

УДК 537.531

А. М. РОСТОМЯН

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ АСИММЕТРИЧНЫХ ВВВ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

Рассмотрены разные варианты рентгеновских асимметричных интерферометров с брэгговской геометрией дифракции лучей. Эти интерферометры с отражающими зеркалами и расщепителем-анализатором пучка изготовлены из моноблока кремния. Теоретически рассчитаны и экспериментально реализованы варианты ВВВ-интерферометров с оптимальной асимметричностью отражений.

Работа посвящается асимметричным вариантам рентгеновских интерферометров типа Бонзе–Харта [1–3] с брэгговской геометрией дифракции лучей и является продолжением [4]. Эти монокристаллические асимметричные ВВВ-интерферометры, как и их симметричные варианты, построены из моноблока кремния, обладающего весьма совершенной структурой. Интерферометр состоит из двух зеркал и расположенной между ними пластинки, служащей одновременно и расщепителем, и анализатором (в дальнейшем – расщепитель-анализатор). Отражающие поверхности таких ВВВ-интерферометров можно разрезать под разными углами φ по отношению к отражающим плоскостям и получить разные варианты асимметричных ВВВ-интерферометров.

Целью данной работы является нахождение зависящего от длины волны оптимального угла асимметричности φ для максимальной трансмиссии в брэгговской геометрии [1].

Общая рентгенооптическая схема двух из таких асимметричных ВВВ-интерферометров, сконструированных в одном моноблоке с диаметром 100мм, представлена на рис. 1. Здесь же показан рентгенооптический ход лучей, производящих брэгговскую трансмиссию (Т) и отражение (R) в обоих (а и б) интерферометрах. Интенсивности интерферирующих Н-пучков, образованных путем TRT и RRR, значительно отличаются, а интенсивности О-пучков – RRT и TRR – равные и тем самым могут обеспечить приемлемый контраст для интерференционной картины. В случае идеальной геометрии интерферометра последовательность трансмиссий и отражений является несущественной.

Два канала между расщепителем и зеркалом, а также между зеркалом и анализатором в этих двух ВВВ-интерферометрах имеют идентичную ширину, равную 9мм. Изображение изготовленных и апробированных ВВВ-интерферометров на основе одного моноблока кремния представлено на рис. 2.

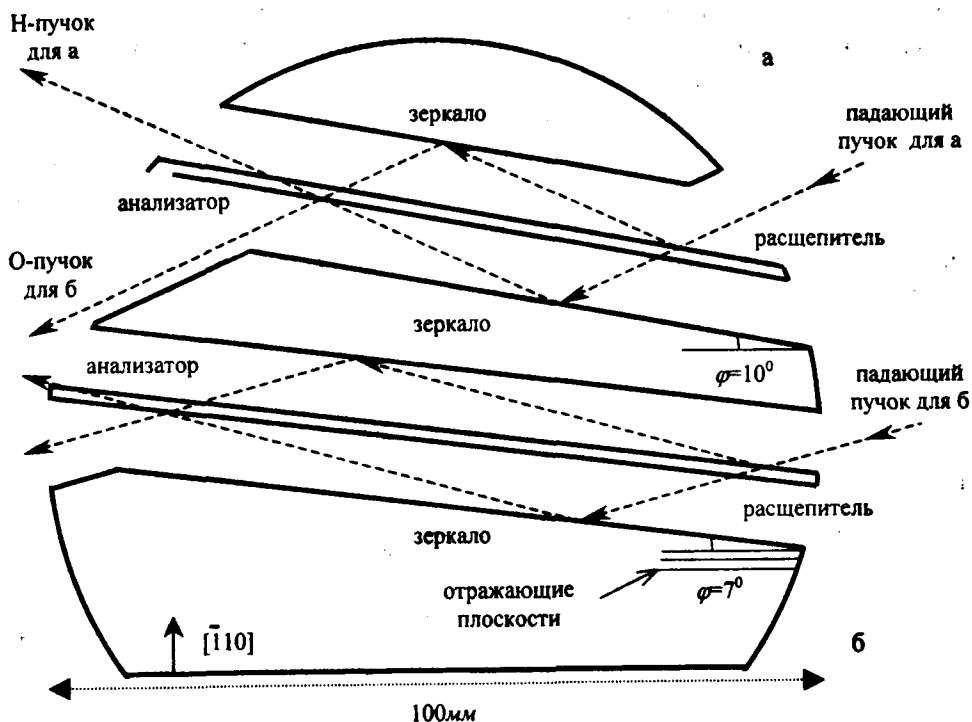


Рис.1. Рентгенооптическая схема (вид сверху) двух асимметричных ВВВ-интерферометров с параметрами асимметричности $\varphi=10^\circ$ (а) и $\varphi=7^\circ$ (б), сконструированных в одном моноблоке, и ход лучей в них.

Здесь видно, что толстые блоки зеркал продолжаютсЯ вверх в виде приподнятых тонких расщепителей высотой по 6мм, образуя LLL-интерферометр.

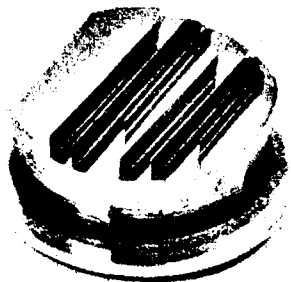


Рис. 2. Два асимметричных ВВВ-интерферометра вместе с LLL-интерферометром, изготовленные на основе одного моноблока кремния.

Таким образом, мы имеем один LLL-и два ВВВ-интерферометра в одном моноблоке. Наличие LLL-интерферометра полезно для апробации работоспособности моноблока с тремя интерферометрами и их правильной ориентации, так как он обычно менее чувствителен к кристаллическим дефектам, чем интерферометры типа ВВВ.

Для выявления оптимального варианта асимметричного ВВВ-интерферометра расчеты произведены в следующих интервалах: асимметричность $0^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$, толщина расщепителя-анализатора $100\text{мкм} \leq t \leq 600\text{мкм}$ и длина волны $0,8\text{А} \leq \lambda \leq 1,6\text{А}$, соответст-

вующая энергии $15,5 \text{кэВ} \geq E \geq 7,7 \text{кэВ}$. Вычисления произведены также для широко используемой в рентгеновской оптике длины волны $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1,5405 \text{А}$.

Результаты расчетов и экспериментов с симметричными интерферометрами позволили определить толщину пластинки между зеркалами $t = 500 \text{мкм}$ [4]. Опыт показывает, что такая толщина достаточна для уменьшения изгиба под воздействием гравитации (при горизонтальной ориентации пластинки) и обеспечивает стабильность против внешних механических вибраций, довольно ощутимых в экспериментальных залах синхротронного излучения.

Оптимальное значение асимметричности φ при фиксированной длине волны λ было получено из зависимости максимального пика интенсивности О-пучка от нормированного угла y (рис. 3), являющегося параметром, измеряющим угол падения пучка в области полного отражения в случае нулевого поглощения. Вычисления произведены на основе теории, приведенной в работе Бонзе и Харта [1], где коэффициент отражения представляется в виде

$$R(y) = E - \sqrt{E^2 - 1}, \quad (1)$$

здесь

$$E = d^2 + f^2 + [1 + (d^2 + f^2)^2 - 2(d^2 - f^2)]^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$d = \frac{v}{|C|} \frac{\chi_{io}}{\chi_{rh}} \frac{\chi_{ih}}{\chi_{rh}} + y, \quad (3)$$

$$f = \frac{v}{|C|} \frac{\chi_{io}}{\chi_{rh}} - \frac{\chi_{ih}}{\chi_{rh}} y, \quad (4)$$

$$v = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\gamma_o}{|\gamma_h|}} + \sqrt{\frac{|\gamma_h|}{\gamma_o}} \right), \quad (5)$$

а нормированная угловая переменная представляется [1, 5] как

$$y = \left[(\psi_o - \psi_{ob}) (\sin 2\vartheta) / \sqrt{\frac{|\gamma_h|}{\gamma_o}} + |\chi_{ro}| v \right] / |C| |\chi_{rh}|. \quad (6)$$

Здесь $\gamma_h = \cos \psi_h$, $\gamma_o = \cos \psi_o$ и ψ_h , ψ_o являются углами между нормалью отражающей поверхности и Н-, О-пучками соответственно. $\psi_{ob} = \pi/2 - \vartheta - \varphi$ — угол падения, а χ — значения действительных и мнимых частей фурье-разложения поляризуемостей.

Так как коэффициент брэгговской трансмиссии экстремально мал для $y < 1$, на рис. 3 приведены значения интенсивностей в интервале $1 < y < 2,4$, где аномальное поглощение имеет минимальное значение.

Как видно из рис. 3, распределение интенсивности О-пучка по y сильно зависит от параметра асимметричности φ ; для представленного варианта с $\lambda = 1 \text{А}$, $(hkl) = (220)$, $t = 500 \text{мкм}$ существует критическое значение асимметричности $\varphi = 7^\circ$ при $y = 1,12$, для которого интенсивность максимальна

Для более длинных волн с $\lambda = 1,5405 \text{А}$ (а) наблюдается похожее пове-

дение, но со сравнительно меньшей интенсивностью О-пучка. В этом случае асимметричность принимает свое максимальное значение при $\varphi = 10^{\circ}$, $y = 1,11$ при тех же параметрах: $(hkl) = (220)$, $t = 500 \text{ мкм}$.

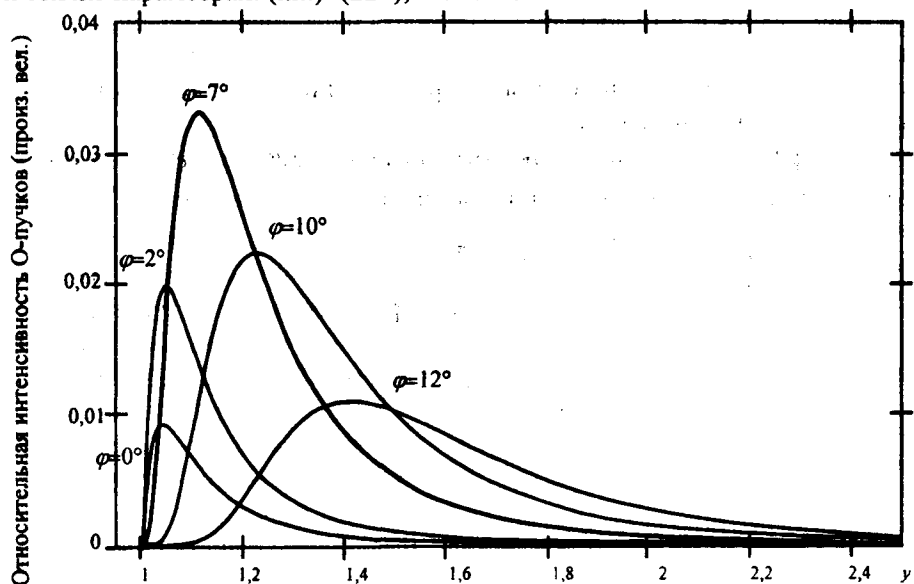


Рис. 3. Вычисленные интенсивности TRR и RRT интерферирующих О-пучков в зависимости от нормированной угловой переменной y для разных углов асимметричности φ при $\lambda = 1 \text{ \AA}$, $(hkl) = (220)$, $t = 500 \text{ мкм}$.

Вычисления показывают также, что уменьшение толщины t расщепителя-анализатора ведет к увеличению интенсивности О-пучка при одинаковых других параметрах. Однако, как было показано в [4], чрезмерное уменьшение t приводит к разного рода нежелательным побочным влияниям на стабильность расщепителя-анализатора.

Учитывая результаты расчетов, мы разработали и сконструировали на основе монокристалла кремния два ВВВ-интерферометра с углами асимметричности $\varphi = 10^{\circ}$ и $\varphi = 7^{\circ}$ для длин волн $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ и $\lambda = 1 \text{ \AA}$ соответственно ($t = 500 \text{ мкм}$, $(hkl) = (220)$).

Интерферометр	Толщина расщепителя-анализатора t , мкм	Асимметрия φ	Длина волны λ , \AA	Энергия E , кэВ	Отражение
а	500	10°	1,5405	8,048	(220)
б	500	7°	1	$E = 12,399$	(220)

В таблице приведены параметры для предложенных оптимальных вариантов асимметричного ВВВ-интерферометра. Выбранные варианты для идентичности условий травления были разработаны и апробированы на выходной линии синхротронного рентгеновского излучения E2 (RÖEMO1) ускорителя DORIS III (4,5 ГэВ, 100 мА) в DESY/HASYLAB (Германия) [6, 7]. Монохроматизация первичного пучка осуществлялась с помощью двухкристального кремниевого монохроматора.

Интерференционные снимки были получены с помощью CCD-камеры с размером пикселя CCD-чипа 12 мкм. Программное обеспечение такой камеры позволяло регистрировать интенсивность рентгеновских лучей вдоль выбранного направления и в то же время передавать информацию на компьютер для обработки. Эта возможность одновременного наблюдения за рефлексом во время опыта является очень полезной при выполнении высокоточных рентгенооптических экспериментов.

Интерференционные снимки ВВВ-интерферометра с $\varphi = 7^\circ$ очень похожи на снимки, полученные с помощью интерферометра с $\varphi = 10^\circ$, и поэтому

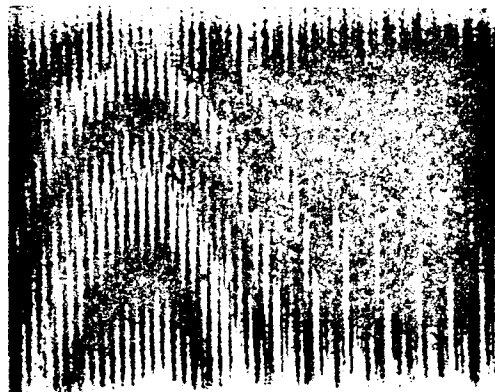


Рис. 4. Часть интерференционной картины (с наложением двух независимых структур), полученной с помощью ВВВ-интерферометра с $\varphi = 10^\circ$ в направлении О-пучка; $\lambda = 1,5404 \text{ \AA}$, $(hkl) = (220)$, $t = 500 \text{ мкм}$. Размер поля рефлекса $\approx 5 \times 4 \text{ мм}^2$. Контраст встроенных линий более 50%.

здесь обсудим только вариант асимметричности (а). На рис. 4 представлена интерференционная картина, полученная с помощью такого ВВВ-интерферометра.

Здесь видно наложение двух независимых некогерентных структур. Одна система линий представляет из себя идеально параллельные полосы с дистанцией в 100 мкм. Эти параллельные к основе интерферометра полосы вызваны узкими каналами, оставленными алмазным фрезом на всех поверхностях образца при процессе вырезки кристалла. Расстояния между этими линиями, как и их ориентация остаются неизменными при внедрении

сдвига фаз между интерферирующими пучками с помощью плексигласовых клиньев. Они регистрировались и с помощью неинтерферирующих пучков при закрытии одного из каналов интерферометра. Таким образом, эти параллельные линии представляют собой амплитудный, а не фазовый контраст. Нарезы в 100 мкм на поверхности образца можно было обнаружить также с помощью оптического микроскопа.

Другая система линий является результатом интерференции между RRT и TRR пучками и представляет собой муаровую картину, которая некогерентно налагается на параллельные полосы амплитудного характера. На рисунке приведены ротационные и дилатационные муаровые полосы, которые реагировали на дополнительно вложенный фазовый сдвиг с помощью плексигласовых клиньев (4 или 5°).

Как и было предсказано теорией [1], нахождение зависящего от длины волны оптимального варианта асимметрии привело к осязательному уменьшению, примерно в четыре раза, времени экспозиции интерференционных картин по сравнению с симметричным вариантом при одинаковых контрастах снимков и других идентичных условиях. В этом аспекте использование высших гармоник, т.е. высших порядков отражений, может быть более обещающим.

Таким образом, с помощью произведенных опытов, результаты которых приведены в предыдущей [4] и настоящей работах, было показано, что высококачественные симметричные и асимметричные ВВВ-интерферометры представленных конструкций могут обеспечить достаточно хороший контраст (до 70%) и стабильность расщепителя-анализатора. Эти исследования произведены в рамках разработки интерферометра Майкельсона в рентгеновском диапазоне длин волн, расширяя его область применения до длин волн 1–0,01 нм. В дальнейшем можно сконструировать ВВВ-интерферометры с поступательным движением одного из зеркал. Их применение в интерферометрах Майкельсона позволит осуществить точные измерения энергетического спектра и когерентных характеристик ондуляторов [8]. Другой возможной областью их применения может быть измерение аномальной дисперсии с помощью синхротронного излучения [9].

В заключение выражаю огромную благодарность коллегам из HASYLAB – проф. Г. Матерлику за предоставление возможности проведения опытов и руководство, В. Граеффу за ценные советы, П. Беккеру (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig) за изготовление образцов и особенно Е. Вьургесу (HASYLAB) за повседневную помощь.

Кафедра физики твердого тела

Поступила 31.08.2004

ЛИТЕРАТУРА

1. Bonse U., Hart M. – Zeitschrift f. Physik, 1966, v. 194, p. 1–17.
2. Bonse U., Graeff W. X-ray and Neutron Interferometry, Topics of Applied Physics (edited by H.-J. Queisser), Berlin: Springer-Verlag, 1977, v. 22, p. 92–143.
3. Bonse U. – Physica B, 1988, v. 151, p. 7–21.
4. Ростомян А.М. – Ученые записки ЕГУ, 2005, № 1, с. 48–52.
5. Bonse U. – Zeitschrift f. Physik, 1964, v. 177, p. 385–423.
6. Wuerges J., Rostomyan A.M., Graeff W. and Materlik G. Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB, Annual Report, Part-I, 1998, p. 997–998.
7. Rostomyan A.M., Wuerges J. and Materlik G. – VI. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie (DKG), Karlsruhe, München: R. Oldenbourg Verlag, 1998, p. 162.
8. Attwood D., Halbach K. and Kim K.-J. – Science, 1985, v. 228, p. 1265.
9. Appel A., Bonse U. – Phys. Rev. Lett., 1991, v. 67, № 3, p. 1673–1676.

Ա. Մ. ՌՈՍՏՈՄՅԱՆ

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ԱՄԻՍԵՏՐԻԿ ԲՅՅ-ԻՆՏԵՐՖԵՐՈՄԵՏՐՈՒ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ա մ փ ո փ ո մ

Գիտարկված են փնջի անդրադարձման բրեզյան երկրաչափությամբ ռենտգենյան ամիսետրիկ ինտերֆերոմետրերի տարբերակներ: Փնջի տրոհիչ, անդրադարձնող հայելիներ և անալիզատոր ունեցող այս ինտերֆերոմետ-

րերը պատրաստված են Si-ի մոնոքրյուրեղից: Տեսականորեն հաշվարկվել և փորձնականորեն իրականացվել են օպտիմալ անդրադարձման ասիմետրիկություն ունեցող BBB-ինտերֆերոմետրերի տարբերակներ:

A. M. ROSTOMYAN

INVESTIGATIONS OF X-RAY ASYMMETRIC BBB-INTERFEROMETERS

Summary

Different versions of X-ray asymmetric interferometers with Bragg reflections are investigated. These interferometers with beam splitter, reflecting mirrors and analyzer are constructed from monolithic Si-crystal. Versions of BBB interferometers with optimal asymmetry are calculated and experimentally tested.