УДК 539.2 548.4 548.73 620.187

Я.С.Белехов, М.Н.Петров

ВЫЯВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕТГЕНОТПОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРАСТА ОТ ДЕФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Application of computer processing for the analysis and decoding of diffraction images of structure defects in 6H-SiC single crystals, revealed by X-ray anomalous transmission method is considered. The computer processing was applied to reducing of graininess of photoemulsion. It allows to improve a quality of the experimental contrast from edge dislocations. The wavelet transform for numerical image processing was applied. The efficiency and applicability for this mathematical technique is discussed.

Введение

Перед современной прикладной наукой и полупроводниковым производством давно уже стоит вопрос о повышении чувствительности и информативности рентгенотопографических методов исследования дефектов монокристаллов. В частности метода, основанного на явлении аномального прохождения рентгеновских лучей (метод АПРЛ), который является одним из самых перспективных для исследования бездислокационных и малодислокационных полупроводников. Наиболее часто встает проблема устранения со снимков зернистости используемых фотоматериалов, на фоне которой затруднительна надежная расшифровка топографических изображений, в результате чего возможны ошибки при идентификации дефекта и его локализации в объеме монокристалла. В последнее время для этих целей предложен ряд методик цифровой обработки изображений, большинство из которых базируется на математическом аппарате Фурье-преобразования.

В данной статье рассматривается применение математического аппарата вейвлетов для цифровой обработки изображений дислокаций, в частности предложен алгоритм вейвлет-обработки и указаны возможные пути его оптимизации.

Алгоритм быстрого вейвлет-преобразования

Абстрактно вейвлет-базис записывается как [1]

$$\psi(x) = a^{-1/2}\psi_0\left(\frac{x-b}{a}\right), \tag{1}$$

где a — параметр, задающий степень сжатия или растяжения (масштаб) вейвлет-функции; b — параметр, задающий смещение функции по координатной (временной) оси; ψ_0 — сама базисная функция, определяемая типом вейвлета.

В дискретном случае анализа параметры a и b заменяются на дискретные значения $a = 2^j$ и $b = k2^j$, где j и k — целые числа. В результате вейвлет-функция принимает вид

$$\psi_{j,k} = a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}x-k),$$

а формула для вычисления детализирующих коэффициентов вейвлет-декомпозиции уровня j записывается как

$$C(j,k) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}x-k)s(x)dx. \tag{2}$$

Приведенные формулы используются для анализа одномерных сигналов. При переходе к двухмерному сигналу, каковым, например, является изображение, необходимо рассматривать две координаты — x и y. В этом случае вейвлет-базис является функцией двух переменных и в непрерывном случае

$$\psi(x,y)=\frac{1}{\sqrt{a_1\cdot a_2}}\psi_0\left(\frac{x-b_1}{a_1},\frac{x-b_2}{a_2}\right),$$

где a_1, b_1 и a_2, b_2 — параметры из формулы (1), относящиеся к измерениям сигнала по x и по y соответственно.

Для нахождения двухмерной вейвлет-функции можно также воспользоваться тензорным произведением одномерных вейвлет-базисов для x и y. Тогда аппроксимирующая двухмерная вейвлет-функция запишется как

$$\varphi(x,y)=\varphi(x)\varphi(y),$$

а в качестве вейвлет-базиса будут одновременно использоваться три вейвлета:

$$\psi_1(x,y)=\varphi(x)\psi(y),\ \ \psi_2(x,y)=\psi(x)\varphi(y),\ \ \psi_3(x,y)=\psi(x)\psi(y).$$

Однако на практике указанные выше выражения не получили распространения. Вместо них для каждого ортогонального вейвлет-базиса были созданы частотные фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Эти фильтры синтезируются на основе частотного образа вейвлета, т.е. когда вейвлет-функция представляется в частотной области по средствам прямого Фурье-преобразования, и такой образ вейвлета называется Фурье-образом. Частотная область вейвлета делится на две составляющие — низкочастотную и высокочастотную. Точка раздела этих частот равна половине частоты дискретизации сигнала. Каждой из этих областей соответствует свой фильтр: *Lo_D (low-pass decomposition)* — низкочастотный фильтр декомпозиции и *Hi_D (high-pass decomposition)* — высокочастотный фильтр декомпозиции. После декомпозиции на выходе каждого фильтра остается только половина частотных компонент сигнала, другая половина удаляется. Такая операция называется *двоичной децимацией* или прореживанием частоты сигнала вдвое. Коэффициенты передаточной характеристики этих фильтров соответствуют собственно самим коэффициентам вейвлет-декомпозиции. *Lo_D* образует на выходе коэффициенты аппроксимации сигнала, а *Hi_D* — соответственно детализирующие коэффициенты. Преимуществом частотного подхода является то, что операция свертки дискретных отсчетов сигнала с коэффициентами импульсной характеристики вейвлет-фильтров занимает значительно меньше времени, чем декомпозиция сигнала по формуле (2). Поэтому такой подход лежит в основе алгоритмов быстрого вейвлет-преобразования (БВП). Основным из этих алгоритмов является пирамидальный алгоритм Маллата. Данный алгоритм позволяет использовать одномерный вейвлет-базис для двухмерной декомпозиции. Подобную операцию называют декомпозицией с разделимым базисом, когда отдельно фильтруются строки и столбцы изображения как конечные одномерные сигналы. Схема этого алгоритма для двухмерного вейвлет-анализа с использованием традиционных обозначений (см. напр., пакет MATLAB [1]) представлена на рис.1.

Двоичная децимация коэффициентов разложения в данной схеме по сути дела является прореживанием спектра входного сигнала (строчек и столбцов изображения) вдвое по частоте. Матрица горизонтальных детализирующих коэффициентов CD^H содержит горизонтальные детали изображения, т.е. наиболее явные в направлении горизонтальных строк. Соответственно вертикальные коэффициенты CD^V передают вертикальные детали изображения, а CD^D — диагональные.

Обозначим через A_j реконструкцию изображения из матрицы коэффициентов аппроксимации уровня j, что соответствует аппроксимации изображения на уровне j. Аналогично через $D_j^{H,V,D}$ обозначим реконструкцию изображения из его детализирующих коэффициентов уровня j, т.е. получаем детали изображения на уровне j. В итоге аппроксимацию сигнала на уровне j можно записать так:

$$A_j=A_{j+1}+D^H_{j+1}+D^V_{j+1}+D^D_{j+1}. \qquad (3)$$

CA_j — входная матрица аппроксимирующих коэффициентов декомпозиции уровня j, где r — количество строк матрицы, а c — количество столбцов. При j = 0 матрица CA_0 — представляет собой исходное изображение

Рис.1. Алгоритм быстрого 2-х мерного вейвлет-преобразования (алгоритм Маллата)

А реконструкция самого изображения S в соответствии с алгоритмом Маллата выглядит как

$$S = A_0 = A_1 + D_1^{H,V,D} = A_2 + D_2^{H,V,D} + D_1^{H,V,D} = \ldots . \qquad (4)$$

По сути дела каждый последующий уровень разложения получается из предыдущих коэффициентов аппроксимации, а само изображение рассматривается как матрица коэффициентов аппроксимации нулевого уровня. С переходом на уровень вниз происходит уменьшение разрешения изображения в 4^j раз по сравнению с оригиналом. В результате происходит последовательное *огрубление* изображения, и каждый последующий уровень декомпозиции строится на базе предыдущей грубой версии.

Вейвлет-обработка изображений дислокаций

В ходе работы рентгенотопографические снимки подвергались декомпозиции по данному алгоритму. Далее определялось, какие из детализирующих коэффициентов содержат зерно фотоэмульсии, и затем эти коэффициенты удалялись из общей структуры вейвлет-разложения. На рис.2а приведены результаты применения данной методики для изображений краевых дислокаций монокристалла 6H-SiC. При обработке этого изображения традиционными цифровыми методами у специалистов не возникало особого интереса к краевой дислокации, обозначенной на снимке цифрой 1. Обычная четырехлепестковая краевая дислокации, обладающая при этом аномально большими размерами по сравнению с соседними. После вейвлет-обработки контраст от дислокации приобрел другие очертания (рис.2в). Дислокация разделилась на две части, которые похожи на две краевые дислокации, контрасты от которых сливаются. Была выдвинута гипотеза, что это и есть две краевые дислокации, плоскости скольжения которых расположены близко друг к другу, причем одна дислокация находится выше другой — ближе к поверхности кристалла. Такое предположение, как и любое другое, требует доказательств. В рентгенотопографии это делается с помощью других независимых методов исследования дефектов полупроводников (напр., метода декарирования с химическим травлением или поляризационно-оптического метода и т.д.). В нашем случае доказательство было найдено на снимке, сделанном по методу Ланга (рис.2б) [2,3]. На этом снимке в том же самом участке кристалла хорошо видны контрасты от двух розеток, расположенных одна под другой.

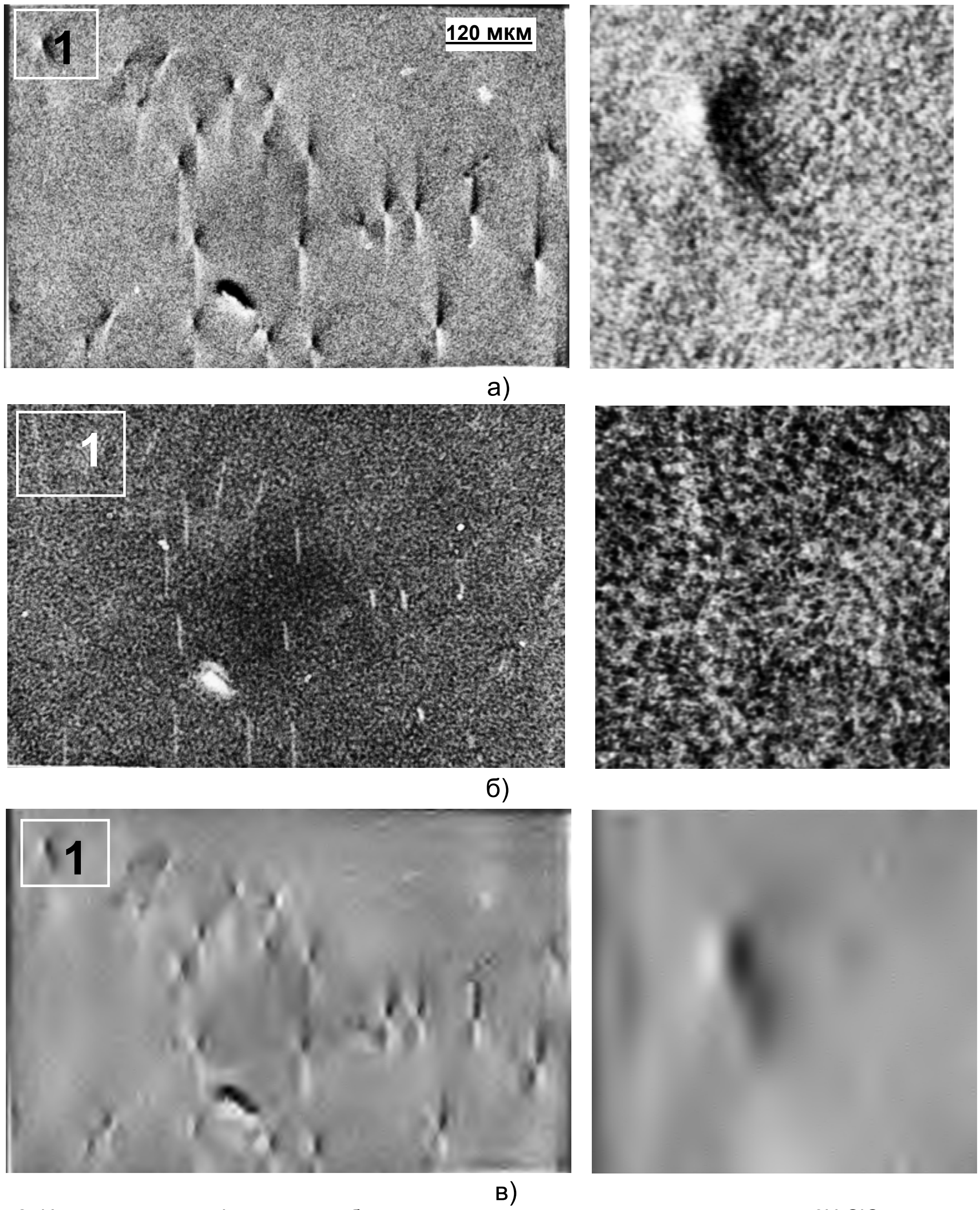

Рис.2. Исходное топографическое изображение краевых дислокаций монокристалла 6H-SiC, полученное методами АПРЛ (а), Ланга (б) и обработанное методом вейвлет-фильтрации (в). Справа от топограмм представлены увеличенные изображения дислокации 1

Трехмерные проекции оригинального и обработанного контрастов представлены на рис.3. В качестве базиса использован ортогональный вейвлет Коифлета [1]. Для того, чтобы передать все детали и тонкости зерна и розеток, потребовалась вейвлет-функция, максимально компактная на временном и частотном интервале.При использовании *грубых* вейвлетов контраст после разложения передавался неточно, и много информации терялось. Кроме того, функция должна бать симметричной, несимметричный вейвлет нарушает пропорции (симметрию) самих розеток при разложении. Использовалась максимальная степень сжатия вейвлета Коифлета (параметр a = 5 в формуле (1)). Симметричность вейвлета также удовлетворяла нашим условиям. Вейвлет-фильтрация представлена как с мягким порогом отсечения детализирующих коэффициентов (рис.3в), так и с жестким (рис.3г) [1]. В обоих случаях четко отображен раздвоенный контраст дислокации. Здесь же представлены и варианты фильтрации контраста с помощью Фурье-преобразования: с применением низкочастотного Фурье-фильтра и прямого изменения амплитудного спектра изображения [4] (рис.3д и 3е). Анализ этих результатов свидетельствует, что Фурье-фильтрация не дает никакой информации о раздвоенности дислокации 1. Гаусс-размытие и нелинейная рекурсивная фильтрации, методика которых рассмотрена в [5], также не дали дополнительной информации.

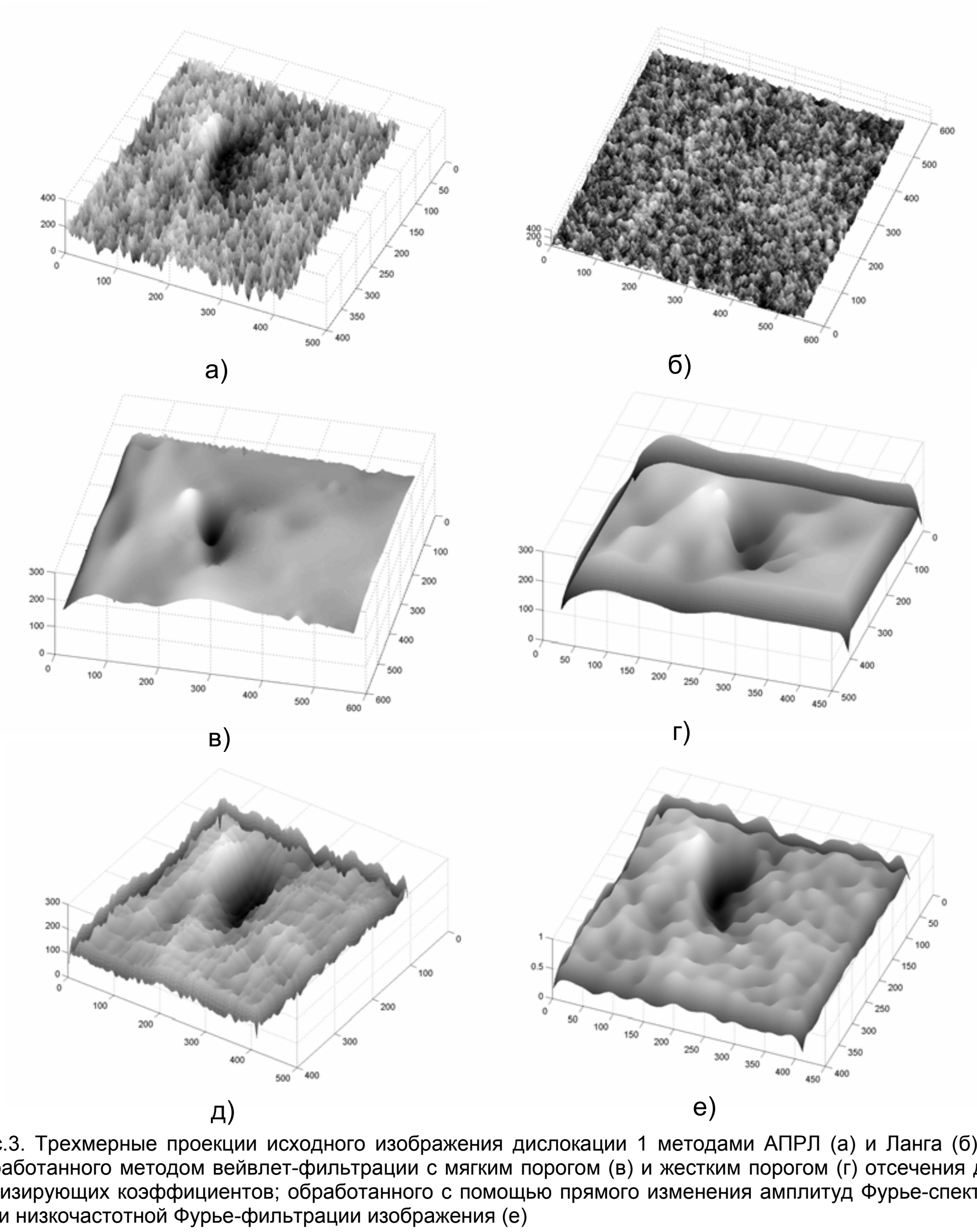

Рис.3. Трехмерные проекции исходного изображения дислокации 1 методами АПРЛ (а) и Ланга (б) — обработанного методом вейвлет-фильтрации с мягким порогом (в) и жестким порогом (г) отсечения детализирующих коэффициентов; обработанного с помощью прямого изменения амплитуд Фурье-спектра (д) и низкочастотной Фурье-фильтрации изображения (е)

Анализ коэффициентов вейвлет-разложения

Рассмотрим подробнее обработанное изображение дислокации 1 с точки зрения вейвлет-анализа. На рис.4 представлены трехмерные графики матриц аппроксимации A_j и деталей $D_j^{H,V,D}$ изображения дислокации 1 (выражения (3) и (4)). Размеры матриц увеличены до размеров исходного изображения по методу бикубической интерполяции, что придает им большую наглядность. Как видим, уже на первых уровнях декомпозиции аппроксимирующие коэффициенты предают информацию о раздвоенности дислокации 1 (рис.4а). На дальнейших уровнях эта информация становится более явной (рис.4б и 4в). Совершенно четко прослеживается это и на вертикальных детализирующих коэффициентах 6-го уровня (рис.4д).

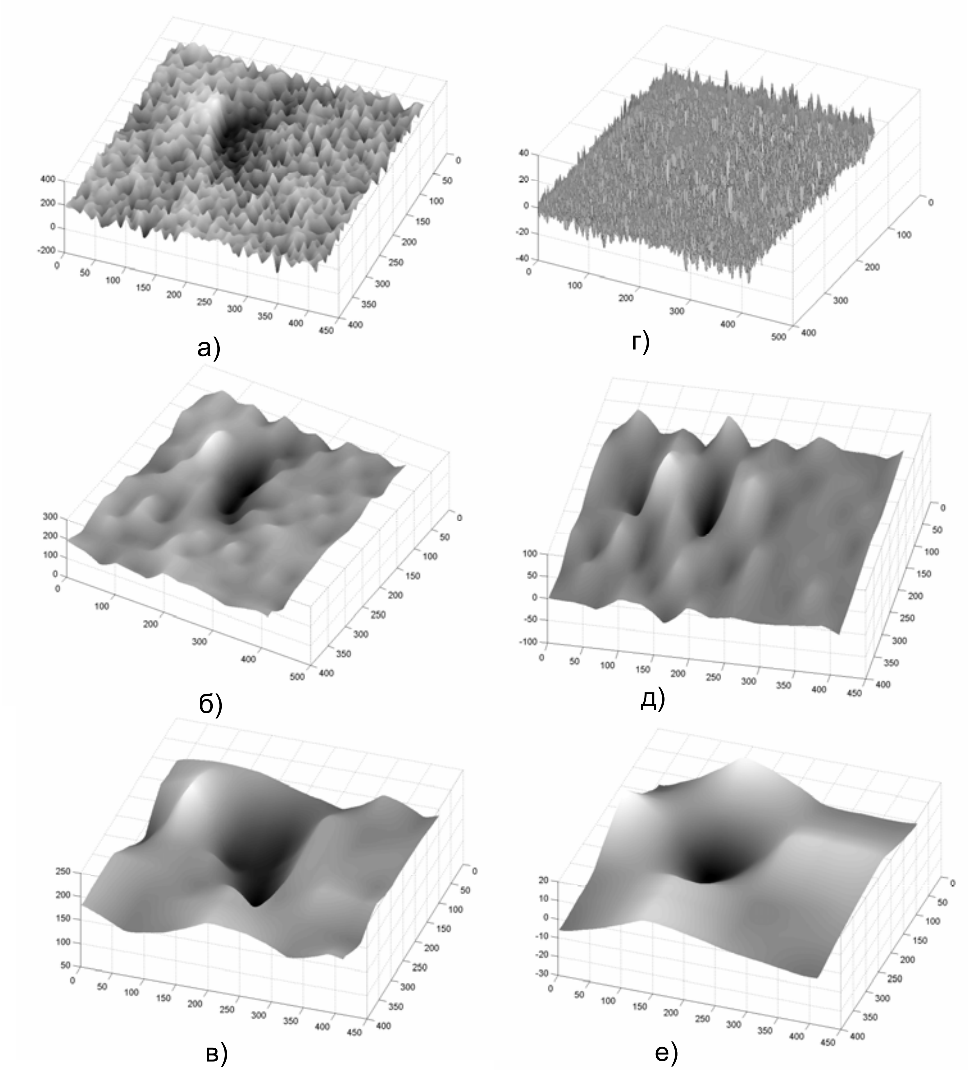

Рис.4. Трехмерные проекции реконструкции контраста дислокации 1 из следующих вейвлет-коэффициентов: коэффициентов аппроксимации 3-го (а), 5-го (б) и 6-го (в) уровней; горизонтальных детализирующих коэффициентов 1-го уровня (г); вертикальных детализирующих коэффициентов 6-го уровня (д); диагональных детализирующих коэффициентов 8-го уровня (е)

Декомпозиция изображения осуществлялась до 8-го уровня (j = 8). Матрица коэффициентов аппроксимации на последнем уровне в 65536 раз меньше, чем исходное изображение дислокации. Но только на 8-м уровне разложения окончательно исчезли детали зерна фотоэмульсии, т.е. контраст от зерна перестал улавливаться коэффициентами аппроксимации CA_j и передаваться на последующие детализирующие коэффициенты CD_{j+1}. Уже одно это говорит о том, насколько сложен контраст зерна. Яркостный диапазон контраста имеет значительную ширину, и детали зерна сохраняются даже на высоких уровнях декомпозиции. После разложения, на всех уровнях удаляются детализирующие коэффициенты, содержащие контраст от зерна. Сохраняются только коэффициенты, значения которых соответствуют последнему уровню. При таком *глубоком* разложении значительно теряются (аппроксимируются) и детали самой розетки. Если опираться на алгоритм Маллата, то реконструкция отчищенного контраста осуществляется на базе последних коэффициентов аппроксимации (j = 8) и цепочки детализирующих коэффициентов, сохраняемых от первого и до последнего уровня, в соответствии с выражением (4). При такой значительной аппроксимации контуры розетки теряют свою резкость, и единственным носителем былых деталей контраста служат детализирующие коэффициенты. Эти коэффициенты последовательно накапливают информацию о деталях розетки от уровня к уровню. Но и эти коэффициенты практически полностью удаляются, поскольку (в соответствии с нижним уровнем) содержат информацию о деталях зерна. Значения коэффициентов зерна и самой розетки на верхних уровнях совпадают. В итоге информация о деталях розетки на этих уровнях теряется. Этим объясняется некая *размытость* изображения розетки после фильтрации.

Выводы

1. Вейвлет-анализ позволяет практически полностью удалить зернистость фотоматериалов с изображения дислокаций, но при этом теряется часть деталей контраста самих дефектов.
2. На снимках после вейвлет-обработки появляются некие артефакты (рис.2в), своего рода вейвлет-интерпретация некоторых участков изображения, что, возможно, объясняется глубокой аппроксимацией контраста, возникающей на высоких уровнях декомпозиции.
3. Использование вейвлет-разложения позволило выявить две краевые дислокации, контраст от которых до обработки расценивался как одна дислокация (рис.3, 4), что позволяет говорить об особой чувствительности вейвлет-разложения к малозаметным особенностям контраста.

1. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Спец. справочник. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
2. Данильчук Л.Н. Дис. … д-ра физ.-мат. наук. Киев: ИМФ АН Украины, 1992. 361 с.
3. Окунев А.О. Дис. … канд. физ.-мат. наук. В.Новгород: НовГУ, 1999. 263 с.
4. Белехов Я.С., Петров М.Н., Дроздов Ю.А. // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2004. №26. С.145-151.
5. Дроздов Ю.А. Дис. … канд. техн. наук. В.Новгород: НовГУ, 2003. 232 с.