

УДК 53.084.2

РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРАНСФОКАТОРЫ: ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ФОКУСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СОСТАВНЫХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ЛИНЗ

© 2023 г. А. С. Нарикович^а, И. И. Лятун^а, Д. А. Зверев^а, И. Б. Панормов^а, А. А. Лушников^а,
А. В. Сеницын^а, А. А. Баранников^а, П. Н. Медведская^а, А. С. Коротков^а, А. А. Снигирев^а, *

^аМеждународный научно-исследовательский центр “Когерентная рентгеновская оптика для установок
Мегасайенс”, Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, 236041 Россия

*e-mail: asnigirev@kantiana.ru

Поступила в редакцию 22.01.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Представлено новое поколение ультракомпактных и высоковакуумных охлаждаемых трансфокаторов на основе преломляющих линз для задач коллимации, транспорта и фокусировки жесткого рентгеновского излучения. Трансфокатор представляет собой оптическое устройство способное изменять положение фокуса в зависимости от количества рентгеновских преломляющих линз, которые выставлены по оптическому пути прохождения рентгеновского излучения. Конструкционные особенности представленного устройства позволяют управлять отдельными оптическими элементами независимо друг от друга, обеспечивая более гибкую настройку фокусного расстояния для широкого круга приложений. Малые габаритные размеры и небольшой вес устройств позволяют интегрировать их на любую станцию синхротронного излучения.

Ключевые слова: рентгеновская оптика, трансфокатор, преломляющие рентгеновские линзы, рентгеновская микроскопия, синхротронное излучение, алюминий, бериллий, алмаз.

DOI: 10.31857/S1028096023110146, **EDN:** WEVMWI

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия ознаменованы интенсивным развитием когерентных методов исследования с использованием рентгеновского излучения. Мировые тенденции в разработке новых методов исследования тесно связаны с использованием специализированных источников синхротронного излучения (СИ) нового поколения. В настоящее время эти источники приблизились к пределу своих характеристик по размеру источника, эмиттанса, яркости излучения, когерентности и временной структуре. Пучки СИ с минимальным значением эмиттанса около 100 пм рад уже были получены на источниках четвертого поколения СИ MAX-IV в Швеции [1] и ESRF-EBS в Гренобле [2]. В настоящее время ведется модернизация магнитных систем накопительных колец существующих источников СИ до четвертого поколения. В России ведутся работы по созданию центров с установками класса “Мегасайенс”: проектирование и строительство синхротронов, способных формировать дифракционно-ограниченные источники излучения с предельно малым эмиттансом и чрезвычайно высокой яркостью, поколения 4+ [3].

Для перехода к новому поколению источников СИ требуются новые технологии, методы исследования и оптика, задачи которой выходят за рамки обычной фокусировки. Опыт применения источников третьего поколения показал, что достижение передовых результатов обусловлено развитием технологических и конструктивных особенностей инструментальной базы синхротронных станций. Одним из наиболее ярких примеров внедрения новых научно-технологических решений является рентгеновская преломляющая оптика [4]. С момента первой экспериментальной демонстрации фокусировки рентгеновского излучения с помощью составной преломляющей линзы (СПЛ), область применения такой оптики постоянно расширялась, значительно перекрыв зону применения традиционных оптических элементов — кристаллов и зеркал.

Относительная простота изготовления, низкая стоимость и низкие требования к качеству поверхности [5] способствовали быстрому развитию технологий изготовления и внедрения рентгеновских преломляющих линз как базового инструментария на источниках СИ. СПЛ позволяют решать задачи по формированию пучка СИ в ка-

честве конденсоров с настраиваемым размером пучка, коллиматоров, обеспечивающих микро-радианную расходимость пучка [6], формирователей пучков, которые способны преобразовать падающее когерентное монохроматическое излучение в интерференционное поле [7], Фурье преобразователей [8], а также использоваться для фильтрации высших гармоник [9]. СПЛ широко используются для рентгеновской визуализации и микроскопии [10, 11], интерферометрии [12–14] и спектроскопии [15]. На сегодняшний день, рентгеновская микроскопия на основе составных преломляющих бериллиевых линз является одним из наиболее информативных рентгеновских методов исследования, особенно в жесткой области энергий рентгеновского излучения. Метод используется для неразрушающего исследования особенностей внутренней структуры объектов в широком спектре направлений исследований, таких как материаловедение, биология и медицина.

Четвертое поколение источников синхротронного излучения со значительно увеличенной яркостью пучка и высокой тепловой нагрузкой предъявляет дополнительные требования к материалам рентгеновских линз. Так, например, если на источнике третьего поколения ESRF (Франция) максимальная яркость достигала 10^{21} фотон/с/мрад²/мм²/0.1% BW (BW – ширина энергетической полосы пропускания), то после модернизации станции, максимальная яркость увеличилась до 10^{23} [16]. Поэтому оптика нового поколения должна быть устойчивой к сверхвысоким тепловым и радиационным нагрузкам, обладать низким коэффициентом теплового расширения и высокой однородностью оптических свойств. Одним из таких материалов является алмаз, который получил широкое распространение для использования в “белых” (высокомощных и немонахроматических) пучках [17]. Алмазные преломляющие линзы используются как пре-фокусирующие и пре-коллимирующие рентгенооптические элементы [18] для решения задачи передачи излучения с минимальными потерями интенсивности и искажений на экспериментальные станции СИ.

Широкое распространение рентгеновских СПЛ обусловлено не только успехами разработок самих оптических элементов, расширением номенклатуры материалов изготовления, но и созданием специальных устройств на основе преломляющих линз – трансфокаторов [19]. Изменяя форму, состав и количество отдельных линз, установленных в устройство, трансфокаторы можно адаптировать к широкому диапазону энергий, обеспечивая гибкую настройку фокусных расстояний и универсальность для широкого спектра методов исследований. Имея возможность настройки постоянной энергии и фокусного расстояния трансфокаторы могут использоваться в качестве системы

коллимации пучка, а также в качестве короткофокусного увеличительного объектива.

На источниках СИ и лазерах на свободных электронах многие экспериментальные методы требуют, чтобы образец и рентгеновский пучок находились в строго определенной геометрии. Поэтому при компоновке оптической схемы эксперимента возникает необходимость использования современных оптических элементов, имеющих минимальные габаритные размеры. В данной работе мы представляем описание нового поколения ультракомпактных трансфокаторов (УКТФ), высоковакуумных охлаждаемых трансфокаторов и совместимых элементов рентгеновской преломляющей оптики, разрабатываемых в Российской Федерации для установок класса “Мегасайенс”. Главными характеристиками устройств являются компактные размеры, малый вес и высокая точность позиционирования элементов рентгеновской оптики. В работе также содержится описание основных характеристик и параметров элементов преломляющей рентгеновской оптики, изготавливаемых в Международном исследовательском центре “Когерентная рентгеновская оптика для установок Мегасайенс” БФУ им. И. Канта.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРАНСФОКАТОРЫ

Одними из первых прототипов трансфокатора стали планарные преломляющие линзы. Помимо новаторских решений в дизайне, технологии изготовления и оптических свойств планарной линзы, еще одним значимым аспектом была идея удобства использования параболической оптики в различных экспериментальных схемах. В частности, в 2004 г. была предложена оптическая система СПЛ из кремния с фиксированным фокусным расстоянием 0.5 м [20], изготовленная по технологии планарной микроэлектроники, включающая литографию и высокоанизотропные методы плазменного травления, предназначенная для дискретного набора энергий от 10 до 20 кэВ. Фиксированное фокусное расстояние было достигнуто путем изменения радиуса и количества одиночных линз в каждой СПЛ. Еще одним примером формирования концепции универсализации экспериментальных схем для различных методов исследования является предложенные в 2007 г. 2 типа компоновки линз на кремниевом чипе [21] – “лестница”, когда все линзы выровнены по краю чипа, и “пирамида”, обеспечивающую фиксированное фокусное расстояние для всех линз. Первое расположение позволяет иметь очень короткое фокусное расстояние, а второе практичнее, когда есть необходимость изменить энергию во время эксперимента. Каждая СПЛ состоит из 10 нанофокусирующих линз с фокусным расстоянием 10 см в диапазоне энергий от 10 до 55 кэВ с шагом 5 кэВ.

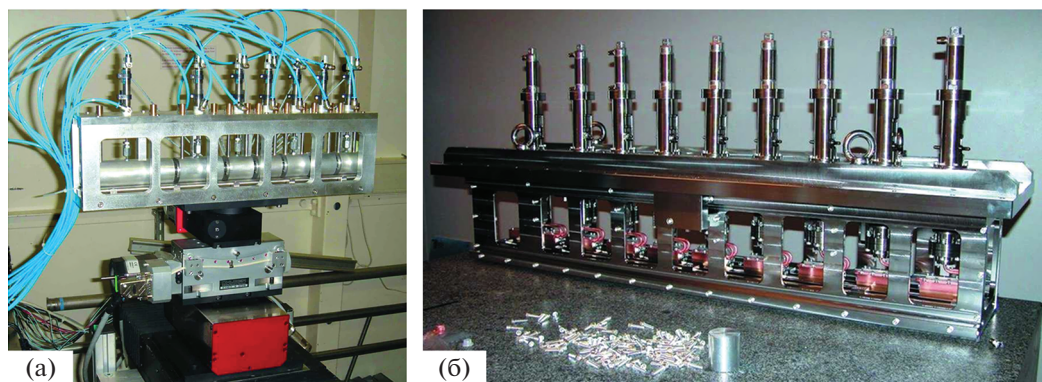


Рис. 1. Изображения трансфокаторов: версия для работы на воздухе (а) и вакуумная версия (б) [21].

В 2009 г. для перемещения и удобства корректировки положения СПЛ вдоль оси пучка был предложен рентгеновский трансфокатор — устройство, перемещающее сборки линз в картриджах, фокусное расстояние которого можно плавно регулировать механическим перемещением одной или нескольких групп картриджей [19]. Основной функцией трансфокатора является ввод и вывод преломляющих линз в пучок излучения. Линейные пневматические или пьезоэлектрические приводы, расположенные в одной плоскости, линейно вдвигают картриджи с линзами в пучок рентгеновского излучения в заданном порядке и по той же траектории выдвигают из пучка. Картриджи с пневматическим приводом содержат геометрическую прогрессию количества линз, что позволяет использовать от 2 до 254 линз (с шагом в степени двойки). Трансфокатор был установлен на станции ID11 на расстоянии 90 м от источника. Испытания проводились в диапазоне энергий рентгеновского излучения от 25 до 60 кэВ (рис. 1а).

Простота и универсальность трансфокаторов привели к их широкому распространению [23, 24], изменив концепцию устройства станций СИ [25]. Сегодня они имеют широкий спектр конструктивных решений [26, 27] используются для коллимации и предварительной фокусировки пучка СИ [28, 29] и лазеров на свободных электронах [30], а также для быстрого изменения размера и формы вторичного источника, путем комбинаций линз для горизонтальной и вертикальной фокусировки [31]. В 2011 г. сообщается о новой версии трансфокатора для использования в вакууме [22]. Использование этих устройств позволило оптимизировать размер и расхождение лучей для белого пучка СИ. Устройство вакуумной версии трансфокатора (рис. 1б) значительно сложнее с инженерной точки зрения, так как картриджи переводятся в вакуум для работы с белым пучком и должны иметь водяное охлаждение, а вся установка значительно длиннее. Вакуумный трансфокатор

состоит из девяти картриджей с водяным охлаждением, содержащих 1, 2, 4, 8, 16 и 32 Ве линзы, а также 32 и 64 Al линзы. Комбинация этих картриджей обеспечивает полную перестройку в диапазоне от 18 до 125 кэВ на 94 м и от 18 до 75 кэВ на 42 м. Конструкция системы картриджей вакуумной версии трансфокаторов показана рис. 2.

Таким образом, с точки зрения условий использования трансфокаторов существует два конструктивных решения: для использования на воздухе и для использования в вакууме. С точки зрения вариантов позиционирования линз, в большинстве применяемых на сегодняшний день трансфокаторах реализован бинарный способ переключения линз — система картриджей с пневматическими приводами, содержащих геометрическую прогрессию количества линз. Несмотря на все преимущества, используемые трансфокаторы картриджного типа имеют большие габаритные размеры, обусловленные использованием пневматических приводов, а также из-за необходимости использования охлаждающих или вакуумных систем. Конструкции таких трансфокаторов громоздки и не позволяют решать ряд задач, где устройство используется как рентгеновский высокоразрешающий объектив. Например, для метода светополевой и темнополовой рентгеновской микроскопии, необходимы компактные перестраиваемые объективы с малым весом и не являющиеся источником дополнительных вибраций. При использовании трансфокаторов картриджного типа, в пучок вводятся картриджи в любой последовательности, в некоторых случаях не соседних, что приводит к смещению точка фокуса относительно устройства. При этом не существует такой последовательности расположения картриджей вдоль оси устройства, которая бы обеспечивала линейную зависимость перемещения положения фокуса в зависимости от введенных картриджей во всем диапазоне фокусных расстояний. Это влечет очевидные неудобства, связанные с необходимостью перемещения само-

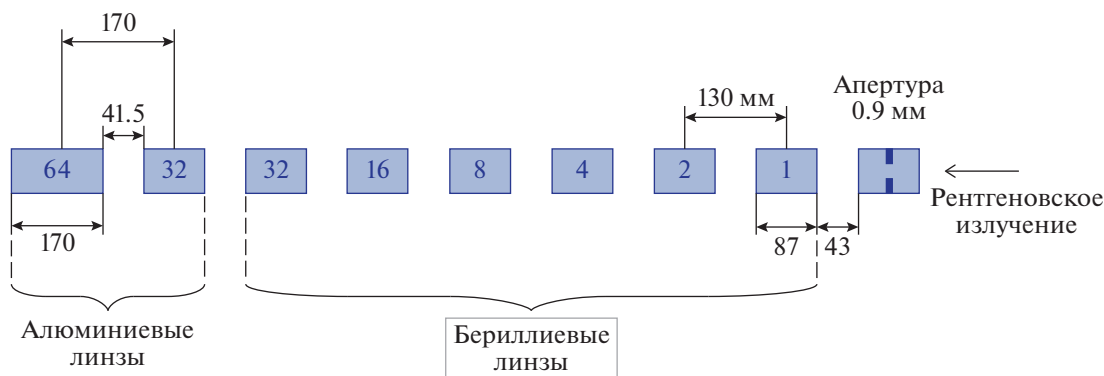


Рис. 2. Схема расположения картриджей в вакуумной версии трансфокатора.

го устройства в процессе эксперимента, что не всегда возможно.

Поэтому в 2015–2016 гг. в Международном исследовательском центре “Когерентная рентгеновская оптика для установок Мегасайенс” БФУ им. И. Канта была разработана и изготовлена новая версия рентгеновского трансфокатора – ультракомпактный трансфокатор (рис. 3) для задач высокоразрешающей рентгеновской микроскопии и томографии. Одним из главных преимуществ УКТФ является дискретный способ перемещения рентгеновских линз – отдельные параболические линзы устанавливаются в пучок РИ последовательно друг за другом. УКТФ в стандартной конфигурации содержит 50 отдельных ламелей – специальных прецизионных подвижных держателя оптических элементов, толщиной 1.0 мм. Ламели спроектированы с возможностью установки 1D- и 2D-линз, а также пинхоллов (ограничивающих апертур) и фильтров для оптимизации радиационной нагрузки на образец. В специальных конфигурациях УКТФ возможна установка ламелей с толщиной 2.0 мм для совместимости устройства с менее компактными оптическими элементами. Благодаря разработанной системе фиксации рабочее положение ламелей в данном типе трансфокатора может быть как в верхней, так и в нижней точке. Ввод и вывод оптических элементов из пучка осуществляется посредством поворота ламели относительно высокоточного вала, обеспечивающим прецизионную посадку сопрягаемых деталей с ошибкой точности перемещения не более 2 мкм. Держатели оптических элементов позиционируются на высокоточных базовых поверхностях, формируя функциональное прецизионное ядро устройства. Количество установленных линз может постепенно изменяться по одной, обеспечивая плавное изменение фокусного расстояния СПЛ. Используемая компактная компоновка обеспечивает минимальное расстояние между оптическими элементами, ограниченного толщиной линз и ла-

мелей, что упрощает возможную настройку устройства вдоль оптической оси. Габаритные размеры УКТФ составляют – $150 \times 100 \times 90$ мм (Д $\times$ Ш $\times$ В). А вес устройства составляет менее 2 кг. Это позволяет устанавливать произвольное расположение УКТФ в пространстве, что существенно упрощает компоновку оптической схемы экспериментальной станции на источнике синхротронного излучения.

При разработке трансфокаторов полный цикл исследований и финальных испытаний на воспроизводимость позиционирования функциональных узлов и отказоустойчивость элементов трансфокаторов проводятся на лабораторном комплексе – уникальной научной установке “Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований” (УНУ “SynchrotronLike”) [32]. Комплекс включает в себя рентгеновский источник Excillum MetalJet D2, который генерирует рентгеновское излучение с энергией 9.25 кэВ (линия GaK_{α}) с размером источника 5×15 мкм² и блок высокоразрешающих рентгеновских камер.

Предварительные лабораторные испытания устройства и юстировка прецизионных узлов компактной версии трансфокатора были выполнены на уникальной научной установке “Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований” (УНУ “SynchrotronLike”) в режиме фокусировки и высокоразрешающей радиографии. Полученные результаты позволили оптимизировать конструкцию блока ламелей и уменьшить смещение оптической оси с точностью 0.01°.

Для повышения точности измерений, испытания основных механических и оптических характеристик УКТФ также были проведены на станции P14 источника СИ PETRA-III (DESY, EMBL, г. Гамбург). Цель испытания состояла в том, чтобы определить повторяемость позиционирования линз в устройстве, при помощи многократного введения и вывода из рентгеновского

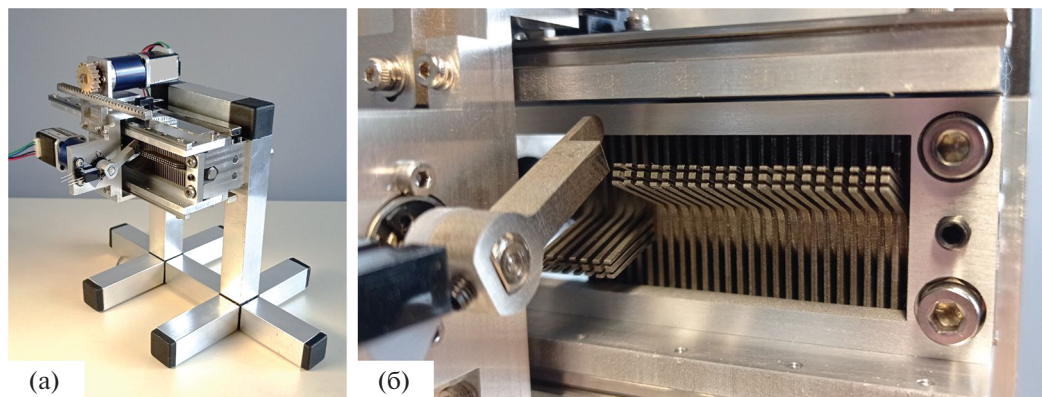


Рис. 3. Изображение ультракомпактного трансфокатора: желтым цветом показано направление рентгеновского излучения (а), красным выделена область блока с 20 ламелями в рабочем положении (б).

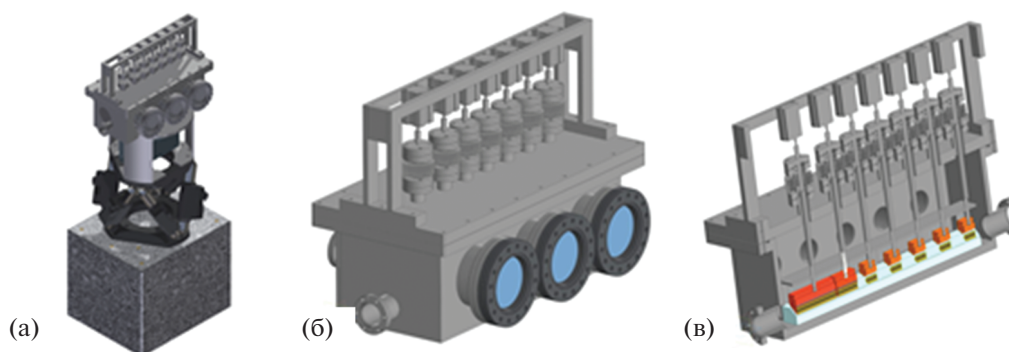


Рис. 4. Высоковакуумная версия трансфокатора: общий вид установки (а), внешний вид вакуумной камеры трансфокатора (б) и расположение картриджей, содержащих СПЛ (в).

пучка различных наборов линз и измерения отклонения положения фокального пятна на рентгеновской камере с субмикронным разрешением. Рентгеновская камера регистрировала 50 изображений при 25 кадрах в секунду для каждого повторения позиционирования. В результате фокусное пятно отклонялось в пределах 1.2 и 0.7 мкм в горизонтальном и вертикальном направлениях [33]. Чтобы определить усредненное положение центра фокального пятна, мы измерили центр масс на всех 50 изображениях. Стандартное отклонение центра масс для 50 изображений было равно 0.25 и 0.07 мкм, что характеризует общую инструментальную погрешность трансфокатора и соответствует среднему сдвигу одиночных линз в СПЛ. Следует отметить, что измеренные характеристики полностью удовлетворяют требованиям к микропозиционированию линз [34]. В настоящее время устройство установлено на станции P14 (EMBL Beamline MX2) источника СИ PETRA-III, для подготовки пучка СИ для экспериментов по белковой кристаллографии.

На сегодняшний день Международном исследовательском центре “Когерентная рентгенов-

ская оптика для установок Мегасайенс” БФУ им. И. Канта доступны три основных варианта механической конструкции рентгеновских трансфокаторов: ультракомпактный трансфокатор с переключением линз дискретного типа, вакуумный трансфокатор с переключением линз бинарного типа и вакуумный трансфокатор с системой водяного охлаждения. Для специальных задач ультракомпактный трансфокатор может быть оснащен системой водяного охлаждения для обеспечения стабильной работы при использовании прибора в условиях вакуума. Один из примеров конструктивного подхода — концепт вакуумного трансфокатора для использования в “белых” пучках представлен на рис. 4.

Устройство обладает масштабируемой конструкцией, что позволяет установить необходимое количество картриджей с СПЛ в зависимости от конкретной задачи их использования. Трансфокаторы оснащаются универсальным блоком управления на базе одноплатного компьютера RaspberryPi. Трансфокаторы управляются при помощи специализированного программного обеспечения предоставляющего высокоуровневый доступ к функциям

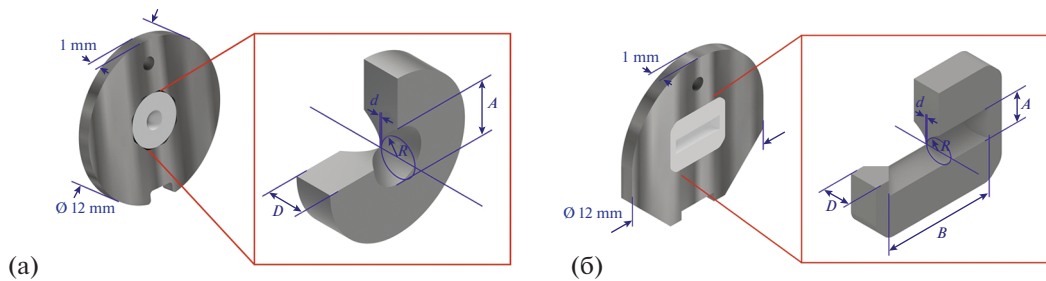


Рис. 5. Геометрические размеры рентгеновской $2D$ -линзы.

управления устройства, с возможностью создания пользовательских команд и отдельных программ. Программное обеспечение полностью совместимо с большинством современных систем управления на источниках СИ, таких как SPEC, ACTL и EPICS.

Таким образом, установка нового фокусного расстояния может выполняться дистанционно в течение нескольких секунд, чтобы соответствовать заданным параметрам источника, расстоянию до образца или другому коэффициенту увеличения.

ОПТИКА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРАНСФОКАТОРОВ

Для фокусировки жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 2 до 200 кэВ на источниках СИ применяются преломляющие металлические и алмазные линзы с радиусом кривизны параболического профиля линзы от 50 до 1000 мкм (базовое исполнение) [35, 36]. Принцип работы преломляющей рентгеновской оптики основан на преломлении рентгеновского излучения в материале линзы. Фокусное расстояние для составной преломляющей линзы (СПЛ) – набора одиночных линз описывается следующим выражением [4]:

$$F = R/2N\delta, \quad (1)$$

где R – радиус кривизны вогнутого параболического профиля линзы в ее апексе, N – количество одиночных преломляющих линз, δ – декремент преломления материала линзы, $n = 1 - \delta + i\beta$ – комплексный показатель преломления [37], где действительная часть $(1 - \delta)$ описывает изменение фазовой скорости волны при прохождении через вещество (эффект преломления излучения), в то время как мнимая часть β описывает уменьшение амплитуды волны (поглощение излучения) в веществе.

Для фокусировки рентгеновского излучения сегодня используются одномерные ($1D$) и двумерные ($2D$) преломляющие рентгеновские линзы для достижения одномерной (линейной) и

двумерной (точечной) фокусировки. На рисунке 5 представлено изображение $1D$ и $2D$ рентгеновских преломляющих линз с указанием их основных геометрических характеристик: $2R_0$ – геометрическая (физическая) апертура, d – перешеек (остаточная толщина материала), при толщине рабочего материала линзы – $D = 1.0$ мм. В табл. 1 представлены основные геометрические характеристики рентгеновских линз и их соответствие. Физическая апертура линзы зависит от радиуса кривизны R и толщины материала D линзы (может отличаться от 1 мм), что позволяет получать апертуры линз до 5 мм и более при увеличении радиуса кривизны линзы. Стоит отметить, что минимальная остаточная толщина материала d в линзе как правило ограничена применяемой технологией изготовления рентгеновской оптики и приводит к дополнительному поглощению излучения линзой. В случае металлической оптики, которая изготавливается методом одноосевого прессования высокоточными пуансонами параметр d составляет ~ 20 – 30 мкм, а минимальный радиус кривизны линзы $R = 50$ мкм. Сегодня среди производителей металлической преломляющей оптики можно выделить две основные организации – GmbH & Co. KG RXOPTICS (rxoptics.de/products/lenses, Германия) и МИП ООО “РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА” (МНИЦ “Когерентная рентгеновская оптика для установок МегаСайенс” БФУ им. И. Канта, xoptica.ru/metal-optics, Калининград, Россия). Научно-исследовательским центром БФУ им. И. Канта была предложен и реализован более компактный дизайн рентгеновских линз – толщиной всего 1 мм, что в два раза меньше чем у производителя RXOPTICS, а также выполнены работы по изготовлению линз с экстремально малым параметром d – не более 10 мкм (рис. 6), что позволяет снизить потери интенсивности из-за фотопоглощения почти в два раза, особо востребованных для приложений в области малых энергий – менее 6–8 кэВ.

Для источников синхротронного излучения с высокой плотностью фотонов (яркостью) научным коллективом также была разработана технология изготовления алмазной преломляющей оп-

тики методом лазерной абляции и методом ионно-лучевой литографии. Алмазные линзы с большой рабочей апертурой изготавливаются из высококачественных монокристаллических алмазных пластин методом послойной лазерной абляции с применением мощных сверхкоротких импульсных лазерных систем. Рентгеновские алмазные линзы ориентированы на решение задач по коллимации и фокусировки рентгеновских пучков с высокой тепловой нагрузкой благодаря высокой термо- и радиационной стойкости алмаза [38]. Минимальный радиус алмазных рентгеновских линз ограничен технологией лазерной абляции и составляет ~200 мкм.

Для упрощения расчета фокусного расстояния СПЛ можно ввести коэффициент пропорциональности K , тогда фокусного расстояния преломляющей линзы можно записать следующим образом:

$$F = (R/2N)(E^2/K), \tag{2}$$

где K – коэффициент пропорциональности (см. табл. 2), R – радиус кривизны параболического профиля, выраженный в метрах, N – количество одиночных преломляющих линз, E – энергия излучения в кэВ (2–200 кэВ).

Более точный расчет всех оптических характеристик СПЛ можно выполнить с помощью онлайн калькулятора [39].

Рабочая (эффективная) апертура A_{eff} преломляющей оптики определяется поглощением рентгеновского излучения в материале линзы и может быть рассчитана по следующей формуле [34]:

$$A_{\text{eff}} = (F\lambda\delta/\beta)^{1/2}, \tag{3}$$

Таблица 1. Основные геометрические параметры 2D рентгеновских линз

Параметр	R – радиус кривизны, мкм				
	50	100	200	500	1000
$2R_0$ – физ. апертура, мкм	~443	~626	~885	1400	~1980
d – перешеек, мкм	20			30	
D – толщина линзы, мм	1.0				

где λ – длина волны излучения. На рис. 7 представлены значения эффективных апертур для наиболее часто используемых преломляющих линз. Дифракционный предел разрешения СПЛ связан с рабочей (эффективной) апертурой следующим выражением [35]:

$$Res_{\text{lim}} = 0.61 (\lambda R/A_{\text{eff}} N \delta). \tag{4}$$

Экспериментальная разрешающая способность металлических СПЛ составляет ~50–100 нм, и ограничена в основном искажениями, вносимыми рентгенонеоднородными материалами (поликристаллической структурой) и несовершенством формы профиля линз [36]. Согласно проведенным исследованиям для минимизации эффекта формирования спекл-полей и дифракционных потерь (глитчей) предлагается использование нового поколения материалов для задач рентгеновской оптики – наноструктурированных металлов и алмазов [41, 42].

В табл. 3 представлены основные оптические параметры составной рентгеновской линзы для диапазона энергии излучения 5–200 кэВ при фиксированном фокусном расстоянии ($F = 1$ м) и фиксированном радиусе кривизны параболического профиля ($R = 50$ мкм), расчеты выполнены

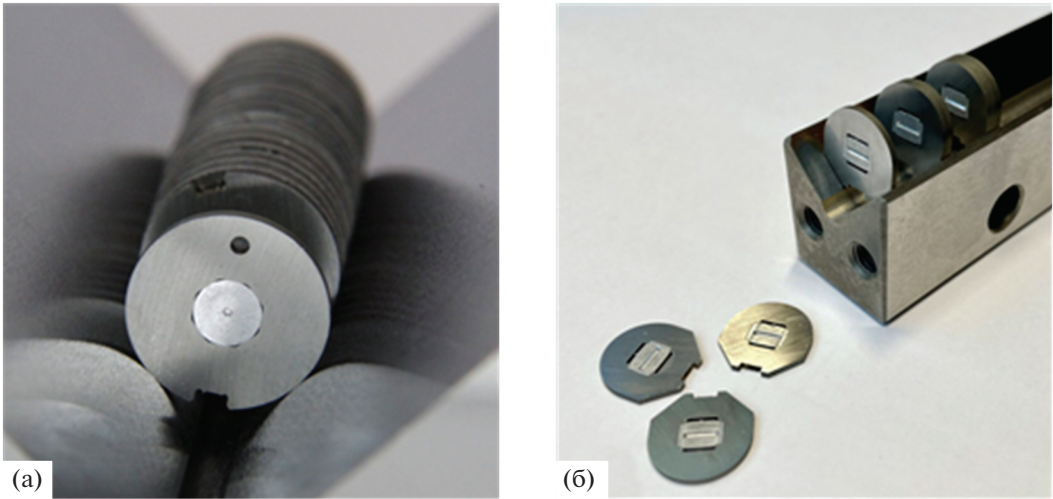


Рис. 6. Преломляющая рентгеновская оптика: бериллиевые двумерные (2D) линзы с радиусом кривизны 50 мкм (а) и алюминиевые одномерные (1D) линзы с радиусом кривизны 200 мкм (б).

Таблица 2. Значение коэффициента пропорциональности

Материал	Бериллий (Be)	Алмаз (C)	Алюминий (Al)	Никель (Ni)
$K \times 10^4$	3.4	7.3	5.4	18

Таблица 3. Основные оптические характеристики рентгеновских линз

E , кэВ	Материал	β	$A_{\text{эф}}$	δ	N
5	Be	1.5×10^{-8}	186	1.4×10^{-5}	2
12	Be	3.7×10^{-10}	616	2.4×10^{-6}	10
12	C	3.3×10^{-9}	358	5.1×10^{-6}	5
20	Be	4.0×10^{-11}	615	8.5×10^{-7}	29
20	C	3.55×10^{-10}	387	1.8×10^{-6}	14
50	Al	9.1×10^{-11}	281	2.2×10^{-7}	115
50	Ni	3.8×10^{-9}	5	7.1×10^{-7}	35
100	Ni	2.3×10^{-10}	75	1.8×10^{-7}	142
100	Au	9.0×10^{-9}	20	3.1×10^{-7}	80
200	Au	7.2×10^{-10}	24	7.8×10^{-8}	320

с помощью онлайн калькулятора [39]. Из табличных данных видно, что при увеличении энергии требуется использовать материалы с высоким средним атомным номером для поддержания фиксированного фокусного расстояния линзы.

Рабочий энергетический диапазон преломляющей оптики для источников синхротронного излучения составляет 2–200 кэВ [36, 43]. Однако для достижения компактных размеров СПЛ как правило используют бериллиевую (Be) оптику для энергий излучения до 20 кэВ, алмазную (C) — для 10–50 кэВ, алюминиевую (Al) — для 20–100 кэВ, ни-

келевую (Ni) — для энергий более 100 кэВ, для сверхжесткого рентгеновского излучения и гамма-излучения — можно использовать материалы с высоким атомным номером — золото, платина или обедненный уран.

Сегодня составные преломляющие линзы являются основными оптическими элементами для решения ряда технических задач, а также широкого спектра экспериментальных методов исследования на современных источниках рентгеновского излучения. Линзы используются для создания коллимационных систем, рентгеновских конденсоров, формирователей микро- и нанопучков, для светло- и темно-польной рентгеновской микроскопии и томографии, дифракционной микроскопии, как Фурье-оптика, базового элемента для интерферометрии и рефлекто-интерферометрии, при проведении исследований в экстремальных условиях и других методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгеновские трансфокаторы на основе составных преломляющих линз являются универсальным решением при проектировании научно-исследовательских станций и оптических линий на современных источниках синхротронного излучения и установках класса Мегасайенс. Трансфокаторы сохраняют in-line геометрию распространения излучения, обеспечивая возможность настройки постоянной энергии и фокусного расстояния. Гибкость конструктивных решений для позиционирования рентгеновских СПЛ делает трансфокаторы пригодным для широкого спектра применений даже на неспециализированных станциях СИ. Трансфокаторы сочетаются с другими оптическими элементами и могут быть использованы в качестве системы коллимации пучка, в качестве короткофокусного увеличительного объектива. Это особенно важно для неразрушающих измерений *in situ* или *in vivo* в различных областях рентгеновских исследований, где критическое значение имеет быстрое отслеживание динамических, морфологических и структурных изменений. Рентгеновские трансфокаторы позволяют существенно оптимизировать и упростить задачу транспорта и коллимацию пучка, а также управлять плотностью потока излучения на образце и получать микро- и нано-рентгеновские зонды, сохраняя фиксированное фокусное расстояние объектива в широком диапазоне энергий. До-

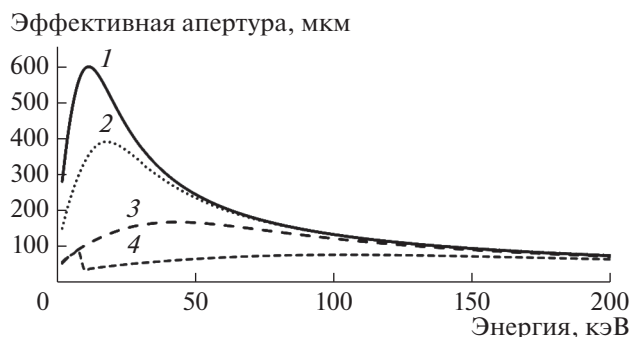


Рис. 7. Зависимость эффективной апертуры СПЛ от энергии излучения для фокусного расстояния $F = 1$ м для разных материалов: 1 — бериллий, 2 — алмаз, 3 — алюминий, 4 — никель.

оснащение оптических линий трансфокаторами происходит без нарушения существующих конструктивных решений, поскольку рентгеновские трансфокаторы совместимы с ультравысоким вакуумом и имеют активное охлаждение для термо- и радиационно-нагруженных участков оптических линий. Ультракомпактный трансфокатор на основе преломляющих линз является универсальным решением и представляет собой самую компактную версию высокоразрешающей зум-объектива для задач когерентной визуализации и томографии микро- и нанообъектов. Рентгеновские трансфокаторы имеют компактную и масштабируемую конструкцию, высокую надежность, низкую стоимость технического обслуживания и совместимость со всеми существующими типами двумерных и одномерных преломляющих линз, что существенно расширяет применимость данного устройства на установках класса Мега-сайенс.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование элементов рентгеновской оптики было выполнено на уникальной научной установке “Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований” (УНУ “SynchrotronLike”). Исследование характеристик компактного трансфокатора на лабораторном комплексе УНУ “SynchrotronLike” было выполнено за счет поддержки гранта РФФИ (№ 19-29-12040). Остальные исследования и работы по проектировке были поддержаны из средств программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” БФУ им. И. Канта.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leemann S., Wurtz W. // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 884. P. 92. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.012>
2. White S., Carmignani N., Carver L., Chavanne J., Farvacque L., Hardy L., Jacob J., Le Bec G., Liuzzo S.M., Perron T., Qin Q., Raimondi P., Revol J.-L., Scheidt K.B. // IPAC2021. 24–28 May. Geneva, Switzerland: JACoW, V. 3. P. 1–6. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-MOXA01>
3. Ashanin I.A., Bashmakov Yu.A., Budkin V.A., Valentinov A.G., Gusarova M.A., Danilova D.K., Dementev A.A., Dmitriyeva V.V., Dudina N.S., Dyubkov V.S., Kliuchevskaia Yu.D., Korchuganov V.N., Lalayan M.V., Lozhev Yu.Yu., Lozeva T.A., Makhoro A.A., Mekhanikova V.Yu., Mosolova O.A., Polozov S.M., Pronikov A.I. // Physics of Atomic Nuclei. Springer, 2018. V. 81. № 11. P. 1646. <https://doi.org/10.1134/S1063778818110030>
4. Snigirev A., Snigireva I., Lengeler B., Kohn V. // Nature. 1996. V. 384. № 6604. P. 49. <https://doi.org/10.1038/384049a0>
5. Snigirev A.A., Filseth B., Elleaume P., Klocke Th., Kohn V., Lengeler B., Snigireva I., Souvorov A., Tuemmler J. // High Heat Flux and Synchrotron Radiation Beamlines. 1997. V. 3151. P. 164. <https://doi.org/10.1117/12.294496>
6. Chumakov A.I., Rüffer R., Leupold O., Barla A., Thies H., Asthalter T., Doyle B.P., Snigirev A., Baron A.Q.R. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 31. <https://doi.org/10.1063/1.126867>
7. Zverev D., Barannikov A., Snigireva I., Snigirev A. // Optics Express. 2017. V. 25. № 23. P. 9. <https://doi.org/10.1364/OE.25.028469>
8. Lyubomirskiy M., Snigireva I., Snigirev A. // Optics Express. 2016. V. 24. № 12. P. 13679. <https://doi.org/10.1364/OE.24.013679>
9. Polikarpov M., Snigireva I., Snigirev A. // J. of Synchrotron Radiation. 2014. V. 21. № 3. P. 484. <https://doi.org/10.1107/S1600577514001003>
10. Byelov D.V., Meijer J.-M., Snigireva I., Snigirev A., Rossi L., Esther van den Pol, Kuijk A., Philipse A., Imhof A., Alfons van Blaaderen, Gert Jan Vroegea, Petukhov A.V. // RSC Advances. 2013. V. 3. № 36. P. 15670. <https://doi.org/10.1039/C3RA41223G>
11. Zverev D., Snigireva I., Snigirev A. // Microscopy and Microanalysis. 2018. V. 24. № S2. P. 296. <https://doi.org/10.1017/S143192761801382X>
12. Snigirev A., Snigireva I., Kohn V., Yunkin V., Kuznetsov S., Grigoriev M.B., Roth T., Vaughan G., Detlefs C. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. № 6. P. 6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.064801>
13. Snigirev A., Snigireva I., Lyubomirskiy M., Kohn V., Yunkin V., Kuznetsov S. // Optical Express. 2014. V. 22. № 21. P. 25842. <https://doi.org/10.1364/OE.22.025842>
14. Zverev D., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigirev A. // Microscopy and Microanalysis. 2018. V. 24. № S2. P. 162. <https://doi.org/10.1017/S1431927618013193>
15. Santoro G., Buffet A., Döhrmann R., Yu S., Körstgens V., Müller-Buschbaum P., Gedde U., Hedenqvist M., Roth S.V. // Rev. Scie Instrum. American Institute Phys. 2014. V. 85. № 4. P. 043901. <https://doi.org/10.1063/1.4869784>
16. Raimondi P. // Synchrotron Radiation News. 2016. V. 29. № 6. P. 8. <https://doi.org/10.1080/08940886.2016.1244462>
17. Polikarpov M., Kononenko T.V., Ralchenko V.G., Ashkinazi E.E., Konov V.I., Ershov P., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigireva I., Polikarpov V.M., Snigirev A. // Proceedings of SPIE. 2016. V. 9963. P. 99630Q–99630Q. <https://doi.org/10.1117/12.2238029>
18. Terentyev S., Blank V., Polyakov S., Zholudev S., Snigirev A., Polikarpov M., Kolodziej T., Qian J., Zhou H., Shvyd'ko Y. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. № 11.

- P. 111 108.
<https://doi.org/10.1063/1.4931357>
19. *Snigirev A., Snigireva I., Vaughan G., Wright J.P., Rossat M., Bytchkov A., Curfs C.* // J. Phys.: Conference Series. 2009. V. 186. P. 10.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/186/1/012073>
 20. *Snigireva I., Snigirev A., Yunkin V., Drakopoulos M., Grigoriev M., Kuznetsov S., Chukalina M., Hoffmann M., Nuesse D., Voges E.* // AIP Conference Proceedings. 2004. V. 705. P. 708.
<https://doi.org/10.1063/1.1757894>
 21. *Snigirev A., Snigireva I., Grigoriev M., Yunkin V., Di Michiel M., Vaughan G., Kohn V., Kuznetsov S.* // Proc. SPIE. 2007. V. 6705. P. 670506.
<https://doi.org/10.1117/12.733609>
 22. *Vaughan G.B.M., Wright J.P., Bytchkov A., Rossat M., Gleyzolle H., Snigireva I., Snigirev A.* // J. of Synchrotron Radiation. 2011. V. 18. № 2. P. 125.
<https://doi.org/10.1107/S0909049510044365>
 23. *Zozulya A.V., Bondarenko S., Schavkan A., Westermeyer F., Grübel G., Sprung M.* // Optical Express. 2012. V. 20. № 17. P. 18967.
<https://doi.org/10.1364/OE.20.018967>
 24. *Berujon S., Ziegler E., Cojocar R., Martin T.* // Advances in X-ray Free-Electron Lasers Instrumentation IV 2017. V. 10237. P. 75. SPIE
<https://doi.org/10.1117/12.2269452>
 25. *Snigirev A., Ershov P., Snigireva I., Hanfland M., Dubrovinskaya N., Dubrovinsky L.* // Microscopy and Microanalysis. 2018. V. 24. № S2. P. 236.
<https://doi.org/10.1017/S1431927618013533>
 26. *Yang L., Liu J., Chodankar S., Antonelli S., DiFabio J.* // J. of synchrotron radiation. 2022. V. 29. № 2. P. 540.
<https://doi.org/10.1107/S1600577521013266>
 27. *Kornemann E., Márkus O., Opolka A., Zhou T., Greving I., Storm M., Krywka C., Last A., Mohr J.* // Optics express. 2017. V. 25. № 19. P. 22455.
<https://doi.org/10.1364/OE.25.022455>
 28. *Buffet A., Rothkirch A., Döhrmann R., Körstgens V., Motakin M., Abul Kashem, Perlich J., Herzog G., Schwartzkopf M., Gehrke R., Müller-Buschbaum P., Roth S.V.* // J. of Synchrotron Radiation. 2012. V. 19. № 4. P. 647.
<https://doi.org/10.1107/S0909049512016895>
 29. *Weitkamp T., Scheel M., Giorgetta J.L., Joyet V., Le Roux V., Cauchon G., Moreno T., Polack F., Thompson A., Samama J.P.* // In Journal of Physics: Conference Series 2017. V. 849. № 1. P. 012037.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/849/1/012037>
 30. *Zozulya A., Batchelor L., Appel K., Boesenberg U., Hallmann J., Kim C., Lobato I., Lu W., Mammen C., Möller J., Roth T., Samoylova L. et al.* // X-Ray Lasers and Coherent X-Ray Sources: Development and Applications XIII 2019. V. 11111OH. P. 37.
<https://doi.org/10.1117/12.2533081>
 31. *Bowler M.W., Nurizzo D., Barrett R., Beteva A., Bodin M., Caserotto H., Delagenière S., Dobias F., Flot D., Giraud T., Guichard N., Guizarro M. et al.* // J. of synchrotron radiation. International Union of Crystallography. 2015. V. 22. № 6. P. 1540.
<https://doi.org/10.1107/S1600577515016604>
 32. *Barannikov A., Shevyrtalov S., Zverev D., Narikovich A., Sinitsyn A., Panormov I., Snigireva I., Snigirev A.* // EUV and X-ray Optics, Sources, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics. 2021. V. 11776. P. 117760.
<https://doi.org/10.1117/12.2582687>
 33. *Narikovich A., Polikarpov M., Barannikov A., Klimova N., Lushnikov A., Lyatun I., Bourenkov G., Zverev D., Panormov I., Sinitsyn A., Snigireva I., Snigirev A.* // J. of Synchrotron Radiation. 2019. V. 26. № 4.
<https://doi.org/10.1107/S1600577519005708>
 34. *Andrejczuk A., Krzywiński J., Sakurai Y., Itou M.* // Journal of synchrotron radiation. 2010. V. 17. № 5. P. 616.
<https://doi.org/10.1107/S0909049510022454>
 35. *Wilhelm F., Garbarino G., Jacobs J., Vitoux H., Steinmann R., Guillou F., Snigirev A., Snigireva I., Voisin P., Braithwaite D., Aoki D., Brison J.-P., Kantor I., Lyatun I., Rogalev A.* // High Pressure Research. 2016. V. 36. № 3. P. 445.
<https://doi.org/10.1080/08957959.2016.1206092>
 36. *Roth T., Alianelli L., Lengeler D., Snigirev A., Frank Seiboth F.* // MRS Bulletin. 2017. V. 42. № 6. P. 430.
<https://doi.org/10.1557/mrs.2017.117>
 37. *James R.W., Lawrence Bragg W.L.* The Optical Principles of the Diffraction of X-rays. London: G. Bell and Sons, 1962.
 38. *Snigireva I., Polikarpov M., Snigirev A.* // Synchrotron Radiation News. 2021. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1080/08940886.2021.2022387>
 39. *Kuznetsov S.* IMT RAS. X-Ray Optics Calculator. Main Formulae. http://nano.iptm.ru/xcalc/xcalc_mysql/crl_par.php. Cited 10 August 2022.
 40. *Medvedskaya P., Lyatun I., Shevyrtalov S., Polikarpov M., Snigireva I., Yunkin V., Snigirev A.* // Optics Express. 2020. V. 28. № 4. P. 4773.
<https://doi.org/10.1364/OE.384647>
 41. *Lyatun I., Ershov P., Snigireva I., Snigirev A.* // Journal of Synchrotron Radiation. 2020. V. 27. № 1. P. 44.
<https://doi.org/10.1107/S1600577519015625>
 42. *Snigireva I., Irifune T., Shinmei T., Medvedskaya P., Shevyrtalov S., Bourenkov G., Polikarpov M., Rashchenko S., Snigirev A., Lyatun I.* // SPIE. 2021. V. 11837. P. 8.
<https://doi.org/10.1117/12.2594675>
 43. *Serebrennikov D., Clementyev E., Semenov A., Snigirev A.* // J. of Synchrotron Radiation. 2016. V. 23. № 6. P. 1315.
<https://doi.org/10.1107/S1600577516014508>

X-Ray Transfocators a Tunable X-Ray Focusing Apparatus Based on Compound Refractive Lenses

**A. S. Narikovich¹, I. I. Lyatun¹, D. A. Zverev¹, I. B. Panormov¹, A. A. Lushnikov¹, A. V. Sinitsyn¹,
A. A. Barannikov¹, P. N. Medvedskaya¹, A. S. Korotkov¹, and A. A. Snigirev^{1, *}**

¹*International Research Center “Coherent X-ray Optics for Megascience facilities” Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, 236041 Russia*

**e-mail: asnigirev@kantiana.ru*

This paper presents a new generation of ultra-compact and high-vacuum cooled X-ray refractive lens-based transfocators for collimation, transport, and focusing of hard X-rays. The transfocator is an optical device capable of changing the position of focus depending on the number of X-ray refractive lenses, which are exposed along the optical path of X-ray radiation. The design features of the device allow the individual optical elements to be controlled independently of each other, providing a more flexible adjustment of the focal distance for a wide range of applications. The small overall dimensions and light weight of the devices allow them to be integrated into any synchrotron radiation station.