

Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий

Методы и применение

Под редакцией
Уэйли Жу и Жонг Лин Уанга

Перевод с английского
С. А. Иванова и К. И. Домкина

под редакцией
канд. техн. наук Т. П. Каминской

4-е издание, электронное



Москва
Лаборатория знаний
2021

УДК 621.3+681.54
ББК 30.3+22.3
P24

Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий.
P24 Методы и применение / под ред. У. Жу, Ж. Л. Уанга ;
пер. с англ. — 4-е изд., электрон. — М. : Лаборатория зна-
ний, 2021. — 601 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ;
экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-142-2

В книге под редакцией известных ученых собраны статьи и обзоры видных специалистов в области нанотехнологий, посвященные растровой электронной микроскопии (РЭМ). С помощью РЭМ можно изучать свойства наночастиц, нанопроволок, нанотрубок, трехмерных наноструктур, квантовых точек, магнитных наноматериалов, фотонных кристаллов и биологических наноструктур.

Рассмотрены различные типы РЭМ, включая просвечивающие микроскопы с высоким разрешением, рентгеновский микроанализ, новейшие методы получения изображения посредством обратно рассеянных электронов, а также методы электронной криомикроскопии для исследования биообъектов.

Книга предназначена для широкого круга практических специалистов в сфере нанотехнологий, но будет полезна также студентам вузов и разработчикам новых типов растровых электронных микроскопов.

УДК 621.3+681.54
ББК 30.3+22.3

Деривативное издание на основе печатного аналога: Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение / под ред. У. Жу, Ж. Л. Уанга ; пер. с англ. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 582 с. : ил., [16] с. цв. вкл. — ISBN 978-5-9963-1110-1.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

Translation from the English language edition:
Scanning Microscopy for Nanotechnology
edited by Weilie Zhou, Zhong Lin Wang

Copyright © 2006 Springer Science+Business Media, LLC
All Rights Reserved

ISBN 978-5-00101-142-2

© Лаборатория знаний, 2015

Оглавление

Предисловие	9
Словарь наиболее часто используемых аббревиатур	17
Глава 1. Основы растровой электронной микроскопии	19
1. Введение	19
1.1. Пространственное разрешение и уравнение Аббе	19
2. Устройство растровых электронных микроскопов	28
2.1. Электронные пушки	29
2.2. Электронные линзы	35
2.3. Параметры колонны	38
2.4. Формирование изображения	43
2.5. Вакуумная система	52
3. Подготовка образцов	55
3.1. Процедуры получения изображений биоорганических образцов в РЭМ высокого разрешения	55
3.2. Фиксация образцов и методы сушки	56
3.3. Дегидратация и высушивание на воздухе	57
3.4. Метод сублимационной криосушки	58
3.5. Сушка в критической точке	58
3.6. Нанесение металлических покрытий	59
3.7. Структурные исследования с помощью ВРРЭМ химически фиксированных массивных биологических тканей, высушенных в критической точке	60
Заключение	64
Литература	64
Глава 2. Метод дифракции отраженных электронов (ДОЭ) и примеры исследования материалов	66
1. Введение	66
1.1. История	66
1.2. Как работает метод ДОЭ?	72
2. Данные измерений	77
2.1. Столбец «Фаза»	78
2.2. Подгоночный модуль	78
2.3. Ориентация	79
2.4. Среднее угловое отклонение	79
2.5. Контраст полос	80
2.6. Крутизна профиля полосы	80

3. Анализ данных	81
3.1. Анализ размера зерен	81
3.2. Виды карт, получаемых методом ДОЭ	82
4. Примеры применения	89
4.1. Алюминиевый сплав, полученный сваркой трением	90
4.2. Деформированный интерметаллический сплав Fe–Al	92
4.3. Тонкие пленки платины	95
4.4. Медная тонкая пленка	98
4.5. Алюминиевая тонкая фольга	102
5. Текущие ограничения метода ДОЭ и перспективы его применения	105
5.1. Пространственное разрешение	105
5.2. Угловое разрешение	106
5.3. Быстродействие	106
6. Выводы	106
Литература	106

Глава 3. Рентгеновский микроанализ в наноматериалах 107

1. Введение	107
1.1. Генерация рентгеновских сигналов	108
1.2. Детектирование сигнала рентгеновского излучения	111
1.3. Параметры энергодисперсионного спектрометра	113
1.4. Рентгеновские артефакты	118
2. Моделирование наноматериалов методом Монте-Карло	121
3. Примеры исследований	125
3.1. Компьютерный чип	125
3.2. Нанопроволока	130
3.3. Наночастицы	131
4. Выводы	135
Литература	136

Глава 4. Низкокиловольтная растровая электронная микроскопия 137

1. Введение	137
2. Генерация электронов и ускоряющее напряжение	140
3. «Зачем применяют низкокиловольтный режим?»	143
4. Применение низких ускоряющих напряжений	150
5. Выводы	157
Литература	158

Глава 5. Электронно-лучевая нанолитография в растровом электронном микроскопе 159

1. Введение	159
1.1. Основы электронно-лучевой литографии на базе растрового микроскопа	159
1.2. Описание электронно-литографической системы на базе РЭМ	162
1.3. Подключение системы литографии к РЭМ	165
2. Материалы и подготовка к обработке	170
2.1. Подложки	170
2.2. Резисты	171
2.3. Нанесение резиста центрифугированием	177
3. Генератор шаблонов	177
3.1. Методические указания по проектированию шаблона	178

3.2. Конфигурация системы	180
3.3. Настройка микроскопа	181
4. Обработка экспонированного шаблона	183
4.1. Проявление	183
4.2. Нанесение резиста и взрывная технология.	184
4.3. Травление	186
4.4. Контроль шаблона и общие ошибки.	187
5. Применение электронно-лучевой нанолитографии в нанотехнологии	190
5.1. Нанотранзисторы	191
5.2. Нанодатчики	193
5.3. Магнитные наноприборы	194
5.4. Биологические применения	196
6. Выводы	196
Литература.	197

Глава 6. Просвечивающая растровая электронная микроскопия для исследования наноструктур

1. Введение	200
2. Получение изображений в просвечивающем растровом электронном микроскопе	203
2.1. Формирование электронного зонда.	206
2.2. Контраст изображения	213
3. Получение спектральных изображений	226
4. Получение трехмерных изображений	230
5. Последние прикладные исследования в области наноструктур	234
5.1. Нанотрубки	234
5.2. Нанокатализ.	236
5.3. Стабилизация подложек лантаном.	237
5.4. Полупроводниковые нанокристаллы	238
5.5. Магнитные наночастицы.	240
5.6. Наностержни из ZnO	241
5.7. Наноразмерное разделение фаз в сложных оксидах	243
6. Перспективы развития ПРЭМ	244
Литература.	245

Глава 7. Введение в наноманипулирование in situ для конструирования наноматериалов

1. Введение	249
2. Электронно-лучевой нагар в РЭМ.	250
2.1. Предотвращение появления загрязнений.	254
2.2. Удаление загрязнений	255
3. Типы наноманипуляторов.	255
3.1. Лабораторные конструкции наноманипуляторов	257
4. Рабочие органы манипуляторов.	259
4.1. Зонды.	259
4.2. Зонды-кантилеверы	264
4.3. Микроэлектромеханические захваты	264
5. Применение наноманипуляторов	265
5.1. Нанопозиционирование	266
5.2. Механическое зондирование наноструктур	268

5.3. Электрические игольчатые зонды	270
5.4. Применение наноманипуляторов в электрических зондовых измерениях интегральных микросхем.	279
5.5. Извлечение тонкого среза полупроводниковой структуры	281
5.6. Манипуляция in situ в просвечивающем электронном микроскопе	284
5. Выводы	284
Литература.	286

Глава 8. Применение фокусированного ионного пучка и двухлучевых систем DualBeam для изготовления наноструктур	288
1. Введение	288
2. Генераторы шаблонов, встроенные в приборы ФИП.	290
3. Травление с помощью ФИП либо ХГФО пленок по двумерным шаблонам с программируемой дозой	294
4. Нанесение рисунка электронным лучом с помощью встроенных генераторов шаблонов	296
5. Автоматизация наноразмерного управления пучком.	297
6. Непосредственное изготовление наноразмерных структур.	299
7. Выводы	300
Литература.	300

Глава 9. Нанопроволоки и углеродные нанотрубки.	302
1. Введение	302
2. Нанопроволоки из полупроводниковых соединений III–V	302
3. Нанопроволоки из полупроводниковых соединений групп II–VI.	315
4. Одноэлементные нанопроволоки	324
5. Углеродные нанотрубки.	332
5.1. Многостенные углеродные нанотрубки	332
5.2. Одностенные углеродные нанотрубки.	336
5.3. Прецизионное отрезание углеродных нанотрубок	341
6. Выводы	342
Литература.	343

Глава 10. Фотонные кристаллы и устройства	346
1. Введение	346
1.1. Фотонные кристаллы: что это такое?	346
1.2. Физическое объяснение происхождения запрещенной зоны в фотонных кристаллах [5].	348
1.3. Обзор применений фотонных кристаллов	349
2. Растровая электронная микроскопия фотонных кристаллов	355
2.1. 2D фотонные кристаллы	355
2.2. Трехмерные фотонные кристаллы	360
3. Создание фотонных кристаллов с помощью РЭМ	365
3.1. Микроманипуляции в РЭМ	365
3.2. Фотонные кристаллы, полученные путем микроманипуляции	367
4. Заключение	370
Литература.	370

Глава 11. Наночастицы и коллоидные самосборки.	373
1. Введение	373
2. Металлические наночастицы	374
3. Мезо- и нанопористые металлические наноструктуры	389

4. Нанокристаллические оксиды	397
4.1. Нанокристаллические оксиды для оптических применений	397
4.2. Нанокристаллические магнитные оксиды	410
5. Наноструктурные полупроводники и термоэлектрические материалы	416
6. Заключение	423
Литература	423

Глава 12. Наноблоки, изготовленные посредством темплатов	427
1. Введение	427
2. Материалы и методы	428
2.1. Производство пористых мембран	428
2.2. Синтез 3D коллоидных кристаллов	430
2.3. Электрохимическое осаждение	431
2.4. Наблюдения с РЭМ и ПЭМ	432
3. Наноблоки	432
3.1. Нанонити из пористых темплатов	432
3.2. Нанотрубки на основе темплатов, модифицированных клеевыми волокнами	433
3.3. Нанопроволоки со структурированными концами из темплатов с модифицированными нанотрубками	435
3.4. Нити из коллоидных кристаллов и пористые волокна из прямых сборок	437
3.5. 1D, 2D, 3D инверсные коллоидные кристаллы из трехмерных коллоидных кристаллов	445
3.6. Получение 3D металлических сферических коллоидных кристаллов на основе инверсных коллоидных кристаллов	450
4. Выводы	452
Литература	453

Глава 13. Одномерные полупроводниковые структуры с кристаллической решеткой типа вюрцита	456
1. Введение	456
1. Синтез и изготовление одномерных наноструктур	457
2.1. Метод газофазного осаждения	457
2.2. Методы химического синтеза из растворов	461
2.3. Совместные методы синтеза, включающие технику литографии	461
3. Одномерные наноструктуры на основе оксидов металлов	463
3.1. Оксидные нанопроволоки	463
3.2. Оксидные нанотрубки	465
3.3. Оксидные наноленты	472
3.4. Иерархическая наноструктура оксида	485
4. Механизмы роста	495
4.1. Каталитические процессы роста «пар-жидкость-кристалл»	495
4.2. Самокаталитический механизм роста	501
5. Выводы	503
Литература	503

Глава 14. Бионаноматериалы	508
1. Введение	508
2. Нановолокна	510
2.1. Нановолокна, полученные методом разделения фаз	510

2.2. Трехмерные нановолокнистые макропористые каркасы	521
2.3. Получение нановолокон посредством электропрядения	524
3. Наночастицы	526
3.1. Применение нанокомпозитных каркасов из полимера/гидроксиапатита в инженерии костных тканей	526
3.2. Наночастицы/наносферы для доставки биологически активных агентов	534
4. Модификация поверхности	538
4.1. Методы модификации поверхности, применяемые в инженерии тканей	538
4.2. Нанесение желатина на поверхность нановолокнистых <i>PLLA</i> каркасов	540
5. Заключение	546
Литература	546
Глава 15. Низкотемпературные стадии в наноструктурных исследованиях	549
1. Введение	549
2. Термины, используемые в крио-ВРРЭМ водных систем	550
3. Жидкая вода, лед и витрифицированная вода	552
4. История развития низкотемпературной РЭМ	554
5. Аппаратура и методы	556
5.1. Внутрелинзовый крио-ВРРЭМ	556
5.2. Окололинзовый крио-ВРРЭМ	559
5.3. Специальные приемы установки криообразца, используемые при низкотемпературной растровой микроскопии	560
Литература	572
Предметный указатель	574