

09

## Составной рентгеноаморфный радиационно-охлаждаемый фильтр на основе свободно висящих тонких пленок для источников синхротронного излучения

© Ю.В. Хомяков,<sup>1</sup> Я.В. Ракшун,<sup>1,2</sup> М.В. Горбачев,<sup>3</sup> О.М. Кутькин,<sup>3</sup> В.А. Чернов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики,  
630102 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073 Новосибирск, Россия  
e-mail: yu.v.khomyakov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2024 г.

В окончательной редакции 17 мая 2024 г.

Принято к публикации 17 мая 2024 г.

Предложен радиационно-охлаждаемый рентгеноаморфный фильтр на основе тонких пленок для интенсивных источников синхротронного излучения четвертого поколения с высокой долей когерентного потока фотонов. С целью обеспечения рентгеноаморфности в качестве материала фильтра предложено использовать стеклоуглерод, металлические стекла и многослойные структуры с наноразмерными периодами. Предполагается, что фильтрация будет производиться поэтапно: сначала будет подавляться излучение в низкоэнергетичном диапазоне (до  $\sim 5$  keV), а затем при необходимости в среднеэнергетичном (до  $\sim 15$  keV). Для осуществления первичной фильтрации излучения в качестве поглотителя предложено использовать набор стеклоуглеродных пленок, а для дополнительной фильтрации — набор пленок, содержащих элементы с более высокими атомными номерами. Подбор материалов фильтрующих пленок позволит реализовать последовательное подавление гармоник ондуляторного излучения при работе в высокоэнергетичном (выше 15 keV) диапазоне. Для стеклоуглеродных пленок проведено моделирование тепловых нагрузок и стационарного распределения температур. Подобрана толщина таких пленок, при которой их максимальная температура в тепловом равновесии при радиационном охлаждении не превышает температуру графитизации.

**Ключевые слова:** рентгеновский фильтр, рентгеноаморфность, радиационное охлаждение, синхротронное излучение, ондуляторное излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58356.178-24

### Введение

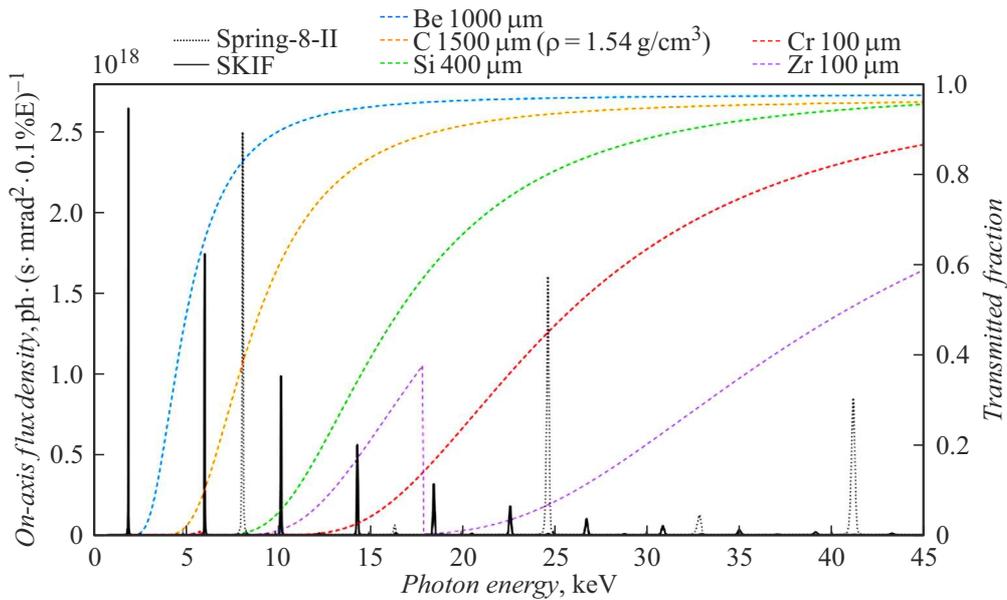
Ключевой особенностью источников синхротронного излучения (СИ) нового, четвертого, поколения является сверхнизкий эмиттанс, приближенный к дифракционному пределу. Циркулирующие в накопительных кольцах таких источников электронные пучки генерируют интенсивные пучки рентгеновского излучения с малой угловой расходимостью, относительно высокой долей когерентного потока фотонов и большими поперечными длинами когерентности. Указанные свойства излучения дают возможность применять новые „когерентные“ методы исследования вещества. Тем не менее реализация потенциала современных источников СИ требует развития специализированной рентгеновской оптики, в частности, фильтров.

Для проведения исследований в жестком рентгеновском диапазоне на источниках СИ с относительно низкой энергией электронов (3 GeV и ниже) используют

высшие гармоники ондуляторов (рис. 1). При этом оказывается необходимым подавлять первые высокоинтенсивные длинноволновые ондуляторные гармоники во избежание перегрева рентгенооптических элементов станций. По этой причине перед оптикой станций располагают блоки охлаждаемых фильтров.

В накопительных кольцах источников СИ четвертого поколения полная мощность, излучаемая электронами при прохождении через магнитное поле ондулятора, достигает десятков киловатт. После предварительной коллимации мощность ондуляторного излучения (ОИ) составляет сотни или даже тысячи ватт. При этом поперечный размер ондуляторных пучков, о которых идет речь, порядка миллиметра. Таким образом, первичные фильтрующие элементы на современных ондуляторных станциях подвергаются крайне высоким локальным тепловым нагрузкам, из-за чего возникает нетривиальная задача теплоотвода.

Одним из решений является использование монокристаллического алмаза в роли первичного фильтрующего



**Рис. 1.** Сравнение спектров излучения, генерируемого одним и тем же ондулятором (табл. 1) при его размещении в прямолинейном промежутке накопительных колец Spring-8-II (энергия электронов 6 GeV, [7]) и SKIF (3 GeV, [8]). Приведены коэффициенты пропускания некоторых фильтров — подбор материалов и толщин фильтра позволяет обеспечить последовательное подавление гармоник ОИ при работе в высокоэнергетическом диапазоне.

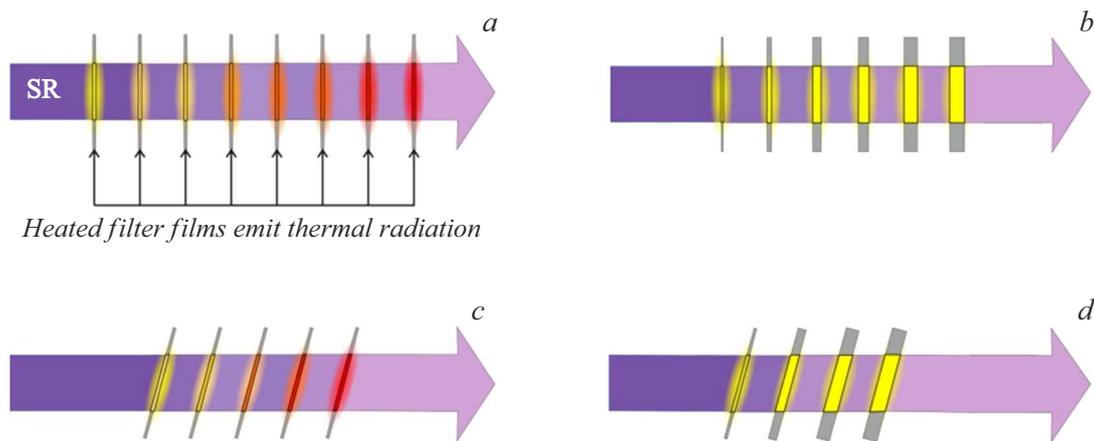
**Таблица 1.** Используемые в расчетах параметры накопительного кольца и сверхпроводящего ондулятора

Параметр	Значение
Накопитель	
Энергия электронов, GeV	3
Ток пучка в основном режиме, mA	400
Горизонтальная бета-функция в центре прямолинейного промежутка, m	15.6
Вертикальная бета-функция в центре прямолинейного промежутка, m	2.4
Горизонтальный эмиттанс в основном режиме (при полном токе), pm-rad	68.18
Вертикальный эмиттанс в основном режиме (при полном токе), pm-rad	6.818
Горизонтальный размер электронного сгустка в центре прямолинейного промежутка $\sigma_x = FWHM_x/2.355$ , $\mu\text{m}$	32.6
Вертикальный размер электронного сгустка в центре прямолинейного промежутка $\sigma_y = FWHM_y/2.355$ , $\mu\text{m}$	4.02
Сверхпроводящий ондулятор	
Период, mm	15.6
Пиковое магнитное поле, T	1.25
Число периодов	128

элемента [1]. Монокристалл алмаза благодаря рекордно высокой теплопроводности может выдерживать чрезвычайно большие тепловые потоки, однако прохождение ОИ через монокристалл приводит к возникновению нежелательных брэгговских рефлексов на некоторых длинах волн, что затрудняет или даже делает невозможным использование излучения с такими длинами волн. Другими словами, спектр прошедшего сквозь монокри-

сталл ОИ становится испещренным так называемыми „глитчами“ [2], т.е. провалами, соответствующими дифракции на кристаллических плоскостях.

Другим широко применяемым материалом первичного фильтра служит графит, поскольку он также выдерживает крайне высокие температуры [3]. Тем не менее использование такого фильтра приводит к паразитной интерференции при прохождении частично когерент-



**Рис. 2.** Радиационно-охлаждаемый рентгеновский фильтр на основе тонких пленок в различных вариантах: *a* — с нормальным падением лучей и постоянной толщиной пленок; *b* — с нормальным падением лучей и растущей толщиной пленок; *c* — с падением лучей под углом  $\theta$  к поверхности и постоянной толщиной пленок; *d* — с падением лучей под углом  $\theta$  к поверхности и растущей толщиной пленок.

ного ОИ через поликристаллическое вещество. Видность возникающей нежелательной интерференционной картины сильно зависит от размеров кристаллических зерен. Материал, состоящий из кристаллитов размером в нескольких десятков нанометров, может считаться рентгеноаморфным [4]. Тогда в случае использования нанокристаллического углеродного фильтра [5] в условиях высоких тепловых нагрузок возникает требование о недопущении рекристаллизации. При этом переход к нанокристаллическим материалам означает существенное снижение теплопроводности, что усугубляет проблему теплоотвода. Так, например, при комнатной температуре теплопроводность природного алмаза выше теплопроводности нанокристаллического алмаза с размером зерен 10 nm на 2 порядка, а 6 nm — на 3 порядка [6].

При рабочих энергиях выше 30 keV многослойные зеркальные монохроматоры, применяющиеся на станциях источников СИ, из-за эффекта полного внешнего отражения (ПВО) пропускают излучение в низко- и среднеэнергетичной части спектра. Для его подавления вводят поглотители, изготовленные из материала, имеющего в своем составе элементы с более высокими атомными номерами (рис. 1). Даже с учетом коллимации и первичной фильтрации тепловые нагрузки на эти дополнительные фильтры оказываются чрезвычайно высокими, что приводит к тем же проблемам, что и описанные для первичного фильтра.

В настоящей работе представлен концепт рентгеноаморфного радиационно-охлаждаемого фильтра на основе тонких пленок. Такой рентгеновский фильтр, с одной стороны, способен выдерживать высокие тепловые нагрузки, а с другой — не вызывает паразитных дифракции и интерференции, а потому является актуальным для станций современных источников СИ.

## 1. Принцип работы радиационно-охлаждаемого фильтра

Принцип работы рассматриваемого рентгеноаморфного фильтра показан на рис. 2. Устройство представляет собой набор фильтрующих элементов — разнесенных свободно висящих тонких пленок, совокупно составляющих необходимую толщину фильтрующего вещества. Пленки предлагается изготавливать из стеклоглелера, металлических стекол, многослойных структур или других рентгеноаморфных материалов. В случае многослойной структуры толщина слоев выбирается малой (по порядку величины она составляет единицы нанометров), при этом межслойные границы препятствуют росту кристаллитов. При прохождении пучка СИ через фильтр поглощающие пленки нагреваются до установления теплового равновесия, т.е. до температуры, при которой мощность поглощаемого рентгеновского излучения сравнивается с мощностью испускаемого теплового излучения. Для обеспечения эффективности теплоотвода пленки размещают на достаточном удалении друг от друга. Толщину отдельной пленки выбирают так, чтобы минимизировать общее число фильтрующих элементов, но при этом не допускать их перегрева.

Предлагаемый радиационно-охлаждаемый тонкопленочный фильтр может быть изготовлен в различных исполнениях. В самом простом случае пленки одинаковой толщины располагаются под прямым углом к падающему ОИ (рис. 2, *a*). С целью минимизации числа фильтрующих элементов или для плавного изменения коэффициента пропускания фильтра пленки могут быть наклонены, как показано на рис. 2, *c*. В таком случае увеличится мощность, поглощаемая каждой пленкой, но поверхностная и объемная плотности поглощаемой мощности изменятся слабо, что будет продемонстриро-

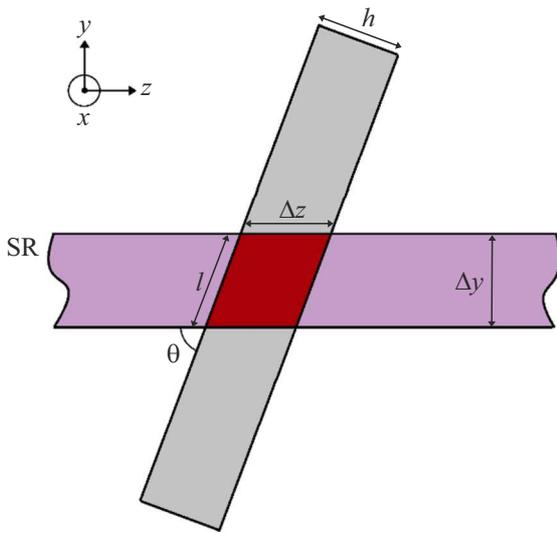


Рис. 3. Иллюстрация к задаче о наклонном фильтре.

вано далее. Возможна модификация обоих описанных вариантов с целью компактизации устройства: толщины пленок могут постепенно увеличиваться по мере аттенюации ОИ так, чтобы установившаяся пиковая температура пленок оставалась одинаковой (рис. 2, b, d).

Важно, что в EUV-литографии существует успешный опыт долгосрочного применения радиационно-охлаждаемых тонкопленочных экранов — пелликов. Поглощаемая одним таким экраном мощность может достигать десятков ватт при плотности поглощаемой мощности порядка  $1 \text{ W/cm}^2$ , при этом пелликл нагревается до температур порядка тысячи градусов [9,10].

Рассмотрим подробнее задачу о влиянии наклона пленки по отношению к пучку СИ на ее поглощательную способность. Пусть параллельный пучок монохроматического рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda$  и поперечными размерами  $\Delta x \times \Delta y$  проходит через пленку толщины  $h$  с показателем преломления  $n = 1 - \delta - i\beta$  под углом  $\theta$  к поверхности (рис. 3). Тогда толщина слоя вещества, через который проходит излучение, равна  $\Delta z = \frac{h}{\sin \theta}$ , а размер освещенной области на поверхности пленки составляет  $\Delta x \times l$ , где  $l = \frac{y}{\sin \theta}$ . Поток фотонов  $\Phi$ , т.е. число фотонов, проходящих через площадь  $\Delta x \times \Delta y$  в единицу времени, по закону Бугера–Ламберта–Бера падает экспоненциально с глубиной вещества  $z$ :

$$\Phi(z) = \Phi_0 \exp(-\mu z), \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  — поток фотонов до поглощения,  $\mu$  — линейный коэффициент поглощения данного вещества для длины волны  $\lambda$ . Полное число поглощенных фотонов в единицу времени:

$$\Phi_{abs} = \Phi_0 - \Phi(\Delta z) = \Phi_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mu h}{\sin \theta}\right) \right]. \quad (2)$$

Объем вещества пленки, в котором происходит поглощение:

$$V = \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\Delta x \Delta y h}{\sin \theta}. \quad (3)$$

Тогда из (2) и (3) усредненные объемная  $q_v$  и поверхностная  $q_s$  плотности поглощаемой мощности выражаются как

$$\bar{q}_v = \frac{\Phi_{abs} E_{ph}}{V} = \frac{1}{\Delta x \Delta y h} \frac{2\pi \hbar c}{\lambda} \Phi_0 \sin \theta \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mu h}{\sin \theta}\right) \right], \quad (4)$$

$$\bar{q}_s = \bar{q}_v h,$$

где  $E_{ph} = \frac{2\pi \hbar c}{\lambda}$  энергия фотонов.

Отметим, что для длины волны поглощаемого фильтра рентгеновского излучения  $\lambda = 0.5 \text{ nm}$  и для типичной (как показано в разд. 3) толщины пленки  $h = 250 \text{ nm}$  имеем

$$\mu h = 4\pi\beta \frac{h}{\lambda} \sim 4\pi \cdot 10^{-6} \frac{250 \text{ nm}}{0.5 \text{ nm}} \sim 10^{-2} \ll 1.$$

Теперь положим  $\theta \sim 1 \text{ rad}$  (т.е. не случай скользкого падения) и, разложив (4) в ряд по  $\frac{\mu h}{\sin \theta} \sim \mu h \ll 1$ , получим

$$\bar{q}_v \propto \frac{\sin \theta}{h} \left[ 1 - 1 + \frac{\mu h}{\sin \theta} - \frac{1}{2} \left( \frac{\mu h}{\sin \theta} \right)^2 \right] = \mu \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\mu h}{\sin \theta} \right]. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что усредненная плотность поглощенной мощности медленно падает с уменьшением  $\theta$ . Считая эту плотность константой, получаем теперь для поглощенной и переизлученной мощностей

$$P_{abs} = \bar{q}_v V \propto \frac{1}{\sin \theta}, \quad (6)$$

$$P_{rad} = 2\varepsilon\sigma T^4 l \Delta x \propto \frac{1}{\sin \theta},$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты,  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $T$  — температура облучаемых поверхностей пленки.

Таким образом, в первом приближении (не скользкого падения) для одной пленки величины  $\bar{q}_v$ ,  $\bar{q}_s$  и  $T$  не зависят от угла наклона в состоянии теплового равновесия. Однако при уменьшении угла  $\theta$  эффективная толщина фильтра увеличивается в  $1/\sin \theta$  раз, что соответствует уменьшению необходимого числа пленок. В отличие от этого применение пленок большей толщины  $h^* = h/\sin \theta$ , расположенных по нормали к пучку ОИ, приводит к росту температуры теплового равновесия, как видно из (6): поглощаемая каждой отдельной пленкой мощность увеличивается, а площадь пятна нагрева, т.е. площадь интенсивно излучающей поверхности пленки, остается минимальной.

Необходимо подчеркнуть, что предложенная концепция составного фильтра допускает некоторые дефекты пленок. Пусть в  $i$ -й пленке фильтра имеется сквозное отверстие малого диаметра, тогда проходящий через

это отверстие луч опередит по фазе проходящие через пленку лучи на величину

$$\Delta\varphi_i = 2\pi \frac{\delta h}{\lambda \sin \theta}. \quad (7)$$

Для примера возьмем в качестве материала пленки стеклоглерод с плотностью  $1.54 \text{ g/cm}^3$ . При нормальном падении рентгеновских лучей с рабочей длиной волны  $\lambda = 0.1 \text{ nm}$  на стеклоглеродную пленку толщины  $250 \text{ nm}$  имеем

$$\Delta\varphi_i = 2\pi \frac{2.1 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \text{ nm}}{0.1 \text{ nm}} \approx 2\pi \cdot 0.005 < \pi/2.$$

То есть абберация волнового фронта с запасом остается в пределах допуска Рэля  $\lambda/4$ . Резонно предположить, что случайные положения дефектов будут равномерно распределены по площади каждой пленки фильтра, а вероятность того, что на пути одного и того же луча окажется несколько дефектов на разных пленках, мала. Тогда при прохождении через все пленки абберация волнового фронта также останется меньшей, чем  $\lambda/4$ .

Отдельного рассмотрения требует возможность применения тонких многослойных пленок под скользящими углами к ОИ. В такой геометрии за счет брэгговской дифракции на многослойной структуре устройство могло бы селективно отражать излучение в заданном узком диапазоне длин волн, слабо уменьшая интенсивность в остальном спектре. Расположение пленок внутри блока фильтров под разными углами или применение разных многослойных структур позволило бы организовать „эквализацию“ рентгеновского излучения, т.е. придать любую наперед заданную форму зависимости коэффициента пропускания фильтра от энергии. Тем не менее необходимое для выполнения условия Брэггов обеспечение плоскостности такой тонкой пленки в границах освещаемой области представляется крайне нетривиальной задачей, особенно с учетом высочайших тепловых нагрузок. Другим потенциальным направлением развития тонкопленочных фильтров могло бы стать применение эффекта ПВО для выведения из пучка низкоэнергетической части излучения, что, однако, потребовало бы располагать пленки под еще меньшими скользящими углами к рентгеновским лучам.

Предложенный тонкопленочный фильтр может выполнять ряд дополнительных функций в оптических линиях станций источников СИ. Устройство возможно использовать для мониторинга интенсивности, формы, размеров, положения и направления рентгеновского пучка по тепловому излучению. Для этого необходимо направить пару ИК-камер/тепловизоров через смотровые окна на первую и последнюю фильтрующие пленки. На регистрируемых температурных картах будут разрешимы относительно резкие границы отпечатка пучка (показано в разд. 3).

Единичная пленка может служить в качестве окна в сверхвысоковакуумных каналах. Весь пакет пленок при

использовании соответствующих материалов может исполнять роль газопоглотителя. Кроме того, предложенный фильтр будет снижать молекулярную проводимость вакуумного канала.

## 2. Материалы

Широкий набор технологически доступных аморфных материалов и многослойных структур [11] позволит эффективно подбирать фильтры для различных диапазонов излучения. Предполагается, что фильтрация ОИ будет производиться в несколько этапов, для чего будет использована комбинация фильтров. При этом первичный фильтр можно устанавливать во фронтэнды экспериментальных станций источников СИ, а дополнительные фильтры, содержащие более тяжелые химические элементы, будут вводиться в пучок при необходимости. Естественно, для обеспечения долговременной термической стабильности во всех используемых фильтрах следует выбирать устойчивые к высоким температурам материалы поглощающих пленок.

Первичный фильтр предназначен для поглощения преимущественно низкоэнергетической части спектра, поэтому пленки первичного фильтра необходимо изготавливать из материала с низким атомным номером. В качестве кандидатов на такой материал выступают стеклоглерод и многослойные структуры на основе бериллия, бора, углерода, азота и кислорода, например,  $\text{V}_4\text{C}/\text{BeO}_x$ ,  $\text{C}/\text{BN}$  и другие. Для дополнительной фильтрации могут, например, использоваться термостабильные многослойные пленки  $\text{TiAlN}/\text{Si}_3\text{N}_4$  [12],  $\text{Sc}/\text{CrN}_x$  [13] или  $\text{SiC}/\text{Be}$ . Для более жесткого диапазона можно рассмотреть многослойные структуры с более тяжелыми химическими элементами, такие, как  $\text{WC}_x/\text{V}_4\text{C}$  [14], а также тугоплавкие металлические стекла на основе  $\text{Mo}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Re}$  [15] и другие.

Фильтрующие пленки можно располагать в вакууме, либо в атмосфере азота и благородных газов, в том числе  $\text{He}$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ . В случае газовой атмосферы к механизму радиационного охлаждения пленок добавится охлаждение за счет передачи части тепла обтекающему пленки газу. Кроме того, станет доступно плавное изменение кривой пропускания фильтра путем регулировки давления газа в камере.

## 3. Моделирование

Для проверки работоспособности тонкопленочного радиационно-охлаждаемого рентгеновского фильтра проведены расчеты спектров ОИ, тепловых нагрузок и распределения температур пленок в состоянии теплового равновесия. В расчетах используются параметры накопительного кольца [8] и сверхпроводящего ондулятора станции 1–1 „Микрофокус“ [16] источника СИ 4-го поколения ЦКП „СКИФ“ (табл. 1). Предполагается, что генерируемый пучок ОИ перед прохождением через

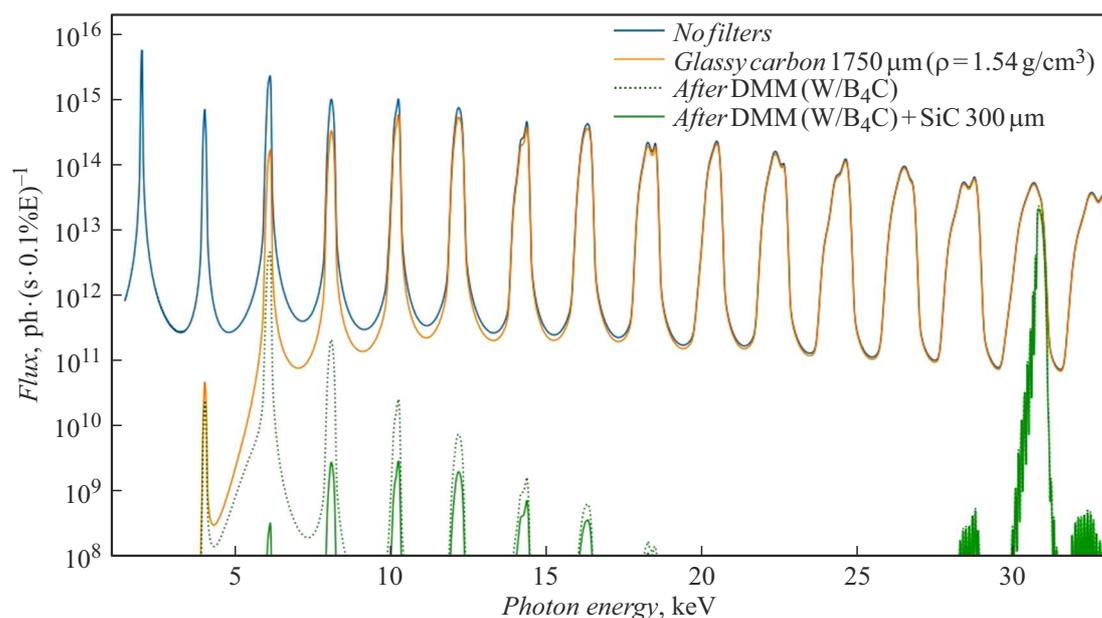
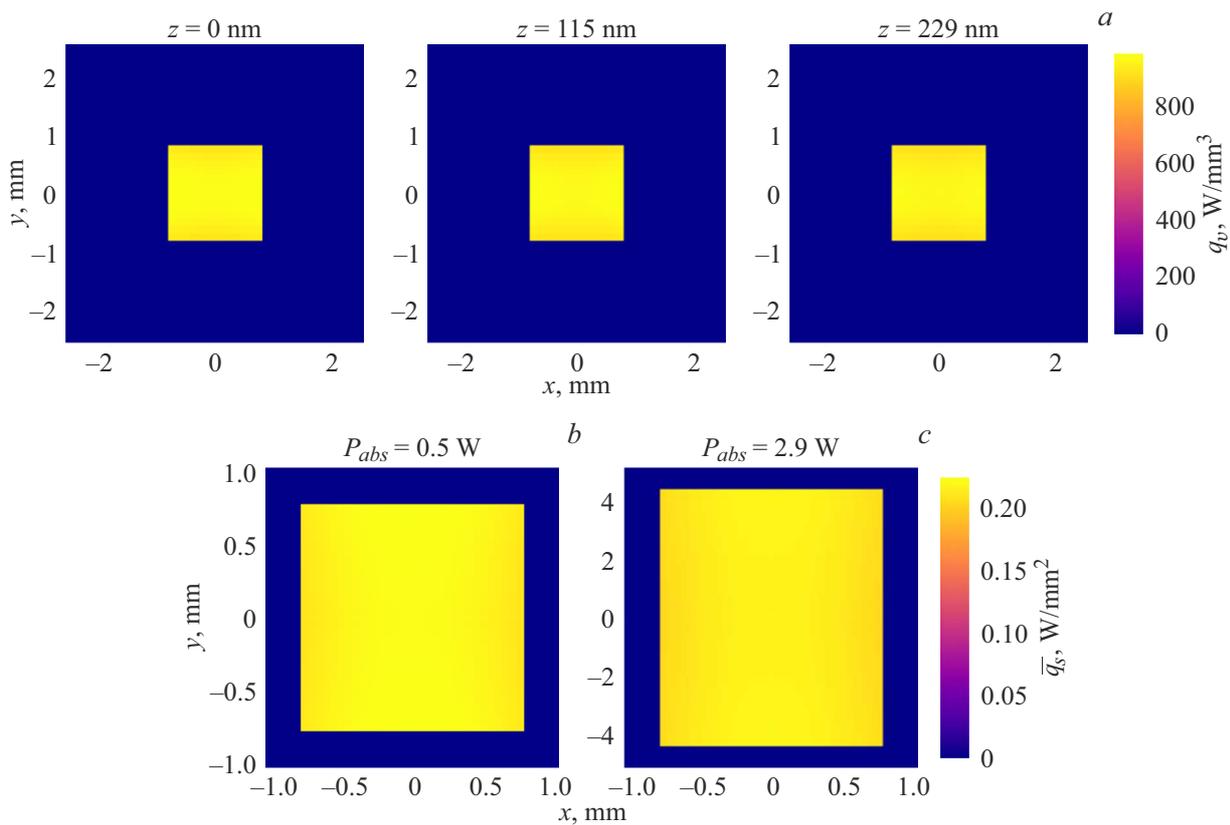


Рис. 4. Аттенуация паразитных „мягких“ гармоник ондулятора. Расчет выполнен с помощью SPECTRA [19].

Таблица 2. Поглощение в стеклоглеродных пленках при нормальном падении ОИ. Освещаемая область  $(1.5 \text{ mm})^2$

Одиночные пленки разной толщины				
Толщина пленки $h$ , nm	Прошедшая мощность, W	Поглощенная мощность, W	Средняя плотность поглощенной мощности $\bar{q}_v$ , W/mm <sup>3</sup>	Средняя плотность поглощенной мощности $\bar{q}_s$ , W/mm <sup>2</sup>
230	298.85	0.49	941.55	0.22
460	298.36	0.97	937.68	0.43
920	297.41	1.93	929.96	0.86
1840	295.55	3.79	914.51	1.68
2300	294.64	4.69	906.78	2.09
Набор пленок одинаковой толщины $h = 230 \text{ nm}$				
Номер пленки	Прошедшая мощность, W	Поглощенная мощность, W	Средняя плотность поглощенной мощности $\bar{q}_v$ , W/mm <sup>3</sup>	Средняя плотность поглощенной мощности $\bar{q}_s$ , W/mm <sup>2</sup>
1	298.85	0.487	941.55	0.22
2	298.36	0.483	933.82	0.21
3	297.88	0.479	926.09	0.21
4	297.41	0.475	918.37	0.21
5	296.94	0.471	910.64	0.21
6	296.47	0.467	902.92	0.21
7	296.01	0.463	895.19	0.21
8	295.55	0.459	887.47	0.20
9	295.09	0.455	879.74	0.20
10	294.64	0.451	872.01	0.20



**Рис. 5.** Карты плотности мощности ОИ, поглощаемого первой стеклоглеродной пленкой толщины  $h = 230$  nm: *a* — срезы объемной плотности  $q_v$  на разной глубине пленки при нормальном падении ОИ; *b* — усредненная по глубине поверхностная плотность  $\bar{q}_s$  при нормальном падении ОИ; *c* — усредненная по глубине поверхностная плотность  $\bar{q}_s$  при падении ОИ под углом  $10^\circ$  к поверхности.

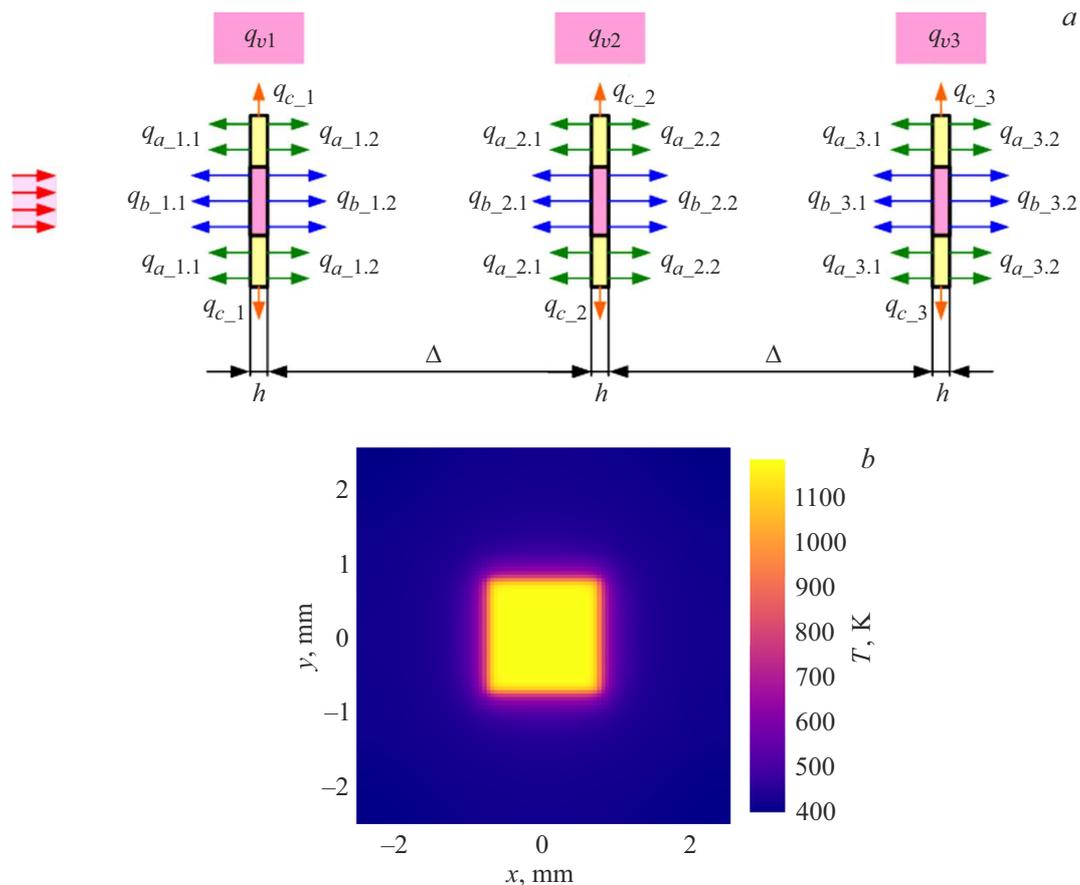
блок фильтров подвергается коллимированию: во фронте станции масками предварительно задается угловая апертура  $(75 \mu\text{rad})^2$ .

На рис. 4 приведена спектральная плотность потока фотонов из ондулятора в телесный угол  $(75 \mu\text{rad})^2$  до фильтрации, после стеклоглеродного фильтра суммарной толщины  $1750 \mu\text{m}$ , после двухзеркального многослойного монохроматора (ДЗМ, англ. „DMM“), настроенного на пропускание  $30.9 \text{ keV}$ , и после ДЗМ с введенным дополнительным фильтром SiC суммарной толщины  $300 \mu\text{m}$ . Необходимая толщина первичного фильтра набирается комбинацией пакета из  $\sim 1000$  стеклоглеродных тонких пленок, принимающих наибольшую тепловую нагрузку, и располагаемых вслед за ним пластин стеклоглерода. При работе на высоких энергиях зеркала ДЗМ [17] располагают под скользящими углами  $\sim 0.5^\circ$  к пучку, из-за чего ДЗМ пропускает низкоэнергетические гармоники ондулятора вследствие эффекта ПВО. Ввод дополнительного фильтра SiC  $300 \mu\text{m}$  обеспечивает подавление этих паразитных гармоник, значительно снижая тепловую нагрузку на дальнейшую рентгеновскую оптику станции. Необходимая толщина SiC набирается пакетом многослойных пленок SiC/Be.

Для оценок тепловых потоков на вакууммированном первичном фильтре здесь и далее поглощающие стеклоглеродные пленки считались однородными с плотностью  $\rho = 1.54 \text{ g/cm}^3$ , что соответствует температуре пиролиза  $1373 \text{ K}$  (марка SIGRADUR® K, [18]). Стеклоглерод, изготавливаемый при более высоких температурах (на уровне  $2473 \text{ K}$ ), имеет вкрапления графита и не может считаться аморфным, поэтому в расчете он не рассматривался. Расстояние от центра ондулятора до первичного фильтра задавалось равным  $20 \text{ m}$ .

В первой части табл. 2 охарактеризовано поглощение ОИ первой стеклоглеродной пленкой первичного фильтра в случае нормального падения, рассмотрены разные толщины пленки. Для дальнейшего расчета выбрана толщина  $230 \text{ nm}$ , поглощение ОИ первыми десятью такими пленками охарактеризовано во второй части табл. 2. Толщина пленки выбиралась так, чтобы тепловое равновесие достигалось при температуре меньшей, чем температура пиролиза стеклоглерода выбранной марки ( $1373 \text{ K}$ ): при превышении этой температуры начинается графитизация.

На рис. 5 показаны срезы объемной плотности поглощаемой мощности  $q_v$  на разной глубине пленки при нормальном падении ОИ (рис. 5, *a*), а также карты усред-



**Рис. 6.** Лучистый теплообмен в составном фильтре на основе стеклоглеродных пленок толщины 230 нм: *a* — иллюстрация к модельной задаче; *b* — расчетное распределение температур на поверхности первой пленки фильтра.

ненной по глубине  $h = 230$  нм поверхностной плотности поглощаемой мощности  $\bar{q}_s$  при нормальном падении пленки (рис. 5, *b*) и при падении под углом  $10^\circ$  к поверхности пленки (рис. 5, *c*). При наклоне пленки интегральная мощность  $P_{abs}$  увеличивается с 0.5 до 2.9 Вт, т. е. в 5.8 раз (что согласуется с  $1/\sin(10^\circ) \approx 5.8$ ), тогда как средние поверхностная и объемная плотности  $\bar{q}_s$  и  $\bar{q}_v$  меняются слабо. Расчеты распределения теплового потока проводились с использованием программы SPECTRA [19]. В дальнейших расчетах рассматривался только случай нормального падения рентгеновских лучей.

С целью оценки установившегося распределения температур в составном фильтре рассмотрена модельная задача лучистого теплообмена, изображенная на рис. 6, *a*. Для учета в первом приближении влияния частичного поглощения соседними пленками испускаемого теплового излучения в задаче взяты наиболее теплонагруженные первые три фильтрующие пленки толщины  $h = 230$  нм, разнесенные друг от друга на  $\Delta = 5$  мм. В соответствии со второй частью табл. 2, внутри пленок заданы однородные объемные источники теплоты  $q_{v1}$ ,  $q_{v2}$  и  $q_{v3}$ , поскольку плотность поглощаемой мощности на толщине пленки меняется слабо (рис. 5, *a*).

Коэффициент теплопроводности стеклоглерода выбранной марки слабо зависит от температуры [18], в численном моделировании он задавался постоянной величиной  $k = 6.5$  Вт/(м · К). Значение степени черноты поверхности всех рассматриваемых пленок задавалось постоянной величиной  $\varepsilon = 0.65$  [20]. Расчет стационарного распределения температур был выполнен в модуле Fluent программы ANSYS 2020R2 [21]. Расчетные мощности теплового излучения и максимальные температуры поверхностей приведены в табл. 3, температурная карта первой пленки — на рис. 6, *b*.

Пиковые температуры облучаемых пленок достигают  $\sim 1200$  К, что ниже температуры начала активной графитизации стеклоглерода. Это означает, что радиационное охлаждение достаточно эффективно, и пленки сохраняют рентгеноаморфность. Таким образом, применение радиационно-охлаждаемых стеклоглеродных пленок для первичной фильтрации мощного ОИ представляется возможным.

Для сравнения также был проведен расчет стационарного распределения температур в случае применения одного „цельного“ стеклоглеродного фильтра толщины  $1750$  мкм с водяным охлаждением, как показано на рис. 7, *a*. В расчете задавались коэффициент тепло-

Таблица 3. Расчет стационарного распределения температур

Номер пленки	$q_v$ , W/mm <sup>3</sup>	Обозначение теплового теплового потока	Излучаемая мощность, W	Суммарная излучаемая мощность, W	Пиковая температура, K
1	941.55	$q_{b\_1.1}$	0.22848	0.487	1182
		$q_{a\_1.1}$	0.04959		845
		$q_{b\_1.2}$	0.22091		1182
		$q_{a\_1.2}$	-0.01173		845
		$q_{c\_1}$	0.00001		422
2	933.82	$q_{b\_2.1}$	0.22321	0.483	1184
		$q_{a\_2.1}$	0.01783		856
		$q_{b\_2.2}$	0.22323		1184
		$q_{a\_2.2}$	0.01897		856
		$q_{c\_2}$	0.00001		473
3	926.09	$q_{b\_3.1}$	0.21724	0.479	1177
		$q_{a\_3.1}$	-0.01200		843
		$q_{b\_3.2}$	0.22459		1177
		$q_{a\_3.2}$	0.04942		843
		$q_{c\_3}$	0.00001		420

отдачи  $3000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  при температуре воды  $295.15 \text{ K}$  и теплопроводность стеклоуглерода  $6.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , не зависящая от температуры. Учитывалось испускание теплового излучения центральной частью фильтра, при этом степень черноты задавалась постоянной величиной  $\varepsilon = 0.65$ . Объемный источник теплоты  $q_v$  задавался с учетом изменения плотности поглощаемой мощности ОИ с глубиной фильтра (рис. 7, b).

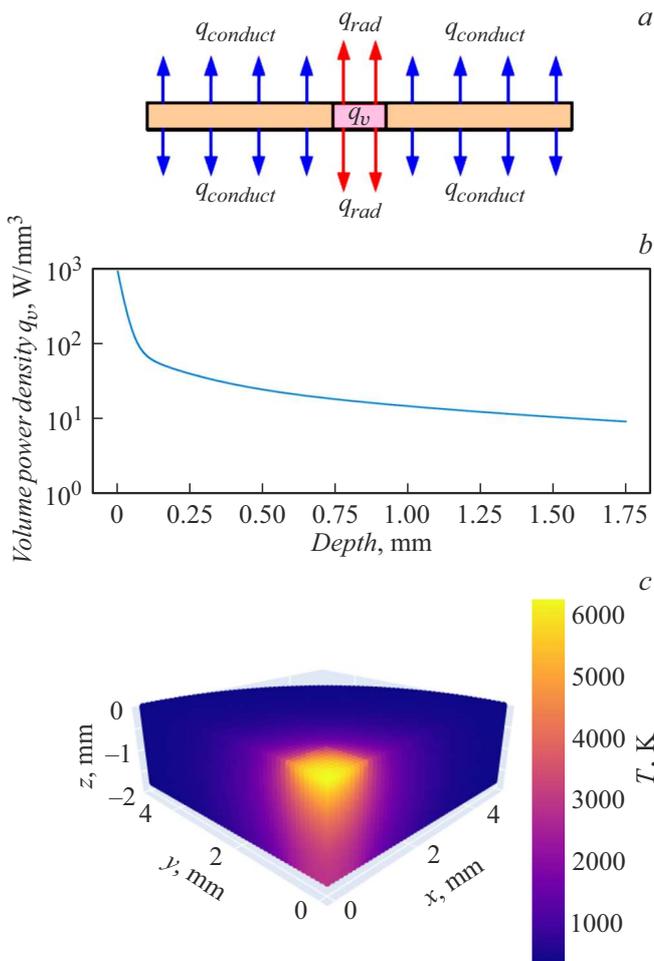
Полученное при таком моделировании распределение температур приведено на рис. 7, c. Максимальная температура в  $6000 \text{ K}$  превышает даже температуру кипения графита ( $4473 \text{ K}$ ). Вероятно, действительно, нагрев сначала приведет к локальной графитизации, при этом значительно возрастет теплопроводность, а температура теплового равновесия снизится. Даже если итоговая температура окажется меньшей, чем температура плавления графита ( $3925 \text{ K}$ ), и фильтр останется твердым, то он уже перестанет быть рентгеноаморфным.

Из рис. 7, b видно, что на первые  $\sim 230 \mu\text{m}$  глубины первичного стеклоуглеродного фильтра приходится наибольшая тепловая нагрузка (в первых  $230 \mu\text{m}$  поглощается  $72 \text{ W}$ , интегрально в  $1750 \mu\text{m}$  —  $144 \text{ W}$ ). Высокие объемные плотности мощности поглощаемого ОИ в этом приповерхностном слое соответствуют поглощению интенсивной первой ондуляторной гармоники. По этой причине целесообразным представляется использование комбинации радиационно-охлаждаемых фильтрующих пленок и конвенционально-охлаждаемого „толстого“ фильтра: около  $1000$  пленок толщины  $230 \text{ nm}$

примут на себя основную тепловую нагрузку, а следующая за ними пластина стеклоуглерода обеспечит необходимую толщину фильтрующего вещества.

## Заключение

В работе изложена идея радиационно-охлаждаемого рентгеноаморфного фильтра на основе тонких пленок для источников СИ четвертого поколения. В качестве материалов фильтрующих пленок предложены стеклоуглерод, тугоплавкие металлические стекла и потенциально устойчивые к высоким температурам варианты многослойных структур. Проведены модельные расчеты тепловых нагрузок и стационарного распределения температур для стеклоуглеродного первичного фильтра. Подобрана толщина пленок, при которой их максимальная температура в тепловом равновесии при радиационном охлаждении не превышает температуру графитизации. Проведенные расчеты свидетельствуют о возможности применения радиационно-охлаждаемых стеклоуглеродных пленок для первичной фильтрации мощного ОИ на станциях источников СИ четвертого поколения. Для последовательного подавления гармоник ОИ при работе в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне предложено использовать дополнительные фильтры с более высокими атомными номерами. В дальнейшем планируется отобрать наиболее перспективные материалы и провести экс-



**Рис. 7.** Стеклоуглеродный фильтр толщины  $1750\mu\text{m}$  с водяным охлаждением: *a* — иллюстрация к модельной задаче; *b* — зависимость объемной плотности мощности поглощаемого ОИ от глубины фильтра; *c* — расчетное распределение температур (изображен один квадрант фильтра).

периментальную проверку их термической стабильности.

Следует также отметить, что представленная концепция радиационно-охлаждаемого рентгеноаморфного фильтра может быть использована и на широких пучках излучения из вигглера, имеющих большие интегральные мощности, но существенно меньшие плотности потока.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания № FWGM-2022-0006.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] С.В. Волков, А.Г. Елесин, К.В. Золотарев, А.А. Краснов, К.С. Ломакин, С.В. Майоров, С.Н. Макаров, А.Д. Николенко, В.Н. Сероштан, Д.В. Скоков, А.В. Шевляков. В сб.: *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов „СКИФ“*, под ред. К.И. Шифер (Институт катализа СО РАН, Новосибирск, 2022), с. 53–71.
- [2] Q. Zhang, M. Polikarpov, N. Klimova, H.B. Larsen, R. Mathiesen, H. Emerich, G. Thorkildsen, I. Snigireva, A. Snigirev. *J. Synchrotron Rad.*, **26** (1), 109 (2019). DOI: 10.1107/S1600577518014856
- [3] A.M. Khounsary, P.J. Viccaro, T.M. Kuzay. *SPIE*, **1345**, 42 (1991). DOI: 10.1117/12.23301
- [4] M. Yabashi, K. Tono, H. Mimura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, T. Tanaka, H. Tanaka, K. Tamasaku, H. Ohashi, S. Goto, T. Ishikawa. *J. Synchrotron Rad.*, **21**, 976 (2014). DOI: 10.1107/S1600577514016415
- [5] H. Schulte-Schrepping, U. Hahn. *AIP Conf. Proc.*, **879**, 1042 (2007). DOI: 10.1063/1.2436241
- [6] M. Mohr, L. Daccache, S. Horvat, K. Brühne, T. Jacob, H. Fecht. *Acta Mater.*, **122**, 92 (2017). DOI: 10.1016/j.actamat.2016.09.042
- [7] H. Tanaka, T. Ishikawa, S. Goto, S. Takano, T. Watanabepresenter, M. Yabashi. In: *Proc. IPAC2016*, ed. by C. Petit-Jean-Genaz, Dong Eon Kim, Kyung Sook Kim, In Soo Ko, Kyung Ryul Kim, Volker RW Schaa (Busan, JACoW, 2016), p. 2867–2870. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2016-WEPOW019
- [8] А.В. Акимов, Ю.С. Актершев, В.В. Анашин, А.В. Андрианов, О.В. Анчугов, М.В. Арсентьева, П.А. Бак, Г.Н. Баранов, А.М. Барняков, А.М. Батраков, О.В. Беликов, Л.Л. Белова, Е.А. Бехтенов, В.И. Бухтияров, А.В. Богомяков, В.М. Борин, Д.Б. Буренков, Д.С. Винник, В.Н. Волков, Е.С. Вонда, К.М. Горчаков, К.А. Гришина, Д.С. Гуров, С.М. Гуров, Г.А. Гусев, Б.А. Довженко, В.Л. Дорохов, Е.Н. Деметьев, А.И. Ерохин, А.А. Жариков, К.В. Жилиев, А.А. Жуков, А.Н. Журавлев, К.В. Золотарев, Н.А. Золотухина, Я.В. Зубавичус, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, К.Ю. Карюкина, В.Д. Кашкин, В.А. Киселев, В.В. Кобец, Е.С. Котов, В.Я. Корчагин, А.А. Краснов, В.С. Крапивин, С.А. Крутихин, В.С. Кузьминых, Г.Н. Кулипанов, И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, А.Е. Левичев, Е.Б. Левичев, Д.В. Лешонок (Дорохова), П.В. Логачев, Ю.И. Мальцева, Ма Сяо Чао, Н.А. Мезенцев, О.И. Мешков, Н.В. Митянина, И.А. Морозов, А.А. Морсин, С.А. Никитин, Д.А. Никифоров, В.К. Овчар, И.Н. Окунев, А.В. Павленко, О.А. Павлов, А.Ю. Пахомов, В.М. Петров, С.Л. Пивоваров, П.А. Пиминов, А.В. Полянский, Д.Н. Пурескин, Д.Ф. Решетов, В.В. Репков, Е.А. Ротов, Т.В. Рыбickaя, С.Л. Самойлов, И.К. Седяров, А.М. Семенов, Д.В. Сеньков, Л.Е. Сердаков, Ш.Р. Сигнатулин, С.В. Сияткин, М.А. Скамароха, А.А. Старостенко, А.Г. Трибендис, А.В. Уткин, М.Г. Федотов, А.С. Цыгано, А.Д. Чернякин, И.Н. Чуркин, С.В. Шиянков, Д.А. Шведов, В.А. Шкаруба, К.С. Штро, Н.С. Щегольков. В сб.: *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов „СКИФ“*, под ред. К.И. Шифер (Институт катализа СО РАН, Новосибирск, 2022), с. 98–179.

- [9] N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, E.B. Kluekov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, L.A. Sjaenok, V.E. Banine, A.M. Yakunin. *J. Micro. Nanolithogr. MEMS MOEMS*, **11** (2), 021115 (2012). DOI: 10.1117/1.jmm.11.2.021115
- [10] C. Zoldesi, K. Bal, B. Blum, G. Bock, D. Brouns, F. Dhalluin, N. Dziomkina, J.D.A. Espinoza, J. de Hoogh, S. Houweling, M. Jansen, M. Kamali, A. Kempa, R. Kox, R. de Kruij, J. Lima, Y. Liu, H. Meijer, H. Meiling, I. van Mil, M. Reijnen, L. Scaccabarozzi, D. Smith, B. Verbrugge, L. de Winters, X. Xiong, J. Zimmerman. *Prog. on EUV Pellicle Dev. Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V. SPIE*, **9048** (90481N), 430 (2014). DOI: 0.1117/12.2049276
- [11] S.Yu. Zuev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, D.A. Tatarskiy, N.N. Tsybin, N.I. Chkhalo. *Tech. Phys.*, **68** (3), S630 (2023). DOI: 10.1134/S106378422390098X
- [12] J.L. Yue, Y.S. Yin, G.Y. Li. *Adv. Mater. Res.*, **79**, 489 (2009). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.489
- [13] E.O. Filatova, S.S. Sakhonenkov, A.V. Solomonov, R.M. Smertin, V.N. Polkovnikov. *Appl. Surf. Sci.*, **644**, 158791 (2024). DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.158791
- [14] P.E. Diehl, M.W. Lund, D.W. Madsen, L.C. McIntyre, D.J. Smith. *Thin Solid Films*, **239** (1), 57 (1994). DOI: 10.1016/0040-6090(94)90108-2
- [15] R. Yoshimoto, Y. Nogi, R. Tamura, S. Takeuchi. *Mater. Sci. Eng.*, **449**, 260 (2007). DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.365
- [16] V.A. Shkaruba, A.V. Bragin, A.A. Volkov, A.I. Erokhin, A.V. Zorin, F.P. Kazantsev, P.V. Kanonik, N.A. Mezentsev, A.N. Safronov, A.A. Sedov, O.A. Tarasenko, S.V. Khrushchev, V.M. Tsukanov. *Phys. Part. Nucl. Lett.*, **20** (4), 904 (2023). DOI: 10.1134/S1547477123040623
- [17] E.I. Glushkov, I.V. Malyshev, E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, Yu.V. Khomyakov, Ya.V. Rakshun, V.A. Chernov, I.P. Dolbnya. *J. Surf. Investig.*, **17** (1), 233 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070133
- [18] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://htw-germany.com/en/material>. Дата обращения 15.05.2024
- [19] T. Tanaka. *J. Synchrotron Rad.*, **28** (4), 1267 (2021). DOI: 10.1107/S1600577521004100
- [20] M. Balat-Pichelin, J.F. Robert, J.L. Sans. *Appl. Surf. Sci.*, **253** (2), 778 (2006). DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.01.007
- [21] E. Madenci, I. Guven. *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®* (Springer, 2015), DOI: 10.1007/978-1-4899-7550-8