

УДК 548.732

МОДУЛЯЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ МОДУЛЯЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

М.К. БАЛЯН, Л.А. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 14 февраля 2005 г.)

Рассмотрена возможность пространственной модуляции рентгеновского пучка с помощью деформации решетки кристалла, вызванной наличием пленок на его поверхности. Количественные результаты получены численным решением уравнений динамической дифракции и использованием линейной теории упругости для описания деформаций.

1. Введение

Пространственная модуляция рентгеновского излучения важна, в частности, для фокусировки жесткого рентгеновского излучения по принципу френелевских зонных пластинок [1,2]. Наряду с существующими методами, представляется интересным с этой целью исследовать возможность модуляции рентгеновского пучка на основе модуляции кристаллической решетки кристалла системой пленок, насажденных на его поверхности.

В данной работе предложен метод модуляции рентгеновского пучка на основе создания специального элемента, состоящего из пары близко расположенных на поверхности кристалла пленок, создающих деформации противоположного знака в кристалле.

2. Дифракция от кристалла с одной пленкой на поверхности

Пусть на выходной поверхности кристаллической пластинки кремния толщиной T насаждена пленка, края которой перпендикулярны плоскости дифракции. Ширина пленки $2l = 2$ мкм, толщина $t = 0,2$ мкм (рис.1а). Плоская, монохроматическая, σ -поляризованная рентгеновская волна единичной амплитуды $\text{MoK}\alpha_1$ излучения ($\lambda = 0,708$ Э) падает на входную поверхность пластины, ориентированной под точным углом Брэгга, и дифрагирует на системе атомных плоскостей (220), перпендикулярных входной поверхности. Внутри кристалла проходящая волна с амплитудой E_0 и дифрагированная волна с амплитудой E_h удовлетворяют уравнениям Такаги [3]. В эти уравнения входит x -компонента вектора смещения $\mathbf{u}$ атомов кристаллической решетки, вызванного присутствием пленки. Согласно линейной теории упругости u_x дается выражением [4]

$$u_x = S(AB - C) \ln \frac{(x+l)^2 + (z-T)^2}{(x-l)^2 + (z-T)^2} + 2SA \left[\frac{(x-l)^2}{(x-l)^2 + (z-T)^2} - \frac{(x+l)^2}{(x+l)^2 + (z-T)^2} \right]. \quad (1)$$

Здесь $S = \sigma t$ – сила на единицу длины, σ – напряжение, $A = (1+\nu)/2\pi E$, $B = 3-4\nu$, $C = (1+\nu)(1-2\nu)/2\pi E$, ν – коэффициент Пуассона кристаллической пластины, E – модуль Юнга. В случае пленки окиси кремния толщиной $t = 1$ мкм на кремниевой подложке получается $S = -3 \cdot 10^2$ Н/м [4]. Численно решив уравнения дифракции для толщины пластины $T = 5\Lambda = 183$ мкм (Λ – экстинкционная длина), получаем распределение интенсивности дифрагированного пучка на выходной поверхности (рис.1б). Толщина кристаллической пластинки специально выбрана кратной экстинкционной длине, чтобы интенсивность дифрагированной волны, соответствующей недеформированным областям выходной поверхности кристалла, была по возможности малой. Кривая интенсивности имеет два максимума вдали от краев пленки, в центре изображения имеется минимум. Расстояние между максимумами – 12 мкм, полуширина максимумов ~ 10 мкм. Таким образом, пленка шириной 2 мкм дает изображение шириной более чем 12 мкм.

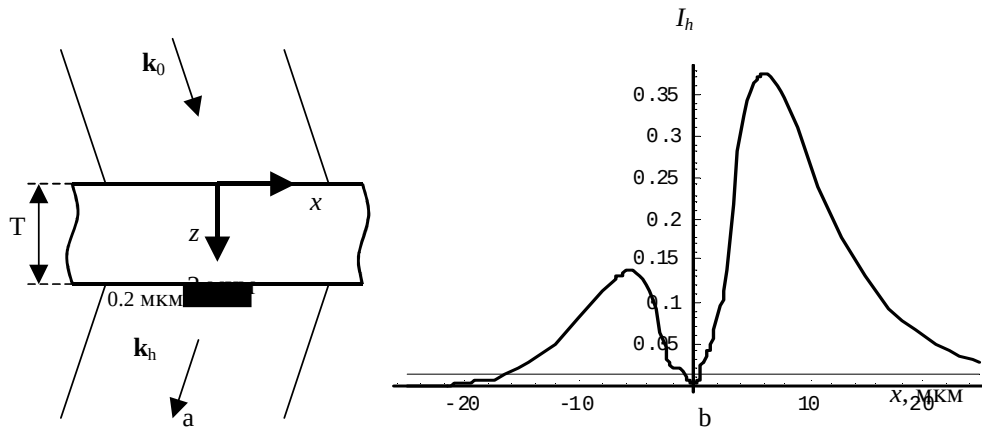


Рис.1. а) Симметричная Лауэ дифракция плоской рентгеновской волны на кристалле кремния с пленкой окиси кремния на выходной поверхности; показаны координатные оси, волновые векторы $\mathbf{k}_0$ и $\mathbf{k}_h$ падающей и дифрагированной волн, соответственно; б) Интенсивность дифрагированного пучка на выходной поверхности кристалла, слабое поглощение. Горизонтальная прямая линия – кривая интенсивности для идеального кристалла. На этом и последующих рисунках в качестве единицы интенсивности взята интенсивность падающего пучка.

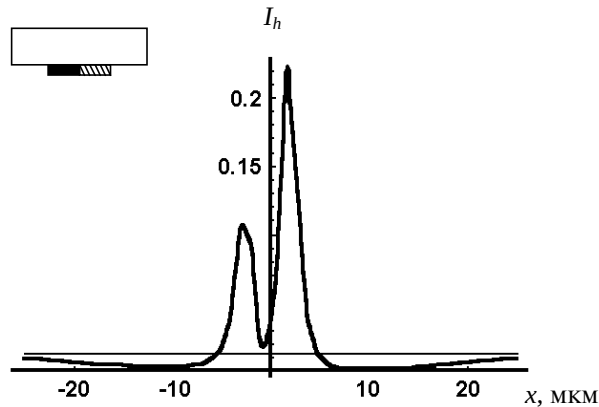


Рис.2. Кривая интенсивности дифрагированного пучка на выходной поверхности кристалла кремния с парой пленок, создающих деформации противоположного знака в кристалле. В левом верхнем углу показано схематическое изображение кристалла с пленками на выходной поверхности.

3. Дифракция от кристалла с парой близко расположенных пленок

Чтобы сконцентрировать энергию дифрагированной волны ближе к краям пленки, необходимо локализовать поле деформаций в центре. Для этого предлагается вблизи первой пленки насадить вторую, но с противоположным знаком для силы S на единицу длины (рис.2). Численным решением уравнений дифракции, выбрав $u_x = u_{1x} + u_{2x}$, где u_{1x} – смещение, вызванное первой пленкой с $S_1 = S$, а u_{2x} – смещение, вызванное второй, близколежащей пленкой пары с $S_2 = -S$, можно найти распределение интенсивности дифрагированной волны на выходной поверхности кристалла. Из рис.2, где отсчет координаты x проводится от центра между двумя пленками пары, видно, что кривая интенсивности дифрагированной волны имеет максимумы непосредственно у краев пары. Координаты максимумов – $-2,73$ мкм и $1,66$ мкм, расстояние которых друг от друга ($4,4$ мкм) значительно меньше, чем в случае одной пленки (12 мкм). Существенно, что полуширина максимумов порядка 2 мкм вместо 10 мкм в случае одной пленки. Таким образом, используя пару пленок с противоположными знаками деформаций, удастся энергию пучка сконцентрировать на том месте, где находится пара пленок, значительно (более чем в $2,5$ раза) уменьшить ширину изображения, и в 5 раз – полуширины максимумов.

4. Модуляция рентгеновского пучка с помощью системы пленок

Сначала рассмотрим дифракцию от кристалла кремния с системой пяти периодически расположенных пленок окиси кремния на выходной поверхности (рис.3). Расстояние между центрами пленок 7 мкм. Полный вектор смещения представим в виде суммы векторов смещений от отдельных пленок. Результат вычислений показывает (рис.3), что кривая интенсивности дифрагированного пучка имеет максимумы вдали от краев

системы. Эту трудность можно преодолеть, используя систему пар пленок. Пусть на выходной поверхности пластины создана периодическая система пар пленок, причем каждая пара имеет параметры, приведенные в §2. На рис.4а показана модуляция кристаллической решетки на выходной поверхности системой пяти периодически расположенных пар с периодом 4 мкм. Результаты вычислений фазы и интенсивности дифрагированной волны на выходной поверхности показаны на рис.4б и 4с, соответственно. Максимумы интенсивностей различных пар разделены друг от друга и имеют координаты -6,71 мкм, -2,96 мкм, 1,41 мкм, 5,16 мкм и 8,91 мкм, соответственно, полуширина максимумов ~2 мкм – порядка полуширины пиков модуляции кристаллической решетки, а период модуляции интенсивности в среднем можно считать 4 мкм, т.е. равным периоду модуляции решетки. Это означает, что таким путем достигается модуляция рентгеновского пучка, "синхронная" с модуляцией самой кристаллической решетки.

При распространении такого модулированного пучка за кристаллом в вакууме, во фраунгоферовой зоне дифракции должны наблюдаться главные максимумы в определенных направлениях, интенсивность которых зависит от числа пар пленок. Следовательно, система пар пленок для рентгеновского пучка может служить дифракционной решеткой. Отметим, что пары пленок можно располагать не периодическим образом, а по другим закономерностям.

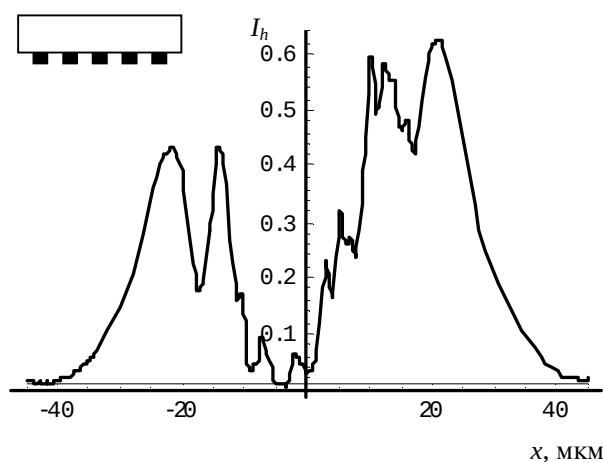


Рис.3. Кривая интенсивности дифрагированного пучка на выходной поверхности кристалла кремния с пятью пленками окиси кремния.

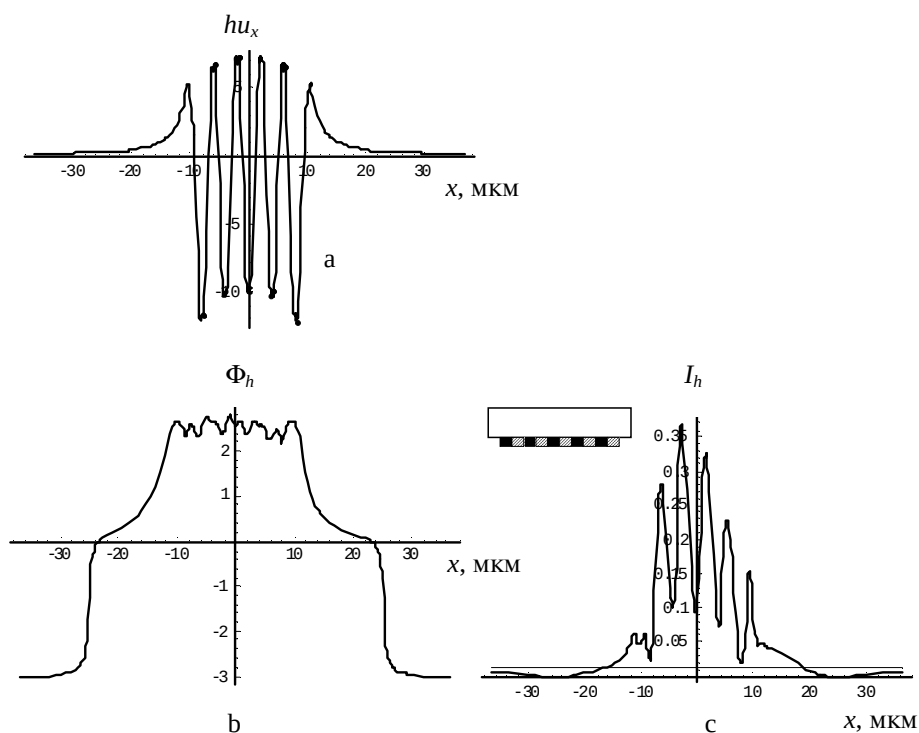


Рис. 4. а) Модуляция кристаллической решетки на выходной поверхности кристалла с пятью парами пленок; б) Фаза амплитуды дифрагированной волны на выходной поверхности; в) Кривая интенсивности дифрагированной волны на выходной поверхности повторяет модуляцию кристаллической решетки.

5. Заключение

На основе численного решения уравнений динамической дифракции исследован вопрос модуляции пучка с помощью модуляции кристаллической решетки насажденными на поверхности кристалла пленками. Одна пленка дает изображение с максимумами далеко от краев (рис.1). С целью преодоления этой трудности в роли элемента системы предлагается использовать пару пленок, создающих деформации противоположного знака в матрице. Изображение от пары пленок имеет максимумы непосредственно у краев пары (рис.2), изображения отдельных пар не налагаются друг на друга (рис.4с) и в результате рентгеновский пучок модулируется с периодом, равным периоду модуляции самой кристаллической решетки. Такую модуляцию рентгеновского пучка можно использовать как для создания рентгеновских дифракционных решеток, так и с целью получения модуляции пучка по заданной закономерности.

Численные расчеты выполнены с помощью программного пакета Математика 4.0.

Авторы выражают благодарность В.В.Аристову за постановку задачи. Работа поддержана грантом INTAS-99-0469.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В.Аристов, Ю.А.Басов, А.А.Снигирев. Письма в ЖТФ, **13**, 116 (1987).
2. А.М.Егизарян, Х.В.Котанджян. Кристаллография, **44**, 589 (1999).
3. S.Takagi. J. Phys. Soc. Japan, **26**, 1239 (1969).
4. I.A.Blech, E.S.Meieran. J. Appl. Phys., **38**, 2913 (1967).

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՓՆՋԻ ՄՈԴՈՒԼՈՒՄԸ ԲՅՈՒՐԵՂԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ՄՈԴՈՒԼՄԱՆ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Մ.Կ. ԲԱԼՅԱՆ, Լ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Դիտարկված է ռենտգենյան փնջի տարածական մոդուլման հնարավորությունը՝ շնորհիվ բյուրեղային ցանցի դեֆորմացիայի, որն առաջանում է բյուրեղի մակերևույթին թաղանթների առկայության հետևանքով: Քանակական արդյունքները ստացված են դինամիկ դիֆրակցիայի հավասարումների թվային ինտեգրման և դեֆորմացիաների նկարագրման առաձգականության գծային տեսության կիրառման միջոցով:

MODULATION OF AN X-RAY BEAM BY MEANS OF CRYSTAL LATTICE MODULATION

M.K. BALYAN, L.A. HAROUTUNYAN

A possibility of the space modulation of X-rays by means of the crystal lattice deformation is considered. The quantitative results are obtained by the numerical solution of dynamic diffraction equations using the linear elastic theory of lattice deformations.