

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЦИКЛИЧЕСКИЕ НАСТРАИВАЕМЫЕ МОНОХРОМАТОРЫ

М. А. МЕСРОПЯН, А. Г. РОСТОМЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 3 января 1990 г.)

Рассмотрены четырехгранные циклические настраиваемые монохроматоры с пересекающейся траекторией с симметричными и асимметричными отражениями. Вычислены степени монохроматизации и коллимации пучков, сформированных в кремниевых монохроматорах после разного числа циклов. Изготовлены циклические настраиваемые кремниевые монохроматоры. Проведены опыты, подтверждающие результаты вычислений.

В работе Котерилла [1] предложены рентгеновские резонаторы с попарно параллельными одинаковыми брэгговскими отражателями. Каждая параллельная пара этих отражателей составляет один монокристалл. Число отражателей ω и, следовательно, число монокристаллов $\omega/2$, определяется значением угла Брэгга θ из условия $90^\circ/\theta < \omega/2 < 180^\circ/\theta$. В зависимости от взаимной ориентации монокристаллов в резонаторе меняется длина резонансной волны, т. е. той волны, для которой коэффициенты отражений от всех отражателей максимальны. При четырех одинаковых отражателях в таком настраиваемом резонаторе по замкнутой траектории могут циркулировать не волны, для которых угол Брэгга от выбранных атомных плоскостей находится в интервале $45^\circ < \theta < 90^\circ$. Ввод первичного и вывод циркулированного пучка в работах [1, 2, 3] предполагается произвести методом утоньшения входного отражателя для достижения либо аномального, либо прямого прохождений. Основной недостаток этих резонаторов — большие потери интенсивности. В первом методе уменьшение интенсивности связано с разницей между углами Лауэ и Брэгга, а во втором оно обусловлено истинным поглощением кристалла. Кроме того, замкнутость траектории в обоих типах резонаторов приводит к слиянию пучков вне резонатора после разного числа циклов и отраженного от внешней поверхности утоньшенного отражателя.

В данной статье целью нашей задачи является повышение интенсивности выходящего из резонатора пучка и одновременное получение нескольких параллельных пучков с разными параметрами монохроматизации и коллимации на выходе резонатора.

Этого можно достичь путем параллельного переноса одного из отражателей, что приводит к нарушению замкнутости траектории пучка с сохранением циклическости внутри резонатора [4].

При каждом полном цикле пучок совершает параллельное перемещение на постоянный шаг, a , величина которого определяется геометрией и величиной перестановки отражателя (рис. 1):

$$a = 2(b_1 - b_2) \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где b_1 —расстояние между отражателями первого монолита; b_2 —расстояние между отражателями второго монолита; θ_A —исправленный угол Брэгга резонансной волны от данных отражателей. Такая перестановка отражателя приводит к образованию отдельного свободного входа первичного пучка и выхода монохроматизированного пучка, а также к получению монохроматизированных пучков после любого числа циклов.

Резонатор состоит из двух монолитов, каждый из которых содержит два параллельных отражателя. Первичный пучок рентгеновских лучей падает под углом дифракции θ_B на первый отражатель первого монолита. Совершив четыре последовательных одинаковых отражения от отражателей 1, 2, 3, 4 под углом θ_B пучок завершает первый цикл. Свободность выхода обеспечивается ступенчатостью первого отражателя, что позволяет части пучка (по высоте), сделавшего один цикл, выйти из резонатора, а остальная часть продолжает циркуляцию. При этих отражениях пучок монохроматизируется вокруг резонансной волны, которая определяется ориентировкой монолитов.

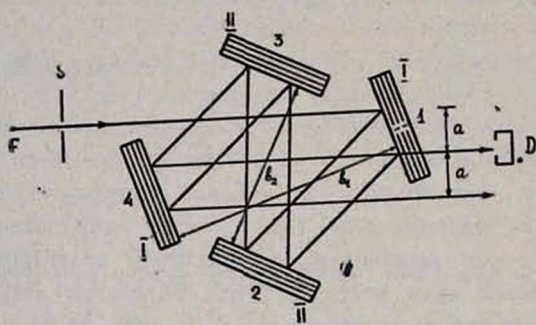


Рис. 1. Схема настраиваемого монохроматора и ход лучей в нем для первого и второго циклов.

Резонатор, работающий в таком режиме, будем называть рентгеновским циклическим настраиваемым монохроматором.

Такие циклические монохроматоры с многократной циркуляцией излучения приводят к разделению пучков с разными степенями монохроматизации и коллимации, сформированных в монохроматоре.

Для определения степеней монохроматизации и коллимации пучков проведены теоретические расчеты и эксперименты. Исследованы циклические настраиваемые монохроматоры с симметричными и асимметричными отражениями, для которых полный коэффициент асимметричности мо-

нохроматора $G = \prod_{i=1}^4 \gamma_i = 1$. Рассмотрены монохроматоры с четырьмя отражениями в одном цикле при следующих вариантах последовательных асимметричных отражений:

$$(\gamma^{-1}, \gamma, \gamma^{-1}, \gamma) \quad \text{и} \quad (\gamma^{-1}, \gamma^{-1}, \gamma, \gamma),$$

где γ принимает значения $1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8$.

По формулам, выведенным в работе [5], составлена программа [6] и на ЭВМ ЕС-45 вычислены изограммы коэффициентов отражения $R(\lambda, \theta)$ монохроматоров для излучения $CoK\alpha_1$ от отражающих плоскостей (440) монокристалла кремния. Значения используемых в расчетах исходных данных следующие [7]:

$$\begin{aligned} i_{CoK\alpha_1} &= 1,788965 \text{ Å}^2; & a_0^{Si} &= 5,430945 \text{ Å}^2; \\ \chi_{ur} &= 20,464404 \times 10^{-6}; & \chi_{it} &= 0,640626 \times 10^{-6}; \\ \chi_{(440)r} &= 8,954962 \times 10^{-6}; & \chi_{(440)it} &= 0,615759 \times 10^{-6}. \end{aligned}$$

Расчеты проведены для однократной ($N=1$) и двухкратной ($N=2$) циркуляций пучка внутри монохроматора.

На рисунках 2 и 3 приведены проекции изограмм на плоскости $\lambda\theta$, полученные пересечениями колоколообразных поверхностей отражений $R(\lambda, \theta)$ плоскостями $R_{\max}/2$, где $R_{\max}$ —значение максимального коэффициента отражения для каждого случая монохроматора. На рисунках видны преобразования изограмм при изменении параметра γ монохроматоров. Из этих рисунков можно определить значения спектральной ширины $\Delta\lambda$ и угловой расходимости $\Delta\theta$ сформированного в монохроматоре пучка, значения спектральной ширины $\delta\lambda$ для любых фиксированных направлений, значения угловых расходимостей $\delta\theta$ для любых фиксированных длин волн. Характер преобразований изограмм для вариантов $(\gamma^{-1}, \gamma, \gamma^{-1}, \gamma)$ и $(\gamma^{-1}, \gamma^{-1}, \gamma, \gamma)$ при изменении γ от $1/8$ до 8 показана на рисунках 2 и 3 для $N=1$. При $N=2$ этот характер не изменяется, однако $\Delta\lambda$, $\delta\lambda$, $\Delta\theta$ и $\delta\theta$ принимают меньшие значения.

Аналогичные расчеты проведены и для отражающих плоскостей (333) монокристалла кремния ($\chi_{(333)r} = 1,746207 \times 10^{-6}$; $\chi_{(333)i} = 0,619612 \times 10^{-6}$) для излучения $CoK\alpha_1$. В этом случае параметры сформированных пучков улучшаются — $\Delta\lambda$, $\delta\lambda$, $\Delta\theta$ и $\delta\theta$ принимают еще меньшие значения. Это происходит из-за относительно узкой ширины Дарвин-Принской кривой при отражающих плоскостях (333). В таблице приведены значения угловых расходимостей $\Delta\theta$ и спектральных ширин $\Delta\lambda$ пучков, сформированных в циклических настраиваемых четырехгранных монохроматорах с одинаковыми отражающими плоскостями (440) и (333), при однократной и двухкратной циркуляции пучка.

Для экспериментального осуществления настраиваемого монохроматора сначала из слитка монокристалла кремния вырезаются два прямых параллелепипеда с ранее вычисленными размерами порядка $40 \times 25 \times 25$ (мм). Боковые грани этих параллелепипедов шлифуются строго параллельно атомным плоскостям с точностью до $0,5'$. Затем вырезаются внутренние части параллелепипедов так, что получаются монолиты U-образной формы, боковые грани которых служат отражателями монохроматора. Внутренние поверхности отражателей тщательно шлифуются параллельно внешним граням параллелепипеда с толщиной $2-5$ мм и точностью до 1 мкм, одновременно регулируя расстояние между параллельными отражателями, расположенными на одном монолите. После

механической обработки всех поверхностей отражателей произведена химическая полировка этих поверхностей полирователем СР-4.

Для такого монохроматора нами разработан и построен специальный гониометр с двумя головками, обеспечивающий их вращения вокруг одной вертикальной оси. Обе гониометрические головки смонтированы на общем конусообразном основании одна внутри другой и соединены с помощью хомутов с дифференциально-винтовыми передачами, уменьшающими минимальный шаг поворота, тем самым увеличивающими точность

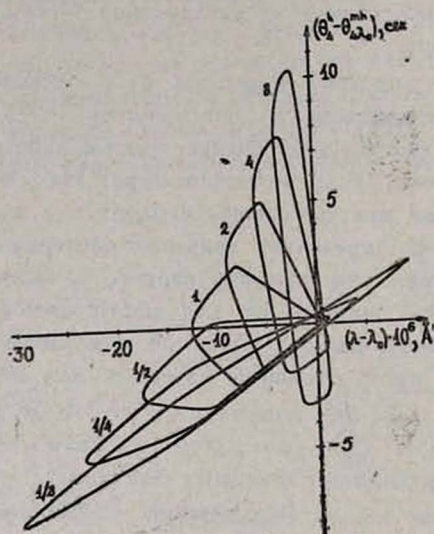


Рис. 2.

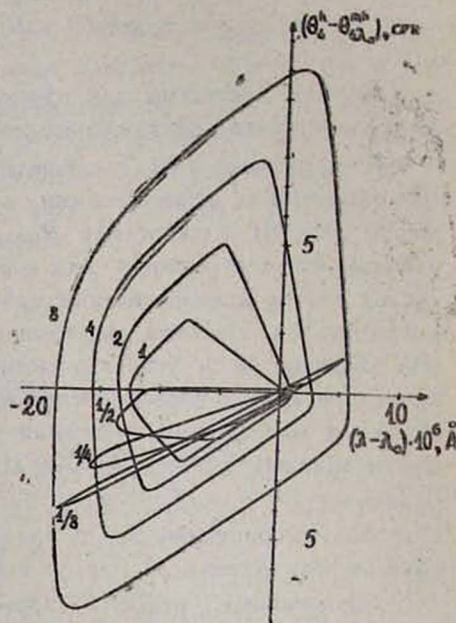


Рис. 3.

Рис. 2. Проекция изограммы для варианта $(\gamma^{-1}, \gamma, \gamma^{-1}, \gamma)$ с отражающими плоскостями (440) кремния для одного цикла ($N=1$) при значениях γ : $1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8$ (θ_2^h — задаваемый угол между последней отражающей плоскостью и направлением распределения выходящего пучка; θ_{20}^{mh} — угол между отраженным пучком и отражающей плоскостью, соответствующий максимальному значению коэффициента отражения для резонансной волны λ_0).

Рис. 3. Проекция изограммы для варианта $(\gamma^{-1}, \gamma^{-1}, \gamma, \gamma)$ с отражающими плоскостями (440) кремния для одного цикла ($N=1$) при значениях γ : $1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8$.

юстировки до $0,5''$ рентгеновского монохроматора на разные длины волн. Юстировка монолитов монохроматора производится в следующей последовательности. На столик внешней гониометрической головки основанием вверх ставится монолит 1. При этом детектор должен находиться под двойным углом дифракции $\theta_D = 2\theta_B$. Грубыми поворотами, а затем и с помощью дифференциально-винтовой передачи, тонкими поворотами монолит 1 выводится на максимум линии из настраиваемого диапазона

Значения угловых расходимостей $\Delta\theta$ и спектральных ширин $\Delta\lambda$ пучков, сформированных в настраиваемых монохроматорах на половине максимального коэффициента отражения $R_{\max}/2$.

N	γ	(440)				(333)			
		$(\gamma^{-1}, \gamma, \gamma^{-1}, \gamma)$		$(\gamma^{-1}, \gamma^{-1}, \gamma, \gamma)$		$(\gamma^{-1}, \gamma, \gamma^{-1}, \gamma)$		$(\gamma^{-1}, \gamma^{-1}, \gamma, \gamma)$	
		$\Delta\theta, \text{сек}$	$\Delta\lambda \cdot 10^3, \text{\AA}^*$	$\Delta\theta, \text{сек}$	$\Delta\lambda \cdot 10^3, \text{\AA}^*$	$\Delta\theta, \text{сек}$	$\Delta\lambda \cdot 10^3, \text{\AA}^*$	$\Delta\theta, \text{сек}$	$\Delta\lambda \cdot 10^3, \text{\AA}^*$
1	1/8	10,32	39,50	5,51	24,35	5,37	31,70	3,65	20,75
	1/4	6,26	27,68	3,06	17,65	3,25	21,75	1,61	14,85
	1/2	3,54	18,95	1,76	13,45	1,93	14,55	0,86	11,25
	1	4,84	12,80	4,84	12,80	2,45	9,60	2,45	9,60
	2	6,81	9,55	8,45	14,45	3,76	7,45	4,55	11,45
	4	9,59	6,95	12,91	18,50	5,21	5,65	6,98	15,25
	8	13,56	5,05	18,47	24,65	7,14	4,15	9,95	20,90
2	1/8	8,02	30,85	4,64	20,65	4,12	24,40	2,39	16,45
	1/4	4,77	20,35	2,24	13,85	2,41	15,75	1,19	11,45
	1/2	2,82	13,15	1,42	10,20	1,42	8,95	0,71	7,55
	1	3,69	7,95	3,69	7,95	1,74	5,25	1,74	5,25
	2	5,38	6,45	6,72	10,15	2,69	4,55	3,34	7,70
	4	7,80	5,20	10,40	14,55	4,03	4,00	5,32	11,70
	8	11,39	3,95	14,83	20,45	5,91	3,05	7,67	16,65

длин волн. На столик внутренней гониометрической головки под монолитом I ставится монолит II с коротким основанием. При этом детектор должен быть возвращен в нулевое положение $\theta_D=0$ и смещен на величину смещения a выходящего пучка по отношению к первичному пучку (см. рис. 1). Грубой юстировкой, а потом же и тонкой юстировкой с помощью дифференциально-винтовой передачи, монолит II точно юстируется на максимум интенсивности пучка, выходящего из монохроматора после первого цикла. Для регистрации двукратно проциркулированного пучка смещение детектора должно быть $2a$.

Поскольку в рентгеновских циклических настраиваемых монохроматорах формируются пучки с высокими степенями монохроматизации и коллимации с фронтальным сечением порядка $0,5 \times 4$ (мм), то эти монохроматоры можно успешно использовать как в рентгеновской спектроскопии, так и для спектрального анализа. С этой целью из проведенных расчетов выбраны и изготовлены следующие варианты монохроматоров для исследований:

1. (1, 1, 1, 1),
2. (1, 1, 1, 1) + (1, 1, 1, 1),
3. (1/4, 4, 1/4, 4)

для отражающих плоскостей (440), а для отражающих плоскостей (333):

4. (1, 1, 1, 1),
5. (1, 1, 1, 1) + (1, 1, 1, 1).

Сняты спектры в области длин волн $K\alpha$ линии Co —а выбранными вариантами монохроматоров [8]. Снятие производится настраиванием монохроматора на разные резонансные волны в диапазоне длин волн $CoK\alpha_{1,2}$. При этом повороте первого монолита на угол $\Delta\alpha$ соответствует поворот второго монолита на угол $3\Delta\alpha$. Полученные экспериментальные ширины включающие естественную ширину и искажения аппаратуры для линии $CoK\alpha_1$, следующие:

1. $\Delta\lambda_1 = 0,640 \times 10^{-3} \text{ \AA}^*$; 4. $\Delta\lambda_4 = 0,595 \times 10^{-3} \text{ \AA}^*$
2. $\Delta\lambda_2 = 0,620 \times 10^{-3} \text{ \AA}^*$; 5. $\Delta\lambda_5 = 0,567 \times 10^{-3} \text{ \AA}^*$
3. $\Delta\lambda_3 = 0,598 \times 10^{-3} \text{ \AA}^*$.

Сравнивая полученные результаты ширины с результатами, полученными с помощью традиционных методов (с двухкристалльными и трехкристалльными спектрометрами) [9, 10], заключаем, что разрешающая сила этих монохроматоров выше, чем у двухкристалльных спектрометров и приближается к разрешающей силе трехкристалльных спектрометров.

Однако в нашем случае вместо трех гониометров используется один, из-за чего юстировка и снятие спектра намного проще.

1. Cottrell R. M. J. United Patent Office, 3518427. 1970.
2. Bond W. L. Duggay M. A., Rentzepis P. M. Appl. Phys. Lett., 10. 216 (1967).
3. Kolpakov A. V., Kuzmin R. N., Ryabov V. M. J. Appl. Phys., 41. 3549 (1970).
4. Ростомян А. Г., Месропян М. А. А. с. 1390550. БИ. 1988, № 15.
5. Fingerland A. Acta cryst. A27. 230 (1971).
6. Ростомян А. М., Ростомян А. Г. Деп. в Арм. НИИНТИ, Е., 1987, № 21—Ар.
7. Vaarden J. A. Rev. Mod. Phys., 1967, v. 31, N. 1.
8. Ростомян А. Г. и др. Межвузовский сборник научных трудов. Е., 1987. Т. 8—9, с. 14—23.
9. Блохин М. А. Физика рентгеновских лучей. М., 1957, с. 518.
10. Shah S. M., Das Gupta K. J. Phys. Soc. Japan, 37, 1069 (1974).

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՑԻԿԼԱՅԻՆ ՍԱՐՎՈՂ ՄՈՆՈԲՐՈՄԱՏՈՐՆԵՐ

Մ. Հ. ՄԵՍՐՈՊՅԱՆ, Ա. Հ. ՌՈՍՏՈՄՅԱՆ

Գիտարկված են սիմետրիկ և ոչ սիմետրիկ անդադարձումներով հատվող հետագծով քառանիստ ցիկլային սարվող մոնոբրոմատորները: Հաշվված են տարրեր թվով ցիկլերից հետո սիլիցիումի մոնոբրոմատորներում կազմավորված փնիերի մոնոբրոմատիկոթյան և զուգամիտիկոթյան աստիճանները: Պատրաստված են սիլիցիումի սարվող ցիկլային մոնոբրոմատորներ և կատարված են հաշվարկների արդյունքները հաստատող փորձեր:

TUNABLE CYCLIC X-RAY MONOCHROMATORS

M. H. MESROPYAN, A. H. ROSTOMYAN

Tunable cyclic four-block monochromators with intersecting trajectories and symmetric and asymmetric reflections are considered. The degrees of monochromatization and collimation of beams formed in silicon monochromators after different numbers of cycles are calculated. The tunable cyclic silicon monochromators were constructed and the results of experiments carried out with their help well agreed with calculations.

Изв. АН Армении, Физика, т. 26, вып. 2, 77—82 (1991)

УДК 537.548.734.538.22

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ, ОПТИЧЕСКИЕ И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОФТАЛОЦИАНИНОВ, ДОПИРОВАННЫХ НАТРИЕМ

Э. Г. ШАРОЯН, М. В. СИМОНЯН, С. С. ТЕРЗЯН, В. Э. ШАРОЯН

Институт физических исследований АН Армении

(Поступила в редакцию 6 мая 1990 г.)

Для получения монокристаллов на основе металлофталочининов и щелочных металлов разработаны два метода. Исследованы оптические спектры и рентгенограммы поликристаллических образцов β -CoPc и проявляющих ферромагнитные свойства соединений, полученных при допировании β -CoPc натрием и при его термическом разложении соответственно.