

УДК 537.531:535.3

ОПТИКА МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ РЕШЕТОК ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИНХРОТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

© 1999 г. В. И. Ерофеев², Н. В. Коваленко¹, В. А. Чернов³, Н. И. Чхало¹, С. В. Мытниченко⁴

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Институт автоматики и электрометрии, Новосибирск, Россия*

³ *Институт катализа им. Г.К. Борескова, Новосибирск, Россия*

⁴ *Институт химии твердого тела и механохимии, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 03.04.1998 г.

Приводятся основные результаты группы Сибирского Центра СИ по изготовлению и исследованию многослойных дифракционных решеток (МДР). Обсуждаются данные по экспериментальному и теоретическому исследованиям отражательной способности МДР. Численное моделирование дифракционной эффективности демонстрирует аналогию свойств кристаллов и многослойных решеток в жесткой рентгеновской области спектра. Обсуждается влияние рентгеновского диффузного рассеяния на характеристики МДР. Предлагаются варианты использования МДР как полихроматических оптических элементов в спектроскопии жесткого рентгеновского диапазона СИ.

ВВЕДЕНИЕ

В 1981 г. Спиллер [1] предложил наносить многослойное покрытие на поверхность дифракционных решеток с целью реализации преимуществ оптики нормального падения в ультрамягком рентгеновском (УМР) диапазоне. В сущности роль многослойного покрытия сводилась лишь к увеличению коэффициента отражения “зубцов” решетки. Несмотря на проблемы практической реализации этого гибридного оптического элемента, связанные с жесткими одновременными требованиями к профилю и шероховатости подложки, эту дату можно считать днем рождения оптики многослойных дифракционных решеток (МДР). Необходимо отметить, что все дальнейшее развитие этого по своей сути чисто “решеточного” направления было связано с оптикой нормального падения в ВУФ–УМР-области.

Другим интересным направлением в рентгеновской оптике было (и остается) развитие В.В. Аристовым и др. [2] брэгг–френелевской оптики. Не вдаваясь в детали, мы отметим лишь два обстоятельства, важных для последующего развития оптики МДР жесткого рентгеновского диапазона. Была развита изящная техника вытравливания рельефа оптического элемента на поверхности кристалла (многослойника), позволяющая сохранить уже имеющуюся высокую пространственную когерентность слоев. Возникла потребность расчета дифракции падающего под скользким углом излучения на нескольких “полупрозрачных” френелевских полосках одновременно.

Недавние работы [3–5] показали, что МДР, приготовленные методом травления периодической структуры на многослойном зеркале, являются перспективными оптическими элементами для спектроскопии жесткого рентгеновского диапазона. Они обладают достаточно большими значениями отражения и обратной угловой дисперсии для практического использования. Также обнаружено, что МДР способны концентрировать дифрагированное излучение в нужный порядок решетки с почти полным подавлением других порядков.

Таким образом, МДР представляют собой альтернативу кристаллам, традиционно используемым в жестком рентгеновском диапазоне. Более того, в отличие от кристаллов, являющихся “монокроматическими” элементами, МДР являются “полихроматическими” элементами. Эта особенность МДР генетически связана с диспергирующими свойствами обычной решетки и позволяет использовать или записывать широкополосный спектр падающего рентгеновского излучения одновременно. Отсюда следует важный вывод, что одновременное использование оптики МДР и широкополосного источника рентгеновского излучения должно дать многократный выигрыш в светосиле по сравнению с использованием традиционной оптики кристаллов для “немонокроматических” спектральных методов (EXAFS-спектроскопии, спектроскопии неупругого рентгеновского рассеяния и т.д.).

Как известно, спектр синхротронного излучения (СИ) представляет собой широкий континуум в отличие от спектра рентгеновских трубок, излу-

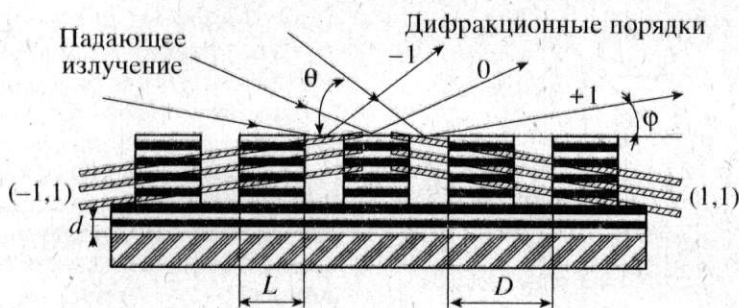


Рис. 1. Схематическое представление многослойной дифракционной решетки.

чающих монохроматическое характеристическое излучение. Тем не менее большинство оптических схем, основанных на использовании кристаллов, выделяет лишь очень узкую часть спектра СИ. В сущности этот подход остался "трубочным" и использует лишь высокую спектральную яркость источников СИ. Применение оптики МДР позволяет увеличить эффективную светосилу за счет увеличения применяемой спектральной ширины СИ.

В данной статье мы приводим результаты исследований многослойных решеток в жестком рентгеновском диапазоне в Сибирском Центре СИ. Наша активность, в частности, была сконцентрирована на технологии получения, теоретическом моделировании и экспериментальном исследовании рентгенооптических характеристик МДР для их последующего использования в новых "СИ-подогнанных" оптических схемах.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ

Схематическое представление многослойной дифракционной решетки (общий случай фазовой решетки) показано на рис. 1. Рентгеновское излучение падает на решетку под углом θ и отражается под углом ϕ . Решетка имеет период D и состоит из полосок многослойника с периодом d и шириной L .

В области жесткого рентгеновского диапазона (малые углы падения и длина экстинкции много больше периода решетки D) многослойные полоски становятся полупрозрачными для падающих рентгеновских лучей. Качественно это приводит к тому, что каждый рентгеновский фотон отражается не от одной, а от нескольких десятков многослойных полосок одновременно. Отражение излучения в дифракционные порядки определяется выполнением условий Лауэ. Максимумы дифракции для -1 , $+1$ порядков соответствуют условиям зеркального отражения падающего излучения от "плоскостей" $(-1, 1)$, $(1, 1)$ соответственно. Легко прослеживается аналогия между МДР и кристаллом.

В УМР-диапазоне (большие углы падения и малая длина экстинкции) падающее излучение полностью отражается на одном многослойном "штрихе". В этом случае свойства МДР аналогичны обычным дифракционным решеткам. Тем не менее, в данном случае возможна реализация фазовой решетки [6, 7], для которой наблюдается значительное увеличение интенсивностей дифракционных порядков.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МДР

Как уже было отмечено, получение МДР методом нанесения многослойного покрытия на заранее структурированную подложку наталкивается на проблему изготовления подложек с крайне жесткими требованиями на профиль и шероховатость. В частности, допуски на профиль поверхности должны быть в пределах долей нанометра. Как результат, МДР, изготовленные этим методом, не продемонстрировали ожидаемых свойств.

Альтернативный метод получения многослойных решеток – изготовление решеток из готовых многослойных зеркал, что позволяет сохранить пространственную когерентность слоев многослойника и, как результат, получать МДР высокого качества.

Для формирования структуры решетки из многослойника можно использовать существующие методы, применяемые в микроэлектронике: электронную, ионную, рентгеновскую литографию. Хотя данные методы и позволяют создавать структуры высокого качества, их размеры ограничены ($\sim 1 \text{ см}^2$). Для практического применения МДР в жестком диапазоне (углы скользкого падения порядка 0.5°) необходимы решетки большего размера. Мы остановились на использовании голографической литографии.

Исследуемые в данной работе МДР были изготовлены из готовых Ni/C многослойных зеркал посредством техники голографической литографии и последующего ионно-лучевого травления [4]. Многослойные зеркала были изготовлены

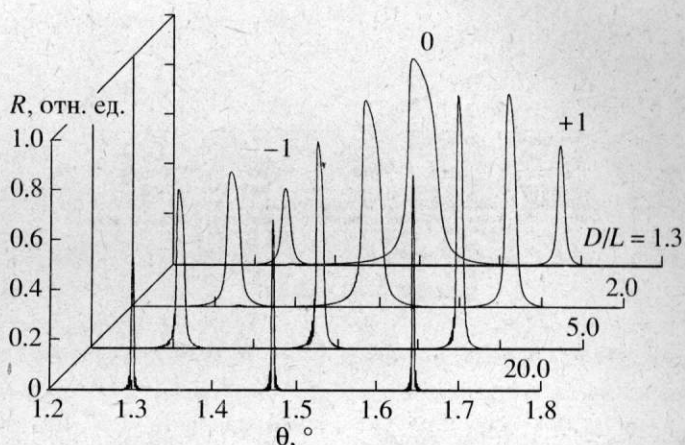


Рис. 2. Рассчитанное распределение дифракции в $-1, 0, +1$ порядки в зависимости от угла падения для различных отношений D/L (рис. 1) гипотетической W/Si-МДР ($D = 2$ мкм, $N = 1000$, $d = 4.5$ нм), $\lambda = 0.154$ нм.

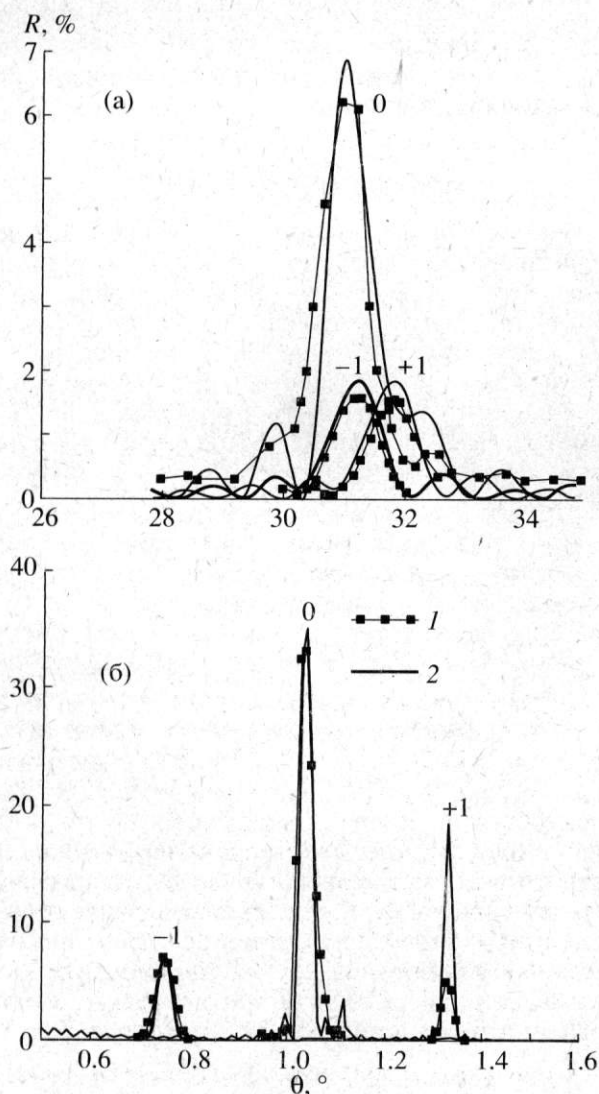


Рис. 3. Сравнение теоретического расчета (1) с экспериментальными данными (2), полученными для МДР-7 в УМР (а) и жестком (б) рентгеновских диапазонах.

методом лазерного напыления [8] на плоские суперполированные кварцевые подложки диаметром 40–60 мм [9]. Период получаемых решеток варьировался в пределах от 0.25 до 1.5 мкм.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СВОЙСТВ МДР

Расчет свойств МДР необходимо проводить в динамическом приближении, с учетом поглощения и многократного рассеяния излучения внутри решетки, что возможно с применением численных методов. В настоящее время для численного моделирования свойств МДР разработано несколько методов: дифференциальный [3], модальный [10] и метод собственных векторов [11]. Указанные методы позволяют получить распределение полей в дифракционных порядках МДР на основе численного решения волнового уравнения. Все они имеют как недостатки, так и определенные преимущества, и их использование для расчета должно определяться возможностями каждого из методов в применении к конкретной задаче.

Из перечисленных методов метод собственных векторов, реализованный нами, позволяет значительно расширить возможности численного моделирования МДР в жестком рентгеновском диапазоне. Он позволяет проводить расчеты свойств практически для любых периодов решетки, с любым числом слоев многослойной структуры.

Метод основан на представлении электромагнитного поля внутри решетки как совокупности собственных векторов матрицы перехода, описывающей преобразование электромагнитного поля при прохождении через один бислой МДР. Половина собственных гармоник в этом случае описывает излучение, распространяющееся от

поверхности решетки к подложке, другая половина описывает излучение, распространяющееся от подложки к поверхности. Использование этих двух типов собственных гармоник в итерационной процедуре при учете граничных условий на поверхности решетки позволяет восстановить реальное поле, отраженное от МДР. Наглядным примером, иллюстрирующим возможности метода, является расчет дифракции на МДР в зависимости от амплитуды рассеяния многослойных "столбиков", показанный на рис. 2.

Изменение рассеивающей амплитуды многослойных столбиков моделировалось простым изменением их ширины L при сохранении периода решетки D . Рассчитанные результаты ясно демонстрируют "переход" решетка-кристалл. Угловые ширины возбуждения дифракции (кривые качания) всех порядков монотонно уменьшаются с увеличением аспектного отношения (D/L). Это вызвано увеличением числа "работающих" слоев многослойника. Аналогично, увеличение числа работающих столбиков вызывает рост интенсивности $-1, +1$ порядков. Другой интересной особенностью является перераспределение между порядками пиковых коэффициентов отражения. При этом ширины их кривых качания меняются таким образом, что интегральные коэффициенты отражения порядков становятся равными. Это поведение полностью аналогично случаю дифракции на "косых" плоскостях кристалла.

Сопоставление численных данных с экспериментом дает хорошее соответствие. На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных и рассчитанных зависимостей коэффициента отражения для различных порядков МДР от угла падения. Была использована Ni/C МДР-7: период решетки 0.837 мкм, период многослойника 4.35 нм, число периодов многослойника 35, отношение толщины слоя Ni к периоду многослойника 0.4.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МДР В ЖЕСТКОМ ДИАПАЗОНЕ

Рентгенооптические свойства МДР в жесткой области исследовались с использованием СИ накопителя ВЭПП-3. Исследования проводились на трехкристальном (n, n)-дифрактометре высокого разрешения (14" на 8 кэВ) с первичным Si(111)-монохроматором и Ge(111)-кристалл-анализатором.

Кривые качания для различных порядков дифракции, полученные на МДР-7 показаны на рис. 3б. Рис. 4 демонстрирует картину распределения дифрагированного излучения от этой МДР для угла падения, соответствующего максимуму

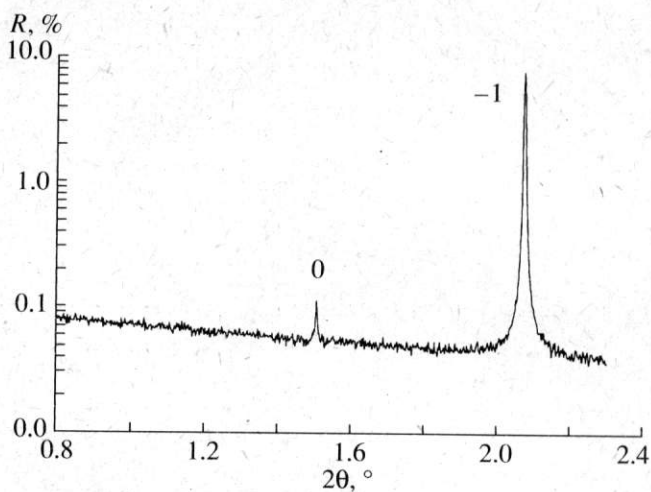


Рис. 4. Распределение дифрагированного излучения ($\lambda = 0.154$ нм) от МДР-7 для угла падения $\theta_{\text{инс}} = 0.75^\circ$, соответствующего максимуму отражения в -1 порядок. Коэффициент отражения приведен в логарифмической шкале.

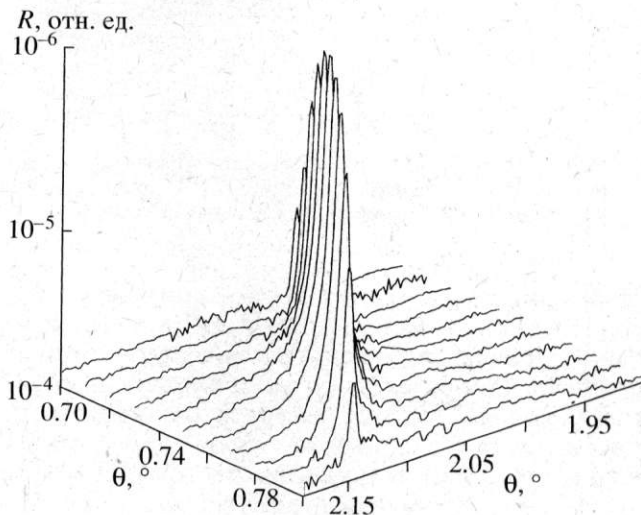


Рис. 5. Угловое распределение интенсивности дифрагированного излучения в зависимости от угла падения, полученное вблизи -1 порядка МДР-7. Интенсивность приведена в логарифмической шкале. Широкая слабая полоса с постоянным углом выхода обусловлена диффузным рассеянием.

отражения в -1 порядок. Измеренное значение коэффициента отражения, равное 8%, составляет 70% от значения, рассчитанного для идеальной решетки с учетом параметров реального многослойника. Кроме того, рис. 4 демонстрирует концентрацию дифрагированного излучения в один порядок с почти полным подавлением других.

В первых исследованиях МДР, изготовленных на "float glass", мы наблюдали слабое диффузное гало, расположенное в основании пиков дифракционных порядков. Естественно было считать, что оно связано в первую очередь с несовершен-

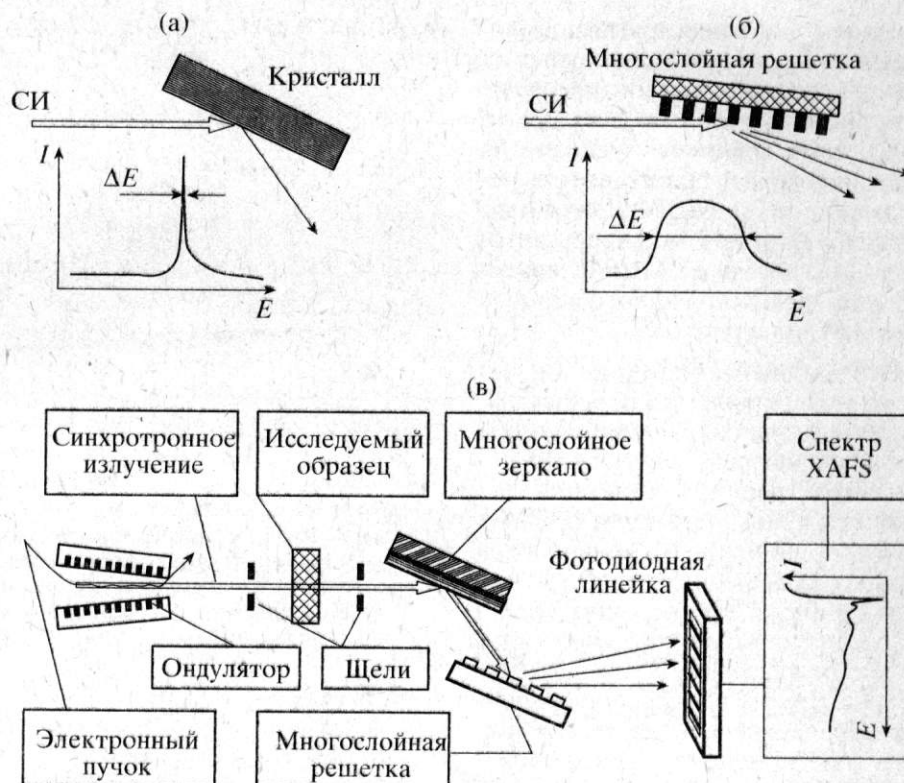


Рис. 6. Принцип XAFS-спектроскопии с наносекундным временным разрешением (Flash-XAFS): (а) – отражение синхротронного излучения от кристалла, (б) – отражение синхротронного излучения от многослойной решетки, (в) – схема регистрации XAFS-спектра в наносекундном временном диапазоне.

ством подложки (неплоскостность и точечные дефекты), а также с несовершенством технологии травления многослойника (пережог многослойника с образованием мозаичности). Тем не менее, дополнительные исследования многослойников, приготовленных по новой, более совершенной технологии, показали, что интенсивность диффузного рассеяния существенно не изменилась. Более того диффузное расслоение связано в первую очередь с природой многослойных зеркал. Рисунок 5 демонстрирует диффузное рассеяние вблизи -1 порядка дифракции. Несмотря на очень слабую интенсивность (порядка 10^{-2} – 10^{-3} интенсивности -1 порядка), его влияние может привести к искажению спектра для “полихроматического” случая. Поэтому необходимо исследовать пути дальнейшего увеличения отношения сигнал/фона.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МДР НА ИСТОЧНИКЕ СИ: ПРОЕКТ FLASH-XAFS-СПЕКТРОСКОПИИ

EXAFS-спектроскопия является достаточно молодым, развивающимся структурным методом, дающим информацию о ближнем порядке выделенного элемента. Не вдаваясь в детали, эту

информацию можно извлечь из тонкой структуры спектра поглощения. Таким образом, этот метод является по своей сути “полихроматическим”. Стандартная схема измерений заключается в последовательном угловом сканировании кристалла с соответствующими измерениями поглощения (рис. 6а). Как легко видеть из рис. 6б, использование МДР в качестве диспергирующего элемента позволяет произвести регистрацию спектра поглощения одновременно в широкой области спектра СИ. Как показывают оценки, светосила схемы с МДР увеличивается в 50–100 раз.

Применение ондулятора с оптимальным спектром излучения (совпадающим с EXAFS-спектром) позволяет получить дальнейшее повышение интегральной интенсивности “полезных” фотонов (рис. 6в). Оценки показывают, что при использовании 200-полюсного ондулятора с градиентом магнитного поля по его длине, установленного на накопителе (энергия электронов 6 ГэВ, ток пучка в “одноранчевом” режиме 50 мА, оптимизированной W/Si-МДР и координатного детектора (фотодиодная линейка интегрирующего типа) можно получить XAFS-спектр с достаточной статистикой (10^8 фотонов) за время прохода одного “банча” через ондулятор (300–500 пс). Это позволит получать прямую структурную инфор-

мацию о динамических процессах с беспрецедентно коротким временем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования рентгенооптических свойств МДР, проведенные нами и другими исследователями, показывают большие потенциальные возможности их использования в качестве дисперсионных элементов оптики СИ. МДР обладают явным преимуществом перед кристаллами в случае их использования в полихроматических спектральных методах.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам участка оптики ИЯФ за приготовление подложек, Е.Д. Чхало за напыление многослойных покрытий, В.И. Капитонову за помощь и поддержку в работе. Особо благодарим академика Э.П. Круглякова и чл.-корр. Г.Н. Кулипанова за постоянную поддержку и внимание. Работа была выполнена при частичной поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 97-02-18454.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spiller E. // AIP Conf. Proc. 1981. V. 75. P. 24.
2. Aristov V.V., Erko A.I., Martynov V.V. // Revue de Physique Applique. 1988. V. 23. P. 1623.
3. Erko A.I., Vidal B., Vincent P. et al. / Nucl. Instr. and Meth. 1993. V. A333. P. 599.
4. Chernov V.A., Chkhalo N.I., Kovalenko N.V., Mytnichenko S.V. // Nucl. Instr. and Meth. 1995. V. A359. P. 138.
5. Chernov V.A., Erofeev V.I., Chkhalo N.I. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1998. V. A405. P. 310.
6. Barbee T.W. Jr. // Proc. SPIE. 1985. V. 563. P. 22.
7. Ross T.S., Perkins R.T., Knight L.V. // Optical Eng. 1980. V. 29. P. 728.
8. Анашин В.В., Валька И.Е., Гаврилов Н.Г. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1995. Т. 4. С. 177.
9. Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kruglyakov E.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1995. V. A359. P. 155.
10. Martynov V.V., Vidal B., Vincent P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1994. V. A339. P. 617.
11. Yerofeyev V.I., Kovalenko N.V. // J. X-Ray Sci. and Tech. 1997. V. 7. P. 75.

A Use of the X-ray Multilayer Gratings on SR

V. I. Erofeev, N. V. Kovalenko, V. A. Chernov, N. I. Chkhalo, S. V. Mytnichenko

In this paper we present the main results at the fabrication, theoretical and experimental studies of X-ray multilayer gratings. The experimental data of multilayer grating reflectivity in comparison with the numerical modelling are presented. The numerical simulation of multilayer grating diffraction efficiency by the method of eigenvectors shows that properties of crystals and multilayer gratings in hard X-rays are similar. The effects of diffuse X-ray scattering from multilayer grating have been discussed. Aspects of polychromatic concept based on the application of the multilayer grating in hard X-rays of SR are discussed.