

УДК 548.732

РЕНТГЕНОВСКИЙ ФАЗОВЫЙ КОНТРАСТ ПРИ ДИФРАКЦИОННОЙ ФОКУСИРОВКЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В СВЕРХРЕШЕТКЕ С МАЛЫМ ПЕРИОДОМ

Л.В. ЛЕВОНЯН, А.М. МАНУКЯН*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: hasmikm@ysu.am

(Поступила в редакцию 27 октября 2017 г.)

Исследована возможность восстановления внутренней структуры одномерных фазовых объектов при дифракционной фокусировке рентгеновской сферической волны. В качестве кристалла-анализатора используется сильно-поглощающая клиновидная сверхрешетка с малым периодом и с ребром, параллельным вектору дифракции, при симметричной геометрии Лауэ. Показано, что без дополнительного перемещения фазового объекта вдоль направления вектора дифракции можно привести в условие фокусировки разные сателлиты. Регистрируя всю карту полученных данных, можно восстановить приобретенную в фазовом объекте добавочную фазу волны.

Изучение внутренней структуры слабопоглощающих некристаллических веществ, а также биологических объектов, проводится методом рентгеновского фазового контраста, который в настоящее время бурно развивается [1]. Задачей рентгеновского фазового контраста является не только получение изображения фазового объекта (ФО), но и его расшифровка, т. е. решение обратной задачи [2, 3].

Как известно, при падении на кристалл монохроматической сферической рентгеновской волны при геометрии Лауэ дифрагированное излучение фокусируется как внутри кристалла, так и за кристаллом – в вакууме [4–7].

Пусть перед входом в кристалл излучение от точечного источника S , находящегося на расстоянии L от кристалла, проходит через ФО, в котором неоднородности распределены одномерно (рис.1). Предполагается, что ФО слабопоглощающий, т. е. интенсивность пучка при прохождении через него практически не меняется, изменяется лишь его фаза. Координатная система выбрана следующим образом: начало координат O на поверхности кристалла есть точка падения луча под точным брэгговским углом θ_B , входная поверхность кристалла совпадает с плоскостью $z = 0$, а отражающие плоскости соот-

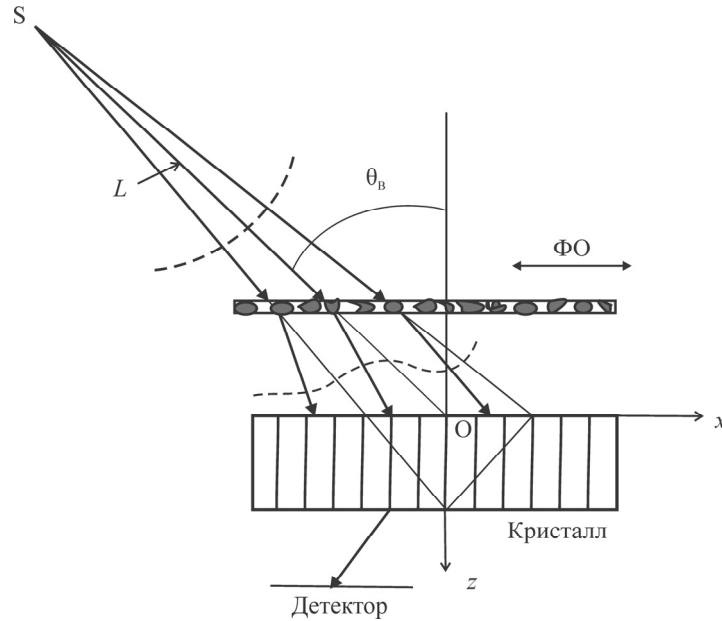


Рис.1. Схема дифракции. Пунктирными линиями изображен волновой фронт до и после ФО.

ветствуют плоскостям $x = \text{const}$, ось y перпендикулярна плоскости рассеяния.

Поскольку падающее на кристалл излучение при отсутствии ФО имеет всевозможные направления вблизи угла Брэгга, то оно фокусируется на определенной глубине внутри кристалла в зависимости от расстояния L источник–кристалл.

При прохождении через ФО условия фокусировки нарушаются, поскольку в результате рефракции на неоднородностях лучи меняют свои направления и волновой фронт деформируется. Изменение направления лучей математически описывается наличием в фазе волны члена $\varphi'(x)$, а деформирование фронта – $\varphi''(x)$, где $\varphi'(x)$ и $\varphi''(x)$ – соответственно первая и вторая производные добавочной фазовой функции $\varphi(x)$ волны, приобретенной при прохождении через ФО:

$$\varphi'(x) = (2\pi/\lambda) \Delta\theta(x).$$

Здесь $\Delta\theta(x)$ – локальное угловое смещение падающего излучения, обусловленное рефракцией на неоднородностях ФО, $\varphi''(x)$ связано с локальным изменением кривизны волнового фронта из-за рефракции в ФО и λ – длина волны излучения.

В работах [8–10] сообщалось о возможности восстановления внутренней структуры одномерных ФО при дифракционной фокусировке рентгеновской сферической волны. С этой целью в качестве кристалла-анализатора предлагалось использовать сильнопоглощающий клиновидный кристалл с ребром,

параллельным вектору дифракции, при симметричной геометрии Лауэ. При этом для каждого отдельного участка ФО для обеспечения условий фокусировки требовалось добавочное перемещение ФО вдоль направления вектора дифракции с целью компенсации величины $\Delta\theta(x)$, в то время как компенсация локального изменения кривизны волнового фронта из-за рефракции получалась на определенной координате y , т. е. в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, без дополнительного перемещения ФО.

В настоящей работе для восстановления внутренней структуры ФО в качестве кристалла-анализатора предлагается использовать сильнопоглощающую клиновидную сверхрешетку с малым периодом и с ребром, параллельным вектору дифракции, при симметричной геометрии Лауэ.

Характерной особенностью дифракции рентгеновских лучей на сверхрешетках или модулированных структурах является наличие сателлитов вокруг основного дифракционного максимума, положение которого определяется усредненным по периоду сверхрешетки параметром решетки. При $z_0 \ll \bar{\Lambda}$ (z_0 – период сверхрешетки и $\bar{\Lambda}$ – усредненная по периоду сверхрешетки экстинкционная длина кристалла) дифракционная картина представляет собой систему неперекрывающихся сателлитов, угловое расстояние между которыми обратно

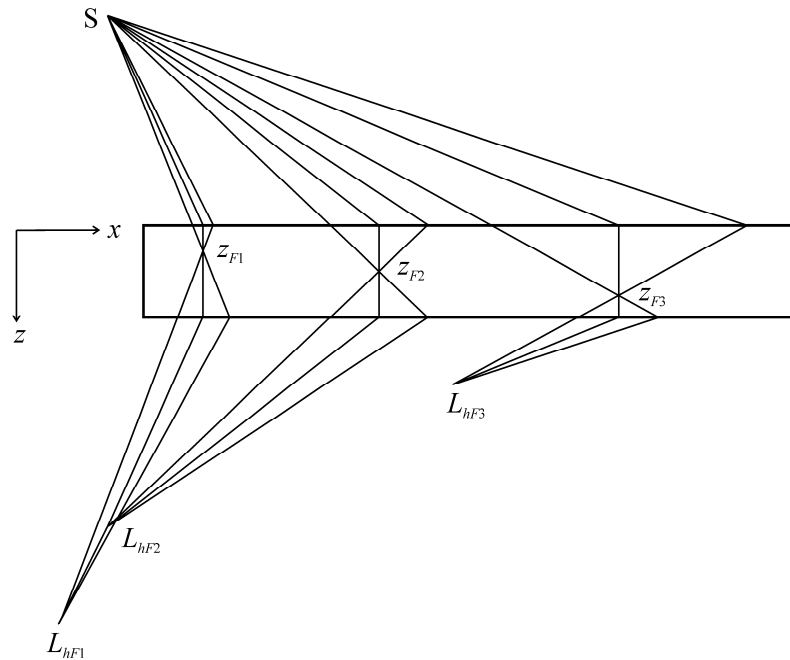


Рис.2. Геометрия дифракционной фокусировки сателлитов с разными структурными факторами: z_{F1} , z_{F2} , z_{F3} – глубины фокусных расстояний сателлитов внутри кристалла, L_{hF1} , L_{hF2} , L_{hF3} – фокусные расстояния соответствующих сателлитов вне кристалла.

пропорционально периоду сверхрешетки, а их ширины и интенсивности зависят от реальной структуры и толщины сверхрешетки [11, 12].

При использовании сверхрешетки в качестве кристалла-анализатора условие $z_0 \ll \bar{\Lambda}$ можно ослабить настолько, чтобы неперекрывающиеся дифракционные сателлиты располагались как можно ближе друг к другу.

Как показано в работах [13–15], при динамической дифракции сферической рентгеновской волны на сверхрешетке с малым периодом в зависимости от структурных факторов сверхрешетки, значения которых зависят от выбранной модели, происходит фокусировка сателлитов как на разной глубине внутри кристалла, так и на разном расстоянии от кристалла – в вакууме (рис.2). При этом фокусная глубина сателлита в кристалле прямо пропорциональна его структурному фактору, так что измерение фокусных расстояний разных сателлитов может стать основой метода определения структурных факторов сверхрешетки, что в итоге дает возможность уточнить, какая из моделей реализуется в действительности.

Если в описанной выше схеме с монокристаллом-анализатором (рис.1) монокристалл заменить на сверхрешетку, то проходящее излучение от каждого отдельного участка ФО изменит свое направление и будет фокусироваться как отдельный сателлит. Предполагается, что характеристики сверхрешетки полностью известны (угловое распределение сателлитов, их угловые ширины и интенсивности, а также фокусные расстояния). Регистрируя всю карту полученных данных, можно восстановить приобретенную в ФО добавочную фазу волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Лидер, М.В. Ковальчук. Кристаллография, **58**, 764 (2013).
2. В.А. Бушуев, А.А. Сергеев. Письма в ЖТФ, **25**, 1 (1999).
3. A.V. Bronnikov. Optics Communications, **171**, 239 (1999).
4. А.М. Афанасьев, В.Г. Кон. ФТТ, **19**, 1775 (1977).
5. V.V. Aristov, V.I. Polovinkina, A.M. Afanas'ev, V.G. Kohn. Acta Cryst., **A36**, 1002 (1980).
6. Л.В. Левонян. Письма в ЖТФ, **7**, 269 (1981).
7. L.V. Levonian. Phys. Stat. Sol. (a), **68**, k199 (1981).
8. Л.В. Левонян. Материалы совещания «Рентгеновская оптика – 2004». Н. Новгород, ИФМ РАН, 277–279, 2004.
9. Л.В. Левонян. Нано- и микросистемная техника, № 9, 18 (2005).
10. L.V. Levonian. Acta Cryst., **A62**, 254 (2006).
11. D.M. Vardanyan, H.M. Manoukian, H.M. Petrosyan. Acta Cryst., **A41**, 212 (1985).
12. D.M. Vardanyan, H.M. Manoukian, H.M. Petrosyan. Acta Cryst., **A41**, 218 (1985).
13. Л.В. Левонян, А.М. Манукян. Известия НАН Армении, Физика, **51**, 95 (2016).

14. **L.V. Levonyan, H.M. Manukyan.** Proceedings Intern. Conf. Electron, Positron, Neutron and X-Ray Scattering under the External Influences, 14–16 September 2015, Yerevan–Megri, Armenia, 101 (2016).
15. **L.V. Levonyan, H.M. Manukyan.** Proceedings of the Yerevan State University, Physical and Mathematical Sciences, **51**, 113 (2017).

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՓՈԻԼԱՅԻՆ ՑԱՅՏՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ ՓՈՔԸ ՊԱՐԲԵՐՈՒԹՅԱՄԲ
ԳԵՐՑԱՆՑՈՒՄ ԳՆԴԱՅԻՆ ԱԼԻՔԻ ԴԻՖՐԱԿՏԱՅԻՆ ԿԻՉԱԿԵՏՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Լ.Վ. ԼԵՎՈՆՅԱՆ, Հ.Մ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

Հետազոտված է միաչափ փուլային օբյեկտների ներքին կառուցվածքի վերականգնման հնարավորությունը ռենտգենյան գնդային ալիքի դինամիկական դիֆրակտային կիզակետման դեպքում: Որպես բյուրեղ-վերլուծիչ կիրառված է փոքր պարբերությամբ ուժեղ կլանող սեպաձև գերցանց, որի կողը զուգահեռ է դիֆրակցիայի վեկտորին, Լաուեի համաչափ երկրաչափության դեպքում: Ցույց է տրված, որ փուլային օբյեկտն առանց դիֆրակցիայի վեկտորի ուղղությամբ լրացուցիչ տեղաշարժի, կարելի է կիզակետել տարբեր սատելիտներ: Գրանցելով ստացված տվյալների ամբողջ քարտեզը՝ կարելի է վերականգնել փուլային օբյեկտում ալիքի ձեռք բերած լրացուցիչ փուլը:

X-RAY PHASE CONTRAST AT THE DIFFRACTION FOCUSING OF SPHERICAL WAVE ON A SUPERLATTICE WITH SHORT PERIOD

L.V. LEVONYAN, H.M. MANUKYAN

The possibility of reconstructing the internal structure of the one-dimensional phase objects at the diffraction focusing of the X-ray spherical wave is investigated. As a crystal analyzer, a strongly absorbing wedge-shaped superlattice with short period and rib parallel to the diffraction vector is used for symmetric Laue geometry. It is shown that without additional moving the phase object along the direction of the diffraction vector, it is possible to bring into the focusing condition different satellites. By registering the entire map of the obtained data, it is possible to restore the additional wave phase acquired in the phase object.