

УДК 548.732

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДУЛЯЦИЯ ДИФРАГИРОВАННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА ОБЪЕМНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

В.К. МИРЗОЯН, А.А. ЕГИАЗАРЯН,
Э.Г. БАГДАСАРЯН, П.В. МИРЗОЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван

(Поступила в редакцию 4 июля 2007 г.)

Экспериментально исследована дифракция рентгеновского излучения в монокристалле кварца в геометрии Лауэ, когда в нем возбуждены объемные акустические волны. Эти волны деформируют отражающие атомные плоскости, что и приводит к пространственной модуляции дифрагированных пучков. У них во фронтальном сечении, перпендикулярно дифракционному вектору, возникают полосы интенсивности, количество которых зависит от порядка гармоники возбужденного акустического поля. Интенсивность возникающих полос зависит от амплитуды переменного напряжения, приложенного к кристаллу.

В настоящее время для развития нанотехнологии очень важно получить дифрагированные рентгеновские пучки с управляемыми параметрами во времени и пространстве, а также выявить новые управляемые свойства монокристаллов. С этой точки зрения работа [1] имеет важное значение, поскольку впервые был сделан количественный анализ интенсивности как отраженного-дифрагированного, так и проходящего-дифрагированного монохроматических пучков. Обнаружен эффект полной переброски интенсивности проходящего пучка от направления прохождения в направление отражения под влиянием температурного градиента или ультразвукового колебания для тонких кристаллов ($\mu t \approx 1$, где μ – линейный коэффициент поглощения рентгеновского излучения для монокристалла, t – толщина кристалла в геометрии Лауэ). После открытия эффекта полной переброски была осуществлена временная модуляция дифрагированных пучков и реализован способ передачи сигналов низкой частоты с помощью рентгеновского излучения [2].

С помощью внешних воздействий осуществлено управление фокусировкой и дефокусировкой рентгеновских лучей [3,4]. Показано, что с помощью температурного градиента можно изменить фокусное расстояние и размеры фокусного пятна.

Авторами работ [5,6] сделан количественный анализ падающего, проходящего-дифрагированного и отраженного-дифрагированного монохроматических пучков и обнаружена зависимость коэффициента линейного поглощения от параметров внешних воздействий. А в работе [6] показано, что среда-монокристалл становится прозрачной для излучения ангстремного диапазона длин волн, что открывает новые перспективы для полу-

чения интенсивных пучков ангстремного диапазона длин волн.

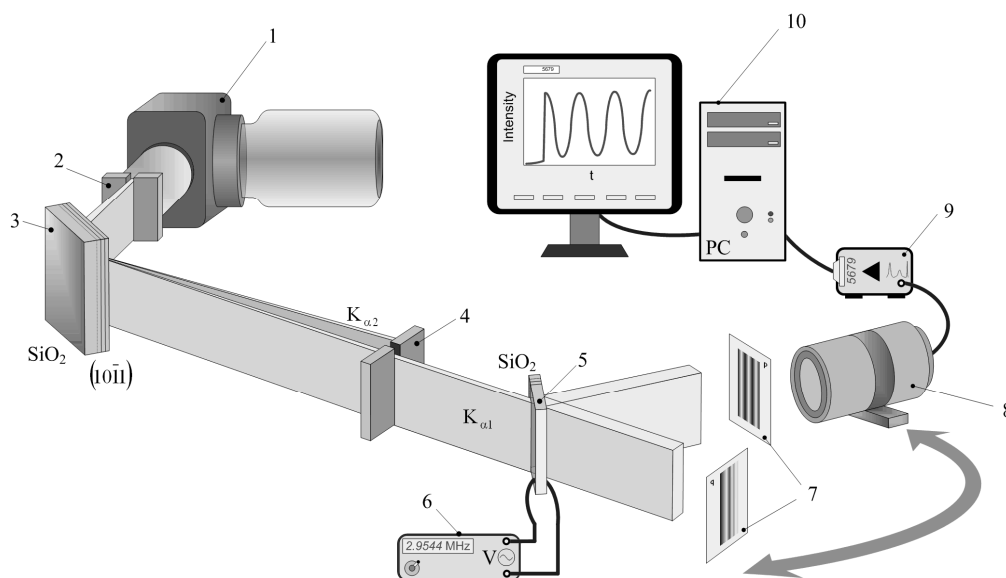


Рис.1. Схема эксперимента. 1 – рентгеновская трубка, 2,4 – щели, 3 – SiO_2 брэгговский монохроматор, 5 – исследуемый образец кварца АТ-среза, 6 – высокочастотный генератор, 7 – фотопластинки, 8 – сцинтиляционный детектор рентгеновского излучения, 9 – счетчик импульсов, 10 – персональный компьютер.

В настоящей работе экспериментально изучено поведение пучков, дифрагированных от плоскостей $(2\bar{1}10)$ монокристалла кварца АТ-среза, когда в нем возбуждены объемные акустические волны. Схема эксперимента приведена на рис.1. На расстоянии 15 мм от источника рентгеновского излучения поставлена щель шириной 0.5 мм. Прошедший через нее пучок отражается по Брэггу от атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ кварца. На пути монохроматизированных пучков $\text{MoK}_{\alpha 1}$ и $\text{MoK}_{\alpha 2}$ размещена щель 4 (рис.1) шириной 15 мкм на расстоянии 50 мм от монохроматора, с помощью которой было экранировано $\text{MoK}_{\alpha 2}$ излучение. На пути монохроматизированного и коллимированного пучка $\text{MoK}_{\alpha 1}$ на расстоянии 150 мм от монохроматора смонтирован кварцевый резонатор АТ-среза толщиной 1.8 мм и юстирован таким образом, чтобы было обеспечено симметричное отражение по Лауэ от атомных плоскостей $(2\bar{1}10)$ перпендикулярно к поверхности АТ-среза. Угол Брэгга для $\text{MoK}_{\alpha 1}$ излучения составляет $8^\circ 18'$, а коэффициент линейного поглощения кварца для этого излучения равен 10.4 см^{-1} . Интенсивность отраженного пучка составляет 2000 имп/сек, когда интенсивность проходящего пучка равна 115000 имп/сек при перпендикулярном облучении исследуемого образца. При возбуждении исследуемого образца резонансной частотой интенсивность отраженного пучка увеличивается в зависимости от величины амплитуды переменного электрического напряжения, а на фронтальном сечении появляются вертикальные полосы, которые наблюдались также в работах [7,8]. Измерены коэффициенты усиления интегральной интенсивности отраженного пучка при разных величинах амплитуды переменного электрического напряжения и порядка гармоник резонансной частоты.

Результаты приведены в табл.1. Как видно, при некоторых условиях интенсивность отраженного пучка увеличивается почти в 17 раз.

Табл.1

Порядок гармоники	III	V	VII	IX
Частота гармоники, МГц	2.9544	4.9184	6.8827	8.8477
Амплитуда напряжения, В	Коэффициент усиления			
1	1.657	5.086	4.571	7.942
2	4.628	9.6	9.371	12.4
3	8	12.857	14.171	14.857
4	9.714	14.457	15.942	16.286
5	10.286	16	16.571	16.742

Кроме изменения интенсивностей отраженных и проходящих пучков, акустические волны приводят к пространственной модуляции интенсивности дифрагированных пучков. У них во фронтальном сечении, перпендикулярно дифракционному вектору, возникают полосы интенсивности. В зависимости от порядка гармоники возбуждения акустического поля, количество полос изменяется.

Во фронтальном сечении отраженного пучка при возбуждении акустического поля третьей гармоникой появляются две, при пятой – четыре, при седьмой – шесть и при девятой – восемь параллельных полос, не считая двух краевых полос. Общее число появляющихся полос m , считая и две краевые, определяется следующим образом:

$$m = n + 1, \quad (1)$$

где n – порядок гармоники. Во всех случаях две краевые полосы получаются более узкими и менее интенсивными, чем остальные. На рис.2 приведены картины фронтальных сечений отраженных и проходящих дифрагированных пучков без возбуждения кристалла (а) и с возбуждением (b,c,d,e) на разных гармониках, для которых амплитуда переменного напряжения равна 5 В. Во всех случаях расстояние кристалл–картина одинаковое. Отметим, что время экспозиции для снятия картины фронтальных сечений без возбуждения кристалла в 12 раз больше, чем при возбуждении.

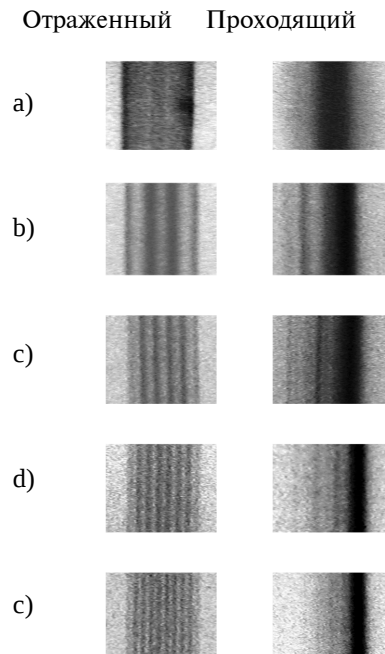


Рис.2. Картины фронтальных сечений дифрагированных проходящих и отраженных пучков без ультразвука (а) и с ультразвуком разных гармоник (третья (b), пятая (c), седьмая (d), девятая (e)) при амплитуде электрического напряжения 5 В.

Для атомных плоскостей $(21\bar{1}0)$ кварца АТ-среза был получен второй порядок брэгговского отражения в геометрии Лауэ. В этом случае интенсивность отраженного пучка получается 1000 имп/сек при той же интенсивности падающего пучка. В табл.2 приведены коэффициенты усиления для разных гармоник акустического поля в зависимости от амплитуды электрического напряжения. Как видно, для второго порядка брэгговского отражения коэффициент усиления достигает 21.6, тогда как для первого порядка брэгговского отражения этот коэффициент имеет значение 16.7. На рис.3 приведены картины фронтальных сечений отраженных дифрагированных пучков при возбуждении кристалла акустическим полем на девятой гармонике для первого (а) и второго (b) порядка брэгговского отражения.

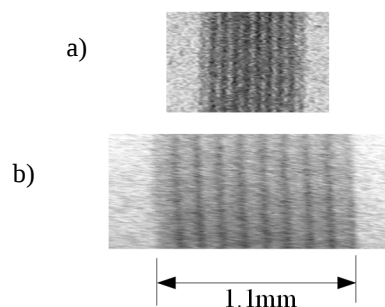


Рис.3. Картины фронтального сечения дифрагированного пучка для первого (а) и второго (b) порядков брэгговского отражения при возбуждении кристалла акустическим полем на девятой гармонике, при значении амплитуды электрического напряжения 5 В.

Табл.2

Порядок гармоники	III	V	VII	IX
Частота гармоники, МГц	2.9544	4.9184	6.8827	8.8477
Амплитуда напряжения, В	Коэффициент усиления			
1	2	13.158	5.316	8.105
2	6.631	18.842	10.631	15.158
3	10	20.526	16.421	18.421
4	12.105	21.263	18.947	20.105
5	13.473	21.578	21.157	21.053

Несмотря на то, что интенсивность второго порядка брэгговского отражения почти вдвое меньше, чем интенсивность первого порядка при максимальном коэффициенте усиления, разрешающая способность намного больше, чем для первого порядка.

Из литературы известно [8], что в кварцевом резонаторе АТ-среза возбуждаются акустические колебания сдвига по толщине. На рис.4 приведена часть резонатора с указанием отражающих атомных плоскостей и их деформаций для третьей гармоники, а также ход рентгеновских лучей в срезе, перпендикулярном АТ-срезу и плоскости отражения ($2\bar{1}10$). На рис.4с через $\Delta\theta_B$ обозначено отклонение от точного угла Брэгга для деформированного кристалла. Узлы и антиузлы стоячей волны обозначены черными и белыми кружками. Поверхности кристалла находятся на антиузлах. Частота третьей гармоники равна 2.9544 МГц, а время экспозиции регистрации дифрагированных картин составляет несколько минут. Следовательно, полученные распределения интенсивности дифрагированных пучков усреднены во времени. С другой стороны, поскольку время прохождения рентгеновского излучения через монокристалл толщиной 1.8 мм составляет почти $6(10^{-12})$ сек, то для каждого фотона монокристалл является неподвижной системой и в присутствии акустических волн. Предполагаем, что имеем монокристалл, у которого отражающие атомные плоскости изогнуты синусоидальным образом и не колеблются, как показано на рис.4с. При этом в разных местах кристалла мы имеем разные отклонения от условия Брэгга. В узлах отклонение от условия Брэгга будет максимальное, а в антиузлах отклонения не будет.

На рис.4с более светлые области соответствуют большему отклонению от условия Брэгга. При колебании в антиузлах условие Брэгга не будет изменяться со временем, а в узлах оно будет изменяться максимально с частотой акустического колебания. Таким образом, при возбуждении монокристалла частотой третьей гармоники по направлению отражения появятся четыре полосы интенсивности, которые соответствуют участкам, где удовлетворяется условие Брэгга, причем две краевые полосы будут более узкими, чем центральные. При возбуждении кристалла на высоких гармониках число полос будет увеличиваться и будет равно числу антиузлов, что и соответствует условию (1).

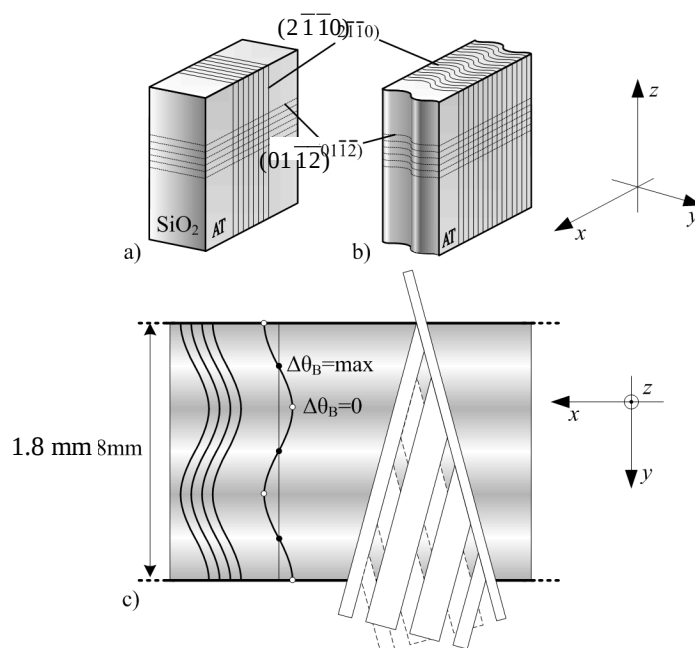


Рис.4. Изображение отражающих атомных плоскостей в кварце АТ-среза для недеформированного (а) и деформированного (b) состояний при возбуждении акустическим колебанием третьей гармоники и ход рентгеновских лучей (с) в деформированном кристалле.

Из вышеизложенного следует, что при брэгговском отражении от атомных плоскостей, параллельных плоскости механического колебания, пространственной модуляции не будет, поскольку в этом случае отражающие плоскости не будут сгибаться, а только атомы будут сдвигаться в плоскостях. Чтобы убедиться в этом, были получены брэгговские отражения от атомных плоскостей $(01\bar{1}2)$ и $(10\bar{1}1)$, взаимное расположение которых приведено на рис.5а. На рис.5b,c,d показано фронтальное сечение отраженных пучков при возбуждении монокристалла акустическим колебанием с частотой пятой гармоники 4.9183 МГц. Для атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ угол Брэгга равен $6^\circ 6'$ для $\text{MoK}_{\alpha 1}$ излучения. Из рис.5с видно, что при отражении от атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ также возникает пространственная модуляция, когда в кристалле возбуждены акустические волны. Это означает, что плоскости $(10\bar{1}1)$ также изгибаются при возбуждении кристалла акустическими волнами. А при отражении от $(01\bar{1}2)$ интенсивные полосы исчезают из фронтального сечения отраженного пучка (рис.5d). Для $(01\bar{1}2)$ угол Брэгга равен $8^\circ 57'$ для $\text{MoK}_{\alpha 1}$ излучения. Исчезновение полос свидетельствует, что при акустическом возбуждении колебания атомов происходят именно в плоскости $(01\bar{1}2)$. Поскольку $(01\bar{1}2)$ и $(2\bar{1}10)$ перпендикулярны (рис.4b), то изгиб плоскостей и, следовательно, модуляция интенсивности будут максимальны при $(2\bar{1}10)$. Заметим, что в работе [8] также плоскость $(2\bar{1}10)$ считается самой эффективной для исследования кварцевых резонаторов АТ-среза с рентгеновской дифракционной топографией.

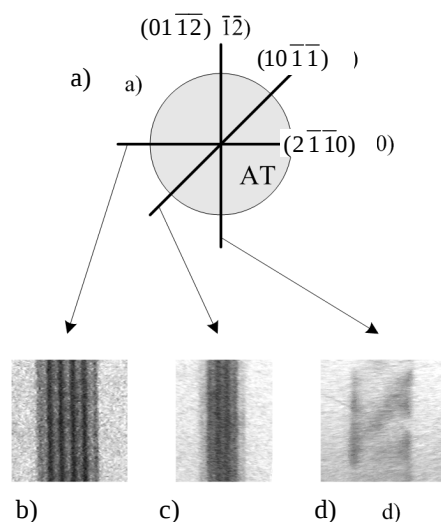


Рис.5. Взаимное расположение рассматриваемых атомных плоскостей (а) и картины фронтальных сечений дифрагированного пучка, отраженного от этих атомных плоскостей, при возбуждении кристалла акустическим колебанием пятой гармоники при амплитуде электрического напряжения 5 В.

Исходя из схематических представлений о деформациях в кристалле (рис.4) под влиянием акустического поля, при отражении от (0112) увеличения интегральной интенсивности отраженного пучка не должно происходить. Однако в эксперименте наблюдалось десятикратное увеличение интенсивности при значении амплитуды приложенного электрического поля 8 В для пятой гармоники резонансной частоты. Это означает, что перераспределение атомов в отражающей плоскости тоже приводит к увеличению интенсивности отраженного рентгеновского пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян. Письма в ЖТФ, **8**, 677 (1982).
2. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян и др. Авторское свидетельство СССР № 1327716, 1 апреля 1987 г.
3. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, Л.А.Кочарян и др. Тезисы докладов III всесоюзного совещания "Когерентное взаимодействие излучения с веществом". М., 1985, с.101.
4. А.Р.Мкртчян, В.К.Мирзоян, А.С.Мелконян и др. Конверсионный потенциал Армении и программы МНТЦ, международный семинар, 2-7 октября 2000г., доклады, ч.1, с.158-161.
5. В.К.Мирзоян, С.Н.Норелян. Тезисы докладов X всесоюзного совещания по когерентному взаимодействию излучения с веществом. Симферополь, 2-8 октября 1990, с.142.
6. А.Р.Мкртчян, В.К.Мирзоян, А.Г.Мкртчян и др. Конверсионный потенциал Армении и программы МНТЦ, международный семинар, 2-7 октября 2000г., доклады, ч.1, с.150-153.
7. В.К.Мирзоян, Т.Г.Довлатян, П.В.Мирзоян. Поверхность, № 9, 80 (2002).
8. S.Slavov. IEEE International Frequency Control Symposium, 1998, pp.836-843.

ԴԻՖՐԱԿՑՎԱԾ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՓՆՋԻ ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ՄՈԴՈՒԼԱՑՈՒՄԸ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ
ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԱԼԻՔՆԵՐՈՎ

Վ.Դ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ, Ա.Ա. ԵԴԻԱԶԱՐՅԱՆ, Է.Հ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Պ.Վ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ

Փորձնականորեն հետազոտված է ռենտգենյան ճառագայթների՝ Լաուէի երկրաչափությամբ դիֆրակցիան կվարցի բյուրեղում, երբ նրանում զրգոված են ծավալային ակուստիկ ալիքներ: Դրանք բերում են անդրադարձնող հարթությունների դեֆորմացիայի, ինչն առաջացնում է անցման և անդրադարձման ուղղությամբ ինտենսիվության տարածական մոդուլացում: Դիֆրակցված փնջի ճակատային հատույթում՝ դիֆրակտային վեկտորին ուղղահայաց, առաջանում են ինտենսիվության շերտեր, որոնց քանակը կախված է ակուստիկ տատանումների ռեզոնանսային հարմոնիկի կարգից: Առաջացող շերտերի ինտենսիվությունը կախված է բյուրեղին կիրառված փոփոխական էլեկտրական դաշտի լարման ամպլիտուդից:

SPATIAL MODULATION OF A DIFFRACTED X-RAY BEAM
BY BULK ACOUSTIC WAVES

V.GH. MIRZOYAN, A.A. YEGHIAZARYAN, E.H. BAGHDASARYAN, P.V. MIRZOYAN

X-ray diffraction in the Laue geometry in quartz crystals excited by bulk acoustic waves is studied experimentally. These waves deform the reflecting planes which results in the spatial modulation of intensities diffracted in both reflecting and primary directions. The intensity fringes perpendicular to the diffraction vector appear in the cross-sections of the diffracted beams. The number of these fringes depends on the harmonics of acoustic vibrations. Their intensity depends on the AC voltage amplitude applied to the crystal.