

УДК 621.384.639

## УСТРОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРЕДЕЛЬНО НИЗКИМ ЭМИТТАНСОМ

© 2019 г. А. В. Зорин<sup>1,2,\*</sup>, Н. А. Мезенцев<sup>1,2</sup>, К. В. Золотарев<sup>1,2</sup>, В. А. Шкаруба<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: a.v.zorin@inp.nsk.su

В ближайшем будущем в России планируется создание сети национальных источников синхротронного излучения с предельно низким эмиттансом. Эта программа известна также как ИССИ-4 (источник специализированный синхротронного излучения 4-го поколения). В настоящей работе описываются современные и перспективные методы использования синхротронного излучения с точки зрения вставных устройств для генерации синхротронного излучения.

DOI: 10.1134/S0367676519020315

### 1. СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В РОССИИ И МИРЕ

Проект ИССИ-4 направлен на создание в России сети источников синхротронного излучения с пилотной машиной в НИЦ СО РАН (Новосибирск), головной машиной в НИЦ “Курчатовский институт” (Протвино, МО), источником СИ в Дальневосточном Федеральном округе (Владивосток).

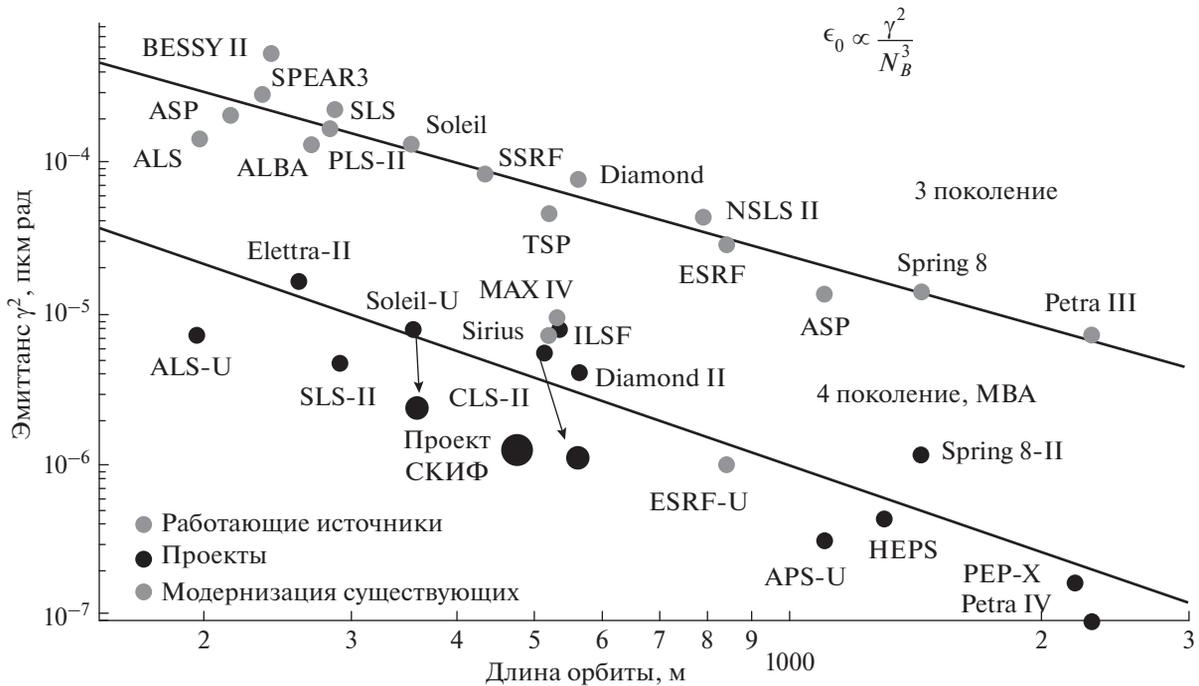
В настоящее время в мире работает около 50 источников СИ, на которых функционирует порядка 1000 экспериментальных станций. При этом только около 20 из этих источников можно отнести к 3-му поколению. Прогресс последних лет в технологиях создания источников СИ, включая разработку новых магнитных структур оптики пучка электронов, привел к пониманию возможности создания источников СИ 4-го поколения. Сейчас на различных стадиях реализации (от предпроектных работ до начала эксплуатации) находится около 20 проектов. Два из них уже находятся на стадии строительства: ESRF-EBS (Франция) и SIRIUS (Бразилия) и один проект MAX-IV (Швеция) вышел на стадию эксплуатации пользователями. Общая картина источников СИ представлена на рис. 1 в соотношении эмиттанс/периметр, определяющем степень совершенства магнитной структуры источников СИ.

В России действуют две установки, которые можно отнести к предыдущим поколениям источников СИ. Это комплекс ВЭПП-3/ВЭПП-4М [1] в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и специализированный источник СИ – уникальная научная установка КИСИ в НИЦ “Курчатовский институт” (Москва). Реализация пилотного проекта ЦКП “СКИФ” позволит отработать ключевые решения (организационные, инженерно-инфраструктурные, ускорительные, пользовательские) и создать сеть со-

временной исследовательской инфраструктуры на базе источников синхротронного излучения нового поколения с головной машиной в НИЦ “Курчатовский институт”. Это позволит на десятилетия обеспечить Российской Федерации высокопроизводительной современной инфраструктурой для решения актуальных задач материаловедения (включая технологии двойного назначения), биологии и медицины, создать условия для проведения исследований и разработок, соответствующие современным принципам организации научной и инновационной деятельности. Сеть источников СИ позволит сконцентрировать, закрепить и развить региональные интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы для обеспечения выхода российских научных, образовательных организаций и производственных компаний на глобальные рынки знаний и технологий.

Необходимо отметить, что эта важнейшая задача уже решается – в сентябре 2017 г. Минобрнауки России в целях реализации федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” через конкурс заключило три соглашения с ИЯФ СО РАН и НИЦ “Курчатовский институт” на проведение прикладных исследований до конца 2018 года совместно с Европейским центром синхротронного излучения (ESRF) по определению конфигурации и ключевых технических параметров основных систем источника синхротронного излучения 4-го поколения по одной из нижеперечисленных систем:

- магнитооптическая и вакуумная система,
- система диагностики и автоматического управления,



**Рис. 1.** Из доклада D. Einfeld от 02.02.2018 о текущем состоянии в мире различных проектов по созданию источников СИ 4-го поколения. Горизонтальная ось — периметр основного кольца в метрах в логарифмическом масштабе, вертикальная ось — нормализованный эмиттанс в логарифмическом масштабе (параметр, определяющий достижимое разрешение на пользовательских станциях).

• встроенные источники излучения и ВЧ-система.

Кроме того, в целях продвижения проекта ИЯФ СО РАН подготовил предварительный вариант концептуального проекта источника СИ. Предложены первоначальные варианты отдельных систем, узлов, инфраструктуры. До конца 2018 г. предстоит, взвесив все за и против, согласовать единую концепцию источника СИ в Новосибирске, с учетом концепции создания головной машины в НИЦ “Курчатовский институт” и концепции развития науки в Сибири “Академгородок 2.0”.

## 2. УСТРОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для правильного выбора устройств генерации излучения (УГИ) основными характеристиками являются энергетический диапазон и плотность потока фотонов, а также характер спектрального диапазона (непрерывный либо дискретный) [2]. Причем в настоящее время существуют возможности реализовать сканирование по энергии с использованием УГИ с дискретным спектром излучений (ондуляторов), так что эта характеристика более не является критической. Поэтому анализ пользовательских потребностей проводился в первую очередь с целью определения двух выше-названных характеристик и дополнительно непрерывности спектра. Были проведены исследования более сотни различных эксперименталь-

ных станций по всему миру, работающих на таких накопителях, как Центр коллективного пользования “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” (Новосибирск, Россия), Сибирь-2 (Курчатовский институт, г. Москва) [3], ESRF (Франция), SPring-8 (Япония), PETRA III (Германия), NSRRC (Тайвань), DFELL (Duke Free Electron Laser Laboratory, Durham, NC, США), CAMD (Луизиана, США) [4], CLS (Канада) [5], ALBA (Испания) [6], KAERI (Ю. Корея) и другие.

Проведенный анализ, учитывающий современные мировые тенденции развития методов использования синхротронного излучения (например, более широкое использование ондуляторов, в том числе в методиках, где необходима перестройка энергетического диапазона излучения), является достаточным для группировки методов по признаку возможности реализации на одном генераторе излучения. На основе этой группировки создана следующая классификация УГИ [7]: многополюсные сверхпроводящие вигглеры с экстремально высоким уровнем поля (7–7.5 Тл) и длинным периодом (140–200 мм) (реализуемые методы: широкие пучки для медицинского применения и исследований массивных объектов технологического назначения и промышленных образцов); многополюсные сверхпроводящие вигглеры со средним уровнем поля (3.5–4.2 Тл) и небольшим периодом (48–60 мм) (для XAFS-спектроскопии и энергодисперсионной дифрактометрии); многополюсные сверхпроводя-

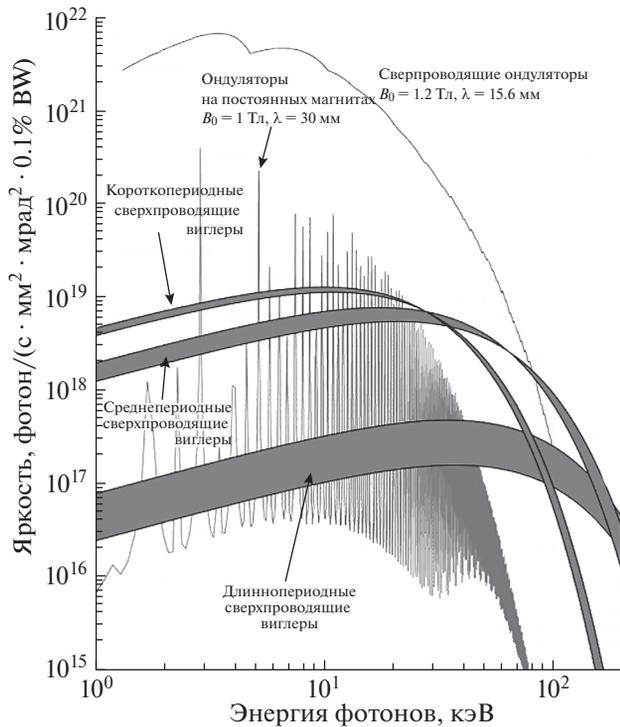


Рис. 2. Спектральные характеристики вставных устройств – генераторов СИ источника “СКИФ”.

шие вивглеры с коротким периодом (30–34 мм) и низким уровнем поля (2–2.2 Тл); сверхпроводящие ондуляторы (для рентгеноструктурного анализа микрообъектов, поверхностно-чувствительные методы и др.); ондуляторы на постоянных магнитах с изменяемой поляризацией (APPLE-II type, циркулярный и линейный магнитный дихроизм); спиральные ондуляторы (циркулярный дихроизм и др.). Важно отметить, что для головной машины проекта ИССИ-4 выбрана энергия пучка 6 ГэВ, и была проведена работа по адаптации многих существующих решений к этой энергии.

### 3. “СКИФ”

Источник синхротронного излучения Центр коллективного пользования “СКИФ” (Сибирский кольцевой источник фотонов) планируется ввести в эксплуатацию в конце 2023-го года. Проект имеет ряд преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами в Южной Корее, Австралии, Тайване, Китае и Японии:

- Минимальный эмиттанс при рабочей энергии электронов 3 ГэВ (использование вивглеров-затухателей и других ускорительных решений в перспективе может позволить уменьшить эмиттанс до значений порядка 70 пм · рад).

- Наличие сверхпроводящих сильнополевых вставных устройств для генерации мощного излучения в жестком рентгеновском диапазоне.

- Наличие сверхпроводящих короткопериодных ондуляторов, генерирующих пространственно когерентное излучение в диапазоне энергий фотонов 40–80 кэВ.

- Создание уникальных современных мультидисциплинарных экспериментальных станций и сопутствующей научно-исследовательской инфраструктуры, которая выведет целые направления российских исследований на передовые позиции в мире.

- Создание уникальной экспериментальной станции исследования быстропротекающих процессов. Детальное понимание механики и химии взрывных и ударно-волновых процессов позволит решить ряд важных задач в области базовых и критических военных и промышленных технологий для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники. Например, безопасность эксплуатации и эффективность работы устройств и технологий, использующих энергию взрыва, в том числе безопасность и гарантия работоспособности ядерных зарядов; противодействие терроризму; новые материалы с высокой удельной энергоемкостью для ракетной промышленности; синтез новых соединений в условиях взрыва; взрывной синтез наночастиц углерода с заданными свойствами.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики УГИ, планируемых для использования на источнике “СКИФ”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена концепция устройств генерации излучения для национальных источников синхротронного излучения с предельно низким эмиттансом, определены основные технические требования к ним, проведено численное моделирование спектров. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “СЦСТИ” на базе ВЭПП-4М, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piminov P. A. et al. // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19.
2. Тернов И.М. // УФН. 1995. Т. 165. Вып. 4. С. 429.
3. Sedlyarov I.K. et al. // Proc. PAC09. Vancouver. BC. Canada. P. 2018.
4. Amin R.S., Jines P., Launey D. et al. // Proc. IPAC 2015. Richmond, VA, USA. S.I.: JACoW. 2015. P. 1682.
5. Khrushchev S.V., Lev V.H., Mezentssev N.A. et al. // NIM A603 (2009). P. 7. doi 10.1016/j.nima.2008.12.112
6. Khrushchev S.V., Lev V.H., Mezentssev N.A. et al. // Proc. of IPAC-2011. San Sebastian, Spain. P. 3304.
7. Khrushchev S., Mezentssev N., Lev V. et al. // Proc. IPAC 2014. Dresden, Germany. P. 4103. doi 10.18429/jacow-ipac2014-wepri09110.18429/jacow-ipac2014-wepri091