537.633.35(049.3)

ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

(Физика формирования изображения и микроанализ)

Reimer L. Transmission Electron Microscopy (Physics of Image Formation and Microanalysis)/ Ed. D. L. MacAdam. — Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1984. — 521 p. — (Springer Series in Optical Sciences. V. 36).

С помощью электронного микроскопа исследователем регистрируется «изображение» объекта. Этим объясняется широкое применение метода электронной микроскопии в различных областях науки и техники. Однако имеется серьезная опасность ошибочного толкования полученных результатов. Это связано с тем, что человек, воспринимающий мир невооруженным глазом или же использующий оптические инструменты, зачастую при анализе электронно-микроскопической фотографии воспринимает изображение объекта либо в самом обычном, традиционном смысле этого слова, либо как снимок, сделанный фотокамерой. Для правильной интерпретации изображения необходимо знать физические законы взаимодействия электронов с веществом и представлять сам механизм формирования изображения в приборе. Необходимо отметить, что за последние 20 лет электронная микроскопия обогатилась различными методами локального анализа вещества и дала возможность извлекать количественные характеристики малых областей исследуемого материала. Сейчас имеется возможность получать не только изображение исследуемого участка вещества, но и количественный «паспорт» по целому перечню параметров. Энергичное развитие растровой электронной микроскопии за этот же период также обогатило электронную микроскопию: резко возросла ее информативность, расширился круг изучаемых материалов, процессов и условий, при которых происходит анализ вещества. В настоящее время, говоря об электронной микроскопии, мы подразумеваем уже комплекс

исследований, который принято называть аналитической микроскопией: сюда входит рентгеновская спектрометрия, методы электронной дифракции, спектрометрия энергетических потерь электронов, микроскопия на селективных энергиях, компьютерная обработка изображения и т. д.

Поэтому несомненный интерес представляет вышедшая в 1983 г. монография профессора Л. Раймера «Transmission Electron Microscopy», написанная на основе лекций, читаемых им в университете г. Мюнстера (ФРГ).

Рецензируемая книга состоит из 10 глав. В вводной читатель знакомится с различными типами современных электронных микроскопов — эмиссионными, растровыми, просвечивающими для изучения поверхности массивных объектов и тонких пленок; обсуждаются вопросы высокого разрешения, основные характеристики приборов, проблемы высоковольтной и аналитической микроскопии. Кратко описывается механизм формирования изображения в каждом из этих микроскопов, отмечаются специфические особенности отображаемой информации. Вторая глава подробно освещает основы корпускулярной оптики электрона. Рассматривается движение электрона в электромагнитных полях, представлена теория электромагнитных линз, теория аберраций. В третьей главе изложена теория волновой оптики. Движение электрона описывается с помощью концепции волнового пакета. Амплитудная интерпретация изображения дается в терминологии обратного фурье-преобразования, а также с использованием пространственных частот и с введением фазового смещения. В гл. 4 описаны элементы просвечивающего электронного микроскопа, принципы формирования изображения. Почти половина книги отведена физике взаимодействия электронов с веществом объекта и физическим основам возникновения контраста и интерпретации изображения для аморфных и кристаллических объектов. Так, в гл. 5 описаны закономерности упругого и неупругого рассеяния электронов в веществе, эффекты многократного рассеяния, механизмы возникновения рентгеновского излучения и оже-эмиссии электронов. Основы физического механизма появления контраста за счет упругого рассеяния электронов и фазового контраста как результат волновой природы электрона для аморфных объектов рассматриваются в гл. 6. Изложена проблема формирования изображения одиночного атома. Гл. 7 вводит основы кинематической и динамической теории электронной дифракции. Заключается глава описанием распределения интенсивности в дифракционных рисунках на аморфных пленках, поликристаллических образцах (кольца Дебая — Шерера), механизма появления линий и полос Кикучи. Опираясь на основы изложенной теории, в следующей главе разобраны закономерности дифракционного контраста и возможности построения изображения кристаллической структуры, подробно разбирается формирование контраста дефектов в кристаллической решетке. Гл. 9 «Аналитическая электронная микроскопия» отражает комплекс методик современного уровня, которые используются в электронной микроскопии для получения максимума информации об объекте. Это — электронная спектрометрия, рентгеновская спектрометрия по энергиям, дифракционные методы идентификации веществ путем измерения параметров решетки, анализ в точке и сканирующий режим с использованием методов растровой электронной микроскопии.

Последняя глава посвящена такому важному вопросу, как воздействие ускоренного потока электронов на материал объекта. Дается физическая трактовка таких явлений, как локальный нагрев вещества и появление радиационных нарушений в органических и неорганических материалах, возникновение загрязнения поверхности объекта за счет конденсации и полимеризации молекул гидроуглерода из вакуума на поверхность вещества.

Надо отметить, что в книге представлен очень большой материал, однако изложен он в определенной степени неравномерно и уровень различных разделов существенно отличается друг от друга. Достаточно глубоко и детально разобраны вопросы взаимодействия электронного потока с веществом, механизмы упругого, неупругого, многократного рассеяния, передачи энергии в электронно-ядерных соударениях и т. д. Этот раздел очень важен, поскольку является базовым для рассмотрения проблемы потерь энергии электронов, проходящих через вещество. Также интересны главы, излагающие вопросы рассеяния и фазового контраста, дифракционного контраста, акцентирующие внимание на получении изображения кристаллической решетки и ее дефектов. На этом уровне, вероятно, нецелесообразно было давать в гл. 7 основные понятия из теории кристаллографии в весьма сжатом и упрощенном виде. К упущениям автора можно отнести также ограниченное изложение материала по существующим теориям и методам расчета и компьютерной обработке изображений, что в настоящее время широко используется и интенсивно внедряется в практику электронной микроскопии для извлечения более широкой информации из снимков.

Материал раздела «Аналитическая электронная микроскопия» — новый, но изложен весьма поверхностно. В то же время первый раздел главы, описывающий рентгеновский микроанализ в просвечивающей микроскопии, достаточно хорошо известен в литературе и знаком специалистам. Эта глава интересна с точки зрения прикладных возможностей, но вызывает сожаление то, что подраздел по спектроскопии потерь энергии электронов и микроскопии на селективных энергиях, очень перспективный с точки зрения чувствительности к элементным неоднородностям, не представлен в полном объеме.

Заслуживает внимания последняя глава, отмечающая возможные нарушения в веществе, возникающие во время работы микроскопа за счет локального нагрева, радиацион-

ных разрушений материала в органических и неорганических веществах. Эти явления приводят к возникновению дефектов, артефактов, ложной информации и вызывают трудности в практической работе и в расшифровке снимков. Физическое представление об этих явлениях, конечно, должен иметь любой исследователь, использующий электронно-лучевую аппаратуру для изучения материалов. Эта цель автором в настоящей главе достигается полностью.

Необходимо отметить, что в просвечивающей микроскопии используются методики, разработанные в растровой — такие как режимы катодолюминесценции, наведенный ток (для изучения полупроводниковых структур), стробоскопия (для изучения быстропеременных процессов в тонких пленках).

В целом книгу следует рассматривать как удачное и полезное пособие для широкого круга исследователей-микроскопистов различных научных направлений. Она отличается широтой и фундаментальностью рассматриваемых вопросов, отражением современного уровня развития электронной микроскопии, глубоким изложением большинства проблем и высоким уровнем математического описательного аппарата. Книги, которыми располагают наши специалисты в области просвечивающей электронной микроскопии, либо частично устарели, либо написаны в весьма популярной форме, либо специфичны для избранного научного направления или же представляют ценность как пособие по практической работе с микроскопом. В этом плане монография Л. Раймера, несомненно, заслуживает внимания как фундаментальная работа, в которой наиболее полно представлены все стороны физики формирования и интерпретации изображения в электронном просвечивающем микроскопе для аморфных и кристаллических материалов, изложены основы современной аналитической микроскопии, разобрана физика воздействия электронного потока на вещество.

Можно смело утверждать, что монография Л. Раймера найдет себе читателей среди специалистов по электронной микроскопии и микроанализу, среди начинающих работать в этой области, а также может служить интересным и полезным пособием для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Г. В. Сапарин