

УДК 53.07:535-34

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-4М

© 2023 г. Б. Г. Гольденберг^{a, b, c, *}, И. С. Гусев^{b, c}, Я. В. Зубавичус^{a, c, d}

^aЦентр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, 630059 Россия

^bИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

^cНовосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

^dИнститут катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: b.g.goldenberg@srf-skif.ru

Поступила в редакцию 30.12.2022 г.

После доработки 22.02.2023 г.

Принята к публикации 22.02.2023 г.

На канале № 1 вывода синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН создана специализированная Технологическая станция для проведения учебно-демонстрационных работ в целях подготовки студентов профильных специальностей, а также новых пользователей, тестирования экспериментального оборудования и проведения предварительных или вспомогательных экспериментов. Непосредственное участие студентов в разработке элементов станции синхротронного излучения и методик проведения экспериментов повышает вовлеченность молодых специалистов в работы на синхротронном излучении и разработку оборудования для экспериментальных станций создаваемого источника ЦКП “СКИФ”. Модульная концепция построения станции дает возможность реализовывать различные методики и развивать установку. В статье описаны устройство станции, параметры излучения, в сравнении с другими действующими станциями синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН. Представлены примеры реализованных на станции методик, полученные в ходе выполнения учебных работ. Продемонстрирована работа автоматизированного фотодиодного монитора для визуализации и контроля интенсивности пучка излучения. Реализованная методика рентгенофлуоресцентного элементного анализа на синхротронном излучении в вакууме дает возможность анализировать легкие элементы, недоступные для анализа на ранее действующих станциях. Описаны перспективы развития Технологической станции.

Ключевые слова: синхротронное излучение, экспериментальная станция, рентгеновский пучок, монохроматор, спектральные измерения, рентгенофлуоресцентный анализ, обучение.

DOI: 10.31857/S1028096023100060, **EDN:** JRQSSJ

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) – электромагнитное излучение, которое испускается заряженными частицами, движущимися по круговым орбитам с ультррелятивистскими скоростями [1] – уникальный инструмент исследования состава и структуры вещества, а также радиационных технологий. В мире действуют примерно 50 научных центров на источниках синхротронного излучения. Исследовательские станции предназначены для реализации конкретных методик. В качестве примера можно привести станцию Структурного материаловедения [2] для исследования особенностей пространственной организации функциональных материалов, станцию “Белок” [3] для проведения рентгеновской дифрактометрии макромолекулярных монокристаллов на Курчатовском источнике синхротронного излучения (Москва,

Россия) или станцию на канале ID02 ESRF (Гренобль, Франция) для исследований малоуглового рентгеновского рассеяния с временным разрешением [4]. Такие станции предоставляют пользователям высокотехнологичный прецизионный инструмент для выполнения определенных исследований. В ведущих мировых исследовательских центрах большое внимание уделяют популяризации высокотехнологичных методов исследований среди школьников старших классов и студентов. В США существует специальная программа национальной академии наук под названием “Introducing Synchrotron into the Classroom,” или сокращенно InSynC, разработанная для обеспечения преподавателям и студентам возможности участвовать в оригинальных исследованиях, проводимых в самых современных исследовательских лабораториях на каналах СИ, чтобы

увидеть, как собирают, обрабатывают и интерпретируют данные. Реализация программы заключалась во внедрении технологий удаленного доступа как на станциях СИ, так и в школах. Таким образом, учащиеся могут наблюдать, обсуждать и частично участвовать в управлении проведением эксперимента в режиме реального времени [5]. Подобные программы, нацеленные на вовлечение старшеклассников в естественнонаучные исследования посредством экскурсий и модельных лабораторных работ, существуют на австралийском синхротроне [6], канадском источнике СИ [7]. Во Франции действует программа взаимодействия парижской центральной школы и синхротрона ESRF [8] охватывающая экскурсии, виртуальные работы и непосредственное участие в экспериментах на каналах СИ.

В Новосибирской области реализуется проект источника синхротронного излучения поколения 4+ “СКИФ”. По предварительным оценкам, при эксплуатации ЦКП “СКИФ” потребуется около 150 специалистов, работающих на экспериментальных станциях СИ, и занимающихся разработкой новых экспериментальных методов [9]. В ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ) на базе накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера [10] действуют экспериментальные станции СИ, на которых реализованы методики дифракционных исследований структуры вещества [11, 12], рентгеноспектрального анализа элементного состава объектов [13, 14], EXAFS-спектроскопии [15], технологических приложений [16] и тому подобные. Практическую подготовку студентов уже сейчас проводят на действующих экспериментальных станциях. Необходимо отметить, что оборудование станций, на которых ведут рутинные эксперименты, настраивают для решения конкретной задачи, и его разборка или перенастройка в учебных целях недопустима, поскольку это существенно сократит доступное для текущих экспериментов время. Таким образом, возможно участие студентов в проведении экспериментов и обработке результатов, но не в настройке оборудования станций. Необходимость подготовки не только пользователей, но и специалистов для создания и эксплуатации экспериментальных станций на источнике “СКИФ” мотивировала создание дополнительной специальной станции.

Технологическая станция СИ представляет собой стенд для обучения будущих специалистов основам экспериментальной работы на СИ. В процессе сборки и наладки оборудования станции студенты смогут получить наглядное представление о принципах работы всей системы и реальный опыт подготовки и проведения экспериментов с СИ [17]. Также этот стенд удобен для тестирования новых элементов аппаратуры для

синхротронных экспериментов, например, рентгеновских детекторов.

СОСТАВ УСТАНОВКИ

На Технологической станции есть набор относительно стандартных элементов пользовательских станций, использующих СИ: вакуумируемый до уровня 10 Па канал вывода СИ, модуль монохроматора и модуль измерений, в которых размещены подвижки, монохроматор, детекторы и прочее оборудование. Вариативность компоновки оборудования станции открывает возможности проведения демонстрационных и учебных работ с применением различных методик исследований на синхротронном излучении.

На рис. 1 представлена схема компоновки Технологической станции. В первой камере установлены монохроматор прорезного типа [18] из кристалла Si(111) и блоки рентгеновских щелей для формирования размеров пучка СИ и отсекающего прямого пучка и рассеянного излучения. Все элементы оснащены моторизованными подвижками, что позволяет выполнять настройку в закрытой камере с включенным пучком СИ. Кристалл-монохроматор установлен на прецизионный гониометр с амплитудой качания 30° , точность позиционирования $-0.05^\circ \pm 0.025^\circ$, минимальный шаг перемещения 0.0005° . Вертикальное положение кристалла можно регулировать в диапазоне 10 мм с точностью ± 1 мкм с помощью вертикальной подвижки 3 (рис. 1). Рентгеновские ножи 1 и 4 установлены на линейных подвижках с точностью позиционирования 3 мкм. Таким образом, в первой камере происходит формирование размеров и спектра пучка СИ.

Для контроля интенсивности СИ и автоматизации настройки положения элементов формирования размеров пучка фотонов в камере монохроматора также установлен фотодиодный монитор пучка 5. На вертикально установленной линейной подвижке в металлическом корпусе размещен кремниевый $p-i-n$ фотодиод. Перед диодом опционально может быть установлен полированный кристалл сцинтиллятора CdWO_4 толщиной 0.4 мм. Перед сцинтиллятором расположена рентгеновская диафрагма из тантала шириной 4 мм и высотой 0.4 мм, определяющая пространственную чувствительность монитора.

Во второй камере размещены исследуемые образцы, энерго-дисперсионный детектор и вспомогательные элементы — люминофорный экран, CCD-камеры для визуального контроля совмещения. Эти элементы моторизованы для настройки под пучком СИ. В данной конфигурации реализована методика рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава образца.

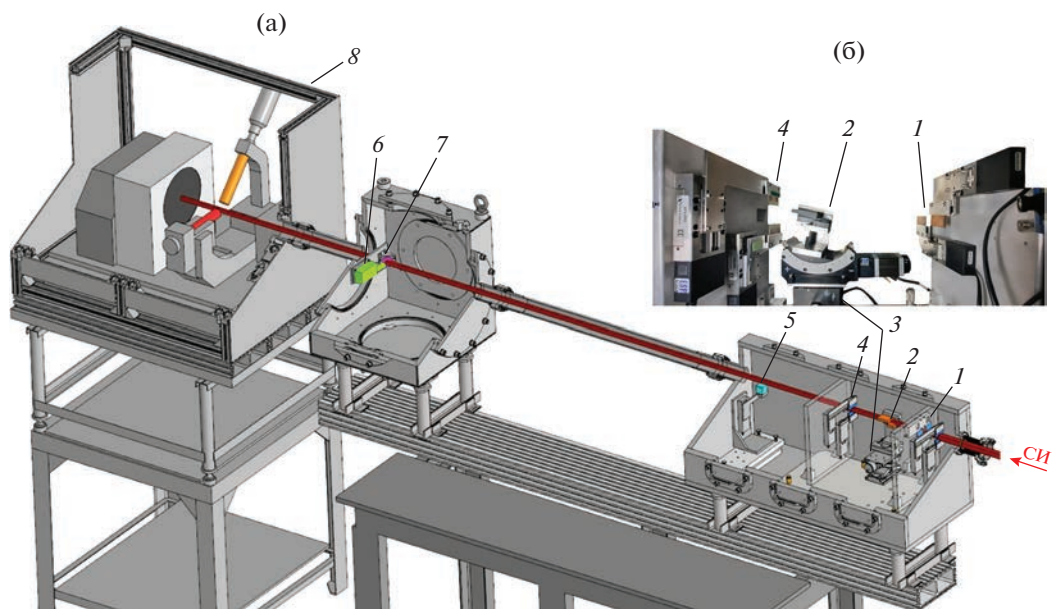


Рис. 1. (а) Схематическое изображение Технологической станции СИ: 1 – блок входных щелей; 2 – прорезной кристалл-монокроматор; 3 – вертикальная подвижка монокроматора; 4 – выходные щели; 5 – фотодиодный монитор пучка; 6 – энергодисперсионный детектор Amptek; 7 – образец. На вкладке: (б) размещение в камере монокроматора с комплектом щелей.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Синхротронное излучение на Технологической станции выводится из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4М, радиус кривизны поворота в точке выхода излучения составляет 34.55 м. В табл. 1 приведены расчетные характеристики излучения на уровне размещения образца на Технологической станции СИ в двух основных режимах работы ВЭПП-4М. Для сравнения приведены характеристики излучения, используемого в рутинных экспериментах на станциях “LIGA-технология и рентгеновская литография” [16] и “Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ” ВЭПП-3 [1, 19]. На рис. 2 представлены расчетные спектры СИ на Технологической станции при двух типичных режимах работы ВЭПП-4М (при энергии электронов 4.5 и 3.5 ГэВ, при среднем токе 10 мА).

Для сравнения приведен спектр излучения для ВЭПП-3 в типичном режиме, используемом в большинстве рутинных экспериментов, реализуемых в исследовательском Центре при энергии электронов 2 ГэВ и среднем токе 100 мА. Как видно, при энергии электронов 4.5 ГэВ в ВЭПП-4М спектральное распределение на Технологической станции близко к спектру ВЭПП-3, хотя и меньше по интенсивности. Это позволяет реализовать многие из методик, используемых на станциях ВЭПП-3.

При энергии электронов 3.5 ГэВ в ВЭПП-4М спектральный поток смещается в область с большей длиной волны излучения и становится заметно слабее, что, однако, не мешает проведению учебно-демонстрационных работ. Данный режим работы ВЭПП-4М интересен тем, что аналогичен режиму работы коллайдера, используемому при проведении исследований в области физики элементарных частиц, когда электростатическим по-

Таблица 1. Сравнение основных характеристик СИ

Параметры	ВЭПП-4М		ВЭПП-3
	Энергия электронов, ГэВ	4.5	3.5
Магнитное поле в точке излучения, кгс	4.34	3.38	20
Средний ток электронов, мА	8	8	80
Суммарная толщина разделительных бериллиевые окна в канале, мкм	800	800	500
Критическая энергия фотонов E_c , кэВ	5.86	2.76	5.33
Расстояние от точки излучения, м	21	21	20

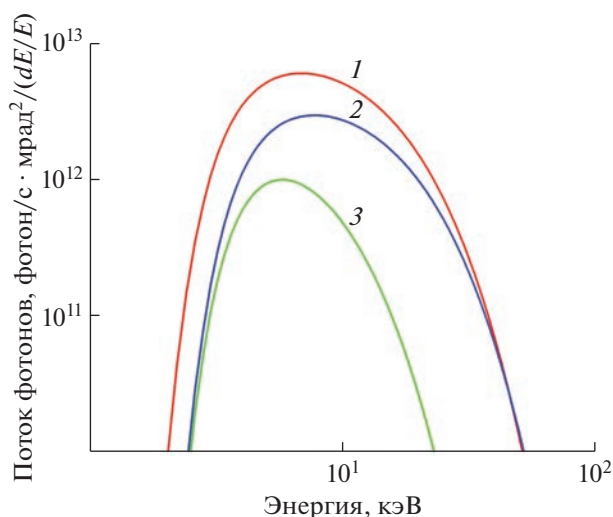


Рис. 2. Сравнение потоков СИ в типичном режиме работы на станциях СИ ВЭПП-3 (1) и на Технологической станции СИ ВЭПП-4М при энергии электронов 4.5 (2) и 3.5 ГэВ (3); $dE/E = 0.001$.

лем разводят по вертикали пучки электронов и позитронов в накопителе, однако орбита электронов в накопителе отличается от режима генерации СИ. Таким образом, одновременно с экспериментами по физике элементарных частиц невозможно проводить работы с СИ на других каналах вывода излучения из ВЭПП-4М, кроме Технологической станции. Особенность Технологической станции состоит в том, что источником излучения служит поворотный магнит, расположенный до системы электростатического разведения, следовательно, орбита электронов при различных режимах в этой точке не изменяется. Кроме того, доступное время для проведения экспериментов на Технологической станции существенно больше, чем на других станциях нашего Центра.

Доступный спектральный диапазон определяется геометрией прорезного монохроматора. Ширина ламелей кристалла — 40 мм, длина первой ламели — 30 мм, второй — 50 мм, зазор между ламелями — 5 мм, соответственно, доступные углы работы монохроматора ограничены от 4.8° до 26.5° . Энергетический диапазон составляет от 4.5 до 23.8 кэВ. Энергетическое разрешение монохроматора определяется свойствами используемого кристалла, апертурой пучка и точностью перемещения гониометра. Энергетическое разрешение в случае использования кристалла Si(111) составляет $\Delta E/E = 1.4 \times 10^{-4}$ [20]. Угловая апертура пучка при размере входных щелей 1 мм и расстоянии от источника излучения 20 м составляет 2.5×10^{-5} рад, что дает вклад в энергетическое разрешение $\Delta E/E = 1.1 \times 10^{-4}$, при энергии 9 кэВ (угол монохроматора — 12.7°). Энергетическое

разрешение монохроматора, таким образом, составляет $\Delta E/E = 1.8 \times 10^{-4}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И УЧЕБНЫЕ РАБОТЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Как видно из рис. 2, интенсивность СИ на Технологической станции слабее, чем на исследовательских станциях ВЭПП-3, следовательно, возрастает время проведения экспериментов, однако это достаточно для проведения учебно-демонстрационных работ или тестирования новых устройств. Реализуемые на станции методики основаны на опыте работ на исследовательских станциях ЦКП СЦСТИ. Ниже приведены типы учебно-демонстрационных работ, реализованных на Технологической станции СИ.

Основы безопасной работы с синхротронным излучением

В ходе ознакомительных занятий демонстрируют высокую проникающую способность СИ в материалы, приемы дозиметрии, в том числе измерение радиационной дозы в камере с пучком СИ. Рассматривают опасные факторы и способы безопасной организации экспериментов.

Визуализация и контроль положения пучка синхротронного излучения

Данный тип работ позволяет продемонстрировать способы визуализации излучения на станции и регистрации пространственного распределения пучка. Рассматривают управление размерами пучка СИ посредством моторизированных щелей и настройку пучка для последующих экспериментов. Разработан компактный фотодиодный монитор пучка и управляющая программа для измерения потока СИ. Сканирование фотодиодным приемником посредством координатной подвижки б (рис. 1) позволяет оперативно получить вертикальный профиль пучка СИ в камере монохроматора и контролировать настройку положения монохроматора и рентгеновских ножей относительно пучка СИ с точностью не хуже 100 мкм. На рис. 3 представлен пример зарегистрированного вертикального профиля СИ.

Изучение взаимодействия синхротронного излучения с веществом

Во время ознакомительных занятий рассматривают взаимодействие СИ с веществом на примере изучения поглощения излучения в материале и регистрация краев поглощения в спектрах пропускания. На рис. 4 представлен зарегистрированный на станции спектр поглощения фольги

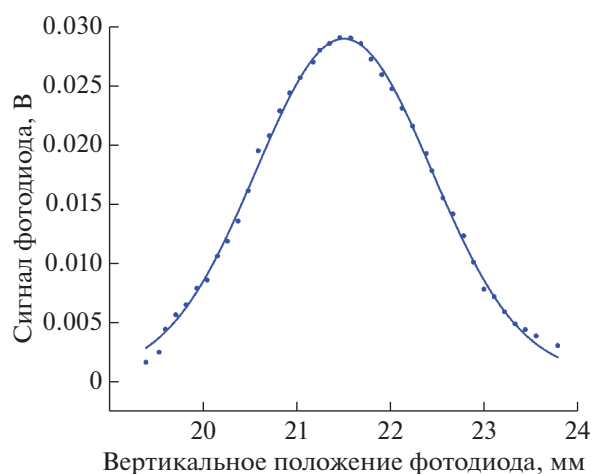


Рис. 3. Зарегистрированный профиль вертикального распределения СИ.

из медно-никелевого сплава толщиной 10 мкм. По положению скачков поглощения можно калибровать гониометр монохроматора. Разрешающая способность монохроматора позволяет реализовать методику EXAFS-спектроскопии. Для примера, на вкладке рис. 4 приведены осцилляции коэффициента поглощения вблизи краев поглощения меди и никеля.

Изучение основ рентгенофлуоресцентного элементного анализа на синхротронном излучении

Данный тип занятий позволяет изучить работу энергодисперсионного детектора, методы регистрации спектров рентгенофлуоресценции и определения элементного состава вещества. На рис. 5 представлен зарегистрированный на Технологической станции рентгенофлуоресцентный спектр тестового образца (напыленные на кремниевую подложку слои алюминия и титана толщиной 1 мкм). Данный спектр представляет интерес для обучения начинающих пользователей, так как может быть четко интерпретирован. Здесь хорошо видны линии люминесценции алюминия (1.49 кэВ), кремния (1.74 кэВ), линии титана (4.51 и 4.93 кэВ), линия упругого рассеяния, соответствующая энергии возбуждения в данном эксперименте (6.50 кэВ), линии двухфотонного возбуждения (9.02 и 9.44 кэВ), а также пик вылета от материала детектора (кремний) (2.77 кэВ). Съемку данного спектра проводили при давлении 30 Па, он демонстрирует преимущества станции для исследования элементного состава в области низких энергий (легких элементов), недоступной для действующих в СЦСТИ станций рентгенофлуоресцентного анализа [13, 14], предназначенных для исследования относительно тяжелых элементов без вакуумирования.

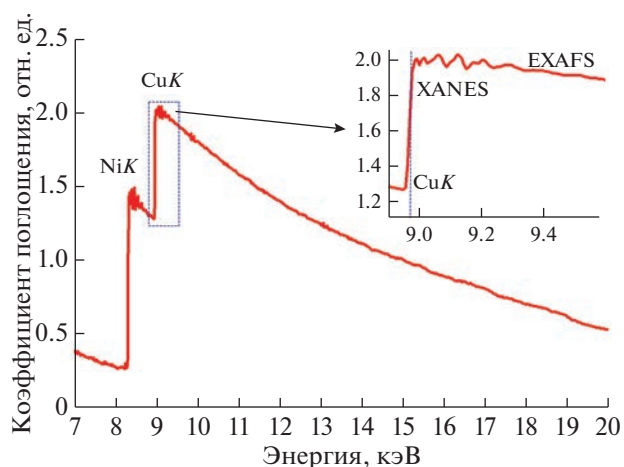


Рис. 4. Спектр пропускания фольги из медно-никелевого сплава толщиной 10 мкм.

Автоматизация эксперимента

Во время ознакомительных занятий студентам предоставляют возможность самостоятельно написать программы управления экспериментом, интегрирующие работу используемой аппаратуры – подвижки, детектор, аналого-цифровой преобразователь и т.п. В ходе выполнения дипломной работы на станции было разработано программное обеспечение для автоматизации работы станции, прошедшее государственную регистрацию [21]. Программное обеспечение управляет всеми подвижками на станции и аналого-цифровым преобразователем для реализации алгоритмов настройки и проведения экспериментов.

Развитие станции продолжается. Запланирована установка после второй экспериментальной

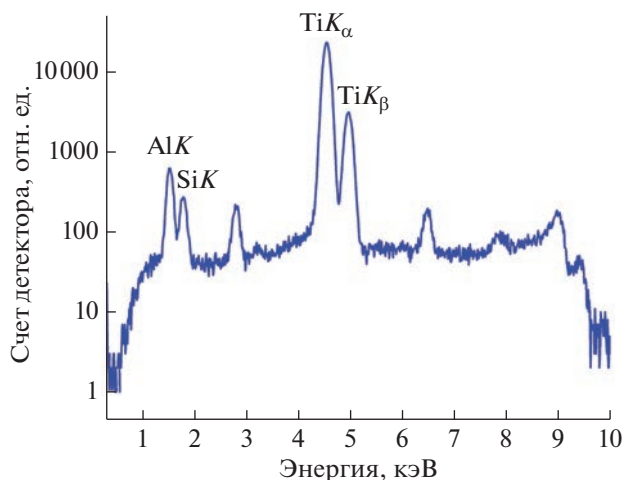


Рис. 5. Спектр рентгенофлуоресценции тестового образца.

камеры (рис. 1, положение 7) компактного полнофункционального дифрактометра MarXperts с 2D гибридно-пиксельным детектором Pilatus 1M (Dectris, Швейцария). Это позволит эффективным образом реализовать на станции комплекс дифракционных методов, а именно порошковую дифракцию и рентгеноструктурный анализ монокристаллов, включая и макромолекулярную кристаллографию. Возможность входящего в состав станции монохроматора позволит выбирать для эксперимента оптимальную энергию фотонов в диапазоне 7–25 кэВ. Расширенные возможности станции сделают ее очень привлекательным образовательным полигоном для студентов, обучающихся по программам, связанным с использованием СИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ЦКП СЦСТИ функционирует специализированная станция синхротронного излучения для проведения учебно-демонстрационных работ для подготовки будущих пользователей, в том числе создающегося источника синхротронного излучения ЦКП “СКИФ”. Студенты НГТУ и НГУ принимали непосредственное участие в создании и вводе в эксплуатацию станции в формате выполнения дипломных работ в части конструирования и сборки элементов станции, разработки программного обеспечения управления оборудованием станции и проведении тестовых измерений. Разработан фотодиодный монитор СИ для оперативного контроля положения элементов станции относительно пучка синхротронного излучения. Продемонстрировано расширение возможностей методики рентгенофлуоресцентного элементного анализа легких химических элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовано оборудование ЦКП СЦСТИ на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2022-263) проект “Инструментально-методическое развитие уникальной научной установки Станция EXAFS спектроскопии Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения и реализация на ней программы масштабных научных исследований мирового уровня с целью получения прорывных результатов в области катализа, зеленой энергетики и фундаментальной медицины”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kunz C.* // Synchrotron Radiation Techniques and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1979. P. 1.

2. *Chernyshov A.A., Veligzhanin A.A., Zubavichus Y.V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. Iss. 1–2. P. 95.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.167>

3. *Lazarenko V.A., Dorovatovskii P.V., Zubavichus Ya.V. et al.* // Crystals. 2017. V. 7. P. 325.
<https://doi.org/10.3390/cryst7110325>

4. *Narayanan T., Sztucki M., van Vaerenberghet P. et al.* // J. Appl. Cryst. 2018. V. 51. P. 1511.
<https://www.doi.org/10.1107/S1600576718012748>

5. *Lanzjrotti A., Bronson S., Miller L., Nasta K.* // Synchrotron Radiation News. 2013. V. 26. Iss. 1. P. 30.
<https://doi.org/10.1080/08940886.2013.753786>

6. *Mills N.* // Synchrotron Radiation News. 2013. V. 26. Iss. 1. P. 16.
<https://doi.org/10.1080/08940886.2013.753776>

7. *Walker T.L., Blyth R.I.R.* // Synchrotron Radiation News. 2013. V. 26. Iss. 1. P. 21.
<https://doi.org/10.1080/08940886.2013.753778>

8. *Pascal B., Ceppi A., Fournier B. et al.* // Jpn. Soc. Synchrotron Rad. Res. 2009. V. 22. № 3. P. 142.

9. *Левичев Е.Б., Журавлев А.Н., Золотарев К.В. и др.* Проект создания синхротронного источника поколения. 4+ ЦКП “СКИФ” в р.п. Кольцово Новосибирской области: общая информация и статус реализации // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”. Том I. / Ред. Шефер К.И. Новосибирск: Институт катализа СО РАН, 2022. 374 с.

10. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. et al.* // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19.
<https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005>

11. *Shevchenko V.G., Eselevich D.A., Popov N.A. et al.* // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2018. V. 54. № 1. P. 58.
<https://www.doi.org/10.1134/S0010508218010094>

12. *Kudryavtsev V.N., Maltsev T.V., Shekhtman L.I.* // Nucl. Instrum. Method Phys. Res. Sect. A. 2017. V. 845. P. 289.
<https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.066>

13. *Дарьин А.В., Чу Г., Бабич В.В. и др.* // Известия РАН. Сер. географическая. 2021. Т. 85. № 1. С. 97.
<https://www.doi.org/10.31857/S2587556621010039>

14. *Легкодьямов А.А., Купер К.Э., Колмогоров Ю.П., Баранов Г.Н.* // Известия РАН. Сер. физическая. 2019. Т. 83. № 2. С. 158.
<https://www.doi.org/10.1134/S0367676519020194>

15. *Мороз Э.М., Пахарукова В.П., Кривенцов В.В., Ларичев Ю.В.* // Журнал структурной химии. 2021. Т. 62. № 4. С. 584.

16. *Goldenberg B.G., Lemzyakov A.G., Nazmov V.P., Pindyurin V.F.* // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 205.
<https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.036>

17. *Goldenberg B.G., Rakshun Ya.V., Bugaev S.V., Meshkov O.I., Tsybulya S.V.* // Bull. RAS: Phys. 2019. V. 83. № 2. P. 129.
<https://www.doi.org/10.3103/S1062873819020151>

18. *Hrdy J.* // Czechoslovak J. Phys. B. 1989. V. 39. P. 261.
<https://www.doi.org/10.1007/BF01597779>

19. *Дарьин Ф.А., Сороколетов Д.С., Ракиун Я.В., Дарин А.В., Векслер И.В.* // Поверхность. Рентген.,

- синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 2. С. 34. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352818020051>
20. Matsushita T., Hashizume H. // Handbook on Synchrotron Radiation. V. 1 / Ed. Koch E.E. Amsterdam: North-Holland, 1983. P. 261.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022662761 (Российская Федерация). Synchrotron Radiation Monitor / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2022.

Synchrotron Radiation Technological Station at the VEPP-4M Storage Ring

B. G. Goldenberg^{1, 2, 3, *}, I. S. Gusev^{2, 3}, Y. V. Zubavichus^{1, 3, 4}

¹Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis Siberian Branch of RAS, Koltsovo, 630059 Russia

²Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, 630090 Russia

³Novosibirsk state university, Novosibirsk, 630090 Russia

⁴Boreskov Institute of Catalysis Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: b.g.goldenberg@srf-skif.ru

On the beam line № 1 of the VEPP-4M storage ring located at the Institute of Nuclear Physics named after Budker SB RAS, a new technologically oriented terminal station has been put into operation. First of all, the station is intended for conducting visual didactic experiments with an active beam for teaching university students of related training profiles and novice users, developing and testing measuring instruments, as well as conducting preliminary or additional measurements. Such a direct involvement of students into the design of beamline components and deployment of different synchrotron techniques increase their motivation towards professional and efficient utilization of synchrotron radiation techniques and instrumentation development, which is highly demanded for the ongoing project SRF SKIF. The modular design of the end station enables implementation of diverse techniques in the mode of continuous upgrade. The present paper describes the optical scheme of the beamline and emphasizes synchrotron beam parameters therein with respect to other beamlines operating in the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. Selected examples of experimental results obtained by students using various techniques in the course of training are given. In particular, the automated operation of a photodiode-based X-ray beam monitor is demonstrated, which is required to visualize the incident X-ray beam, measure its exact position and intensity. The implementation of X-ray fluorescence analysis technique in a dedicated vacuum chamber enables quantification of light elements, which was unattainable at other beamlines. Prospects for further development of the technology-oriented end station are envisaged.

Keywords: synchrotron radiation, experimental beamline, X-ray beam, monochromator, spectral measurements, X-ray fluorescence analysis, student training.