

УДК 621.385.833

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОИСХОЖДЕНИИ КОНТРАСТА В ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Т. А. Гришина

ГП НИИ электронной и ионной оптики, Москва, Россия

В. Ю. Гришина

Московский государственный университет, Москва, Россия

Представлен аналитический обзор методов и аппроксимаций, применявшихся для интерпретации контраста на изображении в просвечивающем электронном микроскопе. Рассмотрены механизмы возникновения контраста на изображениях аморфных и кристаллических протяженных объектов, а также факторы, определяющие природу контраста на изображении атомных структур кристаллической решетки. Проанализированы свойства объекта, ответственные за возникновение на изображении амплитудного и фазового контраста.

С формированием изображения в ПЭМ связаны две проблемы: первая проблема — обеспечение подобия между распределениями интенсивности в плоскости объекта и в плоскости изображения; вторая — необходимость наличия в строении объекта и в закономерностях его взаимодействия с электронным пучком объективных предпосылок для визуализации деталей структуры объекта с конечным контрастом.

На ранних этапах существования ПЭМ, пока достигнутая разрешающая способность измерялась сотнями и десятками ангстрем, эти два аспекта проблемы формирования изображения разрабатывались практически вне связи одна с другой. Обоснование возможности подобия между распределениями интенсивности в плоскости объекта и в плоскости изображения проводилось преимущественно с использованием представлений геометрической электронной оптики. Исследования механизмов возникновения контраста для аморфных и кристаллических объектов проводилось с использованием достижений теории рассеяния электронов на единичном атоме и теории дифракционного взаимодействия электронов с кристаллической решеткой. Позднее, когда разрешающая способность ПЭМ стала измеряться ангстремами и вплотную приблизилась возможность визуализации картин расположения проекций атомных плоскостей и столбцов кристаллической

решетки, пришлось два указанных выше аспекта проблемы формирования изображения исследовать в совокупности и привлечь к этому исследованию представления волновой электронной оптики.

Цель представленного здесь краткого обзора — проследить эволюцию подходов к интерпретации механизма формирования контраста по мере развития просвечивающей электронной микроскопии и теории формирования изображения в ПЭМ.

ВКЛАД ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ В РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПЭМ

Геометрическая электронная и волновая электронная оптика являются продолжением и развитием представлений и методов, применяемых в соответствующих разделах световой оптики. Геометрическая электронная оптика оперирует уравнением траекторий и сосредотачивает свое внимание исключительно на обосновании возможности обеспечения подобия между распределениями интенсивности в плоскости объекта и плоскости изображения. Возможность получения изображения она обосновывает только на основе анализа взаимодействия электронов с полями линз, полностью игнорируя присутствие объекта и взаимодействие электронов с объектом. Область интересов геометрической электронной оптики — проблемы правильной аналитической аппроксимации пространственного распределения электромагнитного поля в электронных линзах, обоснование принципов фокусировки и создание теории аберраций. Именно в рамках геометрической электронной оптики была раскрыта природа аберраций, разработана полная их классификация и выведены коэффициенты аберраций. Все, чего удалось достичь на этом пути, осуществлено трудами очень многих исследователей, но в наиболее полном и завершенном виде представлено в трудах [1], [2].

МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНТРАСТА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ АМОРФНЫХ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Пока минимальные размеры деталей структуры объекта, визуализируемых в ПЭМ, превышают 1,5—2 нм, механизм визуализации контраста этих деталей структуры можно исследовать, не учитывая влияния аберраций изображающей системы. Такая возможность обусловлена спецификой ПЭМ. Специфика эта заключается в том, что во всем диапазоне применяемых в ПЭМ ускоряющих напряжений длина волны электронов остается очень маленькой (при изменении ускоряющего напряжения от 30 кэВ до 2 МэВ длина волны меняется от 0,007 до 0,0005 нм). Для пространственных периодов, составляющих 1,5—2 нм и более, углы дифракции электронов так малы, что рефлексы ненулевых порядков сливаются с рефлексом нулевого порядка. Формирование изображения таких деталей структуры осуществляется путем пропускания через апертуру объектива только одного дифракционного рефлекса. Если это рефлекс нулевого порядка, получается изображение, называемое светлопольным. Если это рефлекс ненулевого порядка, получаемое изображение называют темнопольным.

Контраст, наблюдаемый на изображении, сформированном с участием одного дифракционного рефлекса, передает локальные вариации интенсивности этого рефлекса, имеющие место при переходе от одного участка объекта к другому. Информацию об объекте, заключенную в электронно-микроскопическом изображении, можно использовать только в том случае, если известны свойства объекта, создающие предпосылки для таких локальных вариаций интенсивности и возникновения контраста. Только при этом условии можно установить однозначное соответствие между распределением контраста на изображении, с одной стороны, и морфологией объекта и характеристиками вещества, из которого он состоит, — с другой стороны.

Возможность установления такого соответствия обеспечивают: для аморфных объектов — теория формирования контраста, оперирующая сечениями рассеяния, а для кристаллических объектов — теория дифракционного контраста.

Представления теории формирования контраста, оперирующей сечениями рассеяния, изложены в работах [3—9]. Их разработка осуществлялась на ранних этапах существования ПЭМ, когда реализация предельной разрешающей способности этого прибора и визуализация расположения проекций атомных столбцов и плоскостей кристаллической решетки были еще делом будущего. Эти представления предназначены для расчета контраста деталей структуры и морфологии объекта, размеры которых существенно превосходят межатомные расстояния в твердом теле. Область их применения — интерпретация контраста на изображении аморфных, в том числе биологических, объектов.

Суть этих представлений составляют: концепция механизма возникновения контраста за счет задержки и устранения из участия в формировании изображения электронов, испытавших рассеяние на углы, превышающие угловой размер выходного зрачка изображающей системы, который обычно определяется апертурной диафрагмой, расположенной в задней фокальной плоскости объектива [3]; обеспечение возможности интегральной оценки доли электронов, рассеянных за пределы выходного зрачка системы, из характеристики углового распределения электронов, возникшего после прохождения параллельного пучка через объект [5—9]; расчет такой характеристики из сечений упругого и неупругого рассеяния электронов единичным атомом [10]; подбор соответствующей теоретической модели, аппроксимирующей поле единичного атома, как основы расчета этих сечений [4].

На изображении кристаллического объекта, формируемом с участием одного дифракционного рефлекса, тоже можно визуализировать с конечным контрастом детали структуры, чьи размеры существенно превышают межатомное расстояние. Такой контраст принято называть дифракционным [11]. Он определяется локальными вариациями величин амплитуды и фазы электронной волны в том дифракционном рефлексе, который прошел через апертуру объектива и допущен к участию в формировании изображения. Поэтому необходимым условием создания теории формирования контраста кристаллического объекта на изображении в ПЭМ является наличие такого описания дифракционного взаимодействия электронной волны с кристаллической решеткой, в котором амплитуды и фазы электронной волны, испытавшей дифракционное взаимодействие с полем кристаллической решетки и выходящей из кристалла, были бы представлены в виде функций параметров решетки, толщины кристалла и значений ориентации решетки по отношению к направлениям падения первичного пучка электронов и выхода дифрагированной электронной волны из кристалла. Потребность в таком описании диктуется и необходимостью интерпретации результатов электрографических исследований.

Попытки получения такого описания дифракционного взаимодействия электронной волны с кристаллической решеткой предпринимались неоднократно. В результате этих попыток было разработано и активно используется несколько аппроксимаций теории дифракции электронной волны на кристаллической решетке. Среди них: кинематическая аппроксимация, квантово-оптическая и квантово-механическая формулировки динамической аппроксимации [12], а также комбинированный многослойный расчетный метод "физической оптики" [13]. Последней по времени создания стала формулировка динамического дифракционного рассеяния электронов на кристаллической решетке, названная электронно-оптической [14, 15].

Во всех этих аппроксимациях используются символика и обозначения, введенные в употребление при разработке теории дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке.

ТРАКТОВКА ПРИРОДЫ КОНТРАСТА В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Когда встает задача визуализации расположения проекций атомных плоскостей и столбцов в кристаллической решетке с характерными расстояниями 0,12—0,3 нм, условия формирования дифракционной картины и изображения коренным образом меняются. Углы дифракции электронов, принадлежащих к указанному выше диапазону ускоряющих напряжений, теперь в несколько раз превышают типичные величины апертуры осветителя. Рефлексы ненулевых порядков больше уже не сливаются с рефлексом нулевого порядка и располагаются раздельно. Поэтому визуализацию картины расположения проекций атомных структур кристаллической решетки нельзя осуществить пропустив в апертуру объектива один какой-то дифракционный рефлекс.

Для осуществления визуализации необходимо пропустить в апертуру объектива, как минимум, рефлекс нулевого порядка и рефлексы первого порядка. Процесс формирования изображения с участием нескольких дифракционных рефлексов следует рассматривать в представлениях волновой электронной оптики с учетом возможности возникновения и амплитудного, и фазового контраста.

В представлениях волновой электронной оптики, в отличие от геометрической оптики, формирование изображения рассматривается обязательно с учетом участия в этом процессе исследуемого объекта. Однако наличие объекта учитывается в своеобразной обобщенной (даже отвлеченной) форме.

Возникновение теории формирования изображения, оперирующей представлениями волновой оптики, по-видимому, следует отсчитывать от появления работы [16], в которой изложена дифракционная теория формирования изображения. В этой работе предложено рассматривать формирование изображения как двухступенчатый процесс. Первая ступень — формирование картины дифракции, которую предложено называть первичным изображением; вторая ступень — формирование собственно изображения объекта, которое называется вторичным изображением. Возникновение вторичного изображения — есть результат перекрытия и интерференции лучей, выходящих из точек первичного изображения.

Изображаемый объект [16] предложено рассматривать как совокупность периодических составляющих разных периодов. Каждому периоду соответствует своя величина угла отклонения и своя точка — свой дифракционный рефлекс на первичном изображении.

Дальнейшее развитие эти идеи получили в работе [17], где Цернике первым сформулировал представление об амплитудно- и фазово-модулирующем воздействии объекта на изображающую (световую или электронную) волну как о двух равноправных источниках возникновения контраста. Сформулированы и объяснены различия в условиях визуализации амплитудного и фазового контраста.

В работе [17] показано, что в результате взаимодействия освещающего пучка с деталью структуры объекта, вызывающей изменения в амплитуде прошедшей волны, возникает пара дифракционных рефлексов, синфазных с рефлексом нулевого порядка. Чтобы осуществить визуализацию этой детали структуры на изображении, достаточно просто пропустить дифракционные рефлексы нулевого и первого порядков через выходной зрачок объектива и тем самым обеспечить их дальнейшее взаимное перекрытие и интерференцию, т. е. участие этих дифракционных рефлексов в формировании изображения.

Для визуализации фазового контраста этого недостаточно, поскольку фазово-модулирующее воздействие на изображающую волну заключается в том, что в дифракционных рефлексах первого порядка волна отличается (отстает или опережает) по фазе на $\pi/2$ от волны в дифракционном рефлексе нулевого порядка. Цернике обосновал возможность визуализации фазового контраста путем введения дополнительного сдвига по фазе $\pi/2$ между дифракционными рефлексами нулевого и первого порядков и успешно реализовал этот способ в световой микроскопии.

ТЕОРИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

Если в работах [16, 17] представления о процессе формирования изображения были разработаны в предположении идеальной безабберационной изображающей системы, то в работе [18] предпринята успешная попытка перевести на язык волновой электронной оптики результаты, полученные в представлениях геометрической электронной оптики. В работе [18] предложен способ учета влияния aberrаций при описании процесса формирования изображения на основе представлений волновой электронной оптики. В то время как геометрическая электронная оптика трактует aberrацию как фактор, под влиянием которого электроны, вышедшие из одной точки объекта, пересекают плоскость изображения не в одной (сопряженной) точке, а в пределах некоторой фигуры размытия, занимающей окрестности сопряженной точки, Шерцер [18] трактует дефокусировку и сферическую aberrацию как факторы, деформирующие фронт изображающей волны и нарушающие ее сферичность. Происходит это из-за внесения дополнительного сдвига по фазе между электронами, движущимися вдоль оси электронно-оптической системы, и электронами, движущимися под углом к оси.

Эти идеи Шерцера способствовали переходу к следующему принципиальному этапу в разработке теории формирования изображения, оперирующей представлениями волновой электронной оптики, — к разработке теории передаточных функций.

Функция передачи контраста (передаточная функция) — это обобщенная характеристика изображающих свойств электронно-оптической системы ПЭМ, которая количественно характеризует и связывает между собой предельные возможности прибора в реализации разрешающей способности и визуализации контраста. Эта функция описывает зависимость отношения величин контраста, свойственных одной и той же периодической составляющей в объекте и на изображении, от пространственной частицы, характеризующей эту периодическую составляющую. Под пространственной частотой подразумевается величина, обратная пространственному периоду периодической составляющей. Наиболее заметный вклад в разработку теории передаточных функций внесен трудами Хансена [19—21].

В этих работах сформулировано понятие волновой aberrации, получены выражения для вклада в волновую aberrацию не только дефокусировки и сферической aberrации, но и приосевого астigmatизма, разработан способ учета влияния на волновую aberrацию хроматической aberrации, предложена обобщенная безразмерная форма для записи выражений волновой aberrации. Хансеном выдвинута принципиально новая трактовка роли, которую aberrации могут играть в процессе формирования изображения. Им показано, что мнимая компонента фазового сдвига, сообщаемого волновой aberrацией фронту изображающей электронной волны, может сыграть роль фактора, обеспечивающего визуализацию фазового контраста. Это соображение стало основой для трактовки действительной и мнимой компонент фазового сдвига, вносимого волновой aberrацией как функций передачи амплитудного и фазового контраста (передаточных функций) изображающей системы ПЭМ для слаборассеивающих объектов при когерентном освещении.

Для периодических составляющих, с помощью которых можно описывать модулирующее воздействие объекта на амплитуду и фазу электронной волны, Хансен предложил аппроксимацию в виде дифракционных решеток косинусоидального профиля. Амплитудно-модулирующую решетку с функцией пропускания

$$F_{a.m}(x) = 1 + A \cos(2\pi x/d) \quad (1)$$

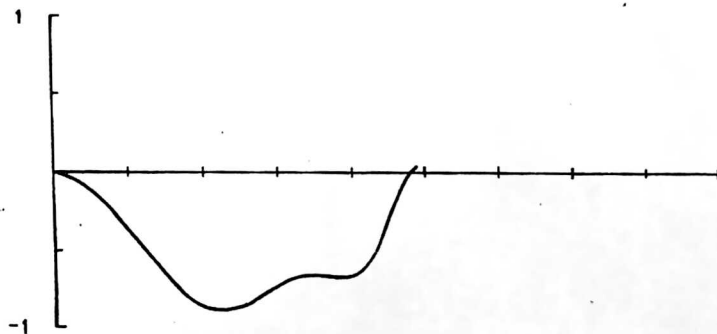
Хансен называет объектом Габора, а фазово-модулирующую решетку с функцией пропускания

$$F_{\text{ф.м}}(x) = 1 + iA \cos(2\pi x/d) \quad (2)$$

объектом Цернике. Амплитудные множители дифракционных решеток (1) и (2) удовлетворяют условию

$$A \ll 1. \quad (3)$$

Типичный пример передаточной функции ПЭМ приведен на рисунке. Ось абсцисс — пространственные частоты (нм^{-1}), ось ординат — коэффициент передачи контраста (отношение величин контраста, свойственного одной и той же периодической составляющей в объекте и на изображении). Расчет выполнен по формуле (4.8) из работы [22]. Учтено влияние сферической aberrации ($C_{\text{сф}} = 1,5 \text{ мм}$); дефокусировки ($f = 66,5 \text{ нм}$ — фокусировка по Шерцеру) и нарушений когерентности: пространственной (апертура осветителя 10^{-3} рад.) и временной (хроматическая aberrация равна $5,4 \text{ нм}$ — с учетом нестабильностей ускоряющего напряжения и тока объектива, а также теплового разброса скоростей электронов при выходе их из катода). Кривая на рисунке наглядно иллюстрирует, в чем, с точки зрения представлений волновой оптики, проявляется на изображении искажающее воздействие aberrаций. Искажающее воздействие состоит в том, что коэффициент передачи контраста зависит от пространственной частоты, что он может становиться равным нулю и менять знак. Предельное разрешение изображающей системы обычно определяют из пространственной частоты, соответствующей первому обращению в нуль передаточной функции. Область передаточной функции до первого обращения в нуль является полосой пропускания, в пределах которой контраст для всех пространственных частот визуализируется изображающей системой с одним и тем же знаком. Полоса пропускания передаточной функции ПЭМ перекрывает узкий диапазон пространственных частот, но это очень важный диапазон. Пространственные периоды, соответствующие этому диапазону, сопоставимы с межатомными расстояниями в твердом теле.



Передаточная функция просвечивающего электронного микроскопа с ускоряющим напряжением 300 кВ

Знаменательно, что разработка теории передаточных функций по времени совпала с экспериментальной реализацией предельной разрешающей способности ПЭМ — с визуализацией картин пространственного расположения проекций атомных плоскостей и столбцов в кристаллической решетке. Введение в употребление передаточных функций создало теоретическую базу для правильной интерпретации распределения контраста на таких микрофотографиях [22]. Наряду с этим были созданы предпосылки для обоснования и разработки голографических принципов апостериорной обработки и коррекции изображения с использованием светооптической дифрактометрии и фильтрации пространственных частот [23].

Роль механизма визуализации амплитудного и фазового контраста, осуществляемой с участием волновой аберрации и иллюстрируемой передаточной функцией, заметна только в пределах узкого диапазона пространственных частот, определяемого полосой пропускания. Для пространственных частот, находящихся справа от полосы пропускания, этот механизм визуализации контраста неизбежно вносит искажения, и эти пространственные частоты должны быть с помощью апертурной диафрагмы исключены из участия в формировании изображения. В параксиальной области, на левом краю полосы пропускания, вклад этого механизма визуализации контраста снижается. На визуализацию контраста деталей структуры, имеющих размеры 1,5—2 нм и более, для которых углы дифракции так малы, что рефлексы ненулевых порядков сливаются с рефлексом нулевого порядка, волновая аберрация практически не влияет.

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ ДУАЛИЗМ В МОДУЛИРУЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЛЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВОЛНУ

В работах [14—15] реализована попытка объединить, взаимно дополнить и использовать все преимущества, свойственные методам разложения пространственной структуры, используемым в аппроксимациях теории дифракции электронов на кристаллической решетке и в теории передаточных функций.

Фурье-составляющая поля кристаллической решетки охарактеризована в работе [14] вкладом, который она делает в функцию пропускания кристалла. Выражение, описывающее этот вклад, получено в виде функции пропускания от наложения двух дифракционных решеток: амплитудно-модулирующей синусоидального профиля и фазово-модулирующей косинусоидального профиля.

Для Фурье-составляющей n -го порядка, соответствующей семейству плоскостей с миллеровскими индексами (hkl) , вклад в функцию пропускания кристалла описывается соотношениями

$$F_{(nb\ nk\ nl)_{ф.м}} = \exp \{ i A_{(nb\ nk\ nl)_{ф.м}} \cos [2\pi \vec{g}_{(nb\ nk\ nl)} \vec{r}] \}, \quad (4)$$

$$F_{(nb\ nk\ nl)_{а.м}} = \exp \{ -A_{(nb\ nk\ nl)_{а.м}} \sin [2\pi \vec{g}_{(nb\ nk\ nl)} \vec{r}] \}, \quad (5)$$

где

$$A_{(nb\ nk\ nl)_{ф.м}} = \frac{\sin [\pi s_{(nb\ nk\ nl)_{ф.м}} t]}{s_{(nb\ nk\ nl)_{ф.м}} \xi_{(nb\ nk\ nl)}};$$

$$A_{(nb\ nk\ nl)_{а.м}} = \frac{\sin [\pi s_{(nb\ nk\ nl)_{а.м}} t]}{s_{(nb\ nk\ nl)_{а.м}} \xi_{(nb\ nk\ nl)}}.$$

$\vec{g}_{(nb\ nk\ nl)}$ — вектор обратной решетки, модуль которого играет здесь роль пространственной частоты и характеризует периодичность дифракционных решеток (4) и (5), аппроксимирующих Фурье-составляющую;

$$s_{(nb\ nk\ nl)_{ф.м}} = \vec{g}_{(nb\ nk\ nl)} \sin \delta \vartheta_{ф.м} \quad \text{и}$$

$\vec{s} (nb \ nk \ nl)_{a.m} = \vec{g} (nb \ nk \ nl) \sin \delta\vartheta_{a.m}$ — параметры отклонения. Они характеризуют направление в пространстве кристаллической решетки, для которого определяется функция пропускания;

$\delta\vartheta$ — угловое отклонение. Его следует отсчитывать: $\delta\vartheta_{ф.м}$ для фазово-модулирующей компоненты (4) — от брэгговского направления n -го порядка, а $\delta\vartheta_{a.m}$ для амплитудно-модулирующей компоненты (5) — от направления, параллельного плоскостям (bkl) ;

$\xi_{(nb \ nk \ nl)}$ — экстинкционная длина.

Соотношения (4) и (5) устанавливают взаимозависимость между характеристиками кристаллической решетки и амплитудно-фазовым дуализмом в модулирующей воздействию поля решетки на электронную волну и выявляют новые аспекты этого явления.

Характер зависимости амплитудных множителей (6) и (7) от параметров отклонения s и глубины t проникновения электронов в кристалл свидетельствует, что в пространстве любой кристаллической решетки есть направления, для которых неизбежно нарушение условия (3). Это означает, что компоненты Фурье-составляющей $F_{(nb \ nk \ nl)}$ — дифракционные решетки с функциями пропускания (4) и (5) — сами являются сильно рассеивающими объектами. Для них подходит только экспоненциальная аппроксимация (4) и (5), а аппроксимация типа (1) и (2), оперирующая двумя первыми членами степенного ряда, неприемлема. Поэтому для сильно рассеивающего объекта при разложении пространственно-трансляционной структуры на периодические составляющие и нахождении их вклада в функцию пропускания объекта нельзя ограничиться Фурье-преобразованием.

В работе [15] показано, что этот процесс разложения необходимо продолжить и довести до представления функции пропускания в виде суперпозиции рэлеевских решеток, т. е. периодических составляющих, каждая из которых возбуждает на картине дифракции один единственный дифракционный рефлекс — рефлекс первого порядка [24]. В работе [15] разработана четырехступенчатая процедура разложения пространственно-трансляционной структуры на рэлеевские решетки. Это позволило предложить новую трактовку амплитудно-фазового дуализма в отклоняющем воздействии объекта на электроны и помогло выявить характерные отличительные особенности амплитудно-модулирующего и фазово-модулирующего воздействий на электронную волну. Их можно сформулировать следующим образом:

1. Характерные особенности амплитудно-фазового дуализма в отклоняющем воздействии поля кристаллической решетки на электроны

отклоняющее воздействие каждой Фурье-составляющей $F_{(nb \ nk \ nl)}$ поля решетки на электроны можно описать как сочетание амплитудно-модулирующего и фазово-модулирующего;

эти два вида модулирующего воздействия ориентационно разделены и максимальные проявления амплитудно-модулирующего и фазово-модулирующего воздействий на электронную волну со стороны одной и той же периодической составляющей не совпадают по направлению. Максимум амплитудно-модулирующего воздействия указанной Фурье-составляющей приходится на направление, параллельное плоскостям с индексами (bkl) , тогда как фазово-модулирующее воздействие в этом направлении полностью отсутствует. Максимум фазово-модулирующего воздействия рассматриваемой Фурье-составляющей приходится на брэгговское направление n -го порядка для плоскостей (bkl) , а амплитудно-модулирующее воздействие в этом направлении равно нулю.

2. Характерные особенности амплитудно-модулирующего воздействия: ориентационная совмещенность всех дифракционных решеток (5), связанных с Фурье-составляющими всех порядков n и обеими семействами плоскостей (hkl) и $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$;

участие совокупной амплитудно-модулирующей компоненты в возбуждении ненулевых дифракционных рефлексов, располагающихся симметрично по обе стороны нулевого рефлекса;

необратимый и однократный характер отклоняющего воздействия на электроны со стороны совокупной амплитудно-модулирующей компоненты

3. Характерные особенности фазово-модулирующего воздействия:

ориентационная отделенность друг от друга дифракционных решеток (4), относящихся к Фурье-составляющим разных порядков n ;

ориентационная разделенность пары дифракционных решеток (4) с индексами $(nb\ nk\ nl)$ и $(\bar{n}\bar{b}\ \bar{n}\bar{k}\ \bar{n}\bar{l})$ и обусловленное этой разделенностью участие каждой фазово-модулирующей компоненты (4) в возбуждении ненулевых дифракционных рефлексов, расположенных только по одну сторону от нулевого рефлекса;

ориентационная сопряженность пары фазово-модулирующих компонент (4), имеющих парные индексы $(nb\ nk\ nl)$ и $(\bar{n}\bar{b}\ \bar{n}\bar{k}\ \bar{n}\bar{l})$, и обусловленная этой ориентационной сопряженностью неизбежность многократной повторяемости отклонений. (Термин "ориентационная сопряженность" означает, что ориентация дифракционной решетки $F_{(nb\ nk\ nl)}_{ф.м}$ совпадает с направлением рефлекса первого порядка, возбуждаемого дифракционной решеткой $F_{(\bar{n}\bar{b}\ \bar{n}\bar{k}\ \bar{n}\bar{l})}_{ф.м}$, и наоборот).

Литература

1. Рустерхольц А. Электронная оптика. — М.: Изд-во иностр. лит., 1952.
2. Глазер В. Основы электронной оптики. — М.: Гостехиздат, 1957.
3. Borries В. Ubermikroskopie. — Berlin, 1949.
4. Lenz F. //Z. Naturforsch. 1954. V. 9a. P. 185.
5. Пилияквич А. Н. Просвечивающая электронная микроскопия. — Киев.: Наукова думка, 1975.
6. Стоянова И. Г., Анаскин И. Ф. Физические основы методов просвечивающей электронной микроскопии. — М.: Наука, 1972.
7. Гришина Т. А., Стоянова И. Г. //Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1972. Т. 136. С. 1945.
8. Гришина Т. А., Стоянова И. Г. //Там же. 1972. Т. 36. С. 1950.
9. Стоянова И. Г., Пилияквич А. Н. //Биофизика, 1963, № 8. С. 101.
10. Мотт Н., Мессис Г. Теория атомных столкновений. — М.: Мир, 1969.
11. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. — М.: Металлургия, 1973.
12. Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. — М.: Мир, 1968.
13. Каули Дж. Физика дифракции. — М.: Мир, 1979.
14. Гришина Т. А., Гришина В. Ю. //Изв. РАН. Сер. Физ. 1995. № 59. С. 113.
15. Гришина Т. А., Гришина В. Ю. //Там же. С. 126.
16. Abbe E. //Archiv f. Mikroskopische Anat, 1983. № 9. P. 413.
17. Zernike F. //Physika, 1942. № 9. P. 686, 974.
18. Scherzer O. //J. Appl. Phys. 1949. V. 20. P. 20.
19. Hanszen K. J. and Morgenstern B. //Z. angew. Phys. 1965. № 19. P. 215.
20. Hanszen K. J. //Z. angew. Phys, 1966. № 20. P. 427.
21. Hanszen K. J. //Advances Opt. Electron Microsc, 1971. № 4. P. 1.
22. Спенс Дж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения. — М.: Наука, 1986.
23. Агеев Е. В., Анаскин И. Ф., Стоянов П. А. //Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1977. № 41. С. 1447.
24. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976.

EVOLUTION OF THE VIEW-POINTS ABOUT IMAGE CONTRAST IN TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY

T. A. Grishina,

Research Institute for Electron and ion optics, Moscow, Russia

V. Yu. Grishina

Moscow State University, Moscow, Russia

The analytical review of the methods and approximations to interpret the transmission electron microscope image contrast is given. The mechanisms of the contrast are considered on the images of the both types of finite sized objects amorphous and crystalline. The nature of contrast on the image of the crystal lattice atomic structures is analysed. The object properties corresponding to arising of the amplitude and phase contrast in the image are researched.