

УДК 004.9

С. В. БАЛОВСЯК, Я. Д. ГАРАБАЖИВ, И. М. ФОДЧУК

*Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Украина*

## ОРИЕНТИРОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОННО-ДИФРАКЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Разработано математическую модель, способ и программное обеспечение для выделения пространственных областей (полос) из их суперпозиции на цифровых электронно-дифракционных изображениях, а также для последующей ориентированной фильтрации изображений полос. Краевые эффекты, которые возникают при пространственном выделении полосы, уменьшены за счет создания вокруг полосы переходной области. Использовано симметричное расширение изображений полос под заданным углом, что уменьшает искажения при фильтрации изображений. На основе экспериментальных и моделированных изображений полос определены оптимальные параметры их фильтрации. Ориентированная фильтрация экспериментальных изображений полос в перспективе позволяет повысить точность электронно-дифракционных методов, предназначенных для исследования кристаллов.*

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, ориентированная фильтрация изображений, преобразование Фурье, свертка

### Введение

Цифровая обработка электронно-дифракционных изображений позволяет с достаточно высокой точностью определять локальные изменения структурных параметров для исследованных кристаллов [1-3]. В данной работе использованы результаты перспективного электронно-дифракционного метода Кикучи [1]. Изображение в методе Кикучи состоит из множества полос, направленных под разными углами. Каждую полосу ограничивают по ширине две линии с низкой и высокой интенсивностью (темная и светлая линии), которые называются линиями Кикучи. Параметры исследованных кристаллов определяются из распределения интенсивности (яркости) изображения полос Кикучи, например, через ширину полосы (расстояние между темной и светлой линией Кикучи) или через форму поперечного профиля полосы (одномерного распределения интенсивности изображения в направлении, перпендикулярном к оси полосы).

В перспективе точность метода Кикучи может быть повышена за счет цифровой обработки изображений полос. Увеличение точности метода Кикучи важно для усовершенствования технологий синтеза кристаллов, например, кристаллов искусственного алмаза. Однако на современном этапе возможности метода Кикучи используются лишь частично из-за сложности анализа распределения интенсивности полос [1]. Проблема возникает вследствие того, что при наложении (суперпозиции) множества полос распределение интенсивности каждой полосы сильно искажается за счет других полос, которые ее

пересекают. Поэтому разрабатываются способы выделения из суперпозиции полос Кикучи изображений отдельных полос, то есть способы реконструкции распределения их интенсивности. Программно такие способы реализованы с помощью ориентированной частотной фильтрации на основе прямого и обратного дискретного преобразования Фурье [4-7]. Ориентированная фильтрация изображения заключается в том, что для каждой полосы подавляются все коэффициенты Фурье, направления которых выходят за пределы установленного углового диапазона.

Первая проблема, которая возникает при ориентированной фильтрации, заключается в возникновении краевых эффектов при выделении области полосы на изображении (из-за резкого изменения интенсивности полосы на границе выделенной области). Другая проблема состоит в сложности выбора оптимальных параметров фильтрации изображений, например, ширины допустимого углового диапазона для полосы.

### Постановка задачи

В данной работе предлагается решение описанных проблем, которые возникают при реконструкции изображения отдельной полосы Кикучи из суперпозиции множества полос. Проблема краевых эффектов решается за счет создания вокруг изображения полосы переходной области, в которой интенсивность полосы плавно уменьшается. Проблема оптимального выбора параметров фильтрации решается путем обработки эталонных (моделированных) изображений полос Кикучи с известными распределениями интенсивности для поперечных профилей полос.

Целью данной работы является разработка математической модели и программы для расчета распределения интенсивности на заданных областях (полосах) электронно-дифракционных изображений путем их пространственного выделения и ориентированной фильтрации.

Программная реализация разработанного метода ориентированной фильтрации цифровых электронно-дифракционных изображений выполнена в системе MATLAB [4].

### 1. Объекты исследования

В данной работе выполнена ориентированная фильтрация цифровых изображений полос Кикучи (картин Кикучи), полученных от искусственных кристаллов алмаза при их исследовании методами дифракции электронов (рис. 1а) [2].

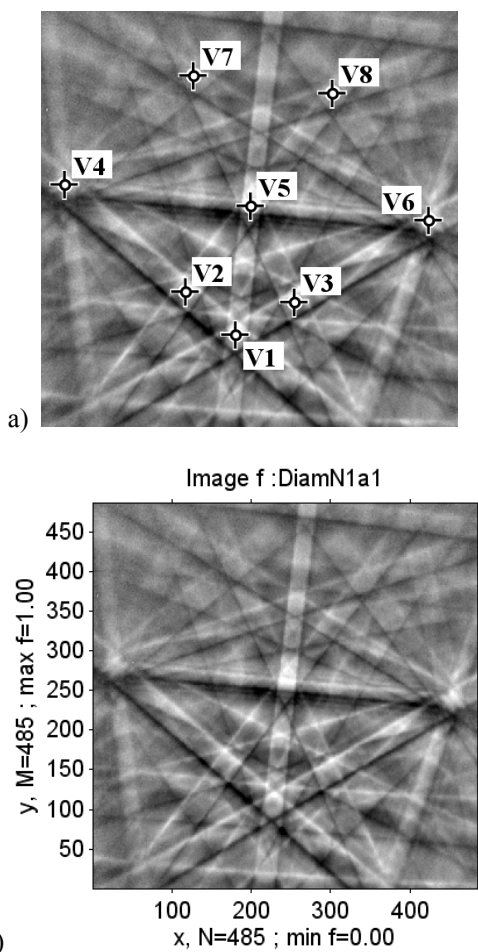


Рис. 1. Экспериментальные цифровые изображения полос Кикучи, полученные от локальной области кристалла искусственного алмаза [2]: а – начальное изображение с указанием центров узлов V1 – V8 пересечения полос (помеченных маркерами «+»); б – начальное нормированное изображение f в системе координат ху

При ориентированной фильтрации полосы Кикучи, например, вдоль узлов V3 – V7, требуется минимизировать влияние остальных полос. Экспериментальные изображения полос (в оттенках серого) программно обрабатывались как матрицы  $f = (f(y, x))$ , где  $y = 1, \dots, M$ ,  $x = 1, \dots, N$ ,  $M$  – высота изображения в пикселях,  $N$  – ширина изображения в пикселях [4, P.12-14] (рис. 1б). В каждый элемент матрицы  $f(y, x)$  записывалась нормированная к 1 интенсивность соответствующего пикселя.

### 2. Математическая модель выделения полосы Кикучи

Границы полосы Кикучи описываются с помощью гипербол, которые незначительно отличаются от прямых (см. рис. 1). Поэтому с целью упрощения в данной работе, также как и в других работах [1], границы полосы описываются прямыми линиями. С учетом этого приближения разработано математическую модель выделения полосы, согласно которой учитываются следующие ее геометрические параметры (рис. 2).

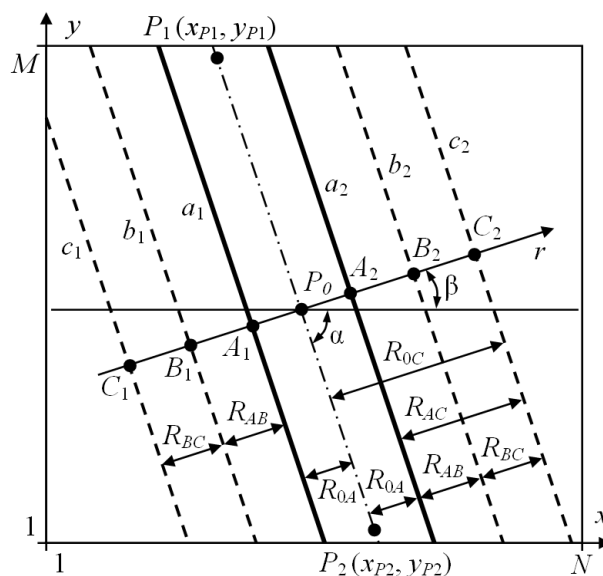


Рис. 2. Геометрические параметры полосы Кикучи на цифровом изображении f, показанные на примере полосы между узлами V3 и V7 (см. рис. 1)

Направление полосы в прямоугольной системе координат ху указывается точками  $P_1(x_{P1}, y_{P1})$  –  $P_2(x_{P2}, y_{P2})$ , которые находятся на оси полосы (см. рис. 2). Ось полосы  $P_1 P_2$  описывается прямой

$$y = k_{01} \cdot x + b_{01}, \tag{1}$$

где  $k_{01}, b_{01}$  – коэффициенты прямой, которые оп-

ределяются через координаты точек  $P_1$  и  $P_2$ .

Наклон оси полосы  $P_1 P_2$  относительно горизонтальной оси координат  $x$  выражается углом  $\alpha = \arctan(k_{01})$ . Значение угла  $\alpha$  положительное для квадранта I системы координат  $xu$  и отрицательное для квадранта IV.

Поперечный профиль  $z(r)$  полосы Кикучи направлен вдоль оси  $r$ , которая перпендикулярна к оси полосы  $P_1 P_2$  и образует с осью  $x$  угол  $\beta$

$$\beta = \pi/2 - \alpha. \quad (2)$$

Значение угла  $\beta$  положительное для квадранта IV системы координат  $xu$  и отрицательное для квадранта I. Центр профиля  $z(r)$  лежит на оси полосы  $P_1 P_2$  и проходит через точку  $P_0(x_{P0}, y_{P0})$ .

Полоса Кикучи находится между параллельными линиями  $a_1$  и  $a_2$  (которые являются границами полосы и параллельны оси полосы  $P_1 P_2$ ), а ширина полосы  $D_A = 2R_{0A}$  указывается точками  $A_1(x_{A1}, y_{A1})$  и  $A_2(x_{A2}, y_{A2})$ . Коэффициенты прямых  $a_1$  и  $a_2$  (их начальные ординаты) рассчитываются через ширину полосы  $D_A$ , а угловые коэффициенты равны  $k_{01}$ .

При выделении полосы на ее границах возникают резкие перепады интенсивности (рис. 3а), что приводит к сильному искажению спектра Фурье изображения полосы при его последующей частотной фильтрации. Поэтому для уменьшения краевых эффектов вокруг изображения полосы Кикучи создается переходная область, в которой интенсивность полосы плавно уменьшается. Предназначение переходной области заключается в сглаживании границы полосы, или, другими словами, в растушевке (feather) границы [5]. Переходная область состоит из двух частей, первая из которых ограничена параллельными прямыми  $a_1$  и  $c_1$ , а вторая – параллельными прямыми  $a_2$  и  $c_2$ . Ширина переходной области (см. рис. 2)

$$\begin{aligned} D_C &= 2R_{0C} = 2(R_{0A} + R_{AC}) = \\ &= 2(R_{0A} + R_{AB} + R_{BC}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R_{AC} = R_{AB} + R_{BC}$ .

Коэффициенты прямых  $c_1$  и  $c_2$  (их начальные ординаты) рассчитываются через ширину переходной области  $D_C$ , а угловые коэффициенты равны  $k_{01}$ . Переходная область ограничивается точками  $C_1(x_{C1}, y_{C1})$  и  $C_2(x_{C2}, y_{C2})$ , где точки  $C_1$  и  $C_2$  обозначают границу переходной области (начало фона). Точки  $B_1$  и  $B_2$  обозначают середины переходных областей, через которые проходят прямые

$b_1$  и  $b_2$ , параллельные к прямым  $a_1$  и  $a_2$ . Ширина половины переходной области (расстояние между точками  $B_1$  и  $B_2$ , рис. 2) равна

$$D_B = 2(R_{0A} + R_{AB}). \quad (4)$$

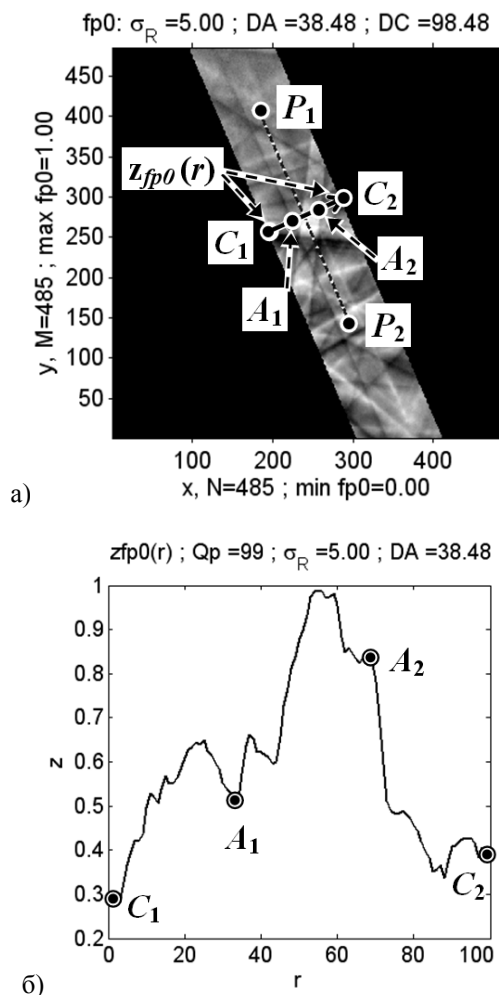


Рис. 3. Пример начального изображения  $f_{p0}$  отдельной полосы Кикучи: а) расширенная область полосы вдоль узлов  $V3 - V7$  (рис. 1); б) поперечный профиль  $z_{fp0}(r)$  распределения интенсивности полосы между точками  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 3а);  $\alpha = -66.72^\circ$ ;  $\beta = 156.72^\circ$

Коэффициенты прямых  $b_1$  и  $b_2$  (их начальные ординаты) рассчитываются через ширину половины переходной области  $D_B$ , а угловые коэффициенты равны  $k_{01}$ . Область полосы Кикучи (ограниченная линиями  $a_1$  и  $a_2$ ) вместе с переходной областью составляют расширенную область полосы (ограниченную линиями  $c_1$  и  $c_2$ ).

Согласно разработанной модели выполняется выделение расширенной области определенной полосы Кикучи из изображения  $f$  (см. рис. 1) в на-

чальное изображение  $f_{p0}$  отдельной полосы (см. рис. 3а).

Полученный поперечный профиль  $z_{fp0}(r)$  распределения интенсивности полосы на изображении  $f_{p0}$  значительно искажен за счет суперпозиции других полос (см. рис. 3б), что указывает на необходимость ориентированной фильтрации изображения полосы. Профиль полосы  $z_{fp0}(r)$ , где  $r = 1, \dots, Q_p$ , рассчитывается в  $Q_p$  точках через интенсивность  $z$  соответствующих пикселей изображения  $f_{p0}$ . Для расчета профилей интенсивности полосы использовано метод билинейной интерполяции (МБИ), согласно которому интенсивность точки профиля рассчитывается через интенсивности 4-х ближайших точек изображения [6]. По сравнению с методом ближайшего соседа МБИ обеспечивает более точное воспроизведение интенсивности профиля (поскольку учитывается интенсивность 4-х, а не одной ближайшей точки изображения). По сравнению с методом бикубической интерполяции МБИ обеспечивает сравнимое качество результата, но без введения дополнительных условий при интерполяции точек на границе изображения.

Для плавного выделения полосы в переходной области используется маска  $m_p = (m_p(y, x))$ , где  $y = 1, \dots, M$ ,  $x = 1, \dots, N$ , которая накладывается на начальное изображение  $f_{p0}$  отдельной полосы. Значения элементов маски  $m_p$  изменяются от 0 до 1. Значение каждого элемента  $m_p(y, x)$  маски означает коэффициент пропускания для соответствующего пикселя полосы. Начальные значения маски записываются в матрицу  $m_{p0}$  (такой же размерности, что и  $m_p$ ). Значения элементов маски  $m_{p0}$  равны 1 в пределах области, ограниченной линиями  $b_1$  и  $b_2$ , и 0 – за пределами указанной области. Таким образом, маска  $m_{p0}$  описывает полосу, ограниченную линиями  $b_1$  и  $b_2$  (см. рис. 2, рис. 4а).

С целью сглаживания границы полосы в данной работе использовано свертку начального изображения маски  $m_{p0}$  с ядром  $w$  фильтра Гаусса со средним квадратичным отклонением (СКО)  $\sigma_R$  [6, 7]. Сглаженное изображение маски  $m_p$  рассчитывается в результате свертки за формулой

$$m_p = m_{p0} * w. \quad (5)$$

При использовании функции Гаусса для маски  $m_p$  обеспечивается не только плавное изменение ее

интенсивности, но и производной от интенсивности, что исключает появление артефактов при фильтрации изображения полосы.

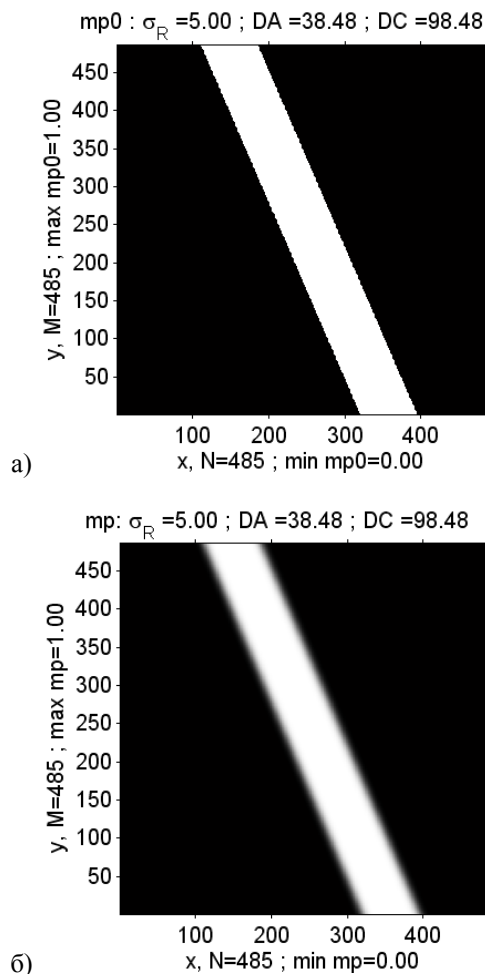


Рис. 4. Изображения маски полосы Кикучи:  
а) начальное изображение маски  $m_{p0}$  ;  
б) сглаженное изображение маски  $m_p$

Ширина частей переходной области, с учетом правила  $3\sigma$  для распределения Гаусса, равна

$$R_{AB} = R_{BC} = 3\sigma_R. \quad (6)$$

В таком случае ширина переходной области

$$R_{AC} = 6\sigma_R. \quad (7)$$

Начальное изображение маски  $m_{p0}$  (с целью уменьшения краевых эффектов) перед сверткой расширяется во все стороны на величину  $M_{w2} = 3\sigma_R$  (с учетом правила  $3\sigma$  для распределения Гаусса). Сглаженное изображение маски  $m_p$  размером  $M \times N$  пикселей (см. рис. 4б) рассчитывается как центральная часть результата свертки размером  $M_e \times N_e$  пикселей, где

$$M_e = M + 2M_{w2}, \quad N_e = N + 2N_{w2}. \quad (8)$$

Свертка маски выполняется в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье [7, P. 511-572] для уменьшения времени обработки. Значения сглаженной маски  $m_p$  по сути являются значениями нечеткой функции степени принадлежности [8] пиксела изображения к определенной полосе Кикучи. Изображение полосы со сглаженной границей  $f_p$  рассчитывается путем умножения начального изображения  $f_{p0}$  полосы на сглаженную маску  $m_p$  по формуле

$$f_p(y, x) = f_{p0}(y, x) \cdot m_p(y, x), \quad (9)$$

где  $y = 1, \dots, M$ ,  $x = 1, \dots, N$ .

Изображение полосы  $f_p$  со сглаженной границей расширяется во все стороны на величину  $M_{w2} = 3\sigma_R$  до изображения  $f_{pe}$  размером  $M_e \times N_e$  пикселей (с целью уменьшения краевых эффектов при последующей фильтрации) (рис. 5).

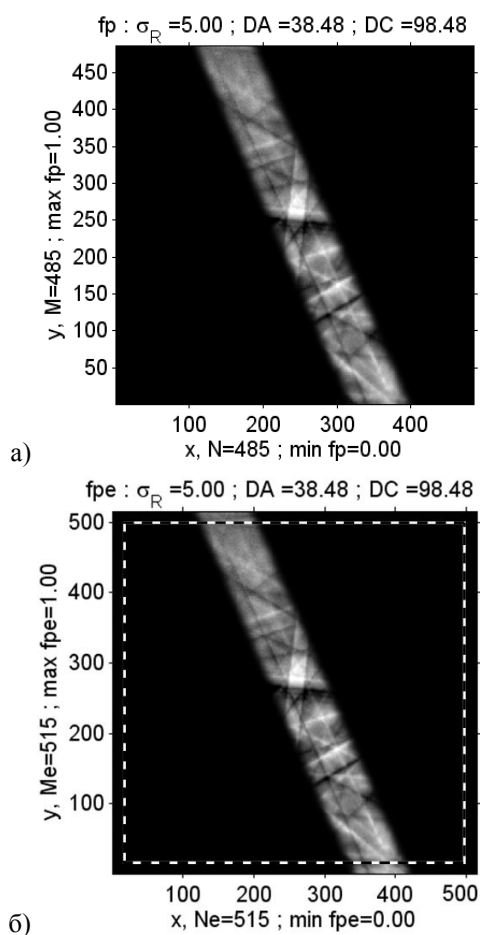


Рис. 5. Пример изображения полосы Кикучи со сглаженной границей: а) изображение  $f_p$  до расширения; б) изображение  $f_{pe}$  после расширения, штриховой линией показано границу изображение  $f_p$ ; угол наклона оси полосы  $\alpha = -66.72^\circ$

В работе использовано усовершенствованный метод симметричного расширения изображения (symmetric extension) [4, P.94-96] – симметричное расширение под произвольным углом.

В усовершенствованном методе изображение  $f_p$  расширяется симметрично от границы, но только вдоль направления полосы под углом  $\alpha$  (см. рис. 5б). В результате такого расширения на изображении  $f_{pe}$  сохраняется направление полосы и минимизируются краевые эффекты (артефакты), которые возникают при фильтрации.

Сглаженная маска  $m_p$  обеспечивает плавное изменение интенсивности полосы от максимальной (на границах полосы, прямые  $a_1$  и  $a_2$ ) до минимальной (на границах фона, линии  $c_1$  и  $c_2$ ). Рассмотрим принцип сглаживания границы полосы на примере поперечного профиля сглаженной маски  $m_p$  и соответствующего профиля характеристической (индикаторной) функции  $\chi_{DA}$  полосы Кикучи шириной  $D_A$  (рис. 6а).

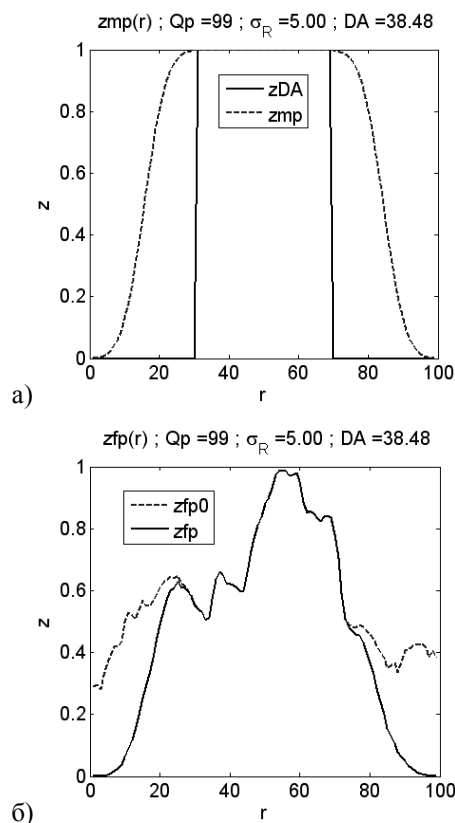


Рис. 6. Профили изображений: а) профиль  $z_{mp}$  сглаженной маски  $m_p$  и профиль  $z_{DA}$  характеристической функции  $\chi_{DA}$  полосы Кикучи шириной  $D_A$ ; б) поперечные профили  $z_{fp0}(r)$  и  $z_{fp}(r)$  распределения интенсивности полосы на изображениях  $f_{p0}$  (см. рис. 3а) и  $f_p$  (см. рис. 5а)

Значения характеристической функции  $\chi_{DA}$  равны 1 для пикселей, которые принадлежат полосе Кикучи, и 0 – для остальных пикселей.

Поэтому в результате умножения начального изображения  $f_{p0}$  полосы на сглаженную маску  $m_p$  интенсивность самой полосы на изображении  $f_p$  (см. рис. 6б) не искажается (для пикселей полосы значения маски  $m_p$  равны 1).

### 3. Ориентированная фильтрация изображения полосы

Над расширенным изображением полосы  $f_{pe}$  производится фильтрация в частотной области с целью удаления влияния других полос [5]. Для этого выполняется прямое дискретное преобразование Фурье (Discrete Fourier Transform) матрицы  $f_{pe}$  по формуле

$$F(m, n) = \sum_{y=1}^{M_e} \sum_{x=1}^{N_e} [f_{pe}(y, x) \cdot \exp\left(-j \cdot 2\pi \left(\frac{m \cdot (y-1)}{M_e} + \frac{n \cdot (x-1)}{N_e}\right)\right)], \quad (10)$$

где  $m$  – номер (индекс) частоты за высотой;  
 $n$  – номер частоты за шириной;  
 $m = 1, 2, \dots, M_e$ ;  $n = 1, 2, \dots, N_e$ ;  
 $j$  – мнимая единица.

Коэффициенты (спектр) Фурье  $F$  визуализируются в виде энергетического спектра (power spectrum)  $P_S = |F|^2$  в логарифмическом масштабе (рис. 7), что позволяет лучше различать отдельные детали. Далее выполняется умножение коэффициентов Фурье  $F$  на передаточную функцию фильтра  $W = (W(m, n))$ , где  $m = 1, 2, \dots, M_e$ ;  $n = 1, 2, \dots, N_e$ , в результате чего рассчитываются фильтрованные коэффициенты Фурье  $G = F \cdot W$ . Функция фильтра  $W$  (рис. 8а) рассчитывается в виде двух секторов с радиусом  $R_{0W} = [M/2]$  и центральным углом  $\gamma$ , равным

$$\gamma = k_\gamma \cdot 2 \cdot \arctan\left(\frac{R_{0A}}{M/2}\right), \quad (11)$$

где  $k_\gamma$  – коэффициент угла  $\gamma$ ,

$R_{0A}$  – половина ширины полосы (см. рис. 2).

Учитывая свойства преобразования Фурье, ось симметрии секторов повернута на угол  $\alpha_F = \alpha + \pi/2$ . Такая функция углового фильтра  $W$  позволяет пропускать только те коэффициенты Фурье, направление которых лежит в допустимом угле-

вом диапазоне  $\gamma$ .

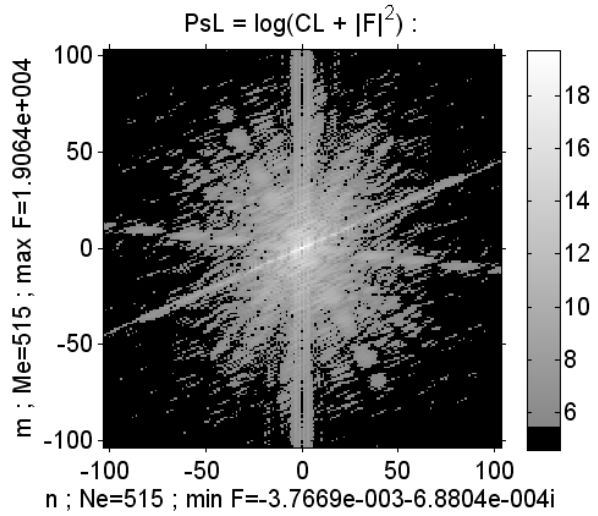


Рис. 7. Фрагмент энергетического спектра Фурье изображения  $f_{pe}$  (см. рис. 5б)

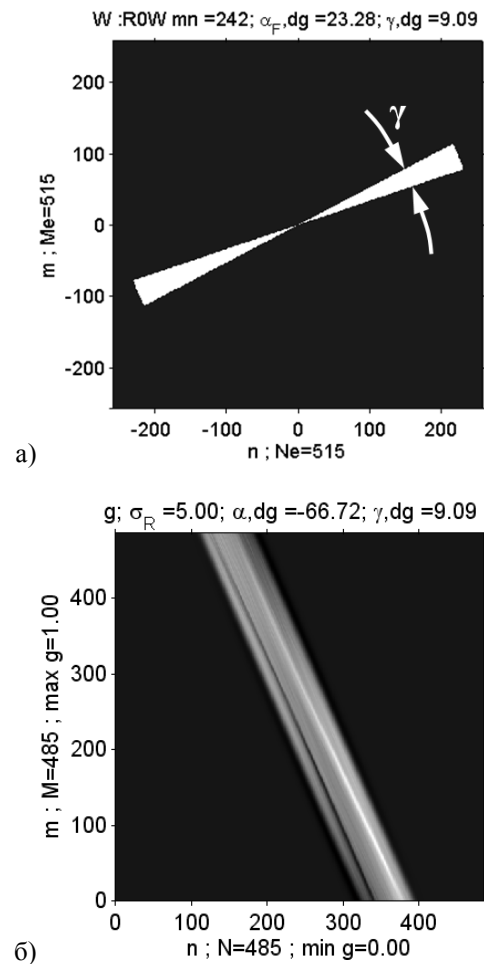


Рис. 8. Фильтр изображения и результат фильтрации: а) передаточная функция фильтра  $W$ ; б) фильтрованное изображение  $g$  полосы Кикучи;

$$k_\gamma = 1.0$$



Фильтрованное изображение  $g$  полосы (см. рис. 8б) рассчитывается как вещественная часть от обратного дискретного преобразования Фурье коэффициентов  $G$  (с отбрасыванием дополнительных пикселей, которые добавлены при расширении изображения  $f_{pe}$ ), умноженная на маску  $m_p$ . Таким образом, на фильтрованном изображении  $g$  полосы Кикучи (см. рис. 8б) и на его профиле (рис. 9) практически полностью удалено влияние других полос.

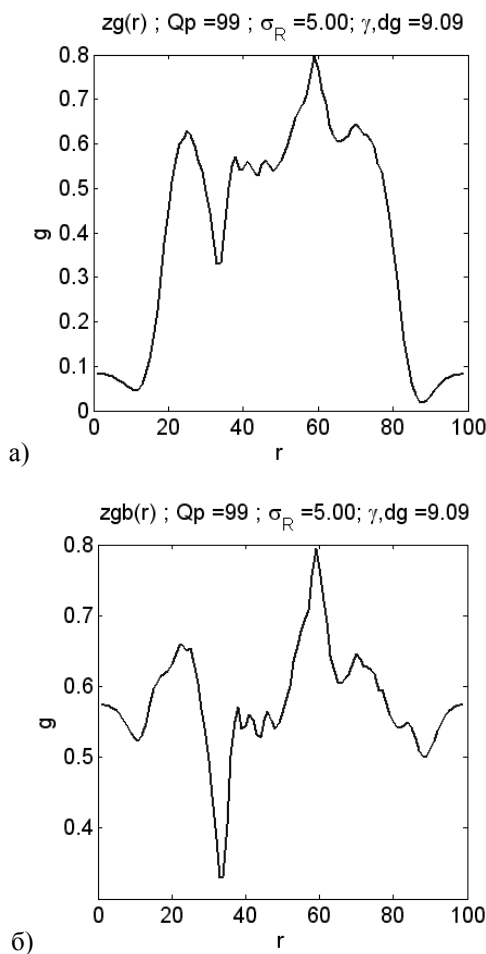


Рис. 9. Поперечный профиль распределения интенсивности полосы (см. рис. 8б), который проходит через центр полосы: а) профиль  $z_g(r)$  без фона; б) профиль  $z_{gb}(r)$  с фоном

#### 4. Оптимизация параметров ориентированной фильтрации изображений

Оптимальные параметры фильтрации изображений полос Кикучи аналитически определяются чрезвычайно сложно, поэтому для их оптимизации выполнена обработка эталонного (моделированного) изображения полос Кикучи (рис. 10), полученного на

основании экспериментального [2]. Распределение интенсивности поперечного моделированного профиля полосы (см. рис. 10а) рассчитывается как сумма нормальных распределений по формуле

$$z_S(r) = \sum_{t=1}^3 A_{pt} \cdot \exp\left(\frac{-(r-r_{ct})^2}{2\sigma_{pt}^2}\right) + A_f, \quad (12)$$

где  $A_{p1} = -0.275$ ,  $r_{c1} = 11.0$ ,  $\sigma_{p1} = 3.1$ ,  
 $A_{p2} = 0.275$ ,  $r_{c2} = 40.0$ ,  $\sigma_{p2} = 4.0$ ,  $A_{p3} = 0.078$ ,  
 $r_{c3} = 30.0$ ,  $\sigma_{p3} = 4.0$ ,  $A_f = 0.430$ .

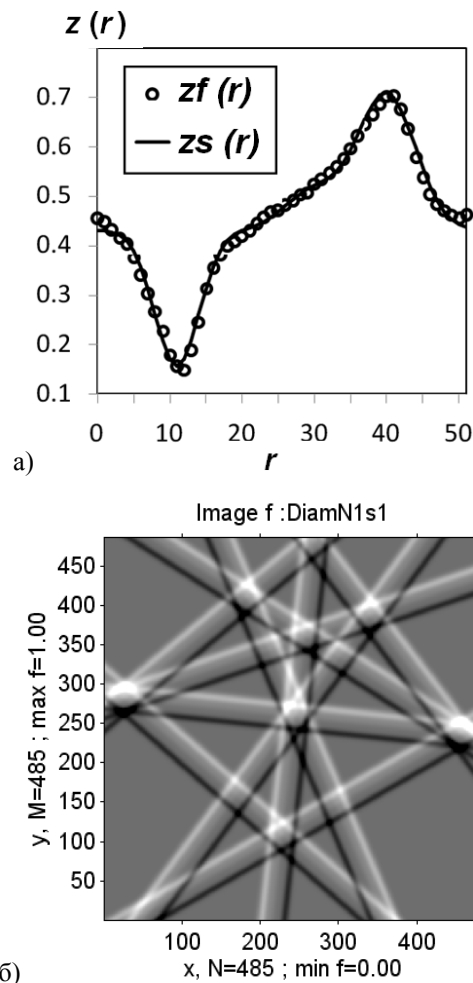


Рис. 10. Моделирование изображений полос Кикучи: моделированный профиль  $z_s(r)$  (12) в сравнении с экспериментальным  $z_f(r)$ , полученным из изображения  $f$  (см. рис. 1) для полосы между узлами  $V2$  и  $V4$ ; б) моделированное изображение 10-ти полос на основании профилей  $z_s(r)$

Определение оптимальной ширины переходной области  $R_{AC}$  выполнено путем перебора значений  $R_{AC}$  и поиском минимального СКО  $m_{se}$  между моделированным профилем  $z_s(r)$  и восстановленным из изображения  $z_{gb}(r)$ . Результаты моделиро-

вания (рис. 11, рис. 12а) показывают, что оптимальное значения  $R_{ACM} = 25$ , и соответственно  $\sigma_R = R_{ACM}/6 = 4.17$ . Аналогично определено оптимальное значение коэффициента  $k_{\gamma M} = 1.6$  (СКО  $m_{se} \approx 0.01$ , рис. 12б), которому соответствует угловой диапазон  $\gamma = 9.74^\circ$  (11). Интерполяция профиля  $z_{gb}(r)$  позволяет получить субпиксельное разрешение [9] при определении его ширины, которая используется для определения параметров исследованных кристаллов [1-3].

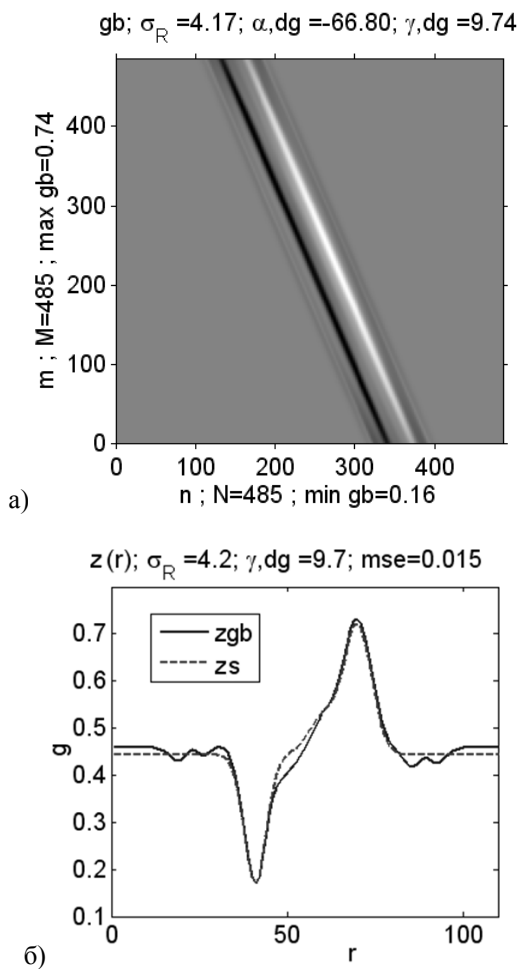


Рис. 11. Фильтрованное изображение  $g_b$  полосы Кикучи с фоном (а) и полученный из  $g_b$  профиль  $z_{gb}(r)$  в сравнении с моделированным  $z_s(r)$ ;

$$R_{AC} = 25; k_{\gamma} = 1.0$$

Таким образом, при установленных значениях параметров  $R_{AC}$  и  $k_{\gamma}$  обеспечивается оптимальная фильтрация моделированных изображений полос Кикучи, и близкая к оптимальной – для экспериментальных изображений Кикучи.

## Заключение

Разработано математическую модель, способ и программное обеспечение для расчета распределения интенсивности на заданных областях (полосах Кикучи) электронно-дифракционных изображений путем их пространственного выделения из суперпозиции полос и последующей ориентированной фильтрации.

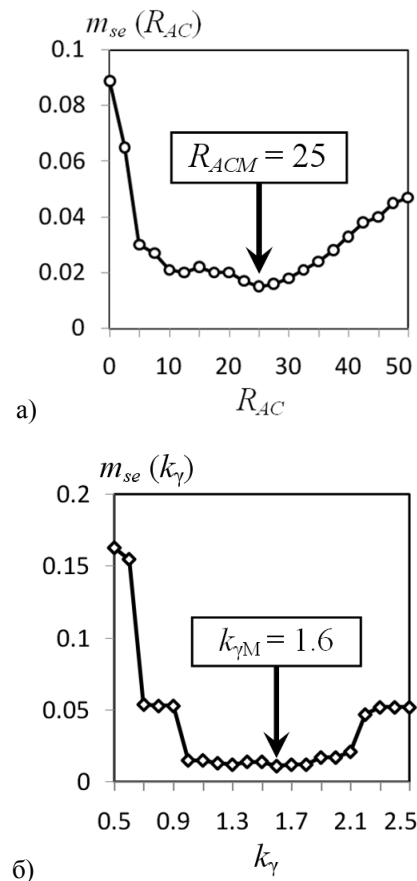


Рис. 12. Определение параметров фильтрации изображений: а) оптимального значения  $R_{AC}$ ; б) оптимального значения коэффициента  $k_{\gamma}$

На основании экспериментальных и моделированных изображений полос Кикучи определено оптимальные параметры фильтрации полос: ширину переходной области  $R_{AC}$  и допустимый угловой диапазон  $\gamma$ . Использовано симметричное расширение изображения полос под заданным углом, что уменьшает краевые эффекты при фильтрации изображения.

Новизна работы заключается в создании математической модели переходной области вокруг изображения полосы, которая учитывает особенности исследованных электронно-дифракционных изображений и предназначена для уменьшения краевых



ефектов на границе полосы при ее пространственном выделении и ориентированной фильтрации.

Ориентированная фильтрация экспериментальных изображений для электронно-дифракционных методов в перспективе позволяет повысить их точность при исследовании кристаллов.

### Литература

1. Ram, F. *Kikuchi bandlet method for the accurate deconvolution and localization of Kikuchi bands in Kikuchi diffraction patterns [Text]* / F. Ram, S. Zaefferer, D. Raabe // *Journal of Applied Crystallography*. – 2014. – Vol. 47. – P. 264-275.

2. *Determination of structural inhomogeneity of synthesized diamonds by back scattering electron diffraction [Text]* / I. M. Fodchuk, S. V. Balovsyak, M. D. Borcha, Ya. D. Garabazhiv, V. N. Tkach // *Phys. Status Solidi A*. – 2011. – Vol. 208, No. 11. – P. 2591-2596.

3. *Определение структурной неоднородности кристаллов по данным анализа картин Кикучи [Текст]* / М. Д. Борча, С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, В. Ю. Хоменко, В. Н. Ткач // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2013. – Т. 35, № 8. – С. 1137-1150.

4. Gonzalez, R. *Digital Image Processing using MATLAB [Text]* / R. Gonzalez, R. Woods, L. Eddins. – Prentice Hall, 2004. – 609 p.

5. Gonzalez, R. *Digital image processing [Text]* / R. Gonzalez, R. Woods. – Prentice Hall, 2002. – 813 p.

6. Bovik, A. L. *The Essential Guide to Image Processing [Text]* / A. L. Bovik. – Elsevier Inc., 2009. – 853 p.

7. Roger, L. *Fourier Methods in Imaging [Text]* / L. Roger, Jr. Easton. – John Wiley & Sons, 2010. – 930 p.

8. Rutkowski, L. *Computational Intelligence. Methods and Techniques [Text]* / L. Rutkowski. – Berlin : Springer-Verlag, 2008. – 519 p.

9. Душена, В. А. *Сравнительный анализ субпиксельных алгоритмов при совмещении изображений [Текст]* / В. А. Душена, М. Л. Усс // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2011. – № 4(52). – С. 41-51.

### References

1. Ram, F., Zaefferer, S., Raabe, D. *Kikuchi bandlet method for the accurate deconvolution and localization of Kikuchi bands in Kikuchi diffraction patterns. Journal of Applied Crystallography*, 2014, vol. 47, pp. 264-275.

2. Fodchuk, I. M., Balovsyak, S. V., Borcha, M. D., Garabazhiv, Ya. D., Tkach, V. N. *Determination of structural inhomogeneity of synthesized diamonds by back scattering electron diffraction. Phys. Status Solidi A*, 2011, vol. 208, no. 11, pp. 2591-2596.

3. Borcha, M. D., Balovsjak, S. V., Fodchuk, I. M., Homenko, V. Ju., Tkach, V. N. *Opredelenie strukturnoj ne-odnorodnosti kristallov po dannym analiza kartin Kikuchi [Determination of structural heterogeneity of crystals according to an analysis Kikuchi pictures]. Metallofizika i novejshe tehnologii*, 2013, vol. 35, no. 8, pp. 1137-1150.

4. Gonzalez, R., Woods, R., Eddins, L. *Digital Image Processing using MATLAB*. Prentice Hall Publ., 2004. 609 p.

5. Gonzalez, R., Woods, R., *Digital image processing*. Prentice Hall Publ., 2002. 813 p.

6. Bovik, A.L. *The Essential Guide to Image Processing*. Elsevier Inc. Publ., 2009. 853 p.

7. Roger, L., Easton, Jr. *Fourier Methods in Imaging*. John Wiley & Sons Publ., 2010. 930 p.

8. Rutkowski, L. *Computational Intelligence. Methods and Techniques*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2008. 519 p.

9. Dushepa V. A., Uss M. L. *Sravnitel'nyj analiz subpiksel'nyh algoritmov pri sovmeshhenii izobrazhenij [Comparative analysis of subpixel algorithms at superposition of images]. Radioelektronni i komp'yuterni systemy – Radioelectronic and computer systems*, 2011. no. 4 (52), pp. 41-51.

Поступила в редакцію 8.08.2016, рассмотрена на редколлегии 16.09.2016

## ОРІЄНТОВАНА ФІЛЬТРАЦІЯ ЦИФРОВИХ ЕЛЕКТРОННО-ДИФРАКЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

С. В. Баловсяк, Я. Д. Гарабазів, І. М. Фодчук

Розроблено математичну модель, спосіб і програмне забезпечення для виділення просторових областей (смуг) з їх суперпозиції на цифрових електронно-дифракційних зображеннях, а також для подальшої орієнтованої фільтрації зображень смуг. Краєві ефекти, які виникають при просторовому виділенні смуги, зменшені за рахунок створення навколо смуги перехідної області. Використано симетричне розширення зображень смуг під заданим кутом, що зменшує спотворення при фільтрації зображень. На основі експериментальних і модельованих зображень смуг визначено оптимальні параметри їх фільтрації. Орієнтована фільтра-

ція експериментальних зображень смуг в перспективі дозволяє підвищити точність електронно-дифракційних методів, призначених для дослідження кристалів.

**Ключові слова:** цифрова обробка зображень, орієнтована фільтрація зображень, перетворення Фур'є, згортка.

## ORIENTED FILTRATION OF DIGITAL ELECTRON DIFFRACTION IMAGES

*S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, Ya. D. Garabazhiv*

A mathematical model, method and software are developed for the selection of spatial regions (bands) from their superposition on digital electron diffraction images, and also for the subsequent oriented filtration of images of bands. Edge effects, which occur when the spatial selection of band, are reduced due to creation a transition area around the band. Symmetric expansion of images of bands at a predetermined angle is used, which reduces distortion in image filtering. On the basis of experimental and simulated images of bands the optimal parameters of their filtration are determined. The oriented filtration of experimental images of bands in the future allows improving the accuracy of the electron diffraction methods intended for research of crystals.

**Key words:** digital image processing, directed image filtering, Fourier transform, convolution.

**Баловсяк Сергей Васильевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина, e-mail: s.balovsyak@chnu.edu.ua.

**Гарабазив Ярослав Дмитриевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина, e-mail: y.harabazhiv@chnu.edu.ua.

**Фодчук Игорь Михайлович** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики твердого тела, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина, e-mail: ifodchuk@ukr.net.

**Balovsyak Serhiy Vasiliyovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Assistant Professor of the Dept. of Computer Systems and Networks, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, e-mail: s.balovsyak@chnu.edu.ua.

**Harabazhiv Yaroslav Dmitrovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Assistant Professor of the Dept. of Computer Systems and Networks, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, e-mail: y.harabazhiv@chnu.edu.ua.

**Fodchuk Igor Mikhailovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor of the Dept. of Solid State Physics, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, e-mail: ifodchuk@ukr.net.