

На правах рукописи

ТКАЛЬ ВАЛЕРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ
РЕНТГЕНОТОПОГРАФИЧЕСКИХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Ижевск - 2007

Работа выполнена в Совместной с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН научно-учебной лаборатории рентгенотопографических методов исследования материалов электронной техники при Новгородском государственном университете им. Ярослава Мудрого

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Емельянов Геннадий Мартинович,
ГОУ ВПО Новгородский государственный
университет им. Ярослава Мудрого

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Бушуев Владимир Алексеевич,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

доктор физико-математических наук, профессор
Кютт Регинальд Николаевич,
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

доктор технических наук, профессор
Мурынов Андрей Ильич,
ГОУ ВПО «Ижевский технический университет»

Ведущая организация: Институт проблем технологии микроэлектроники и
особочистых материалов РАН, Черноголовка

Защита состоится «26» октября 2007 г. в 14 часов в ауд. 2 на заседании
диссертационного совета № Д212.275.03 в Удмуртском государственном
университете по адресу: 426037, Ижевск, ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного
университета

Автореферат разослан «___» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Крылов П.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Успехи микро- и нанoeлектроники последних десятилетий в значительной степени обусловлены внедрением в полупроводниковое производство структурно совершенных монокристаллических материалов, тонких плёнок и новых технологий, а также использованием для исследования и диагностики материалов современных высокоразрешающих и высокочувствительных методов.

Дефекты структуры являются причиной брака и деградации параметров и характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, поэтому неслучайно одной из важнейших задач остаётся как можно более полное их выявление и определение физической природы. Это достигается применением разнообразных диагностических методов, повышением чувствительности, информативности и разрешения старых, а также разработкой новых, более экспрессных методов регистрации и надёжной идентификации дефектов, включая и возможности, предоставляемые современными компьютерными технологиями.

В науке и в производстве для диагностики и исследования материалов широкое распространение получили методы рентгеновской топографии и поляризационно-оптического анализа (метод фотоупругости), которые просты в реализации, обладают высокой надёжностью, чувствительностью и являются к тому же неразрушающими и прямыми. Среди топографических можно выделить метод, основанный на явлении аномального прохождения рентгеновских лучей – топография на основе эффекта Бормана (метод РТБ), который показал высокую эффективность и перспективность при исследовании малодислокационных и бездислокационных монокристаллов.

В методах РТБ и фотоупругости контраст от дефектов структуры представляется в виде розеток интенсивности, форма и количество лепестков которых зависят от типа дефекта, а в случае микродефектов и от их расположения в объёме исследуемого монокристалла. Применяя модифицированные уравнения Инденбома-Чамрова, можно рассчитать теоретические изображения основных типов дефектов структуры, выявляемых этими методами, и тем самым упростить расшифровку экспериментального контраста, повысить надёжность идентификации дефектов структуры. На практике идентификация дефектов структуры осуществляется сопоставлением экспериментального контраста с расчётным или с ранее расшифрованным.

Анализ и расшифровка экспериментального контраста часто затруднены из-за негативного влияния ряда факторов, к которым относят дефекты фотоэмульсии, слабую контрастность, фоновую неоднородность и зернистость изображений. Не всегда удаётся выявить на топограмме и фотоплёнке всю имеющуюся информацию, часть её не удаётся расшифровать, а часть просто не регистрируется человеческим глазом и, следовательно, не подвергается учёту. Полный детальный анализ экспериментального контраста невозможен без устранения этих факторов. Традиционно этого добивались пересъёмкой исследуемых образцов или применением сложных фотографических приёмов обработки топограмм и фотоплёнок.

Более эффективное решение этих проблем может быть достигнуто цифровой обработкой изображений, основанной как на анализе яркостных характеристик (обработка изображений линейными и нелинейными фильтрами), так и на частотном анализе, например, Фурье- и вейвлет-анализе. Данных по идентификации дефектов структуры и выявлении «тонких» особенностей топографических и поляризационно-оптических изображений с помощью цифровой обработки в литературе крайне мало, а что касается вейвлет-анализа, то их практически нет. Приводятся в основном лишь данные, свидетельствующие о перспективности применения вейвлетов для решения задач, связанных с обработкой художественных изображений и их сжатием с минимальной потерей информации. Отсутствуют также данные о получении и вейвлет-обработке топографических и поляризационно-оптических изображений с расширенным динамическим диапазоном – HDR-изображений (32-битный формат), которые должны содержать значительно больше полезной информации о контрасте дефектов структуры, чем аналогичные 8- и 16-битные изображения.

Цель работы: повышение надёжности регистрации и определения физической природы дефектов структуры монокристаллических полупроводников, выявление «тонких» особенностей их экспериментального контраста, получение новой количественной и качественной информации, повышение информативности топографических методов и поляризационно-оптического анализа путём устранения слабой контрастности, фоновой неоднородности и зернистости изображений методами цифровой обработки, основанными на анализе яркостных характеристик и вейвлет-анализе изображений дефектов структуры, включая HDR-изображения.

Для достижения цели необходимо было выполнить следующие мероприятия.

1. Провести анализ и определение основных особенностей теоретического и экспериментального контраста основных типов дефектов структуры монокристаллических полупроводников, полученных решением модифицированных уравнений Инденбома-Чамрова и зарегистрированных методами поляризационно-оптического анализа, рентгеновской топографии на основе эффекта Бормана и Ланга.

2. Повысить качество анализируемых изображений, устранив факторы, затрудняющие их расшифровку и идентификацию дефектов структуры – слабую контрастность, фоновую неоднородность и зернистость топографических и поляризационно-оптических изображений, отделить контраст дефектов структуры от контраста зерна фотоэмульсии и её дефектов, исследовать возможности различных подходов анализа и обработки экспериментального топографического и поляризационно-оптического контраста.

3. Представить изображения дефектов структуры в виде, более удобном для их надёжной идентификации, повысить экспрессность исследований, информативность, достоверность и надёжность топографических методов и поляризационно-оптического анализа, используя разработанные алгоритмы и программы цифровой обработки, основанной на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе.

4. Выявить «тонкую» структуру лепестков розеток интенсивности, повысить надёжность идентификации дефектов структуры монокристаллических полупроводников путём получения топографических и поляризационно-оптических изображений с расширенным динамическим диапазоном (HDR изображений), разложением экспериментального контраста по цветовым каналам и последующей вейвлет-обработкой. Провести сравнительный анализ качества и информативности изображений, представленных в 8-, 16- и 32-битном форматах.

5. Провести апробирование разработанных методов цифровой обработки экспериментального контраста, основанных на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе, на монокристаллах с различным структурным совершенством, определить их основные возможности и ограничения, выделить наиболее оптимальные алгоритмы и программы по обработке изображений, а также перспективные направления цифровой обработки, позволяющие получить максимум

количественной и качественной информации о дефектах структуры исследуемых монокристаллов.

6. Провести оценку основных искажений экспериментального и теоретического контраста, вносимых цифровой обработкой и т.д.

Методы исследования. Для регистрации и определения физической природы дефектов структуры монокристаллических полупроводников (6H-SiC, Si, GaAs и др.) использовались топографические методы РТБ и Ланга, а также метод фотоупругости (поляризационно-оптический анализ). Далее полученный экспериментальный контраст подвергался цифровой обработке, основанной на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе.

В качестве тестовых объектов при апробировании разработанных алгоритмов и программ цифровой обработки чаще всего использовались изображения дефектов структуры монокристаллов 6H-SiC, так как для данного материала характерен маленький размер изображений дефектов, что предъявляет повышенные требования к разрешающей способности и эффективности предлагаемых цифровых методик.

Компьютерное моделирование теоретического контраста основных типов дефектов структуры проводилось решением модифицированных уравнений Инденбома-Чамрова. Идентификация дефектов структуры полупроводников осуществлялась сопоставлением теоретического и экспериментального контраста. Для выявления отличительных особенностей, основных искажений и дополнительных деталей, вносимых цифровой обработкой проводилось «моделирование» зернистости, её вейвлет-обработка и сравнение с результатами аналогичной цифровой обработки экспериментального контраста.

Научная новизна. Диссертационная работа характеризуется следующей научной новизной.

1. Предложены эффективные способы повышения надёжности регистрации и определения физической природы основных типов дефектов структуры исследованных монокристаллических полупроводников за счёт:

– применения для анализа экспериментального контраста и идентификации дефектов структуры цифровой обработки, основанной на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе изображений;

– эффективного устранения основных факторов, затрудняющих расшифровку экспериментального топографического и поляризационно-оптического контраста и

идентификацию дефектов структуры, – слабой контрастности, фоновой неоднородности и зернистости изображений, выявления дефектов фотоэмульсии;

– повышения качества анализируемых изображений и выявления «тонких» особенностей экспериментального контраста дефектов структуры полупроводников;

– получения дополнительной количественной и качественной информации о дефектах структуры и представления их в виде, более удобном для надёжной идентификации – трёхмерных графиков, областей равного контраста, построения профилей интенсивности, применения контрастирования и представления изображений в цвете;

– получения и последующей цифровой обработки изображений с расширенным динамическим диапазоном – HDR-изображений (32-битных), а также разложением изображения по цветовым каналам (синий, зелёный, красный).

2. Проведён яркостный и частотный анализ изображений дефектов структуры монокристаллических полупроводников, позволивший разработать и апробировать эффективные методы цифровой обработки топографического и поляризационно-оптического контраста, сравнить эффективность различных подходов, алгоритмов и программ цифровой обработки изображений и выбрать наиболее оптимальные.

3. Впервые для расшифровки экспериментального контраста, полученного методами РТБ, Ланга и фотоупругости, идентификации дефектов структуры полупроводников, повышения информативности этих методов и достоверности полученных результатов, использовался дискретный вейвлет-анализ. Показано преимущество вейвлет-анализа по сравнению с методами цифровой обработки, основанными на анализе яркостных характеристик изображений.

4. Предложены алгоритмы и программы цифровой обработки, позволяющие с высокой эффективностью устранить слабую контрастность, фоновую неоднородность и зернистость топографических и поляризационно-оптических изображений, выявить не регистрируемые ранее дополнительные детали контраста дальнего и ближнего полей деформаций.

5. Показано, что рентгено топографический и поляризационно-оптический контрасты дефектов структуры полупроводников характеризуются различным соотношением частотных спектров сигнала и шума, что требует разработки для каждого из них разных методик подавления шумовой составляющей.

6. Проведён сравнительный анализ эффективности различных вейвлет-базисов для задач частотного преобразования и обработки экспериментального контраста, определены критерии выбора оптимального вейвлет-базиса.

7. Показано преимущество топографического метода РТБ и цифровой обработки в выявлении основных типов дефектов структуры и «тонких» особенностей экспериментального контраста в малодислокационных и бездислокационных монокристаллических материалах по сравнению с методом Ланга.

8. В кремнии методом РТБ и последующей цифровой обработкой экспериментального контраста выявлены микродефекты В-типа с размерами 2 – 5 мкм, которые ранее регистрировались методами электронной микроскопии.

9. Получены топографические HDR-изображения монокристалла 6H-SiC, определены критерии, по которым необходимо при вейвлет-обработке выбирать область опорного изображения, её геометрические размеры и яркостные характеристики, что позволило получить более информативные изображения дефектов, выявить их «тонкую» структуру и особенности, не регистрируемые ранее.

10. Многоуровневым представлением деталей контраста в рамках вейвлет-алгоритма, устранившего фоновую неоднородность, показана возможность более полного анализа топограмм монокристаллов с сильной фоновой неоднородностью и аномально высокой плотностью дефектов, различные детали которых перекрывали друг друга и затрудняли расшифровку, отделения высокочастотных и среднечастотных деталей контраста в отдельные изображения, что облегчило их анализ и выявило дополнительную информацию о контрасте в каждом диапазоне частот.

Обоснованность и достоверность теоретических и экспериментальных исследований доказывается широким апробированием основных результатов работы на конференциях и семинарах различного ранга, включая международные, публикациями в академических журналах, изданием в соавторстве со своими коллегами в течение 2004 – 2006 годов по данной тематике 5 научных монографий.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

– предложены простые для практической реализации алгоритмы и программы цифровой обработки, повысившие надёжность расшифровки экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллов, а также способы представления

дефектов структуры в виде, более удобном для их однозначной идентификации, выявления дополнительных особенностей экспериментального контраста;

– повышена информативность и достоверность топографических методов РТБ, Ланга и поляризационно-оптического анализа, экспрессность исследования и диагностики структурного совершенства монокристаллов;

– предложена методика выявления в кремнии методом РТБ и последующей цифровой обработкой топографического контраста микродефектов В-типа с размерами 2 – 5 мкм;

– предложен простой способ разделения по линиям равного контраста и профилям интенсивности изображений, создаваемых микродефектами, от изображений зерна фотоэмульсии и её дефектов;

– определено и апробировано аппаратное и программное обеспечение, позволяющее применять рассмотренные в работе методы цифровой обработки топографических и поляризационно-оптических изображений, включая и HDR-изображения, практически во всех лабораториях физического материаловедения и структурного анализа, в учебном процессе;

– на большом количестве образцов проведена апробация алгоритмов и программ цифровой обработки, основанных на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе, определены оптимальные параметры фильтров, позволивших устранить слабую контрастность, фоновую неоднородность и зернистость изображений, выявить дефекты структуры и особенности их экспериментального контраста, трудно регистрируемые ранее традиционным способом;

– предложен и апробирован способ получения топографических HDR-изображений, расширяющий возможности методов, использованных для исследования дефектов структуры монокристаллических полупроводников;

– предложен способ получения дополнительной информации о низкочастотных особенностях лепестков розеток интенсивности и выявлении ядра розеток, основанный на разделении исследуемого контраста по цветовым каналам;

– предложена методика «сшивания» топографических изображений без потери информации, если исследуемый монокристалл был расколот на несколько частей и топографическая съёмка проводилась отдельно для каждого из них.

Результаты данной диссертационной работы могут представлять научный и практический интерес для специалистов, работающих в области физического материаловедения и структурного анализа, цифровой обработки изображений, научных лабораторий институтов РАН и Минобрнауки РФ. В совместной с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН научно-учебной лаборатории рентгено топографических методов исследования материалов электронной техники разработанные методы регистрации дефектов структуры и определения их физической природы, включая цифровую обработку изображений, широко применяются при исследовании и диагностике различных полупроводниковых материалов, при подготовке диссертаций, выпускных квалификационных работ, при чтении спецкурсов для студентов физических и инженерных специальностей НовГУ им. Ярослава Мудрого.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Повышение надёжности регистрации и идентификации дефектов структуры, локализации их в объёме монокристаллических полупроводников, получение дополнительной количественной и качественной информации о дефектах, устранение слабой контрастности, фоновой неоднородности и зернистости изображений, повышение информативности и достоверности методов РТБ, Ланга и фотоупругости, экспрессности исследований достигаются цифровой обработкой, основанной на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе экспериментального контраста дефектов структуры, представлением изображений дефектов структуры в виде трёхмерных графиков, областей равного контраста, построением профилей интенсивности, цветовым контрастированием.

2. Для метода РТБ эффективность идентификации дефектов структуры монокристаллов при цифровой обработке изображений, основанной на анализе яркостных характеристик, значительно выше, чем для метода Ланга, для которого она в сильной степени зависит от выбора отражающих плоскостей (порядка отражения). Для метода РТБ устранение сильной фоновой неоднородности экспериментального контраста топографических и поляризационно-оптических изображений эффективно достигается методом на основе высокочастотной фильтрации с предварительной обработкой нелинейным фильтром, а зернистости изображений – методом на основе фильтра с рекурсивным накоплением.

3. При определении природы микродефектов различных размеров в

кремнии можно, используя цифровую обработку экспериментального контраста, однозначно идентифицировать тип дефекта, более точно оценить их концентрацию и глубину залегания. Контраст, создаваемый крупными и мелкими микродефектами, идентичен, а интенсивность от ядра розетки к её краю убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Методом РТБ и последующей цифровой обработкой контраста выявляются микродефекты не только А-типа с размерами 20 – 50 мкм, но и В-типа с размерами 2 – 5 мкм.

4. Информация о скрытых деталях ближних и дальних полей деформаций от дефектов структуры монокристаллов, не регистрируемая ранее традиционным путём, может быть получена в пространстве вейвлет-коэффициентов при частотном анализе экспериментального контраста, полученного методами РТБ, Ланга и фотоупругости. Объём частотной информации вейвлет-разложения позволяет осуществить на уровне их спектров точное и эффективное разделение контраста розеток интенсивности от контраста зерна и фоновой неоднородности.

5. Полосовой низкочастотной фильтрацией и удалением частотной структуры зерна на выходе полосовых (НЧ) фильтров удаётся эффективно отделить спектр зерна от спектра розеток интенсивности и получить необходимую информацию о дефектах структуры монокристаллических полупроводников. Топографический контраст имеет сложную частотную структуру и в рамках вейвлет-преобразования изображение ключевых деталей розеток интенсивности занимает диапазон от самых низких до средних частот (уровней разложения). Контраст фонового зерна имеет диапазон от самых высоких до средних частот (уровней разложения). В области средних частот контраст зерна и дефектов структуры имеют широкую зону перекрытия, вследствие чего некоторые низкочастотные детали зерна сопоставимы по частоте и структуре со среднечастотными деталями дислокаций и их разделение на уровне спектров затруднительно.

6. Ключевые протяжённые детали дефектов структуры (розеток интенсивности) занимают последние уровни дискретной вейвлет-декомпозиции (самые низкие частоты), следовательно, их форма и «тонкая» структура деталей определяются аппроксимирующими свойствами вейвлет-базиса. Из группы наиболее распространённых вейвлет-базисов двумерного анализа, входящих в программный пакет «Matlab», наилучшими аппроксимирующими свойствами обладают вейвлеты с

максимальной гладкостью и длиной КИХ-фильтра – вейвлеты Коифлета, Симлета, Добеши и дискретный вейвлет Мейера. Эти вейвлет-функции накапливают незначительную ошибку аппроксимации на последних уровнях приближения и позволяют получить достоверную информацию о НЧ деталях контраста розеток. Вейвлет-функции малой гладкости менее пригодны для обработки топографического контраста, поскольку ошибка аппроксимации слишком велика и НЧ детали контраста претерпевают заметные искажения. Использование при обработке топографического контраста наиболее гладких вейвлет-базисов позволяет выявить дополнительные особенности контраста полей поверхностной релаксации от дислокаций, которые имеют гораздо более сложную структуру, чем это имело место при моделировании теоретического контраста, и обладают значительной протяжённостью, приводящей к образованию зон пересечений с соседними дислокациями.

7. Ключевые детали поляриционно-оптического контраста дефектов структуры занимают диапазон от самых высоких до средних частот (уровней вейвлет-декомпозиции) и содержатся в детализирующих вейвлет-коэффициентах. Фоновая неоднородность поляриционно-оптических и топографических снимков занимает наиболее низкие частоты и легко отделима от частотной полосы дефектов структуры при реконструкции изображений обнулением масштабных вейвлет-коэффициентов, что позволяет выявить информацию о дефектах структуры в областях полного почернения (засветки). Детали поляриционно-оптического контраста имеют многоуровневую структуру, на каждом уровне которой наиболее выражены детали соответствующей протяжённости, и в рамках предложенной вейвлет-обработки могут быть чётко выявлены при использовании постепенно сужающейся полосы ВЧ фильтра. В итоге получается набор отдельных изображений для высокочастотных и среднечастотных деталей контраста.

8. Для методов РТБ, Ланга и фотоупругости объём полезной информации о дефектах структуры и основных особенностях их экспериментального контраста в значительной степени зависит от масштаба (размера) изображения, подвергаемого вейвлет-обработке. Изменяя масштаб изображения (число отсчётов для одного и того же сигнала), смещаем полосы частот дефектов структуры и негативных факторов изображения относительно друг друга, получая дополнительную информацию, ранее скрытую на низких частотах. То же

самое происходит в случае вырезания отдельных фрагментов из целого изображения. В этом случае уменьшается общая длина сигнала, характеризующая изображение фрагмента, а значит, увеличивается протяжённость деталей фрагмента относительно новой длины сигнала. Проводя вейвлет-обработку изображения отдельного или небольшой группы дефектов, смещаем частоты розеток и с большей эффективностью выделяем дополнительную информацию, скрытую ранее на низких частотах.

9. HDR-изображения (32-битный формат) содержат значительно больше качественной и количественной информации о дефектах структуры. Вейвлет-обработка HDR-изображений, включая разделение по цветовым каналам, более полно выявляет «тонкую» структуру розеток интенсивности по сравнению с 8- и 16-битными изображениями и повышает надёжность идентификации дефектов структуры монокристаллических полупроводников.

Апробация работы. Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Международном семинаре «Полупроводниковый карбид кремния и приборы на его основе», Новгород, 1995;
2. Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов РСНЭ'97. – Москва - Дубна, 1997;
3. III международном семинаре ISSCRM - 2000. – Великий Новгород. 2000;
4. III Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов РСНЭ-2001, – Москва, ИК РАН. 2001;
5. Международном научном семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных (рентгенотопография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», – Великий Новгород, 18 – 20 ноября 2002 г.;
6. Третьей Российской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на его основе («Кремний-2003»), 26 – 30 мая 2003 г., – Москва, МИСиС. 2003 г.;
7. V International seminar on silicon carbide and related materials. Velikiy Novgorod. 2004;
8. 4 национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов РСНЭ-2003, –

Москва, ИК РАН. 2003 г.;

9. Втором научном семинаре с международным участием «Современные методы анализа дифракционных данных (рентгенотопография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», – Великий Новгород, 26 – 28 мая 2004 г.;

10. 2-га Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. Матеріали конференції. – Чернівці: Рута, 2004;

11. Пятой Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования наноматериалов и наносистем (РСНЭ НАНО-2005). – Москва, ИК РАН, 2005 г.;

12. Третьем международном научном семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных (рентгенотопография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», – Великий Новгород, 22 – 25 мая 2006 г.;

13. III Международной конференции по физике кристаллов «КРИСТАЛЛОФИЗИКА XXI века», – Черногоровка, 20 – 26 ноября 2006 г.;

14. Первой международной научной школе-семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных (рентгенотопография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», – Великий Новгород, 21 – 25 мая 2007 г.;

15. Российском симпозиуме «Космическое материаловедение» – 2007 г. (КМ–2007), – Калуга, 28 мая – 1 июня 2007 г.

16. Ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов НовГУ им. Ярослава Мудрого, – Великий Новгород;

17. Научных семинарах Отделения физики диэлектриков и полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, – Санкт-Петербург, 2000 – 2007 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 68 работ, из них 27 в академических журналах и журналах, рекомендованных ВАК, остальные представляют собой расширенные тезисы докладов, издано 5 научных монографий. Перечень основных публикаций приведён в заключении.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, содержащего 218 наименований и приложения. Объём диссертации составляет 495 страниц, включая 125 рисунков на 159 страницах, 31 таблицу на 41 странице, 34 листинга программ.

Краткое содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационного

исследования, сформулирована цель работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена рассмотрению основных топографических методов и поляризационно-оптического анализа, применяемых для регистрации дефектов структуры монокристаллических полупроводников и определения их физической природы. Отмечается перспективность метода РТБ и его розеточных методик при исследовании малодислокационных и бездислокационных материалов, а поляризационно-оптического анализа для исследования карбида кремния. Выделены проблемы, связанные с анализом экспериментального контраста, которые в значительной степени затрудняют расшифровку экспериментального контраста и надёжную идентификацию дефектов структуры монокристаллических полупроводников, – дефекты фотоэмульсии, слабая контрастность, фоновая неоднородность и зернистость изображений. Действие этих факторов приводит к потере части информации о структурном совершенстве исследуемых материалов и снижает объективность оценки их качества. Как эффективный способ устранения перечисленных выше факторов, а также повышения экспрессности исследований и информативности топографических и оптических методов диагностики, предлагается применить цифровую обработку экспериментального контраста. Рассматривается программно-аппаратная организация цифровой обработки изображений, обосновывается выбор персонального компьютера, монитора, оцифровывающей и записывающей аппаратуры, отмечаются особенности различного программного обеспечения. Рассмотрены теоретические основы методов обработки изображений, применяемых в данной работе (линейная и нелинейная фильтрация), а также основы вейвлет-анализа сигналов и изображений, включая непрерывное вейвлет-преобразование, вейвлет-ряды, кратно-масштабный и построенный на его основе дискретный анализ. Показано преимущество дискретного вейвлет-анализа, как наиболее перспективного и относительно просто реализуемого на практике метода анализа сложных двухмерных сигналов. Представлено обоснование выбора вейвлет-анализа и его сравнение с другими методами частотного анализа изображений, распространёнными в прикладной науке и технике. Выделены основные задачи обработки экспериментального контраста. На основании проведённого анализа сделаны выводы и поставлены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассматриваются наиболее перспективные апробированные

методы и программы цифровой обработки изображений со слабой контрастностью, высокой фоновой неоднородностью и зернистостью, основанные на анализе яркостных характеристик экспериментального контраста. Все методы обработки применялись к большому количеству топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры полупроводников, что позволяет объективно оценить достоинства и недостатки каждого метода, сравнить их эффективность и надёжность регистрации и идентификации дефектов структуры различного типа. Для всех методов приводятся разработанные тексты программ, предназначенные для выполнения в математическом пакете Matlab с параметрами, при которых были получены обработанные изображения.

Для устранения неравномерного фона и слабого контраста предлагается семь методов, применение которых на практике оказалось наиболее эффективным.

Первый метод основан на оценке среднего значения фона в различных областях изображения и вычитании его из исходного изображения разбиением на равные блоки. Этот метод наиболее перспективен для обработки топографических изображений, слабо подверженных фоновой неоднородности (рис.1,д). Достоинство метода – высокая скорость обработки, отсутствие высокочастотной фильтрации, приводящей к усилению зернистости, простота учёта изменений элементов изображения. Недостатком метода является низкая эффективность при обработке изображений с высокой фоновой неоднородностью и необходимость для получения высоких результатов использования малого размера блока, что приводит к потере медленно меняющихся деталей изображений.

Второй метод основан на прямом изменении амплитудного спектра изображения путём удаления из него гармоник, амплитуда которых больше некоторого значения. Этот метод применим для обработки топографических изображений, слабо подверженных фоновой неоднородности и в случае, если детали изображения имеют большую протяжённость (длинные лепестки розеток). Отличительной особенностью изображений, обработанных данным методом, является наличие искажений вследствие явления Гиббса (рис.1,е). С одной стороны, это является недостатком, поскольку дополнительный узор мешает анализу изображения, а с другой стороны – достоинством, поскольку происходит усиление деталей изображения, содержащего перепады яркости.

В третьем и четвёртом методах используются высокочастотная

фильтрация с предварительным логарифмированием или экспоненцированием изображения. Обладая высокой скоростью обработки, эти методы могут эффективно применяться для предварительного анализа экспериментального контраста. **Третий метод** позволяет выявить детали, скрытые в тёмных областях исходного изображения, и его применение наиболее целесообразно для обработки изображений с высокой фоновой неоднородностью и невысокой зернистостью фотоэмульсии (рис.1,з). **Четвёртый метод** позволяет выявить детали, скрытые в светлых областях исходного изображения, и его применение наиболее целесообразно для обработки изображений с высокой фоновой неоднородностью и невысокой зернистостью фотоэмульсии (рис.1,в).

В пятом методе используется высокочастотная фильтрация, однако основу метода составляет предварительная обработка изображения нелинейным фильтром. Этот метод позволяет одновременно выявлять детали изображения на топограмме и фотоплёнке с высокой фоновой неоднородностью и невысокой зернистостью фотоэмульсии, скрытые как в тёмных, так и в светлых областях, но при этом скорость обработки меньше, чем в третьем и четвёртом методах (рис.1,б). Анализ результатов обработки показывает наибольшую перспективность применения метода, основанного на нелинейном усилении и высокочастотной фильтрации, для выявления изображений дефектов структуры, невидимых до обработки.

Шестой метод основан на оценке среднего значения фона в различных областях изображения и вычитании его из исходного изображения с помощью фильтрации. Этот метод отличается от первого тем, что оценка фона проводится не путём разбивания исходного изображения на равные блоки, примыкающие друг к другу, а с помощью фильтрации. В отличие от ранее рассмотренных методов устранения фоновой неоднородности этот обладает большей экспрессностью и требует значительно меньше времени на обработку контраста для получения приличных по качеству обработанных изображений.

Седьмой метод основан на использовании гаусс-размытия и получении разностного контраста между размытым и исходным изображениями, например, в программе «Image-Pro Plus». Данный способ обработки можно рекомендовать для изображений с различной фоновой неоднородностью, но при этом необходимо подбирать оптимальное гаусс-размытие. На практике радиус гаусс-размытия составлял 4–100 пикселей. Качество изображений, обработанных шестым и седьмым

методами, несколько выше, чем представленное на рис. 1, *д* и *е*.

Для устранения зернистости топографических изображений после апробирования предлагается четыре наиболее эффективных метода.

Первый метод основан на прямом изменении амплитудного спектра изображения и линейной низкочастотной фильтрации. Преимуществом линейной фильтрации является независимость линейных искажений, вносимых работой фильтра, от яркости элементов изображения, что приводит к одинаковому изменению всех деталей контраста.

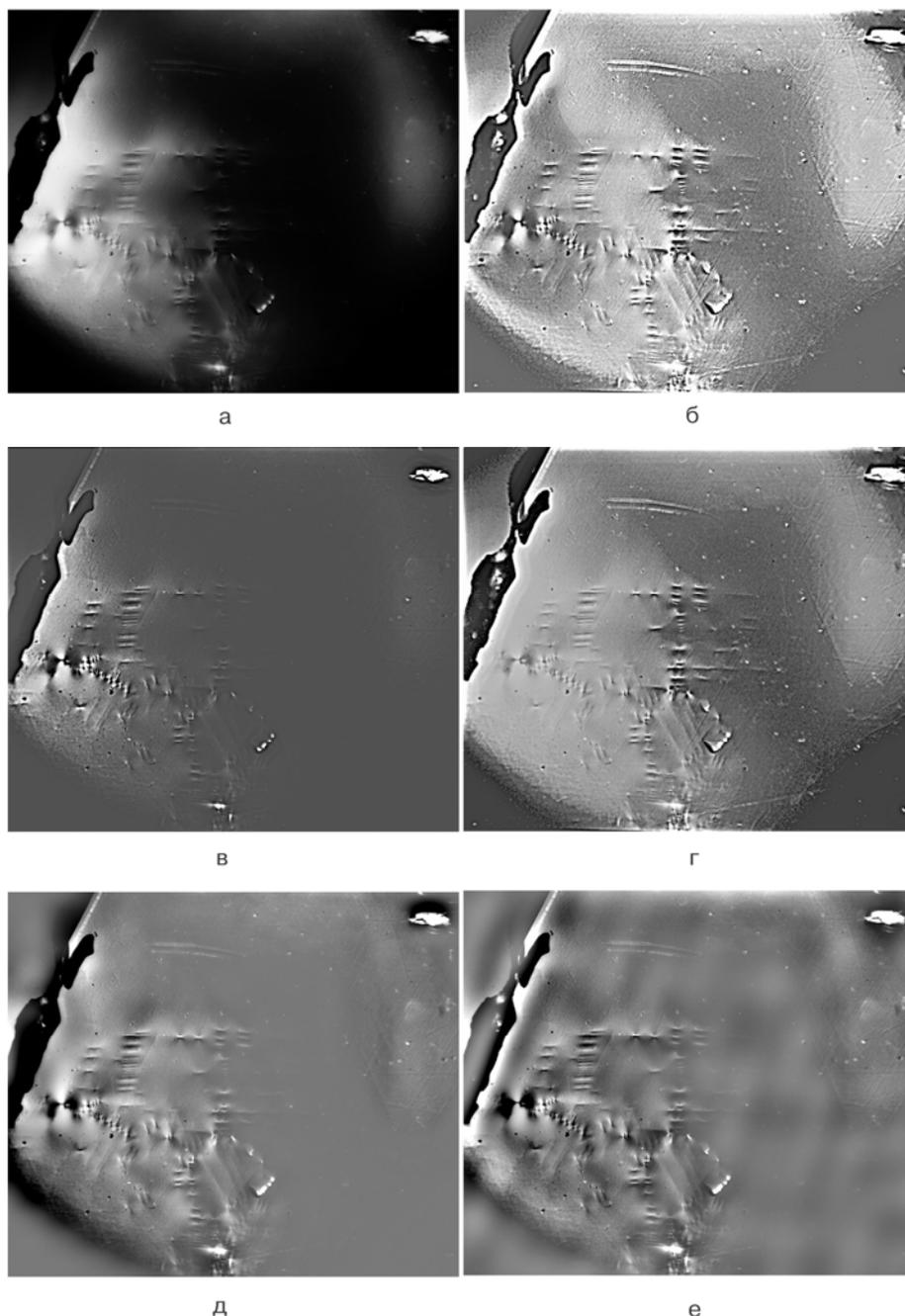


Рисунок 1. Устранение неравномерности фона на примере поляризационно-оптического изображения монокристалла 6H-SiC: *а* – исходное; *б* –

высокочастотная фильтрация с предварительным нелинейным усилением; *в* – высокочастотная фильтрация с предварительным экспоненцированием изображения; *г* – высокочастотная фильтрация с предварительным логарифмированием изображения; *д* – вычитание среднего значения фона; *е* – удаление из спектра изображения низкочастотных гармоник.

Второй метод основан на усреднении зерна с порогом и прямом изменении амплитудного спектра изображения путём удаления из него гармоник, амплитуда которых меньше некоторого значения. Принцип действия этого нелинейного нерекурсивного фильтра основан на распознавании в обрабатываемом изображении областей сигнала и шума по отличию их средних значений. Этот метод применяется при локальной обработке областей изображения для выявления дополнительных особенностей экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры.

В третьем методе применена фильтрация изображения нелинейным нерекурсивным фильтром. Принцип действия фильтра основан на распознавании в обрабатываемом изображении областей сигнала и шума по отличию их средних значений с последующей низкочастотной фильтрацией области шума при сохранении неизменной области сигнала. Этот метод применяется, если возникает необходимость в обработке изображения с целью уменьшения шума при практически полном сохранении закона изменения контраста, формируемого дефектами структуры.

В четвёртом методе применена фильтрация изображения нелинейным рекурсивным фильтром. Принцип действия фильтра основан на распознавании в изображении областей сигнала и шума по отличию их средних значений, что позволяет провести усиление сигнала и ослабление шума путём рекурсивного накопления с различными весовыми коэффициентами для сигнала и шума. Этот метод обладает наибольшей эффективностью подавления зернистости и усиления контраста (рис. 2).

В третьей главе рассматривается применение цифровой обработки, основанной на анализе яркостных характеристик, для расшифровки экспериментального контраста и идентификации дефектов различного типа в SiC, GaAs и Si (винтовых и краевых дислокаций, микродефектов). Для идентификации дефектов структуры и их локализации в объёме монокристалла использовались рассмотренные выше методы, размытие изображений (линейная низкочастотная

фильтрация), цветовое контрастирование, представление дефекта в виде трёхмерных графиков, областей равного контраста и построение профилей интенсивности.

При цифровой обработке экспериментального контраста, содержащего изображения краевых и винтовых дислокаций, удаётся выявить особенности, не

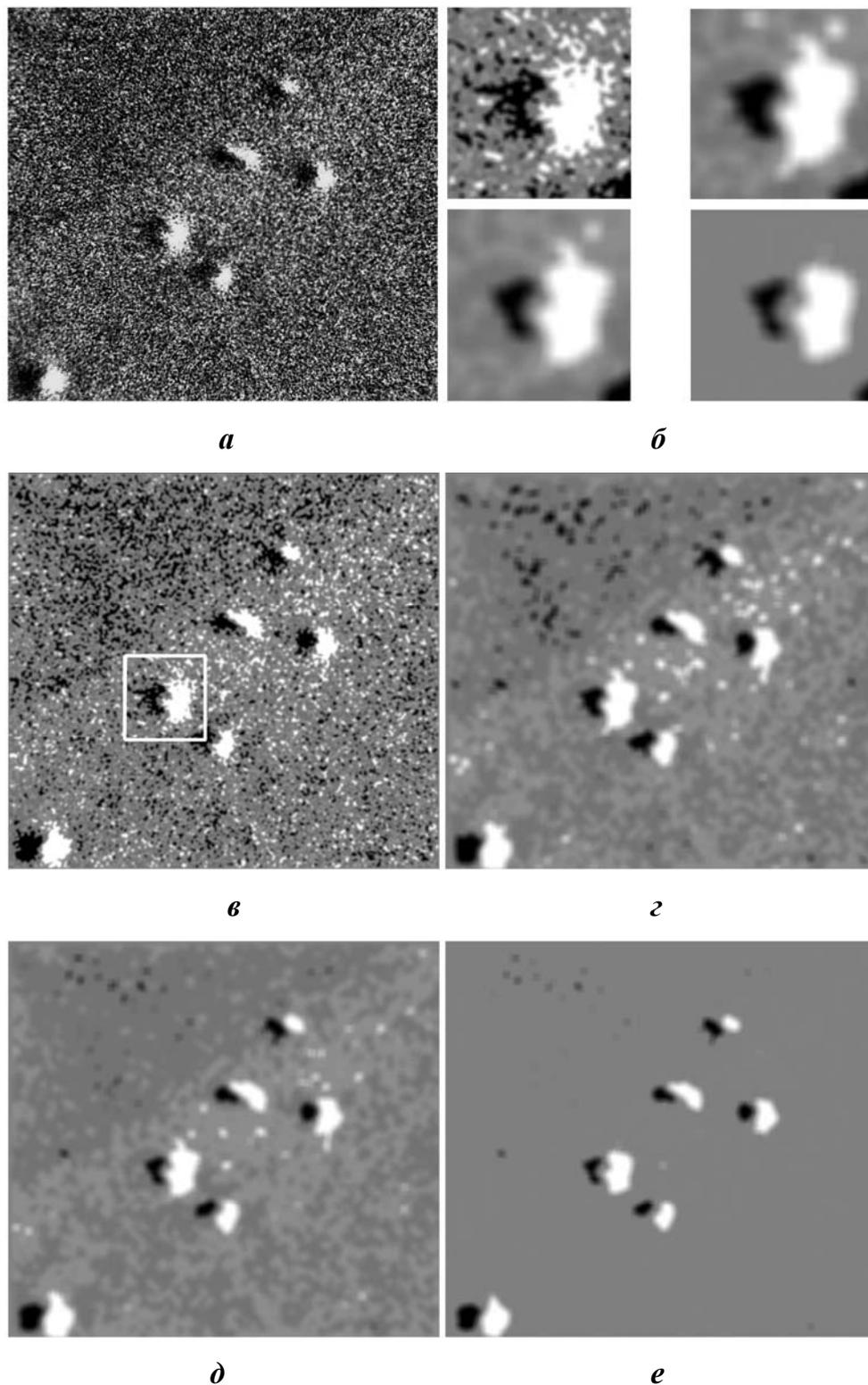


Рисунок 2. Исходное (а) и обработанные фильтрацией нелинейным рекурсивным фильтром (в – е) топографические изображения монокристалла 6H-SiC.

регистрируемые традиционным способом. Для винтовых дислокаций выявляется более сложная структура розеток, связанная с наличием дополнительных лепестков (шесть вместо двух, рис.3, 1). Для краевых дислокаций надёжно выявляется асимметрия лепестков розеток (рис.3, 2), а для поляризационно-оптических изображений краевых дислокаций наличие дополнительных лепестков (10 вместо 6) и соответствие поляризационно-оптического изображения топографическому.

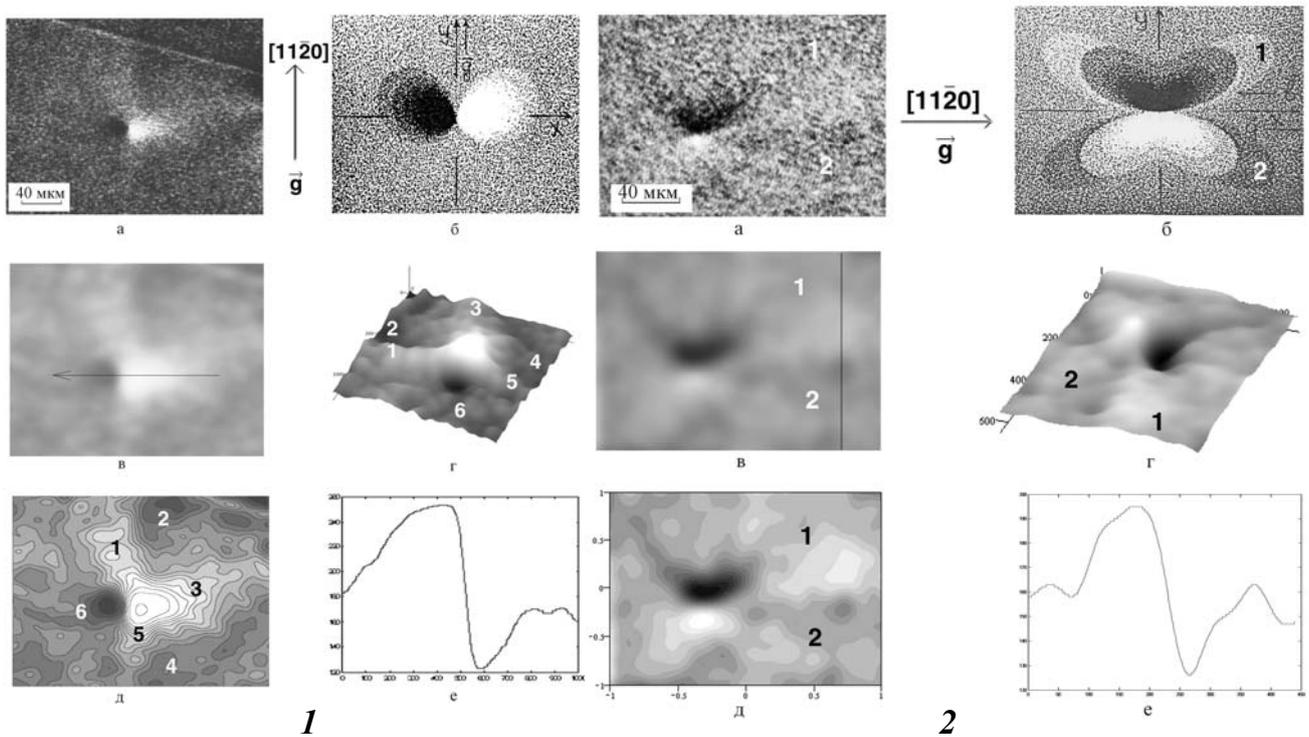


Рисунок 3. Экспериментальная и теоретическая розетки интенсивности от винтовой (1) и краевой (2) дислокаций в монокристалле 6H-SiC, а также результат их цифровой обработки и различного представления.

При определении в кремнии, выращенном по Чохральскому, природы микродефектов, имеющих различные размеры, цифровая обработка экспериментального контраста позволила однозначно идентифицировать тип дефектов, более точно оценить их концентрацию и глубину залегания. Установлено, что контраст, создаваемый крупными и мелкими микродефектами, идентичен, и интенсивность от ядра розетки к её краю убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, что хорошо соответствует теоретическим расчётам.

Показано, что методом РТБ при цифровой обработке контраста выявляются микродефекты не только А-типа с размерами 20 – 50 мкм, но и В-типа с размерами 2 – 5 мкм, которые ранее регистрировались только электронной микроскопией (рис. 4). При цифровой обработке микродефектов, благодаря цветовому контрастированию и

выявлению дополнительных лепестков, удаётся более точно локализовать микродефект по глубине и по поверхности образца.

При сравнении информативности топографических методов показана более высокая эффективность цифровой обработки изображений дефектов, выявленных методом РТБ и его розеточной методикой, по сравнению с методом Ланга. Установлено, что при идентификации дефектов, зарегистрированных по методу Ланга, эффективность цифровой обработки изображений сильно зависит от выбора отражающих плоскостей (порядка отражения).

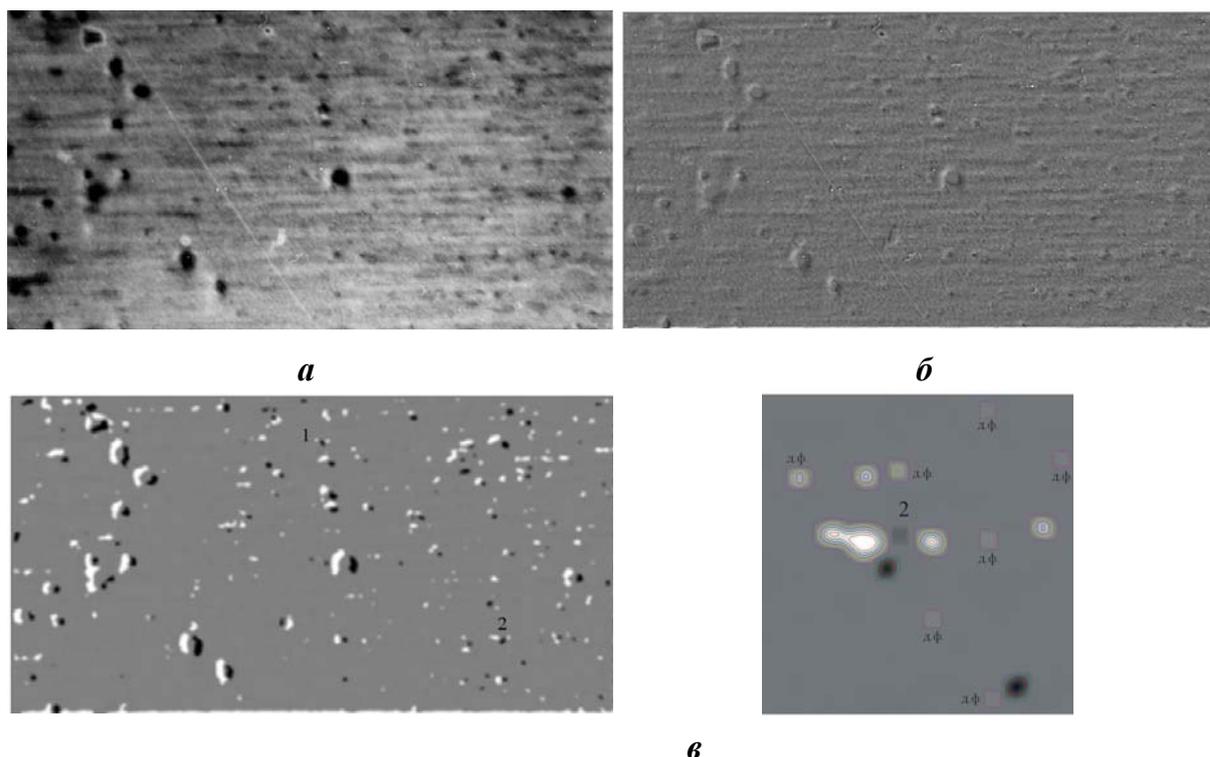


Рисунок 4. Фрагмент топограммы Si и результат его цифровой обработки: **а** – исходный контраст; **б** – после устранения фоновой неоднородности; **в** – после устранения зернистости фильтром с рекурсивным накоплением (слева) и построения линий равного контраста (справа) для дефекта, обозначенного цифрой 2.

Дефекты фотоэмульсии после цифровой обработки имеют отличное от дефектов структуры распределение интенсивности и вид линий равного контраста, поэтому могут быть надёжно выявлены и учтены (обозначены буквами **д.ф.**, рис. 4, **в**).

В четвёртой главе поэтапно представлена разработанная методика вейвлет-обработки топографического контраста, полученного по методу РТБ, и направленная на устранение зернистости (гранулярности) изображений. В начале главы детально анализируется частотный спектр экспериментальных изображений, представляющий собой последовательность коэффициентов вейвлет-разложения, содержащих информацию о дефектах структуры и зерне. В результате дискретного вейвлет-

преобразования получаем два вида коэффициентов:

- масштабные коэффициенты (коэффициенты аппроксимации), несущие информацию о низкочастотной составляющей изображения – грубой аппроксимации изображения при разных масштабах (уровнях) его представления;

- детализирующие (детальные) коэффициенты, несущие информацию о высокочастотной составляющей изображения – мелких деталях контраста на анализируемых масштабах (уровнях). В случае изображения (двухмерного сигнала) имеем набор из трёх видов детальных коэффициентов: горизонтальных, вертикальных и диагональных, передающих частоты деталей, ориентированных в указанных направлениях.

В ходе вейвлет-анализа установлено, что ключевые детали дальнего поля дислокаций (розеток) занимают низкие и средние частоты (уровни) вейвлет-разложения, а детали ближнего поля достигают высоких частот – верхних уровней разложения. При этом самые протяжённые детали розеток интенсивности находятся на самых низких частотах, на которых ухудшается пространственное разрешение вейвлет-анализа. Детали контраста от зерна располагаются в диапазоне от высоких до средних частот (уровней разложения). Спектры зерна и розеток имеют широкую зону перекрытия в области средних частот, в которой низкочастотные детали зерна и среднечастотные (и высокочастотные) детали изображения дефектов на уровне вейвлет-коэффициентов неотличимы друг от друга. Большая часть информации о зерне содержится в детальных коэффициентах декомпозиции. Прямое изменение, т.е. удаление по определённому порогу детальных коэффициентов на верхних и средних уровнях вейвлет-разложения с целью удаления контраста зерна, приводит к значительным искажениям контраста розеток в результате последующей реконструкции и неприемлемо для целей обработки. Нужный результат достигается путём последовательной реконструкции определённого набора нижних и средних уровней коэффициентов. В результате получается НЧ (низкочастотная) или полосовая фильтрация детальных коэффициентов, при которой на первом этапе удаётся отделить спектры зерна и розеток. Число и диапазон уровней, участвующих в реконструкции, определяет полосу пропускания НЧ фильтра. Следующим этапом обработки является нелинейная фильтрация, отсекающая полученные коэффициенты реконструкции по определённому порогу. Величина порогов находится в результате НЧ фильтрации опорной области исходного изображения, которая не должна содержать контраст от дефектов структуры. Конечным этапом обработки является объединение результатов нелинейной фильтрации для разных полос НЧ фильтра в

единое результирующее изображение. В итоге формируется конечный (окончательный) алгоритм вейвлет-обработки, позволяющий устранить зернистость экспериментального контраста и выявить тонкие особенности ближних и дальних полей розеток интенсивности. Обобщённая схема алгоритма представлена на рис. 5.

В главе проведено сравнение результатов вейвлет-обработки для различных масштабов представления изображений дефектов структуры (розеток интенсивности). В случае более крупного масштаба представления дефектов выявляется ряд дополнительных деталей изображения, не выявляемых в случае обработки полного снимка (см. таблица 1), это повышает в целом надёжность их идентификации.

Приведён сравнительный анализ эффективности цифровой обработки при использовании различных вейвлет-базисов, применяемых для анализа двухмерных сигналов, и определены основные требования к ним. Оптимальными оказались вейвлет-базисы с максимальной гладкостью функции и длиной КИХ-фильтра, т.к. они обладают наилучшим пространственным разрешением на низких частотах анализа. Результаты обработки для трёх наиболее оптимальных вейвлет-базисов при различных масштабах топографического изображения приведены в таблице 1.

В конце главы сравнивается эффективность вейвлет-обработки и ранее использованных методов цифровой обработки этих же топографических изображений при использовании линейной и нелинейной фильтрации. Показано, что вейвлет-обработка выявляет больше особенностей экспериментального контраста дефектов структуры, позволяет сохранить закон распределения интенсивности розеток в отличие от ранее применяемых нелинейных фильтров, которые приводят к бинаризации изображения и потере низкочастотной информации о дефекте.

Для основных типов дефектов структуры проведена цифровая обработка различными вейвлет-базисами теоретического контраста (бинарно-точечного и при 64 градациях серого цвета) на предмет анализа возможных искажений и изменений. Бинарно-точечный контраст в данном случае являлся и контрастом, «моделирующим» зернистость изображений. Результат вейвлет-обработки, представленный в качестве примера в таблице 2 для краевой дислокации, свидетельствует об отсутствии видимых искажений теоретического контраста и хорошем соответствии с изображением краевой дислокации при 64 градациях серого цвета и экспериментальными результатами. В таблице 3 приведены примеры вейвлет-обработки топографических изображений дефектов. В заключение главы делается вывод об основных преимуществах и ограничениях дискретного вейвлет-анализа.

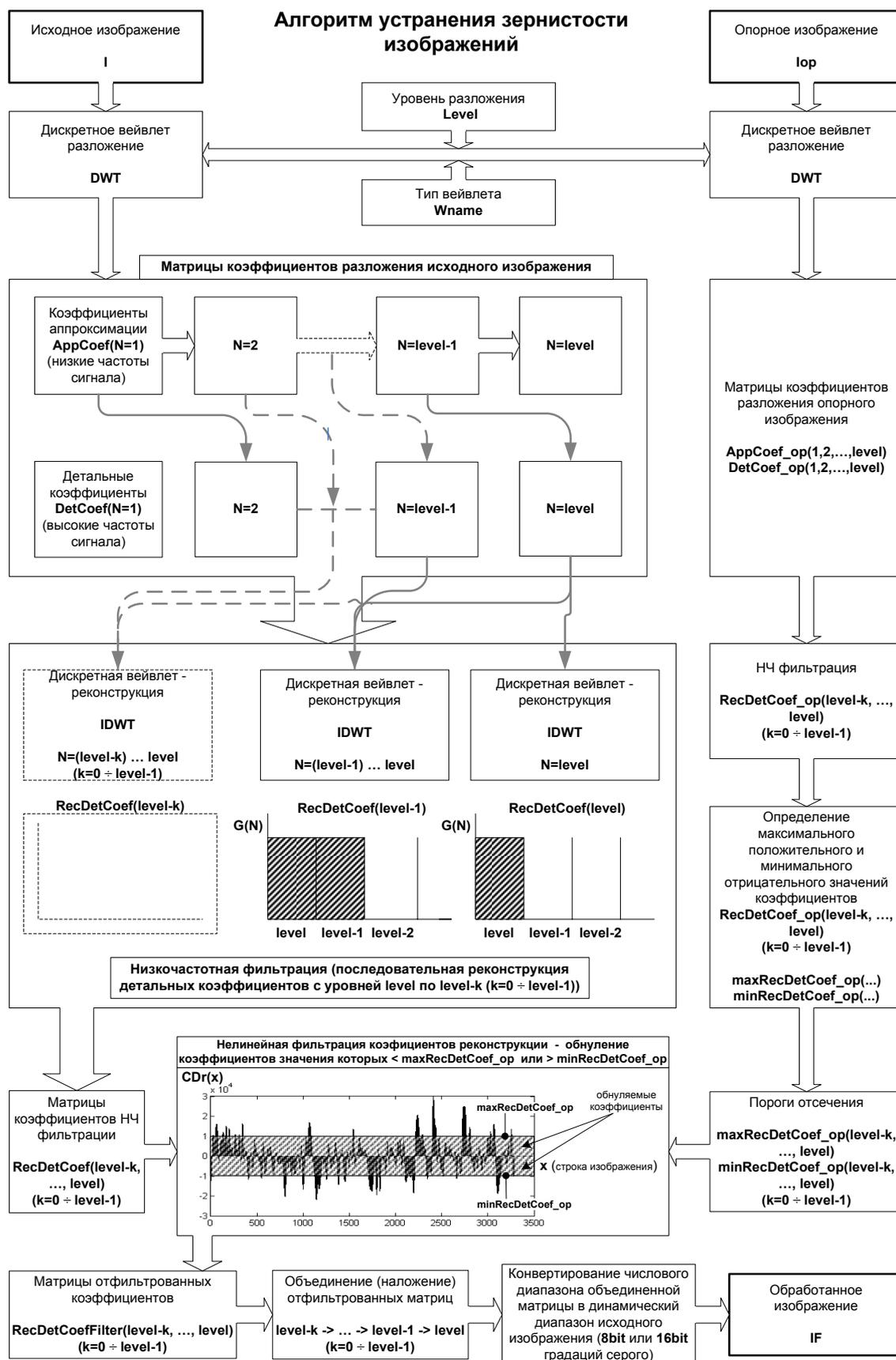


Рисунок 5. Схема алгоритма устранения зернистости дифракционного контраста, основанного на дискретном вейвлет-анализе.

Таблица 1.

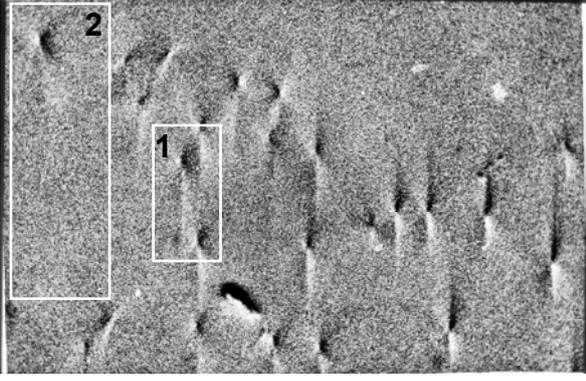
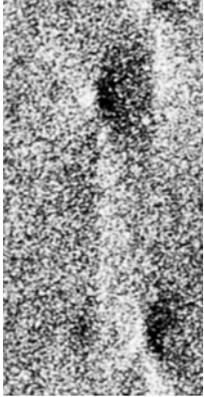
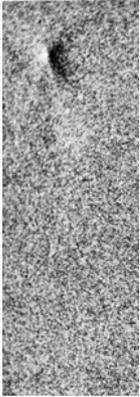
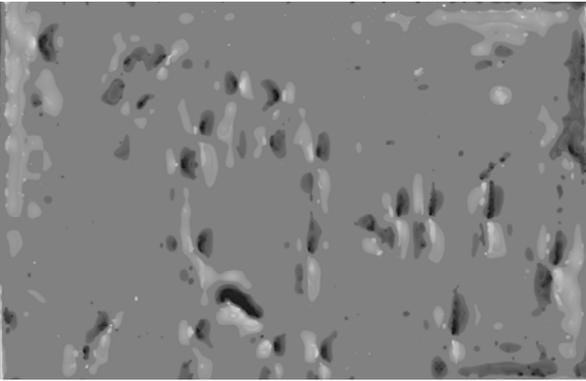
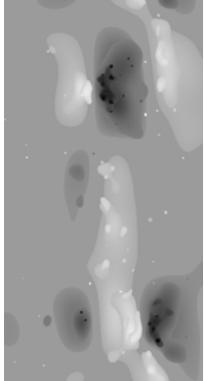
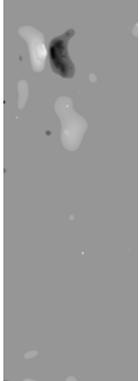
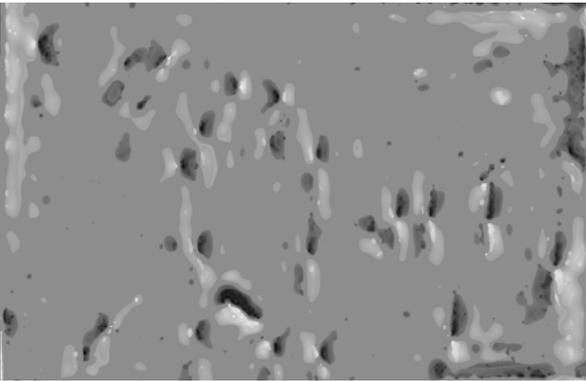
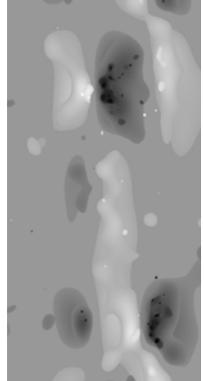
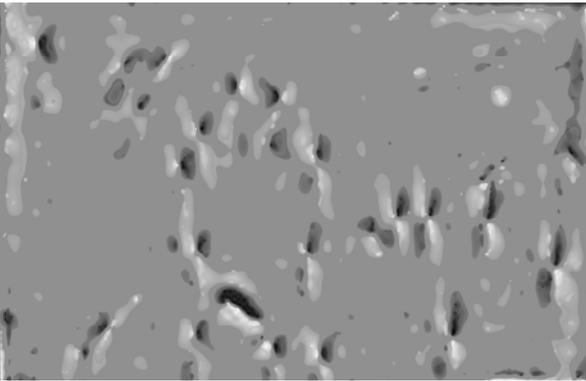
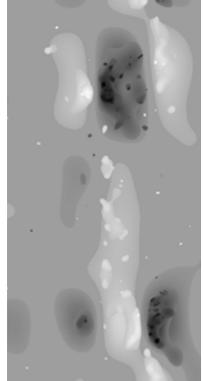
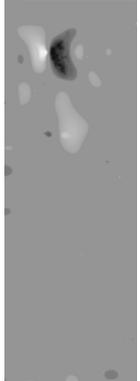
Тип используемого вейвлет-базиса	Вейвлет-обработка рентгенотопограммы, полученной по методу РТБ (АПРЛ) для монокристалла 6H-SiC	Вейвлет-обработка фрагментов топограммы с изображением отдельных (групп) дислокаций	
		группа дислокаций 1	дислокация 2
Исходное изображение			
Вейвлет Коифлета с гладкостью функции 10			
Вейвлет Добеши с гладкостью функции 10			
Дискретный вейвлет Мейера			

Таблица 2.

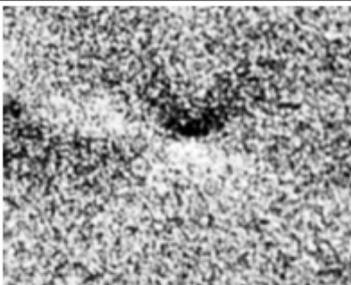
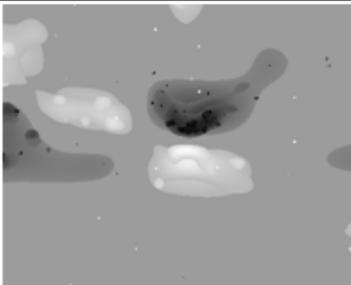
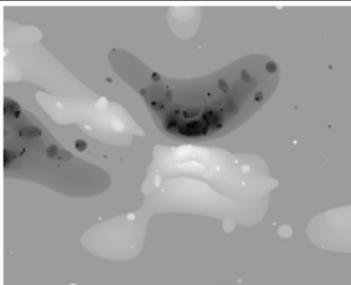
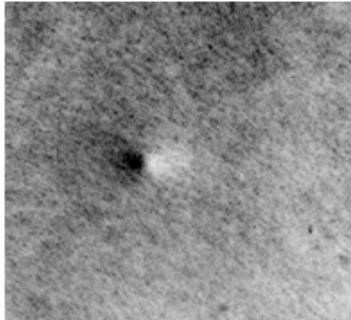
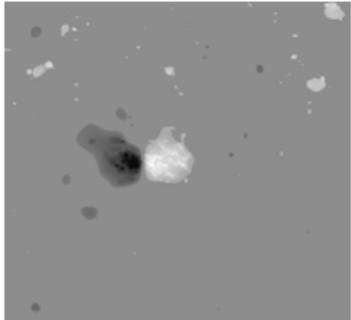
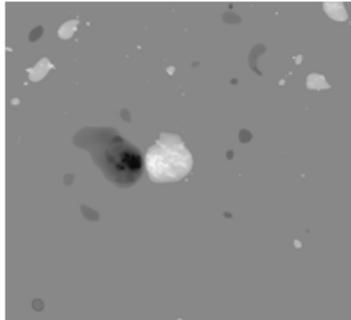
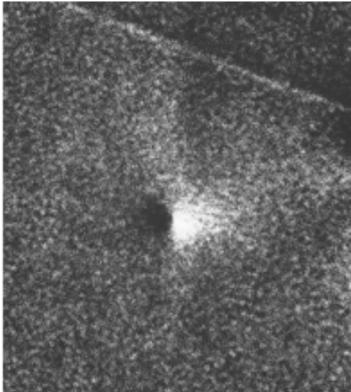
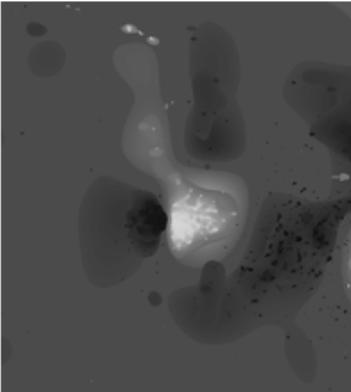
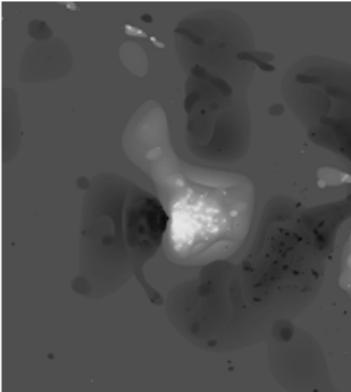
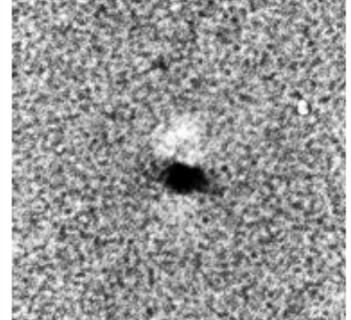
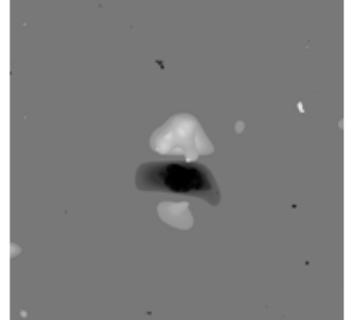
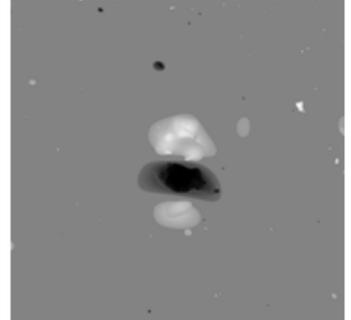
Тип изображения (теоретический или обработанный контраст)	Общий размер (масштаб) топограммы, мкм		
	200	400	600
Смоделирован - ный контраст в бинарно - точечном (зернистом) варианте			
Смоделирован - ный контраст в варианте 64 градаций серого			
Обработка точечного теоретического контраста с применением вейвлета Симплета с масштабом функции 8 (sym8)	Параметры полос пропускания НЧ фильтра, используемых для обработки		
	снизу – 9, сверху – 3+6 уровень	снизу – 8, сверху – 3+5 уровень	снизу – 7, сверху – 3+5 уровень
Обработка точечного теоретического контраста с применением дискретного вейвлета Мейера (dmeу)	снизу – 9, сверху – 3+5 уровень	снизу – 8, сверху – 3+5 уровень	снизу – 8, сверху – 3+5 уровень

Результаты устранения «моделируемой» зернистости теоретического контраста от краевой дислокации в монокристалле 6H-SiC в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 5 (дислокация системы скольжения $\{1\bar{1}00\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$, с учётом поля поверхностной релаксации).

В пятой главе рассматривается разработанная методика вейвлет-обработки поляризационно-оптического контраста, направленная на устранение слабого контраста и фоновой неоднородности изображений.

В начале главы приводится детальный анализ частотного вейвлет-спектра

Таблица 3.

Тип дефектов наблюдаемый на <u>топограмме</u>	Исходное изображение	Результаты <u>вейвлет-обработки</u>	
		<u>sym8</u>	<u>dmev</u>
		Параметры полос пропускания НЧ фильтра, используемых для обработки	
Краевая дислокация с полем поверхностной релаксации	441x361 пиксель	снизу – 9, сверху – 3+7 уровень	снизу – 9, сверху – 3+7 уровень
			
Правовинтовая дислокация	1578x1482 пиксель	снизу – 10+9, сверху – 4+7 уровень	снизу – 10+9, сверху – 4+7 уровень
			
Правовинтовая дислокация	1800x2016 пиксель	снизу – 10, сверху – 3+9 уровень	снизу – 10, сверху – 4+9 уровень
			
Когерентное включение типа «вакансия»	1704x1656 пиксель	снизу – 10, сверху – 3+8 уровень	снизу – 10, сверху – 3+8 уровень
			

Результаты устранения зернистости экспериментального контраста от дислокаций и микродефектов в монокристалле 6H-SiC (в соответствии с алгоритмом на рис. 5).

экспериментальных изображений, содержащего информацию о дефектах структуры и фоновой неоднородности. Показано, что контраст фоновой неоднородности в полном объёме передаётся масштабными коэффициентами нижних и средних уровней вейвлет-разложения. Контраст розеток интенсивности полностью передаётся детализирующими коэффициентами верхних и средних уровней разложения, т.е. укладывается в диапазон от высоких до средних частот.

На первом этапе обработки проводится разделение информационного спектра от шумового, т.е. разделение контрастов розеток и фоновой неоднородности. Эффективного устранения контраста фоновой неоднородности удаётся достичь путём удаления (обнуления) масштабных коэффициентов на этапе реконструкции. При этом в реконструкции участвуют только детализирующие коэффициенты определённого набора верхних уровней разложения. В этом случае имеет место ВЧ (высокочастотная) фильтрация детальных вейвлет-коэффициентов, которая позволяет выявить тонкие особенности деталей розеток на разных частотах. Диапазон уровней, участвующих в реконструкции, формирует полосу пропускания ВЧ фильтра. Постепенно сужая полосу пропускания ВЧ фильтра, получаем для каждой полосы отдельное изображение с чётко выраженными высокочастотными или среднечастотными (в зависимости от полосы) деталями розеток. Высокочастотные детали передаются на верхних уровнях большими значениями детальных коэффициентов. Амплитуда коэффициентов низкочастотных деталей на этих уровнях несопоставимо меньше. В результате чего можно совмещать в области детальных коэффициентов различные участки изображений, предварительно усилив в них высокочастотный контраст. Усиление высокочастотных деталей указанных участков достигается путём нелинейного преобразования их гистограммы, направленной на усиление контрастности участков. В дальнейшем происходит объединение детальных коэффициентов исходного и усиленного участков, в ходе которого большие по амплитуде коэффициенты заменяют меньшие по амплитуде. В результате происходит замена прежних низкочастотных деталей участка новым усиленным высокочастотным контрастом. На конечном этапе обработки происходит ВЧ фильтрация объединённых коэффициентов.

В итоге разработан алгоритм вейвлет-обработки (рис. 6), позволяющий устранить фоновую неоднородность изображения и совместить между собой его отдельные участки, различающиеся степенью усиления контрастности.

Для оптимизации предложенного алгоритма устранения фоновой неоднородности выполнен ряд дополнительных исследований.

1. Проведён анализ эффективности работы алгоритма для различных масштабов представления поляризионно-оптических розеток (отдельных фрагментов исходного изображения). В таблице 4 приведены результаты вейвлет-обработки изображения для разных полос пропускания ВЧ фильтра при различных масштабах изображения дефектов. При обработке большого (обзорного) изображения использовалось предварительное усиление контрастности отдельно для затемнённого и засвеченного участков снимка, и затем в ходе обработки усиленные участки «сшивались» между собой.

2. Исследовано влияние различных вейвлет-базисов на результат цифровой обработки и определены основные требования к их параметрам и свойствам. В случае фоновой неоднородности требования к вейвлет-базису менее жесткие по сравнению с устранением зернистости изображений. Удовлетворительных результатов обработки удаётся достичь с применением базисов средней гладкости.

3. Показано, что информативность результатов вейвлет-обработки можно повысить за счёт использования более высокого яркостного разрешения (количество градаций серого) при оцифровке поляризионно-оптических изображений.

В конце главы проводится сопоставление эффективности вейвлет-обработки по сравнению с ранее апробированными методами цифровой обработки этих же изображений при использовании линейной и нелинейной фильтрации. В заключение делается вывод об основных преимуществах и ограничениях дискретного вейвлет-анализа для обработки поляризионно-оптического контраста.

В шестой главе рассматривается получение и вейвлет-обработка топографических HDR-изображений, т.е. изображений с расширенным динамическим диапазоном (32-битных). Проводится сравнение и анализ эффективности вейвлет-обработки 8-, 16- и 32-битных изображений. Показано, что HDR-изображения содержат больше полезной информации об экспериментальном контрасте, более соответствуют теоретическому контрасту и позволяют выявить при вейвлет-обработке дополнительную информацию о «тонкой» структуре лепестков розеток интенсивности, ранее плохо выявляемую на 8- и 16-битных изображениях (рис. 7 и 8). Обработка проводилась с учётом всех приемлемых полос пропускания фильтра, но для иллюстрации проделанной работы приводится полоса, ограниченная 4 уровнем

Алгоритм устранения фоновой неоднородности

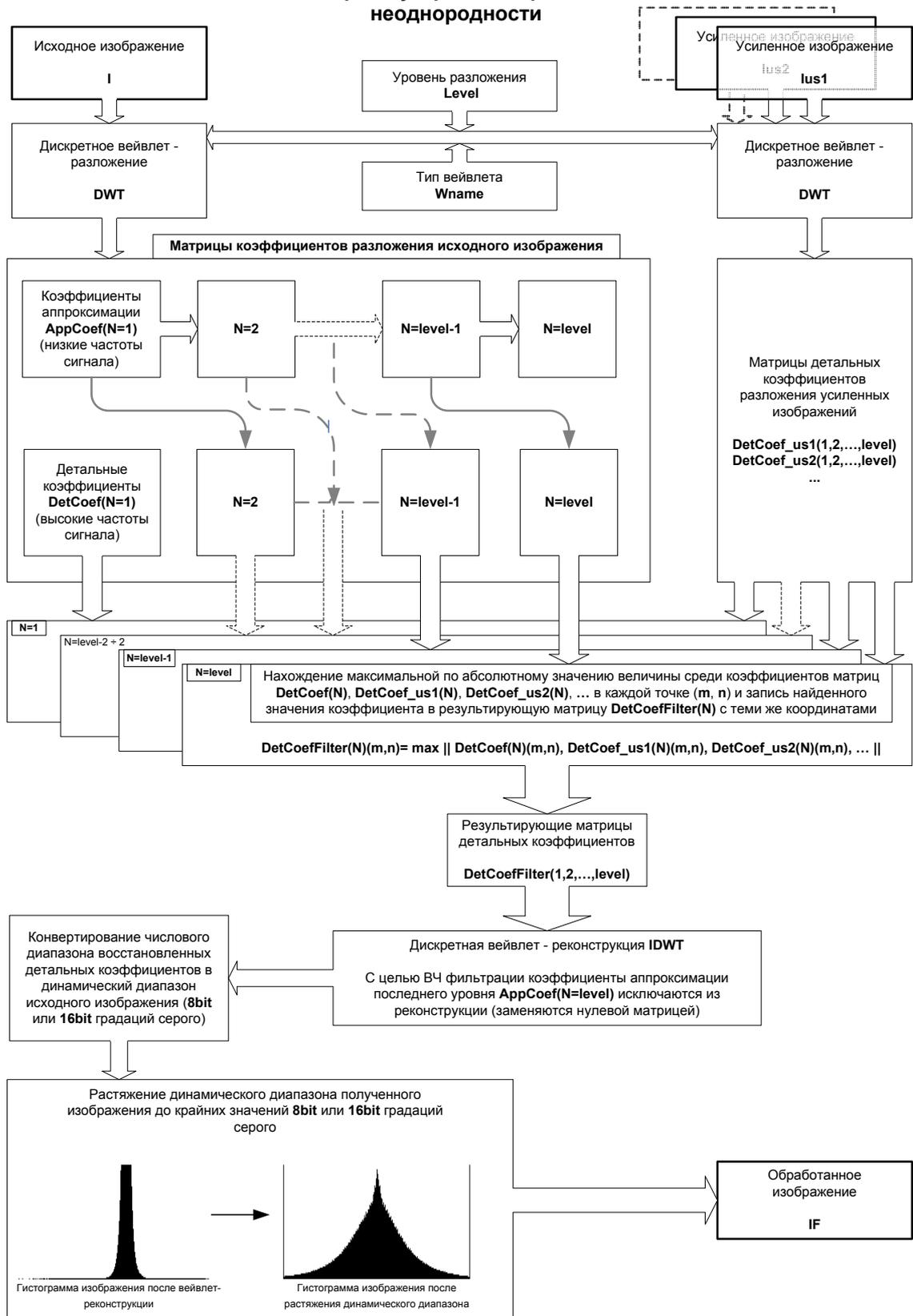
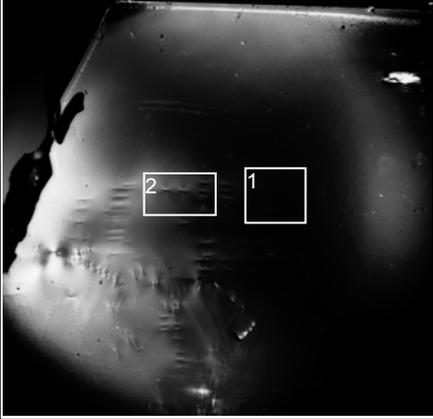
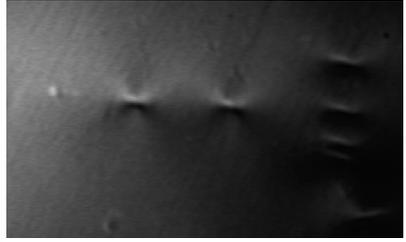
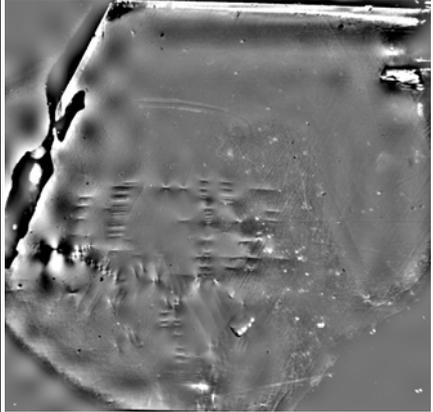
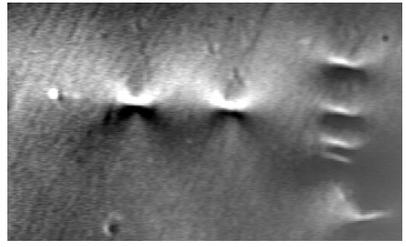
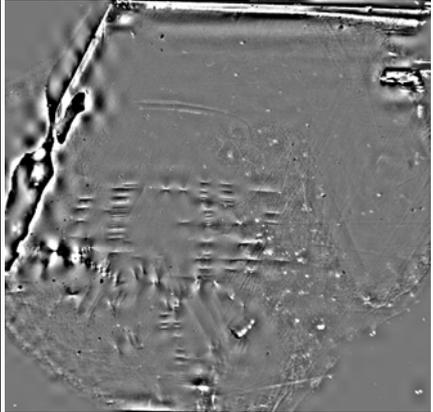
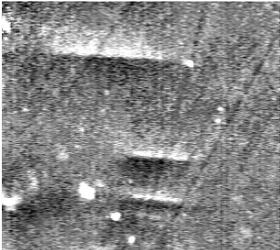
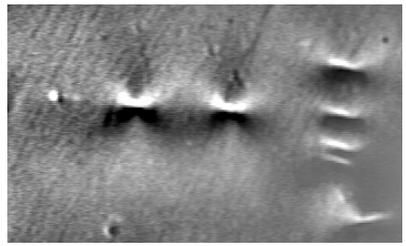
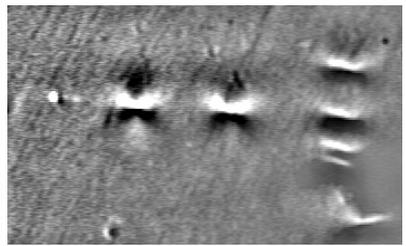


Рисунок 6. Схема алгоритма устранения фоновой неоднородности и выравнивания контрастности изображений, основанного на дискретном вейвлет-анализе.

Таблица 4.

Полоса пропускания ВЧ фильтра	Вейвлет-обработка поляризационно-оптического изображения на базе вейвлета Симлета с гладкостью 8	Вейвлет-обработка фрагментов изображения, содержащих отдельные группы дислокаций (розеток интенсивности)	
		группа дислокаций 1	группа дислокаций 2
Исходное изображение			
С 1 по 7 уровень разложения			
С 1 по 6 уровень разложения			
С 1 по 5 уровень разложения			

разложения сверху и 7 снизу. Данная полоса фильтрации является оптимальной для анализа обзорных топограмм, так как обеспечивает эффективное устранение зернистости, сохраняет при этом высокоинтенсивные центральные детали дефектов, формирующие ядро розеток, а также слабоинтенсивные протяжённые детали розеток, позволяющие определить границы полей деформаций от дефектов.

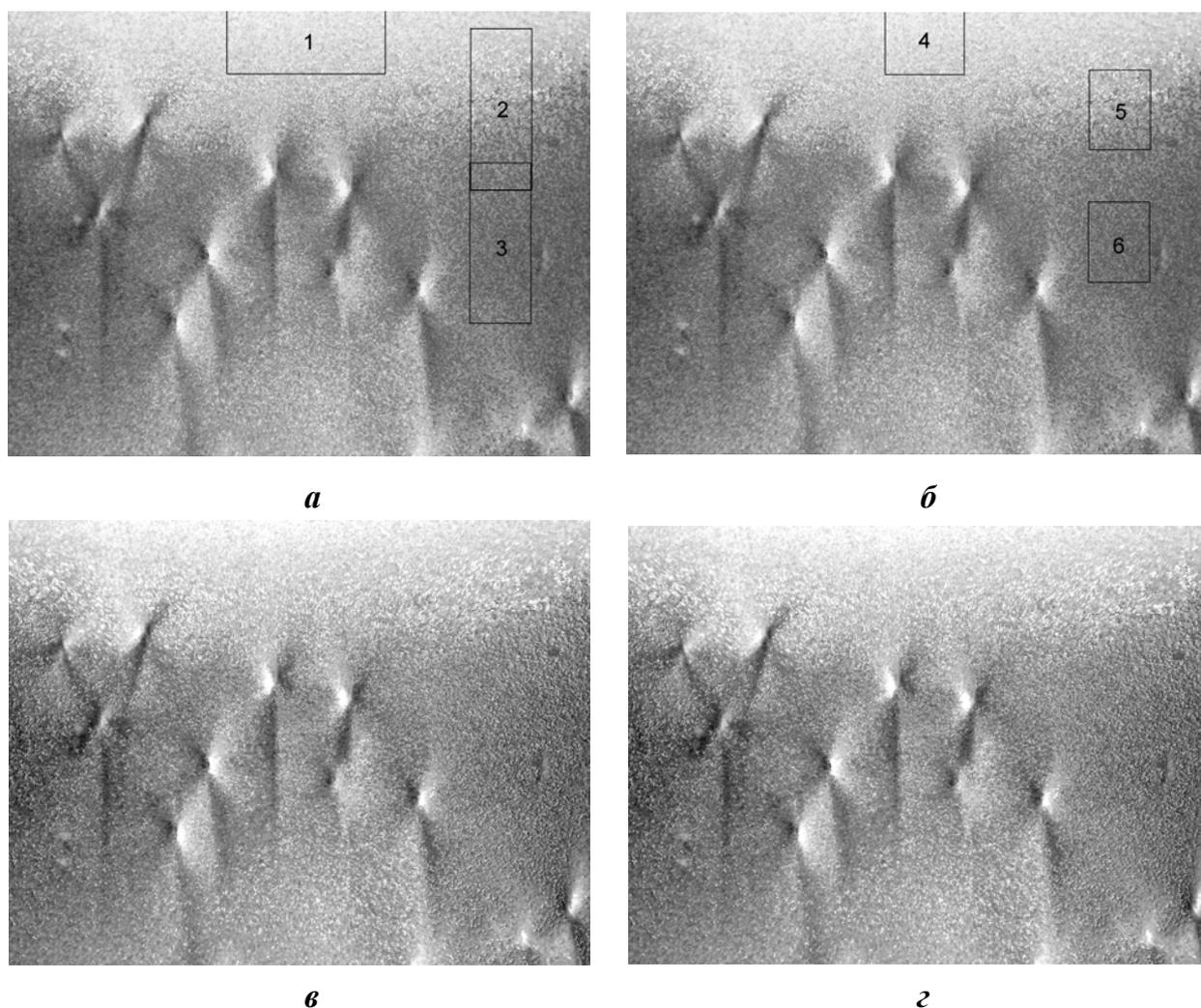


Рисунок 7. Снимки топограмм 6H-SiC с различным яркостным разрешением: 8 бит (а), 16 бит (б), 32 бита с 8-битным сжатием (в), 32-бита с 16-битным сжатием (г).

Установлено, что эффективность вейвлет-обработки существенно зависит от правильного выбора области опорного изображения, показана на рис. 7 цифрами 1 – 6. Для обзорных топограмм существенным является не площадь опорного изображения, а яркостные характеристики опорной области. Наиболее оптимальной является область 2. Для маленьких фрагментов или при вейвлет-обработке отдельного дефекта более критичным является выбор площади области опорного изображения.

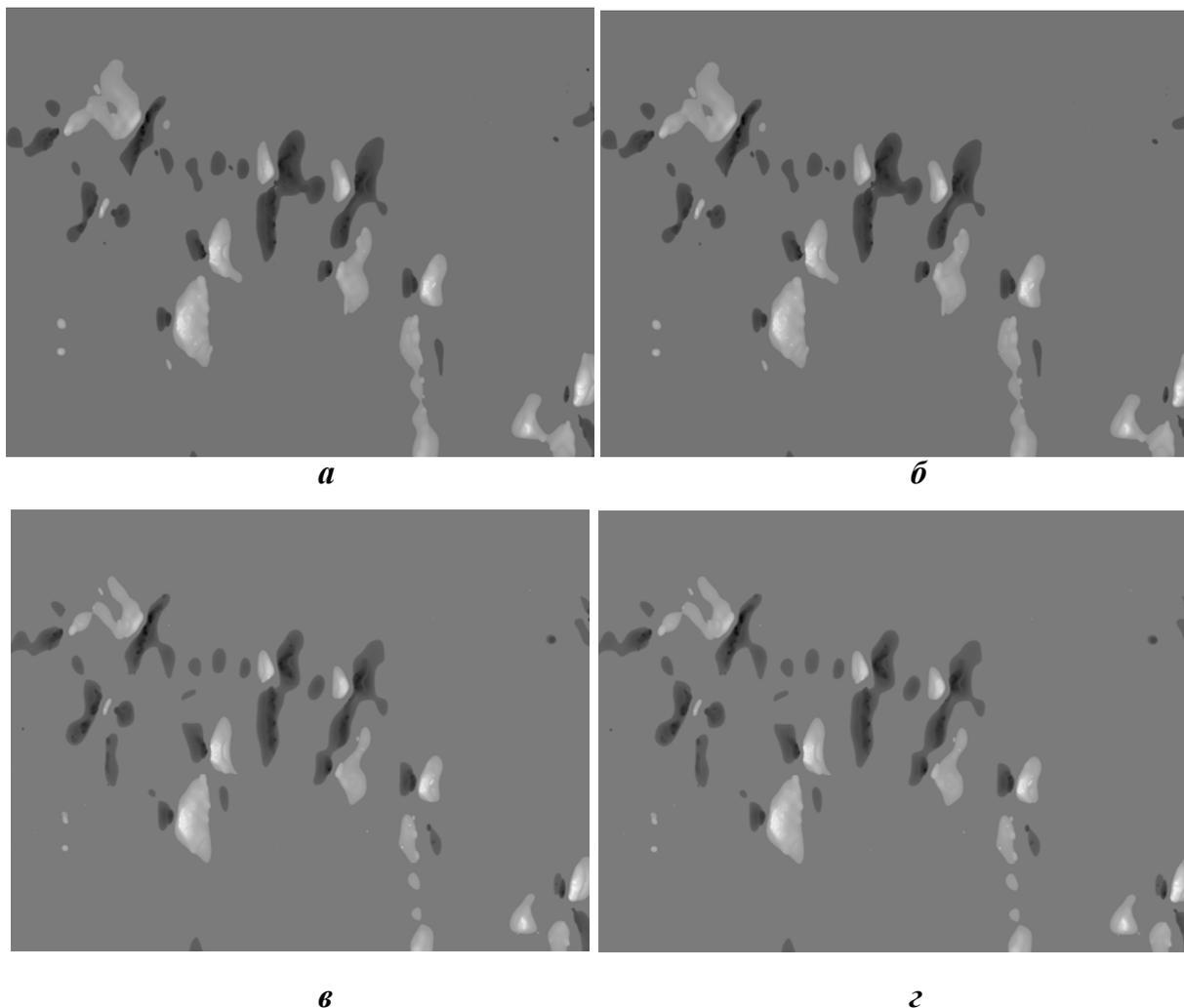


Рисунок 8. Результаты вейвлет-обработки изображений 6H-SiC большой площади с различным яркостным разрешением для опорной области, имеющей разброс яркости зерна (цифра 2 на рис. 7,а): а – разрешение 8 бит, б – разрешение 16 бит, в – 8 бит, г – 16 бит. Все изображения приведены с расширенным динамическим диапазоном.

Перспективным является разложение HDR-изображений по цветовым каналам – синий, зелёный, красный (рис. 9) и последующая их вейвлет-обработка (рис. 10). Красная компонента содержит низкочастотную информацию о контрасте, и вейвлет-обработка выявляет «тонкую» структуру лепестков розеток интенсивности и в меньшей степени ядра розеток. Зелёная компонента содержит больше деталей, относящихся к среднечастотной области, и вейвлет-обработка даёт информацию об основных особенностях экспериментального контраста. Вейвлет-обработка синей компоненты содержит высокочастотную информацию, а это – информация о ядре розеток интенсивности и его более точной локализации по поверхности образца.

Эффективность данного подхода цифровой обработки заметно выше для HDR-изображений, чем для 8- и 16-битных. Меняя полосу пропускания фильтра, можно получить качественные изображения без зерна и с хорошей детализацией лепестков розеток интенсивности и их ядра.

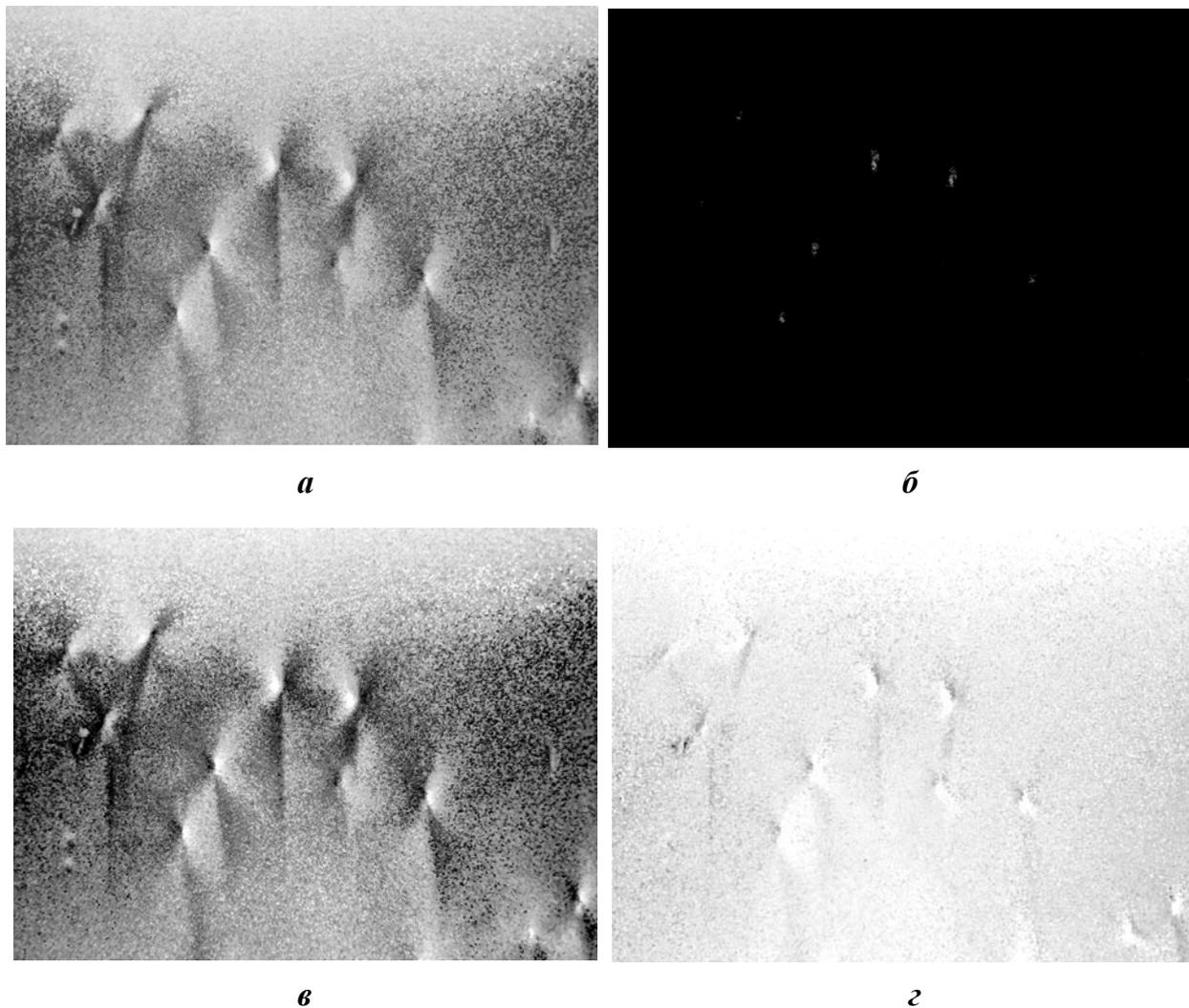


Рисунок 9. Цветовые компоненты топографического HDR-изображения монокристалла $6H-SiC$, сохранённые в 16-битном и чёрно-белом формате: *а* – исходное, *б* – синяя, *в* – зелёная и *г* – красная компоненты изображения.

В седьмой главе приводятся примеры вейвлет-обработки для различных топографических и поляризационно-оптических изображений различных монокристаллов. Продемонстрированы примеры гибкости и перенастраиваемости предложенных алгоритмов (рис. 5 и 6) для решения разнообразных задач. В частности, алгоритм устранения фоновой неоднородности при обработке фотографического снимка с топограммы монокристалла GaSb позволил успешно устранить не только фоновую неоднородность топографического изображения, но и

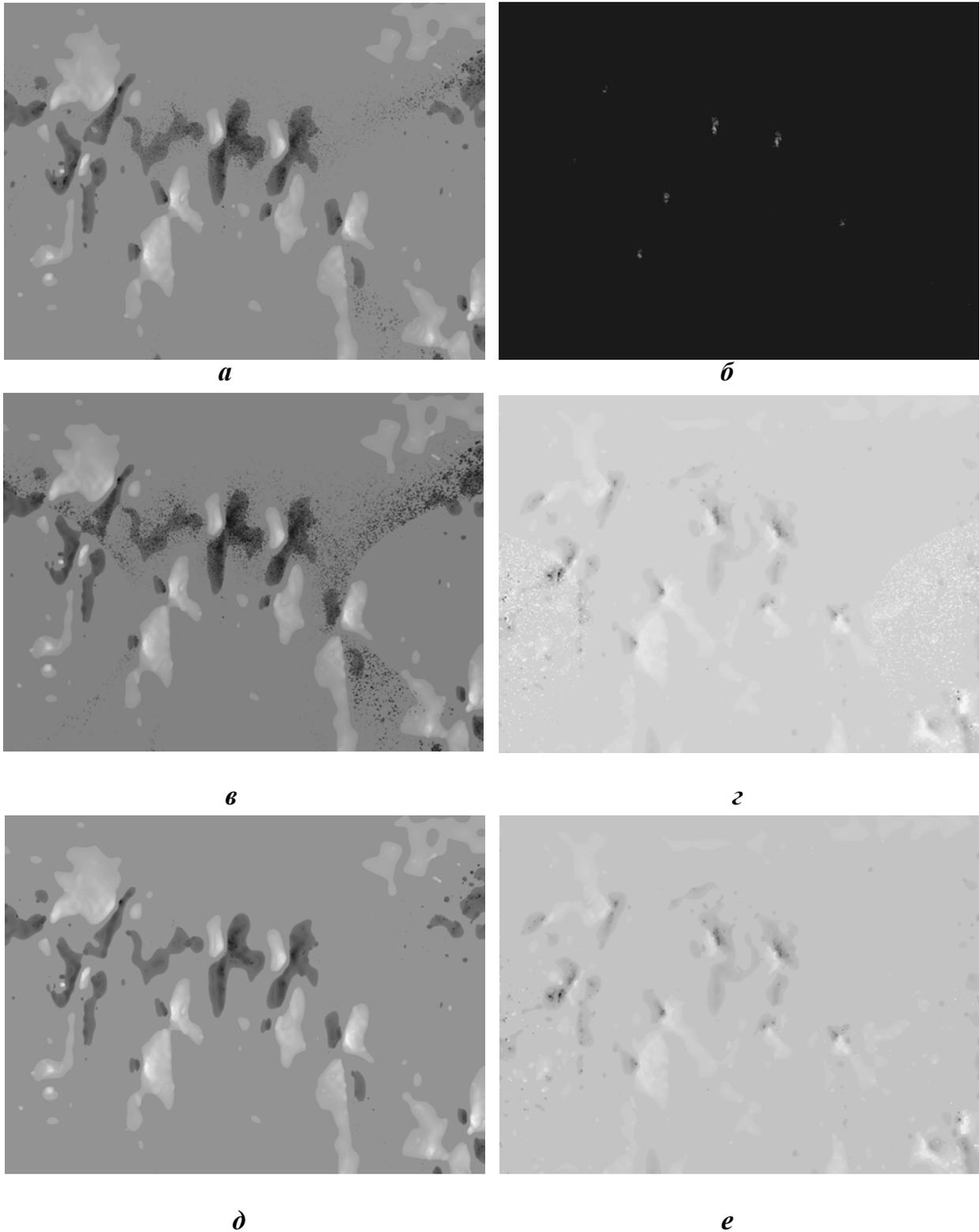


Рисунок 10. Результат вейвлет-обработки топографического HDR-изображения монокристалла 6H-SiC (16-битное сохранение), представленного в чёрно-белом формате, при полосе пропускания, ограниченной сверху 1 уровнем и снизу 7 уровнем (a – г): а – исходное, б – синяя, в – зелёная и г – красная компоненты изображения, д – зелёная компонента при полосе пропускания, ограниченной 3 и 7 уровнями, е – красная компонента при полосе пропускания, ограниченной 4 и 7 уровнями.

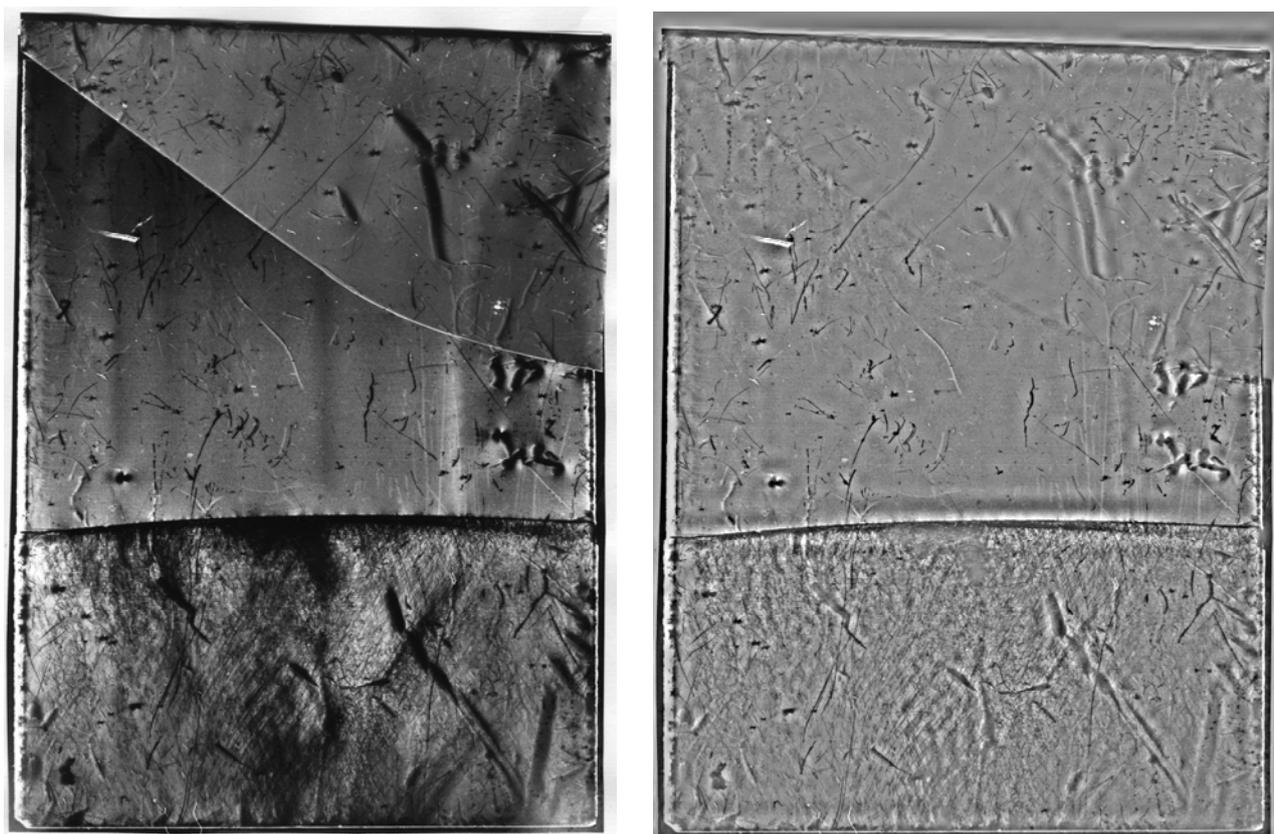
*а**б*

Рисунок 11. Исходное (а) и после вейвлет-обработки (б) изображения GaSb: б конечный уровень декомпозиции с расширенным динамическим диапазоном.

выявить полосы роста и без потери информации «сшить» две части изображения расколотого монокристалла с устранением линии шва. На границе раздела изображений получился равномерный переход деталей контраста друг в друга (рис. 11). Область перекрытия по линии «сшивания» изображений составляла 20 – 50 пикселей. В главе приводятся также результаты вейвлет-обработки топографического изображения, полученного по методу Ланга. Цифровая обработка проводилась по несколько изменённому алгоритму, в результате чего удалось выявить дополнительную информацию о контрасте, не выявляемую ранее первоначальной схемой алгоритма (рис. 5) и ранее апробированными методиками цифровой обработки, основанными на анализе яркостных характеристик. Для рассматриваемого изображения характерна строгая вертикальная направленность контраста от дефектов. В соответствии с алгоритмом обработки на этапе НЧ (полосовой) фильтрации использовались только вертикальные детальные коэффициенты разложения, в то время как горизонтальные и диагональные коэффициенты исключались из реконструкции (обнулялись). Результаты обработки топограммы для

полосы пропускания НЧ (полосового) фильтра, ограниченной 3 и 4 уровнями декомпозиции, представлены на рис. 12,б. Ранее этот же монокристалл был исследован методом РТБ и подвергался цифровой обработке, основанной как на анализе яркостных характеристик, так и на частотном вейвлет-анализе (рис. 12,в,г,д). Анализ топографических изображений монокристалла 6H-SiC, полученных методами РТБ и Ланга, свидетельствует о более высокой информативности и детализации изображений, полученных методом РТБ.

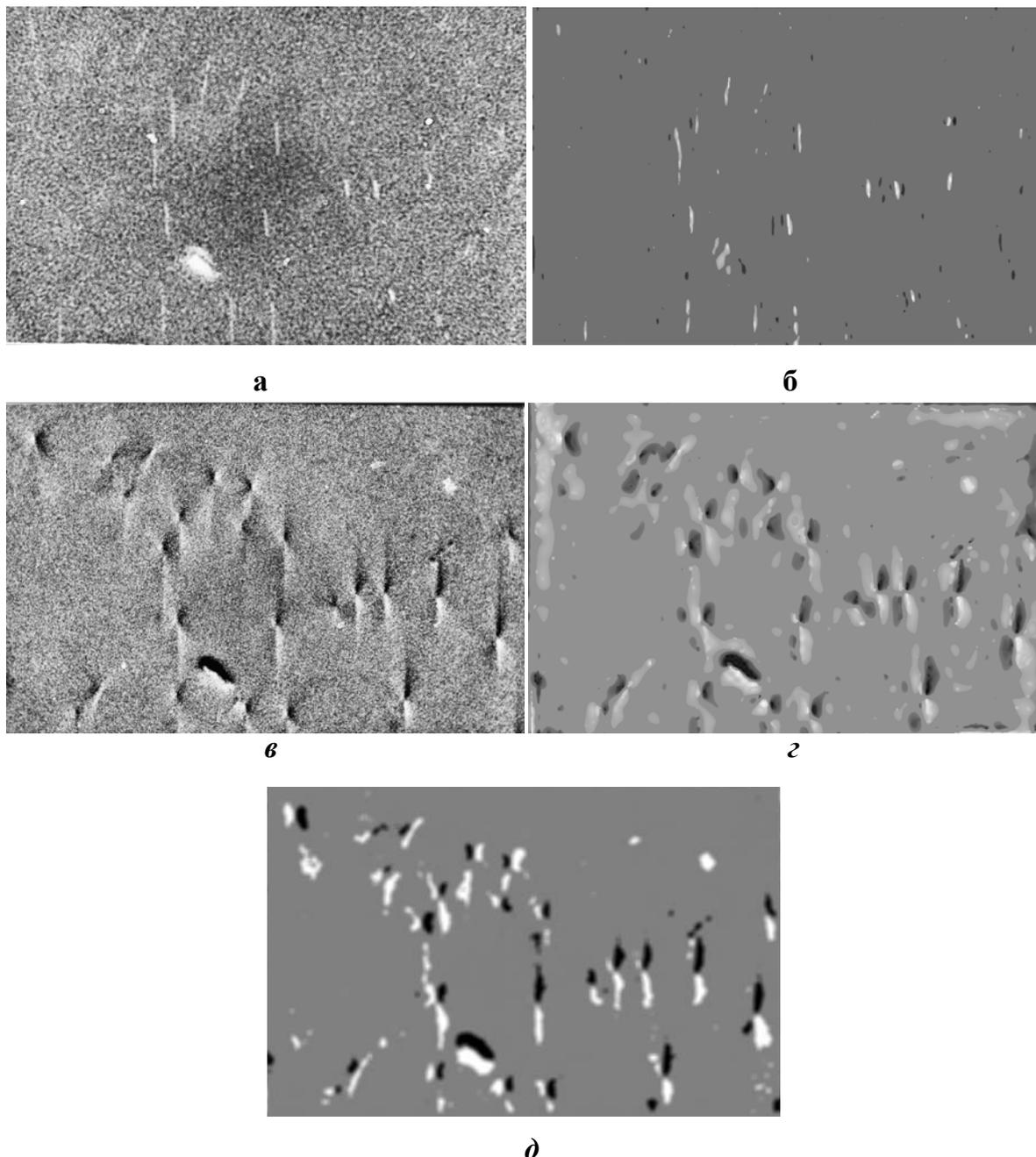


Рисунок 12. Топограмма монокристалла 6H-SiC, снятая по Лангу (а) и после вейвлет-обработки при использовании только вертикальных детализирующих коэффициентов и полосе пропускания НЧ фильтрации, ограниченной 3 и 4 уровнями

декомпозиции (б), а также снятая методом РТБ (в) и после цифровой обработки вейвлетом *dmeu* (г) и нелинейной фильтрации с рекурсивным накоплением (д).

В главе также рассмотрены основные проблемы и ограничения вейвлет-обработки, вытекающие из анализа экспериментальных результатов, и предлагаются пути повышения её эффективности.

В заключении сформулированы основные выводы по работе и даны рекомендации по дальнейшему повышению информативности методов рентгеновской топографии и поляризационно-оптического анализа при использовании цифровой обработки изображений, приведён перечень опубликованных научных статей и изданных монографий.

В приложении приведены тексты программ по цифровой обработке, позволяющих устранить фоновую неоднородность и зернистость изображений.

Основные результаты и выводы

Основным итогом данного диссертационного исследования можно считать повышение надёжности регистрации и определения физической природы дефектов структуры монокристаллических полупроводников, получение не выявляемой ранее новой количественной и качественной информации о дефектах в результате применения цифровой обработки топографических и поляризационно-оптических изображений, включая и HDR-изображения. Результат достигнут благодаря:

- детальному изучению яркостной и частотно-временной природы экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллических полупроводников, зарегистрированного методами РТБ, Ланга и фотоупругости;
- разработке и апробации на большом количестве полупроводников эффективных способов устранения факторов, затрудняющих расшифровку экспериментального контраста и надёжную идентификацию дефектов структуры, – слабой контрастности, фоновой неоднородности и зернистости изображений, зерна и дефектов фотоэмульсии, а также повышению качества анализируемых изображений;
- разработке эффективных и перспективных алгоритмов и программ цифровой обработки топографического и поляризационно-оптического контраста дефектов структуры, основанной на анализе яркостных характеристик и частотном вейвлет-анализе.

К основным результатам данной работы следует отнести также повышение информативности и экспрессности использованных методов исследования дефектов структуры монокристаллов – методов РТБ, Ланга и фотоупругости.

В работе были использованы простейшие (базовые) схемы вейвлет-преобразования и набор вейвлет-базисов, входящий в программный математический пакет «Matlab». Анализ полученных экспериментальных результатов позволил определить новые и перспективные направления по дальнейшему совершенствованию алгоритмов обработки изображений дефектов структуры монокристаллов с использованием вейвлетов следующих поколений и более эффективных схем преобразования, а также поиска альтернативных путей анализа и обработки частотно-временных характеристик экспериментального контраста дефектов структуры.

В ходе выполнения диссертационной работы автором были получены следующие основные научные результаты, которые стали возможными благодаря применению современных компьютерных технологий.

1. Для надёжной идентификации дефектов структуры монокристаллических материалов и устранения факторов, затрудняющих расшифровку топографического и поляризационно-оптического контраста – слабой контрастности, фоновой неоднородности и зернистости изображений, разработаны и апробированы доступные для широкого круга специалистов методы цифровой обработки, основанные на анализе яркостных характеристик. При этом наилучшие результаты по устранению фоновой неоднородности получены при использовании метода, основанного на высокочастотной фильтрации с предварительной обработкой изображения нелинейным фильтром, а зернистости изображений – при использовании метода на основе фильтра с рекурсивным накоплением.

2. Повышение качества и информативности экспериментальных изображений и выявление дополнительной количественной и качественной информации о дефекте структуры достигается последовательным применением при цифровой обработке нескольких фильтров.

3. Надёжность идентификации дефектов структуры и их локализации, а также выявление дополнительных особенностей могут быть повышены представлением экспериментального контраста в виде трёхмерных графиков и областей равного контраста, построением профилей интенсивности, представлением изображения в

цвете и цветовым контрастированием.

4. Размытие экспериментального топографического и поляризационно-оптического контраста дефектов структуры монокристаллов с помощью линейных низкочастотных фильтров («гаусс-размытие» и «усреднение») с целью устранения зернистости изображений не приводит к потере информации о дефекте структуры, который при этом надёжно идентифицируется.

5. При определении природы микродефектов в кремнии методом РТБ и последующей цифровой обработкой экспериментального контраста удаётся однозначно идентифицировать тип дефектов, более точно оценить концентрацию и глубину их залегания, установить, что контраст, создаваемый крупными и мелкими микродефектами, идентичен, а также выявить микродефекты В-типа с размерами 2 – 5 мкм, ранее регистрируемые только электронной микроскопией.

6. Показана более высокая эффективность и информативность метода РТБ и его розеточных методик в выявлении дефектов структуры малодислокационных и бездислокационных монокристаллов по сравнению с методом Ланга. Идентификация дефектов, зарегистрированных по методу Ланга, и эффективность последующей цифровой обработки экспериментального контраста в большей степени зависят от выбора отражающих плоскостей (порядка отражения).

7. Эффективное устранение зернистости топографического контраста дефектов структуры монокристаллов достигается разработанным и апробированным алгоритмом и программой цифровой обработки на основе частотного вейвлет-анализа. Результат получен последовательной реконструкцией детализирующих вейвлет-коэффициентов из определённого набора нижних и средних уровней – полосовая (НЧ) фильтрация коэффициентов с последующей нелинейной пространственной фильтрацией полученных коэффициентов реконструкции и их совмещением в результирующем изображении.

8. Эффективное устранение сильной фоновой неоднородности топографического и поляризационно-оптического контраста дефектов структуры монокристаллов достигается разработанным и апробированным алгоритмом и программой цифровой обработки на основе частотного вейвлет-анализа. Результат получен путём ВЧ фильтрации вейвлет-коэффициентов – реконструкции определённого набора верхних уровней детализирующих вейвлет-коэффициентов, исключая коэффициенты аппроксимации, с последовательным уменьшением числа

уровней, участвующих в реконструкции (последовательное сужение полосы пропускания ВЧ фильтра).

9. Выявлены дополнительные особенности для ближнего и дальнего полей деформаций от дефектов структуры, которые были скрыты на исходных снимках и не выявлялись ранее апробированными методами цифровой обработки, основанными на анализе яркостных характеристик, а надёжно зарегистрированы только вейвлет-обработкой рентгенотопографических и поляризационно-оптических изображений

10. При цифровой обработке теоретического бинарно-точечного контраста, полученного решением модифицированных уравнений Инденбома-Чамрова, с помощью алгоритма устранения зернистости изображений было установлено, что для теоретического контраста линейных дислокаций и микродефектов, как и для экспериментального контраста, цифровая обработка не вносит значительных искажений и сохраняет закон распределения интенсивности для розеток интенсивности, хорошо совпадающий с теоретическим. Лучшее соответствие теории и эксперимента получено для изображений, подвергнутых вейвлет-обработке.

11. Алгоритм устранения фоновой неоднородности при вейвлет-обработке позволил сформировать контраст различных по протяжённости деталей дифракционного изображения в виде отдельных уровней (изображений), имеющих «абсолютно» симметричные гистограммы, что сделало анализ обработанных изображений более комплексным (многоуровневым) и позволило с большей гибкостью манипулировать их гистограммой с целью усиления контрастности изображений и их информативности.

12. Алгоритмы вейвлет-обработки опираются на относительно жёсткие критерии – ограниченный набор уровней разложения, а, значит, ограниченный набор полос пропускания для полосовых фильтров, ограниченный набор оптимальных вейвлет-базисов и т.д. Это позволяет формализовать процедуру вейвлет-обработки и сводит до минимума вероятность ошибки вследствие некорректно заданных параметров обработки.

13. В рамках алгоритма устранения фоновой неоднородности проведено сравнение результатов обработки изображений, имеющих 8 бит и 16 бит градаций серого цвета. Показано, что эффективность обработки и информативность получаемых результатов напрямую зависят от динамического диапазона входного изображения. Чем больше разрядность изображения, полученная при его оцифровке,

тем больше дополнительной информации, позволяющей надёжно идентифицировать дефект структуры, удаётся выявить при вейвлет-обработке.

14. Получены топографические HDR-изображения (32-битные), которые при последующей вейвлет-обработке позволяют зарегистрировать ранее трудно выявляемую «тонкую» структуру розеток интенсивности дефектов структуры монокристаллических полупроводников и, таким образом, получить больше дополнительной количественной и качественной информации, чем 8- и 16-битные.

15. Эффективность вейвлет-обработки и выявление «тонкой» структуры дефектов повышается разложением экспериментального контраста на цветовые компоненты – синюю, зелёную и красную и оптимальным выбором полосы фильтра.

16. Определены критерии оптимального выбора области опорного изображения, её площади и размера обрабатываемого изображения, определяющие в значительной степени эффективность вейвлет-обработки при устранении зернистости экспериментального контраста и повышающие надёжность идентификации дефектов структуры монокристаллических полупроводников.

17. Разработанные методики вейвлет-обработки позволили применить их для «сшивания» экспериментального контраста, полученного для отдельных частей разбитого образца монокристалла, и устранить без потери полезной информации на изображении линию, соответствующую соединению частей, выявить полосы роста.

18. Сопоставление частотного и яркостного подходов цифровой обработки показало, что вейвлет-анализ экспериментальных изображений при той же вычислительной мощности персонального компьютера занимает меньше времени, т.е. обладает большей экспрессностью.

19. В результате разработки и апробации алгоритмов и программ вейвлет-обработки выявились основные факторы, ограничивающие эффективность методов:

– в случае устранения зернистости рентгено топографического контраста ограничением является недостаточное пространственное разрешение вейвлет-анализа на низких частотах, вследствие чего возможно некоторое искажение обработанных изображений, не всегда удаётся полностью выявить информацию о наиболее низкочастотных (протяжённых) деталях розеток интенсивности;

– в случае устранения фоновой неоднородности изображений ограничением является явление элайзинга в ВЧ субполосе (наложения спектров сигнала), вследствие чего возникают низкочастотные осцилляции (биения) вокруг резких

контуров изображения, что, в свою очередь, приводит к искажению среднечастотных деталей розеток. Явление элайзинга может быть уменьшено размытием в пределах малых областей резких границ анализируемых изображений (границ кристалла, сколов, царапин и т.д.), как это было сделано при «сшивании» двух изображений разбитого монокристалла GaSb.

20. Полученные в данной диссертационной работе научные и практические результаты свидетельствуют о высокой перспективности разработанных и апробированных методик цифровой обработки топографического и поляризационно-оптического контраста и необходимости их применения для повышения чувствительности и информативности методов РТБ, Ланга и фотоупругости, повышения экспрессности исследований. Представляет научный и практический интерес дальнейшее развитие частотного подхода в обработке дифракционных изображений с использованием лифтинговой схемы вейвлет-разложения и вейвлетов следующего поколения, а также использование HDR-изображений.

Необходимо отметить, что недостаточно высокий уровень полиграфической базы не позволяет отразить на рисунках в автореферате все основные преимущества цифровых методов обработки топографического и поляризационно-оптического контраста дефектов структуры исследованных монокристаллов, которые хорошо проявляются на профессиональных мониторах и на специальной фотобумаге при распечатке изображений с помощью профессиональных струйных принтеров.

Общее число публикаций докторанта составляет более 120 наименований, включающих в себя монографии, статьи, тезисы докладов и научные отчёты.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих научных монографиях и статьях.

Монографии

1. Данильчук Л.Н., Ткаль В.А., Окунев А.О., Дроздов Ю.А. Цифровая обработка рентгено топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2004. – 227 с.
2. Данильчук Л.Н., Окунев А.О., Ткаль В.А. Рентгеновская дифракционная топография дефектов структуры в кристаллах на основе эффекта Бормана. – Великий

Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2006. – 493 с.

3. *Данильчук Л.Н., Окунев А.О., Ткаль В.А., Труханов Е.М., Фёдоров А.А., Василенко А.П.* Рентгеновская топография кремния на основе плёночной интерферометрии эпитаксиальных систем и эффекта Бормана. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого. 2006. – 351 с.

4. *Ткаль В.А., Окунев А.О., Емельянов Г.М., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.* Вейвлет-анализ топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого. 2006. – 397 с.

5. *Окунев А.О., Ткаль В.А., Данильчук Л.Н.* Исследование дефектов структуры монокристаллического карбида кремния прямыми физическими методами. – Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого. 2006. – 253 с.

Статьи

1. *Анисимов В.Г., Буйлов А.Н., Окунев А.О., Ткаль В.А.* Подготовка монокристаллического карбида кремния для рентгено топографических исследований. – М.: 1999. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ, 09.09.99, 2809-В99.

2. *Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А.* Компьютерная обработка рентгено топографических изображений дефектов структуры монокристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2002. № 8. С. 6 – 11.

3. *Данильчук Л.Н., Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А., Шульпина И.Л.* Рентгеновская топография дефектов структуры монокристаллических полупроводников на основе эффекта Бормана (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 11. – С. 24 – 33.

4. *Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А., Шульпина И.Л.* Применение компьютерной обработки рентгено топографических изображений для идентификации дефектов структуры монокристаллов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 12. – С. 30 – 36.

5. *Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А., Шульпина И.Л.* Исследование дислокаций в монокристаллическом карбиде кремния поляризационно-оптическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69, № 1. – С. 24 – 29.

6. Данильчук Л.Н., Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А., Шульпина И.Л. Диагностика монокристаллов применением компьютерной обработки дифракционных и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – Т. 69, № 11. – С. 26 – 32.
7. Ткаль В.А., Окунев А.О., Дроздов Ю.А., Шульпина И.Л., Данильчук Л.Н. Компьютерная обработка и анализ топографических изображений краевых дислокаций в монокристаллах 6H-SiC // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. № 1. – С. 32 – 38.
8. Дроздов Ю.А., Ткаль В.А., Окунев А.О., Данильчук Л.Н. Устранение фоновой неоднородности и влияния зернистости фотоматериалов на топографические и поляризационно-оптические изображения дефектов структуры монокристаллов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 7. – С. 25 – 34.
9. Окунев А.О., Ткаль В.А., Дроздов Ю.А., Данильчук Л.Н. Топографический контраст винтовых дислокаций в монокристаллах 6H-SiC и его компьютерная обработка // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. № 9. – С. 58 – 63.
10. Ткаль В.А., Окунев А.О., Дроздов Ю.А., Данильчук Л.Н. Применение цифровой обработки для выявления топографических изображений микродефектов и дефектов фотоэмульсии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 11. – С. 23 – 28.
11. Анисимов В.Г., Данильчук Л.Н., Дроздов Ю.А., Окунев А.О., Ткаль В.А. Исследование сложных дефектов упаковки в монокристаллах кремния // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. № 11. – С. 74 – 81.
12. Окунев А.О., Данильчук Л.Н., Ткаль В.А., Дроздов Ю.А. Секционные топограммы дислокаций в 6H-SiC // Вестник Новгородского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2004. № 28. – С. 143 – 149.
13. Данильчук Л.Н., Окунев А.О., Ткаль В.А., Дроздов Ю.А. Экспериментальное определение физической природы ростовых микродефектов в бездислокационном кремнии, выращенном методом Чохральского // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. № 7. – С. 13 – 22.

14. *Белехов Я.С., Ткаль В.А., Окунев А.О., Петров М.Н.* "Устранение фоновой неоднородности поляризационно-оптических изображений". Электронный журнал "Исследовано в России", 142, стр. 1434 – 1441, 2005 г.

<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/142.pdf>

15. *Ткаль В.А., Окунев А.О., Данильчук Л.Н., Белехов Я.С.* "Фоновая неоднородность топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов (способы устранения)". Электронный журнал "Исследовано в России", 210, стр. 2171 – 2180, 2005 г.

<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/210.pdf>

16. *Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.* "Цифровая обработка топографических изображений дефектов структуры монокристаллов на основе вейвлет-анализа". Электронный журнал "Исследовано в России", 211, стр. 2181 – 2190, 2005 г.

<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/211.pdf>

17. *Данильчук Л.Н., Окунев А.О., Тимофеева Ю.В., Анисимов В.Г., Ткаль В.А.* "Изучение дефектов структуры монокристаллических сплавов Bi+Sb методом двухкристальной топографии в геометрии Брэгга". Электронный журнал "Исследовано в России", 224, стр. 2307 – 2314, 2005 г.

<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/224.pdf>

18. *Окунев А.О., Ткаль В.А., Данильчук Л.Н.* Изображения винтовых дислокаций, перпендикулярных поверхности монокристалла 6H-SiC , в методе Ланга // Вестник Новгородского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2005. № 34. – С. 106 – 111.

19. *Окунев А.О., Данильчук Л.Н., Ткаль В.А.* Секционные изображения дислокаций, перпендикулярных поверхности монокристаллов 6H-SiC // Физика твёрдого тела. – 2006. – Т. 48, вып. 11. – С. 1962 – 1969.

20. *Okunev A. O., Danil'chuk L. N., and Tkal' V. A.* Section Images of Dislocations Normal to the Surface of a 6H-SiC Single Crystal // Physics of the Solid State. – 2006. – V. 48, № 11. – P. 2084 – 2090.

21. *Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.* Применение вейвлет-анализа для устранения фоновой неоднородности поляризационно-

оптических изображений дефектов структуры монокристаллов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 7. – С. 22 – 29.

22. **Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.** Устранение зернистости топографических изображений дефектов структуры монокристаллов с помощью вейвлет-анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 8. – С. 27 – 32.

23. **Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.** Выявление особенностей экспериментального контраста при перемасштабировании изображений на основе вейвлет-анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 9. – С. 25 – 33.

24. **Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.** Устранение зернистости топографических изображений дефектов структуры монокристаллов различными вейвлет-базисами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 10. – С. 23 – 30.

25. **Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.** Сопоставление результатов цифровой обработки топографического контраста на основе вейвлет-анализа и нелинейной фильтрации с рекурсивным накоплением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 2. – С. 36–45.

26. **Ткаль В.А., Окунев А.О., Белехов Я.С., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.** Устранение фоновой неоднородности изображений дефектов структуры монокристаллов различными вейвлетами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 3. – С. 28–37.

27. **Ткаль В.А., Окунев А.О., Петров М.Н., Данильчук Л.Н.** Вейвлет-обработка топографических изображений с расширенным динамическим диапазоном // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. № 5. – С. 1–11.

Работа над диссертацией проводилась в рамках:

1. гранта РФФИ № 02-02-17661а;
2. программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», программа: 202 Новые материалы, раздел 202.01 Материалы для микро- и наноэлектроники, код Проекта 01.02.048.
3. гранта РФФИ № 06-02-16230-а.