

На правах рукописи

Орлов Михаил Андреевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА
ФАЗОВОГО КОНТРАСТА ЦЕРНИКЕ ДЛЯ ЖЕСТКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного
состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре физики наносистем физического факультета Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель:

Ковальчук Михаил Валентинович,

Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты:

Квардаков Владимир Валентинович

Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Зам. директора по синхротронно-нейтронным исследованиям

Бушуев Владимир Алексеевич

Доктор физико-математических наук, профессор
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики твердого тела
Профессор

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН)

Защита состоится _____ 2012 г. в ____ часов на заседании
диссертационного _____ совета Д 520.009.01 при Национальном
Исследовательском Центре «Курчатовский институт» по адресу: 123182
Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Автореферат разослан _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

А.В. Мерзляков

Актуальность

С появлением источников синхротронного излучения 3-го поколения (ESRF, Spring-8, APS), характеризующихся высокой степенью пространственной когерентности рентгеновских пучков, жесткое рентгеновское излучение стало активно использоваться для исследования внутренней структуры слабопоглощающих некристаллических объектов. В частности, был развит метод безлинзового фазового контраста, позволяющий существенно снизить дозу поглощенного излучения, что имеет первостепенную важность, например, при исследовании медико-биологических образцов. Количество публикаций по данной тематике растет с каждым годом.

В настоящее время наиболее распространены два основных метода фазоконтрастных исследований. Во-первых, это фазодисперсионная интроскопия [1], применяемая для исследования объектов субмиллиметровых размеров и имеющая принципиальное ограничение по разрешению, составляющее несколько микрон, и во-вторых, – осевая (in-line) голография [2], применяемая для изучения объектов с меньшими размерами и требующая более высокой степени пространственной когерентности падающего пучка рентгеновского излучения. Оба этих метода обладают определенными недостатками. Так, они слабо чувствительны к плавным изменениям плотности в образце и позволяют отчетливо наблюдать лишь контуры объектов. Кроме того, они позволяют получить не само изображение объекта, а распределение интенсивности, либо неточно воспроизводящее форму объекта, либо не имеющее внешнего сходства с объектом, и тогда его требуется расшифровать. Этим недостаткам можно избежать, если использовать в жестком рентгеновском диапазоне известный из оптики видимого света метод фазового контраста Цернике [3], в котором для формирования изображений применяется фокусирующий элемент – объектив. Этот метод чувствителен к плавным изменениям плотности в

образце. Кроме того, он позволяет упростить решение обратной задачи, поскольку на детекторе в данном случае видно непосредственно распределение фазы, накопленной в образце. Так, прямоугольный объект при использовании метода Цернике будет изображаться в виде прямоугольника, а эллиптический – в виде полуэллипса. При этом метод Цернике за счет наличия объектива позволяет увеличивать изображение в десятки раз, что важно при использовании детекторов невысокого разрешения.

На данный момент было поставлено несколько экспериментов с применением техники Цернике в рентгеновском диапазоне (например, [4-6]), однако систематических теоретических исследований данного метода не проводилось. При этом в проведенных экспериментах объективом служила зонная пластинка, предназначенная, вообще говоря, не для формирования изображений, а для фокусировки пучков. Вместе с тем параболическая преломляющая линза в роли объектива могла бы дать лучшее разрешение. Учитывая все более широкое распространение безлинзовых методик фазового контраста, а также отсутствие теоретических разработок по новому направлению фазоконтрастных исследований – методу Цернике в рентгеновском излучении, численный анализ возможностей этого метода представляется весьма актуальным.

Цель работы и основные задачи

Основной целью работы является теоретическое изучение особенностей метода фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском диапазоне и поиск оптимальных схем формирования изображения.

Задачи диссертации:

1. Численный анализ возможностей фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении при использовании параболической

преломляющей линзы и зонной пластинки в качестве фокусирующего элемента. Сравнение этих рентгенооптических приборов, исследование их специфики, поиск способов улучшения качества изображения.

2. Разработка способов корректировки изображения.
3. Моделирование эксперимента по визуализации микротрубок в кристалле карбида кремния методом фазового контраста Цернике. Рассмотрение как мелких, так и сильно вытянутых в продольном направлении сечений микропор.
4. Исследование влияния некогерентности пучка на изображение, рассмотрение различных видов спектра.
5. Получение двумерных профилей интенсивности.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов

1. Впервые проведено подробное численное исследование особенностей фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении. Теоретически показано, что преломляющая линза в качестве фокусирующего элемента позволяет добиться лучшего разрешения, чем зонная пластинка.
2. Показано, что формирование изображений осуществляется также и за счет проседания фона вне изображений, что обусловлено сохранением интегральной интенсивности. Таким образом, идея Цернике представляет собой лишь наводку на эффект, и реальный механизм формирования изображений намного сложнее.
3. Показано, что, хотя преломляющая линза из-за сильного поглощения на краях плохо изображает периферийные образцы, изображение может быть легко скорректировано путем деления результирующего профиля интенсивности на функцию поглощения в линзе с коэффициентом, незначительно отличающимся от единицы.
4. Впервые с помощью компьютерного моделирования показана возможность использования метода фазового контраста Цернике в

жестком рентгеновском излучении для исследования структуры микропор в кристаллах карбида кремния.

5. Показано, что в изображении сильно вытянутых в продольном направлении сечений микротрубок возникают специфические осцилляции, по виду которых можно восстановить структуру объектов.
6. Показано, что немонахроматичность пучка не оказывает существенного влияния на изображение микротрубок.
7. Проведены расчеты двумерных профилей интенсивности.

Практическая ценность работы

1. Замена фазового контраста в in-line схеме фазовым контрастом Цернике позволит получать изображения не только контуров слабопоглощающих объектов, но и их внутренних участков, в которых набег фазы изменяется плавно.
2. Использование фазового контраста Цернике вместо фазового контраста в in-line схеме позволит упростить решение обратной задачи, поскольку в первом случае на экране детектора виден профиль распределения плотности в образце, а не голограмма, которую требуется расшифровать.
3. Использование в методе фазового контраста Цернике для жесткого рентгеновского излучения преломляющей параболической линзы вместо зонной пластинки позволит получать изображения с более высоким разрешением.
4. Корректировка изображений в схеме с преломляющей линзой дает возможность восстанавливать изображение вдоль всей апертуры.
5. Использование метода фазового контраста Цернике вместо фазового контраста в in-line схеме позволит получать информацию о продольном и поперечном радиусах эллиптических сечений микротрубок, а не только о площади сечения.

6. Показано, что качество изображения может быть улучшено путем использования метода, аналогичного птихографии, когда объект изображается не целиком, а по частям, при этом каждый раз рассматриваемая часть образца располагается напротив той области объектива, где изображение наиболее качественное.

Публикации

По результатам данной диссертационной работы опубликованы 4 статьи в рецензируемых журналах и тезисы к 8 докладам. Список научных работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, получены лично Орловым М.А. Постановка задач исследований, определение методов их решения и интерпретация результатов выполнены совместно с научным руководителем при личном участии Орлова М.А.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Материал изложен на 130 страницах, содержит 63 рисунка и список литературы из 105 наименований.

Работа осуществлялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-12239-офи_м), а также Министерства образования и науки РФ (контракт № 02.740.11.0415).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, представлен список публикаций.

В главе 1 представлен литературный обзор, в первой части которого кратко излагаются основные факты из истории развития рентгеновских методик исследования структуры вещества, начиная от методов изучения кристаллических веществ и заканчивая рентгеновским фазовым контрастом. Во второй части описываются особенности методов безлинзового фазового контраста с кристаллом-анализатором и в in-line схеме. В третьей и четвертой частях рассказывается о способах изготовления и экспериментальном использовании рентгеновских преломляющих линз и зонных пластинок соответственно. В пятой части описывается принцип действия метода фазового контраста Цернике и указываются его особенности при переходе в рентгеновскую область. В шестой части рассказывается о различных экспериментальных реализациях метода в рентгеновской области.

В главе 2 описывается методика численного исследования. В данной работе решается задача с переносом излучения, которая ставится следующим образом. Пусть известно распределение напряженности в некоторой плоскости 1, перпендикулярной оптической оси. Необходимо найти профиль волнового поля в плоскости 2, также перпендикулярной оптической оси. В данной работе основной интерес представляют объектная плоскость, плоскости, проходящие через середину объектива и точку фокусировки источника, а также плоскость детектора. Направим ось z декартовой системы координат вдоль оптической оси, а оси x и y – перпендикулярно ей. В данной работе используется так называемое приближение параксиальных (приосевых) пучков, означающее, что характерные поперечные координаты много меньше продольных. В этом случае перенос излучения от плоскости к плоскости описывается с помощью пропагатора Кирхгофа

$$P(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right),$$

где λ – длина волны излучения. Для того чтобы определить профиль напряженности поля в некоторой плоскости, необходимо осуществить свертку пропагатора Кирхгофа с функцией распределения напряженности в плоскости, в которой это распределение известно. Взаимодействие излучения с объектами описывалось путем умножения волновой функции поля на трансмиссионную функцию объекта

$$T(x, y) = \exp\left(-i[\delta - i\beta]\frac{2\pi}{\lambda}t(x, y)\right).$$

Здесь $t(x, y)$ – локальное изменение продольной толщины объекта, δ и β – величины, определяющие комплексный показатель преломления материала объекта: $n = 1 - \delta + i\beta$.

В данной работе расчеты выполнялись в приближении геометрической оптики, то есть считалось, что продольными размерами объектов можно пренебречь, поэтому функция T не зависит от z . Вычисления проводились с помощью быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform) [7].

В главе 3 приведены результаты численного моделирования фазового контраста Цернике в одномерном случае. В качестве фокусирующего элемента рассматривались как преломляющая параболическая линза, так и зонная пластинка. Схема численного эксперимента для случая с линзой представлена на рис. 1.

Прежде всего, необходимо было сделать анализ применимости метода, то есть дать рекомендацию на форму и размер объектов, которые в принципе можно наблюдать с его помощью. Для этого вначале были рассмотрены кремниевые объекты, расположенные в центре апертуры (рис. 2). На рисунке высота поднятия интенсивности в относительных единицах равна удвоенному сдвигу фаз, вносимому объектами, что и должно наблюдаться в

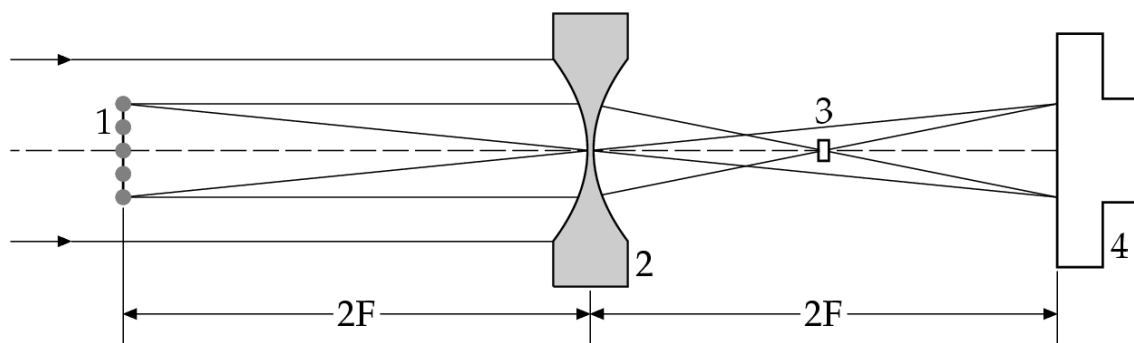


Рис. 1. Схема фазового контраста Цернике при использовании преломляющей линзы. Почти параллельный пучок синхротронного излучения падает слева. 1 – объект, 2 – преломляющая линза, 3 – фазосдвигающая пластинка, 4 – координатный детектор. При изображении без увеличения объект и детектор ставятся на двойном фокусном расстоянии от линзы, а фазосдвигающая пластинка – в точке фокусировки источника.

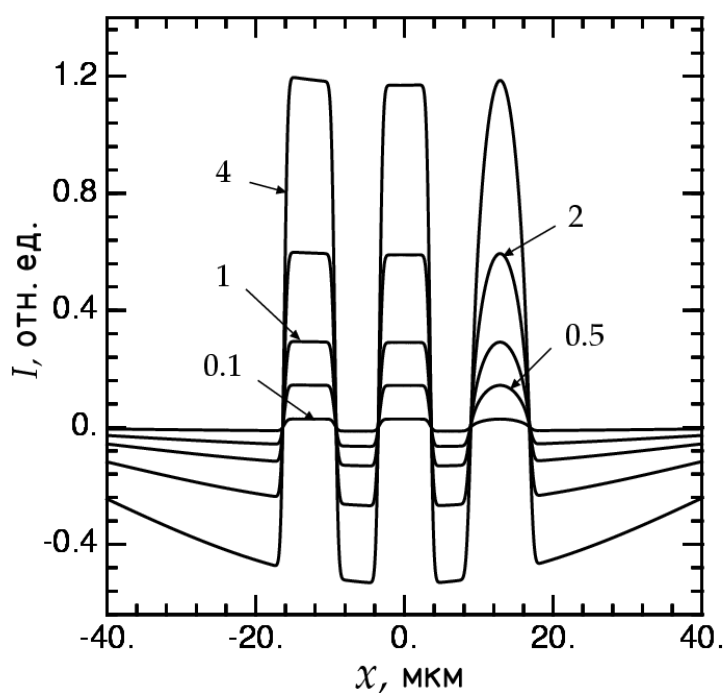


Рис. 2. Изображение линзой трех кремниевых объектов с прямоугольным и эллиптическим сечением при различных значениях продольного размера d . Значения d в мкм проставлены у кривых.

методе Цернике. Видно также, что фон с увеличением продольного размера объектов проседает, что свидетельствует о чисто дифракционном характере формирования изображений.

Следующим важным вопросом было определение того, как зависит качество изображения от положения объекта на апертуре линзы. Для этой цели в работе был смоделирован набор объектов, расставленных вдоль всей апертуры. Объекты обладали разной формой и толщиной и по-разному сдвигали фазу, что позволяло видеть на одном графике целый спектр различных ситуаций. Рис. 3 иллюстрирует, что качество изображения ухудшается при удалении от центра, поскольку все сильнее начинает сказываться поглощение в линзе, и крайние образцы практически неразличимы. Однако оказалось, что изображение легко скорректировать путем деления результирующего профиля интенсивности на функцию, незначительно отличающуюся от функции поглощения в линзе. Это отличие обусловлено влиянием фазосдвигающей пластинки, вносящей незначительное изменение в профиль интенсивности в плоскости детектора. В результате данной процедуры не только выравнивается фон, но и контраст восстанавливается сам собой.

Что касается зонной пластинки, то она обладает бесконечным количеством порядков фокусировки. На формирование изображения в первом порядке уходит около 40% интегральной интенсивности, оставшаяся часть не участвует в формировании изображения, однако также попадает на детектор, что приводит к порче изображения. Чтобы исключить влияние минус первого порядка, объекты смещаются в сторону от оптической оси. Кроме того, как известно, при использовании зонной пластинки слишком высокий уровень пространственной когерентности носит пагубный характер, поскольку приводит к образованию деструктивных спеклов, и изображение приходится усреднять. В результате качество изображения, даваемого зонной пластинкой, оказывается хуже, чем при использовании линзы, однако,

поскольку толщина зонной пластинки незначительна и одинакова вдоль всей апертуры, поглощение в данном случае практически не заметно.

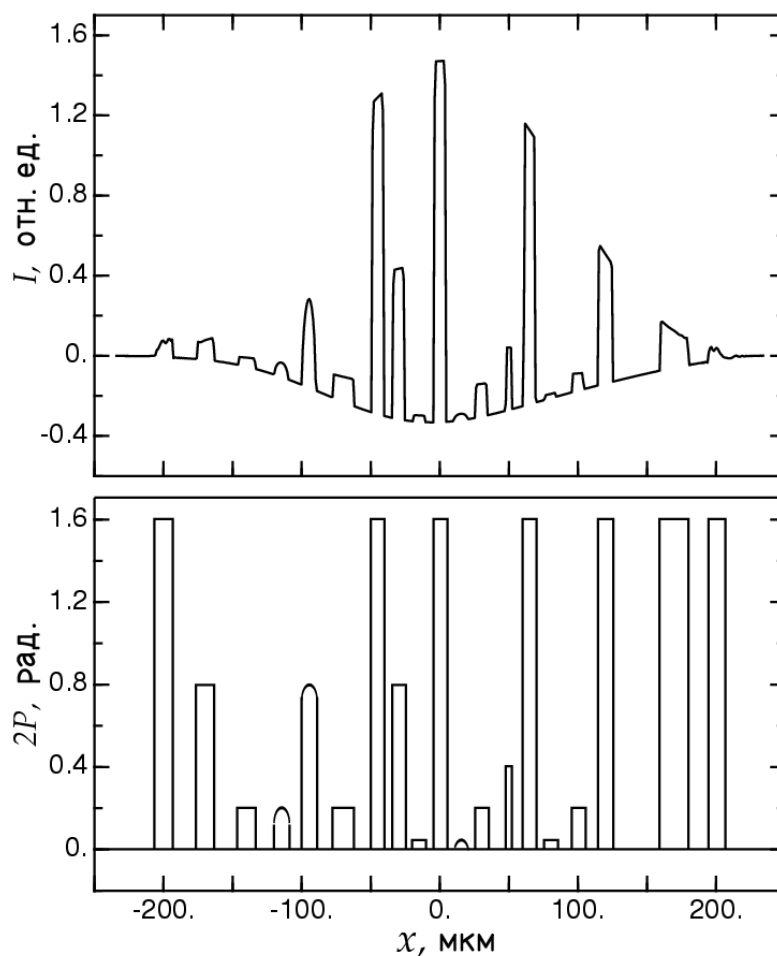


Рис. 3. (а) Изображение линзой серии разных объектов, распределенных по апертуре линзы. (б) Точный профиль удвоенного сдвига фазы, создаваемый рассмотренными объектами.

В главе 4 приведены результаты численного моделирования эксперимента по визуализации микротрубок в карбиде кремния (SiC). Карбид кремния представляет собой перспективный материал полупроводниковой электроники, по многим показателям превосходящий кремний. В процессе роста кристаллов карбида кремния в нем образуются специфические дефекты – микротрубки. Наиболее прямым методом неразрушающего исследования

микротрубок, расположенных в толще образца, является метод фазового контраста в in-line схеме [8]. Однако в последние годы было показано [9], что данный метод не является эффективным при исследовании сечений пор субмикронного размера, поскольку он не позволяет определить по отдельности продольный и поперечный размер эллиптического сечения микротрубки. В связи с этим было бы целесообразно при исследовании микропор в карбиде кремния перейти от фазового контраста в in-line схеме к фазовому контрасту Цернике, позволяющему извлекать из изображения на детекторе полную информацию о сечении микротрубки. При этом наличие преломляющей линзы в методе Цернике позволяет увеличивать изображение в десятки раз, и увеличение определяется соотношением расстояний от образца до объектива и от объектива до детектора. Рис. 4 показывает, как меняется изображение эллиптического сечения мелкой микротрубки с ростом коэффициента увеличения. Если коэффициент увеличения равен M , то поперечный размер изображения увеличивается в M раз, а продольный – уменьшается в M раз, что необходимо для сохранения интегральной интенсивности.

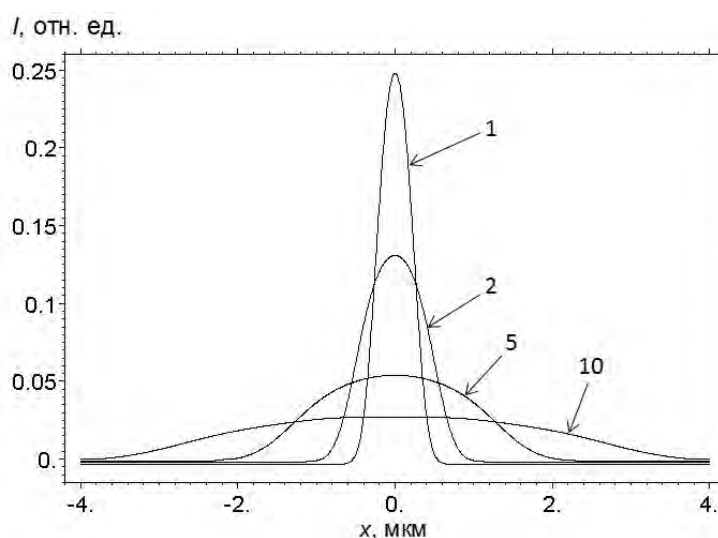


Рис. 4. Изображения микротрубки с продольным и поперечным радиусами сечения $R_1 = R_2 = 0.3$ мкм при различных значениях коэффициента увеличения M . Значения M проставлены у кривых.

Микротрубки представляют собой сильно вытянутые цилиндрические поры, и если ось цилиндра образует малый угол с оптической осью, то продольное сечение микротрубки может оказаться очень большим. Хотя метод Цернике не предназначен для исследования объектов, вносящих в падающую волну сдвиг фаз $\varphi \gg 1$, оказывается, что в этом случае продольный размер объектов также может быть восстановлен. На рис. 5 (а) показано изображение линзой серии эллиптических пор в кристалле SiC. Продольный диаметр крайней справа поры составляет 3 мкм, следующей за ней – 5 мкм, далее к каждой поре прибавляется по 5 мкм. На рис. 5 (б) показано изображение выпуклых эллиптических объектов такого же размера. Видно, что по достижении определенного значения интенсивность в центре начинает спадать, а в изображении сильно вытянутых пор возникают осцилляции. Природа осцилляций заключается в том, что продольная толщина эллипсоидальной поры при движении от центра к краю все быстрее уменьшается, и с возрастающей скоростью уменьшается сдвиг фазы, вносимый порой. Каждый раз, когда в поре теряется сдвиг фаз 2π , трансмиссионная функция поры умножается на величину $\exp(2\pi i) = 1$, то есть принимает одинаковые значения. В этом случае интенсивность на детекторе также принимает одинаковые значения. Зная полное число осцилляций, легко понять, сколько раз в поре накопился сдвиг фазы 2π , и тем самым определить ее продольный размер.

При исследовании небольших (с продольным диаметром до 10 мкм) пор в веществе вместо фазосдвигающей пластинки удобнее использовать выемку в веществе, поскольку в этом случае сохраняется пропорциональность между высотой поднятия интенсивности и вносимым микротрубкой сдвигом фаз. Именно за счет использования выемки в расчетах на рис. 5 (а) мелкие поры изображаются в режиме положительного контраста, то есть их изображения возвышаются над уровнем фона.

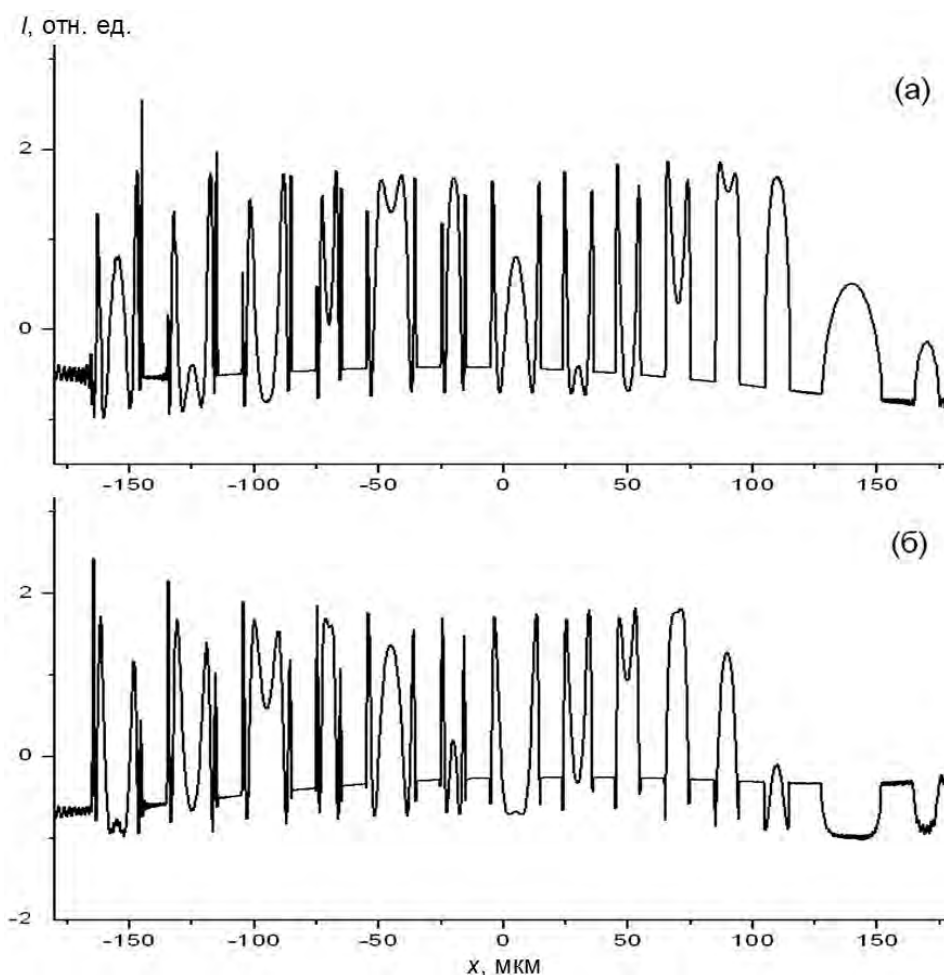


Рис. 5. Изображения: (а) серии крупных пор в кристалле SiC; (б) серии крупных эллиптических объектов таких же размеров.

Часто микротрубки в карбиде кремния исследуются в белом пучке (например, в работах [8, 9]). В такой схеме измерений монохроматор не используется. Это приводит к частичной потере временной когерентности, но зато в этом случае возрастает число регистрируемых фотонов и, следовательно, увеличивается отношение сигнал/шум. В данной работе было показано, что отсутствие существенной монохроматизации не приводит к заметному ухудшению картины. Слабое влияние спектра на изображение объектов с малым сечением объясняется тем, что модуль сдвига фазы $|P| = (2\pi/\lambda)\delta t$, вносимого образцом в падающую волну, линейно растет с длиной волны излучения, так как индекс преломления δ с высокой точностью пропорционален λ^2 , поскольку такую зависимость от λ в первом

приближении имеет амплитуда рассеяния излучения на одном электроде. В результате увеличение контраста при меньших энергиях компенсирует его уменьшение при больших энергиях.

В главе 5 исследуются особенности, возникающие при моделировании фазового контраста Цернике в двумерном случае. Используется расчетная сетка из $N = 1024 \cdot 1024$ точек. Основная сложность при проведении двумерных расчетов заключается в невозможности задания сетки с большим числом точек из-за большого времени вычислений и ресурсов памяти. Известно, что в методе FFT имеются ограничения, налагаемые на такие параметры, как шаги в прямом и обратном пространстве, размер расчетной области в прямом пространстве. И часто эти ограничения приводят к возникновению артефактов в изображении объектов. Поэтому достаточно надежно получаются только дифракционные картины от мелких объектов, размеры которых значительно меньше расчетной области. В одномерном случае таких проблем не возникает, поскольку можно задать большие размеры расчетной области и мелкий шаг одновременно.

Из рис. 6 (а) видно, что наиболее отчетливо линзой изображаются объекты, расположенные в центре апертуры. Однако можно получить такое же качественное изображение и остальных объектов, если использовать метод, аналогичный птихографии [10]. Он заключается в том, что крупный объект изображается не целиком, а по частям, при этом каждый раз рассматриваемая часть объекта располагается напротив той области объектива, где изображение наиболее качественное. В случае с линзой это центр апертуры. Впоследствии полученные изображения участков объекта складываются в единую картину. При этом существенно, что изображаемая часть объекта выделяется щелью, в то время как остальная часть пучка блокируется. На рис. 6 (б) показано изображение тех же объектов, что и на рис. 6 (а), но полученное указанным методом. Видно, что такой подход позволяет заметно улучшить качество изображения и выровнять контраст.

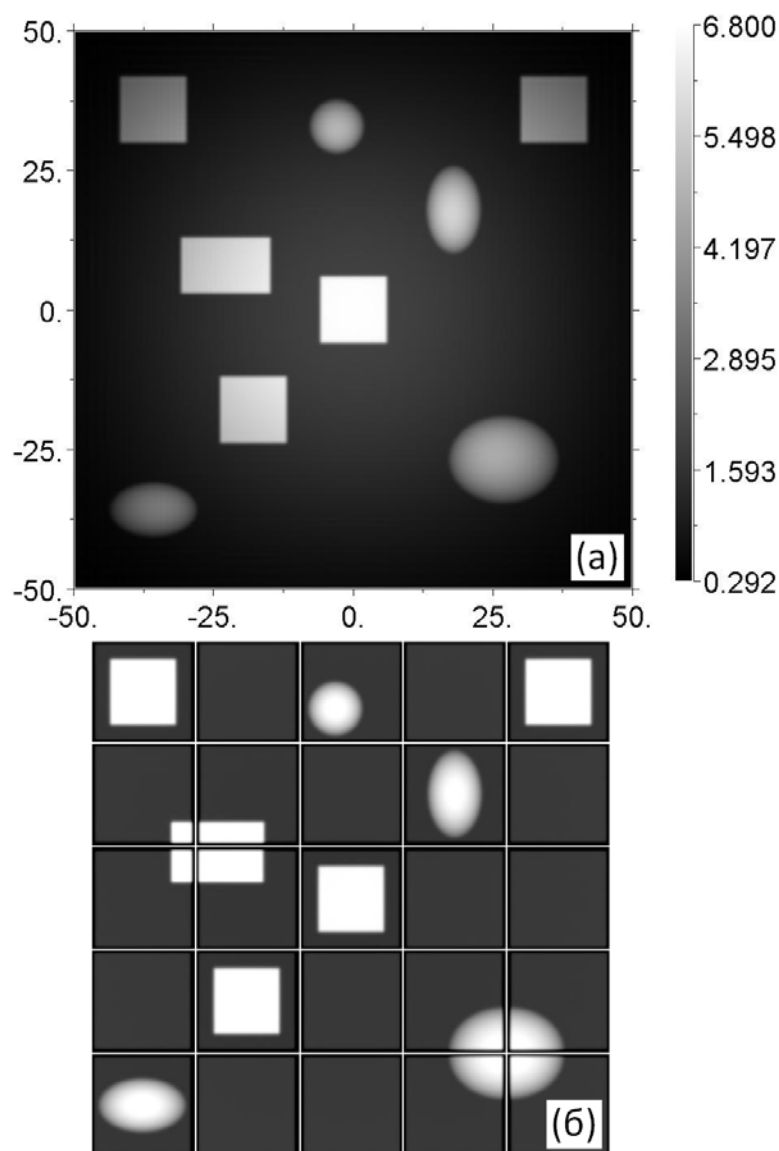


Рис. 6. Изображение линзой серии кремниевых объектов: (а) без применения птихографии; (б) с применением птихографии.

На рис. 7 (а) представлены результаты расчета с использованием зонной пластинки на сетке из $2048 \cdot 512$ точек. На данном рисунке показано изображение зонной пластинкой серии кремниевых объектов одинакового продольного размера, расположенных в центральной области апертуры. При этом на изображение самих объектов накладывается изображение центральных зон зонной пластинки. Видно также, что изображение центральных зон повторяется на краях расчетной области. Это связано с тем,

что интеграл Фурье заменяется на ряд Фурье и существует минимальный вектор обратной решетки. Шаг сетки в q -пространстве равен $dq = 2\pi/X$, где X – размер расчетной области. Поскольку сетка имеет четное число точек, то нулевой точки нет и минимальный вектор обратной решетки равен $dq/2$. Поэтому изображение в прямом пространстве является периодическим с периодом $X/2$. При удалении от центра интенсивность этих артефактов ослабляется, что связано с наличием более высоких гармоник в ряде Фурье.

В случае с зонной пластинкой, как и в случае с линзой, для улучшения качества изображения может быть применена методика, аналогичная птихографии. Однако при этом щель (диафрагму), вырезающую часть объекта, следует помещать не в центре, а на определенном удалении от него. В экспериментах объект помещают ближе к краю апертуры, где находятся наиболее мелкие зоны, и за счет этого улучшают разрешение. В численных

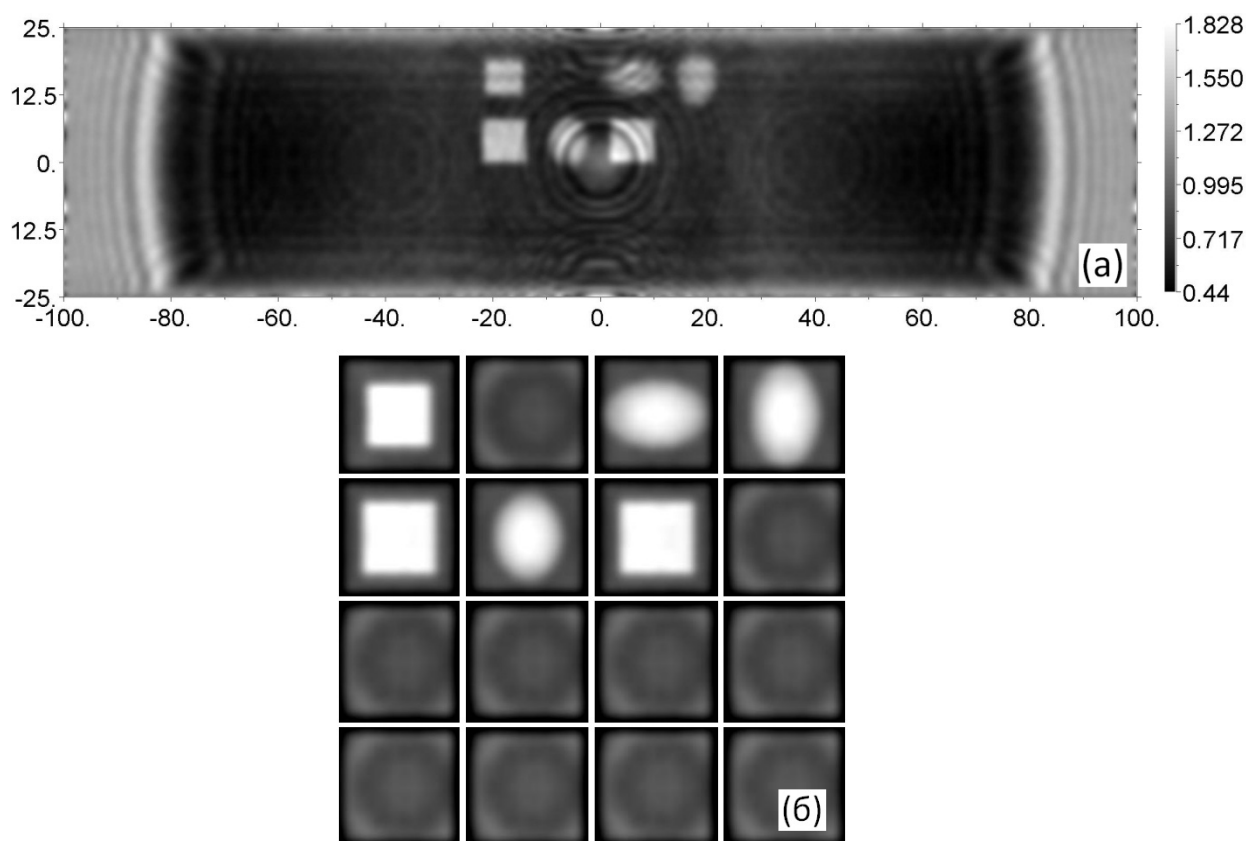


Рис. 7. Изображение зонной пластинкой серии кремниевых объектов: (а) без применения птихографии; (б) с применением птихографии.

расчетах объект следует расположить так, чтобы, с одной стороны, зоны были достаточно мелкими, с другой – чтобы на одну зону приходилось достаточное число точек для адекватного описания рельефа зонной пластинки. На рис. 7 (б) показано изображение тех же объектов, что и на рис. 7 (а), методом птихографии. Центр щели находился в точке с координатами (0, -40). Как и в случае с линзой, данный подход позволяет сделать изображение более качественным.

Основные выводы диссертации

1. Теоретический анализ показал, что преломляющие линзы могут эффективно формировать изображения фазовых объектов в схеме фазового контраста Цернике в диапазоне жесткого рентгеновского излучения. Поскольку рентгеновские собирающие линзы являются очень тонкими в центральной области, наиболее отчетливо изображаются объекты в центральной части апертуры. На краях апертуры линзы поглощают, что приводит к заметной порче изображений.
2. Рентгеновские зонные пластинки также могут быть использованы в качестве фокусирующего элемента в методе фазового контраста Цернике. Зонная пластинка обладает одинаковой толщиной вдоль всей апертуры и практически не поглощает падающее на нее излучение. Однако у зонной пластинки имеется бесконечное количество порядков фокусировки, излучение от которых, попадая на детектор, приводит к порче изображения. В результате качество изображения, формируемого зонной пластинкой, оказывается хуже, чем при использовании преломляющей линзы. Чтобы исключить влияние минус первого порядка фокусировки, исследуемый объект следует смещать в сторону от оптической оси. Кроме того, при

использовании зонных пластинок изображение портится за счет слишком высокой степени когерентности пучка, приводящей к паразитной интерференции разных порядков, поэтому для улучшения качества изображения следует вводить в систему фазовый шум за счет вращающихся рассеивателей.

3. Численное моделирование показало, что вокруг изображения наблюдается поднятие или проседание фона. Это означает, что формирование изображений происходит и за пределами изображений, что является чисто дифракционным эффектом. Этот эффект не следует из теории Цернике, однако он логично вытекает из соображений сохранения интегральной интенсивности.
4. Изображение, формируемое линзой, может быть легко скорректировано путем деления результирующего профиля интенсивности на функцию поглощения в линзе с коэффициентом, незначительно отличающимся от единицы. Это отличие обусловлено влиянием фазосдвигающей пластинки, вносящей незначительное изменение в профиль интенсивности в плоскости детектора. В результате данной процедуры не только выравнивается фон, но и контраст восстанавливается сам собой.
5. Метод фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении может быть использован для изучения структуры микротрубок в кристаллах карбида кремния. Показано, что данный метод позволяет восстанавливать структуру эллиптических сечений пор субмикронных размеров, которые не удастся исследовать с помощью метода фазового контраста в in-line схеме. Преломляющая линза позволяет увеличивать изображение в десятки раз. При исследовании мелких сечений микротрубок с продольным диаметром до 10 мкм вместо выпуклой фазосдвигающей пластинки удобнее использовать выемку в веществе.

6. В изображении сильно вытянутых в продольном направлении сечений микротрубок возникают специфические осцилляции. Зная число осцилляций и высоту поднятия центрального пика, можно рассчитать продольный размер эллиптического сечения поры.
7. Показано, что качественное изображение сечений микротрубок можно получить без существенной монохроматизации пучка, которая понижает интенсивность сигнала и не всегда желательна.
8. При проведении двумерных расчетов в изображении объектов возникают артефакты, связанные с малым числом точек расчетной сетки в горизонтальном и вертикальном направлениях. В случае использования преломляющей линзы в роли фокусирующего элемента наиболее качественное изображение формируется в центральной области, при использовании зонной пластинки – на некотором удалении от оптической оси, поскольку в центральной области на изображение объектов накладывается изображение первых зон зонной пластинки. Показано, что качество изображения может быть заметно улучшено путем использования метода птихографии.

Публикации по теме диссертации

1. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Численное моделирование фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении с использованием преломляющих линз и зонных пластинок. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010, N. 11, с. 76-81.
2. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Корректировка изображения в методе фазового контраста Цернике для жесткого рентгеновского излучения. // Труды МФТИ, 2011, т. 3, N. 2, с. 64-68.
3. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Теоретический анализ возможностей метода фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении для

- неразрушающего изображения микротрубок в монокристалле карбида кремния. // Кристаллография, 2011, 56, N. 6, с. 1007-1012.
4. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Компьютерный анализ двумерных изображений в методе фазового контраста Цернике для жестких рентгеновских лучей. // Кристаллография, 2012, 57, N. 5, с. 761-766.
 5. М.А. Орлов, В.Г. Кон. Численное моделирование фазового контраста Цернике в жестком рентгеновском излучении с использованием преломляющих линз и зонных пластинок. / Тезисы докладов. VII Национальная конференция «Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии». РСНЭ-НБИК 2009. ИК РАН, Москва, 16-21 ноября 2009, с. 505.
 6. М.А. Орлов. Теоретический анализ особенностей рентгеновского метода фазового контраста Цернике при использовании преломляющих линз и зонных пластинок. / Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010» [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2010. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.
 7. М.А. Орлов. Возможности рентгеновского метода Цернике на примере микротрубок в карбиде кремния. / Сб. аннотаций. 8-ая Курчатовская молодежная научная школа, РНЦ КИ, Москва, 22-25 ноября 2010, с. 132.
 8. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Корректировка изображения в методе Цернике для жесткого рентгеновского излучения. / Тезисы докладов. 4-ая всероссийская конференция молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение», ИПТМ РАН, Черноголовка, 22-24 ноября 2010, с. 80.
 9. М.А. Орлов. Границы применимости метода фазового контраста Цернике для жесткого рентгеновского излучения. / Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2011» [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2011. — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см.

10. V.G. Kohn, M.A. Orlov. Computer study of micropipe structure in SiC using Zernike phase contrast method in hard X-ray radiation. / Materials of the 5-th forum «Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy». Symposium and summer school (tutorial lectures), Moscow – Zelenograd, Russia, September 12-16, 2011, p. 148. Internet-resource: http://asdn.net/ngc2011/raw_abstracts//attached_abstracts/110430114016/abstract.pdf
11. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Исследование сильно вытянутых в продольном направлении объектов методом Цернике в жестком рентгеновском излучении. / Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии): сборник материалов и программа 3-й международной молодежной научной школы-семинара. НФ СПбГУСЭ, Великий Новгород, 12-16 сентября 2011 г, с. 66.
12. В.Г. Кон, М.А. Орлов. Теоретическое исследование особенностей формирования изображений микро- и нанообъектов в методе фазового контраста Цернике с использованием синхротронного излучения. / Тезисы докладов. VIII Национальная конференция «Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии». РСНЭ-НБИК 2011. ИК РАН, Москва, 14-18 ноября 2011, с. 470.

Список цитированной литературы

1. В.А. Соменков, А.К. Ткалич, С.Ш. Шильштейн. Рефракционный контраст в рентгеновской интроскопии. // ЖТФ, 1991, т. 61, с. 197-201.
2. A.A. Snigirev, I.I. Snigireva, V.G. Kohn, S.M. Kuznetsov, I.A. Schelokov. On the possibilities of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation. // Rev. Sci. Instrum., 1995, vol. 66, N. 12, p. 5486-5492.

3. Zernike F. Phase contrast method in microscopic observations (in german). // Z. technische Physik, 1935, 16, p. 454-457.
4. G. Schmahl, D. Rudolph, P. Guttman, G. Schneider, J. Thieme, B. Niemann. Phase contrast studies of biological specimens with the x-ray microscope at BESSY (invited). // Rev. Sci. Instrum., 1995, vol. 66, N. 2, p. 1282-1286.
5. M. Awaji, Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano, N. Kamijo, S. Tamuraa, M. Yasumoto. Zernike-type X-ray imaging microscopy at 25 keV with Fresnel zone plate optics. // J. Synchrotron Rad., 2002, 9, p. 125-127.
6. Y.S. Chu, J.M. Yi, F. De Carlo, Q. Shen, Wah-Keat Lee, H.J. Wu, C.L. Wang, J.Y. Wang, C.J. Liu, C.H. Wang, S.R. Wu, C.C. Chien, Y. Hwu, A. Tkachuk, W. Yun, M. Feser, K.S. Liang, C.S. Yang, J.H. Je, G. Margaritondo. // Hard-x-ray microscopy with Fresnel zone plates reaches 40 nm Rayleigh resolution. Appl. Phys. Lett., 2008, vol. 92, 103119.
7. Интернет-ресурс: <http://alglib.sources.ru/fft>
8. V.G. Kohn, T.S. Argunova, Ho Je Jung. Study of micropipe structure in SiC by x-ray phase contrast imaging. // Appl. Phys. Lett., 2007. vol. 91, 171901.
9. В.Г. Кон, Т.С. Аргунова, Но Je Jung. Особенности фазово-контрастных изображений микротрубок в SiC в белом пучке синхротронного излучения. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, N. 1, с. 5-10.
10. J.M. Rodenburg. Ptychography and Related Diffractive Imaging Methods, в серии «Advances in imaging and electron physics», V. 150, p. 87.