

УДК 539.26, 534.16, 548.73

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В КОЛЕБЛЮЩЕМСЯ РЕНТГЕНОАКУСТИЧЕСКОМ ЭЛЕМЕНТЕ НА ОСНОВЕ X-СРЕЗА КРИСТАЛЛА КВАРЦА

А.Р. МКРТЧЯН^{1,2}, А.Е. БЛАГОВ^{3,4}, В.Р. КОЧАРЯН^{1,2*}, А.Г. КУЛИКОВ^{3,4},
А.Е. МОВСИСЯН¹, Т.Р. МУРАДЯН¹, А.В. ТАРГОНСКИЙ^{3,4},
Я.А. ЭЛИОВИЧ^{3,4}, А.Н. ДАРИНСКИЙ³,
Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ^{3,4}, М.В. КОВАЛЬЧУК^{3,4}

¹Институт прикладных проблем физики НАН РА, Ереван, Армения

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

³Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография
и фотоника» РАН, Москва, Россия

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

*e-mail: vahan2@yandex.ru

(Поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.)

Экспериментально и теоретически исследованы механические деформации в кварцевом рентгеноакустическом элементе, возникающие при возбуждении резонансных толщинных ультразвуковых колебаний. Эксперименты проводились методами рентгеновской топографии и двухкристальной дифрактометрии, а теоретические расчеты – с помощью математического моделирования методом конечных элементов. Из расчетов следует, что механическая деформация, возникающая в резонаторе в результате возбуждения толщинных колебаний, сильно стратифицирована и представляет серию максимумов, расстояние между которыми зависит от кристаллографического направления. Наблюдающееся большое число узлов и пучностей колебаний напрямую зависит от резонансной частоты рентгеноакустического элемента. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

1. Введение

Дифракция рентгеновских лучей в монокристаллах крайне чувствительна к изменению параметра кристаллической решетки, которое может быть вызвано как статическими дефектами решетки, так и различными внешними факторами, в частности, воздействием акустических полей. В течение последних нескольких десятков лет было опубликовано большое число работ, посвященных изучению различных аспектов этой проблемы. Одно из направлений исследований связано

с возможностью получения информации о самих упругих колебаниях в монокристалле, что является важным для физической акустики, и, кроме того, может быть использовано для контроля качества различных устройств пьезотехники и акустоэлектроники. Другим направлением является исследование новых эффектов и фундаментальных особенностей рентгеноакустического взаимодействия в монокристаллах, что открывает возможности создания адаптивных рентгенооптических элементов с управляемыми в пространстве и времени параметрами, такими как, например, угловая расходимость или интенсивность отраженного пучка.

В работах [1–3] исследовался эффект ослабления аномального прохождения ($\mu t \geq 10$) рентгеновских лучей при воздействии ультразвука (УЗ) с волновым вектором, перпендикулярным отражающим плоскостям. Экспериментальные и теоретические результаты, полученные в этих работах, показали высокую чувствительность интенсивности аномального прохождения к акустическим деформациям. Обнаружены и исследованы эффекты резонансного подавления аномального прохождения и осцилляции интенсивности рентгеновского излучения (РИ) при изменении амплитуды акустических колебаний. Наблюдаемые эффекты позволяют локально и с высокой чувствительностью проводить измерение динамических параметров кристаллов.

В случае дифракции в геометрии Брэгга достаточно возбуждения лишь приповерхностных слоев, поэтому одно из направлений связано с изучением поверхностных акустических волн (ПАВ) [4–6]. В этих условиях в кристалле образуется сверхрешетка, что приводит к возникновению дополнительных максимумов при отражении рентгеновского пучка (сателлитов) и к уменьшению интенсивности основного максимума, что может быть использовано в качестве электронного аналога механического прерывателя пучка.

Одним из наиболее удобных и эффективных способов влияния на дифракцию рентгеновских лучей в геометрии Лауэ является модуляция монокристаллической пластины стоячей низкочастотной (~ 100 кГц) УЗ волной с волновым вектором, направленным вдоль поверхности образца. В работах [7–13] исследованы особенности дифракции рентгеновских лучей и предложены подходы для управления пространственно- и спектрально-временными характеристиками рентгеновского пучка, и реализовано их использование для проведения рентгенодифракционных экспериментов, например, регистрации кривой дифракционного отражения (КДО) или сканирования длины волны.

Другими важными применениями являются исследования дифракции рентгеновских лучей в геометрии Лауэ, когда в монокристаллах возбуждены объемные акустические колебания, распространяющиеся вдоль толщины образца [14–26]. В этих работах показано, что наличие внешних акустических полей или температурного градиента может резко изменить сечение процесса рассеяния в

конкретном образце и таким образом может стать удобным инструментом управления параметрами дифрагированного рентгеновского излучения в пространстве и во времени. В работах [14,15] впервые наблюдалось явление полной переборки рентгеновских лучей из направления прохождения в направлении отражения в монокристаллах кварца, находящихся под действием акустической волны в геометрии дифракции Лауэ. Первые теоретические расчеты [16] для объяснения полученных результатов были выполнены для плоской рентгеновской волны, а в дальнейшем повторены и для сферической волны [17]. Одной из важных задач, которая решается при управлении параметрами РИ, является его фокусировка. В этом направлении в работах [17,18] экспериментально показано, что с помощью акустических полей и температурного градиента можно фокусировать и управлять местоположением фокуса дифрагированного пучка в пространстве и во времени, а также преобразовывать сферическую волну в плоскую. В работе [19] экспериментально исследована угловая ширина перебрасываемого РИ, а также её зависимость от толщины монокристалла. Показано, что угловая ширина полного перебрасываемого излучения прямо пропорциональна толщине исследуемого образца. В другой работе [20] экспериментально исследована зависимость полуширины кривой качания от величины внешних воздействий. При использовании плоской монохроматической рентгеновской волны было показано, что с помощью кривых качания, снятых в различных областях кристалла, можно определить радиус изгиба отражающих атомных плоскостей и тем самым определить градиент деформации в кристалле.

В работах [21,22] исследовано поведение коэффициента поглощения рентгеновского излучения для монокристалла кварца в геометрии Лауэ при наличии акустических колебаний и показано, что с увеличением меры воздействий резко уменьшается коэффициент поглощения РИ.

В работах [23,24] рассмотрена модуляция интенсивности рентгеновского излучения во времени в поле акустической волны, которая, в свою очередь, модулирована низкочастотными акустическими колебаниями разной формы. Показано, что интенсивность дифрагированных пучков осциллирует, практически повторяя характерную форму низкочастотного возбуждения.

В работах [25,26] экспериментально показано, что присутствие объемных акустических волн в монокристалле кварца АТ-среза приводят к пространственной модуляции дифрагированных пучков, причем в кристаллах во фронтальном сечении возникают полосы интенсивности.

Для управления параметрами рентгеновских пучков используются и другие методы, например, зеркала, действующие на принципе полного внешнего отражения [27] с периодической многослойной структурой [28], френелевские

зонные пластины [29]. Однако отметим, что существенным препятствием для повышения эффективности вышеуказанных рентгенооптических элементов являются некоторые технологические трудности, связанные с их структурой, а также качеством обработки материалов. Особенно их эффективность ограничивается из-за поглощения рентгеновских лучей. Еще одним недостатком таких элементов является то, что они разрабатываются для использования в определенных статических рентгенооптических схемах и, как правило, не допускают быстрой оперативной перестройки параметров.

С этой точки зрения элементы рентгеновской оптики, основанные на применении акустических волн, выгодно отличаются от вышеупомянутых. Во-первых, они позволяют изменять параметры пучка в широком диапазоне при вариации параметров самих колебаний, а во-вторых, такие элементы позволяют производить контролируемую перестройку параметров за один период собственных колебаний, что открывает возможности проведения исследований в режиме непрерывного сканирования, в том числе – с временным разрешением.

В некоторых случаях [30] интенсивность отраженного пучка по фронту неравномерна и зависит от амплитуды приложенного электрического поля, что из-за использования слишком упрощенной модели модуляции кристаллической решетки акустической волной не позволяет теоретически описать реальные экспериментальные результаты.

С этой целью в данной работе теоретически и экспериментально исследовано деформационное поле в рентгенооптических элементах – кристаллах кварца X-среза при присутствии поперечных акустических полей.

2. Экспериментальные и теоретические исследования, обсуждение результатов

Рентгенодифракционные измерения проводились с использованием полихроматического (а) и монохроматического (б) пучков (рис. 1а и б). В качестве образцов были использованы кристаллы кварца в форме диска диаметром 16 мм с толщиной 0.65 мм и диаметром 20 мм с толщиной 2.8 мм. Ориентация лицевых поверхностей кристаллов $(11\bar{2}0)$ (X-срез), на них были нанесены тонкие (до 1 мкм) токопроводящие слои. Для закрепления образцов использовались специальные кристаллодержатели, оснащенные кольцевыми контактами для подвода электрического сигнала, позволявшие проводить эксперименты в геометрии Лауэ (на просвет).

В экспериментах с полихроматическим пучком использована рентгеновская трубка с Ag анодом БСВ-29 при напряжении 30 кВ и с анодным током 5 мА (рис. 1а). На расстоянии 1 см и 41 см от источника поставлены щели с размером

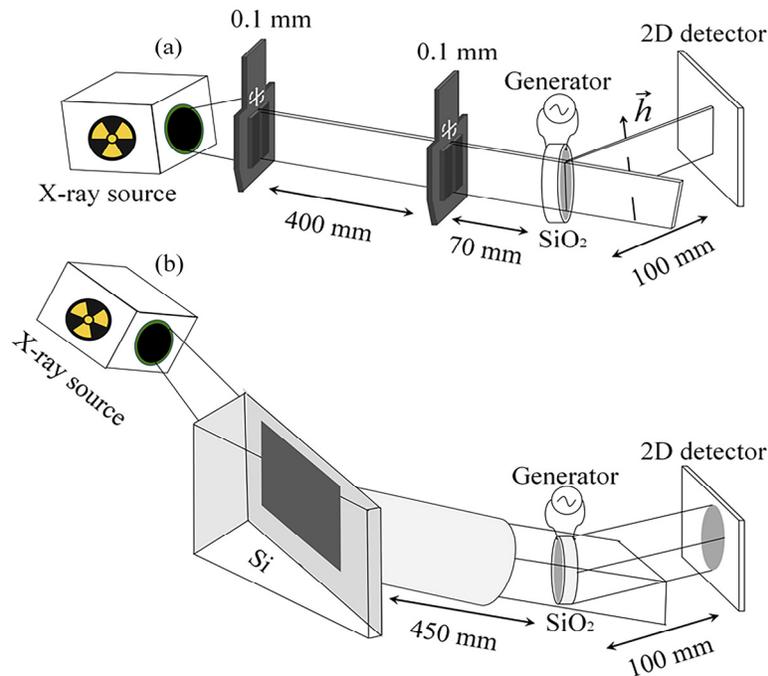


Рис.1. Экспериментальная схема с использованием (а) полихроматического и (б) монохроматического рентгеновского пучка.

$0.1 \times 10 \text{ мм}^2$ соответственно. Исследуемый образец установлен на расстоянии 7 см от последней щели в геометрии Лауэ. Такая коллимация рентгеновского пучка обеспечивала отражение от атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ монокристалла кварца только $K\alpha_1$ -линии излучения (длина волны $\lambda([AgK\alpha_1]) = 0.55941 \text{ \AA}$, угол Брэгга $\theta_B = 4.80^\circ$). На расстоянии 10 см от образца был установлен двумерный координатный детектор рентгеновского излучения, апертура матрицы которого составляла 255×255 пикселя, а размер каждого пикселя (разрешение) $55 \times 55 \text{ мкм}^2$.

Эксперименты с монохроматическим пучком реализованы в двухкристалльной схеме рентгеновской дифракции на базе лабораторного дифрактометра ТРС (Рис.1б). Источник излучения – рентгеновская трубка с Мо анодом, из спектра которой с помощью системы коллимации и кристалла монохроматора с асимметричным отражением 440 ($\theta_M = 21.68^\circ$) и коэффициентом асимметрии $b = 0.025$ выделялась спектральная линия $MoK\alpha_1$ с длиной волны $\lambda[MoK\alpha_1] = 0.70932 \text{ \AA}$. После монохроматора линейные размеры полученного пучка составляли $12 \times 18 \text{ мм}^2$ на позиции образца. Регистрация топограмм производилась на двумерном координатном детекторе с размером $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ и апертурой 1024×1024 пикс. Расстояние монохроматор-образец составляло 45 см, а образец-детектор составляло 10 см. Образец с толщиной 0.65 мм устанавливался в положение, удовлетворяющее условию дифракции для рефлекса $(20\bar{2}2)$

в геометрии Лауэ с углом Брэгга $\theta_B = 12.25^\circ$.

Приложение электрического поля в направлении параллельном оси X $[11\bar{2}0]$ кварца вызывает в исследуемых образцах колебания сдвига по толщине, перпендикулярно плоскостям $(10\bar{1}1)$, на которых реализуется рентгеновская дифракция в геометрии Лауэ.

Для определения резонансной частоты образцов, соответствующей возбуждению колебаний сдвига по толщине, регистрировались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) кристаллов кварца (рис.2). Измерения проводились с помощью анализатора спектра Rigol DSA815TG. Из АЧХ определялась резонансные частоты $f_{рез} = 4.385$ МГц для кристалла толщиной 0.65 мм и $f_{рез} = 1.008$ МГц для кристалла толщиной 2.8 мм, что соответствует расчетным значениям, полученным исходя из частотной постоянной используемой моды колебаний X-среза кварца.

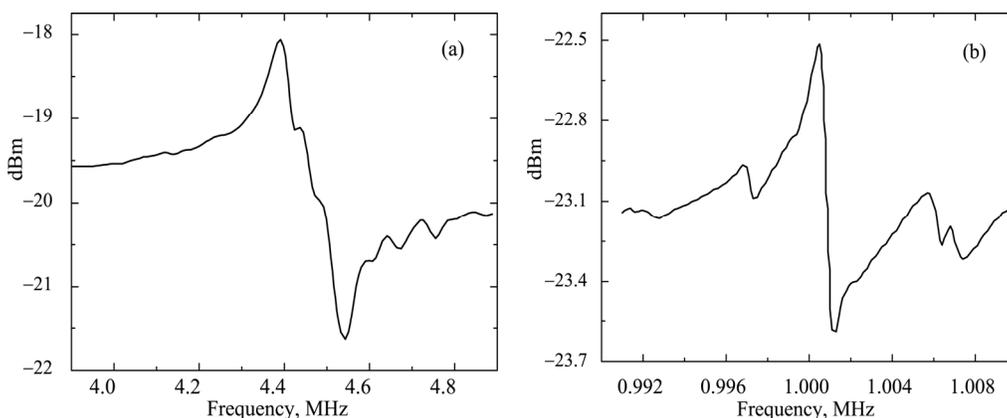


Рис.2. АЧХ в области частот 4.3894 ± 0.05 МГц для кристалла толщиной 0.65 мм (а) и в области частот 1.008 МГц ± 0.012 МГц для кристалла толщиной 2.8 мм (б).

Приведенные АЧХ свидетельствуют о возбуждении относительно чистых мод колебаний для обоих резонаторов с наличием небольших паразитных колебаний, менее выраженных в случае тонкого образца.

Распределение деформаций по объему образца можно оценить с помощью рентгеновской топограммы монокристалла, снимающейся в геометрии Лауэ по методу Ланга, когда кристалл и 2D детектор одновременно двигаются поперек пучка, или методом с использованием асимметричного монохроматора, когда происходит засветка большой области кристалла широким пучком. Во втором случае 2D детектором регистрируется картина дифракции в режиме накопления интегральной интенсивности, т.е. с одновременным поворотом по оси ω вблизи

Брэгговского максимума в процессе съемки, что позволяет оценить распределение узлов и пучностей колебаний по объему образца [31].

На рис.3а и б приведены рентгеновские топограммы кристалла толщиной 2.8 мм, полученные по методу Ланга в отсутствие и при подаче акустических колебаний. Резонансная частота возбуждения кристалла составляла 1.008 МГц. Амплитуда электрического сигнала в режиме возбуждения акустических колебаний на резонансной частоте составляла 60 В. Проекция падающего рентгеновского пучка определялась размером щелей и составляла $0.1 \times 10 \text{ мм}^2$.

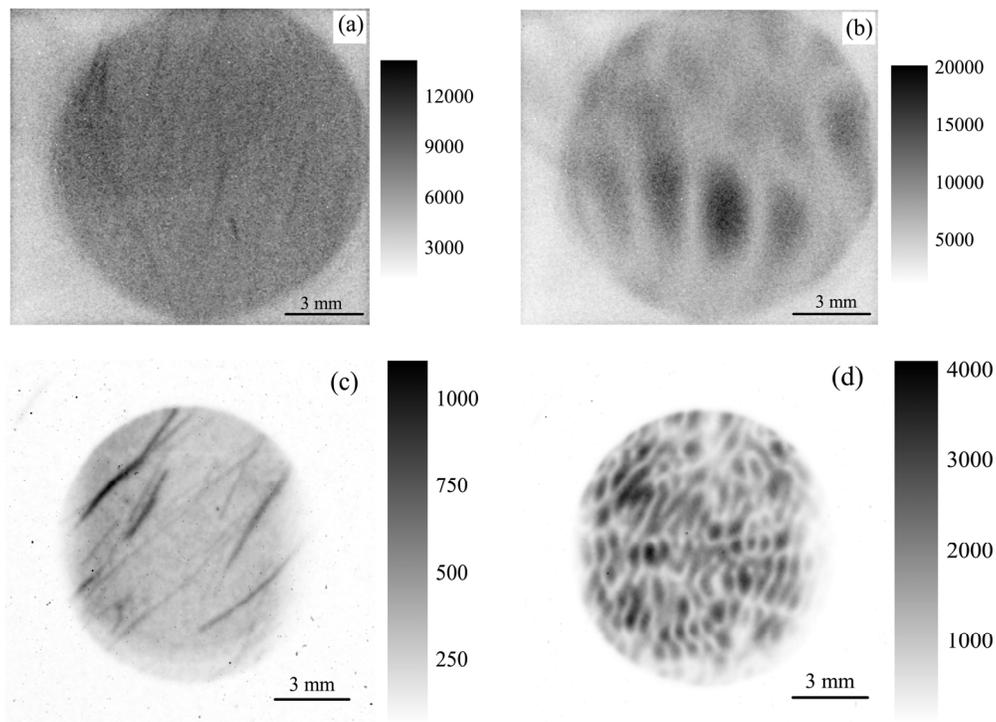


Рис.3. Рентгеновские топограммы кварцевых резонаторов толщиной 2.8 мм, полученные по методу Ланга (рефлекс $(10\bar{1}1)$) в отсутствие (а) и при возбуждении (б) акустических колебаний резонансной частоты 1.008 МГц, и толщиной 0.65 мм, полученные с использованием широкого монохроматического пучка (рефлекс $(20\bar{2}2)$) в отсутствие (с) и при подаче (д) акустических колебаний с частотой 4.3989 МГц.

На Рис.3с и д приведены рентгеновские топограммы кристалла толщиной 0.65 мм, полученные при облучении широким монохроматическим пучком в отсутствие и при возбуждении акустических колебаний в геометрии Лауэ. Резонансная частота возбуждения кристалла равнялась 4.3989 МГц. Амплитуда электрического сигнала – 40 В. Проекция падающего рентгеновского пучка на

образце составляла $12 \times 18 \text{ мм}^2$ ».

Без акустических колебаний на топограммах (рис.3а и с) хорошо видна дефектная структура кристаллов, а при возбуждении акустических колебаний (рис.3b и d) в кристалле проявляется особая форма деформации, при которой коэффициент отражения падающего рентгеновского излучения для разных участков кристалла имеет различные значения. Полученная сложная картина распределения интенсивности является следствием образования на поверхности кристалла большого количества узлов и пучностей колебаний, при этом максимальная интенсивность соответствует пучностям [32]. Кроме того, влияние статических дефектов на итоговую картину распределения интенсивности возбужденного кристалла становится незаметным.

На рис.4а и b приведены значения интенсивности отраженного пучка, зарегистрированные от разных участков кристалла с помощью линейного сканирования параллельно вектору дифракции (0 соответствует началу сканирования) для кристаллов с толщиной 2.8 мм и 0.65 мм без и с присутствием акустических полей, при амплитудах колебаний электрического сигнала 60 В и 40 В, соответственно.

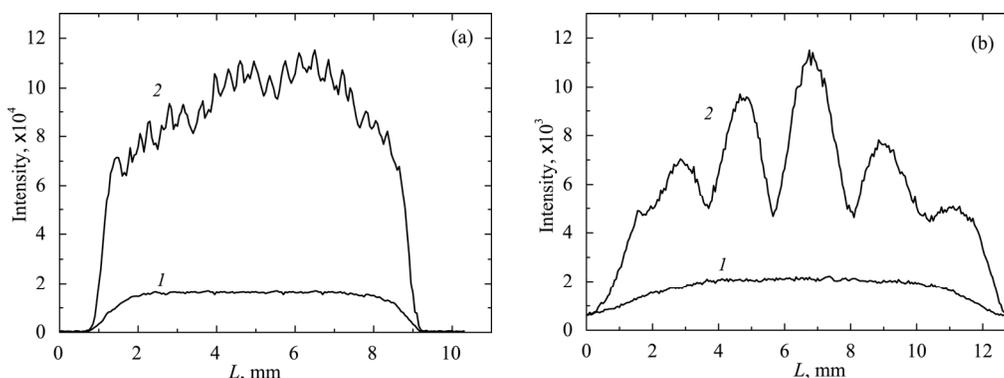


Рис.4. Значения интенсивности отраженного пучка от разных участков кристалла при линейном сканировании параллельно вектору дифракции для кристаллов с толщиной 0.65 мм (а) и 2.8 мм (b), без и при возбуждении акустических полей, кривые (1) и (2), соответственно.

Из кривых 1 на рис.4а и b видно, что без акустических колебаний интенсивность отраженного пучка с приближением к центру кристалла постепенно увеличивается, а с удалением от центра – уменьшается. Это объясняется тем, что падающий пучок в центре кристалла освещает больший участок, чем по краям.

Из анализа кривых, полученных при возбуждении акустических колебаний, приведенных на рис.4а и b, следует, что при дифракции РИ происходит многократное увеличение интенсивности отраженного рентгеновского излучения и

с приближением к центру кристалла наряду с увеличением интенсивности отраженного пучка наблюдается периодичность изменения интенсивности. Из этого можно предположить, что внутри кристалла значения деформации по ее длине периодически меняются, при этом полученные данные хорошо согласуются с данными рентгеновской топографии, представленными на рис.3.

С целью теоретического рассмотрения деформационного поля в X-среза монокристалле кварца в условиях возбуждения поперечных акустических полей проведено численное моделирование механического отклика образца методом конечных элементов. В модели рассматривался монокристалл кварца X-среза толщиной 0.65 мм, который находится под воздействием электромагнитного поля с напряжением – 1 В и с резонансной частотой $f_{\text{рез}} = 4.385$ МГц.

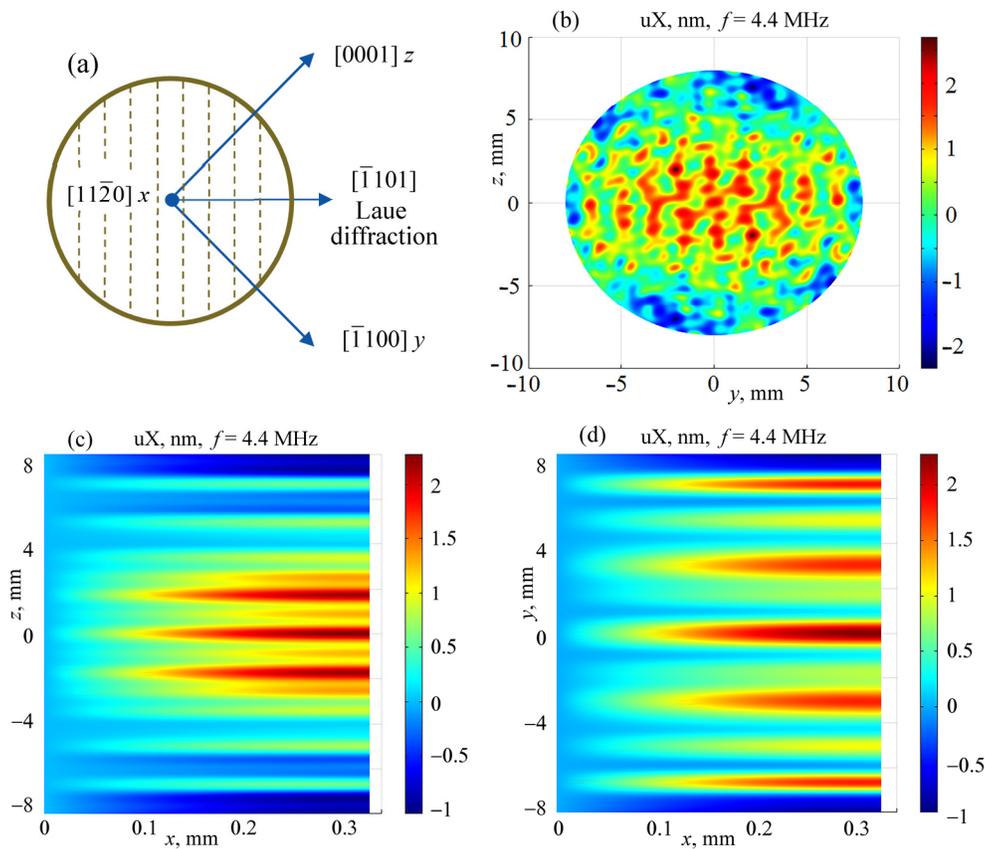


Рис.5. Схематическое изображение поверхности исследуемого кристалла (X-срез) и систем кристаллических плоскостей (а) смещения по оси X на поверхности кристалла (б), деформации по толщине кристалла в центральном сечении кристалла XY (с) и в центральном сечении кристалла XZ (д). На рис. (с) и (д) показана половина кристалла по толщине. $X = 0$ – середина кристалла, $X = 0.325\text{мм}$ – внешняя поверхность.

Схематическое изображение поверхности исследуемого кристалла (X-срез) и системы кристаллических плоскостей приведены на рис.5а. На рис.5b приведены смещения поверхности кристалла вдоль оси X. На рис.5с и d приведены деформации по толщине кристалла в центральном сечении плоскостей XY и XZ, соответственно.

На рис.5b видно, что смещения поверхности по оси X (распределение деформации на поверхности кристалла) имеет сложный вид, очень близкий к наблюдаемому ранее на топограммах. На рис.5с и d видно, что внутри (в центре) кристалл фактически не деформируется, а при приближении к краю значения деформации монотонно растут. Кроме того, из рисунков следует, что по длине пластины значения деформации периодически меняются, что также соответствует проведенным измерениям интенсивностей отраженного пучка на разных участках кристалла (кривые 2 на рис.4а и b).

3. Заключение

Таким образом, проведено экспериментальное и теоретическое изучение пространственной структуры распределения интенсивности рентгеновского пучка при реализации эффекта переброски рентгеновских лучей в геометрии дифракции Лауэ из направления прохождения в направление отражения в колеблющихся кварцевых резонаторах. С помощью численных расчетов получены сечения 3D картины распределения деформаций тремя ортогональными плоскостями, показывающие, что распределения напряжений представляет систему слоев, параллельных плоскости кварцевого резонатора, а также сложную структуру локальных максимумов, накладывающихся на теоретическую кривую распределения Гаусса. Характер распределения локальных максимумов, полученный методами рентгеновской топографии и дифракции, хорошо согласуется с расчетными результатами.

Показано, что количество локальных максимумов деформаций существенно возрастает с ростом частоты колебаний. Возрастание резонансной частоты от 1 МГц до 4.3 МГц уменьшает расстояние между локальными максимумами деформации практически на порядок (от 2.5 мм до 0.3 мм).

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития методов численного моделирования и регистрации спектров АЧХ, а также при финансовой поддержке ГКН МОН РА и РФФИ (РФ) в рамках совместной научной программы 18RF-142 и 18-52-05024 Арм_а соответственно, в части подготовки образцов и проведения рентгенодифракционных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.R. Entin.** Phys stat sol. (b), **90**, 575 (1978).
2. **A.E. Blagov, M.V. Koval'chuk, V.G. Kohn, V.V. Lider, Yu. V. Pisarevskii.** Journal of experimental and theoretical physics, **101**, 770 (2005).
3. **A.E. Blagov, M.V. Koval'chuk, V.G. Kohn, Yu. V. Pisarevskii.** Crystallography Reports, **51**, 729 (2006).
4. **V.V. Antipov, A.A. Blistanov, E.D. Roshchupkina, R. Tucoulou, L. Ortega, D.V. Roshchupkin.** Appl. Phys. Lett., **85**, 5325 (2004).
5. **D.V. Roshchupkin, D.V. Irzhak, and V.V. Antipov.** Appl. Phys. Lett., **94**, 222903 (2009).
6. **V.I. Punegov, Y.I. Nesterets, D.V. Roshchupkin.** J. Appl. Cryst., **43**, 520 (2010).
7. **A.E. Blagov, M.V. Kovalchuk, Yu.V. Pisarevskii, P.A. Prosekov.** Crystallography Reports, **53**, 379 (2008).
8. **А.Е. Благов, А.Н. Даринский, М.В. Ковальчук, Ю.В. Писаревский, П.А. Просеков, А.В. Таргонский.** Акустический журнал, **59**, 561 (2013).
9. **А.Е. Благов, Ю.В. Писаревский, А.В. Таргонский, Я.А. Элиович, М.В. Ковальчук.** ФТТ. **59**, 947 (2017).
10. **M.V. Kovalchuk, A.V. Targonskii, A.E. Blagov, I.S. Zनावескина, Yu.V. Pisarevskii.** Crystallography Reports, **56**, 828 (2011).
11. **А.Е. Благов, П.А. Просеков, А.В. Таргонский, Я.А. Элиович.** Кристаллография, **50**, 189 (2015).
12. **А.Е. Благов, Ю.В. Писаревский, М.В. Ковальчук.** Кристаллография, **61**, 10 (2016).
13. **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).
14. **А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, Р.Г. Габриелян, Л.А. Кочарян, К.Г. Галоян, А.А. Асланян.** Письма в ЖТФ. **9**, 1181, (1983).
15. **А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян.** Письма в ЖТФ, **8**, 677 (1982).
16. **R.G. Gabrielyan, H.A. Aslanyan.** Phys. Stat. sol. (b), **123**, K97, (1984).
17. **A.R. Mkrтчyan, M.A. Navasardian, R.G. Gabrielyan, L.A. Kocharian R.N. Kuzmin.** Solid State Communications, **59**, 147 (1986).
18. **А.Р. Мкртчян, Р.Г. Габриелян, А.А. Асланян А.Г. Мкртчян, Х.В. Котанджян,** Изв. АН Арм. ССР, Физика, **21**, 297, (1986).
19. **С.Н. Нореян, В.К. Мирзоян, В.Р. Кочарян.** Изв. НАН Армении, Физика, **39**, 124 (2004).
20. **В.К. Мирзоян, С.Н. Нореян, В.Р. Кочарян.** Изв. НАН Армении, Физика, **40**, 53 (2005).
21. **В.К. Мирзоян, А.Р. Мкртчян, А.Г. Мкртчян, С.Н. Нореян, В.В. Вагнер, Г. Праде, В. Матц, Н. Шелл.** Тезисы докладов V Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучения, нейтронов и электронов для исследования наноматериалов и наносистем, Москва, 286 (2005).
22. **A.R. Mkrтчyan, A.H. Mkrтчyan, V.R. Mirzoyan, V.R. Kocharyan, A.E. Movsisyan.** World Scientific publication Co. Pte. Ltd, ISBN-13 978-981-4307-00-0, 306 (2010).
23. **Л.А. Кочарян, Р.Р. Сукиасян, А.С. Борназян, А.Г. Бегларян, А.Р. Гаспарян.** Изв.

- АН Арм. ССР, Физика, **21**, 317 (1986).
24. **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).
 25. **В.К. Мирзоян, А.А. Егиазарян, Э.Г. Багдасарян, П.В. Мирзоян.** Изв. АН Арм. ССР, Физика, **42**, 355 (2007).
 26. **T.R. Muradyan, R.V. Amiraghyan, S.H. Khlopuzyan, A.R. Wagner, V.R. Kocharyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **50**, 204, (2015).
 27. **А.В. Виноградов, И.А. Брыгов, А.Я. Грудский.** Зеркальная рентгеновская оптика, Л., Машиностроение (1989).
 28. **I. Snigireva, A. Snigirev, C. Rau, T. Weitkamp, V. Aristov, M. Grigoriev, S. Kuznetsov, L. Shabelnikov, V. Yunkin, M. Hoffmann, E. Voges.** Nuclear Instruments & Methods A, **467-468**, 982 (2001).
 29. **V. Aristov, M. Drakopoulos, S. Kuznetsov, A. Snigirev, I. Snigireva, V. Yunkin.** Proceedings of SPIE, **4783**, 97 (2002).
 30. **В.К. Мирзоян, С.Н. Нораян, А.А. Нораян, В.Р. Кочарян.** Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **2**, 92 (2005).
 31. **А.Г. Куликов, Н.В. Марченков, А.Е. Благов, К.Г. Кожемякин, М.Ю. Насонов, С.С. Пашков, Ю.В. Писаревский, Г.Н. Черпухина.** Акустический журнал, **62**, 675 (2016).
 32. **А. Благов, С. Дёмин, А. Калоян, К. Кожемякин, К. Подурец, А. Куликов, Н. Марченков, С. Пашков, Ю. Писаревский, М. Скворцова, А. Южалкин.** Компоненты и технологии, **2**, 17 (2017).

DISTRIBUTION OF DEFORMATIONS IN THE OSCILLATING X-RAY
ACOUSTIC ELEMENT BASED ON THE X-CUT QUARTZ CRYSTAL

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

Mechanical deformations in the quartz X-ray acoustic element arising from the excitation of resonant thickness ultrasound oscillations are experimentally and theoretically investigated. Experiments were carried out using X-ray topography and double-crystal diffractometry, and theoretical calculations were performed using mathematical modeling via the finite element method. As the result of the calculations it can be concluded that the mechanical deformation arising in the resonator as a result of the excitation of thickness oscillations is strongly stratified and represents a series of maxima, the distance between which depends on the crystallographic direction. The large number of nodes and antinodes of the oscillations directly depends on the resonant frequency of the X-ray acoustic element. The obtained experimental results are in good agreement with theoretical calculations.