Издательство «Мир». Редакция литературы по электронике, 1990. – 632 с.
7. Гольденберг Б.Г. Базовые принципы LIGA-технологии. – URL:
<https://studylib.ru/doc/2049691/bazaovye-principy-liga--tehnologii>

7. Оценка качества освоения программы

Оценка качества освоения программы осуществляется по результатам прохождения слушателем контрольного опроса, включающего три вопроса по одному для каждого модуля программы. Вопросы включают не только сведения теоретического характера, но и расчетные (практические) задания, подобные тем,

которые разбирались на практических занятиях. Условия начисления баллов за результаты контрольного опроса приведены в таблице:

Критерий оценивания	Условия начисления баллов	Количество баллов
Правильность ответа на вопросы, включая выполнение расчетного (практического) задания	Даны правильные ответы на три вопроса	15
	Даны правильные ответы на два вопроса	10
	Дан правильный ответ на один вопрос	5
	Правильные ответы не даны	0
Суммарный балл		0 - 15

Минимальное количество баллов, при котором программа считается освоенной, составляет 5 баллов.

8. Составители программы

Доцент ИПМТ, к.т.н.


/Л.И. Матына/

Зав. каф. МиУП, к.ф.-м.н, доцент



/С.П. Олейник/

Согласовано:

Директор ДРОП


/Н.Ю. Соколова/

Зам. директора института ПМТ


/А.В. Железнякова/