ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ИЗГИБА ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

А. А. ПАПОЯН, П. А. БЕЗИРГАНЯН

Экспериментально показано, что при неоднородном изгибе плоско-параллельной пластины на секционной топограмме дифрагированного пучка появляются V-образные маятниковые полосы, расстояние между вершинами которых с увеличением степени неоднородности изгиба уменьшается, а их число увеличивается. Обнаружено хорошее согласие экспериментальных результатов с динамической теорией рассеяния рентгеновских лучей в слабо деформированных кристаллах. На основе проведенных исследований разработан повый метод прецизионного определения степени однородности изгиба по высоте образца.

Явление маятниковой интерференции — один из основных объектов исследования динамической теории рассеяния рентгеновских лучей (РА) в кристаллах — широко применяется для решения различных задач. Впервые существование явления маятниковой интерференции РА теоретически доказал Эвальд, а Като и Ланг [1] экспериментально наблюдали результат такой интерференции — маятниковые полосы (МП). Но оказалось, что они не идентичны с полосами, которые ожидались согласно теории Эвальда. Теоретическое объяснение новых полос дал Като [2, 3] в предположении, что падающая на кристалл рентгеновская волна является сферической.

В последние годы динамическая теория рассеяния РЛ быстро развивается для несовершенных кристаллов [4—9]. Согласно работе [4], слабая деформация совершенного монокристалла приводит к тому, что в любой его маленькой области рассеяние РЛ описывается основными соотношениями дифракции РЛ для идеального кристалла, а переход из одной области в другую учитывается либо изменением волнового вектора ΔK , либо изменением межплоскостного расстояния Δd . Таким образом, в слабо деформированном кристалле рентгеновские волновые поля и динамическое взанмодействие между ними сохраняются, однако траектории, вдоль которых распространяются потоки әнергии, искривляются и эффективная толщина кристалла меняется [9]. Так как интерференционные порядки МП зависят от эффективной толщины кристаллов, то, согласно [9], они при слабой деформации образца должны меняться.

В работе [10] вто явление наблюдалось при однородной деформации клиновидного образца температурным градиентом, а в работе [11] — мехаинческим изгибом. В работе [12] механическим четырехточечным способом был осуществлен однородный изгиб плоско-параллельной пластины, а в [13] — закручивание. В обоих случаях наблюдалось изменение знака контраста центральной МП, что также обусловлено изменением эффективной толщины образца вследствие деформации. В работах [14, 15] исследовалось влияние неоднородной деформации плоско-параллельной пластины на маятниковые полосы. В [14] неоднородная деформация образца осуществлялась его сжатием ножами, а в работе [15] — нанесением окисной пленки на некоторую область одной из поверхностей образца. В обоих случаях вдоль линии максимального значения градиента деформации возникали V-образные МП, основаниями обращенные к этой линии.

Вследствие большой чувствительности маятниковых полос к слабым деформациям результаты вышеуказанных работ позволяют разработать прецизионные методы определения количественных параметров, характеризующих деформационное поле, созданное извне или существующее вокруг нарушений и несовершенств в монокристаллах.

В настоящей работе экспериментально обнаружено возникновение V-образных МП при неоднородном изгибе по высоте плоско-параллельной пластины, исследовано их поведение при изменении степени однородности и предложен метод прецизионного исследования степени изгиба по высоте образца (в направлении, перпендикулярном вектору дифракции).

1. Методика эксперимента

В эксперименте был использован образец, вырезанный из бездислокационного монокристалла кремния в виде плоско-параллельной пластины с размерами $40 \times 15 \times 0.82$ мм³. Нормаль к большим поверхностям образца после механической и химической обработок составлял угол $\delta = 2^\circ$ с отражающими плоскостями (110), которые были перпендикулярны к основанию образца с точностью 2'. Регистрировалось отражение (220),

Схема эксперимента приведена на рис. 1, где F — проекция фокусного пятна ренггеновского излучения MoK, с размерами 400×400 мкм².



Рис. 1. Схема эксперимента.

S — щель шириной 25 мкм, O — исследуемый образец, P — фотопластинка типа МК. Расстояния на схеме таковы: FS = 130 см, SO = 5 см. OP = 10 см. Изгиб образца был осуществлен при помощи специального устройства, предназначенного для четырехточечного цилиндрического изгиба плоско-параллельных монокристаллов [16]. Чтобы обеспечить неоднородность изгиба по высоте образца два изгибающих стержня в устройстве заменялись конусными стержнями, благодаря чему нижнее основание образца начинало изгибаться раньше верхней. Постепенно увеличивая неоднородность изгиба образца, были сняты четыре секционные топограммы дифрагированного пучка, которые с увеличением в 9,2 раза приведены на рис. 2 (a-2).

386

Следует стметить, что во избежание больших экспозиций в эксперименте ширина щели S была взята порядка 25 мкм, вследствие чего на рис. 2. хорошо видны лишь вершины V-образных МП, перемещения которых и исследуются в настоящей работе.



6

a

ō

2

Рис. 2. Секционные топограммы дифрагиро ванного пучка, снятые от образца при постепенном увеличении неоднородности сгоизгиба.

Отметим также, что секционные топограммы были сняты при вогнутом образце, однако, как показали результаты дополнительных экспериментов, изменение знака изгиба не влияет на возникновение и на поведение V-образных МП.

2. Обсуждение полученных результатов и выводы

Согласно динамической теории рассеяния РЛ, расстояние между МП максимально между вершинами полос, соответствующих лучам, падающим на кристалл под точным углом Брэгга, и определяется выражением

$$\Delta_0 = \frac{\lambda \cos \theta}{|C| (\chi_{\bar{\lambda}} \chi_{\bar{\lambda}})^{1/2}},$$
(1)

где λ — длина рентгеновской волны, θ — угол Брэгга, С — поляризационный фактор, равный 1 или соз 2 θ соответственно для σ - и л-поляризаций, χ_h, χ_h^- — коэффициенты Фурье диэлектрической проницаемости порядка h [17]. Эная Δ_{θ} , можно легко посчитать интерференционный порядок центральной МП, получаемой на секционной топограмме от плоско-параллельной пластины с толщиной t:

$$n_0 = \frac{t}{\Delta_0} \,. \tag{2}$$

Как уже отмечалось во введении, изгиб образца приводит к изменению его эффективной толщины, вследствие чего интерференционный порядок МП в любой точке кристалла меняется, причем, согласно [11], порядок n после деформации связан с порядком n_0 до деформации соотношением

$$n = \frac{1}{2} n_0 \left[\sqrt{(1+P^2)} + P^{-1} \arcsin h P \right].$$
 (3)

Здесь *Р* — параметр деформации, который в случае механического однородного изгиба определяется по формуле

$$P = \frac{\delta \operatorname{tg} \theta}{C \lambda_h R} \left[1 + (1 + \gamma) \cos^2 \theta \right] t, \tag{4}$$

где v — коэффициент Пуассона, R — радиус изгиба кристалла.

Если плоско-параллельная пластина подвергается однородному изгибу, то, согласно [12], это приводит к изменению контраста центральной МП, а если изгиб по высоте образца постепенно меняется, эффективная толщина образца по высоте тоже будет плавно меняться, и он превратится в «клин». В результате помимо вышеописанных явлений происходит и новое явление — возникают V-образные МП, что хорошо видно на серии топограмм рис. 2 (a-2).

На секционной топограмме рис. 2a, соответствующей неизогнутому состоянию кристалла, на краях видны V-образные МП, обусловленные уменьшением толщины краев образца при механической и химической обработках. При исследовании влияния изгиба на МП следует рассмотреть среднюю часть секционной топограммы, где на формирование дифракционной картины этот эффект не влияет.

Как видно из рис. 2 (6-г), чем больше степень неоднородности изгиба, тем больше отличаются эффективные толщины кристалла по высоте образца, в результате чего происходит увеличение угла «клина» и возрастание числа V-образных МП, вышедших на секционной топограмме. Если порядок центральной полосы плоско-параллельной пластины до изгиба был n_0 (см. формулу (2)), то порядок k-ой V-образной МП, возникшей вследствие неоднородного изгиба, будет соответственно

$$n = n_0 + k$$
 или $n = n_0 + \left(k - \frac{1}{2}\right)$ (5)

в зависимости от того, совпадает или отличается его знак контраста от знака контраста центральной MП.

Из вышеизложенного следует, что в любой точке кристалла можно определить раднус локального изгиба. Действительно, если в этой точке

интерференционный порядок МП есть n, то по формуле (3) можно найти соответствующее вначение P, а по формуле (4) — R. Например, на рис. 2iв точке, отмеченной стрелкой, порядок МП равен $n = n_0 + 1$, и так как в нашем эксперименте n_0 , согласно формуле (2), равен 24, то n = 25. Имея в виду также, что в формуле (4) $\delta = 2^\circ$, $\theta = 10,63^\circ$, $\lambda_h = 2,04 \cdot 10^{-6}$, v = 0,25, и взяв вместо C его среднее значение

$$\overline{C}=\frac{1+\cos 2\theta}{2},$$

равное 0,966, в этой точке получим R = 3,6 м, что хорошо совпадает со значением, определяемым известным рентгеновским методом [13].

Выбирая несколько точек по высоте образца h и по вышеописанной методике определяя значения радиусов локального изгиба в них, можно количественно оценить зависимость R от h, т. е. определить степень однородности изгиба в направлении, перпендикулярном вектору дифракции.

Имея в виду, что применение общеизвестных методов определения степени однородности изгиба по высоте образца [13, 18, 19] включает необходимость как дополнительного поворота образца или системы щелей на 90° с последующей его юстировкой под точным углом Брэгга, так и применение устройств для тонкого переноса и поворота, можно заключить, что вышеописанный новый метод определения степени однородности изгиба по высоте монокристаллов существенно проще при одновременном обеспечении высокой степени точности измерений (МП очень чувствительны к слабым деформациям). Все это создает хорошие предпосылки для его успешного применения при решении различных научных и практических задач, например, для контроля степени однородности изгиба изогнутых кристаллмонохроматоров, применяемых в рентгеновских спектрометрах и дифрактометрах [20, 21].

Ереванский государственный университет

Поступила 31. Х. 1980

ЛИТЕРАТУРА

- 1. N. Kato, A. R. Lang. Acta Cryst., 12, 787 (1959).
- 2. N. Kato. J. Appl. Phys., 39, 2225 (1968).
- 3. N. Kato. J. Appl. Phys., 39, 2231 (1968).
- 4. P. Pening, D. Poider. Philips Res. Rep., 16, 419 (1951).
- 5. S. Takagi. Acta Cryst., 15, 1311 (1962).
- 6. D. Taupin. Bull. Soc. Franc. Miner. Cryst., 87, 469 (1964).
- 7. U. Bonse. Z. Phys., 177, 385 (1964).
- 8. N. Kato. J. Phys. Soc. Japan, 19, 67 (1964).
- 9. N. Kato. J. Phys. Soc. Japan, 19, 971 (1964).
- 10. M. Hart. Z. Phys., 189, 269 (1966).
- 11. M. Hart. Appl. Phys. Lett., 7, 96 (1965).
- 12. П. А. Безирганян, А. А. Папоян, Г. М. Аладжаджян. Кристаллография, 25, 850 (1980).
- 13. В. И. Кушнир, Э. В. Суворов, К. Ю. Мухин. ФТТ, 22, 2135 (1980).
- 14. Y. Ando, N. Kato Acta Cryst., 21, 284 (1966).
- 15. Y. Ando, J. R. Patel, N. Kato. J. Appl. Phys., 44, 4405 (1973).

16. П. А. Безирганян, А. А. Папоян, О. С. Семерджян. Положительное решение № 2885119/25-26, 1980.

17. N. Kato. Acta Cryst., 14, 627 (1961).

- 18. U. Bonse, W. Graeff. Z. Naturforsch., 28a, 558 (1973).
- 19. K. Godwod, A. T. Nagy, Z. Rek. Phys. Stat. Sol. (a), 34, 705 (1976).
- 20. В. М. Самсонов. Препринт ЛИЯФ-278, Ленинград, 1976.

21. В. М. Самсонов, Е. Г. Лапин. Препринт ЛИЯФ-587, Ленинград, 1980.

ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂԱՅԻՆ ՀԱՐԹ-ԶՈՒԳԱՀԵՌ ԹԻԹԵՂԻ ՃԿՄԱՆ ՀԱՄԱՍԵՌՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա. Ա. ՊԱՊՈՅԱՆ, Պ. Հ. ԲԵՉԻՐԳԱՆՑԱՆ

Փորձնականորհն ցույց է տրված, որ միաբյուրնղային հարթ-ղուգահեռ թիթեղի անհամաանո ճկման մամանակ դիֆրակցված փնջի սնկցիոն տոպոգրամմայում առաջանում են V-աձև հոճանակային շերտեր, որոնց թիվը ճկման անհամասեռության աստիճանի մեծացմանը զուգընթաց աճում է, իսկ գագաթների միջև եղած հեռավորությունը՝ նվազում։ Կատարված հետաղոտություններից ելնելով առաջարկվում է նոր ճշգրիտ մեթոդ ըստ թյուրեղի բարձրության (դիֆրակցիայի վեկտորին ուղղահայաց ուղղությամբ) ճկման համասեռությունը որոշելու համար։

INVESTIGATION OF BENDING HOMOGENEITY OF A PLANE-PARALLEL MONOCRYSTAL PLATE

A. A. PAPOIAN, P. H. BEZIRGANIAN

A series of four topograms of a beam diffracted from a plane-parallel monocrystal plate was taken at different degrees of bending homogeneity. V-shaped pendudum fringes were shown to arise at inhomogeneous bending, the number of which increased with the bending inhomogeneity and the distance between fringe tops decreased. The observational data well agreed with the predictions of dynamical theory of X-ray scattering in weakly distorted crystals.

. . . R.S. in the second
