

## **ТРЕХВОЛНОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ЦУГА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**А.О. Абоян**

*Национальный политехнический университет Армении*

В классических работах по теории интерференции рентгеновских лучей при расчете интенсивности рентгеновских волн в случае рассеяния в газах, жидкостях и аморфных твердых телах, а также в кристаллах предполагается, что весь облучаемый объем, независимо от их размеров, рассеивает рентгеновские волны когерентно. Однако обзор научной литературы по теории интерференции рентгеновских лучей показывает, что для точного определения ширины и интенсивности дифракционных максимумов необходимо учесть время продолжительности когерентного излучения. В случае, когда толщина кристалла порядка или меньше длины цуга, длительность времени когерентного излучения можно не учитывать, а при толщине кристалла больше длины цуга неучет длительности когерентного излучения приводит к недопустимым ошибкам. Теоретически исследована зависимость интенсивности рассеянных волн от длительности когерентного излучения.

Поэтому в теории интерференции, как и вообще в рентгеноструктурных исследованиях, определение длины цуга рентгеновского излучения имеет важное значение. Особенно это важно для рентгеновской интерференции и голографии, а также для проверки теоретических представлений.

Исходя из вышеизложенного, предложен метод измерения длины цуга рентгеновского излучения трехволновым интерферометром, который отличается большой точностью. Показано, что при данной конфигурации плоскостей описанного прибора можно измерять длину цуга определенной длины волны и ее гармоник. Трехволновой интерферометр может быть особенно полезным при использовании синхротронного излучения.

**Ключевые слова:** интерференция, интерференционная картина, длина цуга, трехкристальный двухволновой интерферометр, трехволновой интерферометр, разность фаз, разность геометрических путей.

**Введение.** На основе данных, изложенных в работе [1], при расчете интенсивности рассеянных волн и дифракционных ширин спектральных линий в первую очередь необходимо выяснить вопрос о соотношении длины цуга рентгеновского излучения и размеров идеальных областей монокристаллов.

При измерении длины цуга рентгеновского когерентного излучения наиболее подходящим, на наш взгляд, является интерферометрический метод. Для этого необходимо испускаемое рентгеновским источником излучение расче-

нить на два потока, заставить их встретиться после того, как ими будут пройдены различные пути, и, таким образом, получить интерференционную картину. Далее необходимо постепенно увеличивать разность ходов между этими двумя потоками до тех пор, пока не исчезнет интерференционная картина. Очевидно, что интерференционная картина исчезнет с того момента, когда разность ходов между этими двумя потоками, постепенно увеличиваясь, станет больше, чем длина цуга рентгеновского монохроматического излучения. Таким образом, измерив разность ходов между двумя потоками в момент исчезновения интерференционной картины, можем измерить длину цуга, т.е. длительность когерентного излучения, создавшего эту картину. Осуществление такого опыта достаточно сложно и связано с рентгеновской интерферометрией.

В оптике давно известно, что при достаточно больших разностях ходов интерференционная картина исчезает. Однако это явление до сих пор не наблюдалось при интерференции рентгеновских лучей, что объясняется отсутствием рентгеновских интерферометров. Открытие аномального прохождения (эффект Бормана) и в связи с этим бурное развитие динамической теории интерференции рентгеновских лучей привели к созданию рентгеновских интерферометров [2 – 6]. Наш опыт по изготовлению интерферометров различных конструкций и их применению дал возможность сконструировать и изготовить рентгеновский цугомер-прибор для измерения длины цуга (длительности когерентного излучения).

**Методика работы и ее обоснование.** При выборе методики работы необходимо учесть следующие факторы:

1. Постепенным увеличением разности ходов между интерферирующими волнами можно добиться исчезновения интерференционной картины.

2. В случае, когда амплитуды интерферирующих волн сильно отличаются друг от друга, интерференционная картина исчезает: сумма и разность амплитуд этих волн отличаются друг от друга незначительно (видимость уменьшается).

3. На первый взгляд, разности фаз (ходов) между интерферирующими волнами легко увеличить введением на пути одной из волн среды с показателем преломления, отличным от единицы. Однако это может привести к новым трудностям. Так как показатель преломления рентгеновских лучей для сред мало отличается от единицы (от показателя преломления вакуума или воздуха), то для получения разностей оптических путей больших, чем длина цуга, необходимо ввести среду протяженностью порядка 10 см, что, во-первых, почти до невозможности увеличивает размеры интерферометра; во-вторых, из-за поглощения этой средой волна, проходящая через нее, так сильно ослабляется, что интерференционная картина по причине, указанной во втором пункте, исчезает. Детальное обсуждение этого вопроса показало, что для измерения длины цуга рентге-

новского излучения необходимо создать разность фаз между интерферирующими волнами путем создания разности их геометрических путей.

Метод измерения длины цуга с помощью трехблочного двухволнового интерферометра описан в работе [7]. В настоящей работе дается описание трехволнового метода.

Как было отмечено в пункте 3, для измерения длины цуга самым подходящим методом является создание разностей фаз между интерферирующими волнами путем создания разности их геометрических путей. Нетрудно убедиться в том, что создание разностей геометрических путей интерферирующих волн как в кристалле, так и вне кристалла легко реализовать с помощью многоволновых интерферометров.

Основы многоволновой интерференции изложены в работе [8].

В настоящей работе нами предлагается трехволновой метод измерения длины цуга, который отличается большой точностью.

Допустим, имеем трехволновой интерферометр, состоящий из пяти блоков, вырезанных на общем основании из кристалла кремния, как это показано на рис. 1.

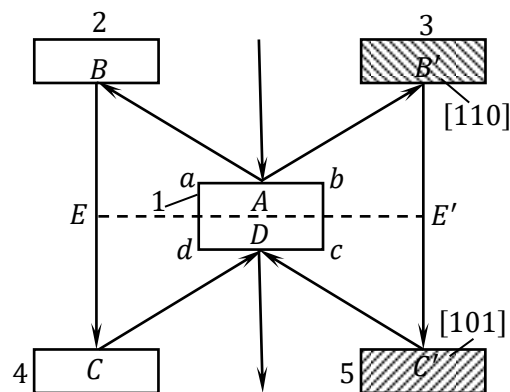


Рис. 1. Трехволновой интерферометр из пяти блоков, вырезанных на общем основании из кристалла кремния

Здесь показан ход лучей, когда первичный пучок падает перпендикулярно. При плоскостях (440) и (404), расположенных симметрично относительно нормали к поверхности отражения, приведенная схема удовлетворяется для излучения  $NiK_{\alpha}$  (см. [8]) и его гармоник. С изменением семейства отражающих плоскостей (межплоскостных расстояний) можно найти и другие излучения, удовлетворяющие этой схеме. При наличии синхротронного излучения получение такого хода лучей не представляет труда.

Как видно из рис. 1, в точке  $D$  интерферирующие волны налагаются друг на друга с одинаковыми фазами, так как для этой геометрии удовлетворимы следующие условия:

$$BC \parallel B'C', \quad BC = B'C', \quad AB = AB' = C'D = DC,$$

следовательно,

$$AB + BC + CD = AB' + B'C' + C'D.$$

Однако нетрудно убедиться в том, что наложение интерферирующих волн с одинаковыми фазами может происходить и при выполнении условий:  $BE = E'C'$  и  $EC = E'B'$ , где  $EE'$  делит сечение  $abcd$  первого блока пополам.

Теперь рассмотрим следующую схему. Допустим, что от блоков 3 и 5 вырезаны (с их внутренних сторон) слои одинаковых толщин  $x$ , что равносильно отодвиганию каждого из этих блоков на  $x$  (увеличение расстояния  $B'C'$  на  $2x$ ), как это показано на рис. 2.

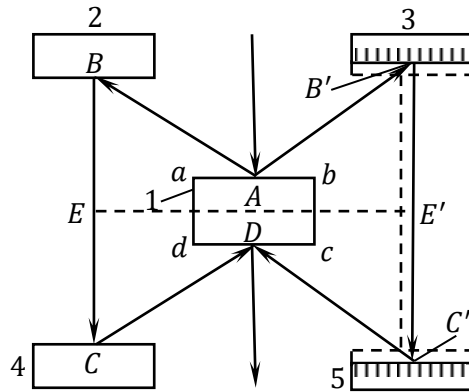


Рис. 2. Слои блоков 3 и 5 интерферометра, вырезанные с их внутренних сторон с одинаковой толщиной  $x$

Простыми вычислениями можно показать, что при этом пучки  $AB'$  и  $DC'$  не смещаются, точка  $D$  (точка наложения интерферирующих пучков) остается на месте, а пучок  $B'C'$  смещается параллельно самому себе вправо.

Из-за удаления этих слоев (увеличение расстояния на  $2x$ ) на правом плече интерферометра (в область  $AB'C'D$ ) появляется добавочная разность ходов, равная

$$\Delta_0 = 2x \cdot \frac{1 + \sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta - \varphi)}. \quad (1)$$

Для измерения угла необходимо постепенно увеличивать эту разность, после чего зафиксировать ту разность хода, при которой в результате наложения

волн в точке  $D$  интерференционная картина исчезает, т.е. когда в точке  $D$  налагаются друг на друга волны, принадлежащие разным путям: волновой пучок в точке  $A$  разделяется на две части - часть пучка, проходящая по пути  $AB'C'D$ , достигает точки  $D$  в тот момент, когда другая часть, идущая по пути  $ABCD$ , уже вышла из этой точки. Для постепенного увеличения разности между путями  $ABCD$  и  $AB'C'D$  необходимо блоки отрезать наклонно, как это показано на рис. 3.

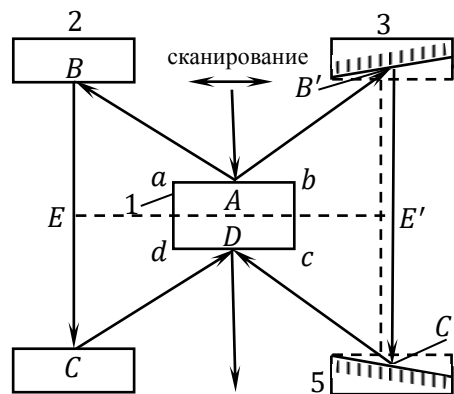


Рис. 3. Блоки 3 и 5, вырезанные наклонно для постепенного увеличения разности между путями  $ABCD$  и  $AB'C'D$

Тогда путем сканирования падающего пучка при неподвижном интерферометре или интерферометра при неподвижном падающем пучке (как это показано стрелкой на рис. 3) перемещением пучка падения вправо можно постепенно увеличить разность ходов между путями  $ABCD$  и  $AB'C'D$ . С передвижением точки падения вправо контрастность интерференционной картины постепенно уменьшается, и в пределе, когда разность между путями  $AB'C'D$  и  $ABCD$  становится больше, чем длина пучка, интерференционная картина исчезает.

Разность ходов между плечами такого интерферометра в зависимости от величины перемещения точки падения  $A$  (от интервала сканирования) можно выразить следующей формулой:

$$\Delta = \frac{2d \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\theta - \varphi) \operatorname{tg} \alpha} \cdot \frac{1 + \sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \varphi)}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол наклона внутренних поверхностей блоков 3 и 5 (см. рис.3);  $d$  — расстояние между точками падения  $A$  и  $A'$  (интервал сканирования);  $\varphi$  — угол между рассеивающими плоскостями и поверхностью кристалла.

Формулы (1) и (2) показывают, что весьма малым наклоном поверхностей блоков 3 и 5 и небольшим перемещением точки падения  $A$  можно создать разность между путями  $ABCD$  и  $AB'C'D$ , равную или большую, чем длина цуга.

Действительно, при излучении  $NiK_{\alpha 2}$  ( $\theta \approx 59^{\circ}35'$ ) в случае перемещения точки падения  $A$  на 5 мм (интервал сканирования) получается разность ходов порядка  $10^{-4}$  при  $\alpha$  порядка одной дуговой минуты.

Таким образом, асимметричность отражений от третьего и пятого блоков настолько мала, что она не может привести к каким-либо ощутимым изменениям угла отражения ( $\theta \approx 59^{\circ}35'$ ), и при сканировании условия отражения во всех пяти блоках остаются строго одинаковыми: интерферометр, показанный на рис. 3, имеет точную геометрию и поэтому дает большую точность измерений.

#### **Выводы**

1. Предложен точный трехволновой метод измерения длины цуга.
2. При данном кристалле и данной конфигурации плоскостей описанного прибора можно измерять длину цуга определенной длины волны и ее гармоник.
3. Прибор особенно полезен при использовании синхротронного излучения.

#### **Литература**

1. Aboyan A.H., Drmeyer G.R. // East European Scientific Journal. Matematika- Fizika.- 2016.- V. 1, 3(6). - P. 147-151.
2. Bonse U., Hart M. // Appl. Phys. Lett. – 1965. - V. 7. - P. 99-100.
3. Bonse U., Hart M. // Z. Physik. – 1965. - V. 188. - P. 154 -164.
4. Bonse U., Hart M. // Z. Physik. - 1965. - V. 190. - P. 455 - 467.
5. Aboyan A.O. // Cryst. Res. Technol. – 1996. - V. 31. - P. 513 – 519.
6. Bezirganyan P.A., Eiramdzian F.O., Truni K.G. // Phys. stat. sol. (a). -1973. - V. 20. - P. 611- 618.
7. Aboyan A.H., Drmeyer G.R. // East European Scientific Journal. Matematika- Fizika.- 2016.- V. 1, 3(7). - P. 98-103.
8. Безирганян П.А., Габриелян Р.Ц. Препринт / ЕГУ. -1976. - № 8.

*Поступила в редакцию 26.11. 2018.  
Принята к опубликованию 30.05.2019.*

**ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԼԾԱՇԱՐՔԻ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅԱՆ  
ՉԱՓՄԱՆ ԵՌԱԼԻՔ ՄԵԹՈԴ**

**Ա.Հ. Աբոյան**

Ռենտգենյան ճառագայթների ինտերֆերենցիայի տեսության դասական աշխատանքներում ռենտգենյան ալիքների ինտենսիվության հաշվարկի ժամանակ գաղերում, հեղուկ-

ներում, ամորֆ պինդ մարմիններում, ինչպես նաև բյուրեղներում դրանց ցրման դեպքում ենթադրվում է, որ ճառագայթվող ամբողջ ծավալը, անկախ դրա չափերից, ռենտգենյան ալիքները ցրում է կոհերենտ: Սակայն ռենտգենյան ճառագայթների ինտերֆերենցիայի տեսության գիտական գրականության ակնարկը ցույց է տալիս, որ դիֆրակցիոն մաքսիմումների ինտենսիվության լայնության ճշգրիտ որոշման համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել կոհերենտ ճառագայթման տևողությունը: Այն դեպքում, երբ բյուրեղի հաստությունը լծաշարքի երկարության կարգի է կամ փոքր է նրանից, ճառագայթման տևողությունը կարելի է հաշվի չառնել, իսկ եթե հաստությունը մեծ է լծաշարքի երկարությունից, կոհերենտ ճառագայթման տևողությունը հաշվի չառնելը հանգեցնում է անթույլատրելի սխալների: Յրված ալիքների ինտենսիվության կախվածությունը կոհերենտ ճառագայթման տևողությունից ուսումնասիրված է միայն տեսականորեն: Այդ պատճառով էլ ինտերֆերենցիայի տեսության, ինչպես նաև ընդհանրապես ռենտգենական ուղվածքային հետազոտություններում ռենտգենյան ճառագայթման լծաշարքի երկարության որոշումը կարևոր նշանակություն ունի: Այն հատկապես կարևոր է ռենտգենյան ինտերֆերենցիայի և հոլոգրաֆիայի, ինչպես նաև տեսական պատկերացումների ստուգման համար:

Ելնելով վերը շարադրվածից՝ առաջարկված է ռենտգենյան ճառագայթման լծաշարքի երկարության չափման եղանակ եռալիք ինտերֆերաչափով, որն աչքի է ընկնում մեծ ճշտությամբ: Ցույց է տրվել, որ նկարագրված սարքի հարթությունների տվյալ կոնֆիգուրացիայի դեպքում կարելի է չափել որոշակի ալիքի երկարության լծաշարքի երկարությունը և նրա հարմոնիկը: Եռալիք ինտերֆերաչափը կարող է հատկապես օգտակար լինել սինխրոտրոնային ճառագայթման կիրառման դեպքում:

**Առանցքային բառեր.** ինտերֆերենցիա, ինտերֆերենցիոն պատկեր, լծաշարքի երկարություն, եռաբյուրեղ երկալիքային ինտերֆերաչափ, եռալիք ինտերֆերաչափ, փուլերի տարբերություն, երկրաչափական ճանապարհների տարբերություն:

### A THREE-WAVE METHOD FOR MEASURING THE WAVE – TRAIN LENGTH OF X-RAY RADIATION

A.H. Aboyan

In classical works on the theory of the X-ray interference, at calculating the intensity of the X-ray waves in case of scattering in gases, liquids and amorphous solid bodies, as well as crystals, it is supposed that the whole amount to be radiated, regardless of its dimensions, coherently scatters the X-ray waves. However, the review of scientific literature on the theory of the X-ray interference shows that to define the width and intensity of diffraction maximums accurately, it is necessary to take into consideration the duration of coherent radiation. In the case, when the crystal thickness is equal to or less than the length of the wave-train, the duration of the coherent radiation need not be taken into account, while when the crystal thickness is more than the length of the wave-train, the neglect of the coherent radiation duration brings about inadmissible errors. The dependence of intensity of the scattered waves on the coherent radiation duration has been investigated only theoretically. Therefore, in the

theory of interference, as in general in X-ray studies, the determination of the wave-train length of the X-ray radiation is important. This is especially essential for X-ray interference and holography, as well as for testing the theoretical concepts.

Based on what is mentioned above, a method for measuring the wave – train length of X-ray radiation by a three-wave interferometer distinguished by high accuracy is proposed. It is shown that at the given plane configuration of the described device, the wave- train length of a certain length of the wave and its harmonics can be measured. The three-waved interferometer can be especially useful when using synchrotron radiation.

**Keywords:** interference, interference pattern, wave - train length, three-crystal two- wave interferometer, three-wave interferometer, phase difference, difference of the geometrical paths.