

МНОГОСЛОЙНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА В СИБИРСКОМ ЦЕНТРЕ СИ

Коваленко Н.В.¹, Мытниченко С.В.², Чернов В.А.³¹ *Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск, Россия*² *Институт химии твердого тела и механохимии, Новосибирск, Россия*³ *Институт катализа, Новосибирск, Россия*

Первоначальным импульсом развития многослойной рентгеновской оптики в ИЯФ послужила проблема диагностики плазмы в мягком рентгеновском диапазоне. Для решения этой задачи были развиты современные технологии напыления многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) и производство подложек рентгенооптического качества. В настоящее время для изготовления многослойных структур применяются методы лазерного и магнетронного напыления. Аттестация МРЗ осуществляется в мягком и жестком рентгеновских диапазонах.

Огромный потенциал многослойной оптики применительно к СИ привел к появлению неформальной группы сотрудников Сибирского центра с целью, как развития многослойной оптики, так и ее последующего применения в различных рентгеновских методах. С другой стороны эти же методы (дифракция, диффузное рассеяние, EXAFS и др.) используются для исследования внутренней структуры МРЗ. Углубленное понимание строения элементов многослойной оптики приводит в свою очередь к совершенствованию технологии их изготовления и как следствие улучшению их рентгенооптического качества.

Активность группы в области многослойной оптики определяется следующими направлениями:

1. Создание светосильных монохроматоров первичного пучка и анализаторов вторичного излучения на основе МРЗ.

Использование МРЗ в качестве первичных монохроматоров СИ позволяет увеличить интенсивность монохроматического пучка на 1-2 порядка ввиду увеличения спектральной полосы отражения по сравнению с кристаллами. Это позволяет резко поднять экспрессность методов, не требующих высокого энергетического разрешения. С этой целью короткопериодные W/Si многослойные зеркала были использованы в качестве первичного монохроматора на станции элементного анализа ВЭПП-3. Измерения подтвердили увеличение интенсивности пучка накачки более чем на 1 порядок без ухудшения чувствительности самого метода.

В области мягкого рентгеновского излучения (0.1-1 кэВ) МРЗ частично компенсируют отсутствие кристалл-анализаторов с большими периодами. Несмотря на некоторые затруднения связанные с необходимостью использования как минимум трех различных типов многослойных покрытий зеркал они позволяют полностью перекрыть этот диапазон. С этой целью они успешно используются для спектральных измерений на станции метрологии ВЭПП-2М.

Для выделения вторичного рентгеновского излучения образца (элементный анализ, EXAFS спектроскопия по флуоресцентному выходу, MCD спектроскопия и т.д.) нами был предложен новый тип анализатора спектра, основанный на использовании плоского МРЗ с радиально увеличивающимся периодом. Данный анализатор позволяет легко перестраиваться по энергии в широких пределах (до 10 кэВ) с относительным энергетическим разрешением 2÷3%. Большое значение геометрической светосилы анализатора ($0.1 \div 0.3$ стер.) обеспечивается кольцевой геометрией зеркала.

2. Разработка и создание эффективных рентгенооптических элементов с высоким спектральным разрешением.

Ввиду конечного значения (100-200) числа когерентно отражающих периодов МРЗ (что связано как с проблемами технологии их изготовления, так и с фотопоглощением) они не способны обеспечить спектральное разрешение лучше 0.5-1%. Изящным выходом из этого

положения являются многослойные дифракционные решетки (МДР). Формирование, каким либо образом, дополнительного строго периодического рельефа решетки вдоль МРЗ позволяет получить МДР с высоким спектральным разрешением. Отличительными особенностями решеток данного типа являются: высокая эффективность при больших углах отражения рентгеновского излучения, способность концентрации отраженного излучения в один дифракционный порядок с практически полным подавлением других порядков, резкое уменьшение доли рассеянного излучения и т.д.

Благодаря таким достоинствам МДР являются, по-видимому, единственным реальным претендентом для работы в «трудном» спектральном диапазоне (1-3 кэВ), где обыкновенные решетки уже не работают, а кристаллы еще не достаточно эффективны. Использование МДР в более жестком диапазоне СИ также привлекательно ввиду того, что они, в отличие от кристаллов, являются полихроматическими диспергирующими элементами. Это позволяет использовать большую часть спектра СИ и таким образом существенно (в 30-50 раз) повысить эффективность спектрометра. При благоприятных условиях (ондулятор на источнике СИ третьего поколения и эффективный координатный детектор) использование МДР позволит производить регистрацию всех точек спектра поглощения за наносекундное время (FLASH-XAFS).

Эти и другие доводы хорошо объясняют нашу долговременную активность по созданию разнообразных МДР и их исследованию.

3. Разработка и создание рентгеновских волноводов.

Применение тонкопленочных планарных волноводов в оптоэлектронике оказалось столь впечатляющим, что представляется интересным сконструировать подобную оптику для жесткого рентгеновского диапазона. С этой целью мы начали работы по изготовлению, теоретическим и экспериментальным исследованиям планарных волноводов с «боковой» накачкой.

Волновод представляет собой трехслойную структуру, состоящую из двух слоев материала с большой плотностью разделенных слоев слабопоглощающего материала. Верхний слой делается достаточно тонким, для того чтобы пучок накачки, падающий на волновод под углом меньшим угла полного внешнего отражения, мог частично просочиться в волновод и возбудить волноводную моду. Резонансно усиленное излучение выходит из торца волновода. Теоретически рассчитанное усиление (отношение плотностей излучения выходного и падающего пучков) может достигать значений 100-1000. Волновод оказывается уникальным высокоинтенсивным источником расходящегося излучения с размером источника менее 100 нм (по одной координате). Такие пучки интересны для применения в рентгеновской микроскопии, микродифракции, MTR REFL-XAFS и для литографии и LIGA-технологии.

Выбранная нами стратегия на изготовление бериллиевых волноводов оказалась достаточно удачной. Уже первые эксперименты на ESRF с Mo/Be/Mo волноводами показали рекордные значения усиления (на уровне 100 для области 8-20 кэВ) и хорошо соответствовали расчету. Переход на C/Be/C волноводы привел к дальнейшему прогрессу. Эксперименты, проведенные на ВЭПП-3, показали усиление порядка 300 при возбуждении TE_0 волноводной моды на энергии 8 кэВ.

Работа проводится при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 99-02-16671 и 00-02-17624).

Владимир Александрович Чернов n.v.kovalenko@inp.nsk.su

Multilayer X-ray Optics at Siberian sr Center

Chernov V.A.¹, Kovalenko N.V.², Mytnichenko S.V.³

¹ Borekov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russia

² Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

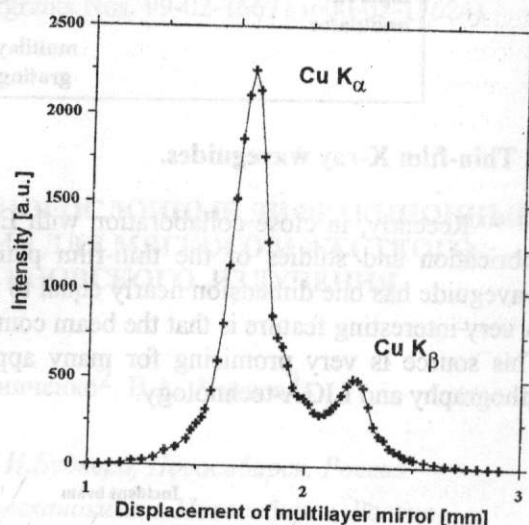
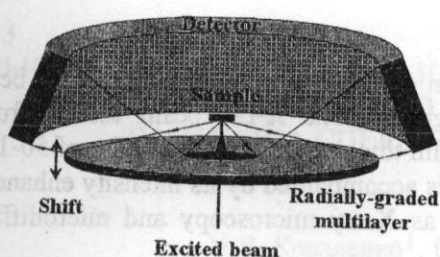
³ Institute of Solid State Chemistry, Novosibirsk, Russia

1. Use of multilayers.

The use of multilayers instead of crystals allows one to increase the spectral band of the reflected beam. Since SR has a very smooth spectrum the multilayers reflect beam with a 1-2 order higher intensity. It makes possible to decrease the time of measurements in experiments where high resolution is not needed. With this in mind the short-period W/Si multilayers were tested in primary monochromator of the X-ray fluorescent analysis station at VEPP-3 storage ring. Measurements confirm the increase of the monochromator output beam by approximately one order without worsening of the method sensitivity.

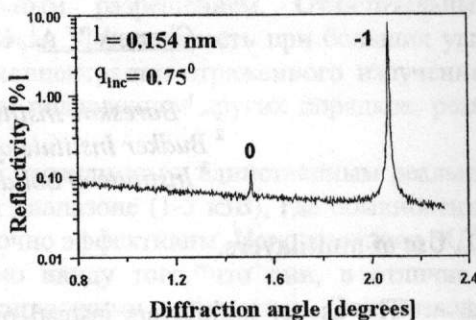
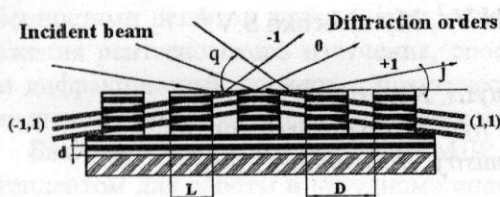
In soft X-ray range (0.1-1 keV) where long-period crystals are absent the multilayers being simple and inexpensive dispersive elements may be used for spectral measurements. Four types of multilayers produced at BINP (Y/Mo, Ni/C, Fe/Ca and W/Si) completely cover this energy range. The double-multilayer monochromator is operated at the metrology station of VEPP-2 storage ring.

In order to select X-ray fluorescence photons (X-ray fluorescent analysis, fluorescent EXAFS-spectroscopy, MCD-spectroscopy and so on) we proposed new spectral analyser using flat radially graded multilayer. For the special case of small Bragg angles, in order to reflect monochromatic beam from a point source, a flat mirror substrate has to be covered by multilayer with period as a linear function of radius. This analyser is easily tuned over a wide energy range by only changing the distance sample-mirror. A ring-like shape of the multilayer mirror provides a sufficiently large detection solid angle ($0.1 \div 0.3$ sr). Analyser can be used up to 10 keV photons with achievable spectral resolution of 2÷3%.



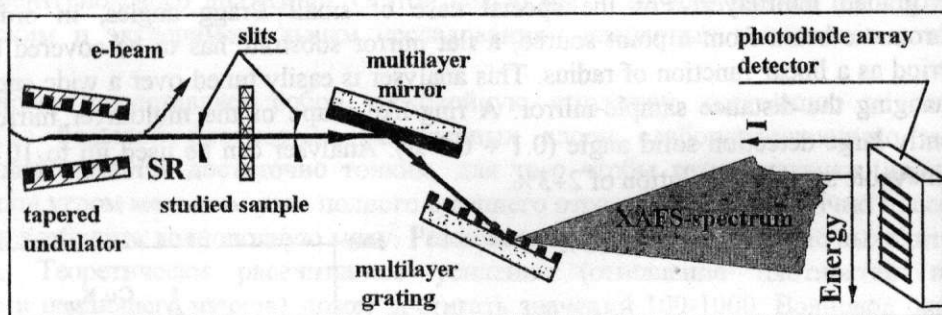
2. Development of multilayer optics with high spectral resolution.

Because of limited number of the coherent periods (100-200), that is caused by both technology problems and extinction effects, multilayers not allow one to obtain the energy resolution better than 0.5-1%. The use of Multilayer Gratings (MG) is an elegant method to overcome this problem. The highly coherent grating pattern fabricated by any method along the multilayer mirror can provide high spectral resolution of this optical element. The remarkable features of MGs are: high efficiency at larger angles of diffraction, the possibility to concentrate the reflected beam to one reflection order with nearly complete suppression of other orders, the remarkable decreasing of incoherently scattering background and so on.



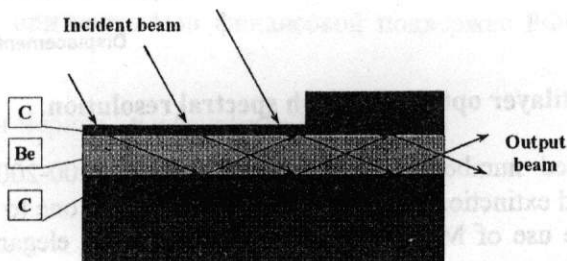
Due to these features MG seems to be the unique candidate for the “difficult” energy range (1-3 keV) where the usual gratings and crystals are not efficient.

Using MGs allows one to extend the range of dispersive optics to hard energy X-rays. In this respect, MGs are an alternative to crystals conventionally used in this range of SR. Unlike crystals MGs are polychromatic elements. This feature is unique for dispersive optics and favours for spectroscopy applications. It makes possible to extract and disperse a large portion of X-rays from the wide-band SR source. This gives a 30-50 fold enhancement of the registered photon flux. Under favourable conditions (undulator radiation from third generation SR source and high efficient position sensitive detector) MDG use allows one to obtain the complete absorption spectrum for a one bunch flash time (3-5 nsec).



3. Thin-film X-ray waveguides.

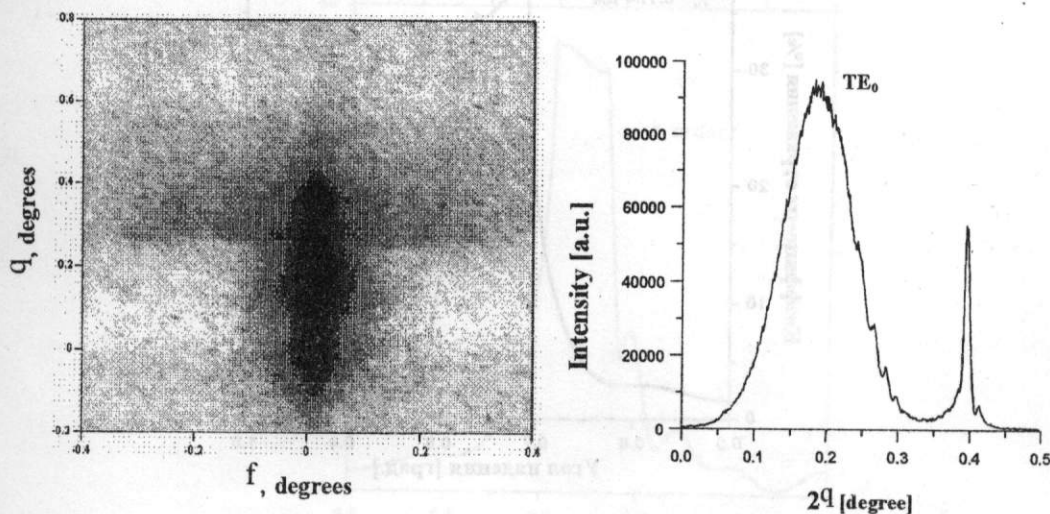
Recently, in close collaboration with Elettra team (S. Di Fonzo and W. Jark), we begin the fabrication and studies of the thin-film planar waveguides. The X-ray beam exiting from this waveguide has one dimension nearly equal to the thin film thickness, i.e., of the order of 50-100 nm. A very interesting feature is that the beam compression is accompanied by its intensity enhancement. This source is very promising for many applications as X-ray microscopy and microdiffraction, lithography and LIGA-technology.



The thin-film X-ray waveguide represents a triple layer structure: the middle (guiding) layer is a low-absorbing film sandwiched between two layers with smaller refractive index. Beam coupling is achieved by making the top layer sufficiently thin so that the evanescent wave, generated by

reflection of the incident beam at angles less than the critical angle θ_c , can penetrate through the top layer. For particular grazing angles of the incident beam, in strict analogy with standing wave excitation in resonator, this evanescent wave can resonantly excite the waveguide modes. The resonantly trapped radiation travels along waveguide and emerges from the waveguide edge. For an ideal waveguide illuminated by a perfect and monochromatic beam, theory predicted a possible flux gain of 10^2 – 10^3 -fold.

We have chosen beryllium metal as a low-absorbing material for the waveguide designing. For 8–20 keV photon range, the record 100-fold flux increase with Mo/Be/Mo waveguides was achieved in the first experiments at ESRF. This value agrees well with theoretical predictions. Further progress was done with C/Be/C waveguides. Unprecedented approximately 300-fold amplification (the ratio of the incident beam flux density to the excited TE_0 mode one) was observed at 8 keV in experiments at VEPP-3 storage ring.



This work was partially sponsored by RBRF (grants Nos. 99-02-16671 и 00-02-17624).

Vladimir A. Chernov n.v.kovalenko@inp.nsk.su

8-113

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ФАЗОВЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ СКОльзяЩЕГО ПАДЕНИЯ ДЛЯ МЯГКОГО И ЖЕСТКОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.В. Коваленко¹, С.В. Мытниченко², В.А. Чернов³

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

2 - Институт химии твердого тела и механохимии, Новосибирск, Россия

3 - Институт катализа им. Борескова, Новосибирск, Россия

Для использования в качестве дисперсионных элементов рентгеновского излучения предлагается новый тип рентгеновских многослойных дифракционных решеток - фазовые многослойные решетки скользящего падения. Отличительной особенностью многослойных решеток является то, что положительные порядки решетки имеют два пика отражения. Один пик соответствует отражению в порядок многослойной решетки, а другой соответствует отражению излучения под углом полного внешнего отражения ^{/1/}. При определенном угле падения падающего пучка, для выполнения амплитудно-фазовых условий для излучения отраженного решеткой и излучения отраженного от (многослойной) подложки, можно

добиться концентрации выходного излучения под углом полного внешнего отражения. Максимальные значения эффективности фазовых многослойных решеток достигают 30-70% в области энергий 0.1-10 кэВ. Интересной особенностью данной решетки является сжатие выходного пучка (в 10-20 раз) за счет сильной асимметрии отражения.

Нами была разработана и исследована фазовая многослойная дифракционная решетка для излучения с энергией порядка 8.0 кэВ. Структура решетки состоит из Ni/C многослойного зеркала с периодом 6.7 нм, на поверхности которого сформирована Pt решетка периодом 2000 нм и глубиной штриха 5.5 нм. Предварительные экспериментальные исследования эффективности данной решетки показали, что значения коэффициента отражения в +1 порядок решетки при углах отражения $\sim 0.1^\circ$ находится в хорошем соответствии с теорией.

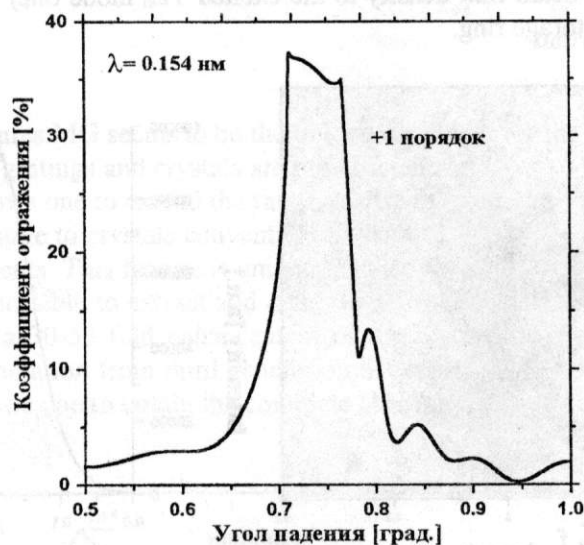


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения рентгеновского излучения от угла падения для +1 дифракционного порядка Pt-Ni/C фазовой многослойной решетки скользящего падения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проекты №№ 99-02-16671 и 00-02-17624.

Литература:

1. A. Sammar, J.-M. Andre, B. Pardo. Diffraction and scattering by lamellar amplitude multilayer grating in X-UV region. Optic Communications 86 (1991) 245-254

Николай Владимирович Коваленко n.v.kovalenko@inp.nsk.su

A HIGH EFFICIENCY GRAZING INCIDENCE PHASE MULTILAYER GRATINGS FOR SOFT AND HARD X-RAY RANGES

Chernov V.A.¹, Kovalenko N.V.², Mytnichenko S.V.³

¹ Siberian SR Center at Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

² Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

³ Institute of Solid State Chemistry, Novosibirsk, Russia

We propose to use as x-ray dispersive elements a new type of x-ray multilayer gratings - grazing incidence phase multilayer gratings. The distinctive feature of an x-ray multilayer grating is that a positive diffraction orders have at least two peaks of reflection: one peak corresponds to reflection in "conventional" multilayer grating order, another peak corresponds to x-rays reflected at

the total external reflection conditions^{1/}. For a given incidence angle, when the phase and amplitude matching between x-rays reflected from upper grating structure and bottom (multilayer) substrate is completed, a great increase of reflection at the critical angle θ_c can be obtained. A maximum diffraction efficiency of these gratings ranges up to 30-70% at energy range 0.1-10 keV. What is more, by virtue of the fact that the reflection of x-ray occurs at the angles significantly less than the incidence angles, an additional compression of x-ray beam will be obtained

The grazing incidence phase multilayer grating for x-ray energy above 8.0 keV was developed. The grating structure consists of the Ni/C multilayer with period 6.7 nm, on the top of multilayer, Pt grating with period 2000 nm and depth of groove 5.5 nm was formed. The preliminary experimental investigation of diffraction efficiency of the grating shows that the reflectivity of +1 diffraction order is in reasonably good agreement with the theory.

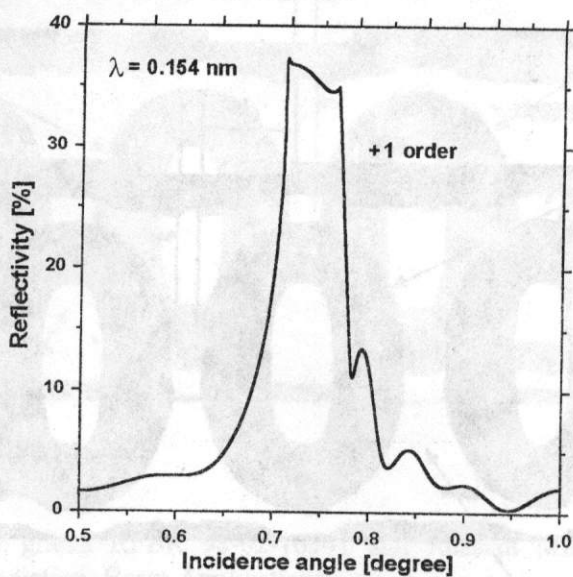


Fig. 1. Reflectivity of +1 diffraction order of Pt-Ni/C phase multilayer grating versus incidence angle.

The work was partially supported by RBRF, grants Nos. 99-02-16671 and 00-02-17624.

References:

1. A. Sammar, J.-M. Andre, B. Pardo. Diffraction and scattering by lamellar amplitude multilayer grating in X-UV region. *Optic Communications* 86 (1991) 245-254

Nikolay Kovalenko *n.v.kovalenko@inp.nsk.su*

8-15

ФОКУСИРОВКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРОКАПИЛЛЯРНЫХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ЛИНЗАХ

В.В.Аристов, Л.Г.Шабельников

ИПТМ РАН, 142432 Черноголовка, Моск. обл, Россия

Ю.И.Дудчик, Н.Н.Кольчевский, Ф.Ф.Комаров

НИИ прикладных физических проблем, Курчатова 7, 220064 Минск, Беларусь

В.В.Протопопов

ФТИ РАН, Нахимовский пр. 34, 117218 Москва