

РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА: КАК И ЧТО УВИДИМ?

1. Преломляющая рентгеновская оптика: статус, проблемы и перспективы (А.А.Снигирев)
2. Рентгеновская оптика дифракционного качества: технология, метрология, применения (Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов)
3. Многослойная рентгеновская оптика на основе бериллия (В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало)
4. Методы повышения разрешения и чувствительности в микротомографии путем использования рентгено-оптических элементов (В.Е. Асадчиков)
5. Рентгеновская оптика косоугольного падения и её приложение в проекте орбитальной астрофизической обсерватории «Спектр-РГ» (М.Н. Павлинский, А.А. Лутовинов)

Преломляющая рентгеновская оптика: статус, проблемы и перспективы

А.А. Снигирев, Балтийский федеральный университет им. И. Канта
Калининград, Россия, e-mail: anatoly.snigirev@gmail.com

С момента первой успешной экспериментальной демонстрации фокусировки преломляющими линзами рентгеновских лучей [1], область применения рефракционной оптики существенно расширилась, значительно перекрыв зону применения традиционных рентгеновской оптики – кристаллов и зеркал. Сегодня такая оптика активно используется на всех современных высоко-энергетических (>2 ГэВ) источниках синхротронного излучения 3-го поколения и лазерах на свободных электронах (XFEL). Такое стремительное развитие обусловлено успехами, как в разработке самих оптических элементов, так и специальных перестраиваемых устройств на основе преломляющих линз - трансфокаторов [2], позволяющих работать в широком диапазоне энергий от 2 до 200 кэВ. Помимо их применения в традиционных задачах микро-фокусировки, они также могут использоваться в качестве конденсоров с настраиваемым размером пучка, коллиматоров, обеспечивающих микро-радианную расходимость пучка, монохроматоров - фильтр низких частот [2], устройств для подавления высоких гармоник [3], Фурье преобразователей [4].

Улучшенные характеристики пучков, производимых новыми источниками синхротронного излучения 4-го поколения с уменьшенным горизонтальным эмиттансом, откроют уникальную возможность для создания эффективных систем транспорта пучка на основе преломляющей оптики. В связи с существенным уменьшением горизонтального размера источника и расходимости пучка, такие системы могут передавать пучок фотонов практически без потерь от источника до исследуемого образца или любых промежуточных узлов оптической схемы (зеркал, кристаллов, линз и т.д.). Очевидно, экспериментальные станции получают значительные преимущества при использовании

легко перестраиваемых систем на основе преломляющих линз, установленных сразу после источника. В этой связи, разработка радиационно- и термо-устойчивой алмазной оптики имеет решающее значение [5-8]. Реализация системы транспортировки пучка на основе преломляющих линз значительно упростит компоновку большинства новых станций [9], что открывает дополнительные возможности в исследовании материалов в экстремальных условиях [10, 11]. Это также позволит плавно перейти, в процессе модернизации, от текущих параметров пучка, на существующих станциях, к улучшенным характеристикам, избегая серьезных изменений оптической схемы [12].

Применения преломляющей оптики могут быть распространены в область Фурье-оптики, когерентной дифракции и микроскопии [12-16]. Для изучения 3-D структуры фотонных кристаллов и мезоскопических материалов [17-19], были предложены методы когерентной дифракционной микроскопии и высокоразрешающие дифракционные методы использующие преломляющую линзу в качестве Фурье преобразователя. Особый интерес представляют формователи пучка – аксиконы [20], позволяющие создавать заданной формы волновые фронты. В этой связи, использование новых аддитивных технологий 3-х мерной печати для моделирования и создания рентгеновской микро-оптики трудно переоценить [21,22].

Рентгеновская интерферометрия – еще одно перспективное направление развития преломляющей оптики. Недавно предложенные много-линзовый интерферометры могут генерировать интерференционное поле с переменным периодом в диапазоне от десятков нанометров до десятков микрометров [23-25]. Этот простой способ создания рентгеновский стоячей волны в параксиальной геометрии открывает возможность разработки новых методов рентгеновской интерферометрии для изучения природных и искусственных наноматериалов, таких как самоорганизующиеся биосистемы, фотонные и коллоидные кристаллы, объекты наноэлектроники. Такое устройство может быть использовано в качестве классического интерферометра для построения фазово-контрастных изображений и радиографии, а также может быть полезно для характеристики когерентных свойств высокоэнергетических рентгеновских источников.

- [1] A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler, *Nature*, 384, 49 (1996).
- [2] G.B.M. Vaughan, J.P. Wright, A. Bytchkov et al, *J. Synchrotron Rad.*, 18, 125 (2011).
- [3] M. Polikarpov, I. Snigireva, A. Snigirev, *J. Synchrotron Rad.*, 21, 484 (2014).
- [4] M. Lyubomirskiy, I. Snigireva, A. Snigirev, *Optics express*, 24, 13679 (2016).
- [5] M. Polikarpov, I. Snigireva, J. Morse et al, *J. Synchrotron Rad.*, 22, 23 (2015).
- [6] S. Terentyev, V. Blank, S. Polyakov et al, *Appl. Phys. Lett.*, 107, 111108 (2015).
- [7] M. Polikarpov, I. Snigireva, A. Snigirev, *AIP Conference Proceedings*, 1741, 040024, 2016.
- [8] Q. Zhang et al., *J. Synchrotron Rad.*, 26 (2019) 109.
- [9] M. W. Bowler, D. Nurizzo, R. Barrett et al, *J. Synchrotron Rad.*, 22, 1540 (2015).
- [10] N. Dubrovinskaia , L. Dubrovinsky, N. A. Solopova, et al, *Sci. Adv.*, 2, e1600341, (2016).
- [11] F. Wilhelm, G. Garbarino, J. Jacobs, et al, *High Pressure Research*, 36, 445 (2016).
- [12] Orange Book “ESRF Upgrade programme Phase II 92015-2022), *Technical Design Study*”, G. Admans, et al eds., (2014).
- [13] V. Kohn, I. Snigireva, A. Snigirev, *Opt. Comm.*, 216, 247 (2003).
- [14] M. Drakopoulos, A. Snigirev, I. Snigirev, J. Schilling, *Appl. Phys. Lett.*, 86, 014102 (2005).
- [15] P. Ershov, S. Kuznetsov, I. Snigireva et al, *Appl. Cryst.*, 46, 1475 (2013).
- [16] H. Simons, A. King, W. Ludwig et al, *Nature Communications*, 6, 6098 (2015).
- [17] A. Bosak, I. Snigireva, K. Napolskii, A. Snigirev, *Adv. Mater.*, 22, 3256 (2010).
- [18] D. V. Byelov, J.-M. Meijer, I. Snigireva et al, *RSC Advances*, 3, 15670.V (2013).
- [19] V. Kohn, I. Snigireva, A. Snigirev, *J. Synchrotron Rad.*, 21, 729 (2014).
- [20] D. Zverev, A. Barannikov, I. Snigireva, A. Snigirev, *Opt. Express*, 25 (2017) 28469-28477.
- [21] A. K. Petrov, V. O. Bessonov, K. A. Abrashitova et al, *Opt. Express*, 25 (2017) 14173.
- [22] A. Barannikov, M. Polikarpov, P. Ershov et al, *J. Synchrotron Rad.* (2019)
- [23] A. Snigirev, I. Snigireva, V. Kohn et al, *Phys. Rev. Lett.*, 103, 064801 (2009).

[24] A. Snigirev, I. Snigireva, M. Lyubomirskiy, et al, Optics express, 22(21), 25842 (2014).

[25] M. Lyubomirskiy, I. Snigireva, V. Kohn, et al, J. Synchrotron Rad., 23, 1104 (2016).

Рентгеновская оптика дифракционного качества: технология, метрология, применения

Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

– докладчик: *Николай Иванович Чхало*

Аннотация

Прогресс последних лет в технологии роста многослойных интерференционных зеркал (МИЗ) нормального падения позволил приступить к решению амбициозной задачи – переносу традиционных методов управления световыми пучками в экстремальный ультрафиолетовый (ЭУФ) и мягкий рентгеновский (МР) диапазоны длин волн. Благодаря короткой длине волны, низкому рассеянию и резонансному характеру взаимодействия с веществом, излучение этого диапазона предоставляет уникальные возможности для нанофизики, нанотехнологии и нанодиагностики веществ. Наибольший объем информации о физических процессах, происходящих на Солнце, получается из исследований короны Солнца в ЭУФ и МР диапазонах. Широкополосные МИЗ позволяют транспортировать, фокусировать, проводить спектральный анализ атто- и суб-аттосекундных импульсов электромагнитного излучения без «размытия» волнового пакета, либо даже укорачивать его во времени.

Для использования потенциала МИЗ для изображения и транспортировки пучков без искажений волновых фронтов необходима оптика дифракционного качества для рентгеновского диапазона. По сравнению с традиционной оптикой ее точность должна быть как минимум на два порядка выше. Традиционные методы изготовления и изучения зеркал не обеспечивают этих требований.

В докладе сообщается о развиваемых в ИФМ РАН новых методах изготовления и характеристики оптики дифракционного качества для ЭУФ- и МР-диапазонов. Приводятся примеры применения данной оптики для задач внеземной астрономии, рентгеновской микроскопии и литографии.

Многослойная рентгеновская оптика на основе бериллия

В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало, Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

– докладчик: *Владимир Николаевич Полковников*

Аннотация

Доклад посвящен исследованиям бериллий-содержащих многослойных зеркал (МЗ). Еще в 1990-х годах бериллий применялся в мягком рентгеновском (МР) и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах в качестве слабопоглощающего материала (спейсера). Однако МЗ на основе спейсера Ве обеспечивали высокие коэффициенты отражения только в очень узком диапазоне длин волн 11,2–12,4 нм. На других длинах волн бериллий-содержащие МЗ уступали традиционным МЗ на основе спейсеров Si, Al и Mg. В ходе наших работ было показано, что в диапазоне длин волн $\lambda > 17,1$ нм бериллий

обладает уникальным сочетанием мнимой и действительной частей показателя преломления. Это позволяет использовать Ве в качестве рассеивающего материала и в этом качестве одновременно получать и рекордно высокие коэффициенты отражения и спектральную селективность. Гладкость дисперсионной зависимости коэффициента преломления Ве позволяет использовать его в коротковолновой части МР-спектра в качестве основы МЗ, предназначенных для применения в широком диапазоне длин волн. Кроме того, применение методики барьерных слоев позволило нам добиться рекордных значений отражения бериллий-содержащих МЗ в диапазоне 11,2–14 нм.

Методы повышения разрешения и чувствительности в микротомографии путем использования рентгено-оптических элементов

В.Е. Асадчиков, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

– докладчик: Виктор Евгеньевич Асадчиков

Аннотация

В настоящее время рентгеновская томография является широко распространенным методом исследования пространственной структуры объектов в различных областях науки и техники. Компьютерная (рентгеновская) томография стала одним из основных диагностических методов в современной медицине. Однако, достигаемые в этих приборах пространственное разрешение и чувствительность оказываются недостаточными для использования приборов во многих иных применениях. Существенным недостатком серийных рентгеновских томографов является тот факт, что инструменты обеспечивают возможность определения поглощения лишь в относительной шкале Хаунсфелда.

Повышение разрешения и чувствительности в настоящее время (ввиду ряда ограничений) может быть достигнуто лишь при уменьшении поля зрения. По этой причине активно ведутся исследования в области рентгеновской микротомографии. Основными возможностями повышения разрешения являются проекционное увеличение при использовании микрофокусных источников и/или использование рентгено-оптических элементов. К их числу относятся капиллярные линзы, зонные пластинки Френеля, асимметричные отражающие кристаллы (Bragg magnifiers), а также многослойные рентгеновские зеркала, которые, однако, могут быть эффективно применены лишь для мягкого рентгеновского излучения. Отметим, что применение монохроматического излучения позволяет определять значения линейных коэффициентов поглощения, что существенно повышает качество получаемой информации.

В докладе показаны возможности применения этих элементов в рентгеновской микротомографии как в нашей стране, так и за рубежом. Отдельно рассмотрен вопрос повышения чувствительности рентгеновских томографов путем применения фазочувствительных методов, что также достигается, в том числе, с использованием различных рентгено-оптических элементов. К последним, кроме выше перечисленных, относятся и дифракционные решетки (Тальбо интерферометрия). Приведены примеры исследования трёхмерной структуры образцов различной природы при различном пространственном разрешении.

Рентгеновская оптика косо́го падения и её приложение в проекте орбитальной астрофизической обсерватории «Спектр-РГ»

М.Н.Павлинский, А.А. Лутовинов, ИКИ РАН, Москва

– докладчик: *Михаил Николаевич Павлинский*

Аннотация

В период с 2007 по 2016 год в ИКИ РАН и РФЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров) велась работа по изготовлению рентгеновского зеркального телескопа косо́го падения ART-XC для орбитальной астрофизической обсерватории «Спектр-РГ» (запуск обсерватории запланирован на 21 июня 2019 года). В рамках этих работ шла разработка технологий изготовления рентгеновских зеркал методом гальванопластики на основе никеля и никель-кобальта с иридиевым покрытием. Сложность задачи заключалась в изготовлении зеркал, позволяющих работать до энергий ~ 30 кэВ с угловым разрешением $\leq 1'$ в поле зрения более $\geq 30'$. Представлены технологические наработки, решение задачи метрологического обеспечения и результаты наземных испытаний на специализированном калибровочном стенде рентгеновской оптики косо́го падения в паре с разработанным позиционно-чувствительным и спектрометрическим полупроводниковым детектором на базе CdTe. В совокупности семь зеркальных систем телескопа ART-XC обеспечивают эффективную площадь ~ 460 см² по оси зрения на энергии 8 кэВ.