

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 1

12 января 1988 г.

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЯ БРЭГГ-ФРЕНЕЛЕВСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗОЙ

А р и с т о в В.В., Б а с о в Ю.А., К у л и п а н о в Г.Н.,
П и н д ю р и н В.Ф., С н и г и р е в А.А.,
С о к о л о в А.С.

Слабое взаимодействие жесткого рентгеновского излучения с веществом (показатель преломления близок к единице) исключает создание преломляющих рентгенооптических элементов по аналогии с оптикой видимого света. Однако в ряде теоретических и экспериментальных работ показана возможность использования дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке для когерентного сжатия волнового фронта [1-6]. Было использовано свойство динамической Лауэ-дифракции на совершенных кристаллах, когда показатель преломления вблизи точного значения брэгговского угла претерпевает сильную дисперсию.

Используя эффект динамической фокусировки, в работах [7-9] были предприняты попытки передачи изображения в рентгеновских лучах. Практическое применение предлагаемых схем ограничено малой угловой апертурой ($\Delta\theta \sim 10^{-4} - 10^{-5}$) линз, низкой светосилой, кроме того, значительные хроматические аберрации требуют использование предварительно монохроматизированного пучка [9].

В этой связи наибольший интерес для решения задачи передачи изображения представляет недавно предложенная и реализованная идея создания рентгенооптических элементов, как синтез брэгговской дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке с френелевской дифракцией на искусственной структуре [10-11]. При этом представляется возможность создать эффективные фокусирующие рентгеновские элементы со структурой трехмерных зон Френеля - Брэгг-френелевской оптики. Первым простым шагом эксперименталь-

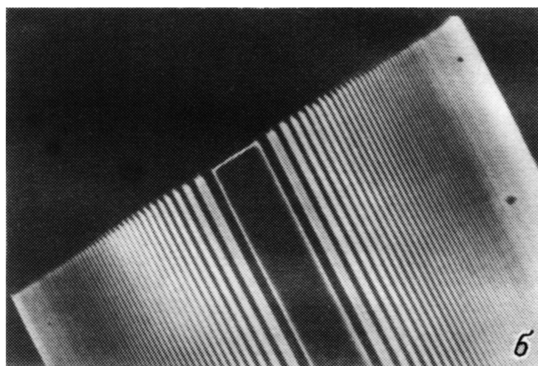
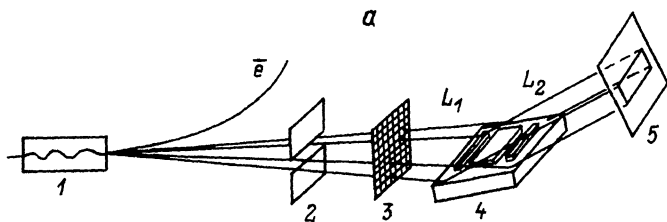


Рис. 1. а) Схема эксперимента: 1 – ондулятор, 2 – щель, 3 – никелевая сетка, 4 – линза, 5 – плоскость изображения сетки.
б) Брэгг-френелевская линза.

ной реализации брэгг-френелевской линзы явилось создание профиля на монокристалле кремния по закону одномерных зон Френеля, размеры которых r_n могут быть выражены формулой

$$(r_n \sin \theta_B)^2 = n f \lambda,$$

где n – номер зоны, f – фокусное расстояние, θ_B – брэгговский угол, λ – длина волны излучения. Угловая апертура такой линзы может существенно превышать угловую ширину отражения совершенного кристалла. Разрешение БФЛ определяется размером последней зоны. Существенным преимуществом БФЛ по сравнению как с предложенными ранее фокусирующими элементами на основе динамической дифракции по Дауэ, так и с обычной френелевской оптикой является практическое отсутствие хроматических aberrаций, возможность получения угловой апертуры до 10^{-1} рад и достижения разрешения 1–10 нм.

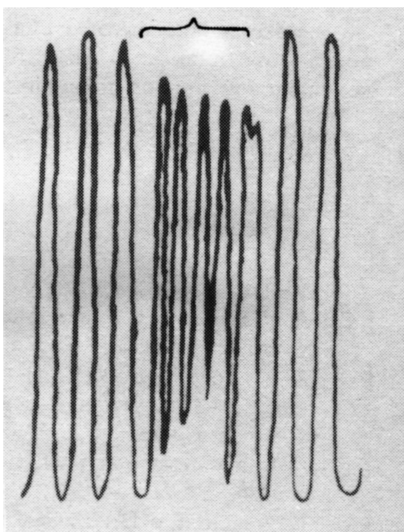
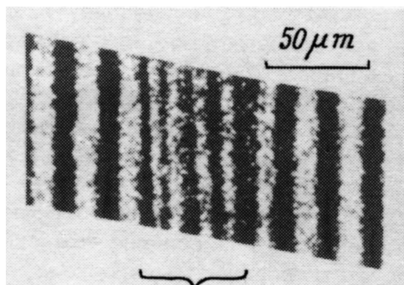
Целью настоящей работы является демонстрация возможности передачи изображения с помощью БФЛ в полихроматическом рентгеновском излучении.

Рис. 2. Экспериментальные топограмма и денситограмма изображения сетки.

Эксперименты выполнялись на пучке синхротронного излучения из сверхпроводящей „змейки“, установленной на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М 12 (Новосибирск, Институт ядерной физики СО АН СССР). При типичных условиях съемок энергия электронов в накопителе составляла ≈ 630 МэВ, максимальное магнитное поле на оси „змейки“ – 71 кГс, электронный ток в накопителе – 30 мА. Поперечные размеры электронного пучка в эмейке (размеры источника излучения) составили 60×800 мкм. Пучок СИ выпускался из вакуумной камеры накопителя через бериллиевые окна (суммарная толщина Be 200 мкм), которые обрезали длинноволновую часть спектра.

В качестве БФЛ использовалась линейная зонная пластинка Френеля, изготовленная в виде профиля на поверхности (Ш) совершенного монокристалла Si (рис. 1, б). Основные геометрические параметры БФЛ составили: ширина центральной зоны 20 мкм, крайней – 0.5 мкм; полная ширина линзы – 200 мкм; длина – 1 мм; высота зон – 3 мкм. Схема эксперимента передачи изображения приведена на рис. 1, а. Расстояние от точки излучения до зонной пластинки составляло 5 м.

Использовалось отражение (Ш) для длины волны 1.7 \AA . В этом случае фокусное расстояние линзы равнялось 5 см^1 . В качестве объекта была взята сетка из никеля толщиной 7 мкм и периодом 20 мкм, которая была установлена на расстоянии 15 см от линзы, а изображение фиксировалось на фотопластинку, расположенную в 7.5 см за линзой. Таким образом, согласно формуле линзы $\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{f}$, такая геометрия эксперимента обеспечивала двухкратное уменьшение изображения объекта.



¹ Изготовленная нами линза позволяла получать разрешение порядка 0.5 мкм и давала дифракционную эффективность не менее 2%.

На рис. 2 приведена топограмма изображения сетки переданное кристаллом с БФЛ, и соответствующая ему денситограмма. Хорошо видно, что в области монокристалла, где нет зонного профиля, изображение сетки передается 1:1. В области зонной пластинки (проекция ее апертуры составляет 70 мкм и показана на рисунке скобкой) изображение сетки уменьшается в два раза.

Таким образом, в работе впервые продемонстрирована передача изображения с помощью Брэгг-френелевской линзы в жестком рентгеновском излучении, что открывает реальную возможность создания рентгеновского микроскопа на основе элементов Брэгг-френелевской оптики.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность сотрудникам ВЭПП-2М за обеспечение устойчивости работы комплекса в период проведения экспериментов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Инденбом В.Л., Слободецкий И.Ш., Труни К.Г. - ЖЭТФ, 1974, т. 66, № 3, с. 1110-1120.
- [2] Суворов Э.В., Половинкина В.И. - Письма в ЖЭТФ, 1974, т. 20, № 5, с. 326-329.
- [3] Афанасьев А.М., Кон В.Г. - ФТТ, 1977, т. 19, № 6, с. 1775-1783.
- [4] Аристов В.В., Половинкина В.И., Шмытско И.М., Шулаков Е.В. - Письма в ЖЭТФ, 1978, т. 28, № 1, с. 6-9.
- [5] Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н. - Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 23, № 7, с. 385-388.
- [6] Кушнир В.И., Суворов Э.В. - Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 32, № 9, с. 551-554.
- [7] Инденбом В.Л., Аладжаджан А.Г. - ДАН СССР, 1976, т. 227, № 4, с. 828-829.
- [8] Суворов Э.В., Инденбом В.Л., Мухин К.Ю. - Материалы 1У Совещания по динамическим эффектам рассеяния рентгеновских лучей и электронов. Л., 1977, с. 9-11.
- [9] Кушнир В.И., Суворов Э.В. - ФТТ, 1982, т. 24, № 6, с. 1606-1611.
- [10] Aristov V.V., Snigirev A.A., Basov Yu.A., Nikulin A.Yu. - AIP. Conf. Proc., 1986, N146, ser. 7, p. 253-259.
- [11] Аристов В.В., Басов Ю.А., Снигирев А.А. - Письма в ЖЭТФ, т. 13, в. 2, с. 114-118.
- [12] Глускин Е.С., Ильинский П.П., Кезерашвили Г.Я., Кулипанов Г.Н., Пиндюрин В.Ф., Скринский А.И., Соколов А.С. - Препринт 83-145, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск.