

УДК 548.732

## **МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЧКОВ, ДИФРАГИРОВАННЫХ ОТ МОНОКРИСТАЛЛА ПРИ НАЛИЧИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА**

К.Т. АЙРАПЕТЯН<sup>1</sup>, С.Н. НОРЕЯН<sup>1</sup>, В.В. МАРГАРЯН<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория рентгеновских пучков, Ереван, Армения

<sup>2</sup>Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

<sup>3</sup>Национальный исследовательский томский политехнический университет, Томск, Россия

\* e-mail: marg-varдан@yandex.ru

(Поступила в редакцию 16 сентября 2016 г.)

Предложен метод для исследования параметров рентгеновских пучков, перебрасываемых от направления прохождения в направлении отражения, в зависимости от значения приложенного температурного градиента. Увеличение интегральной интенсивности дифрагированного рентгеновского пучка обусловлено как явлением переброски внутри столика Дарвина, так и увеличением угловой ширины пучка. Показано, что с большой точностью можно определить то значение температурного градиента, начиная с которого увеличивается угловая ширина перебрасываемого рентгеновского пучка.

### **1. Введение**

Исследование реальной структуры монокристаллов, а также существующих в них дефектов и искажений, обусловленных внешними воздействиями, является одной из актуальных задач современной физики твердого тела. Развитие этой области связано с исследованием рассеяния рентгеновских лучей в монокристаллах, а также с созданием новых элементов рентгеновской оптики. Как известно, при наличии внешних воздействий [1] (температурный градиент, ультразвуковые колебания) в результате отражения рентгеновских лучей от семейства атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  монокристалла  $\text{SiO}_2$  в геометрии Лауэ при определенных условиях наблюдается полная переброска интенсивности первичного пучка от направления прохождения в направлении отражения. Для изучения и выявления особенностей данного явления проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования. Исследованы угловая и энергетическая дисперсии полностью перебрасываемых рентгеновских пучков [2–7]. В частности, в работах [5,6] показано, что угловая ширина полностью перебрасываемого пучка сильно зависит от толщины перебрасывающего монокристалла и

от расстояния источник–исследуемый образец, и с увеличением этого расстояния угловая ширина уменьшается. В работе [8] экспериментально и теоретически исследовано поведение интерференционного коэффициента поглощения рентгеновского излучения для монокристалла кварца в геометрии Лауэ при наличии температурного градиента. В работе [9] на основе решений уравнений Такаги динамической теории рассеяния рассмотрена задача бормановского поглощения (аномальное поглощение) рентгеновских лучей в слабдеформированных кристаллах. В работе [10] экспериментально исследовано поведение интерференционного коэффициента поглощения рентгеновского излучения в зависимости от расположения векторов дифракции и температурного градиента в геометрии Лауэ.

В настоящей работе экспериментально исследовано поведение параметров перебрасываемых рентгеновских пучков в зависимости от значения приложенного температурного градиента.

## 2. Методика эксперимента

На рис.1 показана трехкристальная схема эксперимента. Для этих исследований было использовано монохроматическое излучение  $MoK\alpha_1$ . В качестве исследуемых образцов были использованы плоскопараллельные монокристаллы кварца толщиной  $t = 0.7$  мм с отражающими плоскостями  $(10\bar{1}1)$  и  $(10\bar{1}0)$ , которые находились в условии отражения геометрии Лауэ.

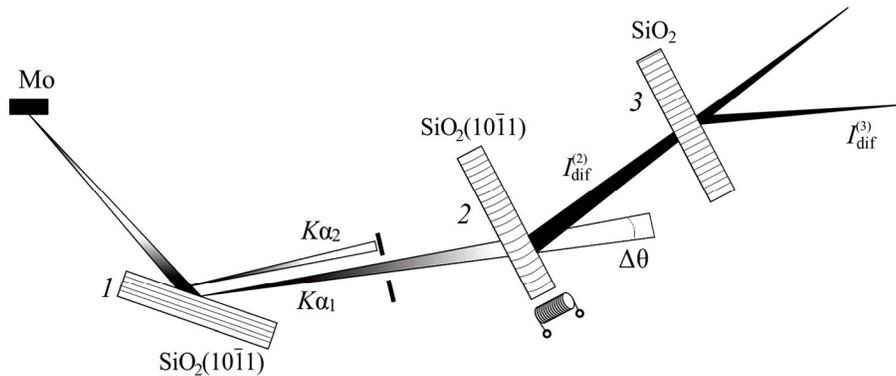


Рис.1. Схема эксперимента.

В геометрии Брэгга–Лауэ по схеме  $(n; n)$  получали дифракционное Лауэ-отражение от атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  второго кристалла для излучения  $MoK\alpha_1$ . Затем по схеме  $(n; -n)$  третий кристалл юстировали по отношению ко второму кристаллу так, чтобы отражающие атомные плоскости третьего кристалла оказались в условии отражения Брегга, и измеряли интенсивность отраженного пучка. В ходе эксперимента с приложенным температурным градиентом

ко второму монокристаллу измеряли интенсивность дифрагированных отраженных пучков от второго и третьего монокристаллов. Эксперименты проводились при параллельном ( $\mathbf{V} \uparrow \mathbf{g}$ ) и антипараллельном ( $\mathbf{V} \downarrow \mathbf{g}$ ) направлениях вектора приложенного температурного градиента ( $\mathbf{V}$ ) и вектора дифракции ( $\mathbf{g}$ ). С постепенным увеличением величины температурного градиента, приложенного ко второму монокристаллу, измерена интенсивность как отраженных ( $I_{\text{dif}}^{(2)}; I_{\text{dif}}^{(3)}$ ), так и прошедших ( $I_{\text{tr}}^{(2)}; I_{\text{tr}}^{(3)}$ ) пучков от второго и третьего монокристаллов.

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 приведены зависимости интенсивности пучков, отраженных вторым и третьим монокристаллом, от величины приложенного температурного градиента при антипараллельном расположении векторов дифракции и температурного градиента, когда отражающими атомными плоскостями второго и третьего кристалла являются  $(10\bar{1}1)$ .

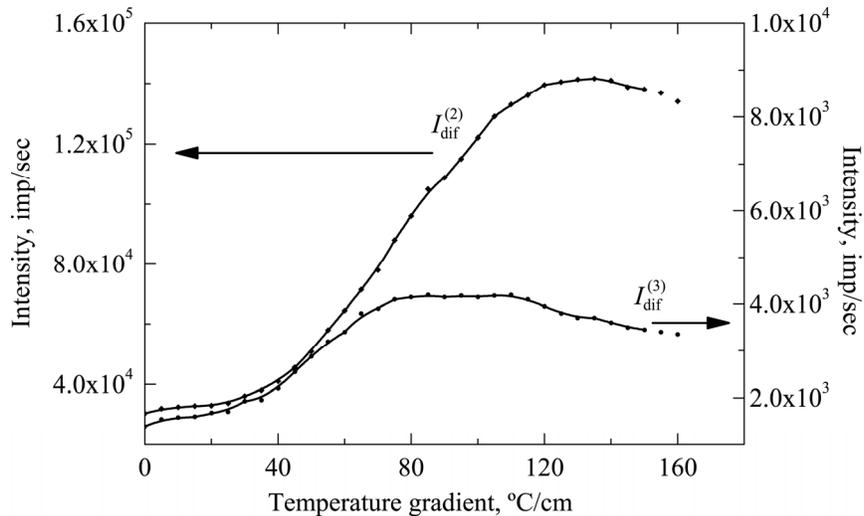


Рис.2. Зависимости интенсивности дифрагированных пучков от значения температурного градиента при ( $\mathbf{V} \downarrow \mathbf{g}$ ) и  $(10\bar{1}1)$ .

На рис.3 приведены те же самые зависимости при параллельном расположении векторов дифракции и температурного градиента. Как видно из приведенных кривых, по ходу увеличения температурного градиента, которое обусловлено явлением переброски рентгеновских излучений от направления прохождения в направление отражения, интенсивности обоих пучков постепенно увеличиваются. Поскольку увеличивается интенсивность дифрагированного отраженного пучка  $I_{\text{dif}}^{(2)}$  от второго кристалла, который служит падающим пучком для третьего кристалла, то должна увеличиваться и интенсивность отраженного

пучка от третьего кристалла. Следуя по ходу увеличения величины температурного градиента, заметим, что начиная с некоторой величины приложенного воздействия, интенсивность отраженного  $I_{\text{dif}}^{(3)}$  пучка от третьего кристалла насыщается несмотря на то, что интенсивность отраженного  $I_{\text{dif}}^{(2)}$  пучка продолжает расти.

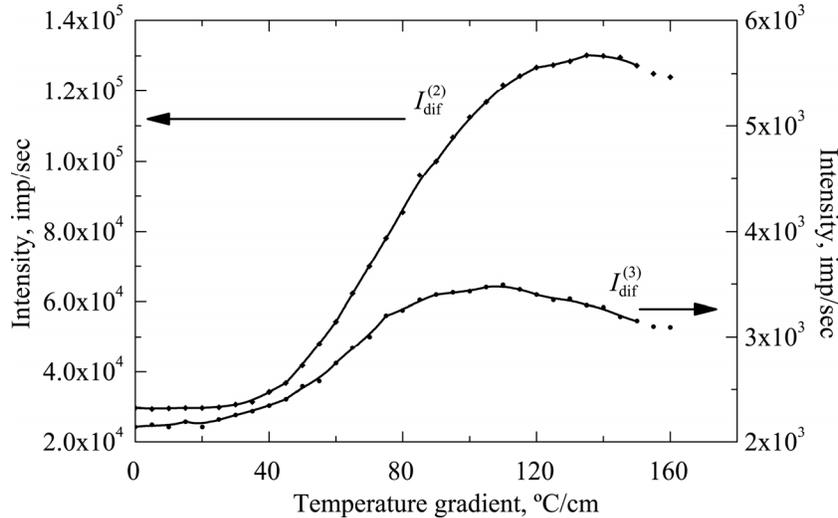


Рис.3. Зависимости интенсивности дифрагированных пучков от значения температурного градиента при  $(\mathbf{B} \uparrow \mathbf{g})$  и  $(10\bar{1}1)$ .

Для объяснения данного явления детально рассмотрим особенности эксперимента. При отсутствии внешних воздействий ширина столика Дарвина  $\Delta\theta(10\bar{1}1)$  отражающих атомных плоскостей намного меньше угловой апертуры  $\Delta\theta_{K\alpha_1}$ , поэтому второй кристалл отражает угловую часть апертуры падающего монохроматического излучения  $\text{MoK}\alpha_1$ . Поскольку третий кристалл также является кварцем, то отражающие атомные плоскости одинаковые и примененная схема бездисперсионная, поэтому для третьего кристалла вся угловая апертура отраженного пучка от второго монокристалла находится в условии дифракционного отражения. Как известно, наличие внешнего воздействия (температурный градиент), перпендикулярно приложенного к отражающим атомным плоскостям, приводит к увеличению интенсивности отраженного рентгеновского пучка за счет проходящего, и при определенной величине температурного градиента происходит полная переброска [1]. В данном эксперименте соответствующие увеличения интенсивностей пучков  $I_{\text{dif}}^{(2)}$  и  $I_{\text{dif}}^{(3)}$  обусловлены переброской интенсивности проходящего пучка от направления прохождения в направление отражения внутри угловой апертуры столика Дарвина  $\Delta\theta(10\bar{1}1)$ .

Наличие температурного градиента приводит к формированию определенного деформационного поля в монокристалле, за счет чего отражающие атомные плоскости изгибаются. Это приводит к тому, что, начиная с определенных значений температурного градиента, во втором кристалле увеличивается угловая ширина  $\Delta\theta_T$  перебрасываемого пучка, за счет чего увеличивается интегральная интенсивность отраженного пучка  $I_{\text{dif}}^{(2)}$ . Третий кристалл отражает только часть  $\Delta\theta(10\bar{1}1)$  ширины  $\Delta\theta_T$  падающего пучка, что и приводит к насыщению интенсивности отраженного пучка.

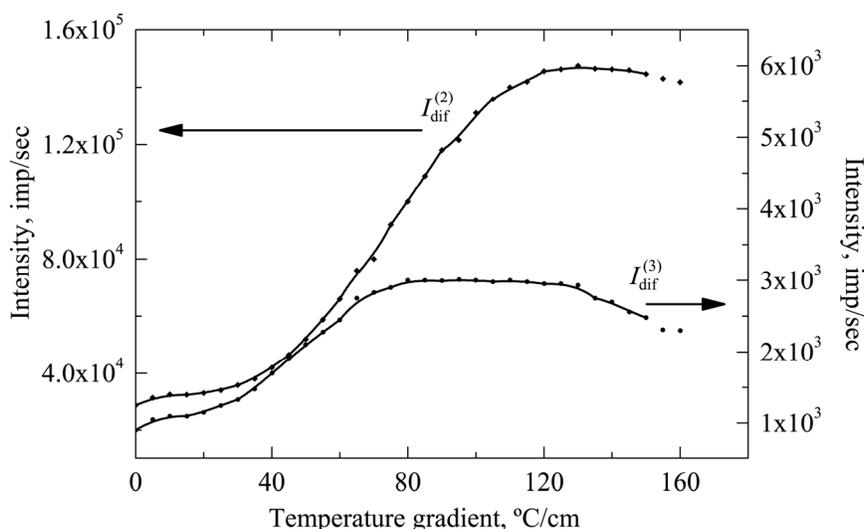


Рис.4. Зависимости интенсивности дифрагированных пучков от значения температурного градиента при ( $\mathbf{B}\uparrow\downarrow\mathbf{g}$ ) и ( $10\bar{1}1$ ).

В настоящей работе также проведены экспериментальные исследования для отражающих атомных плоскостей ( $10\bar{1}1$ ) второго кристалла и для ( $10\bar{1}0$ ) третьего кристалла. На рис.4 и 5 приведены зависимости интенсивности пучков, отраженных вторым и третьим монокристаллами, от величины приложенного температурного градиента соответственно при антипараллельном и параллельном расположении векторов дифракции и температурного градиента, когда отражающими атомными плоскостями второго кристалла являются ( $10\bar{1}0$ ), а третьего кристалла – ( $10\bar{1}0$ ). Поскольку  $\Delta\theta(10\bar{1}1) > \Delta\theta(10\bar{1}0)$ , на рис.4 и 5 более четко видна разница пределов насыщения интенсивности. Из приведенных результатов видно, что для двух разных значений температурного градиента ( $120^\circ\text{C}/\text{cm}$  и  $150^\circ\text{C}/\text{cm}$ )  $I_{\text{dif}}^{(2)}$  имеет одинаковые значения, а  $I_{\text{dif}}^{(3)}$  принимает разные значения. Поскольку при наличии температурного градиента параметры (угловая и энергетическая дисперсия) и интенсивность дифрагированного рентгеновского

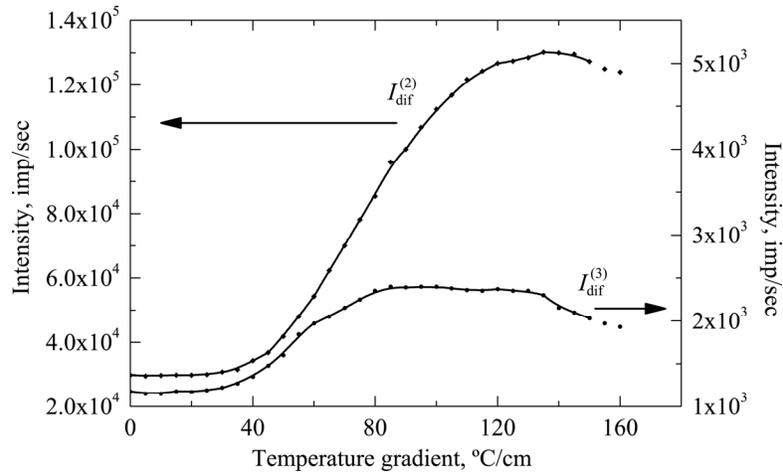


Рис.5. Зависимости интенсивности дифрагированных пучков от значения температурного градиента при ( $\mathbf{V}\uparrow\mathbf{g}$ ) и (1011).

пучка от второго кристалла зависят от значения температурного градиента, поэтому разница значений интенсивности дифрагированного пучка от третьего кристалла  $I_{\text{dif}}^{(3)}$  при двух разных значениях температурного градиента (120°C/см и 150°C/см) обусловлена изменением параметров дифрагированного пучка от второго кристалла. Это говорит о том, что в угловой ширине дифрагированного пучка от второго монокристалла происходит перераспределение интенсивности.

#### 4. Заключение

Таким образом, нами предложен метод для исследования параметров рентгеновских пучков, который дает возможность с большой точностью определить то значение температурного градиента, начиная с которого увеличивается угловая ширина перебрасываемого рентгеновского пучка. Показано, что при определенных значениях температурного градиента в угловой ширине дифрагированного пучка от второго монокристалла происходит перераспределение интенсивности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян. Письма в ЖТФ, **8**, 677 (1982).
2. А.Р. Мкртчян, Р.Г. Габриелян, А.А. Асланян А.Г. Мкртчян, Х.В. Котанджян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, **21**, 297 (1986).
3. М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян, К.Т. Айрапетян А.Р. Агумян, Ж.С. Горцакалян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, **23**, 217 (1988).
4. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, **21**, 340 (1986).
5. С.Н. Норейян, В.К. Мирзоян, В.Р. Кочарян. Изв. НАН Армении, Физика, **39**, 124 (2004).

6. **В.В. Маргарян, С.Н. Нореян, К.Т. Айрапетян.** Известия НАН Армения, Физика, **45**, 215 (2010).
7. **V.R. Kocharyan, A.S. Gogolev, A.E. Movsisyan, A.H. Beuybutyan, S.G. Khlopuzyan, L.R. Aloyan.** J. Appl. Crystallography, **48**, 853 (2015).
8. **В.Р. Кочарян, Р.Ш. Алексанян, К.Г. Труни.** Известия НАН Армения, Физика, **45**, 290 (2010).
9. **К.Г. Труни, В.Р. Кочарян, Г.Р. Григорян.** Известия НАН Армении, Физика, **47**, 131 (2012).
10. **К.Т. Hayrapetyan, S.N. Noreyan, V.V. Margaryan, V.R. Kocharyan.** Advanc. Mater. Resear., **1084**, 342 (2015).

ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԳՐԱԴԻԵՆՏԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂԻՑ ԴԻՖՐԱԿՑՎԱԾ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՓՆՋԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Կ.Տ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ս.Ն. ՆՈՐԵՅԱՆ, Վ.Վ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ

Առաջարկված է ջերմային գրադիենտի արժեքից կախված, առաջնային ուղղությունից դեպի անդրադարձման ուղղություն վերամղված ռենտգենյան փնջերի բնութագրերի ուսումնասիրման մեթոդ: Դիֆրակցված ռենտգենյան փնջի ինտեգրալային ինտենսիվության մեծացումը պայմանավորված է ինչպես Դարվինի սեղանի ներսում վերամղման երևույթով, այնպես էլ փնջի անկյունային բացվածքի մեծացմամբ: Ցույց է տրված, որ մեծ ճշտությամբ կարելի է որոշել ջերմային գրադիենտի այն արժեքը, որից սկսած մեծանում է վերամղված ռենտգենյան փնջի անկյունային բացվածքը:

THE METHOD OF PARAMETERS INVESTIGATION OF X-RAY BEAMS  
DIFFRACTED FROM A SINGLE CRYSTAL AT THE PRESENCE OF  
TEMPERATURE GRADIENT

K.T. HAYRAPETYAN, S.N. NOREYAN, V.V. MARGARYAN

The method of investigation of the X-ray beams parameters pumped from the transmission direction into the reflection direction depending on the value of the applied temperature gradient is suggested. The increase of the integral intensity of the diffracted X-ray beam is caused by both the pumping effect inside the Darwin table and the increase of the angular width of the beam. It is shown the possibility of determination with a high precision of that value of the temperature gradient beginning with which the angular width of the pumped X-ray beam is increased.