

На правах рукописи

КУПЕР Константин Эдуардович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИК РЕНТГЕНОВСКОЙ
МИКРОСКОПИИ И ТОМОГРАФИИ НА ИСТОЧНИКЕ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЭПП-3**

**01.04.01 - приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЗОЛОТАРЕВ – кандидат физико-математических наук,
Константин Учреждение Российской академии наук Институт
Владимирович ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского
отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КНЯЗЕВ – доктор физико-математических наук, профессор,
Борис Александрович Учреждение Российской академии наук Институт
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского
отделения РАН, г. Новосибирск.

ПАЛЬЧИКОВ – доктор технических наук,
Евгений Иванович Учреждение Российской академии наук Институт
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ – Национальный исследовательский центр
ОРГАНИЗАЦИЯ «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2011 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высокая проникающая способность рентгеновского излучения дала исследователям уникальный инструмент для неразрушающего контроля изучаемых объектов. Рентгеновская интроскопия актуальна во многих областях науки, таких как медицина, геология, материаловедение, археология и др. Исследования, проводимые с помощью рентгеновского излучения, часто являются единственным способом изучения внутреннего строения уникальных объектов без их разрушения.

Одной из методик, появившихся вследствие развития рентгеновской интроскопии и компьютерной техники, стала вычислительная рентгеновская томография (ВРТ). Предпосылкой ВРТ послужили недостатки обычной рентгенографии, породившие идею получения не одного, а ряда снимков, выполненных под разными ракурсами, и построения по ним путем математической обработки трехмерного распределения плотностей в исследуемом объекте. Возможность определения внутренней трехмерной структуры объектов без их разрушения является очень ценным качеством и широко используется в медицине и других областях.

В последнее время большое количество научных групп во всем мире занимаются развитием методов рентгеновской микроскопии и томографии. Такой интерес вызван несколькими факторами, повлиявшими на прогресс в этой области.

Во-первых, это создание в середине прошлого века сверхъярких в рентгеновском диапазоне специализированных источников синхротронного излучения (СИ) на основе накопителей электронов высокой энергии. К неоспоримым достоинствам СИ можно отнести высокую интенсивность, непрерывный спектр излучения, малую угловую расходимость и естественную поляризацию. Все вышеперечисленные качества сделали СИ незаменимым источником в ряде экспериментов с использованием рентгеновской микроскопии, позволяя получать данные о структуре объекта с микронным и субмикронным разрешением за доли секунды.

Во-вторых, благодаря развитию микроэлектроники, появились детекторы с высоким пространственным разрешением, позволяющие получать изображение в рентгеновском диапазоне. Несомненным достоинством цифровых детекторов является большой динамический диапазон регистрации, позволяющий значительно увеличить информативность рентгеновских изображений. Тот факт, что изображение существует в цифровом виде, дает исследователю безграничные возможности в проведении любой математической обработки данных.

И наконец, третьим стимулирующим фактором развития стало создание рентгенооптических элементов, позволяющих еще больше повысить качество и пространственное разрешение получаемых изображений.

Технология производства рентгенооптических элементов бурно развивается в последнее время, используя новейшие достижения, полученные в различных областях материаловедения, микроэлектроники и нанотехнологий. Неоценимым достоинством рентгеновской оптики является возможность получения не только амплитудно-модулированных (теневых) изображений, но и сформированных изменением фазы падающей электромагнитной волны при прохождении через объект. Это свойство рентгенооптических элементов делает возможным регистрацию слабоконтрастных деталей (менее 1%) в рентгеновском диапазоне.

В ИЯФ СО РАН рентгеновской микроскопией с использованием СИ начали заниматься с 70-х годов прошлого столетия, однако экспериментальная установка на основе современных цифровых детекторов и рентгенооптических элементов, позволивших существенно поднять пространственное разрешение, была создана только в 2005 г. Новая станция СИ «Микроскопия и томография» стала актуальным и популярным инструментом для многочисленных исследований.

Цель работы

Разработка и создание аппаратно-методического комплекса для проведения широкого круга исследований в области рентгеновской микроскопии и томографии в поли- и монохроматическом излучении с пространственным разрешением от 3 до 100 мкм. В качестве первоочередных задач было определено исследование уникальных образцов в области минералогии и археологии, изучение микроструктуры энергетических материалов и контроль качества изготовления рентгеношаблонов, используемых в LIGA-процессе.

Личный вклад автора

Вклад автора в создание станции «Микроскопия и томография» на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3 был основным и определяющим.

Большая часть описанных в диссертации расчетных и экспериментальных результатов получена непосредственно автором.

Автором были разработаны и созданы программы, необходимые для обработки и восстановления трехмерных изображений методом ВРТ.

Автором были проведены многочисленные эксперименты в области ВРТ, рентгеновской микроскопии и топографии.

Обработка экспериментальных данных и визуализация полученных результатов также проводилась автором данной работы.

Научная новизна

Создана специализированная станция СИ, позволяющая проводить эксперименты в области рентгеновской микроскопии в диапазоне длин волн от 0.14 до 2 Å.

Впервые реализована схема трехкристальной топографии с использованием увеличенного изображения от асимметрично срезанных кристаллов.

Предложен метод контроля качества рентгеношаблонов на основе увеличенного изображения с помощью асимметрично срезанных кристаллов.

Проведены исследования природных алмазов методом ВРТ для выявления последовательности их кристаллизации.

Проведены исследования методом ВРТ неоднородности плотности энергетических материалов с разрешением в единицы микрон.

Получены трехмерные изображения внутреннего строения уникальных археологических предметов, что позволило значительно дополнить информацию об объектах исследований.

Научная и практическая ценность

Разработанная и созданная установка позволяет получать данные о трехмерной структуре объектов в поли- и монохроматическом излучении СИ (с возможностью перестройки в диапазоне длин волн от 2 до 0.3 Å). Пространственное разрешение регистрируемых изображений зависит от геометрических размеров изучаемых объектов и составляет 100 мкм для образцов с габаритами до 45×45×50 мм³.

Разработанный и реализованный микроскоп на основе увеличителя с использованием асимметрично срезанных кристаллов позволяет получать трехмерные фазоконтрастные изображения объектов с габаритами до 2×2×2 мм³ и пространственным разрешением не хуже 3 мкм.

Основные положения, выносимые на защиту

Разработаны методики проведения томографических исследований с пространственным разрешением от 3 мкм до 100 мкм на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3.

Создана установка для вычислительной рентгеновской томографии и микроскопии с использованием увеличения изображения на основе отражения от асимметрично срезанных кристаллов.

Результаты исследований, полученных методом рентгеновской микроскопии, для аттестации рентгеношаблонов, использующихся в LIGA-процессе.

Результаты исследований трехмерной структуры энергетических материалов, полученные методом ВРТ.

Результаты исследований методом рентгеновской топографии морфологии природных алмазов из кимберлитовых трубок и россыпей Якутской алмазоносной провинции.

Результаты томографических исследований уникальных археологических находок и геологических образцов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: международные конференции по использованию синхротронного излучения (Новосибирск, 2006, 2008, 2010 гг.); Симпозиум «Нанозлектроника и нанозлектроника» (Нижегород, 2007 г.); Национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования наноматериалов и наносистем, РСНЭ НАНО (Москва, 2007 г.);

XXIV International conference on interaction of intense energy fluxes with matter (Эльбрус, 2009 г.); 6th World Congress on industrial process tomography WCIPT6 (Пекин, 2010 г.).

Результаты работы были опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах: «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A»; «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования»; «Физика горения и взрыва»; «Геология и геофизика»; «Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации содержит 129 страниц, 77 рисунков и 1 таблицу. Список литературы состоит из 111 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведен краткий обзор истории рентгеновской микроскопии и томографии. Обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи проводимых исследований. В конце перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий обзор трех основных частей, определяющих развитие рентгеновской микроскопии в мире, к которым можно отнести источники излучения, рентгеночувствительные детекторы и рентгеновскую оптику. В первой части главы приводятся сравнительные характеристики рентгеновских источников и описываются преимущества синхротронного излучения (СИ). Далее рассматриваются и классифицируются детекторы, используемые в рентгеновской микроскопии в настоящее время. Последний раздел главы содержит описание основных

рентгенооптических элементов, используемых для повышения пространственного разрешения метода, и приводятся их базовые характеристики. В конце главы обосновывается целесообразность использования асимметрично срезанных кристаллов как элементов увеличивающей оптики.

Вторая глава содержит описание созданной станции «Микроскопия и томография» на канале СИ из ускорительного комплекса ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Глава начинается с описания характеристик источника СИ, используемого в экспериментах. Приводятся основные параметры, включающие в себя размер, угловое и спектральное распределение СИ, приходящего на станцию.

Далее описывается устройство и оптическая схема рентгеновского монохроматора. Обосновывается степень монохроматизации ($\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-4}$) и рабочий диапазон длин волн используемого рентгеновского излучения.

В пункте 2.3 приводится описание экспериментального объема, включающего в себя держатель образца, увеличитель на асимметрично срезанных кристаллах и детектор рентгеновского излучения.

Двухкоординатный детектор рентгеновского излучения (фирма Photonic Science) выполнен на базе ПЗС-матрицы размером 4008×2670 элементов.



Рис.1. Увеличитель на основе асимметрично срезанных кристаллов. 1 – исследуемый образец, 2, 3 – первый и второй асимметрично срезанные кристаллы, 4 – двухкоординатный детектор.

Для повышения пространственного разрешения регистрируемых изображений на станции используется увеличитель на основе асимметрично срезанных кремниевых кристаллов. Два кристалла, расположенные в перпендикулярном относительно друг друга направлении (схема Киркпатрика - Баеза), обеспечивают увеличение рентгеновского изображения по двум координатам (рис. 1). Асимметрично срезанные

кристаллы, изготовленные совместно с ИФП СО РАН, имеют рабочую кристаллографическую плоскость (111) с углом к поверхности 9.15° . Кристаллы имеют высокое качество рабочей поверхности с шероховатостью на уровне 0.2 мкм. Кристаллы изготовлены из одного кремниевого моноблока и имеют абсолютно идентичные рентгенооптические свойства.

Увеличение, получаемое при отражении монохроматического излучения от поверхности кристаллов, вычисляется по следующей формуле:

$$m = \frac{\sin(\theta_{br} + \varphi)}{\sin(\theta_{br} - \varphi)} \quad (1)$$

Где θ_{br} – угол, соответствующий условию Вульфа-Брэгга, φ - угол между поверхностью и кристаллографической плоскостью.

Коэффициент увеличения зависит от энергии используемого рентгеновского излучения и в наших экспериментах варьируется в диапазоне от 15 до 30.

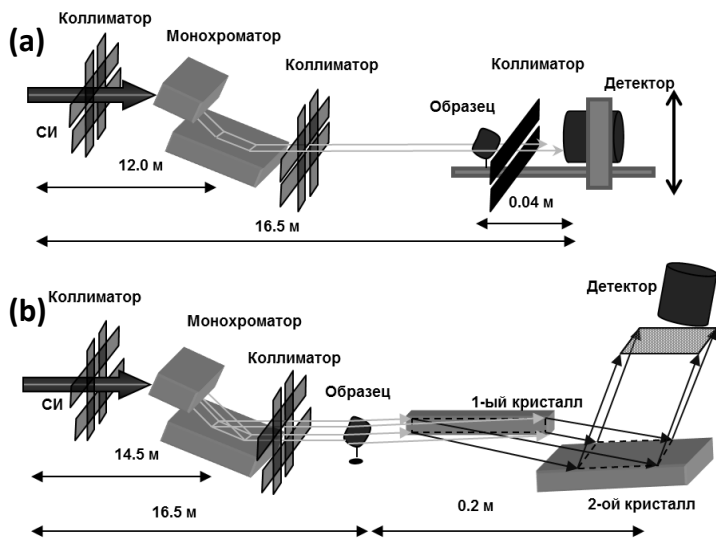


Рис.2. Схемы получения изображений. Схема без увеличения (а) и схема с использованием асимметрично срезаемых кристаллов (б).

На станции реализовано две схемы получения изображений. В первой предусматривается исследование крупных образцов, не требующее высокого пространственного разрешения (рис. 2а). Во второй схеме используется увеличитель на основе асимметрично срезаемых кристаллов, позволяющий поднять разрешение регистрируемых изображений до 2-3 мкм (рис. 2б).

В схеме без увеличения исследуемый образец, жестко связанный с детектором, сканируется в вертикальном направлении относительно

плоского монохроматического излучения, вырезаемого коллиматором. Максимальные геометрические размеры исследуемых объектов ограничены горизонтальным размером пучка СИ, равным 45 мм.

В схеме с использованием асимметрично срезанных кристаллов размеры исследуемых объектов определяются рабочим полем микроскопа и составляют $1 \times 1 \text{ мм}^2$ для коэффициента увеличения 30 и $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$ для коэффициента увеличения 15.

В заключении главы описывается система управления и обработки данных, используемых на нашей установке. Программный интерфейс, написанный автором, позволяет обеспечить синхронизацию всех процессов, необходимых для проведения и получения трехмерных изображений методом ВРТ.

Третья глава посвящена исследованию качества цифровых изображений, определяемого пространственным разрешением, контрастом и шумами в получаемых нами данных.

Проведен анализ получаемого пространственного разрешения в схемах без увеличения и с использованием асимметрично срезанных кристаллов. Для экспериментального определения пространственного разрешения вводится понятие функции распыливания линии (ФРЛ), получаемой методом «наклонного края». Ширина на полувысоте (ШПВ) этой функции численно определяет разрешение системы в вертикальном и горизонтальном направлениях. Далее вычисляется функция частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), которая связывает пространственную частоту, определяющую разрешение, и контраст в регистрируемых изображениях.

Для схемы без увеличения обсуждаются параметры, влияющие на пространственное разрешение получаемых изображений.

На основе динамической теории Эвальда и представления электромагнитной волны в виде интеграла Френеля вычисляются теоретические аппаратные функции для пространственного разрешения в схеме с использованием асимметрично срезанных кристаллов.

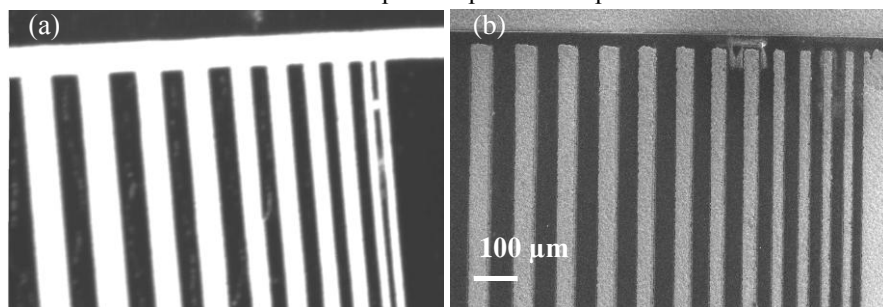


Рис.3. Изображение тест-объекта, полученное на нашей установке с 20-кратным увеличением (а) и с помощью электронной сканирующей микроскопии (б).

Приводится сравнение вычисленных и полученных экспериментально данных, и объясняется причина их расхождения. Для 20-кратного увеличения с использованием монохроматической длины волны ($\lambda=1.13 \text{ \AA}$) экспериментально измеренное разрешение в вертикальном направлении составляет 2.37 мкм, а для горизонтального направления - 2.25 мкм.

На рис. 3 показано изображение тест-объекта, полученное на нашей установке и с помощью электронной сканирующей микроскопии (ширина самой маленькой полоски составляет 10 мкм).

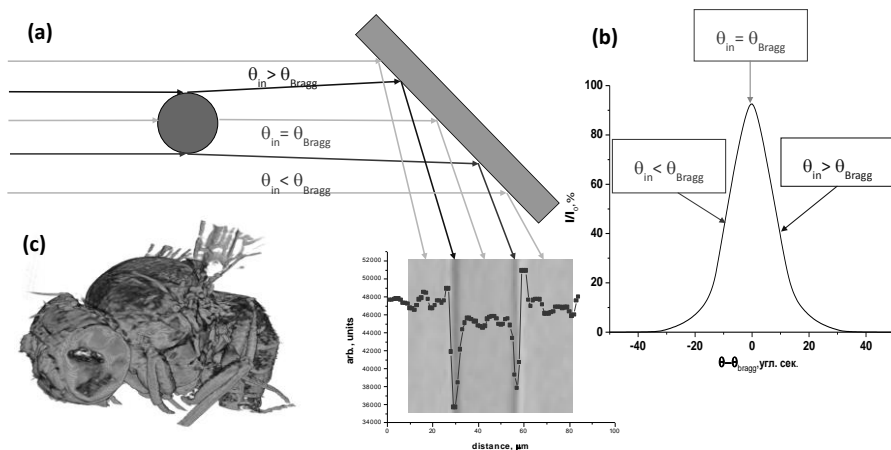


Рис.4. (а) – Получение рефракционного контраста в изображении нейлоновой нити при отражении от асимметрично срезанного кристалла, (b) – зависимость интенсивности отраженного излучения от угла падения на кристалл, (с) - трехмерное изображение мухи дрозофилы, полученное методом ВРТ.

Для рентгеновского диапазона, который мы использовали в наших экспериментах, значение декремента преломления δ лежит в пределах $10^{-5} - 10^{-6}$, поэтому угол рефракции не превышает нескольких угловых секунд. Но, так как интенсивность отраженного излучения от асимметрично срезанных кристаллов меняется от угла падения в пределах 30-50 угл. сек. (рис. 4b), то в получаемых нами изображениях появляется рефракционный контраст. Контраст, обусловленный изменением фазы, может в несколько раз превосходить вариацию интенсивности, вызванную поглощением рентгеновского излучения в объекте. На рис. 4а видно, что рефракционный контраст от нейлоновой нити превосходит амплитудный более чем в 5 раз. Особенно различие контрастов заметно для биологических и органических объектов, для которых поглощение в рентгеновском диапазоне составляет несколько процентов. На рис. 4с приведено трехмерное изображение мухи дрозофилы, полученное методом ВРТ на нашей установке.

В пункте 3.3 проводится анализ шумов и делается вывод о минимальной экспозиции, необходимой для получения приемлемой статистики в регистрируемых изображениях.

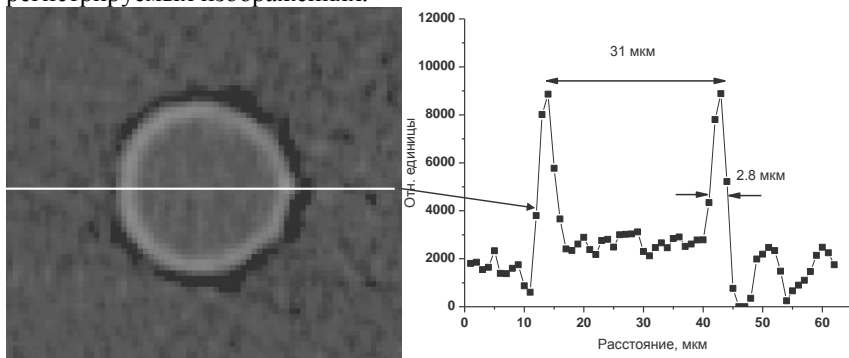


Рис.5. Распределение плотности полимерной нити, восстановленное методом ВРГ.

В пункте 3.4 рассмотрен алгоритм получения трехмерных изображений с использованием метода обратного проецирования с фильтрацией. Сделан вывод о количестве проекционных данных, необходимых для получения восстановленного изображения без заметной потери пространственного разрешения. Приведен пример восстановленного изображения полимерной нити, из которого видно, что параметры источника СИ из ускорительного комплекса ВЭПП-3 и нашей установки обеспечивают пространственное разрешение на уровне 3 мкм.

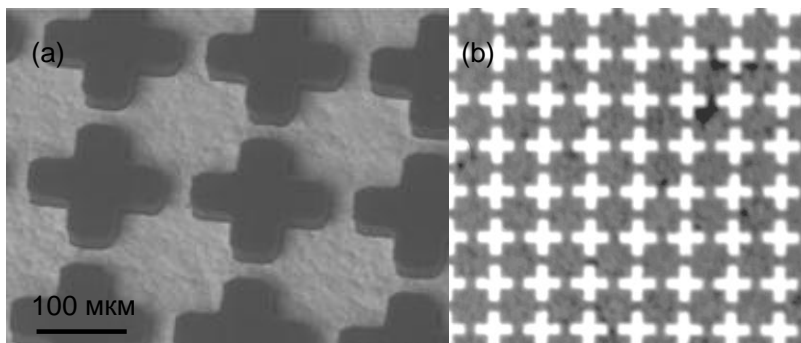


Рис.6. Изображения золотого рентгеношаблона, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (а) и методом рентгеновской микроскопии (б).

В четвертой главе представлены основные результаты, полученные на станции «Микроскопия и томография», расположенной на канале СИ из

ускорительного комплекса ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Работы, проводившиеся на станции, можно разделить на две основные части.

Первый класс задач был посвящен исследованию двумерных проекций, полученных методами рентгеновской микроскопии и топографии. Он включал в себя исследование качества изготовления рентгеношаблонов, создаваемых в ИЯФ СО РАН для глубокой рентгенолитографии. Сюда же относится изучение морфологии кристаллической структуры природных алмазов. На рис. 6 показаны изображения золотого рентгеношаблона, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа и с помощью увеличителя на основе асимметрично срезанных кристаллов. Видно, что электронная микроскопия имеет более высокое пространственное разрешение, чем рентгеновские изображения, но она дает информацию только о поверхности исследуемых объектов. Получение изображения дефектов, скрытых в глубине поглощающего слоя, может дать только анализ микроизображений в рентгеновском диапазоне. Следует отметить еще одно важное преимущество рентгеновской микроскопии - возможность получать сведения о толщине и рельефе поглощающего слоя в рентгеношаблоне.

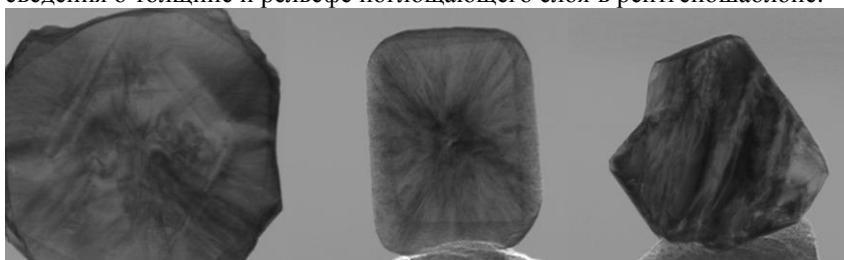


Рис.7. Топограммы алмазов с различной морфологией, снятые в прошедшем излучении.

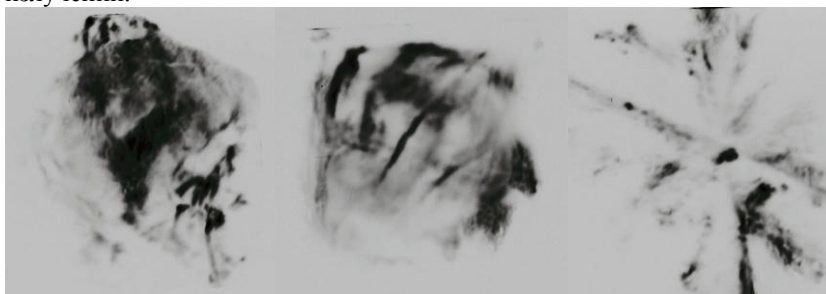


Рис.8. Топограммы алмазов с различной морфологией, снятые в отраженном излучении.

На базе установки была впервые реализована схема трехкристалльной топографии, позволяющая регистрировать изображения алмазов как в прошедшем, так и в отраженном под Брэгговским углом излучении.

При регистрации в прошедшем излучении получается наложение двух изображений, обусловленное поглощением рентгеновского излучения в кристалле и ослаблением интенсивности из-за Брэгговского отражения (рис. 7). В этом случае можно хорошо соотнести внутреннюю неоднородность кристаллической решетки к геометрии самого кристалла.

Для более тщательной характеристики морфологии кристалла необходимо получать информацию, не искаженную изображением дефектов поверхности и формой кристалла. В этом случае регистрация в отраженном излучении позволяет получать изображение, определяемое только дефектами кристаллической структуры алмаза (рис. 8).

Второй класс задач состоял в исследовании трехмерной структуры образцов методами вычислительной рентгеновской томографии. С помощью ВРТ были исследованы образцы геологических пород, микроструктура энергетических материалов (взрывчатые вещества и твердое ракетное топливо), а также изучены уникальные археологические объекты, предоставленные Институтом археологии и этнографии СО РАН.

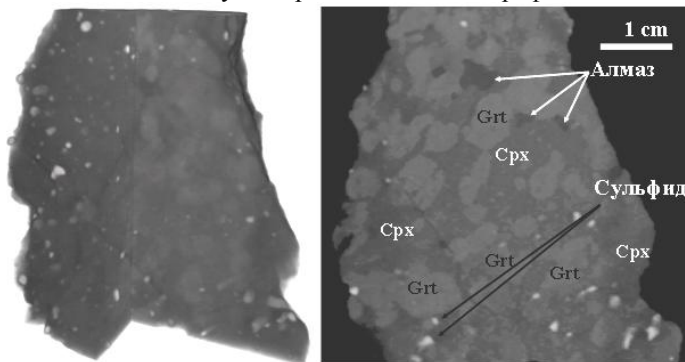


Рис.9. Распределение породообразующих минералов в образце алмазоносной породы, полученное методом ВРТ (Срх-клинопироксен, Grt-гранат).

Метод ВРТ позволил оптимизировать геологические исследования при определении минерального (фазового) состава и текстурно-структурных особенностей алмазоносных пород. Отсутствие этапа предварительной подготовки объекта (распиловка, изготовление полированных шлифов, напыление и др.) ускорило проводимые геолого-минералогические исследования. Полученное трехмерное распределение минералов в алмазоносных образцах значительно упростило обнаружение редких фазовых превращений, происходивших в период образования мантийных пород. Наши результаты дали возможность охарактеризовать генетические взаимоотношения и последовательность кристаллизации алмазов и сопутствующих минералов в глубинных зонах Земли (рис. 9).

Исследование трехмерной структуры энергетических материалов (ЭМ) с

помощью ВРТ позволяет исследовать распределение неоднородности плотности в изучаемом объекте. Чувствительность к детонации во многом определяется микроструктурой ЭМ. Наша установка дает трехмерное распределение неоднородностей в непрозрачных для видимого диапазона ЭМ с разрешением на уровне 3 мкм.

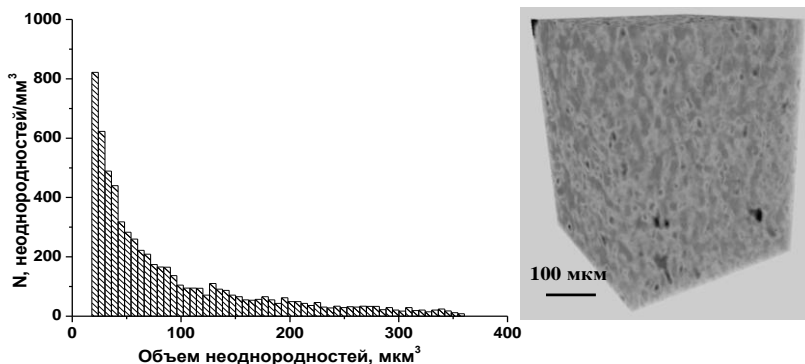


Рис.10. Трехмерная структура ЭМ и гистограмма распределения неоднородностей.

Высокая чувствительность микроскопа к изменению фазы излучения, прошедшего через исследуемый объект, визуализирует небольшие вариации (менее 0.1%) плотности в объеме ЭМ (рис. 10). Оперативно получаемая информация позволила проводить *insitu* исследования образования пор в процессе термоциклирования образцов взрывчатых веществ. Эти данные очень важны при моделировании структурных изменений, происходящих в ЭМ во время старения. Обнаружено, что во время нагрева образуются микропоры размерами до 60 мкм. Такие размеры неоднородностей являются недопустимыми для исследуемых нами ЭМ.

Применяя методики ВРТ, можно провести датировку возраста уникальных деревянных археологических находок (рис. 11а) на основании древесно-кольцевого анализа, или дендрохронологии. Обычно такой анализ проводится на поперечных спилах или кернах, то есть с разрушением образца. Ясно, что для уникальных археологических предметов это невозможно.

Трехмерное изображение (рис. 11б), полученное нами в монохроматическом излучении ($\lambda=0.9 \text{ \AA}$) методом ВРТ, позволяет создавать виртуальный разрез предмета в любой требуемой плоскости. В итоге получают привычные для древесно-кольцевого анализа данные (рис. 11в).

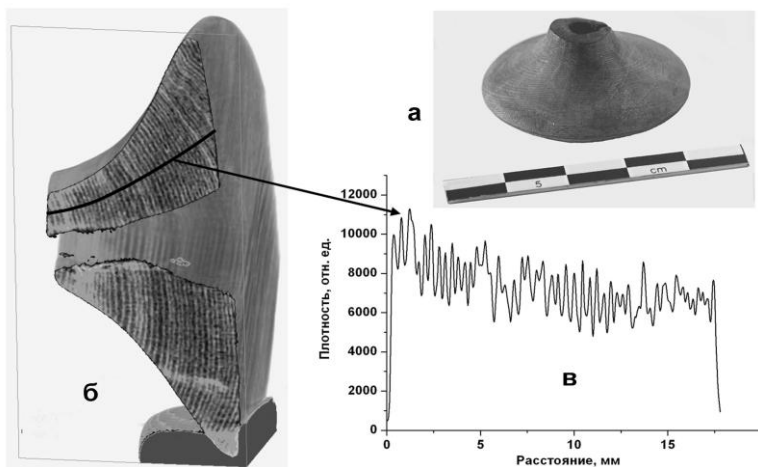


Рис.11. а – общий вид колчанной блихи; б – поперечный разрез предмета с обозначенным радиусом измерения; в – кривая плотности, отражающая изменчивость ширины годичных колец.

Основные результаты, полученные в диссертации

Результатом выполненных работ стало создание томографической установки на канале СИ ускорительного комплекса ВЭПП-3.

Автоматизация созданной автором станции «Микроскопия и томография» обеспечивает синхронизацию всех процессов, необходимых для томографической съемки.

Разработка и создание в рамках проводимых исследований увеличителя на асимметрично срезанных кристаллах позволило повысить пространственное разрешение до 2-3 мкм. Чувствительность установки к направлению излучения, прошедшего через объект, обеспечило регистрацию образцов, слабоконтрастных в рентгеновском диапазоне. Рефракционный контраст позволяет получать качественные изображения объектов, для которых величина рентгеновского ослабления не превышает 0.1%.

Реализован метод оперативного неразрушающего контроля качества рентгеношаблонов, необходимых для работ по созданию микроструктур методом LIGA-технологий. Полученные данные дали информацию о дефектах, не выявляемых методами электронной и оптической микроскопии.

Реализован метод трехкристальной топографии, позволивший получить информацию о неоднородности строения кристаллической решетки природного алмаза.

Получено трехмерное распределение минерального состава и текстурно-структурных особенностей в уникальных алмазоносных ксенолитах

мантийных пород, позволившее уточнить процессы кристаллизации в представленных образцах.

Получено распределение неоднородностей в объеме энергетических материалов в микрометровом диапазоне. С помощью созданной методики были получены *insitu* данные об образовании пор с размерами до 60 мкм во время термического старения образцов взрывчатых веществ.

Разработана методика для получения вариации ширины годовых колец, необходимая при неразрушающем дендрохронологическом анализе археологических предметов.

Создан аппаратно-программный комплекс для неразрушающего исследования уникальных археологических находок методом ВРТ. В частности получены данные о строении глиняной головы из древнего погребения, относящегося к тесинскому этапу тагарской культуры.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. К.Е. Купер, D.A. Zedgenizov, A.L. Ragozin, et al., Three-dimensional distribution of minerals in diamondiferous eclogites, obtained by the method of high-resolution X-ray computed tomography, // Nucl. Inst. and Meth. Sect. A, Vol. 575, p. 255-258, (2007).
2. С.Ю. Скузоватов, Д.А. Зедгенизов, В.С. Шацкий, А.Л. Рагозин, К.Э. Купер, Особенности состава облакоподобных микровключений в октаэдрических алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутия), //Геология и геофизика, т. 52, № 1, с. 107-121, (2011).
3. К.Е. Купер, D.A. Zedgenizov, A.L. Ragozin, V.S. Shatsky, X-ray topography of natural diamonds on the VEPP-3 SR beam, // Nucl. Inst. and Meth. Sect. A, Vol. 603, p. 170-173, (2009).
4. В.Е. Зарко, В.Н. Симоненко, П.И. Калмыков, А.А. Квасов, Е.Н. Чесноков, К.Э. Купер, Лазерное иницирование кристаллизованных смесей фуразанотетразиндиоксида и динитродиазептана, // Физика горения и взрыва, т. 45, № 6., с. 131-134, (2009)
5. Е.Л. Гольдберг, К.Э. Купер, И.Ю. Слюсаренко, Предварительные результаты использования метода вычислительной рентгеновской томографии для анализа археологических деревянных изделий, // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий, Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, т. XVI, с. 176-181, (2010).
6. Б.Г. Гольденберг, А.Ю. Абрамский, А.Г. Зелинский, А.И. Маслий, Е.А. Максимовский, В.И. Кондратьев, В.П. Корольков, К.Э. Купер, Е.В. Петрова, В.Ф. Пиндюрин, Особенности изготовления шаблонов для глубокой рентгеновской технологии в сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения, //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 2, с. 62-68, (2011).

КУПЕР Константин Эдуардович

**Развитие методик рентгеновской микроскопии и
томографии на источнике синхротронного излучения ВЭПП-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 11.11. 2011 г.

Подписано в печать 11.14.2011 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

Обработано на ПК и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева,

11