

УДК 548.732

ВОЗМОЖНОСТЬ ДВУМЕРНОЙ ФОКУСИРОВКИ ОТРАЖЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ МОНОКРИСТАЛЛА КВАРЦА ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА

В.Р. КОЧАРЯН^{1,2*}, А.Е. МОВСИСЯН², А.С. ГОГОЛЕВ¹

¹Национальный исследовательский томский политехнический университет, Томск, Россия

²Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: vahan2@yandex.ru

(Поступила в редакцию 8 июня 2018 г.)

Экспериментально исследовано отражение Лауэ от монокристалла кварца при наличии температурного градиента, который приложен перпендикулярно к отражающим атомным плоскостям ($10\bar{1}1$) так, что приводит к двумерному изгибу этих плоскостей. Показано, что приложенный к кристаллу таким образом температурный градиент приводит к двумерной фокусировке отраженного рентгеновского излучения. При увеличении температурного градиента фокус рентгеновских лучей приближается к кристаллу быстрее в плоскости отражения, чем в перпендикулярной плоскости.

1. Введение

Разработка и совершенствование новых методов управления параметрами рентгеновского излучения имеет важное значение для создания новых, более чувствительных и универсальных рентгенооптических элементов, важных для развития методов томографии биологических объектов с микро- и наноразрешением, определения совершенства микро- и наноструктур и т. д.. Одной из важнейших задач в управлении параметрами рентгеновского излучения является его фокусировка. Методы фокусировки рентгеновского излучения быстро развиваются в связи с развитием рентгеновских источников и технологий изготовления фокусирующих элементов. В основе разработки и создания фокусирующих элементов лежат явления преломления, отражения и дифракции. В некоторых традиционных фокусирующих приборах рентгеновского излучения используются зонные пластинки Френеля [1, 2], преломляющие элементы [3] или элементы полного внутреннего отражения [4]. Границы применимости этих элементов определяются показателем преломления материалов, из которых они

изготовлены. В некоторых фокусирующих приборах используются многослойные структуры с переменными толщинами слоев [5] и изогнутые монокристаллы [6–8], от которых дифрагированное рентгеновское излучение фокусируется. Рентгеновские лучи, как правило, требуют чрезвычайно высокой точности изготовления элементов, даже для приблизительных конфигураций.

В современных фокусирующих системах важным требованием является точное управление положением фокуса, что можно реализовать с помощью управляемого изгиба кристаллических плоскостей линз (монокристаллов) с помощью внешних воздействий (акустические колебания, температурный градиент) [9–12]. Как известно, с помощью температурного градиента, приложенного перпендикулярно к атомным плоскостям $(10\bar{1}1)$ монокристалла кварца x -среза, можно управлять радиусом изгиба атомных плоскостей [13] и межплоскостным расстоянием [14]. В этих работах одна из граней прямоугольного параллелепипеда кварца, которая параллельна атомным плоскостям $(10\bar{1}1)$, нагревается, а другие грани находятся в режиме свободного теплообмена с окружающей средой (воздух). В таких условиях, как показано в работах [10–14], отраженное рентгеновское излучение фокусируется только в плоскости отражения, т. е. атомные плоскости изгибаются вокруг перпендикулярной оси отражающих плоскостей [15, 16].

Целью настоящей работы является исследование явления дифракции рентгеновского излучения от монокристалла кварца при наличии такого температурного градиента, который создает двумерный изгиб, который, в свою очередь, приводит к двумерной фокусировке отраженного рентгеновского излучения.

2. Экспериментальная часть и результаты

В эксперименте использован белый спектр рентгеновского излучения от рентгеновской трубки Ag БСВ-29 при напряжении 50 кВ и с анодным током 4 мА. Фокусное пятно трубки 0.4×0.8 мм². На расстоянии 13 см от источника установлена щель диаметром 0.5 мм для двумерной коллимации рентгеновского излучения. Исследуемый образец установлен на расстоянии 19.5 см от щели. На расстояниях 20 и 40 см от образца, перпендикулярно к распространению пучка, был установлен двухкоординатный детектор рентгеновского излучения, матрица которого составляла 256×256 пикселей, а размер каждого пикселя (разрешение) 55×55 мкм². Схема эксперимента приведена на рис. 1. Образец представлял прямоугольную пластину монокристалла кварца x -среза площадью 3×3 см² и толщиной 0.7 см. Кристаллический образец изготовлен таким образом, чтобы одно из ребер располагалось параллельно семейству атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$. В

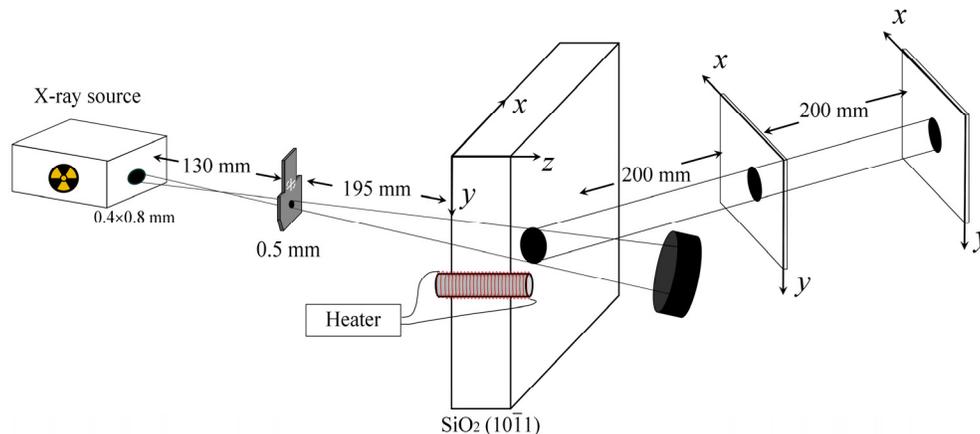


Рис.1. Схема эксперимента.

центральной части этого ребра размещался цилиндрический нагреватель длиной 1 см и диаметром 1 мм, а остальные ребра находились в свободном теплообмене с воздухом, как представлено на рис.1. Нагреватель с такой геометрией создает температурный градиент в монокристалле кварца не только перпендикулярно к отражающим атомным плоскостям ($10\bar{1}1$), но и обеспечивает температурный градиент от центра кристалла к другим ребрами, то есть в направлениях y - и z -осей.

В работе [17] было показано, что нормальная компонента температурного градиента к отражающим атомным плоскостям, которая совпадает с осью x на рис.1, приводит только к изменению межплоскостных расстояний, а тангенциальная компонента приводит к изгибу этих атомных плоскостей.

Как отмечалось выше, в описанной геометрии эксперимента создается температурный градиент по осям y и z от центра монокристалла. В нашем случае эти оси параллельны отражающим атомным плоскостям ($10\bar{1}1$), то есть создается соответствующее условие для двумерного изгиба этих плоскостей. Ось нагревателя установлена параллельно оси z , что приводит к большему значению температурного градиента по оси y , чем по оси z . Такая геометрия была выбрана специально, чтобы радиус кривизны, обратно пропорциональный величине температурного градиента, отражающих атомных плоскостей ($10\bar{1}1$) был меньше по оси y , чем по оси z . В экспериментах температура нагревателя изменялась от комнатной температуры (18°C) до 400°C .

На разных расстояниях от монокристалла кварца регистрировалось фронтальное распределение интенсивности отраженного рентгеновского излучения с энергией 40 кэВ от отражающих атомных плоскостей ($10\bar{1}1$) при разных значениях температуры нагревателя. В ходе эксперимента наблюдалось многократное

увеличение интегральной интенсивности отраженного рентгеновского излучения в зависимости от увеличения температуры нагревателя.

На рис.2 приведены распределения интенсивности отраженного рентгеновского излучения по x на разных расстояниях от монокристалла кварца при разных значениях температуры нагревателя.

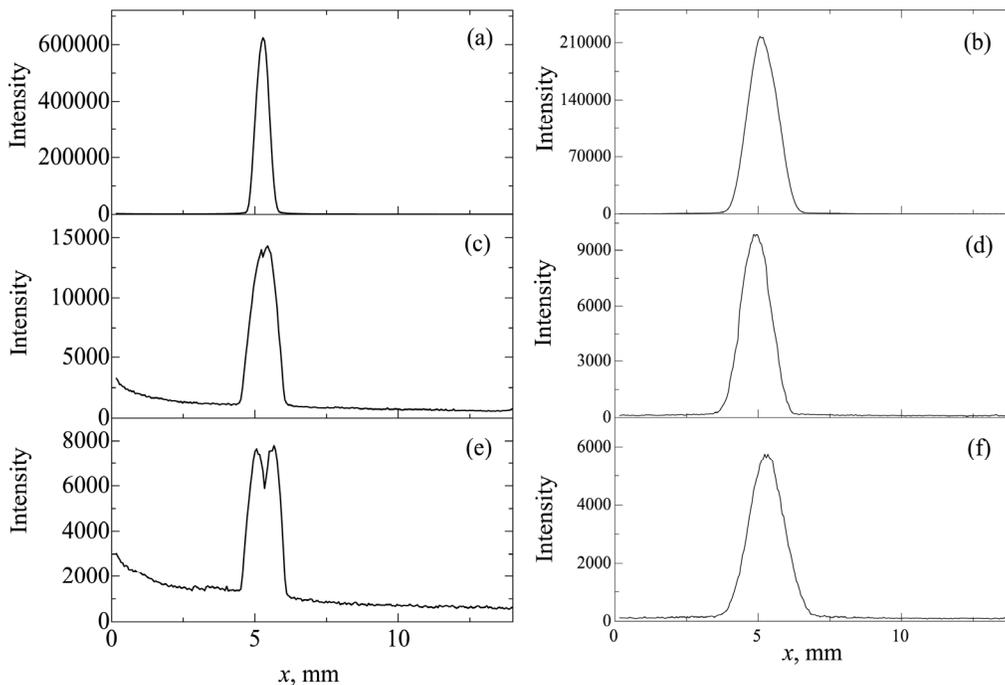


Рис.2. Распределение интенсивности отраженного рентгеновского излучения с энергией 40 кэВ в плоскости отражения на расстояниях 20 см (a, c, e) и 40 см (b, d, f) от монокристалла кварца при разных значениях температуры нагревателя: 400°C (a, b), 70°C (c, d) и 18°C (e, f).

На рис.3 приведены распределения интенсивности отраженного рентгеновского излучения по y на разных расстояниях от монокристалла кварца при разных значениях температуры нагревателя.

На рис.4 приведены фронтальные распределения интенсивности отраженного рентгеновского излучения на расстояниях 20 и 40 см от монокристалла кварца при разных значениях температуры нагревателя (18, 70 и 400°C).

3. Обсуждение результатов

Из приведенных на рис.2 распределений интенсивности отраженного рентгеновского излучения на расстояниях 20 и 40 см от монокристалла при отсутствии внешних воздействий (18°C) видно, что при удалении от монокристалла пучок в плоскости отражения имеет слабое расхождение. Из рис.3 чётко видно,

что в перпендикулярном направлении к плоскости отражения без внешних воздействий отраженное рентгеновское излучение имеет значительную расходимость, которая составляет $\sim 34'$ и обусловлена коллимацией первичного пучка.

Из рис.2 следует, что когда температура нагревателя составляет 70°C , интенсивность отраженного пучка увеличивается почти в два раза и распределение интенсивности на расстоянии 20 см значительно изменяется (центральная часть становится более интенсивной, чем крайние). Несмотря на это, в плоскости отражения на расстоянии 20 см сечение рентгеновского пучка не меняется, а на расстоянии 40 см немного уменьшается, т. е. в плоскости отражения рентгеновский пучок не расходится. Из рис.3 следует, что в перпендикулярном направлении к плоскости отражения при температуре нагревателя 70°C соответственно на расстояниях от кристалла 20 и 40 см поперечные сечения рентгеновских пучков почти не изменяются по сравнению со случаями без внешних воздействий.

Из рис.2 и 3 видно, что когда температура нагревателя достигает 400°C , интенсивность отраженного пучка увеличивается на два порядка. Параллельно этому на расстоянии 20 см кривая распределения интенсивности отраженного рентгеновского пучка в плоскости отражения почти в два раза сужается, а на

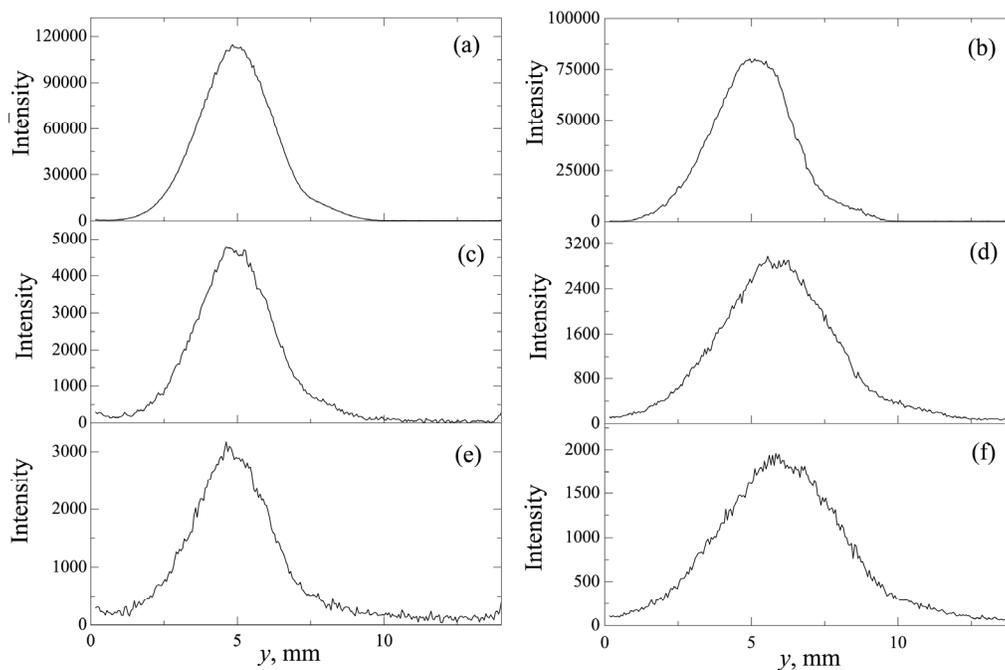


Рис.3. Распределение интенсивности отраженного рентгеновского излучения с энергией 40 кэВ перпендикулярно к плоскости отражения на расстояниях 20 см (а, с, е) и 40 см (b, d, f) от монокристалла кварца при разных значениях температуры нагревателя: 400°C (а, b), 70°C (с, d) и 18°C (е, f).

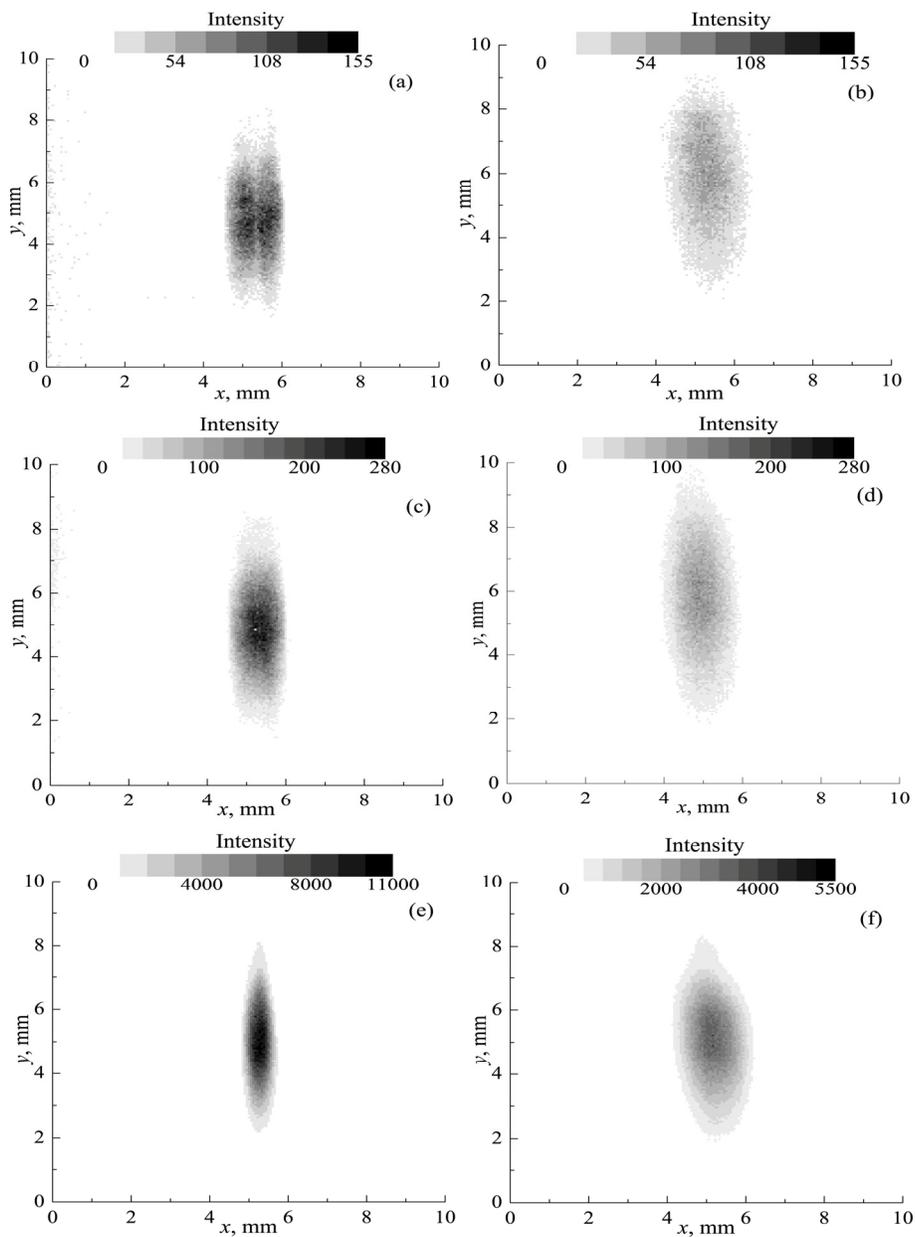


Рис.4. Фронтальное распределение интенсивности отраженного рентгеновского излучения с энергией 40 кэВ на расстояниях 20 см (а, с, е) и 40 см (b, d, f) от монокристалла кварца при разных значениях температуры нагревателя: 18°C (а, b), 70°C (с, d) и 400°C (е, f).

расстоянии 40 см увеличивается по сравнению со случаем без внешних воздействий. Из рис.3 следует, что в перпендикулярном направлении при температуре нагревателя 400°C на расстоянии 20 см ширина кривой распределения интенсивности рентгеновского пучка не меняется, а на расстоянии 40 см кривая

значительно сужается по сравнению со случаем без внешних воздействий и рентгеновский пучок не расходится.

Это более наглядно демонстрирует рис.4, где приведены фронтальные распределения интенсивностей на расстояниях 20 и 40 см от монокристалла кварца при температуре нагревателя соответственно 18, 70 и 400°С.

Учитывая то, что пространственное разрешение детектора в горизонтальном и вертикальном направлениях составляет 55 мкм, то можно на этих изображениях измерять угловую ширину рентгеновского излучения во взаимно-перпендикулярных направлениях с точностью $\sim 2'$.

В табл.1 приведены значения пространственной ширины отраженного пучка (определенной на полувысоте распределения интенсивности) и угловых ширин во взаимно-перпендикулярных направлениях на расстояниях 20 и 40 см при температуре нагревателя 18, 70 и 400°С. В таблице Δx_1 и Δx_2 – пространственные ширины пучка в плоскости отражения, а Δy_1 и Δy_2 – пространственные ширины пучка в перпендикулярной плоскости на расстоянии 20 и 40 см, соответственно. В последних двух колонках таблицы приведены результаты измерения угловых ширин рентгеновского излучения по взаимно-перпендикулярным направлениям $\Delta\theta_x$ и $\Delta\theta_y$, соответственно. Из приведенных значений видно, что отраженное рентгеновское излучение без внешних воздействий имеет расходимость в плоскости отражения $\sim 5'$ и в перпендикулярной к ней плоскости $\sim 30'$. В плоскости отражения рентгеновское излучение фокусируется и фокус приближается к кристаллу при росте температуры нагревателя, а в перпендикулярной плоскости, где пучок имеет значительное расхождение $\sim 30'$, угол расхождения постепенно уменьшается и при температуре 400°С расхождение достигает $\sim 3'$.

Табл.1. Значения пространственной и угловой ширины отраженного пучка на расстояниях 20 и 40 см при разных температурах

| $T, ^\circ\text{C}$ | $\Delta x_1, \text{мм}$ | $\Delta y_1, \text{мм}$ | $\Delta x_2, \text{мм}$ | $\Delta y_2, \text{мм}$ | $\Delta\theta_x, \text{угловых минут}$ | $\Delta\theta_y, \text{угловых минут}$ |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 18 | 1.265 | 2.97 | 1.54 | 4.62 | 4.73 | 28.36 |
| 70 | 1.045 | 2.915 | 1.1 | 4.07 | 0.94 | 19.85 |
| 400 | 0.495 | 2.75 | 1.26 | 2.915 | 13.15 | 2.84 |

Учитывая, что мы наблюдаем отражение от белого спектра излучения анода, очевидно, что фокусировка – геометрическая и происходит благодаря изгибу отражающих атомных плоскостей. Из значений $\Delta\theta_x$ и $\Delta\theta_y$, приведенных в

табл.1, видно, что максимальная разница угловой ширины отраженного рентгеновского излучения в плоскости отражения изменяется меньше ($\sim 18'$), чем в перпендикулярной плоскости ($\sim 23'$). Это означает, что в направлении оси y , перпендикулярной плоскости отражения, радиус кривизны атомных плоскостей ($10\bar{1}1$) меньше, чем по оси z , что и предполагалось в начале эксперимента.

Следует отметить, что степень изгиба зависит от коэффициента теплового расширения по данному направлению. Следовательно, при соответствующем выборе кристалла, его среза и семейств отражающих атомных плоскостей можно обеспечить такой двумерный изгиб, при котором получится точечный фокус отраженного рентгеновского излучения.

4. Заключение

Экспериментально показано, что при наличии температурного градиента в монокристалле кварца с x -срезом в зависимости от положения и формы нагревателя можно получить двумерный изгиб отражающих атомных плоскостей ($10\bar{1}1$) и тем самым обеспечить возможность двумерной фокусировки рентгеновского излучения при отражении от этих плоскостей. Также показано, что в этих условиях интегральная интенсивность отраженного рентгеновского излучения возрастает на порядки, а угловая ширина во взаимно-перпендикулярных направлениях управляема.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы Министерства образования и науки РФ Соглашение № 14.578.21.0198 (RFMEFI57816X0198).

ЛИТЕРАТУРА

1. C. David, B. Nöhammer, E. Ziegler. Appl. Phys. Lett., **79**, 1088 (2002).
2. M. Grigoriev, R. Fakhrtidinov, D. Irzhak, Al. Firsov, An. Firsov, A. Svintsov, A. Erko, D. Roshchupkin. Opt. Commun., **385**, 15 (2017).
3. A. Snigirev, I. Snigireva. C. R. Physique., **9**, 507 (2008).
4. H. Yumotoa, H. Mimura, S. Matsuyama, H. Hara. Rev. Scient. Instr., **76**, 063708 (2005).
5. H.C. Kang, H. Yan, R.P. Winarski, M.V. Holt, J. Maser, C. Liu, R. Conley, S. Vogt, A.T. Macrander, G.B. Stephenson. Appl. Phys. Lett., **92**, 221114 (2008).
6. L.V. Levonyan, M.K. Balyan. Phys. Stat. Sol. (a), **140**, 247 (1993).
7. S.H. Khlopuzyan. Armenian J. Physics, **8**, 73 (2015).
8. D. Irzhak, D. Roshchupkin. J. Appl. Phys., **115**, 244903 (2014).
9. R.G. Gabrielyan, H.A. Aslanyan. Phys. Stat. Sol. (b), **123**, K97 (1984).
10. В.Р. Кочарян. Известия НАН Армении, Физика, **52**, 528 (2017).
11. A.R. Mkrtychyan, M.A. Navasardian, R.G. Gabrielyan, L.A. Kocharian, R.N. Kuzmin.

Solid State Communications, **59**, 147 (1986).

12. **В.В. Маргарян, К.Т. Айрапетян, С.Н. Нореян, В.А. Хачатрян, А.А. Кизириди, Л.Р. Алоян.** Известия НАН Армении, Физика, **52**, 361 (2017).
13. **В.К. Мирзоян, С.Н. Нореян, В.Р. Кочарян.** Изв. НАН Армении, Физика, **40**, 53 (2005).
14. **V.R. Kocharyan, A.S. Gogolev, A.E. Movsisyan, A.H. Beybutyan, S.G. Khlopuzyan, L.R. Aloyan.** J. Appl. Crystallography, **48**, 853 (2015).
15. **А.Е. Мовсисян.** Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 281 (2010).
16. **P. Penning, D. Polder.** Phillips Res. Rep., **16**, 419 (1961).
17. **С.Н. Нореян, В.К. Мирзоян, В.Р. Кочарян.** Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 1, 18 (2004).

ԿՎԱՐՅԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՈՒՄ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԳՐԱԴԻԵՆՏԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ
ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԱՆԴՐԱԴԱՐՁԱԾ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ
ԵՐԿՉԱՓ ԿԻՉԱԿԵՏՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Վ.Ռ. ՔՈՉԱՐՅԱՆ, Ա.Ե. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԳՈԳՈԼԵՎ

Փորձնականորեն ուսումնասիրվել է Լաուէ անդրադարձում կվարցի միաբյուրեղում ջերմային գրադիենտի առկայության պայմաններում, որը կիրառված է $(10\bar{1}1)$ անդրադարձնող ատոմական հարթություններին ուղղահայաց այնպես, որ առաջացնում այդ հարթությունների երկչափ ճկում: Ցույց է տրված, որ նման ձևով կիրառված ջերմային գրադիենտը բերում է անդրադարձած ռենտգենյան ճառագայթման երկչափ կիզակետման, ընդ որում ջերմային գրադիենտի աճին զուգընթաց անդրադարձման հարթության մեջ ռենտգենյան ճառագայթման կիզակետը ավելի արագ է մոտենում բյուրեղին քան նրան ուղղահայաց հարթության մեջ:

POSSIBILITY OF TWO-DIMENSIONAL FOCUSING OF REFLECTED X-RAYS FROM QUARTZ SINGLE CRYSTAL AT THE PRESENCE OF EXTERNAL TEMPERATURE GRADIENT

V.R. KOCHARYAN, A.E. MOVSISYAN, A.S. GOGOLEV

The Laue reflection from a quartz single crystal under the external temperature gradient, which is applied perpendicularly to the reflecting atomic planes $(10\bar{1}1)$ of the crystal so that a two-dimensional bending of these planes occurs, was studied experimentally. It is shown that the temperature gradient applied to the crystal in this way leads to a two-dimensional focusing of the reflected X-rays. Moreover, as the temperature gradient increases, the focus of X-rays approaches to the crystal more rapidly in the plane of reflection than in the perpendicular plane to it.