

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВИГГЛЕРЫ И ОНДУЛЯТОРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАКОПИТЕЛЕ «СКИФ»

*В. А. Шкаруба^{а,б,1}, А. В. Брагин^а, А. А. Волков^{а,б}, А. И. Ерохин^а,
А. В. Зорин^а, Ф. П. Казанцев^а, П. В. Каноник^а, Н. А. Мезенцев^{а,б},
А. Н. Сафронов^а, А. А. Седов^а, О. А. Тарасенко^а,
С. В. Хрущев^{а,б}, В. М. Цуканов^{а,б}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Центр коллективного пользования «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН,
Кольцово, Россия

Основными устройствами для генерации синхротронного излучения на строящемся синхротроне «СКИФ» являются сверхпроводящие вставные устройства — вигглеры и ондуляторы, создаваемые в ИЯФ СО РАН. В данном докладе представлено обоснование выбора рабочих параметров, основные характеристики и особенности конструкции этих устройств, а также текущий статус работ по их созданию.

The main devices for generating the synchrotron radiation at the “SKIF” synchrotron light facility under construction will be superconducting wigglers and undulators which are created at Budker INP SB RAS. The paper presents the rationale for the choice of operating parameters, the main characteristics and design features of these devices, as well as the current status of work on their creation.

PACS: 84.71.Ba; 41.60.Ap; 07.20.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Основными устройствами генерации фотонов на источнике синхротронного излучения «СКИФ» [1] с энергией 3 ГэВ являются сверхпроводящие многополюсные вставные устройства со знакопеременным магнитным полем — вигглеры [2] и ондуляторы [3]. Благодаря использованию сверхпроводящих технологий такие устройства позволяют получать более высокий уровень магнитного поля при минимальном периоде магнитной структуры, чем на аналогичных устройствах на основе постоянных магнитов. Это дает возможность разместить на доступной длине промежутка большее число магнитных полюсов для увеличения интенсивности генерируемого излучения. При этом интенсивность излучения из вигглеров возрастает пропорционально, а из

¹E-mail: shkaruba@mail.ru

ондуляторов — квадратично количеству полюсов. Использование сверхпроводящих вставных устройств позволяет получать на таких относительно небольших накопителях, как «СКИФ», с энергией 3 ГэВ, характеристики излучения, не уступающие по яркости излучению из поворотных магнитов на машинах с высокой энергией до 6 ГэВ. В первой очереди строительства источника «СКИФ» предполагается ввести в эксплуатацию 5 экспериментальных станций, использующих для генерации излучения сверхпроводящие многополюсные вставные устройства, в том числе 2 вигглера и 3 ондулятора, основные характеристики которых представлены в таблице. Основные магнитные параметры каждого из этих устройств были оптимизированы под конкретную пользовательскую задачу.

Основные параметры сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов

| Параметр | Вигглер 1-5 | Вигглер 1-3 | Ондулятор 1-1 (1-2) | Ондулятор 1-4 |
|---|-------------|-------------|---------------------|---------------|
| Магнитное поле, Тл | 4,5 | 2,7 | 1,25 | 1,6 |
| Период, мм | 48 | 27 | 15,6 | 18 |
| Межполюсный зазор, мм | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Вертикальная/горизонтальная апертура камеры, мм | 5/40 | 5/40 | 5/40 | 5/40 |
| Число периодов | 18 | 74 | 128 | 111 |
| Магнитная длина, мм | ~ 950 | ~ 2000 | ~ 2000 | ~ 2000 |
| Длина между фланцами, мм | ~ 2700 | ~ 2700 | ~ 2700 | ~ 2700 |
| Мощность излучения, кВт | 39 | 33 | 7,7 | 11,7 |
| Угол излучения, мрад | ± 3,5 | ± 1,2 | ± 0,32 | ± 0,46 |
| Параметр отклонения K | ~ 20 | ~ 6,8 | ~ 1,8 | ~ 2,7 |

1. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВИГГЛЕРЫ

Использование многополюсных вигглеров с высоким уровнем поля, под действием которого траектория пучка электронов отклоняется на углы много большие, чем угол естественного расхождения фотонного пучка $1/\gamma$ (где γ — релятивистский фактор), обусловлено требованиями экспериментов большей геометрической области засветки образца. Также, благодаря высокому уровню поля, появляется возможность генерации фотонов в высокоэнергичном рентгеновском диапазоне (до ~ 150 кэВ). В этом случае необходимо выделять из широкого непрерывного спектра излучения большой мощности тот спектральный диапазон, который требуется для эксперимента с использованием средств рентгеновской оптики. При этом значительную часть неиспользуемой мощности приходится поглощать оптическими элементами канала вывода излучения.

1.1. Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4,5 Тл для станций 1-5. Экспериментальная станция 1-5, называемая «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне», предназначена для исследований образцов в области материаловедения, геологии, археологии и биомедицины методами рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализа в жестком диапазоне фотонов от 25 до 150 кэВ. Основные параметры магнитной структуры вигглера были оптимизированы для получения максимально возможного потока фотонов в требуемом диапазоне энергий. Так как основной вклад в тепловую нагрузку на элементы рентгеновской

оптики дает поглощение мягкой части спектра, а жесткость спектра пропорциональна величине магнитного поля, спектр излучения был сдвинут в жесткую область за счет получения максимально возможного уровня магнитного поля. При минимальном технологически возможном магнитном зазоре величиной 7 мм, который ограничен условиями динамики электронного пучка по вертикальной апертуре вакуумной камеры 5 мм, оптимальный уровень магнитного поля составил 4,5 Тл при периоде 48 мм, а число основных периодов равно 18. Для изготовления обмоток был использован Nb-Ti/Cu сверхпроводящий провод диаметром 0,9 мм, имеющий критический ток ~ 380 А в поле 7 Тл. Дополнительным условием было ограничение мощности излучения на уровне ~ 35 кВт во избежание теплового разрушения алмазных окон канала вывода излучения. При этом полная мощность излучения генерируется в горизонтальный угол $\pm 3,5$ мрад. На рис. 1, а представлено спектрально-угловое распределение потока фотонов для данного вивглера. Короткий 10-полюсный прототип вивглера был успешно испытан в криостате с жидким гелием, где в процессе тренировки было достигнуто максимальное поле величиной 5,12 Тл. Запуск полноразмерного 40-полюсного вивглера планируется осуществить в 2022 г.

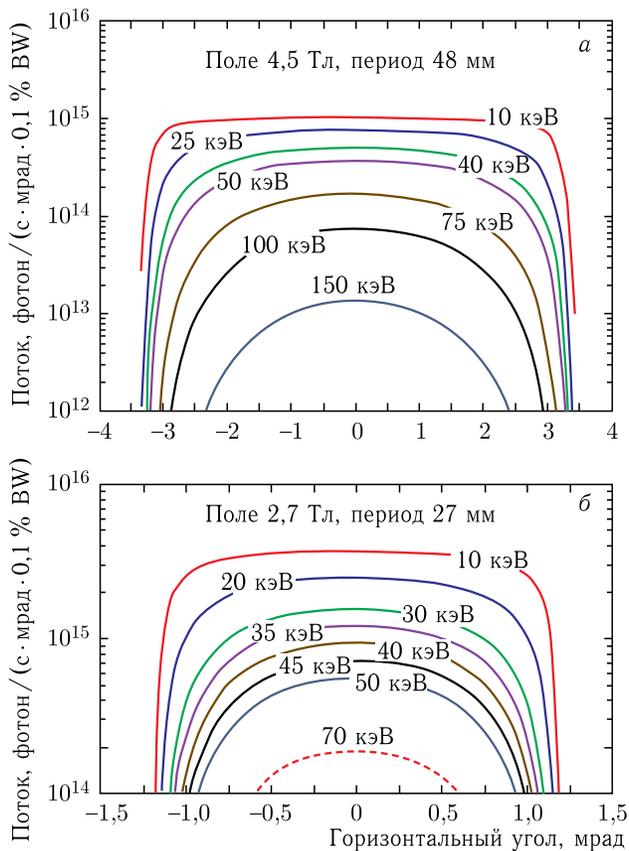


Рис. 1. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из вивглеров с полем: а) 4,5 Тл; б) 2,7 Тл

1.2. Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и полем 2,7 Тл для станций 1-3. При разработке экспериментальной станции 1-3 «Быстропротекающие процессы», предназначенной для получения «рентгеновского кино» при исследовании материалов в условиях импульсных ударных нагрузок с характерными масштабами времени от пикосекунд до миллисекунд, требовалось устройство, обеспечивающее максимальное количество фотонов на один электронный сгусток в широком спектральном диапазоне от 20 до 70 кэВ. В этом случае было оправдано использование именно вигглера, поскольку создание ондулятора, генерирующего излучение на высоких гармониках с энергией квантов до 70 кэВ, в настоящее время технически недоступно. В качестве вставного устройства, оптимального для заданной энергии и имеющего широкий пучок для решения задач радиографии, был разработан сверхпроводящий 152-полюсный вигглер с периодом 27 мм и магнитным полем 2,7 Тл. Полная мощность излучения, генерируемого в горизонтальный угол $\pm 1,2$ мрад, была также ограничена величиной ~ 35 кВт для защиты элементов канала вывода излучения от высокой тепловой нагрузки. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из этого вигглера представлено на рис. 1, б. Основная обмотка имеет одну секцию и изготавливается из Nb-Ti/Cu сверхпроводящего провода диаметром 0,9 мм, имеющего критический ток 570 А в поле 7 Тл. В настоящее время идет изготовление короткого прототипа магнитной структуры данного вигглера для проведения испытаний в жидком гелии. Параметры этого устройства являются на сегодняшний день рекордными с точки зрения достижения максимально возможного уровня поля при минимальной величине периода. Ближайшим по этим параметрам является 119-полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 2,1 Тл и периодом 30 мм, установленный на накопителе ALBA [4].

2. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ОНДУЛЯТОРЫ

Создание источника синхротронного излучения четвертого поколения «СКИФ» со сверхмалым горизонтальным эмиттансом (~ 75 пм·рад), который приближается к дифракционному пределу в наиболее востребованном энергетическом диапазоне фотонов, дает возможность создания когерентных пучков фотонов высокой яркости с энергией в десятки килоэлектронвольт. Такие пучки могут генерироваться с помощью многополюсных сверхпроводящих ондуляторов с коротким периодом ~ 15 –18 мм, магнитным полем на орбите $\sim 1,2$ –1,6 Тл. Отличие магнитной структуры ондулятора от вигглера состоит в том, что в ондуляторе траектория электронного пучка отклоняется на малые углы, сравнимые с углом естественного расхождения пучка фотонов $1/\gamma$. В результате возникает интерференция излучения из всех полюсов, что приводит к дискретному спектру ондуляторного излучения в виде гармоник. Критерием качества ондулятора является величина среднеквадратичной фазовой ошибки, которая характеризует отличие магнитного поля реального ондулятора от идеального синусоидального поля и которая не должна превышать величину $\sim 3^\circ$. На современных накопителях, с малым эмиттансом и энергетическим разбросом, значение этого параметра особенно возрастает, так как большая величина фазовой ошибки будет ограничивать яркость излучения на высоких гармониках и не позволит в полной мере использовать возможности накопителя.

2.1. Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15,6 мм и полем 1,25 Тл для станций 1-1 и 1-2. Два одинаковых сверхпроводящих ондулятора с периодом 15,6 мм и полем 1,25 Тл будут использованы в качестве источников излучения для экспериментальных станций, называемых «Микрофокус» (1-1) и «Структурная диагностика» (1-2), предназначенных для исследований широкого спектра задач методами микроскопии и рентгеновской дифракции. Предполагается использовать в том числе и высокие гармоники ондуляторного излучения с энергией фотонов вплоть до 35 кэВ, что налагает особо жесткие требования на минимизацию величины фазовой ошибки. Величина фазовой ошибки возрастает с увеличением разницы в амплитудах поля между полюсами, а также с нестабильностью величины периода на длине ондулятора. По оценкам разброс геометрических размеров магнитных полюсов не должен превышать 10–20 мкм.

В качестве прототипа для исследования технической возможности создания устройства с требуемыми характеристиками был спроектирован и изготовлен полноразмерный 119-полюсный ондулятор, основанный на чередующихся активных и нейтральных полюсах [3]. Основным элементом магнитной структуры является сверхпроводящая катушка, намотанная на железном сердечнике. Использовался сверхпроводящий Nb-Ti/Cu провод диаметром 0,55 мм, имеющий критический ток 260 А в поле 7 Тл. Максимальное поле в критической области обмотки при токе 500 А составляет 4,25 Тл, что соответствует уровню поля 1,2 Тл на оси ондулятора. Нестабильность в величине периода была минимизирована фрезеровкой пазов для установки сверхпроводящих полюсов с требуемой точностью. Однако отладить технологию изготовления самих полюсов, обеспечивающую такую же повторяемость в размерах, не представляется возможным. Поэтому величина фазовой ошибки ондулятора, вычисленная на основе магнитных измерений сразу после изготовления ондулятора, оказалась более 5°. Проведенная серия перестановок отдельных полюсов между собой на основе измерения амплитуд магнитного поля не позволила снизить величину фазовой ошибки менее чем до 4° по причине сильного взаимного влияния полей соседних катушек друг на друга. Поэтому был предложен способ подавления фазовой ошибки, основанный на запитке отдельных групп полюсов независимыми корректирующими источниками тока на уровне ~ 1 % от основного тока величиной ~ 500 А. Независимая запитка каждой группы катушек дала возможность подобрать корректирующие токи, позволившие одновременно скорректировать уровень магнитного поля и орбиту пучка на всей длине ондулятора. В результате коррекции величина интегральной фазовой ошибки, вычисленной на основе измерений магнитного поля вдоль ондулятора, составила 2,9°, а локальная фазовая ошибка снизилась до 1,9°. На рис. 2 представлены спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA [5] на основе нескорректированного и скорректированного магнитного поля ондулятора для энергии электронного пучка 3 ГэВ, тока 0,4 А и эмиттанса 75 пм·рад, из которых видно, что спектральные пики излучения после коррекции магнитного поля значительно выросли на всех гармониках.

2.2. Сверхпроводящий ондулятор с периодом 18 мм и полем 1,6 Тл для станции 1-4. В качестве источника излучения для экспериментальной станции 1-4, называемой «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм», использующей методы рентгеновской спектроскопии, оптимальным выбором является сверхпроводящий ондулятор с периодом 18 мм и полем 1,6 Тл. Это позволит проводить эксперименты в диапазоне

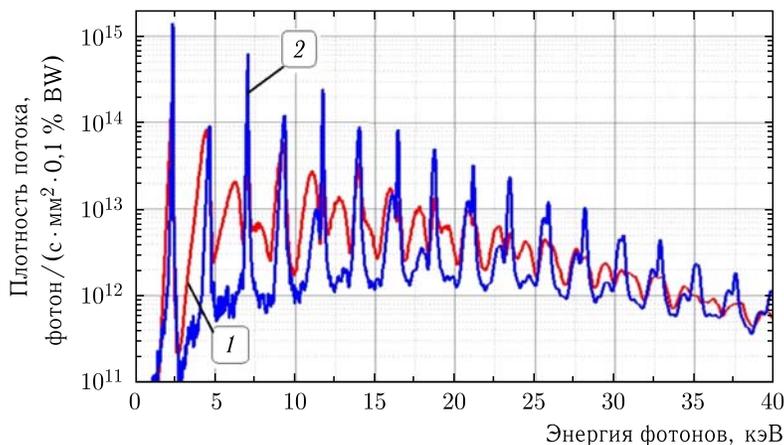


Рис. 2. Спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA на основе нескорректированного (1) и скорректированного магнитного поля (2) ондулятора

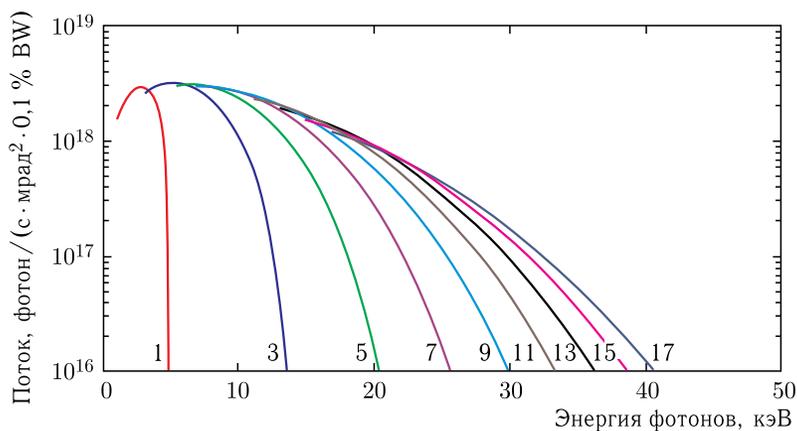


Рис. 3. Спектральный поток фотонов на гармониках с 1-й по 17-ю при изменении поля от 0 до 1,6 Тл

от 4 до 35 кэВ. Конструкция этого устройства, основанная на тех же принципах, что и предыдущего ондулятора, находится на стадии разработки. На рис. 3 представлены спектральные характеристики данного вставного устройства.

3. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Криогенная система представленных вставных устройств работает на принципе косвенного охлаждения, при котором магнит располагается в вакууме, а все притоки тепла в криостате перехватываются на соответствующие ступени криокулеров [2]. Температура магнита на уровне $\sim 3,5$ К поддерживается за счет циркуляции жидкого гелия по каналам в теле магнита, а сам гелий содержится в отдельном сосуде, расположенном в защитном вакууме вне магнита. Предварительное охлаждение магнита

до рабочих температур производится посредством азотных тепловых трубок, обеспечивающих отвод тепла на 60 К головки криокулеров. При достижении температуры замерзания азота ~ 64 К тепловая связь между магнитом и криокулером автоматически разрывается. Дальнейшее охлаждение магнита происходит уже за счет циркуляции гелия. При этом для первичного охлаждения используется только газообразный гелий, который подается из баллона. По мере понижения температуры плотность гелия в криостате увеличивается и, по достижению соответствующей температуры, начинается ожижение и набор рабочего уровня гелия в сосуде. Далее в таком режиме криогенная система позволяет работать автономно внутри биозащиты накопителя в течение нескольких лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы, создаваемые в ИЯФ СО РАН для накопителя четвертого поколения «СКИФ», станут основными устройствами генерации синхротронного излучения и обеспечат требуемые спектральные характеристики для решения широкого спектра исследовательских задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levicev E.* Lattice Optimization of a Fourth-Generation Synchrotron Radiation Light Source in Novosibirsk // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 2021. V. 24. 120704.
2. *Шкаруба В. А., Брагин А. В., Волков А. А., Ерохин А. И., Зорин А. В., Лев В. Х., Мезенцев Н. А., Сафронов А. Н., Сыроватин В. М., Тарасенко О. А., Хрущев С. В., Цуканов В. М.* Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН // *Письма в ЭЧАЯ.* 2020. Т. 17, № 4(229). С. 567–575.
3. *Bragin A., Khrushchev S., Lev V., Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tarasenko O., Tsukanov V., Volkov A., Zorin A.* Short-Period Superconducting Undulator Coils with Neutral Poles: Test Results // *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* 2018. V. 28, Iss. 4. 4101904.
4. *Volkov A., Lev V., Mezentsev N., Miginskaya E., Syrovatin V., Khrushchev S., Tsukanov V., Shkaruba V.* Superconducting 119-Pole Wiggler with 2.1 T Field and 30 mm Period Length for the ALBA Storage Ring // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2012. V. 6. P. 379–387.
5. *Tanaka T., Kitamura H.* // *J. Synchrotron Radiat.* 2001. V. 8. P. 1221–1228.

Получено 18 ноября 2022 г.