

УДК 535.015

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ КОЛЛИМАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА ПРИ ПОМОЩИ ПЛАНАРНОГО МНОГОЛИНЗОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

© 2023 г. Д. А. Зверев<sup>а</sup>, \*, В. А. Юнкин<sup>б</sup>, С. М. Кузнецов<sup>б</sup>, А. А. Баранников<sup>а</sup>,  
М. Н. Сороковиков<sup>а</sup>, М. А. Воеводина<sup>а</sup>, А. А. Снигирев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта,  
Калининград, 236041 Россия

<sup>б</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,  
Черноголовка, 142432 Россия

\*e-mail: daswazed@gmail.com

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

После доработки 14.11.2022 г.

Принята к публикации 14.11.2022 г.

Предложен метод определения степени коллимации когерентного рентгеновского пучка при помощи планарного многолинзового интерферометра. Метод основан на анализе изображений Тальбота, представляющих собой периодические картины интерференционных полос, формируемых интерферометром на соответствующих расстояниях. Высокая чувствительность положения и периода интерференционных полос к форме волнового фронта рентгеновского пучка позволяет определить степень его коллимации, а также оценить когерентные свойства излучения. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована экспериментально на исследовательской станции ID15B источника синхротронного излучения ESRF. Выполнено теоретическое исследование, представлены соответствующие результаты компьютерного моделирования. Полученные экспериментальные данные полностью соответствуют теоретическим оценкам.

**Ключевые слова:** рентгеновская оптика, составные преломляющие линзы, когерентность, интерферометр, синхротрон, диагностика источника.

**DOI:** 10.31857/S1028096023060201, **EDN:** DJSEKX

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие источников синхротронного излучения, подразумевающее увеличение их спектральной яркости, улучшение когерентных и коллимационных свойств генерируемого рентгеновского пучка, стимулирует работы по созданию рентгеновской оптики, способной в полной мере раскрыть и использовать весь потенциал яркого, направленного синхротронного излучения. Современная рентгеновская оптика оказала влияние на становление большинства синхротронных методов исследования, таких как, например, рентгеновская фазово-контрастная микроскопия, фотонная корреляционная спектроскопия, когерентная дифракционная томография или интерферометрия. В то же время самая молодая рентгеновская преломляющая оптика [1], способная эффективно управлять жестким рентгеновским излучением, становится все более востребованной, демонстрируя свою универсальность и применимость.

Сегодня рентгеновская преломляющая оптика повсеместно используется на исследовательских

станциях синхротронных источников излучения, некоторые из них полностью на ней основаны [2–4]. Очевидно, что наряду с предельными характеристиками источников синхротронного излучения мощный потенциал и стремительно растущая популярность преломляющей оптики определяют образ современного синхротронного эксперимента. Такой тип оптики позволяет полноценно реализовать возможности современных рентгеновских методов визуализации, требующих различных преобразований волнового фронта, например, для создания специального освещения. Он может быть эффективно использован для задач диагностики источника, транспорта и подготовки рентгеновского пучка, в методах рентгеновской интерферометрии, для формирования периодической пространственной структуры пучка [5–9].

Следует отметить, что рентгеновская интерферометрия на основе преломляющей оптики является относительно новым направлением в современной экспериментальной физике. Первый

рентгеновский интерферометр, использующий явление дифракции рентгеновских лучей на кристаллических решетках трех монокристаллов для формирования периодической интерференционной картины, был описан в 1965 г. в работах Бонзе и Харта [10]. С появлением современных источников синхротронного излучения стали доступны классические интерферометрические эксперименты как на основе элементов дифракционной оптики, такие как метод двойной щели Юнга [11–14] или интерферометрия Тальбота [15–17], так и на основе преломляющей оптики [18–22]. Со дня своего возникновения рентгеновская интерферометрия продемонстрировала поистине уникальные возможности в различных областях изучения конденсированных сред: при измерении фундаментальных физических констант, параметров кристаллической решетки, изучении структурных дефектов в почти совершенных монокристаллах. Сегодня рентгеновские интерферометры используют в исследованиях, требующих времяразрешающей диагностики объектов, для определения параметров жесткого рентгеновского излучения, а также при исследовании слабопоглощающих (фазовых) объектов [23–26].

Обеспечение возможности регулирования поперечного размера пучка, а также управления плотностью потока фотонов является одной из наиболее востребованных задач современной рентгеновской оптики. Так, например, предложенный ранее расширитель пучка [27] на основе многолинзового интерферометра обеспечивает возможность наблюдения крупных объектов, исследуемых методами фазово-контрастной визуализации и проекционной рентгенографии, без процесса их сканирования, а коллимация и фокусировка излучения при помощи составных преломляющих линз [28–30] позволяет увеличить плотность потока фотонов на образце, обеспечивая высокое временное разрешение современных методов исследования. Подобные подходы к подготовке рентгеновского пучка дают возможность проводить исследования объектов, чувствительных к радиационным нагрузкам: различных полимеров или биологических образцов. Немаловажным является возможность сохранения когерентных свойств формируемого пучка, а также и эффективность его преобразования.

В настоящей работе предложен новый метод определения степени коллимации когерентного рентгеновского пучка при помощи планарного многолинзового интерферометра. Метод был теоретически описан, а представленные аналитические оценки показали, что положение интерференционных полос, формируемых интерферометром, позволяет определить степень коллимации (угловую расходимость) рентгеновского пучка. Экспериментальная демонстрация предложенного подхода была выполнена при энергии рент-

геновского излучения 30 кэВ на исследовательской станции ID15B ESRF (Гренобль, Франция), где в качестве коллимирующего устройства была использована составная преломляющая линза. Было показано, что составная преломляющая линза, установленная на фокусном расстоянии от источника, формирует плоский волновой фронт рентгеновского пучка, обеспечивая высокую степень его коллимации.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Рентгеновский многолинзовый интерферометр представляет собой массив из  $M$  параллельных идентичных планарных составных преломляющих линз, установленных на одинаковом расстоянии  $d$  друг от друга. Каждая составная линза имеет физическую апертуру  $A$  и состоит из  $N$  отдельных двояковогнутых параболических линз с радиусом кривизны  $R$  в вершине образующих их парабол. Такая система линз способна преобразовывать плоский монохроматический рентгеновский пучок с длиной волны  $\lambda$  в набор из  $M$  взаимно когерентных пучков, каждый из которых фокусируется на расстоянии  $f = R/2N\delta$ , где  $\delta$  — дефокмент показателя преломления  $n$  материала интерферометра. Сформированные фокусы разнесены в поперечном направлении на расстоянии  $d$  относительно друг друга, а их размер ограничен дифракционным пределом  $\sigma_f = \lambda f/2A_{\text{эф}}$  и на несколько порядков меньше расстояния между ними, где  $A_{\text{эф}}$  — эффективная апертура одной составной преломляющей линзы. Эффективная апертура  $A_{\text{эф}} \approx (\lambda/\delta/2\beta)^{1/2}$  зависит от поглощения рентгеновского излучения в материале интерферометра, которое описывается мнимой частью  $i\beta$  его показателя преломления  $n = 1 - \delta + i\beta$  [31]. В общем случае на произвольном расстоянии  $z$  от фокусов интерференционное поле имеет сложную пространственную структуру, однако для некоторых расстояний выполняется условие конструктивной интерференции, а результирующая сумма волн представляет собой периодическое распределение амплитуды волнового поля в плоскости наблюдения. Например, периодическая система линейных источников воспроизводится в виде интерференционных полос с периодом  $\Lambda = d$ , наблюдаемых на расстоянии Тальбота  $z = Z_T = 2d^2/\lambda$ . На половине расстояния Тальбота  $z = 1/2Z_T$  формируется аналогичное изображение, но смещенное в пространстве на половину периода полос. Кратное уменьшение периода полос  $\Lambda = d/q$ , соответствующее дробному эффекту Тальбота, наблюдается на расстояниях  $z = Z_T/q$ , где  $q > 2$  — целое число.

В случае освещения многолинзового интерферометра точечным источником, находящимся на расстоянии  $z_0$  от него, положение формируемых

сфокусированных пучков  $z_f$  определяется формулой тонкой линзы  $1/f = 1/z_0 + 1/z_f$ . Интерференционная картина от  $M$  вторичных источников, представляющая собой интерференционные полосы, масштабно увеличивается с коэффициентом:

$$C = (z_f + z^* + z_0)/(z_f + z_0) \quad (1)$$

и наблюдается на расстоянии  $z^*$  от них. Данное расстояние может быть выражено следующим образом:

$$1/(z_f + z^*) + 1/z_0 = 1/(f + z), \quad (2)$$

где  $z$  — соответствующее расстояние Тальбота.

При использовании источника рентгеновского излучения с конечным размером  $s_0$  только часть расходящихся пучков, сформированных составными преломляющими линзами интерферометра, лежащими в области когерентности падающего на него излучения, участвует в формировании интерференционных полос. Количество таких пучков можно оценить как  $M_{\text{coh}} = l_{\text{coh}}/d < M$ , где  $l_{\text{coh}} = \lambda z_0/s_0$  — длина области пространственной когерентности рентгеновского пучка, формируемого источником. Ширина формируемых интерференционных полос  $\omega$  увеличивается:  $\Lambda/M_{\text{coh}} > \Lambda/M$ . Очевидно, что наблюдение интерференционных полос будет невозможно при размере источника  $s_0 \gg \lambda z_0/d$ , при котором длина когерентности меньше расстояния между соседними составными преломляющими линзами, входящими в состав интерферометра.

## МЕТОД И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Метод определения степени коллимации рентгеновского пучка при помощи многолинзового интерферометра основан на способности интерферометра формировать интерференционную картину полос лишь на определенных расстояниях  $z^*$  от его фокусов, зависящих от расходимости падающего пучка, в общем случае обусловленной расположением источника излучения. При конечном расстоянии между источником и интерферометром, согласно (2), расстояние до области формирования интерференционных полос увеличивается по сравнению с соответствующим расстоянием Тальбота, на котором наблюдается сложная интерференционная структура. Использование какого-либо коллимирующего устройства, формирующего плоский волновой фронт падающего на интерферометр пучка, например, составной преломляющей линзы, обеспечивает условия для возникновения периодической интерференционной картины полос на расстояниях Тальбота. Таким образом, определяя положение области формирования интерференционных полос, возможно точно определить степень колли-

мации рентгеновского пучка, формируемого коллимирующим устройством.

Демонстрация предложенного подхода была выполнена на исследовательской станции ID15B источника синхротронного излучения ESRF (Гренобль, Франция) при энергии рентгеновского излучения 30 кэВ. Многолинзовый интерферометр, состоящий из 100 параллельных планарных составных преломляющих линз, разделенных в поперечном направлении расстоянием  $d = 10$  мкм, был установлен на расстоянии 44.3 м от ондуляторного источника излучения, имеющего размеры  $30 \times 300$  мкм в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно. Каждая составная преломляющая линза используемого интерферометра включает 29 двояковогнутых параболических линз, имеющих физическую апертуру  $A = 10$  мкм и радиус кривизны в вершинах их параболических преломляющих поверхностей  $R = 1.25$  мкм. На рис. 1 представлены изображения 100-линзового интерферометра, полученные при помощи растрового электронного микроскопа Zeiss Crossbeam 540, входящего в состав уникальной научной установки “Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований” (УНУ “SynchrotronLike”).

Перед интерферометром была установлена двухкоординатная щель размерами  $700 \times 35$  мкм в вертикальном и горизонтальном направлениях, ограничивающая его апертуру. Изображения интерференционных картин регистрировали с помощью высокоразрешающего рентгеновского детектора PCO с пространственным разрешением около 2 мкм (эффективный размер пикселя составлял 0.74 мкм), расположенного на расстоянии Тальбота  $Z_T = 4.84$  м. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 2.

Без использования составной преломляющей линзы четкое изображение периодической картины полос формируется на расстоянии  $z^* = 5.44$  м, большем, чем расстояние Тальбота, что обусловлено сферическим волновым фронтом рентгеновского пучка, формируемого источником. При этом на расстоянии Тальбота наблюдалось изображение пучка, имеющее сложную интерференционную структуру (рис. 3а).

Составная преломляющая линза, включающая девять бериллиевых одиночных параболических линз с радиусом кривизны их преломляющих поверхностей 200 мкм, была установлена на расстоянии 34 м от источника. При используемой энергии рентгеновского излучения 30 кэВ расчетное фокусное расстояние такой линзы совпадает с расстоянием от нее до источника. Это обеспечивает высокую степень коллимации преобразованного пучка, волновой фронт которого становится плоским. В этом случае многолинзовый интерфе-

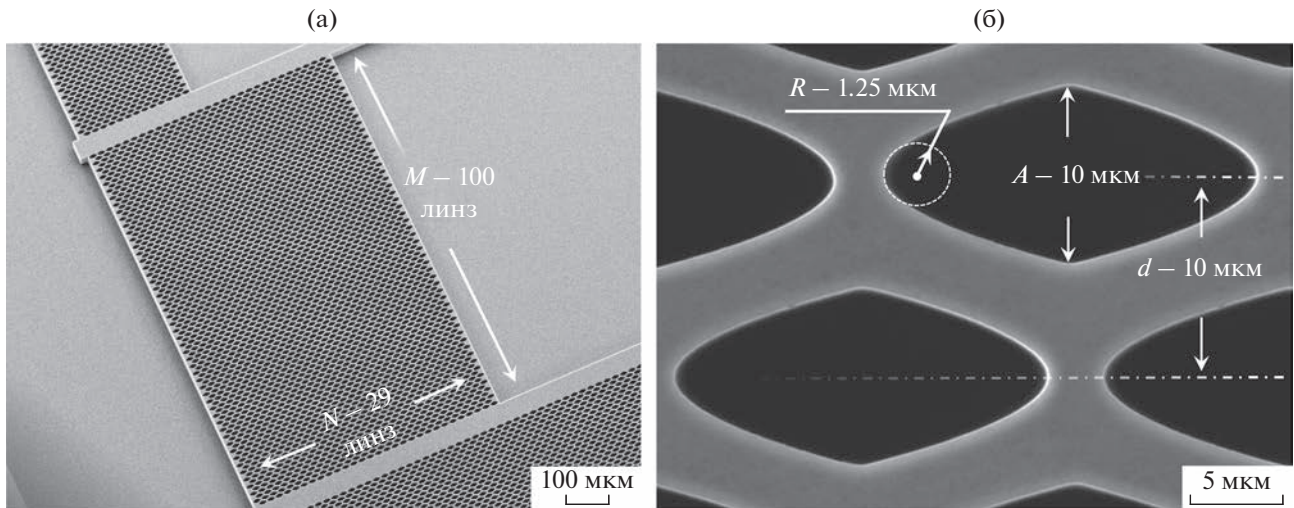


Рис. 1. Изображения 100-линзового интерферометра, полученные в разном масштабе при помощи растрового электронного микроскопа.

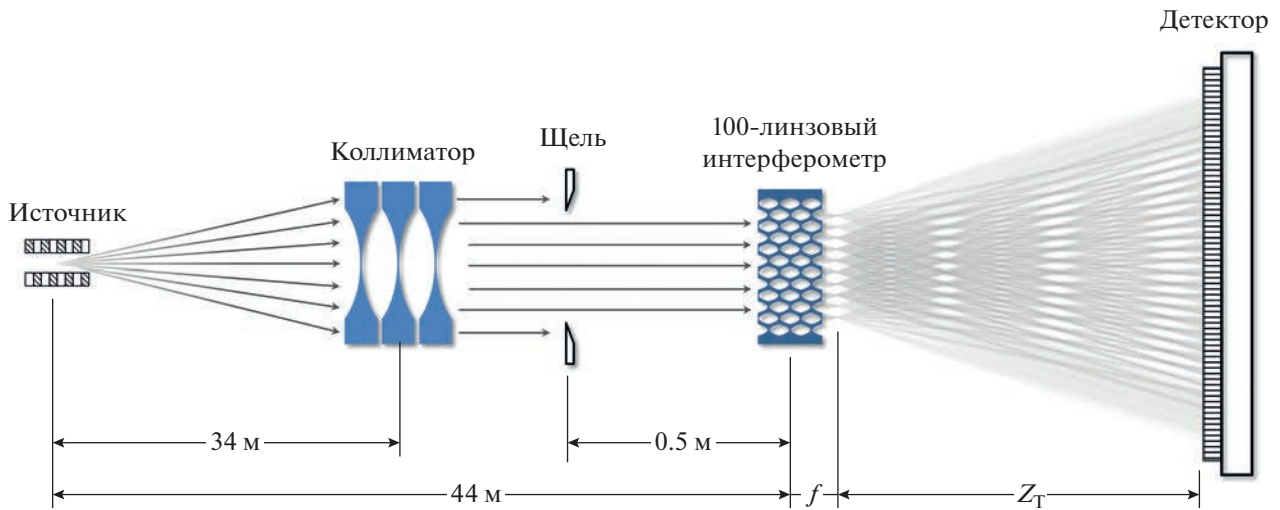


Рис. 2. Экспериментальная оптическая схема тестирования метода определения степени коллимации рентгеновского пучка.

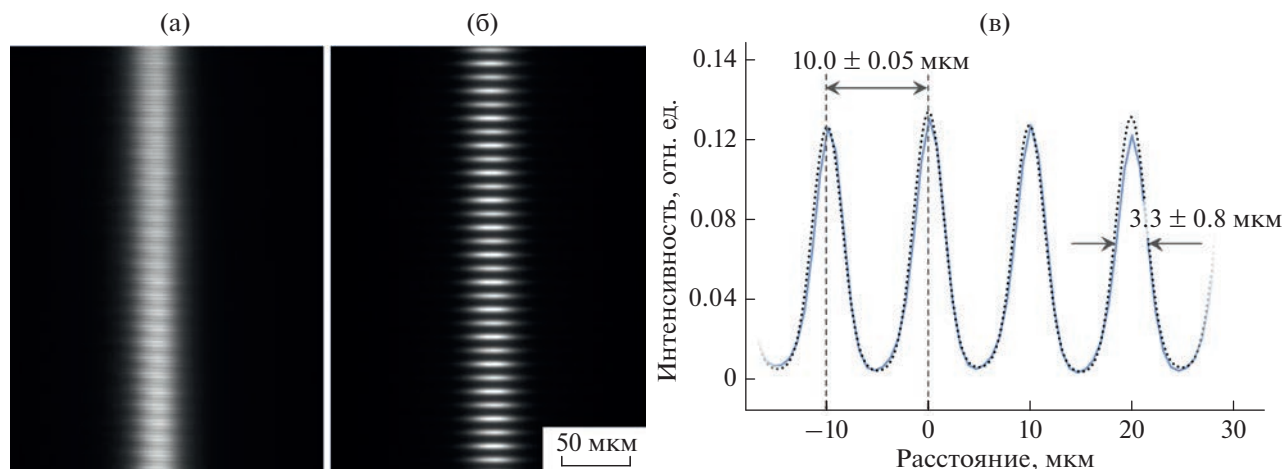
рометр, освещаемый сколлимированным рентгеновским пучком, формирует периодическую картину интерференционных полос, наблюдаемую на расстоянии Тальбота  $Z_T = 4.84$  м (рис. 3б).

На рис. 3в представлено распределение интенсивности, полученное в сечении изображения интерференционных полос. Измеренный период интерференционной картины составил  $\Lambda = 10 \pm \pm 0.05$  мкм, что полностью соответствует результатам компьютерного моделирования рассматриваемой оптической схемы, выполненного с учетом конечного размера источника  $s_0 = 30$  мкм и пространственного разрешения используемого высокоразрешающего детектора  $l_d = 2$  мкм. Изме-

ренная ширина интерференционной полосы  $\omega = 3.3 \pm 0.8$  мкм позволяет оценить эффективный вертикальный размер источника, используя выражение:

$$\omega = \left[ (\Lambda ds_0 / \lambda z_0)^2 + \sigma_f^2 + l_d^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

учитывающее вклад дифракционного уширения рентгеновского пучка  $\sigma_f$  на физической апертуре преломляющих линз интерферометра и пространственное разрешение детектора  $l_d$  в ширину формируемых интерференционных полос. Рассчитанный вертикальный размер источника составил  $37 \pm 15$  мкм, что немного превышает его характерное значение 30 мкм.



**Рис. 3.** Интерференционные картины, наблюдаемые на расстоянии Тальбота без использования (а) и с использованием (б) составной преломляющей линзы для коллимации рентгеновского пучка. Распределение интенсивности в сечении изображения Тальбота (в): сплошная линия — эксперимент; пунктир — моделирование.

Следует отметить, что столь грубая оценка размера источника связана с необходимостью учитывать в расчетах пространственное разрешение используемого высокоразрешающего детектора, вносящее существенный вклад в уширение интерференционных полос на изображении. Вклад дифракционного уширения рентгеновского пучка на физической апертуре преломляющих линз интерферометра пренебрежимо мал по сравнению с пространственным разрешением детектора и не превышает 100 нм. Более точно определить размер источника можно только в том случае, когда пространственное разрешение детектора будет значительно меньше истинной ширины полосы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в настоящей работе новый метод определения степени коллимации рентгеновского пучка при помощи планарного многолинзового интерферометра является яркой демонстрацией возможности применения преломляющей оптики для формирования пучка на современных источниках рентгеновского излучения. Было показано, что оптические свойства рассматриваемого рентгеновского интерферометра, состоящего из ста рядов составных преломляющих линз, могут быть описаны с использованием формализма изображений Тальбота [21, 22], в рамках которого периодическая пространственная структура пучка формируется лишь на определенных расстояниях. Вне этих расстояний наблюдается более сложная интерференционная картина. Чувствительность формируемых изображений к форме волнового фронта рентгеновского пучка позволяет определить степень его коллимации, а также оценить когерентные свойства излучения.

Эффективность предложенного подхода продемонстрирована экспериментально на исследовательской станции ID15B источника синхротронного излучения ESRF при энергии 30 кэВ. На расчетном расстоянии Тальбота были зарегистрированы интерференционные картины, соответствующие прямому когерентному освещению интерферометра пучком со сферическим волновым фронтом, генерируемым ондуляторным источником, и пучку с плоским волновым фронтом, предварительно сколлимированным при помощи составной преломляющей линзы. Было показано, что составная преломляющая линза, установленная на фокусном расстоянии от источника, обеспечивает высокую степень коллимации преобразованного пучка с плоским волновым фронтом. Дополнительный анализ формируемых в представленном эксперименте интерференционных полос позволил оценить размер источника излучения, что делает многолинзовый интерферометр гибким и универсальным инструментом не только для подготовки и формирования рентгеновского пучка, но и для диагностики источника. Полученные экспериментальные данные полностью соответствуют теоретическим представлениям.

Стоит отметить, что рассматриваемая система линз может быть использована и для визуализации слабопоглощающих образцов подобно решеточным интерферометрам Тальбота [15–17]. Многолинзовый интерферометр является более гибким и эффективным формирователем периодических интерференционных картин. Многолинзовый интерферометр способен работать в широком диапазоне значений энергии жесткого рентгеновского излучения, в котором решеточный интерферометр становится слабопоглощающим и теряет

свою эффективность. Кроме того, размер фокусных пятен, создаваемых каждым рядом линз, может быть в десятки раз меньше размера щелей решеточного интерферометра, а числовая апертура расходящихся из фокусов пучков может значительно превышать углы дифракции рентгеновских лучей на щелях решеточного интерферометра.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена: при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по гранту № 075-15-2021-1362 в части разработки теории; при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-12043) в части обработки и анализа результатов исследования. Экспериментальная реализация метода выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта. Работа В.А. Юнкина по созданию кремниевых интерферометров была частично поддержана в рамках ГЗ № 075-00706-22-00. Работа М.Н. Сороковикова по исследованию геометрических характеристик составных преломляющих линз интерферометра выполнена при финансовой поддержке БФУ им. И. Канта в рамках научного проекта № 121122900221-9.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов с третьими лицами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B.* // Nature. 1996. V. 384. № 6604. P. 49. <https://doi.org/10.1038/384049a0>
2. *Snigireva I., Polikarpov M., Snigirev A.* // Synchrotron Radiat. News. 2022. V. 34. № 6. P. 12. <https://doi.org/10.1080/08940886.2021.2022387>
3. *Snigirev A.* // Synchrotron Free Electron Laser Radiat. Gener. Appl. (SFR-2022). Novosibirsk, June 27–30, 2022. P. 120. <https://indico.inp.nsk.su/event/61/attachments/1533/2171/SFR-22Bookofabstracts.8.06.pdf#page=122> (accessed 16 September 2022)
4. *Vaughan G.B.M., Wright J.P., Bytchkov A., Rossat M., Gleyzolle H., Snigireva I., Snigirev A.* // J. Synchrotron Radiat. 2011. V. 18. № Pt 2. P. 125. <https://doi.org/10.1107/S0909049510044365>
5. *Moosmann J., Ershov A., Altapova V., Baumbach T., Prasad M.S., Labonne C., Xiao X., Kashef J., Hofmann R.* // Nature. 2013. V. 497. № 7449. P. 374. <https://doi.org/10.1038/nature12116>
6. *Otten A., Köster S., Struth B., Snigirev A., Pfohl T.* // J. Synchrotron Radiat. 2005. V. 12. № 6. P. 745. <https://doi.org/10.1107/S0909049505013580>
7. *Roth T., Detlefs C., Snigireva I., Snigirev A.* // Opt. Commun. 2015. V. 340. P. 33. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.11.094>
8. *Snigirev A., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Schelokov I.* // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. № 12. P. 5486. <https://doi.org/10.1063/1.1146073>
9. *Zverev D., Barannikov A., Snigireva I., Snigirev A.* // Opt. Express. 2017. V. 25. № 23. P. 28469. <https://doi.org/10.1364/oe.25.028469>
10. *Bonse U., Hart M.* // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 6. № 8. P. 155. <http://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.1754212>
11. *Leitenberger W., Kuznetsov S.M., Snigirev A.* // Opt. Commun. 2001. V. 191. № 1–2. P. 91. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(01\)01104-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(01)01104-X)
12. *Paterson D., Allman B.E., McMahon P.J., Lin J., Moldovan N., Nugent K.A., McNulty I., Chantler C.T., Retsch C.C., Irving T.H.K., Mancini D.C.* // Opt. Commun. 2001. V. 195. № 1–4. P. 79. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(01\)01276-7](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(01)01276-7)
13. *Leitenberger W., Wendrock H., Bischoff L., Weitkamp T.* // J. Synchrotron Radiat. 2004. V. 11. № 2. P. 190. <https://doi.org/10.1107/S0909049503029169>
14. *Lyubomirskiy M., Snigireva I., Snigirev A.* // Opt. Express. 2016. V. 24. № 12. P. 13679. <https://doi.org/10.1364/oe.24.013679>
15. *David C., Nöhammer B., Solak H.H., Ziegler E.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. № 17. P. 3287. <https://doi.org/10.1063/1.1516611>
16. *Momose A., Kawamoto S., Koyama I., Hamaishi Y., Takai, K., Suzuki Y.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. V. 42. № 7B. P. L866. <https://doi.org/10.1143/jjap.42>
17. *Pfeiffer F., Kottler C., Bunk O., David C.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. № 10. P. 1. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.108105>
18. *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. 064801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.064801>
19. *Zverev D., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigirev A.* // Opt. Express. 2020. V. 28. № 15. P. 21856. <https://doi.org/10.1364/oe.389940>
20. *Sorokovikov M., Zverev D., Yunkin V., Kuznetsov S., Snigireva I., Snigirev A., Sorokovikov M.* // Proc. SPIE. V. 11839. № 8. P. 48. <https://doi.org/10.1117/12.2595017>
21. *Lyubomirskiy M., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Yunkin V., Vaughan G., Snigirev A.* // J. Synchrotron Radiat. 2016. V. 23. P. 1104. <https://doi.org/10.1107/S160057751601153X>
22. *Snigirev A., Snigireva I., Lyubomirskiy M., Kohn V., Yunkin V., Kuznetsov S.* // Opt. Express. 2014. V. 22. № 21. P. 25842. <https://doi.org/10.1364/oe.22.025842>
23. *Dilmanian F.A., Zhong Z., Ren B., Wu X.Y., Chapman L.D., Orion I., Thomlinson W.C.* // Phys. Med. Biol. 2000. V. 45. № 4. P. 933. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/4/309>
24. *Svatos J., Polack F., Joyeux D., Phalippou D.* // Opt. Lett. 1993. V. 18. № 16. P. 1367. <https://doi.org/10.1364/ol.18.001367>
25. *Momose A., Yashiro W., Maikusa H., Takeda Y.* // Opt. Express. 2009. V. 17. № 15. P. 12540. <https://doi.org/10.1364/oe.17.012540>



26. Momose A., Takeda T., Itai Y., Hira K. // Nat. Med. 1996. V. 2. № 4. P. 473.  
<https://doi.org/10.1063/1.1145931>
27. Zverev D., Snigireva I., Sorokovikov M., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigirev A. // Opt. Express. 2021. V. 29. № 22. P. 35038.  
<https://doi.org/10.1364/OE.434656>
28. 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. Synchrotron Radiat. 2019. V. 26. № 4. P. 1208.  
<https://doi.org/10.1107/S1600577519005708>
29. Snigirev A., Snigireva I., Vaughan G., Wright J., Rossat M., Bytchkov A., Curfs C. // J. Phys. Conf. Ser. 2009. V. 186. № 1. P. 12073.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/186/1/012073>
30. Chumakov A.I., Rüffer R., Leupold O., Barla A., Thiess H., Asthalter T., Doyle B.P., Snigirev A., Baron A.Q.R. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. № 1. P. 31.  
<https://doi.org/10.1063/1.126867>
31. Kohn V.G. // J. Synchrotron Radiat. 2017. V. 24. № 3. P. 609.  
<https://doi.org/10.1107/S1600577517005318>

## Determining the Collimation Degree for a Coherent X-Ray Beam Using a Planar Multilens Interferometer

D. A. Zverev<sup>1,\*</sup>, V. A. Yunkin<sup>2</sup>, S. M. Kuznetsov<sup>2</sup>, A. A. Barannikov<sup>1</sup>, M. N. Sorokovikov<sup>1</sup>,  
M. A. Voevodina<sup>1</sup>, A. A. Snigirev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Microelectronics Technology RAS, Chernogolovka, 142432 Russia*

\*e-mail: [daswazed@gmail.com](mailto:daswazed@gmail.com)

A method is proposed for determining the degree of collimation of a coherent X-ray beam using a planar multilens interferometer. The method is based on analyzing Talbot images, which are periodic patterns of interference fringes formed by the interferometer at appropriate distances. The high sensitivity of the position and period of the interference fringes to the shape of the X-ray beam wave front makes it possible to determine the degree of its collimation, as well as to evaluate the coherent properties of the radiation. The effectiveness of the proposed approach has been experimentally demonstrated at the ID15B beamline of the ESRF synchrotron radiation source. A theoretical study has been carried out, and the corresponding results of computer simulation have been presented. The experimentally data obtained fully correspond to the theoretical estimates.

**Keywords:** X-ray optics, compound refractive lenses, coherence, interferometer, synchrotron, source diagnostics.