Общая физика

УДК 535

Применение представлений волновой электронной оптики для описания процесса взаимодействия электронов с полем кристаллической решетки электронно-микроскопического объекта.

Часть I. Функция пропускания кристаллической решетки для электронной волны

Т. А. Гришина, О. Д. Потапкин
ФГУДП НИИЭИО ГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

Б. Н. Васичев
Московский институт электроники и математики (Технический университет), Москва, Россия

Разработан оригинальный метод разложения трехмерной структуры кристаллической решетки на периодические компоненты. При этом были использованы результаты теории функций передачи контраста, распространенные на случай сильнорассеивающего объекта. Установлено выражение для функции электронно-оптической проницаемости поля кристаллической решетки применительно к электронной волне. Эта функция представлена в виде экспоненты, которая имеет в качестве аргумента длину оптического пути для электронной волны в кристалле, измеренную по направлению падающего пучка.

Формирование изображения в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) представляет сочетание двух процессов взаимодействия: взаимодействие пучка электронов с полями линз изображающей системы микроскопа и взаимодействие электронов пучка с объектом, приводящее к возникновению контраста на изображении.

При описании процесса взаимодействия электронов с полями линз обычно используют представления геометрической электронной оптики. Объектом анализа в этом случае является воздействие поля на траекторию электрона. Аберрацию геометрическая электронная оптика трактует как фактор, под действием которого траектории, выходящие из одной точки плоскости объекта, пересекают плоскость изображения не в одной (сопряженной) точке, а в пределах некоторой фигуры размытия, занимающей окрестности сопряженной точки.

Однако полноценная и исчерпывающая интерпретация контраста, наблюдаемого на изображении, возможна только на основе представлений волновой электронной оптики. Обращение к этим представлениям неизбежно хотя бы потому, что угловое распределение электронов, выходящих из объекта, обусловлено дифракцией волны де Бройля на периодических составляющих поля объекта.

С точки зрения представлений волновой электронной оптики аберрации и дефокусировка действуют как совокупная волновая аберрация, которая деформирует фронт изображающей электронной волны, нарушает ее сферичность. Это происходит из-за внесения дополнительного сдвига по фазе между электронами, движущимися вдоль оси электронно-оптической системы, и электронами, движущимися под углом к оси. Эта трактовка механизма воздействия аберраций на электронную волну, выдвинутая Шерцером [1], послужила предпосылкой для разработки теории передаточных функций.

Функция передачи контраста (передаточная функция) — это обобщенная характеристика изображающих свойств электронно-оптической системы ПЭМ. Данная функция количественно характеризует и связывает между собой предельные возможности прибора в реализации разрешающей способности и визуализации контраста. Она описывает зависимость отношения величин контраста, свойственных одной и той же периодической составляющей в объекте и на изображении, от пространственной частоты, характеризующей эту периодическую составляющую.

В основу создания теории передаточных функций положена принципиально новая трактовка роли, которую волновая аберрация может играть в процессе формирования контраста изображения. Эта трактовка была выдвинута Хансеном [2—4], который показал, что мнимая компонента фазового сдвига, сообщаемого волновой аберрацией 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 аберрацией, как функций передачи амплитудного и фазового контраста (передаточных функций) изображающей системы ПЭМ для слабрассеивающих объектов при когерентном освещении.

В предлагаемом цикле работ проанализирована возможность использования представлений и методов волновой электронной оптики и теории передаточных функций для описания закономерностей дифракционного взаимодействия электронов с кристаллической решеткой электронно-микроскопического объекта.

Общая сравнительная характеристика различных аппроксимаций теории дифракционного взаимодействия электронов с полем кристаллической решетки

Попытки получения описания дифракционного взаимодействия электронной волны с полем кристаллической решетки, в котором амплитуды и фазы электронной волны, испытавшей дифракционное взаимодействие и выходящей из кристалла, были бы представлены в виде функций параметров решетки, толщины кристалла и параметров, количественно характеризующих значения ориентации решетки по отношению к направлениям падения первичного пучка электронов и выхода дифрагированной электронной волны из кристалла, предпринимались неоднократно. В результате этих попыток разработано и активно используется несколько аппроксимаций теории дифракции:

кинематическая аппроксимация теории дифракции;

квантово-оптическая формулировка динамического приближения теории дифракции (двухволновое приближение);

квантово-механическая формулировка динамической аппроксимации теории дифракции (многоволновое приближение) [5];

комбинированный многослоевой расчетный метод "физической оптики" [6].

Общим для всех аппроксимаций теории дифракции является использование фурье-преобразования для описания разложения пространственной структуры кристаллической решетки, а также применение принципа Гюйгенса при нахождении распределения амплитуд и фаз дифрагированной электронной волны по углам дифракции.

Все перечисленные аппроксимации теории дифракции электронов на кристаллической решетке имеют свои ограничения и недостатки.

В кинематической аппроксимации получено аналитическое представление для амплитуды дифрагированной волны, но эта амплитуда предполагается пренебрежимо малой по сравнению с амплитудой освещающей волны и по сравнению с амплитудой волны, прошедшей без отклонения. Поэтому эта аппроксимация применима для описания дифракции только в отдельных специфических случаях.

В динамических аппроксимациях теории дифракции допускается, что амплитуда дифрагированной волны может быть сопоставима с амплитудой освещающей волны и по величине превышать амплитуду волны, прошедшей без отклонения. Поэтому область применимости динамических аппроксимаций значительно шире.

Однако при нахождении амплитуд и фаз дифрагированной электронной волны на этапе применения принципа Гюйгенса *многоволновые динамические аппроксимации*, оперирующие волновыми функциями Блоха, неизбежно сопряжены с большими объемами громоздких расчетов. Не менее громоздких расчетов требует и метод "*физической оптики*". И не всегда результаты этих расчетов удается поставить в однозначное соответствие с данными эксперимента.

Разработку альтернативной формулировки динамического дифракционного рассеяния электронов на кристаллической решетке, использующей достижения волновой электронной оптики, целесообразно начать с анализа сходства и различий в способах разложения пространственной структуры, принятых в перечисленных теориях дифракции и в теории передаточных функций электронно-оптической системы электронного микроскопа.

Особенности способов описания разложения пространственной структуры объекта на периодические составляющие, применяемых в теориях дифракции и в теории передаточных функций

Теория передаточных функций характеризует изображающие свойства электронного микроскопа, а теории дифракции — описывают отклоняющее воздействие поля кристаллической решетки на электроны. Сходство заключается в том, что в обеих теориях учитывают подверженность пространственной структуры исследуемого объекта разложению на периодические составляющие, а в основе описания этого разложения во всех случаях присутствует фурье-преобразование пространственной структуры. Однако в моделях разложения пространственно-трансляционной структуры, применяемых в теориях дифракции и в теории передаточных функций, имеются и существенные различия.

В теориях дифракции хорошо проработан и конкретизирован математический аппарат процедуры разложения в трехмерном пространстве. (Под конкретностью математического аппарата здесь подразумевается возможность установления однозначного соответствия между пространственными периодами периодических составляющих поля решетки и конкретными параметрами трехмерной пространственной структуры кристаллической решетки.)

Однако физическая сущность параметра, который подвергается разложению, в теориях дифракции несколько завуалирована. Непосредственно в выражении (8.19) из [5], описывающем амплитуду дифрагированной волны, фигурирует экстинкционная длина, представляющая собой нормированное выражение фурье-компоненты потенциала кристаллической решетки. Оперируя распределением потенциала, приходится решать напрямую волновое уравнение (уравнение Шредингера), а распределение выходящих из объекта электронов по углам дифракции определять, применяя принцип Гюйгенса в численной форме, т. е. путем численного суммирования найденных в результате решения волнового уравнения парциальных волновых функций (в случае кристаллической решетки — это функции Блоха).

В теории передаточных функций [2—4] 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

$$F_{\text{а.м}}(x) = 1 + A\cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \tag{1}$$

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

$$F_{\text{ф.м}}(x) = 1 + iA\cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \quad — \tag{2}$$

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

$$A << 1.$$

В соотношениях (1) и (2) математический аспект операции фурье-преобразования выражен в менее конкретной и завершенной форме, чем в любой из перечисленных аппроксимаций теории дифракции, зато физический смысл параметра, подвергаемого этой операции, вполне ясен. Слаборассеивающие амплитудная и фазовая дифракционные решетки косинусоидального профиля (1) и (2), которыми в теории передаточных функций оперируют как периодическими составляющими структуры объекта, являются периодическими составляющими функции пропускания объекта.

Имея функцию пропускания объекта, можно избежать применения принципа Гюйгенса в численной форме и получить распределение электронов по углам дифракции в аналитическом виде с помощью дифракционного интеграла Кирхгофа [7]. Функция пропускания описывает распределение электронной волны в плоскости, нормальной к направлению освещающей плоской волны и расположенной сразу же за объектом. При подстановке ее в дифракционный интеграл Кирхгофа получается распределение выходящих из объекта электронов по направлениям их движения, т. е. по углам дифракции. Поэтому при решении задачи о дифракции электронов на любом объекте предпочтительно оперировать функцией пропускания объекта, а не распределением потенциала в нем.

Из изложенного можно заключить, что разработку динамической аппроксимации теории дифракции, которая сочетала бы в себе преимущества, свойственные теории передаточных функций с преимуществами, свойственными ранее созданным динамическим аппроксимациям теории дифракции, целесообразно начать с вывода выражения, описывающего функцию пропускания кристаллической решетки по отношению к плоской электронной волне.

Функция пропускания кристаллической решетки для электронной волны

Для обеспечения возможности нахождения функции пропускания объекта необходимо, чтобы в любой произвольно выбранной точке (x, y, z) этого объекта была известна величина фазового сдвига, сообщаемого полем объекта волновому фронту при прохождении последним через эту точку. Этот фазовый сдвиг равен разности электронно-оптических показателей преломления [8] объекта и вакуума

$$\Delta (x, y, z) = n (x, y, z) - 1,$$

где

$$n(x,y,z) = \left\{\frac{[U + V(x,y,z)]^*}{U}\right\}^{1/2}, \tag{3}$$

U — ускоряющее напряжение дифрагирующих электронов;

$V(x, y, z)$ — потенциал кристаллической решетки в точке с координатами (x, y, z);

звездочка означает релятивистскую поправку.

Функция пропускания кристалла по отношению к электронной волне, проходящей в направлении $[uvw]$, определяется выражением

$$F\left(x,y,t_{[uvw]}\right) = \exp\left\{\frac{2\pi i}{\lambda}\int_0^{t_{[uvw]}} \Delta(x,y,z)dt_{[uvw]}\right\},$$

где λ — длина волны де Бройля для электронов пучка;

$t_{[uvw]}$ — толщина кристалла в направлении $[uvw]$.

Интеграл в показателе экспоненты описывает длину оптического пути (эйконал) электронной волны в кристалле.

Периодические составляющие функции пропускания

Как и потенциал кристаллической решетки, электронно-оптический показатель преломления электронов в кристалле является трехмерной периодической величиной. Трехмерное периодическое распределение значений фазового сдвига $\Delta (x, y, z)$, как и распределение значений потенциала решетки, можно разложить в ряд Фурье по составляющим, которые соответствуют семействам плоскостей кристаллической решетки с миллеровскими индексами (hkl) [9]. В результате будет получен дискретный набор фурье-составляющих поля решетки

$$\Phi_{(hkl)}[\Delta(x,y,z)] = \Delta_{(hkl)} \exp[2\pi i \bar{g}_{(hkl)} r]. \tag{4}$$

Здесь символ $\Phi_{(hkl)}$ означает фурье-компоненту, соответствующую семейству кристаллографических плоскостей с миллеровскими индексами (hkl);

$\Delta_{(hkl)}$ — амплитудный множитель этой фурье-компоненты;

$\vec{g}_{(hkl)}$ — вектор обратной решетки. Его модуль является пространственной частотой фурье-составляющей $\Phi_{(hkl)}[\Delta\ (x,\ y,\ z)]$ и описывается соотношением

$$\left|\vec{g}_{(hkl)}\right| = 1/d_{(hkl)},$$

где $d_{(hkl)}$ — межплоскостное расстояние плоскостей с миллеровскими индексами (hkl).

Оценим вклад фурье-составляющей $\Phi_{(hkl)}[\Delta\ (x,\ y,\ z)]$ поля решетки в функцию пропускания кристалла для направления, в котором эта фурье-составляющая не меняется по мере проникновения в глубину кристалла. Этот вклад можно записать в виде

$$F_{(hkl)} = \exp\left\{\frac{2\pi i}{\lambda}\Delta_{(hkl)} \cdot t \exp\left[2\pi i\vec{g}_{(hkl)}\, r\right]\right\}, \tag{5}$$

где t — толщина кристалла.

Соотношение (5) описывает периодическую составляющую функции пропускания кристалла, обусловленную семейством плоскостей (hkl).

Если энергия дифрагирующих электронов достаточно высока и строгое выражение (3) для электронно-оптического показателя преломления можно заменить приближенным

$$n(x,y,z) = 1 + \frac{V(x,y,z)}{2U*},$$

то амплитудный множитель в (4) можно преобразовать к виду

$$\Delta_{(hkl)} = \frac{V_{(hkl)}}{2U*},$$

где $V_{(hkl)}$ — фурье-составляющая потенциала кристаллической решетки.

Если же учесть связь между $V_{(hkl)}$ и экстинкционной длиной [9]

$$\xi_{(hkl)} = \frac{hV}{2eV_{(hkl)}},$$

где h — постоянная Планка;

e и v — соответственно, заряд и скорость дифрагирующего электрона, то периодическую составляющую $F_{(hkl)}$ функции пропускания кристаллической решетки можно представить в виде

$$F_{(hkl)} = \exp\left\{\frac{\pi i t}{\xi_{(hkl)}} \exp\left[2\pi i\vec{g}_{(hkl)}\,\vec{r}\right]\right\}. \tag{6}$$

Соотношение (6) описывает вклад периодической составляющей поля кристаллической решетки, обусловленной семейством плоскостей с миллеровскими индексами (hkl), в функцию пропускания кристалла. Вклад этот представлен в виде функции экстинкционной длины $\xi_{(hkl)}$ и вектора обратной решетки $\vec{g}_{(hkl)}$. Отметим, что те же самые параметры фигурируют в качестве аргументов и в выражении для блоховской волновой функции.

Предельные выражения периодической составляющей функции пропускания кристаллической решетки. Физическое истолкование. Сравнение с волновыми функциями Блоха

Как и при выводе выражений для блоховских волновых функций [5], к выражению $\exp\left[2\pi i\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right]\}$, стоящему в показателе экспоненты в (6), можно применить формулу Эйлера и представить $F_{(hkl)}$ в виде

$$F_{(hkl)} = \exp\left\{\frac{\pi i t}{\xi_{(hkl)}}\cos\left[2\pi\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right]\right\}\exp\left\{\frac{-\pi t}{\xi_{(hkl)}}\sin\left[2\pi\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right]\right\}. \tag{7}$$

$F_{(hkl)}$ в (7) представлено как произведение двух компонент, пространственная периодичность которых характеризуется синусоидой и косинусоидой от одного и того же аргумента.

В одном предельном случае, когда $\sin\left[2\pi\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right] = 0$, соотношение (7) преобразуется к виду [10]

$$F_{(hkl)\text{ф.м}} = \exp\left\{\frac{\pi i t}{\xi_{(hkl)}}\cos\left[2\pi\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right]\right\}. \tag{8}$$

В другом предельном случае, когда $\cos\left[2\pi\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right] = 0$, соотношение (7) преобразуется к виду

$$F_{(hkl)\text{а.м}} = \exp\left\{\frac{-\pi t}{\xi_{(hkl)}}\sin\left[2\pi\bar{g}_{(hkl)}\bar{r}\right]\right\}. \tag{9}$$

Физический смысл пары компонент (8) и (9) функции пропускания кристаллической решетки интересно проанализировать в сопоставлении с выражениями, описывающими волновые функции Блоха.

В общем случае пара волновых функций Блоха $b^{(1)}$ и $b^{(2)}$ с волновыми векторами $k^{(1)}$ $k^{(2)}$ представляет решение задачи о взаимодействии пучка электронов с периодической составляющей потенциала кристаллической решетки, полученное путем решения уравнения Шредингера. Эта пара волн описывается соотношениями (см. § 5, гл. 9 в [5])

$$\begin{aligned} b^{(1)}\left(\bar{k}^{(1)},\bar{r}\right) &= i\sqrt{2}\sin(\pi\bar{g}\,\bar{r})\exp\left[2\pi i\left(\bar{k}^{(1)}+\frac{1}{2}\bar{g}\right)\bar{r}\right]; \\ b^{(2)}\left(\bar{k}^{(2)},\bar{r}\right) &= \sqrt{2}\cos(\pi\bar{g}\,\bar{r})\exp\left[2\pi i\left(\bar{k}^{(2)}+\frac{1}{2}\bar{g}\right)\bar{r}\right]. \end{aligned} \tag{10}$$

Волновые функции Блоха представляют пару компонент, пространственная периодичность которых, как и пространственная периодичность пары предельных выражений (8) и (9) функции пропускания, характеризуется синусоидой и косинусоидой от одного и того же аргумента. Сравним физическое истолкование этих двух пар компонент.

Волновые функции (10) принято интерпретировать как функции, описывающие пространственную периодичность потоков волновых полей электронов пучка в пространстве кристаллической решетки [1].

Выражения (7)—(9) описывают воздействие фурье-составляющей поля кристаллической решетки на плоскую электронную волну как воздействие дифракционной решетки, которая в одном предельном случае, описываемом соотношением (8), ведет себя как фазовая дифракционная решетка косинусоидального профиля $F_{(hkl)\text{ф.м}}$, а в другом предельном случае, описываемом соотношением (9), — как амплитудная дифракционная решетка синусоидального профиля $F_{(hkl)\text{а.м}}$.

Сравнение способов истолкования пространственного сдвига пары компонент периодической составляющей поля кристаллической решетки, принятых для волновых функций Блоха и для функции пропускания

Между синусоидой и косинусоидой одного и того же аргумента имеется пространственный сдвиг на 1/4 периода. Чтобы выявить физический смысл этого пространственного сдвига в случае волн Блоха (10), прибегают к следующему приему. От рассмотрения распределений волновых функций переходят к рассмотрению распределений их интенсивностей, которые описываются функциями $\sin^2(\pi\bar{g}\bar{r})$ и $\cos^2(\pi\bar{g}\bar{r})$. Пространственный период этих распределений интенсивности в два раза меньше, чем период распределений волновых функций. Эти распределения половинного периода сдвинуты одно относительно другого на полпериода, и этот сдвиг на полпериода истолковывают как связь волновых функций $b^{(1)}$ и $b^{(2)}$ с неким элементом периодической структуры прямого пространства, а именно, с последовательностью линейных цепочек атомов, параллельных направлению освещающего пучка и чередующихся с периодом $d_{(hkl)}$. Предложено считать [5], что максимумы распределения интенсивности синусоидальной волны Блоха $b^{(1)}$ совпадают с серединами промежутков между цепочками, а максимумы распределения косинусоидальной волны Блоха $b^{(2)}$ — с центрами атомов, составляющих цепочку.

Совсем по-другому можно интерпретировать пространственный сдвиг между синусоидальной и косинусоидальной компонентами в соотношениях (8)—(9), если рассматривать их как дифракционные решетки. Этот сдвиг можно трактовать как ориентационное несовпадение дифракционных решеток $F_{(hkl)\text{ф.м}}$ и $F_{(hkl)\text{а.м}}$ [10].

Если в обратном пространстве две дифракционные решетки сдвинуты одна относительно другой на 1/4 периода (на $|\bar{g}|/2$), то в прямом пространстве это соответствует повороту этих решеток относительно друг друга на угол, равный половине угла дифракции, т. е. на брэгговский угол. При этом $F(hkl)$ф.м на 1/4 периода опережает $F(hkl)$а.м, а $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})\text{ф.м}}$ — на 1/4 периода отстает от $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})\text{а.м}}$. Это означает, что в прямом пространстве угол между направлениями $F(hkl)$ф.м и $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})\text{ф.м}}$ больше, чем угол между $F_{(hkl)\text{а.м}}$ и $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})\text{а.м}}$. Разность равна двойному брэгговскому углу, т. е. углу дифракции.

Естественно предположить, что ориентации амплитудно-модулирующих и фазово-модулирующих компонент пары периодических составляющих $F_{(hkl)}$ и $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})}$ в пространстве решетки как-то связаны с направлением плоскостей решетки, имеющих те же миллеровские индексы (hkl) и $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$, и со строгими брэгговскими направлениями для этих плоскостей. Тогда наиболее вероятным представляется допущение, что $F_{(hkl)\text{а.м}}$ и $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})\text{а.м}}$ сонаправлены и параллельны плоскостям кристаллической решетки с миллеровскими индексами (hkl) и $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$, а ориентации $F_{(hkl)\text{ф.м}}$ и $F_{(\bar{h}\bar{k}\bar{l})\text{ф.м}}$ параллельны строгим брэгговским направлениям для плоскостей с индексами (hkl) и $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$.

Принятие этого допущения равносильно утверждению, что направление падения освещающего пучка электронов на кристалл является фактором, от которого зависит характер модулирующего воздействия фурье-компоненты $F_{(hkl)}$ на электронную волну.

Об этом модулирующем воздействии можно сказать, что оно переходит от чисто амплитудного, когда электроны падают на кристалл параллельно плоскостям (hkl), к чисто фазовому, когда электроны входят в кристалл под брэгговским углом к плоскостям (hkl).

Заключение

Проанализирована возможность использования достижений волновой оптики и теории передаточных функций для описания закономерностей взаимодействия электронов с кристаллической решеткой электронно-микроскопического объекта.

Обоснован и применен нетрадиционный принцип разложения пространственной структуры кристаллической решетки на периодические составляющие. В этом принципе разложения использованы достижения теории передаточных функций, распространенные на случай сильнорассеивающего объекта. При этом сохранены символика и обозначения, введенные в употребление при разработке теории дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке и традиционно используемые во всех аппроксимациях, описывающих дифракционное взаимодействие электронов с кристаллической решеткой.

Получены соотношения, описывающие вклад фурье-компоненты поля кристаллической решетки в функцию пропускания кристалла для электронной волны. Проанализированы сходство и отличия этих соотношений от выражений для волновых функций Блоха.

Литература

1. *Scherzer O.* //J. Appl. Phys. 1949. V. 20. P. 20.
2. *Hanszen K. J., Morgenstern B.* //Z. angew. Phys. 1965. № 19. P. 215.
3. *Hanszen K. J.* //Ibid. 1966. № 20. P. 427.
4. *Hanszen K. J.* //Advances Opt. Electron Microsc. 1971. № 4. P. 1.
5. *Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М.* Электронная микроскопия тонких кристаллов. — М.: Мир, 1968.
6. *Каули Дж.* Физика дифракции. — М.: Мир, 1979.
7. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. — М.: Наука, 1973.
8. *Рустерхольц А.* Электронная оптика. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952.
9. *Гришина Т. А.* //Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1988. Т. 52. № 7. С. 1292.
10. *Гришина Т. А., Гришина В. Ю.* //Изв. РАН. Сер. Физ. 1995. Т. 59. С. 113.

Application of the wave electron optics conception for the description of the electron-lattice field interaction in the electron microscope.

Part I. Description of the crystal lattice transparency function for the electron wave

T. A. Grishina, O. D. Potapkin
Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

B. N. Vasichev
Moscow Institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

An untraditional principle of the expansion of the crystal lattice three-dimensional structure in the periodic components is developed. Contrast transfer functions theory advances extended on the case of the strongly scattering object were used in it. Expression for the electron-optical transparency function of the crystal lattice field for the electron wave was obtained. This function is represented by the exponentional one which has as argument the optical way length for the electron wave in crystal measured along the incident beam direction.