12

Разработка сверхпроводящих спиральных ондуляторов для ЦКП „СКИФ“

© А.А. Седов,[1] Н.А. Мезенцев,[1] Я.В Ракшун,[1,2] А.Н. Сафронов,[1] Ю.В. Хомяков,[1,3] В.А. Чернов,[1] В.А. Шкаруба[1]

[1] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[2] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[3] Центр коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“,
630559 Кольцово, Россия
e-mail: A.A.Sedov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 6 мая 2026 г.
В окончательной редакции 6 мая 2026 г.
Принято к публикации 6 мая 2026 г.

Предложены варианты сверхпроводящих спиральных ондуляторов, включая ондулятор с изменяемой поляризацией излучения и двухпериодный ондулятор. Устройства предназначены для эксплуатации на фундаментальной гармонике в интервале энергий от экстремального ультрафиолета до мягкого рентгена в ЦКП „СКИФ“. Описаны магнитные и криогенные системы ондуляторов, а также система коррекции орбиты электронного пучка. Приведены оценки спектральных и геометрических характеристик генерируемого излучения.

Ключевые слова: ондуляторное излучение, источник синхротронного излучения, рентгеновская наноскопия, когерентное рентгеновское излучение, круговая поляризация, изменяемая поляризация, рентгеновский магнитный круговой дихроизм, экстремальный ультрафиолет, мягкий рентген.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63620.161-26

Введение

Применение ондулятора в специализированном синхротроне с энергией электронов 3 GeV и эмиттансом порядка 100 pm·rad (например, ЦКП „СКИФ“ [1]) позволяет сформировать яркий источник когерентного мягкого рентгеновского излучения. Это открывает широкие возможности для микроскопии со сверхвысоким пространственным разрешением (вплоть до первых единиц нанометров), в том числе при исследовании динамических процессов. В интервале энергий фотонов от порядка ста до нескольких тысяч электронвольт появляются возможности как для решения ряда задач клеточной биологии, так и для отработки технологий экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ) и рентгеновской литографии.

В таких задачах крайне остро встает проблема термоиндуцированных деформаций рентгенооптических элементов под воздействием интенсивного пучка ондуляторного излучения (ОИ). Сверхпроводящий спиральный ондулятор, впервые предложенный и апробированный в начале 1980-х в ИЯФ [2,3] и активно применяемый в наше время на APS [4], позволяет решить эту проблему. Гармоники излучения, генерируемого таким ондулятором, пространственно разделены: циркулярно-поляризованная фундаментальная гармоника ОИ распространяется вдоль оси ондулятора, тогда как высшие гармоники — в конусе вокруг этой оси. Применяя круглую диафрагму, можно подавить высшие гармоники и таким образом получить спектрально чистый источник, существенно снизив тепловую нагрузку на рентгеновскую оптику экспериментальной станции. Кроме того, проведение исследований исключительно на фундаментальной гармонике ОИ ослабляет требования на величину фазовой ошибки, определяемой геометрической точностью ондулятора. При этом энергия фундаментальной гармоники ОИ может плавно перестраиваться в широком диапазоне путем изменения тока обмотки, благодаря чему становятся доступными спектроскопические методы (например, XAFS), в том числе, как будет показано далее, поляризационно- чувствительные (например, XMCD).

Перечисленные преимущества сверхпроводящего спирального ондулятора делают это устройство эффективной альтернативой ондуляторам на постоянных магнитах типа „APPLE“ [5–10], получившим широкое распространение в мировых центрах синхротронного излучения (СИ). В настоящей работе предложены три варианта сверхпроводящих спиральных ондуляторов для генерации излучения в интервале энергий от ЭУФ до мягкого рентгеновского диапазона в ЦКП „СКИФ“: двухпериодный, с изменяемой поляризацией и короткопериодный.

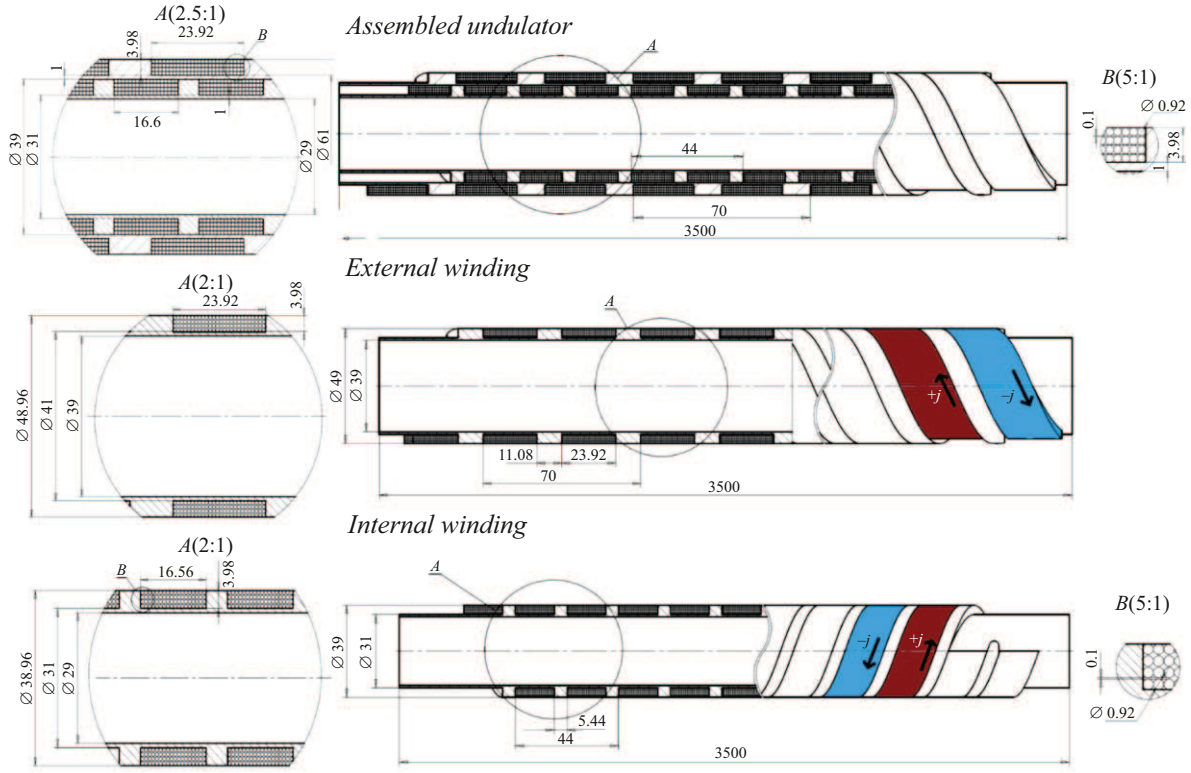

Рис. 1. Схема двухпериодного сверхпроводящего спирального ондулятора.

1. Конструкция и магнитная система ондуляторов

1.1. Двухпериодный ондулятор

Проектирование современной экспериментальной станции источника СИ начинается с ондулятора, а разработка ондулятора — с выбора рабочего интервала энергий фотонов, который определяется экспериментальными задачами. С одной стороны, для технологических задач ЭУФ литографии необходимо обеспечить возможность проведения исследований на рабочих длинах волн существующих и разрабатываемых литографов с лазерно-плазменными источниками, включая оловянные на 13.5 nm (91.9 eV) [11] и ксеноновые на 11.2 nm (110.7 eV) [12]. С другой стороны, для контроля изделий микроэлектроники и задач реверс-инжиниринга перспективен спектральный диапазон вблизи K-края кремния (1.84 keV). При этом особый интерес представляет диапазон „окна прозрачности воды“ между K-краями углерода и кислорода (284–543 eV), в котором благодаря высокому естественному контрасту доступна дозоэффективная микроскопия биологических клеток и вирусов [13].

Для решения указанных задач на станции „Наноскопия“ [13] второй очереди ЦКП „СКИФ“ предлагается использовать длинный (~ 4 m) двухпериодный сверхпроводящий спиральный ондулятор, состоящий из двух вложенных соосных спиральных ондуляторов с разными магнитными периодами и независимым питанием (рис. 1). В свою очередь, каждый из этих ондуляторов выполняется с обмоткой в форме двух соосных спиралей с противоположными направлениями токов, смещенных друг относительно друга на половину магнитного периода. Для обмоток используется трубчатый каркас с соответствующими спиральными проточками, выполненный из алюминиевого сплава АД31 с высокой теплопроводностью при низких температурах. Устройство располагается в криостате с многоступенчатым охлаждением, обеспечивающем гелиевую температуру обмоток, см. разд. 3.

Энергия фундаментальной гармоники ОИ на оси ондулятора определяется следующим соотношением [3]:

$$E_{1st}[\mathrm{keV}] = \frac{0.95E_e^2[\mathrm{GeV}]}{\lambda_u[\mathrm{cm}](1+K^2/2)}, \qquad (1)$$

где E_e — энергия электронов, λ_u — длина периода ондулятора, $K = 0.934\lambda_u[\mathrm{cm}]B_0[\mathrm{T}]$ — параметр ондуляторности, $B_0 = (B_{x\ \max^2} + B_{z\ \max^2})^{1/2}$ — амплитуда магнитного поля на оси. Здесь и далее оси X и Z направлены по горизонтали и вертикали соответственно, а ось Y — вдоль оси ондулятора. Интервал перестройки $E_{1\mathrm{st}}$ ограничен снизу максимально достижимым магнитным полем, а сверху — длиной периода магнитной структуры. По этой причине периоды вложенных ондуляторов должны быть выбраны так, чтобы верхняя граница рабочего диапазона

Таблица 1. Параметры сверхпроводящего провода

Материал сверхпроводника	Nb-Ti
Отношение сечения Nb-Ti:Cu	1:1.4
Диаметр (без изоляции/с изоляцией), mm	0.85/0.92
Материал изоляции	Полиэфиримидный лак
Критический ток при поле 7 T и температуре 4.2 K, A	500

короткопериодной обмотки лежала выше ~ 1.84 keV, а нижняя граница длиннопериодной обмотки — ниже ~ 90 eV.

Итого, для внутренней обмотки выбран период $\lambda_{u\,in} = 42$ mm, при котором достижимо магнитное поле $B_{x\ \max\ in} = B_{z\ \max\ in} = 0.52$ T, что, согласно (1), соответствует интервалу энергий $E_{1st\,in} = 0.395-2$ keV. Для внешней обмотки: $\lambda_{u\,out}$=70 mm, $B_{x\ \max\ out} = B_{z\ \max\ out} = 0.73$ T, $E_{1st\,out} = 0.052-1.2$ keV. Достижимые поля при различной геометрии обмоток рассчитаны методом конечных элементов по закону Био–Савара–Лапласа.

Отметим, что рабочая энергия многослойных рентгеновских зеркал Cr/Sc, на которых основаны проекционный и сканирующий микроскопы станции „Наноскопия“, равна 397.4 eV, т. е. такая оптика может использоваться с любой из обмоток.

Количество периодов ондуляторов определяется конфигурацией прямолинейного промежутка накопителя ЦКП „СКИФ“, допускающей размещение криостата с максимально возможной длиной сверхпроводящего магнита ~ 4 m.

Геометрические параметры обмотки были оптимизированы для достижения требуемых магнитных характеристик. Для расчетов магнитных полей всех ондуляторов, представленных в настоящей работе, был выбран коммерчески доступный на сегодняшний день сверхпроводящий провод диаметром 0.92 mm, параметры которого представлены в табл. 1.

Конструкция, при которой обмотки расположены радиально друг над другом, требует максимальной компактности по толщине магнита. По этой причине были предусмотрены канавки на концах вставного устройства, позволяющие совершать разворот провода на 180° для перехода к соседней спирали, что позволяет выполнять намотку непрерывно одним сверхпроводящим проводом.

Магнитное поле ондулятора при установке его на действующий накопитель не должно влиять на орбиту электронов вне вставного устройства, поэтому для замыкания орбиты на концах магнитной системы будет установлена пара корректоров, см. разд. 4.

Основные параметры двухпериодного ондулятора (а также других предложенных ондуляторов: с изменяемой поляризацией излучения и короткопериодного), полученные после оптимизации обмотки, приведены в табл. 2.

Важной характеристикой для динамики электронного пучка является однородность распределения магнитного поля в поперечном направлении. Обычно требования к поперечной однородности предполагают изменение поля в пределах 0.5 % при поперечном отклонении от оси до 10 mm [14]. На рис. 2 приведено расчетное поперечное распределение поля вблизи орбиты пучка электронов, для которого указанные требования выполняются с большим запасом.

На рис. 3 представлены рабочая точка, соответствующая максимальному магнитному полю на оси, и точка, соответствующая максимальному полю на обмотке, относительно критических кривых сверхпроводящего провода при температурах 4.2 и 3.2 K. В процессе намотки сверхпроводящего провода неизбежно возникают

Таблица 2. Параметры сверхпроводящих спиральных ондуляторов

Ондулятор	Двухпериодный		С изменяемой поляризацией излучения		Коротко-периодный
Обмотка	Внешняя	Внутренняя	Внешняя	Внутренняя	Одна
Магнитный период λ_u, mm	70	42			24
Число периодов	56	94			166
Магнитное поле на оси $B_{x\|z\ \max}$, T	0.73	0.52			0.48
Интервал перестройки энергии E_{1st}, keV (длины волны λ_{1st}, nm)	0.052–1.2 (24–1.03)	0.395–2 (3.14–0.62)			1.65–3.5 (0.75–0.35)
Горизонтальная-вертикальная апертура для пучка электронов, mm	20×7				6×6
Число витков в слое/слоев	26/4	18/4	18/8	18/4	10/10
Максимальный ток, A	1000	1030	600	1030	670

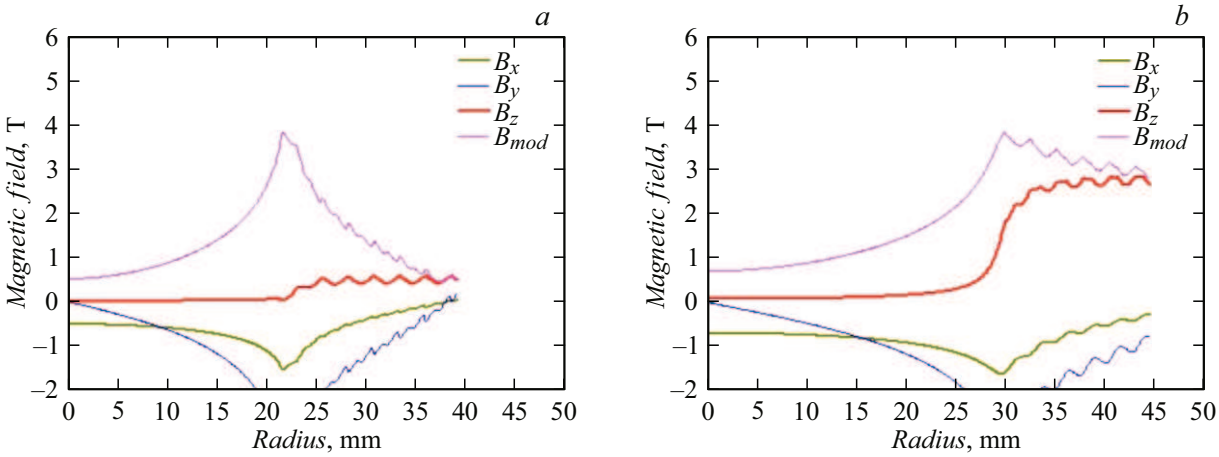

Рис. 2. Радиальное распределение магнитного поля сверхпроводящего спирального ондулятора для внутренней обмотки (*a*), для внешней обмотки (*b*).

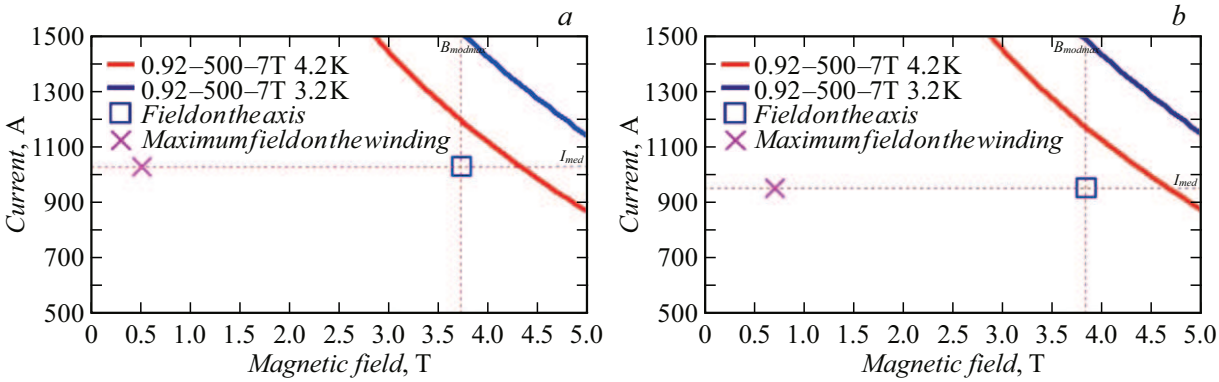

Рис. 3. Положение рабочей точки относительно критических кривых при температурах 4.2 и 3.2 K для внутренней обмотки (*a*), для внешней обмотки (*b*).

механические напряжения, уменьшающие максимальное достижимое магнитное поле в сверхпроводнике. На практике достижимое магнитное поле на 3 %–5 % ниже критического [14], в расчетах оно задавалось не менее чем на 7.5 % ниже критического.

Продольное распределение поля в ондуляторе в плоскости орбиты электронного пучка представлено на рис. 4.

1.2. Ондулятор с изменяемой поляризацией излучения

В мягком рентгеновском диапазоне 0.4–2 keV находятся *L*-края поглощения 3*d* переходных металлов и M-края редкоземельных элементов, что делает этот диапазон пригодным для применения поляризационно-чувствительных методов спектроскопии поглощения — рентгеновского магнитного кругового и линейного дихроизма (XMCD и XMLD соответственно). Эти методы позволяют определять спин и орбитальный магнитный момент атомов с селективностью по химическим элементам, тем самым предоставляя информацию о природе анизотропных магнитных свойств исследуемого вещества на микроуровне. По этой причине указанные методы нашли широкое применение в различных областях науки и техники: от спинтроники до биомагнетизма и физики низких температур [15]. При этом XMCD и XMLD могут применяться в ходе одного эксперимента параллельно с другими методами, например, со сканирующей просвечивающей рентгеновской микроскопией.

Отдельный интерес представляют техники когерентной рентгеновской визуализации, использующие явление магнитного дихроизма: спекл-интерферометрия и фурье-голография. С их помощью становится возможным исследование структуры магнитных доменов в динамике.

Для реализации XMCD и XMLD в мягком рентгеновском диапазоне требуется яркий источник с изменяемой поляризацией излучения, так как использование четвертьволновых пластинок неэффективно вследствие высокого поглощения (в отличие от жесткого рентгеновского диапазона). Зачастую для формирования такого ис-

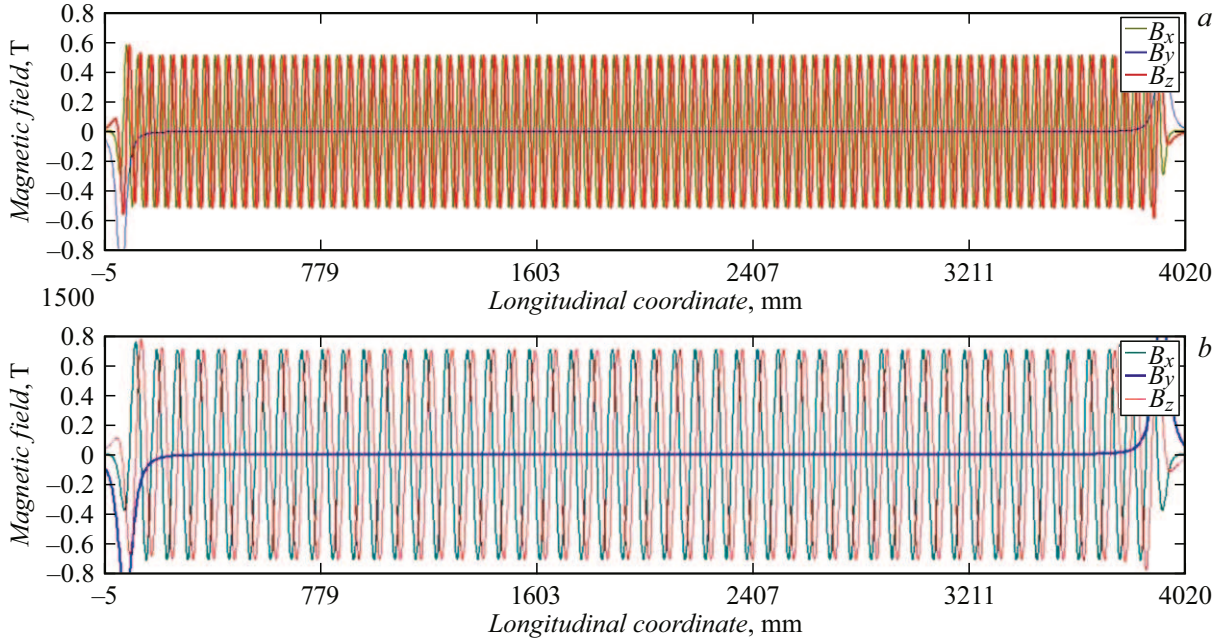

Рис. 4. Распределение магнитного поля двухпериодного сверхпроводящего спирального ондулятора для внутренней обмотки (a), для внешней обмотки (b).

точника в мировых центрах СИ применяют ондуляторы на постоянных магнитах типа „APPLE“. В качестве альтернативы авторами предлагается специализированный сверхпроводящий спиральный ондулятор.

Конструкция спирального ондулятора с изменяемой поляризацией излучения аналогична ранее описанной конструкции двухпериодного ондулятора, за исключением того, что периоды внутренней и внешней обмоток выбираются равными, а сами обмотки обязательно составляют соосные левую и правую винтовые линии. Поочередное использование обмоток позволяет генерировать ОИ с левой или правой циркулярной поляризацией и переключаться между ними за времена порядка секунды. Кроме того, поскольку обмотки запитываются независимо, ондулятор способен генерировать излучение как с эллиптической поляризацией с различными коэффициентами эллиптичности, так и с вертикальной или горизонтальной линейной поляризацией.

При выборе рассмотренного ранее периода $\lambda_u = 42\,\text{mm}$, в режиме генерации ОИ с циркулярной поляризацией максимальное магнитное поле составляет $B_{x\ \max} = B_{z\ \max} = 0.52\,\text{T}$. Соответствующий интервал перестройки энергии фундаментальной гармоники $E_{1st} = 0.395-2\,\text{keV}$, с одной стороны покрывает $L_{2,3}$ края поглощения переходных металлов от Sc до Zn, с другой стороны — $M_{4,5}$ края лантаноидов от La до Lu. Максимальное магнитное поле в режиме генерации ОИ с линейной поляризацией $B_x = 0$, $B_{z\ \max} = 0.8\,\text{T}$ или $B_x = 0.8$, $B_{z\ \max} = 0\,\text{T}$, что соответствует интервалу перестройки $E_{1st} = 0.344-2\,\text{keV}$. В режиме генерации ОИ с эллиптической поляризацией горизонтальная B_x и вертикальная B_z компоненты магнитного поля могут быть заданы в диапазоне $0.1-0.7\,\text{T}$. Параметры ондулятора с изменяемой поляризацией излучения приведены в табл. 2.

1.3. Короткопериодный ондулятор

Уменьшение периода магнитной структуры сверхпроводящего спирального ондулятора приводит к увеличению энергии фундаментальной гармоники до первых единиц килоэлектронвольт. Соответственно такое устройство становится оптимальным для высокоразрешающей микроскопии микроэлектронных компонентов вблизи (до и после) K-края поглощения Si 1839 eV.

Кроме того, в этом спектральном диапазоне также находится K-край поглощения S (2472 eV), что открывает дополнительные возможности контрастирования для рентгеновской микроскопии в задачах клеточной биологии. При этом данное устройство позволит, в принципе, использовать аномальную дисперсию в макромолекулярной кристаллографии без замещения S на As.

Отдельного рассмотрения заслуживают задачи глубокой рентгеновской литографии, включая инспекцию масок и метрологию оптики на рабочих длинах волн литографов, а также производство микроструктур по LIGA-технологии (от нем. *Lithographie, Galvanoformung, Abformung*).

В свою очередь, перестройка энергии в достаточно широком диапазоне позволит реализовать метод рентгеновской спектроскопии поглощения (XAFS). Интерес также представляет рентгенофлуоресцентный анализ (XRF) легких элементов, в том числе, в сочетании со

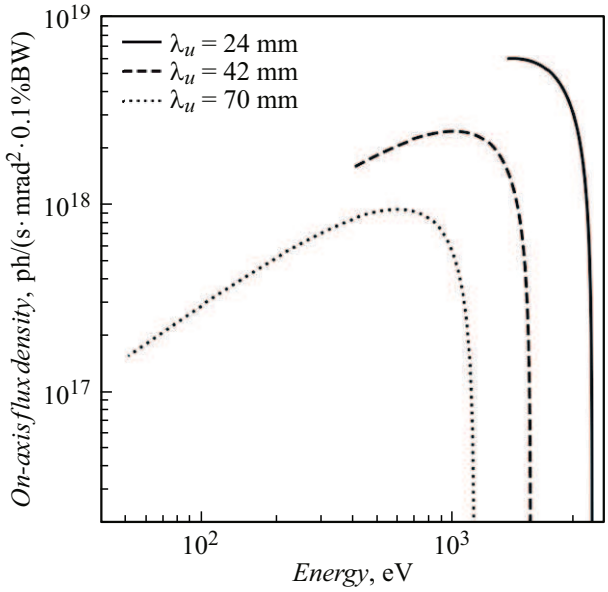

Рис. 5. Огибающие плотности потока фотонов фундаментальной гармоники ОИ на оси.

сканирующей просвечивающей рентгеновской микроскопией.

Конструкция короткопериодного ондулятора представляет собой по сути одну из обмоток ранее описанных устройств и не требует отдельного рассмотрения. При этом ключевую роль играет максимизация магнитного поля на оси ондулятора. В нескольких прямолинейных промежутках накопителя ЦКП „СКИФ“ допускается разместить вакуумную камеру с минимальной горизонтальной апертурой для пучка электронов 6 mm, что позволяет получить минимальный межполюсный зазор для спирального ондулятора 11 mm. Достижимое при таком зазоре магнитное поле на оси ондулятора составляет $B_{x\ \max} = B_{z\ \max} = 0.48$ T при периоде 24 mm, чему соответствует интервал перестройки фундаментальной гармоники ОИ $E_{1st} = 1.65-3.5$ keV. Параметры такого короткопериодного ондулятора приведены в табл. 2.

2. Характеристики генерируемого ондуляторного излучения

Далее приведены оценки спектральных и геометрических характеристик генерируемого ОИ. Расчеты выполнены в Spectra [16] при следующих заданных параметрах накопительного кольца ЦКП „СКИФ“ [1]: энергия электронов 3 GeV, относительный энергетический разброс 0.0011, ток пучка 400 mA, натуральный эмиттанс 75 pm·rad, коэффициент связи 0.1. Горизонтальная и вертикальная бета-функции в центре прямолинейного промежутка для двухпериодного ондулятора и ондулятора с изменяемой поляризацией излучения составляют 15.6 и 2.4 m, а для короткопериодного — 6 и 0.19 m соответственно.

Для всех рассмотренных вариантов сверхпроводящих спиральных ондуляторов на рис. 5 приведены огибающие спектральной плотности потока фотонов фундаментальной гармоники ОИ на оси.

На рис. 6 приведен пример диаграммы направленности ОИ, соответствующий настройке внутренней обмотки двухпериодного ондулятора на энергию 397.4 eV. Явное пространственное разделение гармоник позволяет с помощью диафрагмы выделить центральную часть фундаментальной гармоники и подавить высшие гармоники, как показано на рис. 7. При выборе диафрагмы с угловым размером 35 μrad и менее высшие гармоники подавлены полностью, т. е. обеспечен режим спектрально чистого пучка ОИ. Отметим, что для каждой рабочей энергии диаметр диафрагмы подбирается индивидуально.

Как показано на рис. 6,*f*, интегральная по всему спектру плотность мощности генерируемого излучения распределена осесимметрично с локальным минимумом на оси ондулятора. В табл. 3 приведены величины полной мощности излучения при настройке ондуляторов на разные рабочие энергии. При этом после выделения фундаментальной гармоники диафрагмой мощность спектрально чистого пучка ОИ составляет менее 1 % от максимальной полной мощности.

3. Криогенная система

Криогенная система ондуляторов основана на принципе косвенного охлаждения [17]. Концепция подобной системы охлаждения предполагает нулевой расход жидкого гелия, так как все притоки тепла снаружи, а также джоулево тепло, выделяемое в токовых вводах, перехватывается соответствующими ступенями криокулеров, а сам магнит и сосуд с жидким гелием находятся в вакууме для снижения теплового потока, передающегося через молекулы остаточного газа. Магнит охлаждается жидким гелием, циркулирующим по трубке, имеющей тепловой контакт с магнитом. Небольшой запас жидкого гелия содержится в гелиевом сосуде, находящемся в защитном вакууме вне магнита. Внутри корпуса криостата магнит окружен двумя медными экранами с температурами 20 и 60 K, которые также охлаждаются соответствующими ступенями криокулеров. Для дополнительной задержки потоков теплового излучения извне медные экраны покрыты несколькими слоями криогенной суперизоляции. После захолаживания криогенная система позволяет работать в таком режиме автономно внутри биозащиты накопителя в течение нескольких лет.

Если вигглеры и ондуляторы с планарной конструкцией позволяют сделать горизонтальную апертуру вакуумной камеры достаточно широкой для пропускания пучка СИ от предыдущего поворотного магнита за пределы вставного устройства без касания внутренней стенки камеры, то в конфигурации сверхпроводящего спирального ондулятора такое решение неприменимо.

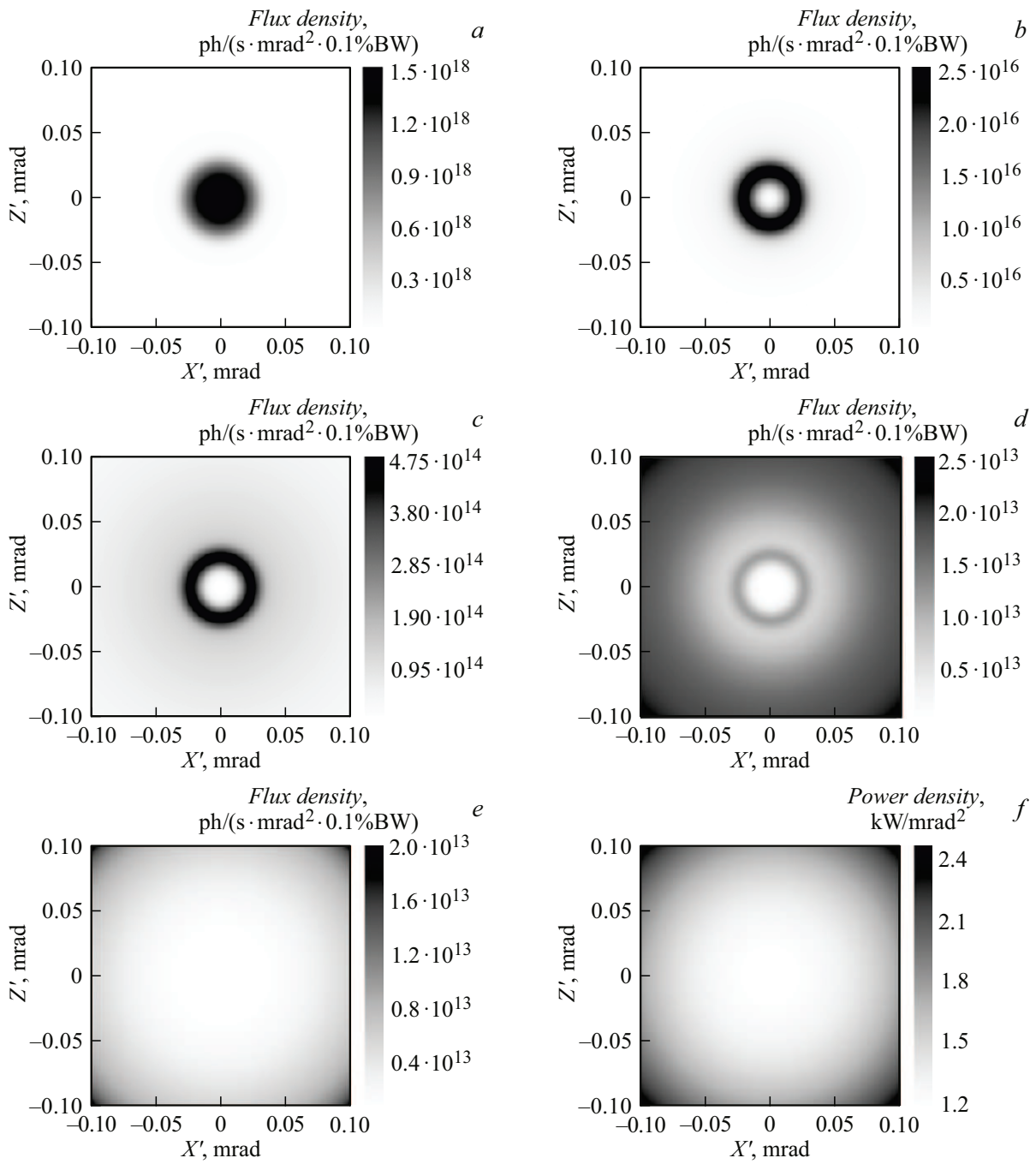

Рис. 6. Диаграммы направленности ОИ (пример $\lambda_u = 42$ mm, $E_{1st} = 397.4$ eV): плотность потока фотонов для 1-й (*a*), 2-й (*b*), 3-й (*c*), 4-й (*d*) и 5-й (*e*) гармоники; интегральная по всему спектру плотность мощности (*f*).

Для достижения максимального уровня магнитного поля на оси ондулятора необходимо минимизировать магнитный зазор, из-за чего пучок СИ из предыдущего поворотного магнита с полем (~ 0.5 T) будет нагревать стенки вакуумной камеры.

Минимально допустимый горизонтальный размер вакуумной камеры ондулятора ограничивается условиями отклонения электронного пучка при инжекции и составляет 20 mm (± 10 mm). При такой геометрии расчетная мощность излучения, поглощаемого на стенке вакуумной камеры, составляет ~ 100 W. Высокая тепловая нагрузка не позволяет использовать в конструкции криостата вариант с „холодной“ камерой для пучка, охлаждаемой криокулерами [18]. Поэтому должна использоваться „теплая“ вакуумная камера с водяным охлаждением, окруженная промежуточным медным экраном для защиты сверхпроводящего магнита от тепловой нагрузки со стороны камеры, что увеличивает размер магнитного

Таблица 3. Мощность генерируемого излучения (без учета корректоров)

Ондулятор	Двухпериодный		С изменяемой поляризацией излучения (в режиме $B_x = B_z$)		Коротко-периодный
Обмотка	Внешняя	Внутренняя	Внешняя	Внутренняя	Одна
Полная мощность излучения при $B = B_{\max}$, kW	9.55	4.86			4.18
Полная мощность излучения при $\lambda_{1st} = 13.5$ nm, kW	5.18	–			–
Полная мощность излучения при $E_{1st} = 397.4$ eV, kW	0.87	4.82			–
Полная мощность излучения при $E_{1st} = 1.84$ keV, kW	–	0.124			3.3
Полная мощность излучения при $E_{1st} = 2.47$ keV, kW	–	–			1.60

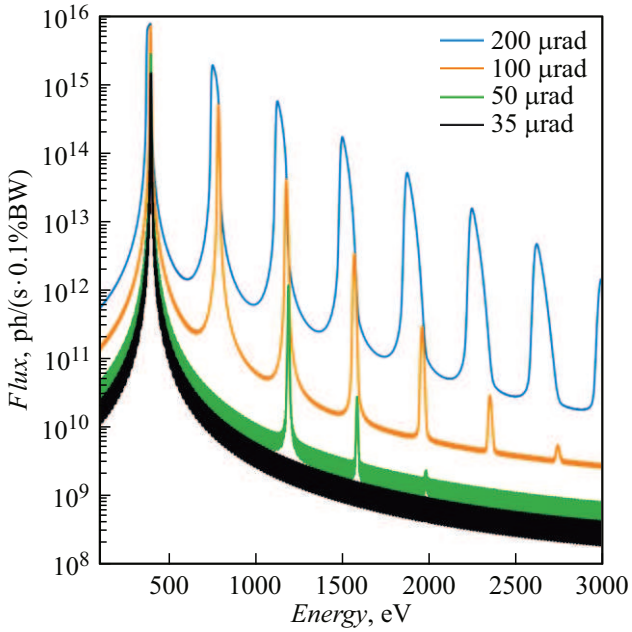

Рис. 7. Спектры ОИ после круглой диафрагмы с угловым размером 200, 100, 50 и 35 μrad (пример $\lambda_u = 42$ mm, $E_{1st} = 397.4$ eV).

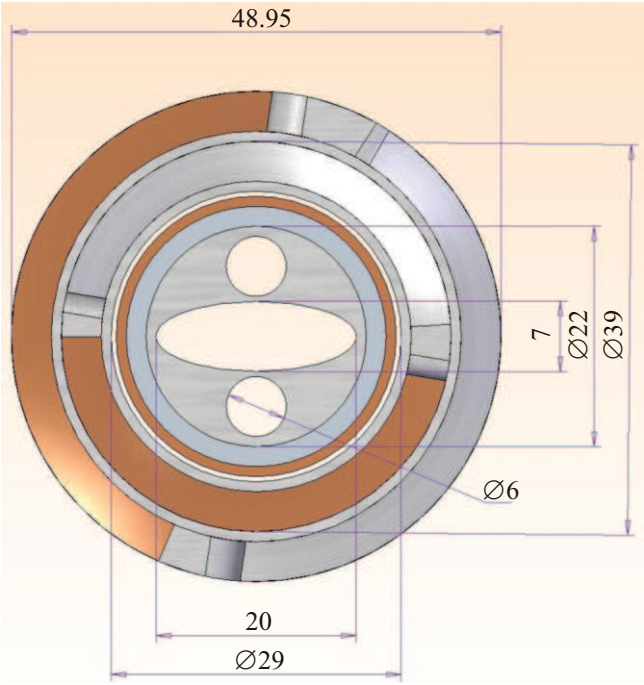

Рис. 8. Поперечное сечение магнита с вакуумной камерой.

зазора до 31 mm (± 15.5 mm). Тем не менее такой размер магнитного зазора позволяет получить требуемое максимальное магнитное поле на X оси ондулятора.

Поперечное сечение магнита с вакуумной камерой внутри показано на рис. 8. Камера изготавливается методом экструзии из алюминиевого сплава АД31. Апертура вакуумной камеры для электронного пучка представляет собой эллипс с осями 20×7 mm. Также в сечении камеры расположены два канала для охлаждения водой. Для крепления камеры и теплового экрана в межполюсном зазоре магнита используются теплоизоляторы в виде шариков из материала ULTEM с низкой теплопроводностью, обеспечивающих требуемый зазор между камерой и магнитом по всей длине. Медный тепловой экран, изолирующий сверхпроводящий магнит от „теплой“ вакуумной камеры, охлаждается с обоих концов 20 K ступенями нижних криокулеров.

4. Коррекция электронной орбиты

Магнитное поле ондулятора при установке его на действующий накопитель не должно влиять на орбиту элек-

тронов вне вставного устройства, поэтому при разработке вставного устройства необходимо добиться минимальных интегралов магнитного поля на концах магнитной системы. Для всех описанных вставных устройств необходимо одновременно компенсировать как горизонтальное, так и вертикальное отклонение орбиты. Поэтому в качестве универсального решения предполагается использовать дипольные корректоры, изготовленные по технологии Canted–Cosine–Theta (CCT) [19], поскольку данная геометрия позволяет компактно разместить корректоры на концах ондулятора.

Принцип работы магнитов на основе технологии CCT состоит в том, что если вокруг трубы намотать кабель в виде двух противоположно наклоненных соленоидов, то траектория витков модулируется в продольном направлении одним периодом синуса. В результате продольные компоненты поля обоих соленоидов вычитаются, а поперечные компоненты складываются и создается чисто дипольная компонента. Если же витки спирали модулируются двумя периодами синуса, то останется только квадрупольная компонента поля, если тремя — только секступольная и т. д. Таким образом, использование CCT-технологии позволяет получить любую требуемую компоненту магнитного поля, применив синусную модуляцию формы витка в продольном направлении с соответствующим периодом. При этом, установив несколько пар обмоток с различными периодами модуляции синуса друг в друга, появляется возможность получить все необходимые компоненты поля сразу в одном магните. Магниты с подобным строением были разработаны и испытаны в ИЯФ СО РАН [20].

Магнитный элемент, изготовленный по технологии CCT, представляет собой две концентрических обмотки с противоположным направлением тока, размещенные на двух цилиндрах в канавках, вырезанных с высокой точностью. Цилиндры размещены соосно друг над другом и изготовлены из немагнитного материала, чтобы избежать вклада нелинейных компонент поля, неминуемо возникающих при использовании железа. Для получения необходимой мультипольной компоненты поля применяется синусная модуляция осевого положения витков спиральной обмотки вдоль всего цилиндра, согласно соотношению (2):

$$y_\theta = c(1 - \cos(n\theta)) + dy\left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right), \qquad (2)$$

$$x_\theta = a \cdot \cos(\theta), \quad z_\theta = a \cdot \sin(\theta),$$

где x, z — поперечные координаты цилиндра, y — продольная координата вдоль оси цилиндра, θ — угол намотки провода на цилиндр, a — радиус намотки провода, c — амплитуда намотки провода в продольном направлении, dy — шаг намотки провода, n — номер мультипольной компоненты поля ($n = 1$ для дипольной линзы).

Внешний вид обмотки вокруг цилиндра для модуляции θ (диполь) представлен на рис. 9. Корректор

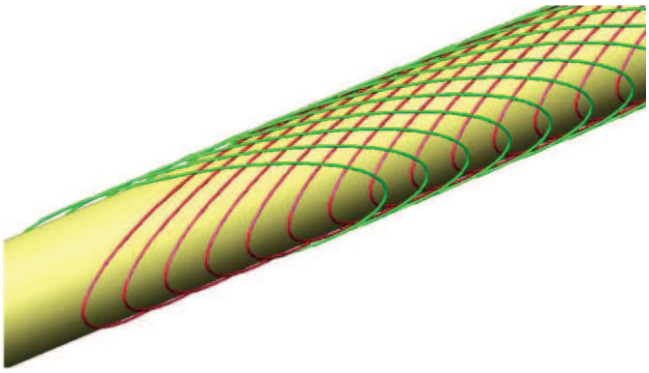

Рис. 9. Расчетная модель обмотки дипольного корректора (модуляция θ).

магнитного поля представляет из себя две дипольные CCT-линзы, расположенные соосно, причем одна линза повернута относительно другой на 90°. Каркас линзы также изготовлен из алюминиевого сплава АД31, а в качестве обмотки используется тот же сверхпроводящий провод из NbTi, что и в ондуляторе. Корректоры располагаются соосно на обоих концах магнита и запитываются независимо.

Заключение

Предложены сверхпроводящие спиральные ондуляторы различных типов (двухпериодный, с изменяемой поляризацией излучения и короткопериодный), которые могут быть использованы в ЦКП „СКИФ“ для генерации ОИ с энергией фундаментальной гармоники в интервале от ЭУФ до мягкого рентгеновского диапазона. Магнитная длина ондуляторов составляет 4 m, периоды обмоток 24, 42 и 70 mm, а соответствующие интервалы перестройки энергии 1.65–3.5 keV, 0.3–1.9 keV и 0.052–1.2 keV. Описаны магнитная и криогенная системы ондуляторов, а также система коррекции электронной орбиты.

В отличие от широко распространенных ондуляторов семейства „APPLE“, требующих мощных прецизионных систем перемещения массивов постоянных магнитов для изменения межполюсного зазора и соответственно энергии ондуляторного излучения, в спиральных ондуляторах сдвиг гармоник осуществляется путем изменения тока обмотки. При этом для расширения интервала перестройки энергии могут использоваться запитываемые независимо вложенные соосные спиральные ондуляторы с разными магнитными периодами. В свою очередь, использование пары вложенных спиральных ондуляторов с одинаковым периодом и противоположными направлениями закрученности винтовой линии обмотки позволяет переключаться между левой и правой циркулярной поляризациями генерируемого излучения, а также, в принципе, получать линейную с большим максимальным полем на оси. Следует отметить, что в ондуляторах

„APPLE“ при переключении поляризации возникают высокие знакопеременные нагрузки, затрудняющие использование длинных вставных устройств такого типа. Спиральные ондуляторы не имеют подобных ограничений.

Для всех предложенных сверхпроводящих спиральных ондуляторов описана унифицированная многоступенчатая криогенная система, преимуществом которой является нулевой расход гелия. Система коррекции электронной орбиты, позволяющая компенсировать интегралы магнитного поля, тем самым нивелируя влияние вставного устройства на орбиту электронов в накопительном кольце, также унифицирована.

В работе определены спектральные и геометрические характеристики генерируемого ОИ, а также показана возможность выделения фундаментальной гармоники при помощи круглой диафрагмы. Диафрагма является простым и дешевым фильтром гармоник, пропускающим десятки ватт полезного потока и эффективно снижающим тепловые нагрузки на рентгеновскую оптику экспериментальных станций. Таким образом, предложенные ондуляторы позволяют сформировать спектрально чистый, яркий источник излучения с высокой долей когерентного потока в интервале энергий фотонов от ЭУФ до мягкого рентгеновского диапазона.

Следует также отметить, что при использовании таких вставных устройств на источнике синхротронного излучения с энергией электронов 6 GeV (проект „СИЛА“, НИЦ „Курчатовский институт“) интервалы перестройки энергии фундаментальной гармоники сместятся в область жесткого рентгена. При этом станет доступным применение более длинных сверхпроводящих спиральных ондуляторов (вследствие большей длины прямолинейных промежутков), что позволит сузить спектральную ширину генерируемой гармоники ОИ и существенно повысить его яркость.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания № FWGM-2025-0052 Минобрнауки России: „Разработка сверхпроводящих магнитных систем для ускорителей заряженных частиц и исследования с использованием синхротронного излучения“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev. Phys. Rev. Accel. Beams, **24** (12), 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704

[2] А.А. Анашин, Г.Я. Кезерашвили, А.П. Лысенко, Е.А. Переведенцев, Ю.М. Шатунов. *Сверхпроводящий спиральный ондулятор для измерения радиационной поляризации встречных пучков на ВЭПП-2М* (Препринт ИЯФ № 84-111, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1984), 15 с.

[3] Е.С. Глускин, П.П. Ильинский, Г.Я. Кезерашвили, Г.Н. Кулипанов, В.Ф. Пиндюрин, А.Н. Скринский, А.С. Соколов. *Исследование излучения из спирального ондулятора, установленного на накопителе ВЭПП-2м, как источника для рентгеновской микроскопии и голографии* (Препринт ИЯФ № 83-145, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1983), 14 с.

[4] M. Kasa, M. Borland, L. Emery, J. Fuerst, K.C. Harkay, Q. Hasse, Y. Ivanyushenkov, W. Jansma, I. Kesgin, V. Sajaev, Y. Shiroyanagi, Y.P. Sun, E. Gluskin. Phys. Rev. Accel. Beams, **23**, 5 (2020).

[5] S. Sasaki, K. Kakuno, T. Takada, T. Shimada, K.I. Yanagida, Y. Miyahara. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **331** (1–3), 763 (1993).

[6] S. Sasaki. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **347** (1–3), 83 (1994).

[7] J. Bahrdt, W. Frentrup, A. Gaupp, B. Kuske, A. Meseck, M. Scheer. Undulators for the BESSY SASE-FEL Project. In AIP Conf. Proceed., **705** (1), 215 (2004).

[8] A.B. Temnykh. Phys. Rev. Special Topics — Accelerators and Beams, **11** (12), 120702 (2008).

[9] T. Schmidt, M. Calvi. Synchrotron Radiation News, **31** (3), 35 (2018).

[10] А.В. Мурзина, Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, В.А. Чернов. ЖТФ, **94** (8), 1217 (2024).

[11] I. Fomenkov, D. Brandt, A. Ershov, A. Schafgans, Y. Tao, G. Vaschenko, S. Rokitski, M. Kats, M. Vargas, M. Purvis, R. Rafac. Adv. Opt. Technol., **6** (3–4), 173 (2017).

[12] N.I. Chkhalo, K.V. Durov, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko. J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **17** (Suppl 1), S226 (2023).

[13] I.V. Malyshev, V.A. Chernov, Y.V. Khomyakov, Y.V. Rakshun, N.I. Chkhalo, M.N. Toropov, D.G. Reunov, V.N. Polkovnikov, A.E. Pestov, I.A. Shchelokov. Poverhnost′. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniâ, (5), 3 (2023).

[14] A.M. Batrakov, E.A. Bekhtenev, V.M. Borovikov, V.K. Djurba, M.G. Fedurin, V.V. Repkov, G.V. Karpov, S.V. Khruschev, G.N. Kulipanov, M.V. Kuzin, V.K. Lev, N.A. Mezentsev, V.A. Shkaruba. ВАНТ. Серия: ядерно-физические исследования, **3** (38), 59 (2001).

[15] G.V.D. Laan. J. Physics: Conf. Series, **430** (1), 012127 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/430/1/012127

[16] T. Tanaka. J. Synchrotron Radiat., **28** (4), 1267 (2021). DOI: 10.1107/S1600577521004100

[17] С.В. Хрущев, В.М. Цуканов, В.А. Шкаруба, Н.А. Мезенцев, А.Н. Сафронов. Известия РАН. Серия физическая, **87** (5), 660 (2023). DOI: 10.31857/S0367676522701277

[18] V.M. Tsukanov, S.V. Khrushchev, N.A. Mezentsev et al. *Development of an indirect cooling cryogenic system with nitrogen and helium heat pipes for superconducting insertion devices at BINP* (AIP Conf. Proceedings, Novosibirsk, 13–16 июля 2020, Novosibirsk), p. 020018. DOI: 10.1063/5.0030402

[19] R.B. Meinke, M.J. Ball, C.L. Goddzeit. *Superconducting double-helix accelerator magnets* (Proceedings 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, OR, USA, 2003), p. 1996–1998, v. 3, DOI: 10.1109/PAC.2003.1288752

[20] V. Shkaruba, A. Bragin, Ye. Gusev, P. Kanonik, F. Kazantsev, S. Khrushchev, A. Kremnev, N. Mezentsev, D. Pilipenko, A. Safronov, A. Sedov, V. Syrovatin, O. Tarasenko, V. Tsukanov, A. Volkov, A. Zorin. Modern Phys. Lett. A, **39** (40), 2440010 (2024). DOI: 10.1142/S0217732324400108