



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПТМ РАН

чл.-корр. РАН

Д.В. Рощупкин

2025 г.

Решение Ученого совета ИПТМ РАН
Протокол №8 от 15.09.2025 г.

Усовершенствованная дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Растровая электронная микроскопия полупроводниковых материалов и структур», разработанная в рамках выполнения ОКР «Разработка универсального растрового электронного микроскопа»

1. История развития и назначение растровой электронной микроскопии
2. Принципы работы и устройство растрового электронного микроскопа (РЭМ)
 - 2.1. Электронная пушка
 - 2.2. Осветительная система
 - 2.3. Фокусирующая система
 - 2.4. Отклоняющая и стигмирующая системы
 - 2.5. Детекторы вторичных и обратно рассеянных электронов
3. Взаимодействие ускоренных электронов с твердым телом
 - 3.1. Механизмы рассеяния и формирование сигналов взаимодействия электронов с веществом
 - 3.2. Длина пробега электронов
 - 3.3. Эмпирическое описание пробега электронов в твердом теле
 - 3.4. Моделирование пробега электронов методом Монте Карло
4. Методы РЭМ
 - 4.1. Режим вторичных электронов
 - 4.1.1. Формирование изображения рельефа поверхности
 - 4.1.2. Потенциальный контраст
 - 4.1.3. Контраст легированных областей
 - 4.2. Режим обратно рассеянных электронов
 - 4.2.1. Формирование изображения рельефа поверхности
 - 4.2.2. Выявление изменения химического состава
 - 4.2.3. Особенности формирования изображения ступенек
 - 4.2.4. Сравнение изображений в режимах вторичных и обратно отраженных электронов
 - 4.3. Метод наведенного тока
 - 4.3.1. Физические принципы
 - 4.3.2. Измерение диффузионной длины в полупроводниковых материалах
 - 4.3.3. Выявление протяженных дефектов и исследование их свойств
 - 4.3.4. Родственные методы: метод индуцированного потенциала, метод индуцированной емкости
 - 4.4. Метод катодолюминесценции
 - 4.4.1. Физические принципы
 - 4.4.2. Измерение локальных спектров люминесценции
 - 4.4.3. Выявление протяженных дефектов и исследование их оптических свойств
- 4.5. Волновая и энерго-дисперсионная рентгеновская спектроскопия
 - 4.5.1. Количественное определение химического состава

- 4.5.2. Карты распределения химического состава
- 4.6. Метод дифракции обратно рассеянных электронов
 - 4.6.1. Физические принципы и система регистрации
 - 4.6.2. Методы обработки сигнала
 - 4.6.3. Определение локальной ориентации кристаллов
 - 4.6.4. Карты распределения ориентации зерен
 - 4.6.5. Определение типов границ зерен
- 4.7. Пространственное разрешение методов РЭМ
- 5. Оценки нагрева образцов в РЭМ
- 6. Исследование полупроводниковых материалов методами РЭМ
 - 6.1. Примеры измерения диффузионной длины в узкозонных полупроводниках
 - 6.2. Исследование дефектов упаковки в 4H-SiC
 - 6.3. Исследование протяженных дефектов кремния
 - 6.4. Измерение диффузионной длины и исследование дислокаций в GaN
 - 6.5. Измерение диффузионной длины и спектров катодолюминесценции в различных полиморфах Ga₂O₃
- 7. Измерение энергии ионизации методом наведенного тока
- 8. Предсказание параметров бета-вольтаических элементов методами РЭМ
 - 8.1. Расчет зависимости поглощенной энергии бета-частиц для основных полупроводниковых материалов
 - 8.2. Расчет параметров бета-вольтаических элементов на основе измерений методом наведенного тока
 - 8.3. Сравнение с результатами измерений с использованием радиоактивного источника
- 9. Модификация свойств материалов электронным пучком РЭМ
 - 9.1. Рекомбинационно-ускоренное скольжение дислокаций
 - 9.2. Влияние облучения в РЭМ на оптические свойства полупроводниковых материалов (ZnO, светоизлучающие структуры с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN)
 - 9.3. Исследование процессов деградации гибридных органо-неорганических перовскитов методами РЭМ
- 10. Специализированные РЭМ для диагностики полупроводниковых наноструктур
 - 10.1. Системы поиска дефектов
 - 10.2. Системы для верификации дефектов
 - 10.3. РЭМ для измерения критических размеров
 - 10.4. Комбинированные системы
 - 10.5. Измерительные РЭМ
- 11. Электронные литографы (ЭЛ)
 - 11.1. ЭЛ с профилированным и гауссовским электронным пучком
 - 11.2. Многолучевые и многоколонные ЭЛ
 - 11.3. ЭЛ для производства шаблонов наноструктур
- 12. Электронно-оптические системы (ЭОС) специализированных РЭМ и ЭЛ. Основные технические характеристики, конструкция, методы расчетов и оптимизации
 - 12.1. Катоды и катодные узлы
 - 12.2. Конденсорные линзы
 - 12.3. Объективные линзы
 - 12.4. Детекторы сигналов: in-lens, through the lens и конверсионные детекторы
 - 12.5. Отклоняющие системы
 - 12.6. Стигмирующие системы
 - 12.7. Столики объектов
- 13. Измерение топологии наноструктур. Измерение критических размеров (CD), 2D, 2,5D и 3D измерения

14. Низковольтная микроскопия высокого разрешения. РЭМ с промежуточным ускорением и замедлением электронов
15. Формирование РЭМ изображения. Совмещение оптического и РЭМ изображений
16. Практические вопросы растровой электронной микроскопии
 - 16.1. Подготовка объектов для исследований
 - 16.2. Настройка режимов работы катодного узла
 - 16.3. Юстировка и калибровка ЭОС
 - 16.4. Получение высокого разрешения

Контрольные вопросы

1. Какие виды излучения образуются при взаимодействии электронного зонда с образцом?
2. Как формируется электронный зонд?
3. Что такое зона генерации и каков ее объем?
4. Принципы получения и оптимизации изображения.
5. Перечислите основные узлы РЭМ.
6. Типы детекторов, особенности изображения при использовании различных детекторов.
7. Перечислите основные методы РЭМ.
8. Вследствие каких процессов образуется характеристическое рентгеновское излучение?
9. Какие характеристики материалов позволяет реализовать метод наведенного тока?
10. Какие характеристики материалов позволяет наблюдать катодолюминесценцию?
11. Какие задачи материаловедения можно решать методом рентгеноспектрального микроанализа?
12. Основные принципы метода дифракции обратно рассеянных электронов.

Объем и виды учебной работы (час)

Общая трудоёмкость	72
Аудиторные занятия, в том числе:	44
Лекции	20
Практические занятия	24
Самостоятельная работа	28

Рекомендуемая литература

1. Гоулдстейн Дж., Джой Д., Лифшин Э., Ньюбери Д., Фиори Ч., Эчлин П. «Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ», МИР, М., 1984 г.
2. Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин. «Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Аппаратура, принцип работы, применение», Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2002.
3. К.Б. Калмыков, Н.Е. Дмитриева «Сканирующая электронная микроскопия и рентгено-спектральный анализ неорганических материалов», Методическое пособие для студентов химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, М., 2017.
4. С.Дж.Б. Рид «Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии», Техносфера. М., 2008.
5. L. Reimer «Scanning Electron Microscopy Physics of Image Formation and Microanalysis», Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985, 1998.
6. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Под редакцией Уэйли Жу и Жонг Пин Уанга. Бином, Лаборатория знаний, М., 2016.