

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Хлопузян Саргис Грачикович

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОКУСИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В  
КРИСТАЛЛАХ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико– математических наук по  
специальности 01.04.07 – “Физика конденсированных сред”

ЕРЕВАН – 2015

---

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Խլոպուզյան Սարգիս Հրաչիկի

ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԱՐՏԱՔԻՆ ԱԶԴԱՎՆԵՐԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ  
ՓՆՋԵՐԻ ՖՈԿՈՒՍԱՑՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԱՐՑԵՐ

Ա.04.07 – «Կոնդենսացված վիճակի ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի զիտական աստիճանի  
հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2015

Тема диссертации утверждена в Институте Прикладных Проблем Физики НАН РА

Научный руководитель: кандидат физ–мат. наук

В. Р. Кочарян

Официальные оппоненты

доктор физ–мат. наук

В. В. Арутюнян

доктор физ–мат. наук

В. А. Бушуев

Ведущая организация: НИЦ “Курчатовский Институт”

Защита диссертации состоится: 17 июня 2015г, в 15:00 часов на заседании Специализированного Совета 049 по физике Ереванского Государственного Университета По адресу: ИППФ НАН РА, 375014, г.Ереван, ул. Г. Нерсисяна 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского Государственного Университета.

Автореферат разослан 13 мая 2015г

Ученый секретарь

Специализированного Совета



Кандидат физ.-мат. наук, доцент

В. П. Калантарян

---

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի Կիրառական Պրոբլեմների Ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու

Վ. Ռ. Քոչարյան

Պաշտոնական ընդհանխոսներ՝

ֆիզ–մաթ. գիտ. դոկտոր

Վ. Վ. Հարությունյան

ֆիզ–մաթ. գիտ. դոկտոր

Վ. Ա. Բուշուև

Առաջատար կազմակերպություն՝ ԱՀԿ “Կուրչատովի անվան ինստիտուտ”

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2015թ. հունիսի 17–ին, ժ.15:00–ին, Երևանի Պետական Համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական Խորհրդի նիստում: Հասցեն՝ ՀՀ ԳԱԱ ՖԿՊԻ, 375014, ք.Երևան, Հր.Ներսիսյան 25:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Երևանի Պետական Համալսարանի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2015թ.-ի մայիսի 13-ին:

Մասնագիտական խորհրդի

գիտ. քարտուղար



Ֆիզ.–մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ

Վ. Պ. Քալանթարյան

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** Развитие более чувствительных и универсальных методов исследования реальных структур совершенных кристаллов и наносистем, экспресс анализ структуры вещества, томографии биологических объектов, прикладных применений в медицине, рентгенодиагностики и рентгенотерапии является весьма актуальной задачей. Отметим также, что несмотря на появление все новых и новых методов исследования, дифрактометрия или рентгенодиагностика не только остаются актуальными, но и во многих случаях являются незаменимыми методами во всех выше перечисленных применениях.

В последнее время рентгеновские методы широко используются в медицине, в технике. Однако несмотря на значительное увеличение светосилы современных рентгеновских источников, они не позволяют решать ряд важных задач, например, в ранней медицинской диагностике, где из-за низкого контраста не всегда удаётся выявить опухоль. С целью получения достаточного контраста в последнее время в компьютерной томографии стали использовать пучки монохроматического излучения с определенной длиной волны в соответствии плотностью объекта. Попытки монохроматизировать рентгеновские пучки с помощью фильтров или монохроматоров приводят к уменьшению интенсивности излучения до уровня непригодного. Для оптимизации необходимой дозы облучения пациентов нужно, чтобы энергия рентгеновского излучения варьировала от 30 кэВ до 250 кэВ с необходимой энергии, светосилой и плотностью излучения.

Большинство проблем можно решить, если использовать источники синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне. Однако, из-за дороговизны, особенно в коротковолновом диапазоне, использование таких источников остается недоступным для широкого использования, например, в медицинской диагностике.

Получение интенсивных источников и базовых элементов «оптики» рентгеновского излучения коротковолнового диапазона с управляемыми рабочими параметрами (энергия, интенсивность, фокусное расстояние) дает возможность развивать технологии и совершенствовать методы рентгенотерапии, повысить качество и расширить области применения рентгеновской дифрактометрии в науке и технике. В этом направлении свое особое и актуальное место занимают вопросы дифракции при внешних воздействиях.

Разными авторами, начиная с 1931г., были реализованы разные варианты внешних воздействий на дифрагированные рентгеновские пучки, такие как постоянные электрические поля, упругие деформации, температурный градиент, акустические поля и т.д. В Институте прикладных проблем физики НАН РА под руководством академика А.Р. Мкртчяна были проведены исследования посвященные управлению в пространстве и во времени рабочих

параметров рентгеновских пучков с энергиями ниже 30кэВ под влиянием внешних воздействий (ультразвуковые колебания и температурный градиент) на кристаллах. Для рентгеновских лучей, нейтронов и синхротронного излучения впервые было обнаружено явление полной переборки из направления прохождения в направление отражения при Лауэ–геометрии с сохранением спектрального распределения пучка, эффект прозрачности кристалла, фокусировки и дефокусировки отраженного рентгеновского пучка при определенных параметрах ультразвукового колебания и температурного градиента. Одновременно было показано, что при наличии внешних воздействий возможно управлять в пространстве и во времени фокусное расстояние от  $-\infty$  до  $+\infty$  и плотность отраженного рентгеновского пучка. Высокая чувствительность дифрагированного пучка к воздействиям на рассеивающий кристалл акустическими колебаниями или температурным градиентом поставила вопрос о нахождении зависимости интенсивности дифрагированного пучка от амплитуды акустических колебаний или величины градиента возбуждений. Для решения этого вопроса были проведены многочисленные эксперименты и развита динамическая теория для объяснения экспериментальных результатов.

Кроме физико–технического применения, исследования в этом направлении приводят к новым подходам в теоретическом описании взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, так как они дают дополнительную информацию о физико–химическом процессе и о характере прохождения рентгеновского излучения через вещество при наличии внешних воздействий представляют большой интерес.

Большинство указанных проблем можно решить, если использовать источники когерентного тормозного излучения электронов высоких энергий, движущихся в кристалле под воздействием акустического поля. В Институте прикладных проблем физики НАН РА, было показано, что воздействие акустического поля на монокристалл кварца приводит к контролируемому изменению интенсивности и энергии пиков когерентного тормозного излучения в жестком рентгеновском диапазоне, что по видимому позволит решить проблему получения и использования когерентности и интенсивности когерентного тормозного излучения. Когерентное тормозное излучение обладает рядом замечательных свойств по сравнению с другими источниками коротковолнового излучения и в настоящее время применяется во многих областях, но не используется в прикладных задачах, таких как диагностика и терапия в медицине, в биологии, в экспресс анализе структуры вещества и т.д. Необходимость пространственно–временного управления рабочими параметрами излучения жесткого рентгеновского диапазона и ее использование во всех выше перечисленных применениях поставила вопрос о нахождении зависимости интенсивности отраженного излучения от амплитуды акустических колебаний или величины температурного градиента.

Исходя из выше изложенного, нами предприняты попытки решить некоторые из перечисленных выше задач.

***Целью настоящей диссертационной работы является:***

- Изучить характеристики (угловая ширина и энергетическая дисперсия) дифрагированного жесткого рентгеновского излучения в зависимости от геометрии эксперимента и параметров исследуемого образца при наличии температурного градиента.
- Изучить возможности получения базовых элементов оптики жесткого рентгеновского излучения (выше 30кэВ) с управляемыми рабочими параметрами (энергия, интенсивность, фокусное расстояние и т.д.)
- Изучить некоторые особенности Лауэ дифракции в кристаллах и возможность получения пространственной модуляции интенсивности отраженного рентгеновского пучка (дробить ее на идентичные пучки) с управляемыми параметрами (количество, расстояние между ними и ширина) при наличии объемных акустических волн.
- Теоретически обосновать особенности этих явлений в зависимости от условий эксперимента.

***Для достижения указанных целей необходимо было решить следующие основные практические задачи.***

- Получить коллимированный полихроматический рентгеновский пучок с углом коллимации  $\Delta\theta \approx 20'' \div 10'$ .
- Изготовить плоскопараллельные монокристаллические пластинки X–среза и АТ–среза с высокой степенью обработки поверхностей с разными толщинами ( $1 \div 10\text{мм} \times 20\text{мм} \times 20\text{мм}$ ).
- Получить монохроматический рентгеновский пучок с определенными параметрами (энергетическая дисперсия  $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-4}$ , угловая расходимость  $\Delta\theta \approx 20'' \div 40''$ ).
- Изготовить малогабаритный синтезатор частоты от 0 до 40МГц с шагом 1Гц для возбуждения акустических волн в пьезокристаллах.
- Изготовить малогабаритный блок питания и приспособление для создания в кристаллах температурного градиента.
- Разработать программы в среде LabVIEW для расчетов характеристик дифракционных (отраженного и проходящего) рентгеновских пучков при внешних воздействиях (температурный градиент и ультразвуковое поле).

***Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:***

- Впервые экспериментально и теоретически показано, что интенсивность отраженного жесткого (выше 30 кэВ) рентгеновского излучения можно увеличить на порядки.
- Экспериментально показано, что с помощью воздействия температурного градиента становится возможно из белого пучка жесткого рентгеновского излучения выделить

пучок с большой угловой (до градуса) и спектральной шириной (до несколько кэВ), перебросить пучок в направлении отражения и сфокусировать его, то есть управлять параметрами пучка в широком диапазоне.

- Экспериментально показано, что с помощью акустических полей возбужденных в монокристалле кварца АТ–среза можно контролировать отраженный рентгеновский пучок, дробить на идентичные пучки, количество которых возможно управлять изменением порядка резонансной частоты, а расстояние между ними и их ширину можно управлять амплитудой акустического колебания.

***Практическая значимость:***

Полученные результаты могут быть применены для создания базовых элементов оптики жесткого рентгеновского излучения, для управления рентгеновскими пучками, в рентгеновской литографии, для определения деформаций в кристаллах, исследования параметров объемных акустических полей, в спектроскопии, в рентгеновской микроскопии, в рентгенотерапии, в рентгенодиагностике и т.д.. Разработаны линза жесткого рентгеновского излучения с пространственно–временными управляемыми параметрами и программный пакет для расчета параметров дифрагированных рентгеновских пучков при внешних воздействиях (температурный градиент и ультразвуковое поле).

***На защиту выносятся следующие основные положения:***

- Изучены разные характеристики (угловая ширина и энергетическая дисперсия) полного перебрасываемого жесткого рентгеновского излучения в зависимости от параметров исследуемого образца при наличии температурного градиента и показано, что становится возможным выделить из белого пучка пучок с большой угловой и спектральной шириной, перебросить в направлении отражения и сфокусировать, то есть, управлять параметрами пучка в широком диапазоне.
- Исследовано поведение фокусировки отраженного жесткого рентгеновского излучения при Лауэ дифракции в зависимости от величины температурного градиента и расположения векторов дифракции ( $\vec{g}$ ) и температурного градиента ( $\vec{B}$ ).
- Изучены особенности пространственно–модулированного отраженного и проходящего рентгеновских пучков при наличии объемных акустических волн, и показано, что отраженные и проходящие пучки становятся идентичными при определенных значениях амплитуды акустических колебаний. Показано также, что количество вертикальных полос, которые появляются на поперечном сечении отраженного пучка, возможно управлять изменением порядка резонансной частоты, а расстояние между полосами и их ширину можно управлять с помощью амплитуды акустического колебания.

- Разработана и реализована линза жесткого рентгеновского излучения с пространственно-временными управляемыми параметрами в широком диапазоне, в частности фокусное расстояние можно управлять от  $-\infty$  до  $+\infty$ ; энергетическая ширина от нескольких эВ до нескольких кэВ и т.д.
- Создана программа в среде LabVIEW для расчетов характеристик дифракционных (отраженного и проходящего) рентгеновских пучков при внешних воздействиях (температурный градиент и ультразвуковое поле).

### ***Апробация работы:***

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной школе–семинаре “Шестой международный научный семинар и Четвертая международная молодежная научная школа–семинар” (Россия, Великий Новгород, 19–27 августа, 2013 г.), на международной конференции “X International Symposium RREPS–13 Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures & III International Conference Meghri–13 Electron, Positron, Neutron and X–ray Scattering under External Influences” (Армения, Озеро Севан, 23–28 сентября, 2013 г.), на международном конгрессе “The 23rd Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (IUCr 2014)” (Канада, Монреаль, 5–12 августа, 2014 г.), на международной школе–конференции “Ядерно–физические технологии в клинической и экспериментальной медицине: состояние, проблемы, перспективы” (Россия, Томск, 3–7 июня, 2013 г.), на конференции “Рентгеновская оптика – 2014” (Россия, Черноголовка, 6–9 октября, 2014 г.), на международной научной конференции “Channeling 2014” (Италия, Капри, 5–10 октября, 2014 г.), на международной научной конференции “Инновационные подходы в области науки” (Армения, Цахкадзор, 5–7 декабря, 2014г.).

Результаты работы докладывались на общих и лабораторных семинарах Института Прикладных Проблем Физики НАН РА.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

### ***Структура и объем диссертации:***

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 106 страницах, включая 23 рисунка, 5 таблиц, списка литературы из 115 наименований.

### ***Содержание работы:***

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения работы.

В первой главе проведен подробный анализ литературных данных по рассеянию рентгеновского излучения на кристаллах подвергнутых внешнему воздействию, по управлению жесткого рентгеновского излучения и ее потребности в науке и медицине.

Во второй главе описаны методики исследований дифракции рентгеновского излучения на кристаллах при наличии температурного градиента. Описан процесс изготовления плоских монокристаллических образцов. Приведены параметры и характеристики изготовленных синтезаторов частоты для возбуждения акустических волн в пьезо-кристаллах и блоков питания для создания температурного градиента в монокристаллах.

В последнем параграфе второй главы приведены некоторые сведения относительно рентгенодифракционных характеристик использованных монокристаллов и спектральных характеристик использованных излучений.

В третьей главе, в §1 экспериментально рассмотрена дифракция жесткого рентгеновского излучения (выше 30кэВ) от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца в геометрии Лауэ под влиянием температурного градиента. В качестве исследуемых образцов были использованы прямоугольные пластинки ( $30 \times 30 \text{ мм}^2$ ) монокристалла кварца с толщинами 6мм и 9мм. Нагреваемая грань пластины была параллельна отражающим атомным плоскостям ( $10\bar{1}1$ ), т.е. температурный градиент был приложен перпендикулярно отражающим атомным плоскостям, причем вектор температурного градиента и вектор дифракции были антипараллельны. Экспериментально рассмотрена зависимость интенсивности рентгеновского излучения 30кэВ и 40кэВ, отраженного от атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) от величины температурного градиента. Схема эксперимента приведена на рисунке 1.

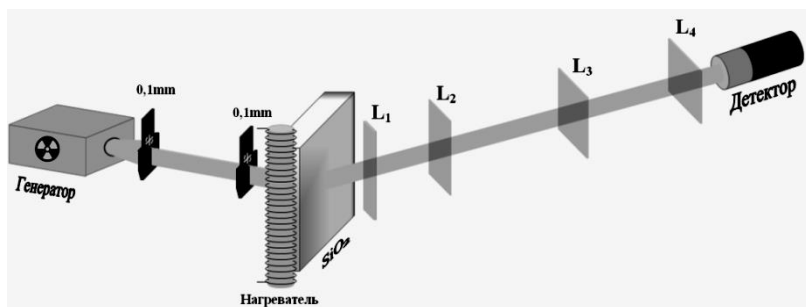


Рис. 1 Схема эксперимента.

На рисунке 2 приведены зависимости интенсивностей отраженных рентгеновских пучков от величины температурного градиента для энергий 30кэВ и 40кэВ. В эксперименте использован белый спектр рентгеновского излучения, который генерировался от рентгеновской трубки Мо БСВ-29 под напряжением 35 кВ, анодным током 10 мА для энергии отражения 30кэВ и под напряжением 45 кВ и анодным током 10 мА при энергии



отражения 40кэВ. Как видно из рисунка 2, наблюдается увеличение интенсивностей отраженных пучков более 60 раз при энергии 30кэВ и более 45 раз при энергии 40кэВ. Многократное увеличение интенсивности обусловлено явлением полной переброски рентгеновского излучения от направления прохождения в направлении отражения с большой угловой шириной, которая намного больше, чем угловая ширина столика Дарвина и зависит от толщины исследуемого монокристалла.

Насыщение и резкое уменьшение интенсивности параллельно с увеличением температурного градиента обусловлено тем, что при больших деформациях длина экстинкции становится намного больше, чем эффективная область (толщина) дифракции каждого монокроматического излучения участвующего в дифракции. Так как для энергии 40 кэВ длина экстинкции больше, чем 30 кэВ то насыщение получается при меньшем температурном градиенте.

На рисунке 3 приведены спектры пучков отраженного и проходящего рентгеновских излучений от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца с толщиной 9мм при энергии отражения 30кэВ для разных значений температурного градиента. Спектры сняты спектрометром XR-100CR с разрешением 270 эВ на линии Am241 17,74 кэВ. Как видно из спектра отраженного рентгеновского пучка (рис. 3а), с увеличением значений температурного градиента происходит многократное увеличение интенсивности, уширение спектра (что обусловлено искривлением отражающих атомных плоскостей) и смещения спектра в направлении низких энергий (что обусловлено увеличением межплоскостных расстояний отражающих атомных плоскостей). Одновременно исследовались характеристики эффекта переброски в спектре проходящего излучения в зависимости от величины температурного градиента (рис. 3б). В сплошном спектре проходящего пучка наблюдался провал, глубина которого определялась величиной температурного градиента и энергетическим разрешением детектора.

Из рисунков 2 и 3 видно, что с увеличением величины температурного градиента увеличивается интегральная интенсивность и ширина спектра отраженного пучка.

Таким образом, экспериментально получено, что при энергиях рентгеновского излучения 30 кэВ и 40 кэВ для отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца X-среза в зависимости от величины температурного градиента интенсивность отраженного пучка можно увеличить на порядок. Показано, что с помощью температурного градиента становится возможным отделить из белого пучка пучок с большой угловой и спектральной шириной, перебрасывать в направление отражения, то есть в широком диапазоне управлять параметрами пучка.

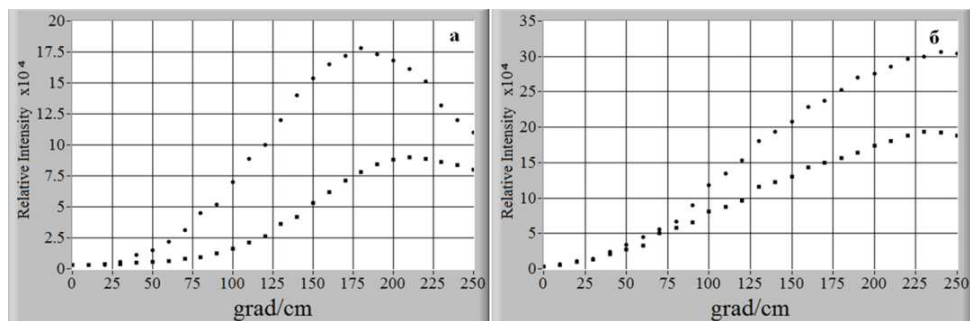


Рис. 2 Зависимость интенсивности отраженного рентгеновского излучения от величины температурного градиента. На рисунке круглыми точками приведена зависимость для энергии 30кэВ, а квадратными – для энергии 40кэВ.

а) толщина монокристалла 6мм, б) толщина монокристалла 9мм

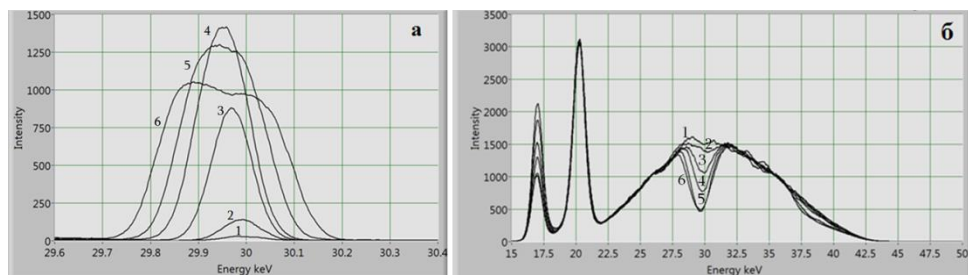


Рис. 3 Спектры отраженного (а) и проходящего (б) рентгеновского пучка для разных значений температурного градиента: 1)  $\Delta T/\Delta x = 0 \text{ град./см}$ , 2)  $\Delta T/\Delta x = 10 \text{ град./см}$ , 3)  $\Delta T/\Delta x = 100 \text{ град./см}$ , 4)  $\Delta T/\Delta x = 150 \text{ град./см}$ , 5)  $\Delta T/\Delta x = 200 \text{ град./см}$ , 6)  $\Delta T/\Delta x = 250 \text{ град./см}$ .

В §2 изучены явления фокусировки отраженного жесткого рентгеновского излучения в геометрии Лауэ под влиянием температурного градиента. Рентгеновская трубка, исследуемые образцы и геометрия эксперимента выбраны так, как описано в §1 третьей главы. Экспериментально рассмотрена зависимость местоположения фокуса отраженного рентгеновского излучения 30кэВ и 40кэВ от величины температурного градиента. Исследования проводились для отражающих атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  монокристалла кварца с толщинами 6мм и 9мм. Для нахождения местоположения фокуса, на расстояниях  $L_1$  (4см),  $L_2$  (35см),  $L_3$  (70см) и  $L_4$  (110см) от исследуемого образца снимались фронтальные сечения пучка (рис. 1) при наличии и отсутствии температурного градиента.

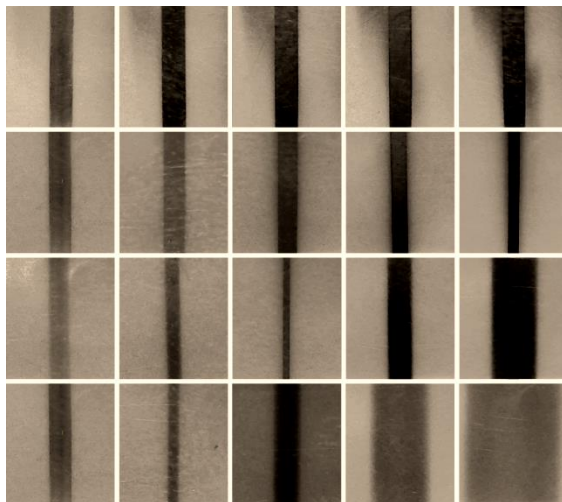


Рис. 4 Фронтальные сечения отраженного жесткого рентгеновского пучка при 0 гр./см, 100 гр./см, 150 гр./см, 200 гр./см и 250 гр./см значениях температурного градиента на расстояниях  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$  от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца с толщиной 6мм.

На рисунке 4 приведены фронтальные сечения отраженного пучка при 0 град./см, 100 град./см, 150 град./см, 200 град./см и 250 град./см значениях температурного градиента на расстояниях  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$  от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла

кварца с толщиной 6мм. Из фотоснимков видно, что без воздействия температурного градиента фронтальные сечения отраженного пучка с увеличением расстояния от исследуемого образца постепенно уменьшается, т.е. фокусное расстояние находится дальше от  $L_4$ . При наличии температурного градиента и с увеличением ее значения фокусное расстояние приближается к кристаллу, а интегральная интенсивность отраженного пучка увеличивается. На рисунке 5 приведены фронтальные сечения отраженного пучка на расстояниях  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  от отражающих атомных плоскостей

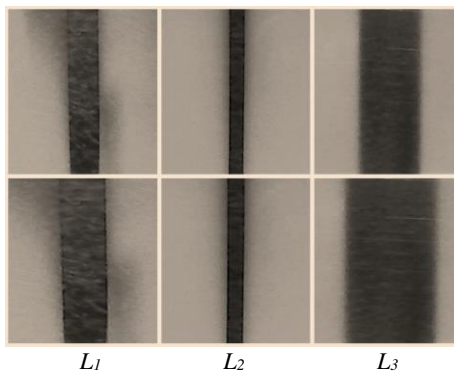


Рис. 5 Фронтальные сечения отраженного жесткого рентгеновского пучка от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца для значения температурного градиента 250 гр./см на расстояниях  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ .

(10 $\bar{1}1$ ) монокристалла кварца с толщинами 6мм и 9мм, при значении температурного градиента 250 град./см. Из этих фотоснимков видно, что с увеличением толщины монокристалла кварца при том же значении внешнего температурного градиента (250 град./см) на расстояниях  $L_1$  и  $L_3$  фронтальные сечения отраженного пучка одновременно увеличиваются, а на расстоянии  $L_2$  почти не меняется. Это означает, что с увеличением толщины монокристалла кварца при том же значении внешнего температурного градиента увеличивается угловая апертура отраженного жесткого рентгеновского излучения и одновременно увеличивается угол фокусировки. Для детального рассмотрения явления фокусировки отраженного пучка под воздействием температурного градиента на расстояниях  $L_1$  и  $L_4$  от исследуемого образца снимались фронтальные сечения отраженного пучка, при значениях тока температурного градиента от 0 град./см до 250град./см с шагом 10 град./см. В ходе эксперимента на расстояниях  $L_1$  и  $L_4$  от рассеивающего монокристалла измерены фронтальные сечения отраженного пучка  $\Delta L_1$  и  $\Delta L_4$  для разных величин температурного градиента.

Полученные экспериментальные результаты позволяют рассчитать местоположения фокуса  $L_f$  и угловую апертуру отраженного жесткого рентгеновского излучения следующим образом

$$L_f = \frac{L_4 \Delta L_1 + L_1 \Delta L_4}{\Delta L_4 + \Delta L_1}, \quad \Delta \theta = 2 \arctg \frac{\Delta L_4 + \Delta L_1}{2(L_4 - L_1)}$$

Зависимость фокусного расстояния отраженного пучка для семейства отражающих атомных плоскостей (10 $\bar{1}1$ ) монокристалла кварца от величины температурного градиента приведено на рис. 6.

Из рисунков 2–4 и 6 видно, что с увеличением величины температурного градиента фокус приближается к кристаллу и одновременно увеличивается интегральная интенсивность и ширина спектра отраженного пучка.

Таким образом, экспериментально показано, что с увеличением величины температурного градиента фокус приближается к кристаллу, фокусное

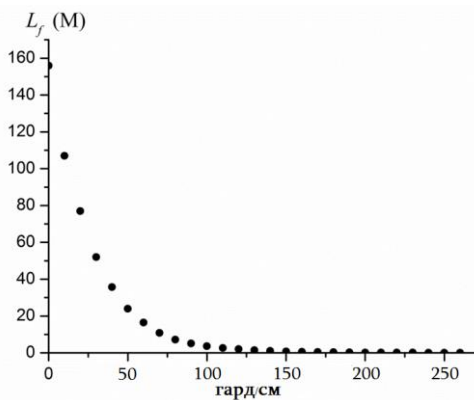


Рис. 6 Зависимость фокусного расстояния отраженного пучка для семейства отражающих атомных плоскостей (10 $\bar{1}1$ ) монокристалла кварца от величины температурного градиента.

пятно сужается в дифракционной плоскости, а интегральная интенсивность и спектрально–угловая ширина пучка увеличиваются на порядки.

В §3 моделирован процесс когерентного рассеяния рентгеновского излучения на монокристаллах кварца при наличии температурного градиента или акустического воздействия для падающего пучка с любым спектрально–угловым распределением. Сперва получены аналитические выражение для дифракции плоской рентгеновской волны от кристаллов при внешних воздействий (температурный градиент и акустическое поле) с учетом поглощения. После этого, в модельных расчетах дифракции, падающая рентгеновская волна разлагается на совокупность плоских монохроматических волн, рассеяние каждого из которых рассматривается в соответствии с динамической теорией в плосковолновом приближении в деформированных кристаллах. После чего в плоскости детектора рассеивающая волна интегрируется по спектральной и угловой переменной.

Компьютерная модель включает лицевую панель (интерфейс пользователя модели, представленный на рисунке 7) с элементами управления программой и индикации для визуализации результатов расчета на экране монитора и блок–диаграмму, в которой описан математический аппарат.

Результаты расчетов по разработанной компьютерной модели для дифракции жесткого рентгеновского излучение от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца толщиной 6 мм и 9 мм показали, что в зависимости от толщины монокристалла и спектрально–угловым распределением первичного пучка интегральная интенсивность отраженного пучка увеличивается на порядки.

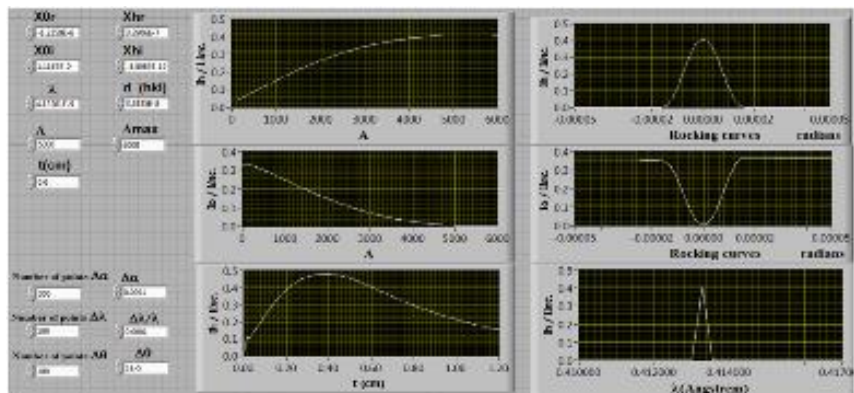


Рис. 7 Лицевая панель виртуального прибора для моделирования процессов когерентного рассеяния рентгеновского излучения в кристаллах, деформированных внешним температурным градиентом или акустическим полем.

В зависимости от меры воздействия, в направлении отражения перебрасывается пучок рентгеновского излучения со спектральной шириной до нескольких кэВ и угловой шириной до нескольких градусов, что и получено в эксперименте.

В четвертой главе экспериментально рассмотрены пространственно–временные характеристики возникающих полос отраженного рентгеновского излучения от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца АТ–среза в геометрии Лауэ при наличии объемных акустических волн.

Экспериментальные исследования проводились на рентгеновской установке ДРОН–3 с анодной трубкой молибдена. Для получения пространственной модуляции интенсивности отраженного пучка при наличии акустических волн использовалась энергия рентгеновского излучения 17.48 кэВ (MoK $\alpha_1$ ) монохроматизированная рентгеноакустическим монохроматором. Схема эксперимента приведена на рис. 8.

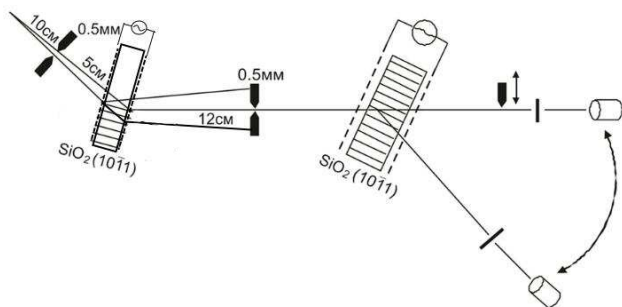
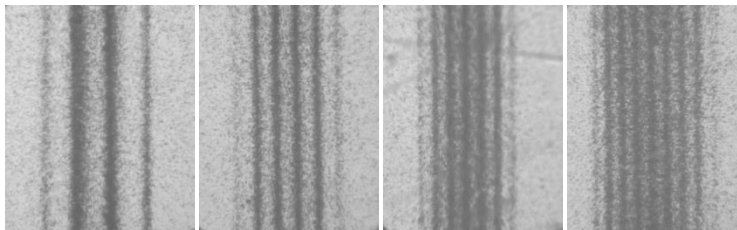


Рис. 8. Схема эксперимента.

При такой геометрии из монохроматора отражается только монохроматизированный пучок MoK $\alpha_1$  с высокой интенсивностью. После монохроматора на расстоянии 12 см размещена щель шириной 0.5 мм, которая пропускает приблизительно половину ширины монохроматизированного пучка. Излучение, проходя через щель, попадает на образец, который находится на расстоянии 20 см от монохроматора. Образец представляет собой шайба-образную пластинку толщиной 1.7 мм из монокристалла кварца АТ–среза, поверхности которой покрыты контактами алюминиевого слоя с толщиной меньше 10 мкм. Рассматривалось несимметричное отражение по Лауэ от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) (угол асимметрии составлял 2 градуса, а угол Брэгга –  $6^\circ 6'$ ).

Возбуждение объемных акустических волн в кристалле осуществлялось с помощью генератора электромагнитных волн, который был подключен к контактам кристалла. При возбуждении исследуемого образца разными порядками резонансной частоты, наблюдается увеличение интенсивности отраженного пучка в зависимости от величины амплитуды

переменного электрического напряжения, а на поперечном сечении появляются вертикальные полосы, количество которых зависит от порядка резонансной частоты.



2.979 МГц

4.971 МГц

6.933 МГц

8.836 МГц

Рис.9 Поперечные сечения отраженного пучка при разных частотах акустических колебаний с возбуждением переменного напряжения 40В. (увеличения 360 раз).

На рисунке 9 приведены поперечные сечения отраженного пучка, полученные на расстоянии 10см от образца, для разных частот акустических колебаний (2.979МГц, 4.971МГц, 6.933 МГц и 8.836 МГц) с возбуждением переменного напряжения 40В подаваемого на кристалл кварца. На рисунке 10 приведена зависимость интегральных интенсивностей дифрагированного проходящего и дифрагированного отраженного излучений от значений переменного напряжения подаваемого на кристалл кварца при частоте возбуждения 4.971 МГц.

Для исключения доли проходящего не дифрагированного пучка при регистрации интегральной интенсивности дифрагированного проходящего пучка использовался поглотитель. Сперва, вне условий Брэгга, поглотитель ставился перед детектором так, чтобы закрывал почти весь пучок (пропускал приблизительно 1% проходящего пучка как показано на рис. 8).

На рисунке 11 а, б и в приведены поперечные сечения отражающихся и проходящих дифракционных пучков, полученных на расстоянии 5см от образца для трех значений амплитуды акустических колебаний, соответствующих 0В, 20В, 40В значениям переменного напряжения, подаваемого на кристалл кварца при частоте возбуждения 4.971МГц.

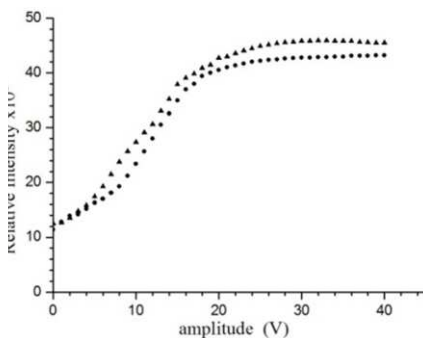


Рис.10 Зависимость интегральной интенсивности дифрагированного проходящего (круглые точки) и отраженного (треугольные) излучения от значения переменного напряжения подаваемого на кристалл кварца при частоте возбуждения 4.971 МГц.

В дальнейшем, с целью рассмотрения в пространстве поведения вертикальных полос в отраженном пучке, снимались поперечные сечения отраженного пучка на разных расстояниях от образца (20см, 45см и 70см) без и под воздействием акустических колебаний.

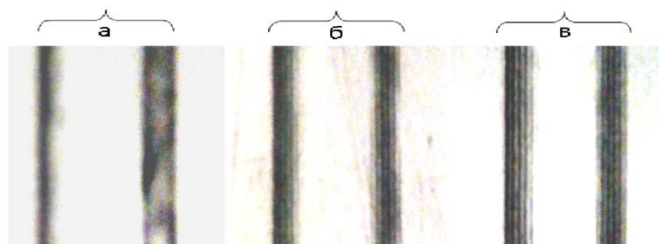


Рис.11 Поперечные сечения отражающих (правый) и проходящих (левый) пучков при частоте возбуждения 4.971 МГц, для трех значений амплитуды акустических колебаний соответствующих значениям переменного напряжения, подаваемого на кристалл кварца. а) 0В, б) 20В, в) 40В. (увеличения 10 раз).

Таким образом показано, что количество вертикальных полос, которые появляются на поперечном сечении отраженных и проходящих дифрагированных пучков, возможно управлять изменением порядка резонансной частоты, а расстоянием между полосами и их шириной можно управлять амплитудой акустического колебания.

***В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:***

— Впервые экспериментально и теоретически показано, что при высоких энергиях (выше 30 кэВ) рентгеновского излучения интенсивность отраженного пучка от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) монокристалла кварца X-среза можно увеличить на порядки в зависимости от величины температурного градиента.

— Показано, что с помощью температурного градиента становится возможным выделить из белого пучка пучок с большой угловой и спектральной шириной, перебрасывать в направление отражения и сфокусировать, то есть, управлять параметрами пучка в широком диапазоне.

— Разработана линза жесткого рентгеновского излучения с пространственно-временным управлением параметров. В частности фокусное расстояние можно управлять в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ ; энергетическая ширина – от нескольких эВ до нескольких кэВ, угловая ширина – от нескольких угловых минут до нескольких градусов и т.д..

— Моделирован процесс когерентного рассеяния рентгеновского излучения на монокристаллах кварца при наличии температурного градиента или акустического воздействия для падающего пучка с любым спектрально-угловым распределением. Показано, что в зависимости от толщины монокристалла и спектрально-углового



распределения первичного пучка интегральная интенсивность, энергетическая ширина и угловая ширина отраженного пучка увеличиваются на порядки.

— Показано, что при определенных значениях амплитуды объемных акустических волн в монокристалле кварца АТ–среза при дифракции рентгеновского излучения от отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) в геометрии Лауэ, можно получить идентичное распределение интенсивности отраженных и проходящих пучков с пространственной модуляцией, а количеством вертикальных полос (которые появляются на поперечном сечении отраженного пучка), расстоянием между ними и шириной можно управлять изменением порядка резонансной частоты и амплитуды акустического колебания.

— Разработана программа с интерфейсом в среде LabVIEW для расчетов характеристики дифракционных (отраженного и проходящего) рентгеновских пучков при внешних воздействиях (температурный градиент и ультразвуковое поле).

***Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:***

1. Vahan Kocharian, Artak Mkrtchyan, Alexey Gogolev, Sargis Khlopuzyan, Poghos Grigoryan. Control over Hard X-Ray Parameters Using External Temperature Gradient. //Advanced Materials Research. Vol. 1084 pp 107-110, 2015.
2. S.H. Khlopuzyan. Focusing of hard x-rays in quartz crystal under external temperature gradient. //ISSN 1829-1171, Armenian Journal of Physics, vol. 8, issue 2, pp. 73-78, 2015.
3. T.R. Muradyan, R.V. Amiraghyan, S.H. Khlopuzyan, A.R. Wagner, and V.R. Kocharyan. Modulation of the Intensity of Reflected X-Rays and Control of its Parameters in the Presence of Volume Acoustic Waves. //Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), Vol. 50, No.2, pp. 204-208, 2015.
4. В.Р. Кочарян, А.Е. Мовсисян, С.Г. Хлопузян, Т.Р. Мурадян. Спектрально-угловая ширина полно перебрасываемого рентгеновского излучения. //Сборник материалов и программа Шестого международного научного семинара и Четвертой международной молодежной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», стр. 66-68, Великий Новгород, 19 - 27 августа 2013 года.
5. В.Р. Кочарян, С.Г. Хлопузян, Т.Р. Мурадян, А.С. Гоголев. Рентгеновские пучки с управляемым параметрам для рентгенодиагностики. //Материалы Международной школы-конференции «Ядерно-физические технологии в клинической и экспериментальной медицине: состояние, проблемы, перспективы», стр. 21-23, 3 - 7 июля, 2013, г. Томск.

6. V.R. Kocharyan, P.A. Grigoryan, E.G. Baghdasaryan, R.V. Amiragyan and S.G. Khlopuzyan. Focusing of Hard X-rays at Quartz Single Crystals in the Presence of Temperature Gradient. //Book of Abstracts of X International Symposium RREPS-13 Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures & III International Conference Meghri-13 Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences. Cod, p. 86. September 23-28, 2013. Lake Sevan, Armenia.
7. V.R. Kocharyan, S.G. Khlopuzyan, A.V. Begaev and Yu.L. Eyhorn. Program of Model Calculation of X-ray Diffraction With Outside Influences. //Book of Abstracts of X International Symposium RREPS-13 Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures & III International Conference Meghri-13 Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences. Cod, p. 89. September 23-28, 2013. Lake Sevan, Armenia.
8. V. Kocharyan, S. Khlopuzyan, P. Grigoryan, E. Baghdasaryan, R. Amiraghyan. Focusing of hard X-ray beams in quartz crystal under the temperature gradient. //Book of Abstracts of The 23rd Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (IUCr 2014). C1137. August 5 to 12, 2014. Montreal, Quebec, Canada.
9. В.Р. Кочарян, А.Г. Мкртчян, С.Г. Хлопузян, А.С. Гоголев, П.А. Григорян. Фокусировка жесткого рентгеновского излучения от монокристалла кварца при внешнем температурном градиенте. //Доклады конференции «Рентгеновская оптика - 2014», стр. 160-162, г. Черногловка, 6-9 октября, 2014.
10. В.Р. Кочарян, Т.Р. Мурадян, Р.В. Амирагян, А.С. Гоголев, С.Г. Хлопузян. Эффект полной переброски от кристалла кварца с АТ-срезом. //Доклады конференции «Рентгеновская оптика - 2014», стр. 168-170, г. Черногловка, 6-9 октября, 2014.
11. А.Н. Mkrтчyan, V.R. Kocharyan, S.G. Khlopuzyan and V.V. Margaryan. Laue Lenses for Hard X-rays with Controllable Parameters. //Book of Abstracts of Channeling 2014, p. 145, Capri, Italy, 5-10 October 2014.
12. V.R. Kocharyan, S.G. Khlopuzyan, A.S. Gogolev, P.A. Grigoryan, T.R. Muradyan and V.V. Margaryan. Intensive Laue Monochromator for Hard X-ray. //Book of Abstracts of Channeling 2014, p. 146, Capri, Italy, 5-10 October 2014.
13. Р.В. Амирагян, С.Г. Хлопузян. Контролируемая линза жесткого рентгеновского излучения. //Материалы международной молодежной конференции «Инновационные подходы в области науки», стр. 93-97, 5-7 декабря, 2014г., г. Цахкадзор, Армения. ISBN 978-9939-1-0102-6.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

### Խլոպուզյան Սարգիս Հրաչիկի

#### ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԱՐՏԱՔԻՆ ԱԶԴԱԿՆԵՐԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ ՌԵՆՏԳԵՆՑԱՆ ՓՆՋԵՐԻ ՖՈԿՈՒՍԱՑՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԱՐՑԵՐ

Ատենախոսությունը նվիրված է կատարյալ միաբյուրեղներում արտաքին ազդակների (ակուստիկական ալիքներ և ջերմաստիճանային գրադիենտ) առկայության պայմաններում կոշտ ռենտգենյան ճառագայթման պարամետրերի տարածա-ժամանակային կառավարմանը: Ստացված արդյունքները ընդլայնում են ինչպես դեֆորմացված բյուրեղներում դիֆրակցված ռենտգենյան ճառագայթների որոշ առանձնահատկությունների մասին ունեցած պատկերացումները, այնպես էլ գոյություն ունեցող դիֆրակցիոն մեթոդների կիրառման շրջանակները, մասնավորապես կոշտ ռենտգենյան «օպտիկայի» բազային էլեմենտների պատրաստման համար:

Աշխատանքում ստացված են հետևյալ հիմնարար արդյունքները:

— Առաջին անգամ փորձնականորեն և տեսականորեն ցույց է տրված, որ X-կտրվածքով կվարցի միաբյուրեղի (10 $\bar{1}$ 1) անդրադարձնող ատոմական հարթություններից անդրադարձած կոշտ ռենտգենյան ճառագայթման (էներգիան մեծ 30 կէՎ-ից) ինտենսիվությունը կախված ջերմային գրադիենտի մեծությունից կարելի է մեծացնել մի քանի կարգով:

— Ցույց է տրված, որ կվարցի միաբյուրեղին կիրառված ջերմային գրադիենտի միջոցով հնարավոր է դառնում կոշտ ռենտգենյան տիրույթում սպիտակ փնջից առանձնացնել մեծ անկյունային և սպեկտրալ լայնությամբ փունջ, վերամղել այն դեպի անդրադարձման ուղղություն և ֆոկուսացնել, այսինքն, լայն տիրույթում կառավարել փնջի պարամետրերը:

— Մշակվել է տարածա-ժամանակային կառավարվող բնութագրիչներով կոշտ ռենտգենյան տիրույթի ոսպնյակ, մասնավորապես, ֆոկուսային հեռավորությունը կարելի է կառավարել  $-\infty$ -ից  $+\infty$ , անկյունային բացվածքը մի քանի ակյունային բուպեից մինչև մի քանի աստիճան և այլն:

— Մոդելավորված է ռենտգենյան ճառագայթման ցրումը կվարցի միաբյուրեղներում ջերմային գրադիենտի և ակուստիկական ալիքների առկայության պայմաններում

ընկնող փնջի ցանկացած սպեկտրային և անկյունային բաշխման դեպքում: Ցույց է տրված, որ միաբյուրեղի հաստությունից և ընկնող փնջի սպեկտրային և անկյունային բաշխումից կախված (10<sup>11</sup>) անդրադարձնող ատոմական հարթությունների ուղղահայաց կիրառված ջերմային գրադիենտը բերում է անդրադարձած կոշտ ռենտգենյան փնջի ինտեգրալ ինտեսիվության, էներգետիկ լայնության և անկյունային բացվածքի մի քանի կարգով մեծացման:

— Ցույց է տրված, որ AT-կտրվացքով կվարցի միաբյուրեղում որոշակի հաճախությամբ և ամպլիտուդայով ծավալային ակուստիկական դաշտի առկայության պայմաններում (10<sup>11</sup>) անդրադարձնող ատոմական հարթությունների ընտանիքից Լաուէի անդրադարձման դեպքում ստացվում է տարածական կտրվածքով միմյանց նման անցած և անդրադարձած մոդուլացված ռենտգենյան փնջեր: Անդրադարձած փնջում դիֆրակցիայի հարթությանն ուղղահայաց ի հայտ եկած շերտերի քանակը, լայնությունը և նրանց միջև հեռավորությունը կարելի է դեկավարել ակուստիկական դաշտի հաճախությամբ և ամպլիտուդայով:

— Մշակվել է ծրագրային փաթեթ արտաքին ազդակների (ջերմային գրադիենտ և ակուստիկական դաշտեր) առկայության պայմաններում միաբյուրեղներից դիֆրակցված անդրադարձած և դիֆրակցված անցած ռենտգենյան փնջերի բնութագրիչների թվային հաշիվների համար LabVIEW ծրագրային միջավայրում:

— Պատրաստվել է փոքր չափերի 0–ից 40 ՄՀց տիրույթի հաճախությունների սինթեզատոր 1 Հց փոփոխման քայլով, պիեզոբյուրեղներում ակուստիկ ալիքների գրգռման համար:

— Պատրաստվել է փոքր չափերի հատուկ սնուցման աղբյուր և հարմարանքներ բյուրեղներում կայուն ջերմային գրադիենտի առաջացման և ապահովման համար:

Ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել՝ բյուրեղներում դեֆորմացիոն դաշտերի որոշման, ծավալային ակուստիկական դաշտերի պարամետրերի ուսումնասիրման, ռենտգենյան փնջերի պարամետրերի կառավարման, կոշտ ռենտգենյան «սպտիկայի» բազային էլեմենտների ստացման համար, ինչպես նաև ռենտգենյան ախտորոշման սարքավորումներում, ռենտգենյան տոմոգրաֆիայում, թերապիայում, սպեկտրասկոպիայում, ռենտգենյան միկրոսկոպիայում և այլ բնագավառներում:

## SUMMARY

Sargis Khlopuzyan

### SOME QUESTIONS OF X-RAY FOCUSING IN CRYSTALS IN THE PRESENCE OF EXTERNAL INFLUENCES

The acquiring and the use of basic elements and intensive sources of short wave X-ray “optics” with controllable working parameters (energy, intensity, focus distance, etc.) are very actual especially in structural research of perfect crystals and nanosystems, in quick diagnostics of structure of matter, X-ray tomography, therapy, spectroscopy, X-ray microscopy and in other areas.

The development of more sensitive and universal methods for real structure studies in perfect crystals and nanosystems poses an urgent issue from scientific and practical viewpoints. Notwithstanding the development of newer research methods, X-ray diffractometry and X-ray diagnostics not only remain actual, but also in many cases are the non-replaceable methods for the mentioned studies.

The dissertation is dedicated to the study of dynamic processes of hard X-ray scattering in the presence of external influences (acoustic waves and temperature gradient) in perfect mono-crystals. The gained results broaden our view on the perceptions about some characteristics of diffracted X-rays in deformed crystals, as well as the scope of application of diffraction methods, particularly in the creation of base elements for hard X-ray beam optics.

In this work the following fundamental results are obtained.

- For the first time it has been shown experimentally and theoretically that the intensity of hard X-rays (energy is greater than 30keV ) reflected from the reflecting atomic planes of quartz mono-crystal ( $10\bar{1}1$ ) of X-cut, depending on the magnitude of the temperature gradient, can be increased by several orders.
- It is shown that we are able to separate a beam with a big angular and spectral width from a white beam in hard X-ray range, to pump the acquired beam towards the reflection direction and to focus it, i.e., to control the parameters of the beam in a wide range with the help of external temperature gradient applied to the quartz single crystal.
- A hard X-ray lens was developed with spatial-temporal controlled characteristics, particularly it is possible to control the focus distance from  $-\infty$  to  $+\infty$  and the angular opening starting from several angular minutes to several degrees.

- The reflection of X-rays in quartz single crystals in the presence of temperature gradient and acoustic waves is modeled for any spectral or angular distribution of the incident beam. It is shown that, depending on the thickness of the single crystal and the spectral and angular distribution of the initial beam the temperature gradient, applied vertically to the reflecting atomic planes ( $10\bar{1}1$ ), leads to the several orders increase of integral intensity, energy width and to the increase of angular width of reflected hard X-ray.
- It is shown that in the case of the massive acoustic field with specific frequency and amplitude induced in quartz mono-crystal from a reflecting atomic plane ( $10\bar{1}1$ ) in Laue reflection case we get passed and reflected modulated X-ray beams with spatial cuts similar to each other. Also, the number, width of the layers and the distance between them, that emerged in the reflected beam and are vertical to the diffraction plane, can be controlled with the frequency and amplitude of the acoustic field.
- A program package with LabVIEW programming language was developed for numerical calculations of the characteristics of X-ray beams (reflected and passed) diffracted from mono-crystals in the presence of external influences (temperature gradient and acoustic field).
- A small size synthesator of 0 to 40 MHz frequency range was developed for the purpose of stimulation of acoustic waves in piezocrystals with 1 Hz changing step.
- A small size special charging source and appliances were developed for the formation and support of stable temperature gradient in crystals.

The acquired results can be used: for determination of the parameter of deformation fields in crystals, for study of parameters of massive and surface acoustic fields, for the control of parameters of X-ray beams, acquiring base elements for hard X-ray beam optics, as well as in X-ray diagnostic equipments, X-ray tomography, in spectroscopy, in therapy, in X-ray microscopy and in other areas.