

УДК 539.22.082.79

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ ДВУХБЛОЧНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕДИФРАГИРУЮЩЕЙ ЗОНОЙ

© 2022 г. Г. Р. Дрмеян^{a, b, *}

^aИнститут прикладных проблем физики НАН РА,
Ереван, 0014 Республика Армения

^bШиракский государственный университет им. М. Налбандяна,
Гюмри, область Ширак, 3126 Республика Армения

*e-mail: drm-henrik@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2021 г.

После доработки 25.01.2022 г.

Принята к публикации 28.01.2022 г.

Экспериментально исследованы структуры полос смещения, полученных от двухблочных кристаллических систем с недифрагирующей зоной, в зависимости как от толщины и формы их блоков, так и от ширины и ориентации недифрагирующей зоны. Показано, что период полос смещения прямо пропорционален сумме толщин блоков. Выявлена связь между периодом полос смещения и шириной недифрагирующей зоны. Показано, что, когда блоки достаточно близки друг к другу и один из них или оба толстые, наблюдается тонкая структура интерференционной картины — линии смещения, а когда оба блока тонкие, она не наблюдается. Увеличение ширины недифрагирующей зоны также резко уменьшает период полос смещения. Предложен метод увеличения разрешения рентгенодифракционных картин, полученных в двухблочных кристаллических системах.

Ключевые слова: тонкая структура, двухблочная система, интерференционная картина, недифрагирующая зона.

DOI: 10.31857/S1028096022080064

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–4], что рентгеновские интерференционные картины возникают не только из-за различия ориентаций и расстояний между отражающими плоскостями, но и из-за других фазовых сдвигов интерферирующих волн, возникающих при дифракции.

Так как при отступлении от идеальной конструкции многоблочного интерферометра или при наличии воздушного зазора (недифрагирующей зоны) между блоками двухблочного интерферометра пучки, налагающиеся на входной поверхности последнего блока интерферометра, смещаются друг относительно друга, между ними возникают разности фаз. Следовательно, возникает периодическое распределение интенсивности суммарной волны, т.е. формируется интерференционная картина. Также интерференционные картины могут формироваться в результате смещения дифрагированных пучков на поверхности входа последнего блока. Такие картины можно

называть картинами смещения (линиями или полосами смещения). Получается, что возникновение полос смещения в двухблочных интерферометрах почти неизбежно: даже в идеальных двухблочных интерферометрах происходит смещение налагающихся волн друг относительно друга; следовательно, и образуются полосы смещения. Возникает естественный вопрос: почему в интерференционных картинах двухблочных интерферометров полосы смещений наблюдаются не всегда? Наши опыты показывают, что в случае двухблочного интерферометра полосы смещения возникают при достаточно малых межблочных расстояниях независимо от толщин блоков.

Таким образом, рентгеновские дифракционные методы, которые широко применяются при выявлении структурных несовершенств кристаллических материалов, имеют ограниченные возможности из-за недостаточности разрешения: в частности, невозможно выявить тонкую структуру рентгенодифракционных картин, получен-

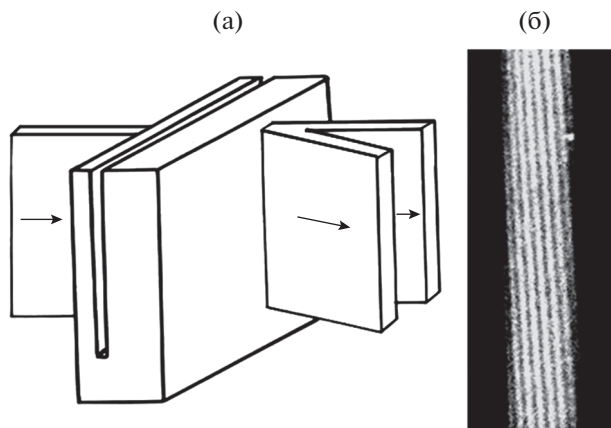


Рис. 1. Двухблочная система, состоящая из тонкого и толстого блоков в форме параллелепипедов (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

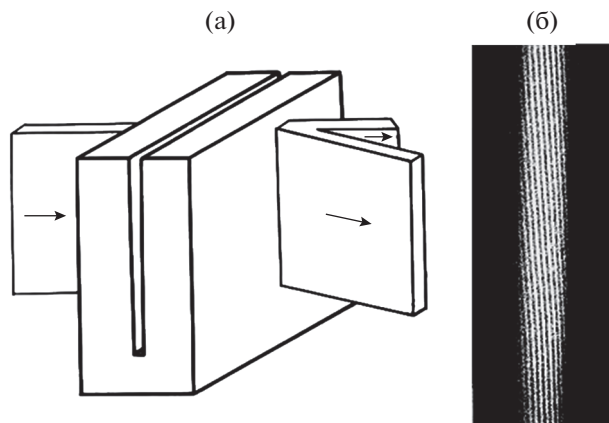


Рис. 2. Двухблочная система, состоящая из блоков в форме параллелепипедов (оба блока толстые) (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

ных от двухблочных кристаллических систем с недифрагирующей зоной. Двухблочные интерферометры не нашли широкого применения, хотя, на наш взгляд, они более перспективны, так как однозначная расшифровка интерференционных картин, полученных от них — задача более простая, чем расшифровка картин трехблочных интерферометров. Поэтому исследование рентгенодифракционных изображений, полученных от несовершенств в кристаллах, является актуальной задачей как для физики конденсированных сред, так и для производства полупроводниковых приборов.

Обычно интерференционную картину получают с использованием трехблочной кристаллической системы [5–7]. Для получения интерференционной картины можно пользоваться другими схемами, но, как правило, в этих схемах почти всегда число блоков бывает больше двух [8, 9]. Однако оказывается, что интерференционную картину можно получить и с помощью двух кристаллических блоков, если только пользоваться достаточно широкими падающими пучками и расстояние между этими блоками сделать достаточно малыми, с таким расчетом, чтобы пучки, полученные в результате расщепления первичного пучка в первом блоке, налагались бы друг на друга во втором блоке.

Двухблочными интерферометрами пользовались разные авторы [10–17], применяя их для решения разных задач: в частности, исследована зависимость интерференционной картины, полученной в двухблочном интерферометре, от характера первичного излучения. Однако, так как авторам этих работ не был известен метод увеличения разрешения интерференционных картин [18],

они не смогли наблюдать линии смещения, полученные от двухблочных систем, блоки которых сравнительно тонки. Более того, авторы этих работ ограничились исследованием только двухблочных систем, состоящих из достаточно толстых кристаллических пластин в форме параллелепипедов, а двухблочные системы, состоящие из тонких блоков в форме параллелепипедов и комбинаций кристаллических блоков других форм (клин и пластинка), ими не исследованы.

В работе экспериментально исследованы двухблочные системы в широком диапазоне изменений толщин блоков и расстояний между ними. Рассмотрены пластинчатые, клинообразные и трапецевидные блоки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование начнем с интерференционных картин, полученных от двухблочных кристаллических систем с недифрагирующей зоной. Для исследования вопросов образования интерференционных картин были изготовлены и опробованы двухблочные кристаллические системы, показанные на рис. 1–7. Во всех этих двухблочных системах блоки расположены так близко друг к другу, что волны, дифрагировавшие в направлении прохождения и отражения в первом блоке, налагаются друг на друга у входа во второй блок.

Для исследования структуры полос смещения в зависимости от толщины и формы кристаллических блоков двухблочной системы были изготовлены и опробованы следующие образцы:

1. Двухблочная система, состоящая из тонкого ($Z_1 = 0.7$ мм) и толстого ($Z_2 = 3.1$ мм) блоков в форме параллелепипедов (рис. 1а). На рис. 1б

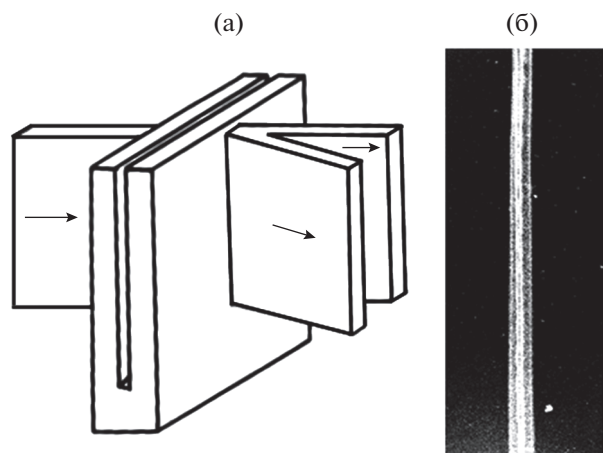


Рис. 3. Двухблочная система, состоящая из блоков в форме параллелепипедов (оба блока тонкие) (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

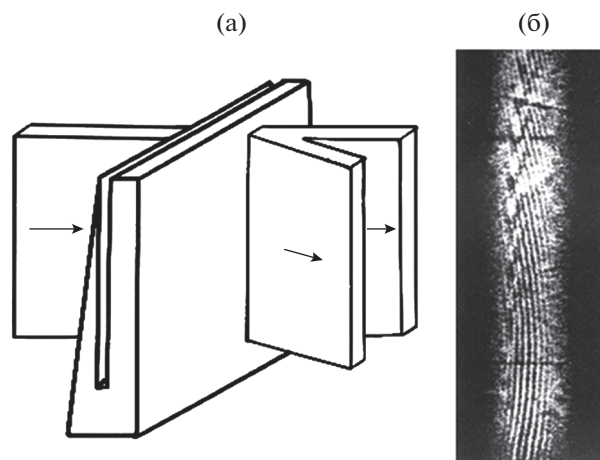


Рис. 4. Двухблочная система, состоящая из толстого блока в форме параллелепипеда и клинообразного блока (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

приведена интерференционная картина, полученная от этой системы.

2. Двухблочная система, состоящая из блоков в форме параллелепипедов (оба блока толстые: $Z_1 = 2.4$ мм, $Z_2 = 2.8$ мм) (рис. 2а). На рис. 2б приведена интерференционная картина, полученная от этой системы.

3. Двухблочная система, состоящая из блоков в форме параллелепипедов (оба блока тонкие: $Z_1 = 0.8$ мм, $Z_2 = 0.7$ мм) (рис. 3а). На рис. 3б приведена интерференционная картина, полученная от этой системы.

4. Двухблочная система, состоящая из толстого ($Z_2 = 3.4$ мм) блока в форме параллелепипеда и клинообразного блока (толщина нижней части клина $Z_1 = 2.4$ мм) (рис. 4а). На рис. 4б приведена интерференционная картина, полученная от этой системы.

5. Двухблочная система, состоящая из одного клинообразного блока (толщина нижней части $Z_1 = 1.4$ мм) и второго тонкого блока в форме параллелепипеда ($Z_2 = 0.82$ мм) (рис. 5а). На рис. 5б приведена интерференционная картина, полученная от этой системы.

6. Кристаллическая система, состоящая из двух толстых блоков, один из которых имеет вид параллелепипеда ($Z_1 = 2.6$ мм), а у другого нижняя часть толще ($Z'_2 = 2.9$ мм) верхней части ($Z''_2 = 2$ мм) (рис. 6а). На рис. 6б приведена интерференционная картина, полученная от этой системы. Как видно из рис. 6б, следы на топограмме тонкой части образца смещены относительно следов на топограмме толстой части в противоположные

стороны. Период полос смещения, полученных от толстой части блока, больше, чем период полос смещения, полученных от тонкой части.

7. Кристаллическая система, состоящая из двух толстых блоков, один из которых имеет вид параллелепипеда ($Z = 4.5$ мм), а другой — призмы, ее сечение по отражающим плоскостям является трапецией (в нижней части толщина $Z'_2 = 6.2$ мм, в верхней — $Z'_2 = 3.4$ мм) (рис. 7а). На рис. 7б приведен фотоснимок полос смещения, полученных от кристаллической системы, показанной на рис. 7а. Как видно из рисунка, период полос смещения по высоте уменьшается — происходит фокусировка полос, что соответствует уменьше-

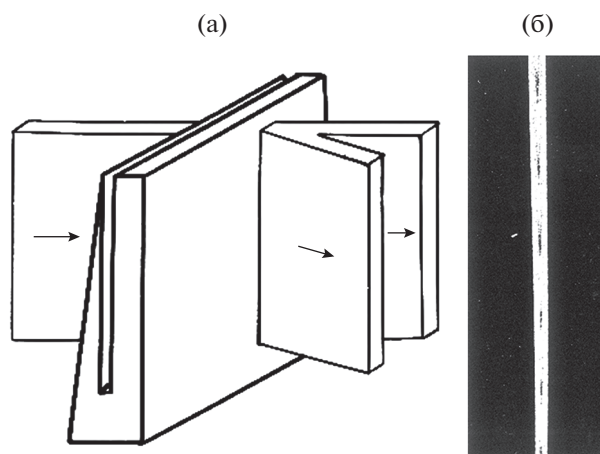


Рис. 5. Двухблочная система, состоящая из одного клинообразного блока и второго тонкого блока в форме параллелепипеда (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

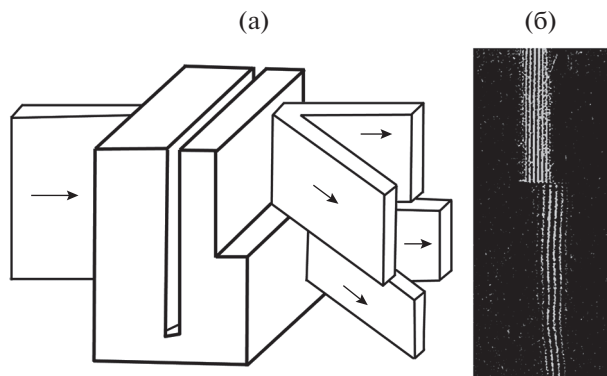


Рис. 6. Система, состоящая из двух блоков, один из которых ступенчатый (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

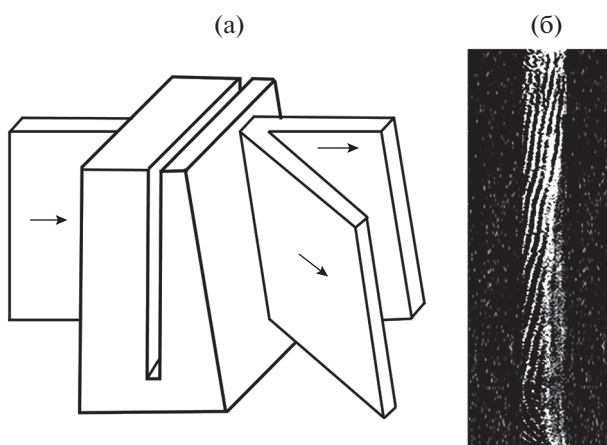


Рис. 7. Система, состоящая из двух блоков, один из которых имеет вид призмы (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

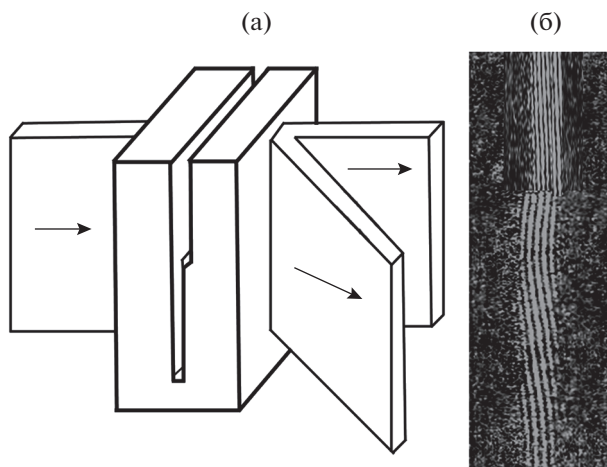


Рис. 8. Система, состоящая из двух блоков со ступенчатой недифрагирующей зоной (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

нию периода с уменьшением суммарной толщины блоков.

До сих пор мы обсуждали экспериментальные исследования структуры линий смещения в зависимости от толщины и формы блоков двухблочной системы, теперь перейдем к исследованию структуры полос смещения в зависимости от ориентации и ширины недифрагирующей зоны.

1. Кристаллическая система, состоящая из одного толстого блока в форме параллелепипеда и второго толстого, но ступенчатого блока со ступенью, направленной внутрь так, что и недифрагирующая зона ступенчатая (рис. 8). На рис. 8а, 8б показаны геометрия рентгенографического эксперимента и секционная топограмма соответственно. Толщина первого блока $Z_1 = 3.8$ мм, толщина тонкой части второго блока $Z_2' = 3.65$ мм,

толщина толстой части второго блока $Z_2'' = 3.88$ мм. Как видно из рис. 8б, период полос смещения, полученных от тонкой части второго блока, гораздо меньше периода полос, полученных от толстой части. Уменьшение периода полос смещения обусловлено двумя причинами: во-первых, суммарная толщина верхней части системы меньше суммарной толщины нижней части ($Z_1 + Z_2' < Z_1 + Z_2''$); во-вторых, в области тонкой части второго блока ширина недифрагирующей зоны ($S_1 = 360$ мкм) больше ширины ($S_2 = 230$ мкм) в области толстой части второго блока.

2. Кристаллическая система, состоящая из одного толстого блока в форме параллелепипеда $Z_1 = 5.8$ мм и другого блока, имеющего ступени с обеих сторон (рис. 9а). Ступени сделаны так, чтобы сумма толщин блоков по всей высоте была одной и той же: $Z_1 + Z_2' = Z_1 + Z_2''$, т.е. $Z_2' = Z_2'' = 3.8$ мм. Такой образец дает возможность исключить эффект толщины блоков и исследовать только зависимость периода полос смещения от ширины недифрагирующей зоны (в нижней части $S_1 = 230$ мкм, в верхней $S_2 = 390$ мкм). Как видно из рис. 9б, увеличение ширины недифрагирующей зоны резко уменьшает период полос смещения. С помощью микрофотограммы (рис. 9в) установлено, что имеет место соотношение $\Lambda_2/\Lambda_1 = S_1/S_2$ ($\Lambda_2/\Lambda_1 = 0.64$, $S_1/S_2 = 0.62$), где Λ_1 и Λ_2 — периоды полос смещения, полученных от участков, содержащих, соответственно, узкую и широкую недифрагирующие зоны.

3. Кристаллическая система, состоящая из двух призм с трапецеобразным сечением, толстая часть одной из них направлена вниз, а другой — вверх. Сумма толщин блоков по всей высоте оди-

накова: $Z_1 + Z_2 = 7.4$ мм, недифрагирующая зона составляет некоторый угол с вертикальным направлением ($\varphi = 18^\circ$). На рис. 10 показаны схема эксперимента и секционная топограмма. Как видно из рис. 10б, по всей высоте следа периоды полос смещения одинаковые. Это объясняется тем, что, во-первых, сумма толщин блоков по всей высоте постоянна, во-вторых, кристаллы толстые, и энергия течет по отражающим плоскостям, поверхность входа в первый блок и поверхность выхода из второго блока параллельны. Интересно исследовать и случай, когда недифрагирующая зона составляет угол с большими поверхностями (рис. 11а). В данном случае толщины блоков постоянны в направлении оси X , а в направлении оси Y меняются. По всей высоте образца сумма толщин блоков постоянна: $Z_1 + Z_2 = 7.65$ мм. На рис. 11 показаны схема эксперимента и секционная топограмма.

4. Кристаллическая система, состоящая из одного толстого блока в форме параллелепипеда и второго толстого клина (рис. 12а). Недифрагирующая зона этого образца клиновидная. Так как сумма толщин блоков $Z_1 + Z_2$ уменьшается по высоте, период полос смещения уменьшается — наблюдается сближение полос смещения (рис. 12б). Быстрое уменьшение периода полос смещения обусловлено, с одной стороны, уменьшением суммарной толщины блоков системы, а с другой стороны, увеличением ширины недифрагирующей зоны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментов (рис. 1–12) показывают, что расстояния между линиями смещения зависят как от расстояния между блоками, так и от их толщины. С увеличением промежутка между блоками и с уменьшением их толщин расстояние между линиями смещения уменьшается и их видимость исчезает. В частности, исследование двухблочных систем, состоящих из блоков в форме параллелепипеда, показало, что, когда блоки достаточно близко расположены друг к другу и один из них или оба толстые (рис. 1, 2, 4, 6, 9), наблюдается тонкая структура интерференционной картины — линий смещения. Когда оба блока тонкие (рис. 3, 5), тонкая структура интерференционных картин не наблюдается. Период полос смещения уменьшается с уменьшением суммарной толщины блоков. Увеличение ширины недифрагирующей зоны резко уменьшает период полос смещения. Период полос смещения прямо пропорционален сумме толщин блоков. Соотношение периодов полос смещения, полу-

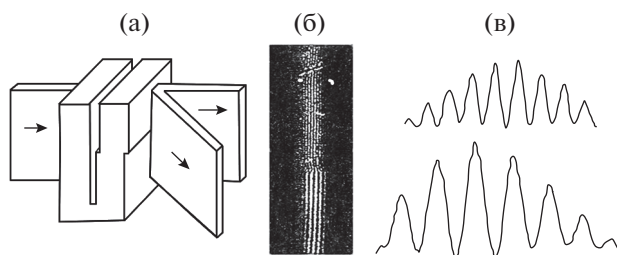


Рис. 9. Система, состоящая из двух блоков, один из которых ступенчатый с обеих сторон (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б); микрофотографии интерференционной картины (в).

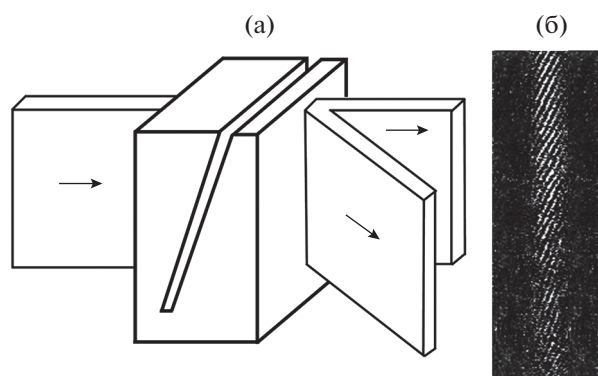


Рис. 10. Система, состоящая из двух призм с трапецеобразным сечением (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

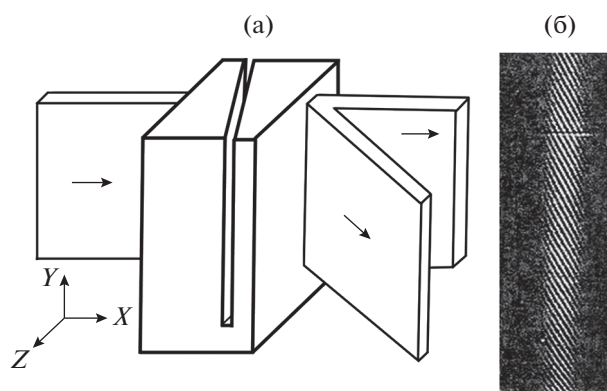


Рис. 11. Двухблочная система с косой недифрагирующей зоной (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

ченных от участков, содержащих, соответственно, узкие и широкие недифрагирующие зоны, обратно пропорционально ширине недифрагирующих зон.

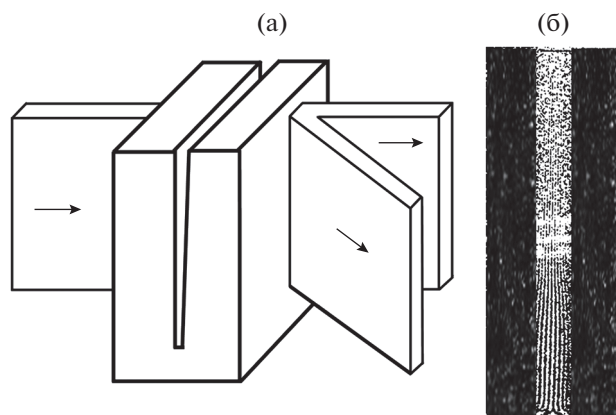


Рис. 12. Двухблочная система с клиновидной недифрагирующей зоной (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

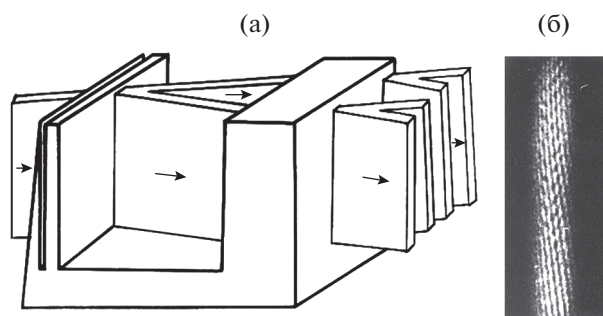


Рис. 13. Система, состоящая из тонкого блока в форме параллелепипеда, клиновидного блока и блока-увеличителя (а), и интерференционная картина, полученная от нее (б).

Исследование двухблочных систем, состоящих из одного блока в форме параллелепипеда и одного клиновидного блока, показало, что, когда параллелепипед достаточно толстый и расположен достаточно близко к клину, четко видны следы линий смещения: V-образные маятниковые полосы покрыты семейством параллельных линий смещения (рис. 4б). Когда параллелепипед тонкий, видны только V-образные полосы маятникового решения (рис. 5б). Для наблюдения тонкой структуры интерференционной картины, сформированной в системе, состоящей из тонкого блока в форме параллелепипеда и клиновидного блока, используем, предложенный в [18] метод увеличения разрешения интерференционных картин (рис. 13а). Как видно из фотоснимка интерференционной картины (рис. 13б), после прохождения через увеличитель (далеко стоящий

толстый кристаллический блок) разрешение картины сильно увеличивается, и наблюдаются параллельные линии на маятниковых полосах.

Все перечисленные интерферометры были изготовлены из монокристаллов кремния и были монолитными. В опытах пользовались отражением $2\bar{2}0$ и излучением $\text{MoK}_{\alpha 1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aladzhadzhyan G.M., Kocharyan A.K., Truni K.G. // Kristallografiya. 1979. V. 2. P. 1135 [In Russian].
2. Bushuev V.A., Ingal V.N., Beliaevskaya E.A. // Kristallografiya. 1996. V. 41. № 5. P. 808 [In Russian].
3. Bushuev V.A., Ingal V.N., Beliaevskaya E.A. // Kristallografiya. 1998. V. 43. № 4. P. 586 [In Russian].
4. Bushuev V.A., Sergeev A.A. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron, Neutron Tech. 2001. V. 16. P. 1429.
5. Bonse U., Hart M. // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 6. P. 155.
6. Bonse U., Hart M. // Z. Physik. 1965. V. 190. P. 455.
7. Eyramdzhyan F.O., Bezirganyan P.A. // Izv. Acad. Sci. Armenian SSR. Physics. 1970. V. 5. P. 453.
8. Aboyan A.H., Bezirganyan P.H., Khzardzhyan A.A. // Phys. Stat. Sol. A. 1990. V. 118. P. 21.
9. Drmeyer H.R., Melkonyan A.H., Knyazyan Z.H. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron, Neutron Tech. 2017. V. 11. № 5. P. 1089.
10. Authier A., Miln A.D., Sauvage M. // Phys. Stat. Sol. 1968. V. 26. P. 469.
11. Hart M., Milne A.D. // Acta Crystallogr. A. 1970. V. 26. P. 223.
12. Hashizume H., Ishida H., Kohra K. // Phys. Stat. Sol. A. 1972. V. 12. P. 453.
13. Bonse U., te Kaat E. // Z. Physik. 1968. V. 214. P. 16.
14. Bonse U., te Kaat E., Spieker P. // Precision Lattice Parameter Measurement by X-Ray Interferometry, in Precision Measurement and Fundamental Constants, Ed. by D.N. Langenberg and B.N. Taylor, NBS Special Publication 343, Gaithersburg, 1971, P. 291.
15. Becker P., Bonse U. // J. Appl. Crystallogr. 1974. V. 7. P. 593.
16. Drmeyer H.R. // Acta Crystallogr. A. 2004. V. 60. P. 521.
17. Drmeyer H.R. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron, Neutron Tech. 2019. V. 13. P. 508.
18. Drmeyer H.R., Margaryan H.G. // Proc. Int. Conf. on Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering under the External Influences, Part I, Yerevan–Meghri, Armenia, 2019, P. 193.

Experimental Investigation of Fine Structure of X-Ray Diffraction Patterns Obtained from Double-Blocked Crystal Systems with a None-Diffraction Zone

H. R. Drmeyan^{1, 2, *}

¹*Institute of Applied Problems of Physics NAS RA, Yerevan, 0014 Republic of Armenia*

²*Shirak State University after M. Nalbandyan, Gyumri, 3126 Republic of Armenia*

**e-mail: drm-henrik@mail.ru*

The structures of shift fringes obtained from double-block crystal systems with a non-diffracting zone are experimentally studied, depending both on the thickness and shape of their blocks, and on the width and orientation of the non-diffracting zone. The period of the shift fringes is shown to be directly proportional to the sum of the block thicknesses. A relationship is revealed between the period of the shift fringes and the width of the non-diffracting zone. It is shown that when the blocks are close enough to each other and one or both of them are thick, a fine structure of the interference pattern is observed — shift lines; and when both blocks are thin, it is not observed. Increasing the width of the non-diffracting zone sharply reduces the period of the shift fringes. A method is proposed for increasing the resolution of X-ray diffraction patterns obtained in double-block crystal systems.

Keywords: fine structure, two-block system, interference pattern, non-diffracting zone.