

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭФФЕКТА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ КВАРЦА Х-СРЕЗА С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.Е. БЛАГОВ^{3,4}, В.Р. КОЧАРЯН^{1,2*}, А.Е. МОВСИСЯН¹, Т.Р. МУРАДЯН¹,
А.В. ТАРГОНСКИЙ^{3,4}, Я.А. ЭЛИОВИЧ^{3,4}, Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ^{3,4},
А.Ю. СЕРЕГИН^{3,4}, В.А. КОРЖОВ^{3,4}, М.В. КОВАЛЬЧУК^{3,4}

¹Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

²Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, Томск, Россия

³Институт кристаллографии имени А. В. Шубникова РАН, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: vahan2@yandex.ru

(Поступила в редакцию 11 июня 2020 г.)

На станции РКФМ НИЦ «Курчатовский институт» проведены исследования особенностей эффекта перераспределения интенсивности дифрагированного синхротронного пучка в кристаллах кварца Х-среза в условиях возбуждения резонансных ультразвуковых колебаний. Получены зависимости интенсивности дифрагированного рентгеновского пучка от напряжения сигнала резонансной частоты, показано, что результаты согласуются с данными полученными ранее в лабораторных условиях. Также впервые получены и исследованы временные характеристики наблюдаемого эффекта перераспределения интенсивности.

1. Введение

Рентгеновское излучение позволяет проводить уникальные исследования в области наноструктурной диагностики с атомарным и субатомарным разрешением, при этом наибольший интерес представляет применение рентгеновского излучения для анализа динамики различных наномасштабных процессов. Для решения этой задачи происходит одновременное развитие трех ключевых направлений методологии современных рентгеновских экспериментов: строятся новые источники излучения, включая синхротроны четвертого поколения и лазеры на свободных электронах, производится детектирующая аппаратура, в том числе быстрые двухкоординатные детекторы, а также создается особая рентгеновская оптика, позволяющая проводить быструю перестройку параметров рентге-

новского или синхротронного пучка. Последнее направление обладает рядом преимуществ, включая масштабируемость – возможность установки на практически любом источнике, от лабораторного дифрактометра до современной синхротронной станции, а также адаптивность – возможность вариации параметров непосредственно во время проведения экспериментов, что является ключевым преимуществом при проведении экспериментов по изучению динамики различных процессов.

В рамках данного направления на текущий момент существует достаточно большое количество работ, предлагающих различные способы управления параметрами рентгеновского пучка с помощью особых элементов рентгеновской оптики [1–2]. Среди прочих стоит отметить работы научной группы из ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, которые посвящены разработке адаптивных элементов рентгеновской оптики на основе продольных и изгибных акустических колебаний [3–7], позволяющих проводить управление угловым положением рентгеновского пучка и осуществлять спектральную перестройку [8–9]. Другая научная группа из ИППФ НАН Армении давно и успешно занимается разработкой элементов, позволяющих модулировать интенсивность рентгеновского пучка с помощью поперечных акустических колебаний. В их ключевых работах [10–17] было проведено детальное изучение эффекта перераспределения интенсивности дифрагированного рентгеновского пучка кварцевым резонатором при присутствии объемных акустических волн. Было показано, что с помощью внешних акустических полей можно управлять формой и параметрами (как в пространстве, так и во времени) дифрагированного рентгеновского пучка. Например, в работе [10] было впервые обнаружено явление полной переброски рентгеновских лучей от направления прохождения к направлению отражения в монокристаллах кварца в геометрии Лауэ под влиянием ультразвуковых колебаний. В работах [11,12] экспериментально и теоретически показано, что с помощью акустического поля можно контролировать местоположение фокуса отраженного рентгеновского излучения, а также преобразовывать сферическую волну в плоскую. В работах [13,14] экспериментально показано, что возбуждение объемных акустических волн в монокристалле кварца с АТ-срезом приводит к пространственной модуляции дифрагированных пучков, у них во фронтальном сечении возникают полосы интенсивности, а их число зависит от порядка гармоники возбуждения акустического поля. В работе [15] осуществилась двойная модуляция рентгеновского излучения ультразвуковым колебанием, который в свою очередь, модулирован низкочастотным акустическим колебанием.

В работе [16] рассматривалась возможность расщепления изначального синхротронного пучка на многочисленные монохроматические пучки. Изучалась возможность применения пространственной и временной модуляции

синхротронного излучения аналогично методике, развитой в работах [10–15] для лабораторного излучения. Первые эксперименты, направленные на изучение такой возможности, проводились на кольцевом ускорителе ЕрФИ АРУС [16]. Была впервые показана возможность экспериментальной модуляции синхротронного излучения для различных резонаторов кварца. Также в данной работе впервые была показана возможность модуляции дифрагированного пучка с одновременным использованием двух управляющих частот – резонансный сигнал приводил к перераспределению интенсивности, а низкочастотный сигнал с частотой 1 или 2 кГц использовался для вторичной модуляции интенсивности отраженного от уже возбужденного кристалла рентгеновского пучка.

В одной из недавних работ [17] в лабораторных условиях были проведены экспериментальные и теоретические исследования структуры распределения интенсивности рентгеновского пучка при реализации эффекта перераспределения интенсивности из проходящего рентгеновского пучка в дифрагированный рентгеновский пучок в аналогичных кварцевых резонаторах. В данной работе с помощью численных расчетов были получены трехмерные картины распределения деформаций, которые показали, что распределение напряжений в резонаторе имеет слоистую структуру, причем «слои» параллельны плоскостям кристалла-резонатора. Также в результатах расчетов наблюдается сложная структура локальных максимумов, которая хорошо согласуется с результатами измерений с помощью метода рентгеновской топографии. Также было показано, что количество локальных максимумов зависит от частоты колебаний и возрастает вместе с ней.

Интерес представляет проведение аналогичных экспериментов на современной синхротронной станции, где интенсивность исследовательского пучка существенно выше, а также определение характерных времен наблюдаемых эффектов с использованием современных времяразрешающих методик. Соответствующие результаты приведены в данной работе.

2. Описание образцов. Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на экспериментальной станции РКФМ Курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ). Использовалась базовая конфигурация оптической схемы станции (рис.1).

В данной конфигурации станция оснащена двухкристальным монохроматором фирмы FMB Oxford с возможностью точной подстройки углового положения второго кристалла-монохроматора. Монохроматор оснащен двумя парами кристаллов кремния симметричных срезов (111) и (311).

Регистрация интенсивности осуществляется путем регистрации TTL-импульсов со сцинтилляционного детектора с помощью многоканального

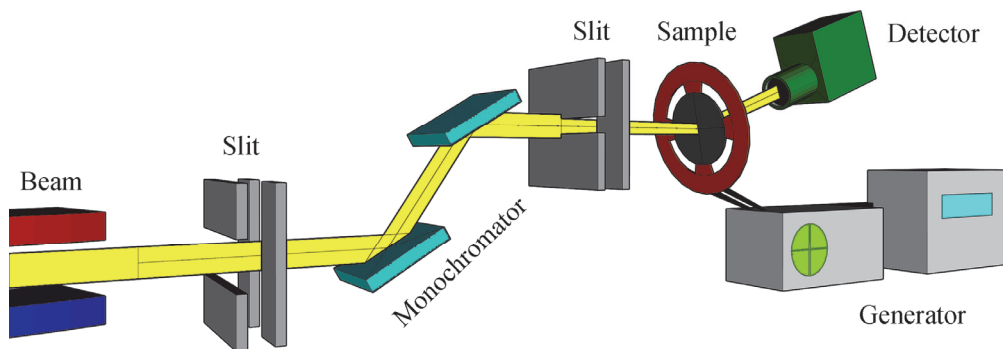


Рис.1. Экспериментальная схема, реализованная на станции РКФМ.

анализатора ORTEC Easy MCS, который синхронизируется по фазе с подаваемым управляющим сигналом с генератора Rigol DG4062 и распределяет интенсивность по каналам, длительность которых ограничена 100 нс.

В качестве образца был установлен кристалл-резонатор кварца толщиной 0.5 мм, резонансная частота которого составляет порядка 5 МГц. На боковые поверхности резонатора методом магнетронного напыления наносились токопроводящие электроды. Фотография образца и его АЧХ, измеренная с помощью анализатора спектров RIGOL DSA1030TG, представлены на рис.2.

Реальное значение резонансной частоты определялось методом корректирующего подбора частоты подаваемого сигнала на генераторе сигналов с помощью непрерывного мониторинга интенсивности рентгеновского пучка. Итоговое значение резонансной частоты составило 5.269973 МГц.

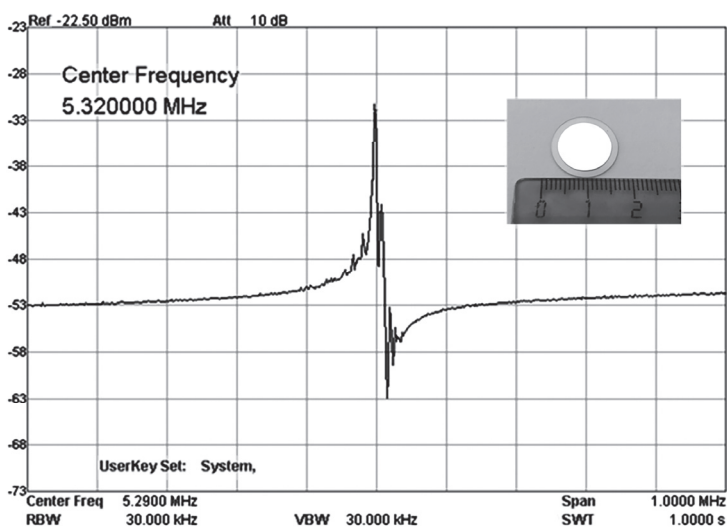


Рис.2. Фотография и АЧХ резонатора, используемого для проведения экспериментов.

После проведения предварительной юстировки экспериментальной схемы и выбор оптимальной точки поверхности кристалла была зарегистрирована зависимость формы и пика КДО (кривой дифракционного отражения) для различных значений амплитуды подаваемого сигнала. При этом фактическое напряжение на кристалле измерялось с помощью осциллографа, т.к. используемый усилитель не позволял выбрать фиксированный коэффициент усиления. Полученные результаты представлены на рис.3, где для каждой из полученных КДО указано напряжение на кристалле, измеренное с помощью осциллографа в данной точке.

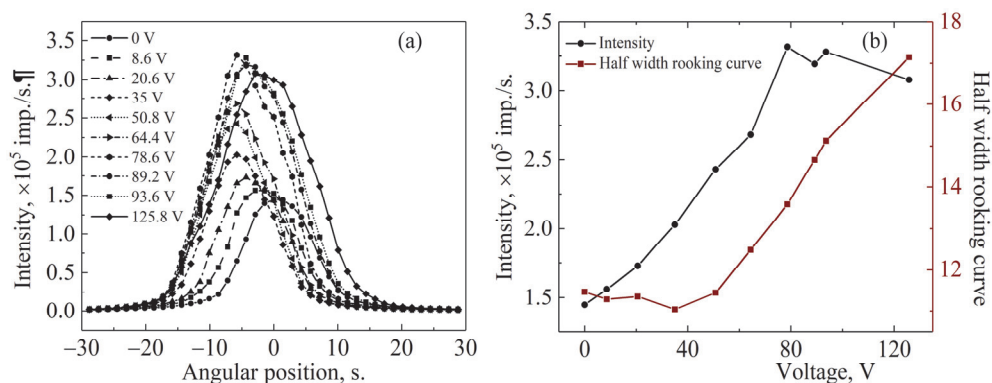


Рис.3. Зависимость формы и интенсивности пика КДО от напряжения сигнала резонансной частоты (0–125 В).

Хорошо видно, что при увеличении напряжения сначала происходит рост интенсивности пика до значений напряжения порядка 80 В, а затем кривая существенно уширяется и интенсивность пика снижается. При этом при напряжении сигнала в 80 В интенсивность дифрагированного пучка увеличивается более чем в 2 раза. Данные результаты хорошо согласуются с теоретической моделью [11–12], а также с результатами, полученными ранее при проведении аналогичных экспериментов на лабораторном дифрактометре ТРС [17].

Также крайне интересной задачей является определение временных характеристик наблюдаемого эффекта перераспределения интенсивности. Определение характерного времени установления колебаний может помочь изучить физику процесса возникновения колебаний в резонаторах, а также оценить их реальное быстродействие при использовании в качестве адаптивных элементов для быстрого управления параметрами рентгеновского пучка.

Исследование временных характеристик осуществлялось с помощью многоканального анализатора спектров Ortec EASY MCS, позволяющего разбивать анализируемый массив данных на 65536 каналов с минимальной длительностью канала в 100 нс. Эксперименты проводились следующим образом. С

помощью генератора сигналов на образец подавался резонансный сигнал, который повторялся определенное число циклов колебаний. При этом момент подачи сигнала синхронизировался по времени с блоком многоканального анализатора, что позволило накапливать статистику любое наперед заданное число раз. На рис. 4 представлен результат исследования временных характеристик эффекта, полученный при накоплении данных в многоканальном анализаторе за 25000 циклов при 10000 периодах колебаний самого резонатора.

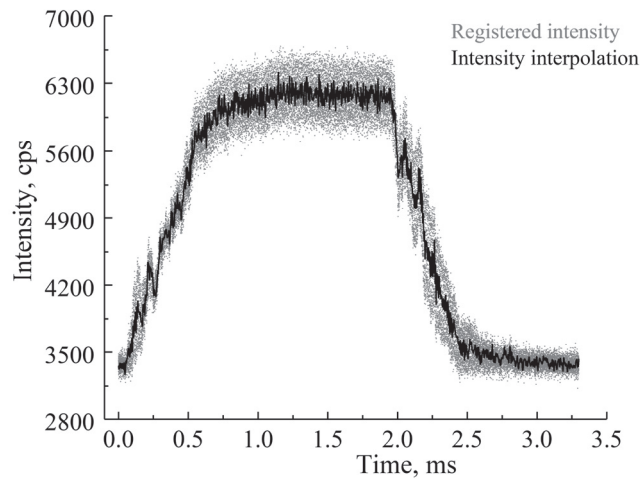


Рис.4. Исследование временных характеристик эффекта.

Хорошо видно, что характерное время установления эффекта составляет примерно 0.7 мс, при этом процесс изменения мгновенной интенсивности, регистрируемой с помощью многоканального анализатора, после включения внешнего сигнала обладает сложным характером, а процесс возбуждения кристалла является многостадийным.

Очевидно, что полученная временная оценка не соответствует по порядку периоду колебаний, характерному для резонаторов с частотами более 1 МГц, однако свой вклад может вносить не только физика возникновения колебаний в резонаторах, но и ограниченное быстродействие оборудования. Оценка вклада аппаратной функции, т.е. характерного времени установления колебаний после усилителя осуществлялось с помощью аналогичной системы для возбуждения определенного числа колебаний, при этом одновременно с мониторингом интенсивности осуществлялся контроль релаксации колебаний непосредственно на выходе используемого усилителя с помощью быстрого осциллографа.

В таком режиме работы была получена оценка характерного времени затухания колебаний, результаты измерений для процессов включения и выключения сигнала представлены на рис.5. Из проведенной оценки видно, что полное время нарастания сигнала составляет не более 200 нс при используемом

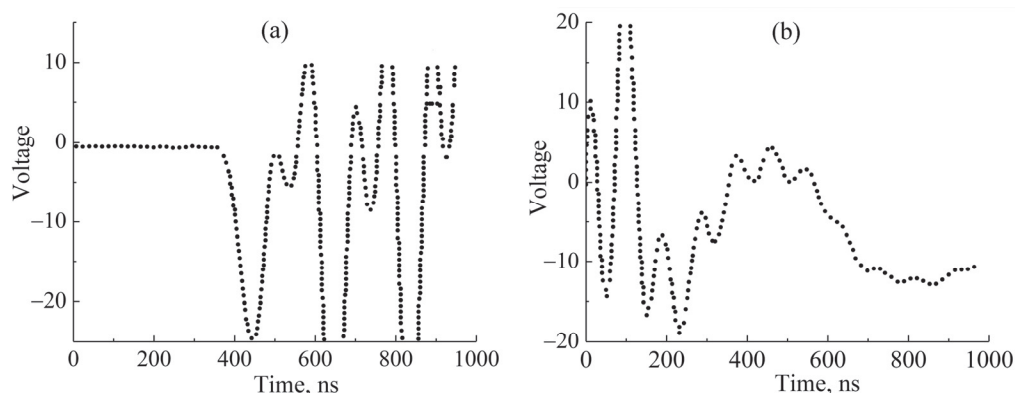


Рис.5. Оценка аппаратных временных характеристик используемого оборудования для генерации управляющего сигнала с помощью осциллографа.

оборудовании. Время полной релаксации электрического управляющего сигнала занимает чуть более продолжительное время и, согласно полученным данным, составляет около 1 микросекунды.

При этом наблюдаемый эффект имеет другой порядок характерных времен – процесс нарастания и релаксации интенсивности занимает времена порядка миллисекунд, что хорошо видно из рис.4, на котором одна точка соответствует одному каналу и составляет по длительности 100 нс. Для максимальной наглядности на рис.6 на одной временной шкале представлено сравнение времен наблюдаемого эффекта с измеренными значениями, характерными для используемой аппаратуры. Здесь серый график – результаты измерений интенсивности, а черный – результат моделирования подаваемого сигнала с учтенной аппаратной задержкой сигнала.

Интересным также представлялось изучение поведения резонатора в

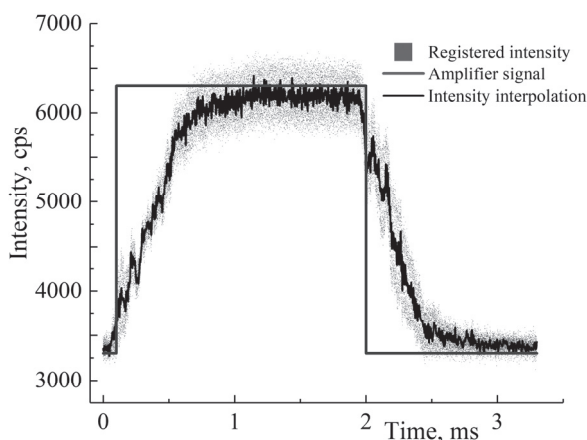


Рис.6. Сравнение быстродействия используемой аппаратуры и временных характеристик эффекта, полученных при проведении эксперимента.

зависимости от количества циклов колебаний подаваемого резонансного сигнала. Такие эксперименты ранее не проводились, однако крайне интересны, т.к. могут позволить более точно определить временные особенности наблюдаемого эффекта, а также попытаться оценить механизмы распределения колебаний при подаче сигнала.

Для проведения данного эксперимента использовалась такая же схема эксперимента, что и для оценки временных характеристик эффекта. С помощью синхронизации многоканального анализатора по определенному номеру канала с генератором на образец подавалось фиксированное число циклов колебаний управляющего сигнала, при этом измерялась зависимость интенсивности от номера канала, т.е. от времени. Время канала составляло минимально возможные для данного прибора 100 нс.

Примеры полученных результатов для 500 и 2000 циклов колебаний представлены на рис.7.

Из полученных результатов видно, что при 500 циклах колебаний кристалл даже не успевает полностью перейти в возбужденное состояние, однако процесс релаксации все равно занимает длительное время.

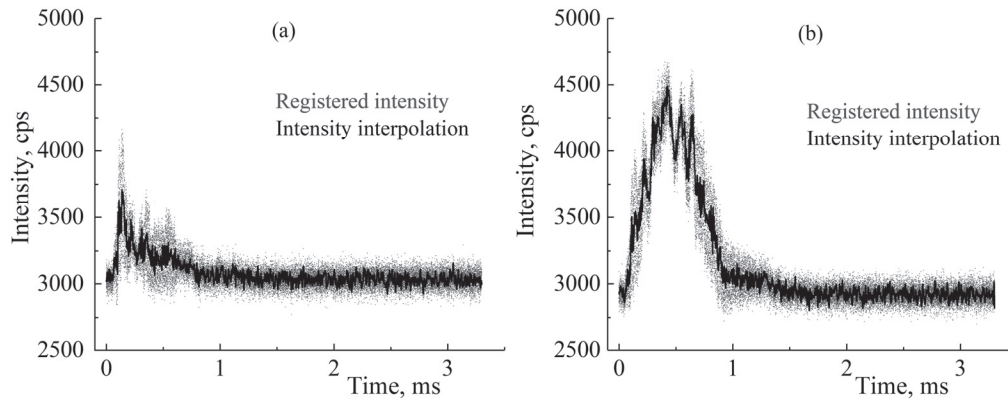


Рис.7. Зависимость интенсивности от времени при различном числе колебаний кристалла-резонатора: (а) 500 циклов колебаний, (б) 2000 циклов колебаний.

3. Выводы и заключение

Проведены исследования эффекта перераспределения интенсивности синхротронного пучка, дифрагированного от кварцевого резонатора, в котором возбуждаются поперечные резонансные колебания. Показана возможность быстрой модуляции интенсивности синхротронного пучка. Полученные в рамках данной работы результаты полностью согласуются с полученными ранее в лабораторных условиях.

Впервые изучены временные характеристики наблюдаемого эффекта перераспределения интенсивности, показано, что процесс занимает времена порядка 1 мс, причем это время не связано с особенностями используемого экспериментального оборудования. Представляется перспективным интересным проведение дальнейших экспериментов на синхротронном источнике, в том числе с двухчастотными элементами особой конструкции, в которых возможно возбуждение одновременно продольных и поперечных волн, что позволит управлять одновременно угловым положением и интенсивностью дифрагированного излучения.

Исследования проводились при поддержке министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части подготовки исследуемых образцов, а также при финансовой поддержке ГКН МОН РА и РФФИ (РФ) в рамках совместной научной программы 18RF-142 и 18-52-05024 соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Richwin, R. Zaeper, D. Lutzenkirchen-Hecht, R. Frahm.** Journal of Synchrotron Radiation, **8**, 354 (2001).
2. **E. Fonda, A. Rochet, M. Ribbens, L. Barthe, S. Belin, V. Briois.** Journal of Synchrotron Radiation, **19**, 417 (2012).
3. **А.Е. Благов, А.С. Быков, И.В. Кубасов, М.Д. Малинкович, Ю.В. Писаревский, А.В. Таргонский, Я.А. Элиович, М.В. Ковальчук.** Приборы и техника эксперимента, № 5, 109 (2016).
4. **A.E. Blagov, M.V. Koval'chuk, V.G. Kohn, V.V. Lider, Yu.V. Pisarevski.** J. Exp. Theor. Phys., **101**, 770 (2005).
5. **А.Е. Благов, М.В. Ковальчук, Ю.В. Писаревский, П.А. Просеков.** Кристаллография, **53**, 411 (2008).
6. **М.В. Ковальчук, А.В. Таргонский, А.Е. Благов, И.С. Занавескина, Ю.В. Писаревский.** Кристаллография, **56**, 886 (2011).
7. **А.Е. Благов, А.Н. Даринский, М.В. Ковальчук, Ю.В. Писаревский, П.А. Просеков, А.В. Таргонский.** Акустический журнал, **59**, 561 (2013).
8. **А.Е. Благов, Ю.В. Писаревский, М.В. Ковальчук.** Кристаллография, **61**, 191 (2016).
9. **А.Е. Благов, Ю.В. Писаревский, П.А. Просеков, А.В. Таргонский, Я.А. Элиович, А.И. Проценко, М.В. Ковальчук.** Кристаллография, **62**, 870 (2017).
10. **А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, Р.Г. Габриелян и др.** Письма в ЖТФ, **9**, 1181 (1983).
11. **R.G. Gabrielyan, A.R. Mkrtchyan, H.A. Aslanyan, Kh.V. Kotandyan.** Phys. Stat. Sol. (a), **92**, 361 (1985).
12. **A.R. Mkrtchyan, M.A. Navasardian, R.G. Gabrielyan, L.A. Kocharian, R.N. Kuzmin.** Solid State Commun., **59**, 147 (1986).
13. **T.R. Muradyan, R.V. Amiraghyan, S.H. Khlopuzyan, A.R. Wagner, V.R. Kocharyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **50**, 204 (2015).

14. A.R. Mkrtchyan, A.S. Bagdasaryan, V.R. Kocharyan, A.A. Kiziridi, T.R. Muradyan. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **51**, 386 (2016).
15. Л.А. Кочарян, А.Г. Бегларян, О.А. Унанян, К.Г. Галоян, Э.М. Арутюнян. Изв. АН Арм. ССР. Физика, **21**, 323 (1986).
16. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, Л.А. Кочарян, В.К. Мирзоян, О.А. Унанян, К.Т. Айрапетян. Изв. АН Арм. ССР. Физика, **21**, 326 (1986).
17. A.R. Mkrtchyan, A.E. Blagov, V.R. Kocharyan, A.G. Kulikov, A.E. Movsisyan, T.R. Muradyan, A.V. Targonsky, Ya. A. Eliovich, A.N. Darinski, Yu.V. Pisarevski, M.V. Kovalchuk. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **54**, 210 (2019).

X-ԿՏՐՎԱՅՔՈՎ ԿՎԱՐՅԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԱԼԻՔՆԵՐԻ
ԳՐԳՈՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԱՇԽՄԱՆ
ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ
ՄԻՆԲՐՈՏՐՈՆԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ա.Ե. ԲԼԱԳՈՎ, Վ.Ռ. ՔՈՉԱՐՅԱՆ, Ա.Ե. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ, Տ.Ր. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ,
Ա.Վ. ՏԱՐԳՈՆՍԿԻՅ, ՅԱ.Ա. ԷԼԻՈՎԻՉ, ՅՈՒ.Վ. ՊԻՍԱՐԵՎՍԿԻ,
Ա.ՅՈՒ. ՍԵՐԵԳԻՆ, Վ.Ա. ԿՈՐԺՈՎ, Մ.Վ. ԿՈՎԱԼՉՈՒԿ

Ազգային հետազոտական կենտրոն «Կուրչատովյան ինստիտուտ»-ի «РКФМ» կայանում ուսումնասիրվել են X-կտրվածքով կլարցի միաբյուրեղներում ռեզոնանսային ուլտրաձայնային տատանումների առկայության պայմաններում դիֆրակցված սինքրոտրոնային փնջի ինտենսիվության վերաբաշխման երևույթի առանձնահատկությունները: Ստացվել են դիֆրակցված ռեզոնանսային ճառագայթման ինտենսիվության կախվածությունը բյուրեղներին տրվող ազդանշանի լարումից, ցույց է տրվել, որ ստացված արդյունքները համահունչ են նախկինում լաբորատոր պայմաններում կատարված հետազոտությունների հետ: Առաջին անգամ հետազոտվել են նաև դիֆրակցված ճառագայթման ինտենսիվության վերաբաշխման երևույթի ժամանակային բնութագրերը:

STUDY OF THE PECULIARITIES OF THE EFFECT OF REDISTRIBUTING INTENSITY IN THE EXCITATION OF ACOUSTIC WAVES IN X-CUT QUARTZ CRYSTALS BY USING SYNCHROTRON RADIATION

A.E. BLAGOV, V.R. KOCHARYAN, A.E. MOVSIKYAN, T.R. MURADYAN,
A.V. TARGONSKY, YA. A. ELIOVICH, Yu.V. PISAREVSKY,
A.YU. SEREGIN, V.A. KORZHOV, M.V. KOVALCHUK

At the “RKFM” stations in NRC “Kurchatov institute”, the characteristics of the effect of redistribution of the intensity of the diffracted synchrotron beam in X-cut quartz crystals under the conditions of excitation of transverse resonant ultrasonic vibrations were studied. The dependences of the intensity of the diffracted X-ray beam on the resonant frequency voltage of the signal are obtained. It is shown that the results are consistent with those previously recorded in the laboratory. Additionally, the temporal characteristics of the observed intensity redistribution effect were obtained and studied for the first time.