

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В КВАРЦЕВЫХ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТАХ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОПОГРАФИИ

© 2024 г. Э. С. Ибрагимов^а, Ф. С. Пиляк^а, А. Г. Куликов^{а,*}, Н. В. Марченков^а,
Ю. В. Писаревский^а, А. А. Калоян^а, Ю. А. Першин^а, Ю. А. Глазунова^б,
С. А. Демин^б, А. С. Южалкин^б, С. С. Пашков^б, Г. Н. Черпухина^б

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

^бОАО “Лит-Фонон”, ул. Краснобогатырская 44, стр. 1, Москва, 107076 Россия

*e-mail: ontonic@gmail.com

Поступила в редакцию 01.08.2023 г.

После доработки 10.02.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Методом рентгеновской топографии на лабораторном и синхротронном источниках рентгеновского излучения получены распределения деформаций в объеме двух типов кварцевых резонаторов АТ-среза, различающихся соотношениями размеров. Из сравнения рентгено топографических данных и амплитудно-частотных характеристик резонаторов установлено соответствие между деформационными картинками и особенностями колебательных процессов для рабочих мод и их гармоник, а также для колебаний на паразитных модах. Обнаружена связь между колебаниями на паразитных модах, проявляющимися в виде неоднородности амплитуды, и топологией резонаторов. Отмечена прикладная значимость полученных результатов для разработки и оптимизации новых конструкций пьезоэлементов и развития технологии их изготовления.

Ключевые слова: кварцевый резонатор, гармоники, распределение деформаций кристаллической решетки, ультразвуковая нагрузка, рентгеновская дифракция

DOI: 10.31857/S0320791924030065 **EDN:** ZMNHTE

ВВЕДЕНИЕ

Кварцевые резонаторы являются широко распространенными компонентами современной микроэлектроники, которые применяются для фильтрации и стабилизации частоты ультразвуковых и электромагнитных колебаний. Особую популярность приобрели кварцевые пьезоэлементы на основе АТ-среза, для которого характерны высокая механическая добротность и температурная стабильность [1]. Благодаря тому, что для данного среза производные 1-го и 2-го порядков резонансной частоты равны нулю, такие пьезоэлементы могут использоваться как в электронных приборах стабилизации и фильтрации частоты, так и в качестве разнообразных датчиков [2–5].

В то же время расчет колебаний анизотропных кварцевых пластин в условиях взаимодействия толщинно-сдвиговых, толщинно-крутильных, изгибных, продольных и контурных колебаний представляет собой нетривиальную задачу,

решаемую аналитически лишь в условиях значительных допущений [6–12]. Результатом подобных расчетов являются диапазоны оптимальных размеров кристаллических пластин, обеспечивающих минимальную связь рабочих колебаний сдвига по толщине с другими видами колебаний.

В частности, собственные частоты колебаний сдвига по толщине определяют по формуле [13]:

$$f = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho}}, \quad (1)$$

где b — толщина пластины; ρ — плотность кварца; c'_{66} — упругий модуль кварца для повернутой системы координат, соответствующей АТ-срезу.

Для практических расчётов во избежание нежелательной связи колебаний сдвига по толщине с изгибными колебаниями пьезоэлемента используют эмпирическую формулу, описывающую условие совпадения обертона частоты изгибных

колебаний с частотой рабочего колебания сдвига по толщине [14]:

$$f_{изг} = \frac{N_{изг}n}{l_x} = f_{сдв} = \frac{N_{сдв}}{t}, \quad (2)$$

где $f_{изг}$, $f_{сдв}$ — соответственно частоты изгибных колебаний и колебаний сдвига по толщине, кГц; n — обертон (гармоника) изгибных колебаний; $N_{изг} = 1338.4$ кГц мм — частотный коэффициент изгибных колебаний; $N_{сдв} = 1660$ кГц мм — частотный коэффициент колебаний сдвига по толщине; l_x — длина пластины вдоль кристаллографической оси X , мм; t — толщина пластины, мм.

Численные же расчеты более сложных взаимодействий различных типов колебаний требуют большой вычислительной мощности и точного учета значительного числа параметров резонатора и при этом не позволяют учитывать реальную структуру кристалла, т.е. влияние дефектов на поле возникающих деформаций.

В связи с этим, методы визуализации деформаций и регистрации их распределения в условиях функционирования резонаторов (в режиме *in operando*) крайне востребованы с точки зрения контроля процесса изготовления и оптимизации конструкции данных компонентов. Особое место среди них занимает метод рентгеновской топографии, чувствительный к атомным смещениям на уровне десятитысячных долей ангстрема. В сочетании с высокой проникающей способностью рентгеновского излучения данный метод позволяет получать информацию с пространственным разрешением из всего объема образца. В частности, метод рентгеновской топографии позволяет визуализировать деформационное поведение резонаторов в процессе их использования [15, 16], выявлять роль дефектов [17, 18] и устанавливать взаимосвязь между геометрией устройства и колебательными процессами, определяющими его функциональные характеристики [19, 20].

В настоящей работе проводится исследование электроакустических параметров и рентгенопографических картин кварцевых резонаторов АТ-среза, отличающихся размером и конфигурацией, которые определяют различные соотношения между амплитудами основных и паразитных мод колебаний.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Пьезоэлементы, исследованные в данной работе, представляют собой монокристаллические

пластины α -кварца прямоугольной формы термостабильного АТ-среза. Данный срез соответствует повороту системы координат вокруг оси X (кристаллографическое направление [110]) на 35.25° . Ориентация поверхности XZ' близка к кристаллографической плоскости (1–11). Матрица пьезоэлектрических модулей кварца рассчитана для повернутой системы координат $XY'Z'$ (табл. 1) относительно табличных значений, представленных в [21].

Таблица 1. Матрица пьезоэлектрических модулей d' кварца в пКл/Н для повернутой системы координат $XY'Z'$, соответствующей АТ-среза. Жирным выделены пьезомодули, активирующие сдвиговые деформации $T_{XZ'}$ и $T_{XY'}$ при приложении электрического поля E вдоль направления Y' .

	T_{XX}	$T_{YY'}$	$T_{ZZ'}$	T_{YZ}	$T_{XZ'}$	$T_{XY'}$
E_X	2.31	-1.20	-1.11	2.42	0	0
$E_{Y'}$	0	0	0	0	-2.66	2.74
$E_{Z'}$	0	0	0	0	1.88	-1.94

В работе исследовались резонаторы кварцевые (РК) двух типов (рис. 1) с различными рабочими частотами (табл. 2). В пьезоэлементах резонаторов 1-го типа (РК563) ось X направлена вдоль более длинной стороны пластины (его длины), а ось Z' — вдоль более короткой (ширины). В пьезоэлементах резонаторов 2-го типа (РК319), наоборот, направлению X соответствует ширина пластины, а Z' — ее длина. Для ослабления связи между основным колебанием сдвига по толщине с нежелательными колебаниями, пьезоэлементам резонаторов 1-го типа придана форма плоских пластин с фасками (форма двояко-выпуклых линз).

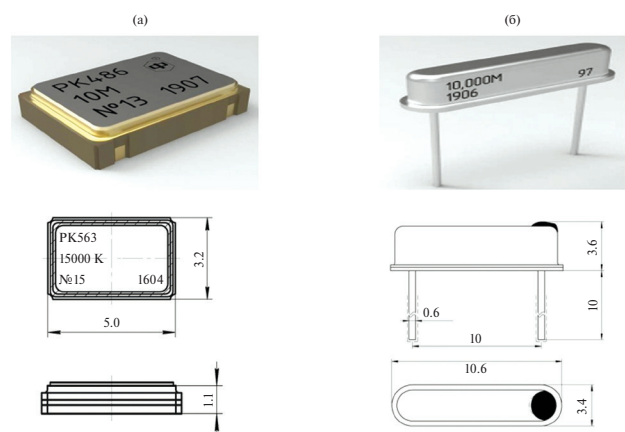


Рис. 1. Общий вид и габаритные размеры резонаторов (а) — РК563 (тип 1) в корпусе поверхностного монтажа и (б) — РК319 (тип 2) в корпусе четвертьволнового резонатора.

Таблица 2. Основные параметры исследованных образцов двух типов

№ измерения	Тип образца (номинальная частота)	Размеры пластины (ширина × длина)	Имеющиеся экспериментальные данные
1–3	Резонатор 1 типа (10 МГц)	2.10×4.0 мм	- Топограмма на рабочей частоте 9.99217 МГц - Топограмма на частоте третьей гармоники 31.73469 МГц - Топограмма на частоте паразитной моды 10.43383 МГц
4	Резонатор 1 типа (14 МГц)	1.97×4.0 мм	- Топограмма на рабочей частоте 13.99129 МГц
5–6	Резонатор 2 типа (12.9 МГц)	1.25×10.0 мм	- Топограмма на рабочей частоте 12.91492 МГц - Топограмма на частоте паразитной моды 13.42367 МГц

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для визуализации пространственного распределения деформаций, возникающих в кварцевых пьезоэлементах в процессе их работы, использовался метод рентгеновской топографии. Данный метод основан на регистрации картины пространственного распределения интенсивности отраженного излучения от определенного семейства кристаллических плоскостей и является уникальным высокочувствительным инструментом визуализации динамических деформаций в кристаллах, возникающих, в частности, при активации пьезоэффекта и ультразвуковых воздействиях. Рентгеновская топограмма несет в себе информацию также и о дефектной структуре кристалла.

Образец, выставленный под углом Брэгга, соответствующим системе исследуемых кристаллических плоскостей (220), целиком засвечивался широким равномерным рентгеновским/синхротронным пучком. За кристаллом устанавливался двумерный детектор с широкой апертурой. Дифрагированное излучение, попадающее в приемное окно детектора, установленного на двойном угле Брэгга образца, формирует на нем изображение засвеченной области исследуемого образца. Деформированные области кристалла искажают исходный волновой фронт падающего слаборасходящегося пучка, за счет чего достигается контраст дифракционных топограмм. Существует множество экспериментальных рентгенооптических схем топографии кристаллических объектов с чувствительностью к разным особенностям реальной структуры и различной разрешающей способностью [22, 23].

Топограммы пьезоэлементов резонаторов 1-го типа были получены на экспериментальной станции «Медиана» Курчатовского источника синхротронного излучения КИСИ-Курчатов (НИЦ «Курчатовский институт») (рис. 2а). Спектр излучения определяется параметрами излучающего поворотного магнита и лежит в широком энергетическом диапазоне, достигая максимальной интенсивности при $E \approx 8 - 14$ кэВ. Полихроматический пучок обладает интенсивностью до 2×10^9 имп/сек см² и малой расходимостью порядка 10 мкрад. Таким образом, за счет амплитуды вариации межплоскостного расстояния $\Delta d/d$ в отдельных областях кристалла-резонатора, соответствующих пучностям колебаний, достигается контраст распределения интенсивности дифрагированного излучения при его фиксированном углом положении. Для регистрации топограмм использовался детектор с размером пикселя 10 мкм. За счет отсутствия изменения угла в процессе записи топограммы в указанной схеме на детекторе получается картина с высокой степенью детализации. Таким образом, топография на белом пучке позволяет зафиксировать тонкую структуру колебаний пьезоэлемента.

Для измерения топограмм пьезоэлементов 2-го типа была использована модернизированная установка трехкристального рентгеновского спектрометра (ТРС), оснащенного двумерным детектором AdvaPIX TRX3 с размером пикселя 55 мкм (рис. 2б). Источником рентгеновского излучения служила рентгеновская трубка с молибденовым анодом мощностью до 2.5 кВт с длиной волны излучения $E[\text{MoK}\alpha_1] = 17.4798$ кэВ. Для получения широкого параллельного монохроматического

пучка был использован асимметричный Si 440 монокроматор с углом Брэгга 21.679° и коэффициентом асимметрии 0.025, установленный после коллимационной щели апертурой 150 мкм, что позволяет получить на выходе после монокроматора однородный пучок шириной до 6 мм со спектральной расходимостью, не превышающей ширину характеристической линии. Топограммы от пьезоэлемента были получены при сканировании образца по оси ω вблизи угла Брэгга в режиме накопления интегральной интенсивности.

Использование как синхротронного, так и лабораторного рентгеновского источника дает качественно схожие картины. Однако, комбинация более яркого синхротронного пучка и детектора с меньшим размером пикселя позволяет более детально анализировать профили распределения деформаций для микроминиатюрных изделий. Использование синхротрона оправдывает себя в случае необходимости получения количественной информации при обработке конструкций новых пьезоэлементов ввиду высокого спроса на пучковое время данных уникальных установок.

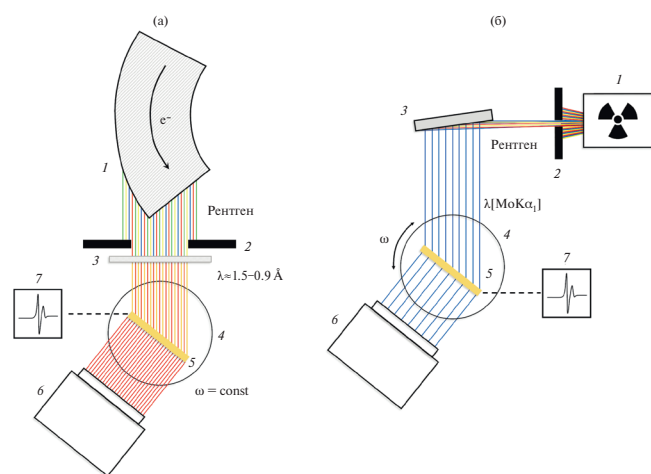


Рис. 2. Схемы реализации измерений. (а) — Топография на белом пучке в однокристалльной схеме дифракции, реализованная на синхротронной станции «Медиана» КИСИ-Курчатов. 1 — поворотный магнит, 2 — входная маска белого пучка, 3 — алюминиевый фильтр для поглощения длинноволновой части спектра, 4 — гониометрическая система, 5 — образец с держателем, 6 — двумерный детектор, 7 — генератор/анализатор электрического сигнала. (б) — Топография на монохроматическом пучке в двухкристалльной схеме дифракции, реализованная на лабораторном трехкристалльном рентгеновском спектрометре ТРС-К: 1 — рентгеновская трубка, 2 — щель предварительной коллимации, 3 — асимметричный однокристалльный монокроматор, 4 — гониометрическая система, 5 — образец с держателем, 6 — двумерный детектор, 7 — генератор/анализатор электрического сигнала.

В обоих случаях амплитудно-частотные характеристики определялись для электрической схемы с последовательно подключенной к резонатору тестовой нагрузкой сопротивлением 50 Ом при помощи анализатора электрического сигнала со встроенным генератором Rigol DSA1030. В процессе записи топограмм частота генератора фиксировалась на значении, соответствующем резонансу кристалла.

В пьезоэлементах резонаторов как 1-го, так и 2-го типов в процессе колебаний на основных гармониках возникают сдвиговые толщинные деформации в плоскости XZ' за счет активации пьезомодуля d'_{25} и в плоскости XY' за счет активации пьезомодуля d'_{26} . Топограммы, полученные в геометрии Лауэ (на просвет) от системы кристаллических плоскостей (220), чувствительны к деформациям в плоскости XY' за счет того, что направления атомных смещений лежат в плоскости дифракции. Геометрия дифракции Лауэ позволяет исследовать колебательные процессы во всем объеме кристаллической пластины резонатора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно были записаны топограммы пьезоэлементов обоих типов исследуемых резонаторов в невозбужденном состоянии (рис. 3). Результат показал наличие статических полей деформаций, соответствующих дефектам кристаллической решетки. Исходные деформационные поля, однако, не оказывают существенного влияния на распределения деформаций в условиях колебаний на резонансных частотах, описанных далее, и не превосходят их величину.

Исследование распределения деформаций в пьезоэлементах резонаторов 1-го типа (PK563)

На рис. 4 представлены топограмма и графики распределения амплитуды деформаций пьезоэлемента с номинальной частотой 10 МГц.

В направлении вдоль оси Z' пьезоэлемента расположены 7 пучностей колебаний, имеющих форму полос (рис. 4а). Подобная картина деформаций соответствует возникновению стоячей волны деформаций сдвига по толщине, возбуждаемой в области электродов и распространяющейся за ее пределы по всему объему кристалла.

При возбуждении пьезоэлемента на 3-ей гармонике колебаний сдвига по толщине с частотой 31.73469 МГц картина распределения амплитуды деформаций (рис. 5) близка к аналогичной картине

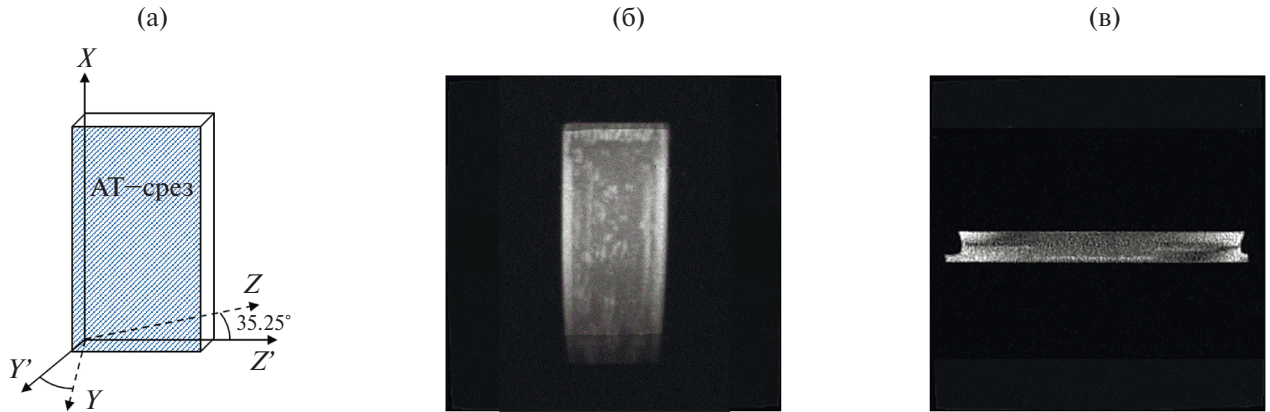


Рис. 3. (а) — Схематическое представление кристаллографической ориентации АТ-среза кварца; (б) и (в) — исходные топограммы резонаторов РК563 и РК319 соответственно, полученные в нормальных условиях (без внешнего воздействия).

на 1-ой гармонике, полученной при рабочей частоте 9.99217 МГц. На пьезоэлементе вдоль оси Z' сохраняется 7 пучностей колебаний.

Для резонатора с номинальной частотой 10 МГц были записаны топограммы на частоте ангармонического колебания 10.43383 МГц (рис. 6). Графики распределения амплитуды колебаний свидетельствуют о наличии интерференции волн, возникающих вдоль осей X и Z' кристаллической пластины.

В случае слабой связи рабочих сдвиговых по толщине колебаний с изгибными и контурными, основным видом побочных колебаний становятся ангармонические колебания, представляющие

собой результат взаимодействия колебаний разного типа [13].

Частоты ангармонических колебаний находятся вблизи рабочей моды и могут быть вычислены по формуле Сайкса [24]:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho} \sqrt{\frac{m^2}{b^2} + \frac{k_1 n^2}{L^2} + \frac{k_2 (p-1)^2}{a^2}}}, \quad (3)$$

где k_1, k_2 — постоянные величины, определяемые экспериментальным путем; m, n и p — целые числа; b, L, a — толщина, длина и ширина пластины соответственно.

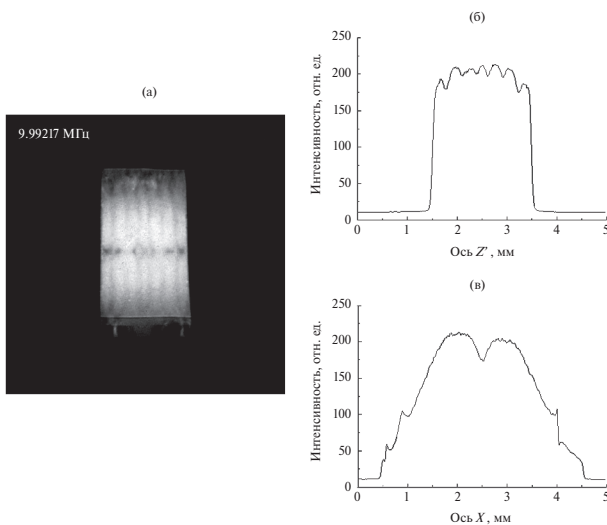


Рис. 4. (а) — Топограмма и (б), (в) — графики распределения по двум направлениям амплитуды деформаций пьезоэлемента на резонансной частоте 9.99217 МГц, соответствующей 1-ой гармонике.

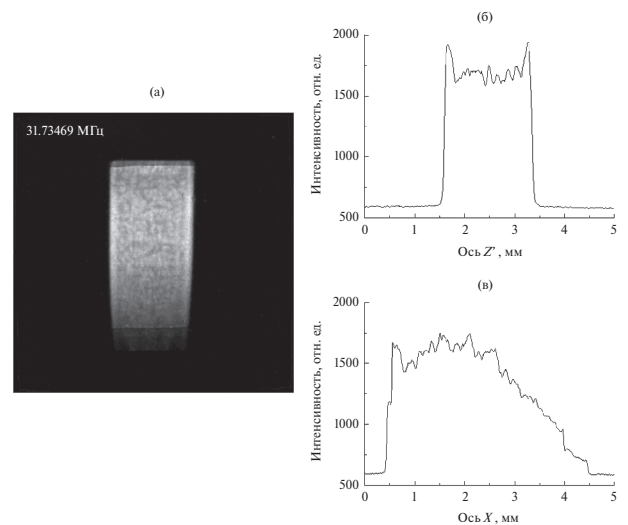


Рис. 5. (а) — Топограмма и (б), (в) — графики распределения по двум направлениям амплитуды деформаций пьезоэлемента резонатора 1-го типа на резонансной частоте 31.73469 МГц, соответствующей 3-ей гармонике.

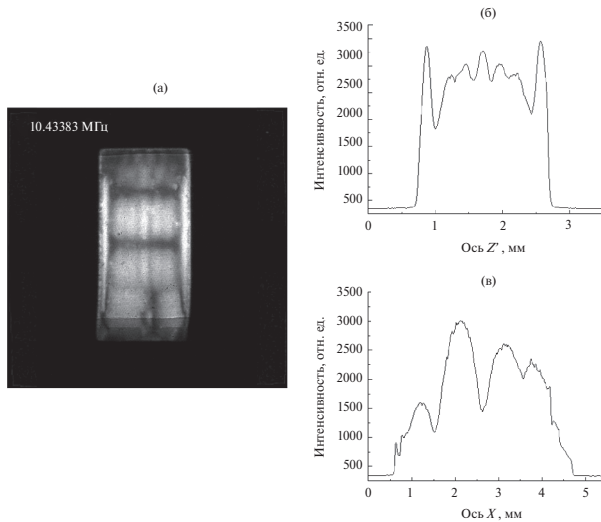


Рис. 6. (а) — Топограмма и (б), (в) — графики распределения по двум направлениям амплитуды деформаций пьезоэлемента на резонансной частоте 10.43383 МГц, соответствующей ангармоническому колебанию.

Представленное на топограмме (рис. 6) ангармоническое колебание может быть обозначено параметрами $m = 1$; $n = 4$; $p = 1$, поскольку работает на первой гармонике с частотой 10.43383 МГц, имеет четыре пучности вдоль оси X и одну стоячую волну в направлении оси Z' .

Особый интерес представляет картина распределения амплитуды деформаций в виде двумерной решетки у пьезоэлемента с номинальной частотой 14 МГц, которая представлена на топограмме (рис. 7).

Количество небольших квадратных пучностей: 18 рядов вдоль кристаллографической оси X и 9 рядов вдоль кристаллографической оси Z' пропорционально размерам длины 3.5 мм и ширины 1.8 мм пластины, что также свидетельствует об интерференционном характере наблюдаемой картины деформаций.

Частотный коэффициент колебания задается следующим соотношением [24]:

$$N = \frac{f l \times 2}{m}, \quad (4)$$

где f — рабочая частота пьезоэлемента в кГц; m — число полуволн (пучностей колебаний); N — частотный коэффициент колебаний в кГц мм; l — размер вдоль кристаллографической оси Z' , мм.

Рассчитанный частотный коэффициент составил 5600 кГц мм. Он значительно больше, чем у нежелательных изгибных, контурных и

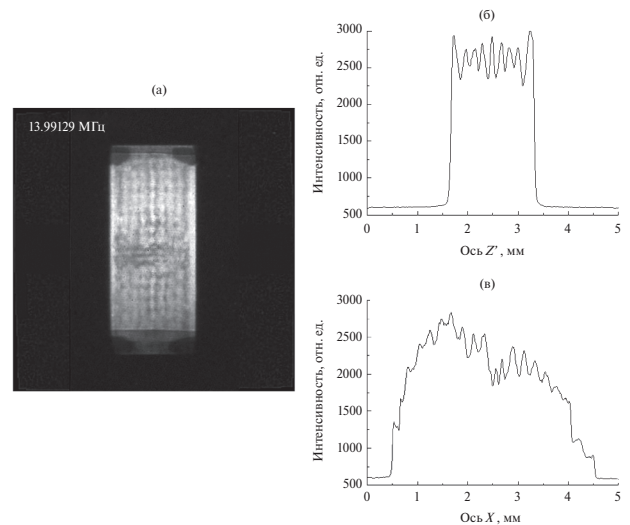


Рис. 7. (а) — Топограмма и (б), (в) — графики распределения по двум направлениям амплитуды деформаций пьезоэлемента на резонансной частоте 13.99129 МГц, соответствующей 1-ой гармонике.

продольных колебаний (1338; 2500; 2800 кГц мм, соответственно), что позволяет избежать взаимодействия данных типов колебаний между собой. Следовательно, картина деформаций в виде двумерной решетки (рис. 7) является результатом интерференции волн и соответствует соотношению размеров длины и ширины пьезоэлемента.

Исследование распределения деформаций в пьезоэлементах резонатора 2-го типа (РК319)

В резонаторах 2-го типа используются связанные колебания сдвига по толщине с гармониками изгиба. Подобные резонаторы отсутствуют в каталогах отечественных и зарубежных фирм, и методика расчета оптимальных размеров пластин отличается от приведенных в работах [6–12]. Согласно методике ТУ РК319 [25] существуют неоптимальные отношения l/t , которые находятся в промежутках между оптимальными значениями, соответствующими различным рабочим частотам резонаторов. Однако расчеты в соответствии с формулой (1) показывают, что не все частоты внутри неоптимального диапазона приводят к возникновению нежелательных продольных или контурных колебаний. В связи с этим важной задачей представляется дальнейшая оптимизация размерного ряда РК319.

С целью проверки расчетов были изготовлены кварцевые резонаторы с неоптимальной номинальной частотой 12.9 МГц. В табл. 3 добротность

изготовленных резонаторов сравнивается с добротностью серийных резонаторов с номинальной частотой 12.0 МГц. Испытания показали, что все изготовленные резонаторы соответствуют требованиям ТУ на резонаторы РК319.

Таблица 3. Параметры резонаторов с оптимальными и неоптимальными частотами по ТУ

Случай	Оптимальный	Неоптимальный
Частота, МГц	12.0	12.9
Ширина, мм	1.20	1.25
Добротность, $Q \times 10^3$	82–178	74–132
Минимальная добротность по ТУ, $Q_M \times 10^3$	70	70

Измеренная амплитудно-частотная характеристика резонаторов 2-го типа представлена на рис. 8.

Вблизи рабочей резонансной частоты 12.91492 МГц присутствует паразитный резонанс с частотой 13.42367 МГц. На рис. 9 и 10 представлены топограммы и графики распределения амплитуды колебаний пьезоэлемента на этих частотах.

Распределения амплитуды колебаний пьезоэлементов с неоптимальным соотношением размеров в направлении оси X похожи на представленные

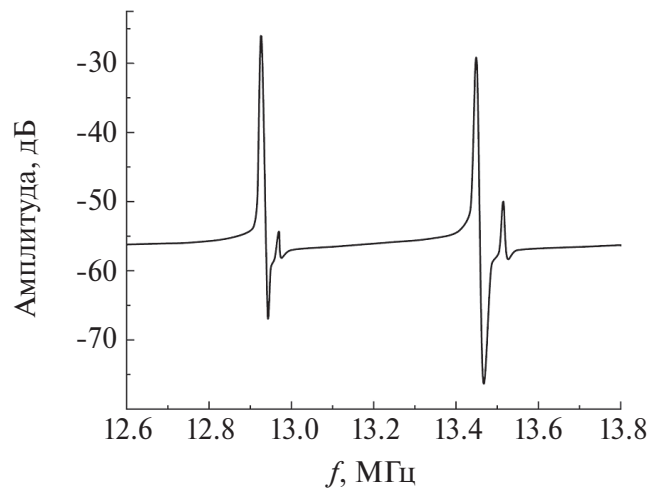


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика резонатора 2-го типа.

для пьезоэлементов резонаторов 1-го типа с номинальной частотой 10 МГц. Количество пучностей вдоль оси X остается равным 7. Так же, как у пьезоэлементов резонаторов 1-го типа, возбуждаемые в области электродов колебания распространяются за ее пределы и, при небольших размерах пластины, происходит их отражение от краев. В результате наблюдается ярко выраженная интерференционная картина. При этом на паразитной моде (рис. 10) незначительный вклад в картину деформаций вносят также изгибные колебания.

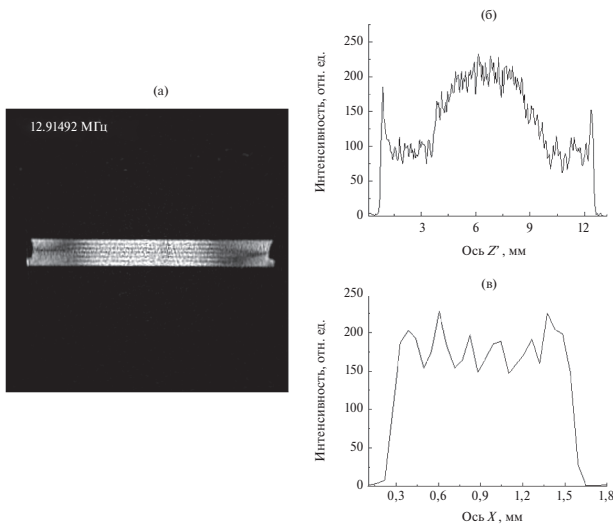


Рис. 9. (а) — Топограмма и (б), (в) — графики распределения по двум направлениям деформаций пьезоэлемента на резонансной частоте 12.91492 МГц.

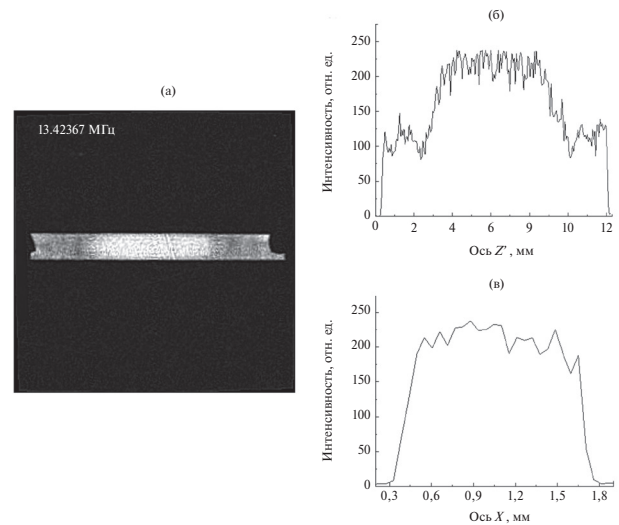


Рис. 10. (а) — Топограмма и (б), (в) — графики распределения по двум направлениям деформаций пьезоэлемента на резонансной частоте 13.42367 МГц, соответствующей ангармоническому колебанию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведены рентгенотопографические исследования распределения деформаций в двух типах микроминиатюрных кварцевых пьезоэлементов, возникающих на рабочей резонансной частоте, кратных ей гармониках, а также на частотах ангармонических колебаний сдвига по толщине.

В процессе проведения исследований кварцевых пьезоэлементов резонаторов 1-го и 2-го типа установлено наличие направленных вдоль длины пучностей колебаний, имеющих форму полос. В направлении ширины наблюдается ярко выраженная картина стоячей волны деформаций, параметры которой зависят от геометрических размеров кристаллической пластины и частоты внешнего сигнала.

По данным топографии обнаружено, что в случае возникновения интерференции волны вдоль длины и ширины элемента, картина колебаний может приобретать форму двумерной решетки. Количество пучностей вдоль осей меняется в зависимости от соотношения поперечного и продольного размеров пластины. При этом возбуждение колебаний в пьезоэлементе на паразитной моде или на третьей резонансной гармонике сохраняет характер картины распределения деформаций и соотношение числа пучностей вдоль соответствующих осей, как и на рабочей моде резонатора. Экспериментальные данные показывают, что отличия от стандартно используемых соотношений размеров не приводят к ухудшению параметров резонаторов.

Рентгенотопографические исследования резонаторов в невозбужденном состоянии выявили наличие ряда дефектов, но при этом показали, что эти дефекты не оказывают существенного влияния на распределение амплитуды деформационных колебаний.

Результаты, полученные в рамках настоящих исследований, имеют практическую значимость с точки зрения понимания особенностей колебаний анизотропных пластин, а также могут быть использованы для расчетов оптимальных конструкций пьезоэлементов, определения местоположения дефектов и механических деформаций в пьезоэлементах и совершенствования технологии изготовления резонаторов. В частности, визуализация распределения и локализации тонкой структуры деформационных полей позволяет сделать вывод о необходимости внесения изменений в конструкцию пьезоэлемента, электродов или держателя при борьбе с паразитными резонансами.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смагин А.Г., Ярославский М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970. 488 с.
2. Мостяев В.А., Дюжиков В.И. Технология пьезо- и акустоэлектронных устройств. М.: Ягуар, 1993. 280 с.
3. Савицкий О.А. Резонатор с управляемой прозрачностью границ // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 4. С. 385–390. DOI: 10.31857/S0320791922040104
4. Туральчук П.А., Вендик И.Б. Синтез полосовых фильтров на объемных акустических волнах с учетом материальных параметров многослойной структуры резонаторов // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 6. С. 611–617. DOI: 10.31857/S0320791922050124
5. Квашинин Г.М., Сорокин Б.П., Бурков С.И. Анализ распространения СВЧ волн Лэмба в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 595–602. DOI: 10.31857/S0320791921060058
6. Onoe M., Kamada K., Okazaki M., Tajika F., Manabe N. 4 MHz AT-Cut Strip Resonator for Wrist Watch / Proc. of the 31st Annual Symposium on Frequency Control. New Jersey: IEEE, 1977. P. 48–54. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1977.200128>
7. Zumsteg A.E., Suda P. Properties of a 4 MHz miniature flat rectangular quartz resonator vibrating in a coupled mode / Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control. New Jersey: IEEE, 1976. P. 196–201. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1976.201314>
8. Okano S., Kudama T., Yamazaki K., Kotake H. 4.19 MHz Cylindrical AT-cut Miniature Resonator / Proc. of the 35th Annual Symposium on Frequency Control. New Jersey: IEEE, 1981. P. 166–173. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1981.200471>
9. Dvorsky L. AT-quartz strip resonator / Proc. of the 41st Annual Symposium on Frequency Control. New Jersey: IEEE, 1987. P. 295–302. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1987.201037>
10. Mindlin R.D. High frequency vibrations of plated crystal plates // Intl. J. Solids and Struct. 1972. V. 8. P. 891–906. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(72\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0020-7683(72)90004-2)
11. Lee P.C. Extensional, Flexural and Width-Shear Vibrations of Thin Rectangular Crystal Plates / Proc. of the 25th Annual Symposium on Frequency Control. New Jersey: IEEE, 1971. P. 63–69. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1971.199834>
12. Zumsteg A.E., Suda P., Zingg W. Energy trapping of coupled modes in rectangular AT-cut resonators / Proc. of the 32nd Annual Symposium on Frequency Control. New Jersey: IEEE, 1978. P. 260–266. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1978.200246>

13. Андросова В.Г. и др. Пьезоэлектрические резонаторы: справочник. Под ред. Кандыбы П.Е. и Позднякова П.Г. М.: Радио и связь, 1992. 392 с.
14. Букштам Б.М., Караульник А.Е. Акустические колебания кварцевых резонаторов среза АТ // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 4. С. 440–445.
15. Куликов А.Г., Марченков Н.В., Благов А.Е., Кожемякин К.Г., Насонов М.Ю., Пашков С.С., Писаревский Ю.В., Чернухина Г.Н. Рентгенографические исследования кварцевых резонаторов с «тройным» электродом // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 6. С. 675–680.
<https://doi.org/10.7868/S0320791916050087>
16. Mkrtchyan A.R., Blagov A.E., Kocharyan V.R., Kulikov A.G., Movsisyan A.E., Muradyan T.R., Targonskiy A.V., Eliovich Ya.A., Darinski A.N., Pisarevskiy Yu.V., Kovalchuk M.V. Distribution of Deformations in the Oscillating X-Ray Acoustic Element Based on the X-Cut Quartz Crystal // J. Contemp. Phys. 2019. V. 54. № 2. P. 210–218.
<https://doi.org/10.3103/S1068337219020142>
17. Snegirev N., Lyubutin I., Kulikov A., Zolotov D., Vasiliev A., Lyubutina M., Yagupov S., Mogilenec Yu., Seleznyova K., Strugatsky M. Structural perfection of Fe_{1-x}GaxBO₃ single crystals designed for nuclear resonant synchrotron experiments // J. Alloys and Compounds. 2022. V. 889. P. 161702.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161702>
18. Buzanov O.A., Kozlova N.S., Kozlova A.P., Zabelina E.V., Blagov A.E., Eliovich I.A., Kulikov A.G., Targonskiy A.V. Crystal growth and optical properties of Ca₃TaGa₃Si₂O₁₄ single crystals // Japan. J. Appl. Phys. 2018. V. 57. № 11S. P. 11UD08.
<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.11UD08>
19. Kulikov A., Blagov A., Marchenkov N., Targonskiy A., Eliovich Ya., Pisarevskiy Yu., Kovalchuk M. LiNbO₃-based bimorph piezoactuator for fast X-Ray experiments: Static and quasistatic modes // Sensors and Actuators A: Physical. 2019. V. 291. P. 68–74.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.041>
20. Marchenkov N., Kulikov A., Targonskiy A., Eliovich Ya., Pisarevskiy Yu., Seregin A., Blagov A., Kovalchuk M. LiNbO₃-based bimorph piezoactuator for fast X-Ray experiments: Resonant mode // Sensors and Actuators A: Physical. 2019. V. 293. P. 48–55.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.028>
21. Bechmann R. Elastic and Piezoelectric Constants of Alpha-Quartz // Phys. Rev. 1958. V. 110. № 5. P. 1060–1061. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.1060>
22. Lang A.R. Topography / International Tables for Crystallography. 2006. Vol. C. Ch. 2.7. P. 113–123.
<https://doi.org/10.1107/97809553602060000582>
23. Bowen D.K., Tanner B.K. High Resolution X-Ray Diffractometry and Topography. London: Taylor & Francis, 1998. 252 p.
24. Sykes R.A. Modes of Motion in Quartz Crystals, the Effects of Coupling and Methods of Design // Bell System Technical Journal. 1944. V. 23. P. 52–96.
25. Резонаторы пьезоэлектрические кварцевые РК319 (ВП) аЦ0.338.105ТУ.

INVESTIGATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF DEFORMATIONS IN QUARTZ PIEZO ELEMENTS BY X-RAY TOPOGRAPHY

E.S. Ibragimov^{a,b}, F.S. Pilyak^{a,b}, A.G. Kulikov^{a,b,*}, N.V. Marchenkov^{a,b},
Y.V. Pisarevskiy^{a,b}, Y.A. Pershin^a, A.A. Kaloyan^b, Y.A. Glazunova^c,
S.A. Demin^c, A.S. Yuzhalkin^c, S.S. Pashkov^c, G.N. Cherpukhina^c

^aShubnikov Institute of Crystallography FSRC "Crystallography and photonics" RAS,
Russia, 119333 Moscow, Leninskiy pr-kt 59

^bNRC "Kurchatov Institute", Russia, 123182 Moscow, Pl. Akademika Kurchatova 1

^cJSC "Lit-Fonon", 107076 Moscow, Krasnobogatyrskaya str. 44, bld. 1

Using X-ray topography on laboratory and synchrotron X-ray sources, the distribution of deformations in the volume of two types of AT-cut quartz resonators of different sizes were obtained. From a comparison of X-ray data and the amplitude-frequency characteristics of the resonators, a correlation between the deformation patterns and the features of oscillatory processes for operating modes and their harmonics, as well as for parasitic modes, was established. A connection between oscillations in parasitic modes, which manifest themselves in the amplitude inhomogeneity, and the topology of the resonators is found. The applied significance of the obtained results for the development and optimization of new designs of piezoelectric elements and the development of their manufacturing technology is noted.

Keywords: quartz resonator, harmonics, crystal lattice strain distribution, ultrasonic loading, x-ray diffraction