537.533.35(049.3)

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Computer Processing of Electron Microscope Images.— Berlin; Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980.— 296 p.— (Topics in Current Physics. V. 13.)

За последние 10—12 лет интенсивно развивается цифровая обработка электронно-микроскопических изображений. Появилась необходимость в фурье-трансформантах изображений, фильтрации и усреднении изображений периодических объектов. Особое значение приобретают работы с малыми радиационными повреждениями биологических объектов, где необходимо обрабатывать статистически зашумленные изображения. При исследовании биологических объектов компьютеры широко используются для трехмерной реконструкции исследуемых структур. Вычислительные методы могут быть распространены и на обработку изображений одиночных частиц с использованием корреляционных функций. Развитию расчетных методов способствовало и то, что были разработаны теоретические основы процесса формирования электронно-микроскопических изображений с целью устранения влияния аберраций и улучшения разрешения.

*) Название этой модели, как вспоминает Ж. Тулуз, связано с произнесенной по другому поводу фразой Андерсона «The name of the game is frustration».

В настоящее время делаются успешные попытки перейти к обработке изображений объектов, сильно рассеивающих электроны.

Вопросам обработки изображений посвящено несколько обзоров, вышедших в разное время, однако, впервые статьи, посвященные различным проблемам этой обработки, собраны вместе, как отдельные главы одной книги. Большинство авторов статей являются признанными специалистами в области обработки электронно-микроскопических изображений, а некоторые из них, например, Хоппе и Франк, создавали те направления исследований, о которых они пишут.

В первой главе, написанной Хоксом, рассматривается обработка изображений, основанная на линейной теории формирования изображений. Вводится понятие передаточной функции, условий, при которых справедливо линейное представление, и рассмотрен случай частично когерентного освещения. Рассматривается также практическое использование предложенного теоретического подхода (случай слабо рассеивающих объектов): определения коэффициента и сферической аберрации C_S и Δ (дефокусировки), а также методов реконструкции фаз и амплитуд изображения. Автор дает ряд конкретных оптических схем и блок-схем связи микроскоп — компьютер для исследований микроскопических изображений.

Вторая глава, написанная Сакстоном, посвящена выявлению информации, содержащейся в изображении в случае сильно рассеивающих объектов. Здесь процесс формирования изображения не является линейным. Методы, рассматриваемые в этой статье, применимы к тем образцам, которые либо толсты, либо имеют большую электронную плотность, чтобы считаться слабо рассеивающими, но достаточно тонки, чтобы их изображение можно было рассматривать как проекцию. Один из первых предлагаемых методов основан на итеративном применении линейной теории. Ряд других методов основан на двойном измерении интенсивностей (изображение/дифракция; два дефокусированных изображения и др.). Предлагаются методы, основанные на теории «аналитического» изображения, «голографическом» подходе, вычитании светлопольного и темнопольного изображений. Глава, написанная Меллемой, посвящена расчетной реконструкции регулярных биологических объектов. В ней дано краткое описание методов двойного фурье-преобразования в приложении к структурам со спиральной, икосаэдрической симметрией и двумерным слоям. Автор приводит формулы для количественной оценки результатов усреднения дифракционных максимумов по симметрии и «внутри» рефлекса. Приводятся примеры реконструкций, сделанных этим методом: бактериофаги, рибосомные слои, пурпурные мембраны, сферические вирусы.

В главе, написанной Хоппе и Хегерли, рассматривается определение трехмерной структуры непериодических образцов с помощью электронного микроскопа. Авторы дают описание методов реконструкции объектов, как в прямом, так и в фурье-пространстве. К первой группе методов относятся обратное проектирование, фильтрованное обратное проектирование, метод алгебраического реконструирования, метод наклонного проектирования. Ко второй группе относится реконструкция с помощью метода двойного фурье-преобразования. В этом случае осуществляется интерполяция между сечениями в фурье-пространстве. Сечения фурье-пространства получают путем фурье-преобразования изображений исследуемого объекта, полученных при различных наклонах образца. Кроме того, авторы дают описание метода реконструкции объектов с помощью разложения на ортогональные функции в полярных координатах и преобразования Фурье — Бесселя. Рассматриваются случаи тонких, неограниченных по протяженности, объектов в ограниченном диапазоне углов наклона и интерполяции в этом случае в фурье-пространстве: реконструкция с помощью интерполяции в проекционном пространстве и предлагается решение задачи совмещения проекций.

Франк дает понятие о функции корреляции и предлагает наиболее быстрый метод ее вычисления. В главе излагаются наиболее важные теоремы, связанные с функцией корреляции, и описываются задачи, которые могут быть решены с ее помощью. Наиболее актуальными, особенно при работе с отдельными частицами, являются определение относительного положения частиц, их взаимной ориентации, определения центра симметрии частиц, поиск частиц одного типа и одной ориентации на поле (согласованная фильтрация), определение отношения сигнал/шум. Автор рассматривает теоретические возможности разрешения указанных задач и предлагает конкретные практические методы реализации решений. К недостаткам книги следует отнести то, что в ней не рассматриваются работы советских авторов по трехмерной реконструкции, хотя в этой области у нас имеются определенные достижения.

Книга представляет интерес для физиков, занимающихся вопросами формирования электронно-микроскопического изображения, для электронных микроскопистов, работающих в области исследования структуры биологических объектов, а также занимающихся исследованиями твердого тела при высоком разрешении. Она также может быть полезна специалистам в области обработки изображений.

Н. А. Киселев