

УДК 535.34:535.4:54.08

КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2023 г. И. А. Рубцов^{1, *}, Я. В. Зубавичус¹, К. А. Тен², Э. Р. Прууэл², А. О. Кашкаров²,
К. Э. Купер¹, А. А. Студенников¹, Б. П. Толочко³, Л. И. Шехтман⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Федеральный исследовательский центр
“Институт катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук”,
Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

*E-mail: i.a.rubtsov@srf-skif.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В рамках разработки и создания экспериментальной Станции 1–3 “Быстропротекающие процессы” строящегося источника синхротронного излучения поколения 4+ была проработана схема для измерения малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением. Такие измерения крайне актуальны на сегодняшний день для изучения эволюции частиц углерода при детонации энергетических материалов, а также для ряда других задач.

DOI: 10.31857/S0367676522701216, EDN: AAEXBR

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день методика малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) активно применяется в каждом центре синхротронного излучения (СИ), для изучения внутренней структуры вещества, его неоднородностей и т.д. для задач физики, химии, биологии и материаловедения. Последние годы данную методику начали использовать для изучения динамических процессов, например таких как детонация энергетических материалов.

Экспериментальная Станция 1-3 “Быстропротекающие процессы”, строящегося источника синхротронного излучения ЦКП “СКИФ”, состоит из двух секций, работающих последовательно: “Динамические процессы” и “Плазма”. Реализация методики МУРР с высоким временным разрешением заложена в секции “Динамические процессы” [1].

Основная задача станции 1-3 – исследование быстропротекающих процессов с характерными

масштабами изменения процесса от пикосекунд до миллисекунд. Исследование таких процессов с использованием синхротронного излучения в мире начали в г. Новосибирске, объединением усилий трех институтов СО РАН: Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Института ядерной физики им. Г.И. Будкера и Института химии твердого тела и механохимии [2–6].

В последние годы в мире исследования быстропротекающих процессов с помощью синхротронного излучения начало активно развиваться: В Великобритании, Франции и Германии были проведены исследования по изучению ударных волн, генерируемых пушками (и лазерами). В эти годы очень активно начали совершенствоваться методики для таких исследований [7–12]. В США, на станции APS возможно проводить эксперименты по измерению МУРР с пространственным разрешением до 1 мкм и с наносекундными временами [13, 14].

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Станция 1-3 “Быстропротекающие процессы” предназначена для изучения процессов, происходящих в условиях взрыва и импульсных ударных нагрузок, при этом основное направление работ — это исследование поведения вещества при интенсивных динамических воздействиях в условиях взрыва и импульсного воздействия различной природы. Скоростное рентгенографирование позволит определять скорости превращений, распределение плотностей при ударном сжатии. Внутреннее состояние сжатого вещества будет определяться дифракционными методиками (в том числе и МУРР).

Впервые методика МУРР для исследования быстропротекающих процессов была применена в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения на ускорительном комплексе ВЭПП-3 для изучения процесса конденсации углерода при детонации энергетических материалов (динамическое измерение интегрального МУРР [2, 3]). Дальнейшее совершенствование измерительного оборудования и постройка новой экспериментальной станции на ускорительном комплексе ВЭПП-4 позволили регистрировать угловое распределение МУРР и перейти к анализу динамики распределений частиц углерода по размерам [15, 16].

Данная методика нашла также применение при изучении синтеза наночастиц металлов [17], горения нанотермитных систем [18], детонации наноструктурированных энергетических материалов [19] и процессов пыления [20].

Таким образом, методика малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением зарекомендовала себя как надежный инструмент для исследования быстропротекающих процессов, в которых за времена в несколько микросекунд происходят изменения (флуктуации плотности) нанометровых масштабов [2–6, 14–20]. Существенными недостатками комплекса ВЭПП-4 являются большой размер пучка электронов (нельзя регистрировать неоднородности более 70 нм), недостаточная интенсивность излучения, а также большой временной интервал между банчами (более 124 нс).

Бесконкурентными преимуществами новой станции являются: а) малый поперечный размер пучка СИ, позволяющий методом малоуглового рентгеновского рассеяния регистрировать в образце неоднородности размером до 3 мкм, б) возможность проводить рентгенографию в одноканальном режиме с субмикросекундным разрешением, в) проводить динамические эксперименты в во взрывной камере с максимальным весом зарядов энергетических материалов до 2 кг в тротиловом эквиваленте, что позволит наблюдать процессы в реальных, практически используемых

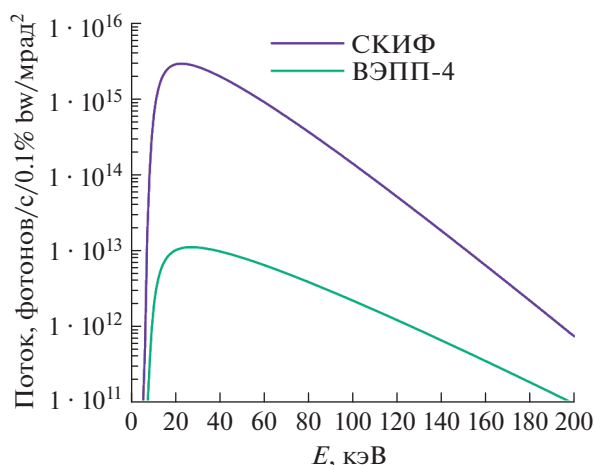


Рис. 1. Спектральная характеристика источника (с учетом поглощения в выходных окнах фронтенда).

масштабах, а также исследовать масштабный эффект в динамических процессах [1].

РЕНТГЕНО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Оптимальная энергия рентгеновских фотонов для измерения МУРР при детонации энергетических материалов (диаметром более 40 мм) составляет порядка 20–40 кэВ. В качестве источника для новой станции СИ будет использоваться сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм, магнитным полем до 2.8 Тл, количеством периодов $N = 74$ установленный в прямолинейном проемжукте ускорительного комплекса ЦКП “СКИФ” поколения 4+ с энергией электронов 3 ГэВ. Спектральная характеристика источника, а также ее сравнение с излучением на ВЭПП-4 приведены на рис. 1 [1].

Характерные скорости процессов, исследуемых на Станции, достигают десятка километров в секунду, поэтому для исследования таких процессов источник СИ является весьма удобным инструментом, поскольку время экспозиции каждого кадра определяется длительностью вспышки от одного электронного сгустка (~3 пс), а время между вспышками СИ от соседних сгустков соответствует минимальному времени между кадрами и определяет временное разрешение эксперимента. В зависимости от режима работы накопителя это время может варьироваться в пределах 3–100 нс. Для возможности проведения таких экспериментов и набора достаточной статистики важен не полный ток накопителя, а ток, обусловленный каждым отдельным электронным сгустком, что соответствует требованию максимально возможного числа электронов в одиночном сгустке [1]. В связи с этим, для наиболее ответственных экспериментов, работа на станции может потребовать

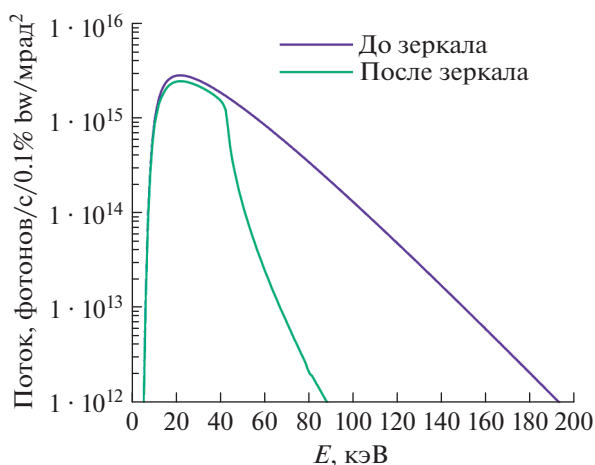


Рис. 2. Спектр излучения до и после зеркала.

специализированного режима работы накопителя: сравнительно небольшое суммарное число сгустков на орбите накопителя с максимально возможным числом электронов в каждом сгустке.

Излучение из вигглера удовлетворяет всем этим требованиям в то время, как использование ондулятора представляется нецелесообразным в связи с тем, что его высокие гармоники (соответствующие энергиям 20 и более кэВ) обладают низкой интенсивностью [1].

Для более медленных процессов, распространяемых со скоростями единицы километров в секунду, можно поднять эффективность регистрации путем интегрирования сигнала с нескольких электронных сгустков [1].

Возможность использования не монохроматического, а “розового” спектра излучения фотонов имеющегося на ВЭПП-4 (рис. 1) для измерения МУРР с высоким временным разрешением и его последующей интерпретацией была подтверждена теоретически и экспериментально в работах [16, 21]. Но, тем не менее, сужение спектрального диапазона, с сохранением (или увеличением) количества фотонов, позволит получать существенно более качественный сигнал.

Подавление мягкой компоненты излучения происходит за счет фильтров, которые используются как в составе фронтенда, так и в составе канала транспортировки пучка. Фильтры, входящие в состав фронтенда принимают на себя основную тепловую нагрузку излучения, обеспечивая более высокую надежность функционирования последующих элементов канала.

Задача следующего рентгено-оптического элемента (зеркала) — сфокусировать пучок на расстоянии 120 м и подавить жесткую компоненту излучения (рис. 2), которая вносит искажение в форму сигнала малоуглового рассеяния. В каче-

стве такого элемента может выступить только зеркало. Изначально рассматривался вариант использования тороидального зеркала, фокусирующего пучок в обеих плоскостях, однако ввиду дороговизны такой конструкции было принято решение использовать систему секционных зеркал, как экономически более доступную в плане реализации.

Ввиду большой тепловой мощности источника (~36 кВт) актуальным является вопрос охлаждения и отвода тепла от оптических элементов, в том числе от зеркала. Основным элементом, который позволит снизить тепловую и радиационную нагрузку на оборудование, является прерыватель пучка (быстрый затвор), основная задача которого заключается в открытии пучка на короткое время проведения эксперимента (~100 мкс–20 мс). Конструктивно он представляет из себя вращающиеся диски с узкими щелями — излучение проходит через прерыватель только в тот момент, когда все щели будут находиться в одной плоскости (с пучком СИ), в остальные моменты времени оно поглощается диском.

Для ударно-волнового сжатия вещества на Станции 1-3 будут использованы различные современные устройства: две газовые пушки (диаметром ствола 20 и 50 мм), две взрывные камеры (на 200 и 2000 г энергетических материалов в тротиловом эквиваленте). Регистрация угловых распределений МУРР будет проводиться кремниевым детектором DIMEX [22] и скоростными камерами Наногейт.

Общая схема экспериментальной Станции исследования быстропротекающих процессов приведена на рис. 3.

СТАНЦИИ-АНАЛОГИ

В России и мире имеются станции со схожими задачами и назначениями, причем их количество в последние годы активно растет.

Исследование быстропротекающих процессов, в первую очередь связанные с энергетическими материалами проводятся на станциях “Субмикросекундная диагностика” и “Экстремальное состояние вещества”, введенные в эксплуатацию в конце девяностых и в 2014 г. соответственно, обе эти станции располагаются в ЦКП Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения (ИЯФ СО РАН) [2–6]. Единственным аналогом за рубежом, где исследуются энергетические материалы, в т.ч. методикой МУРР с высоким временным разрешением является станция The Dynamic Compression Sector (DCS) располагаемая в США на накопителе Advanced Photon Source (APS), построенная в 2014 г. [13, 14].

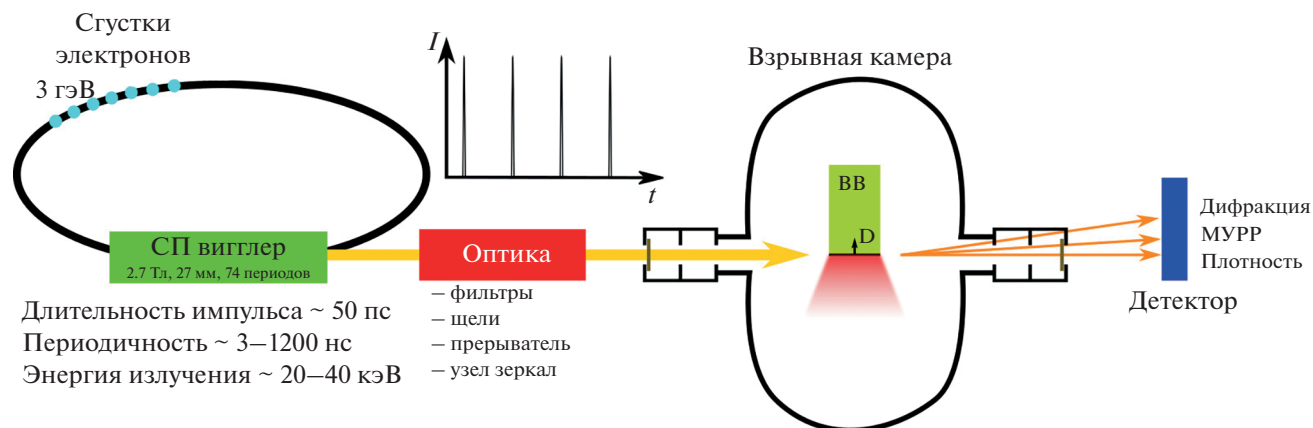


Рис. 3. Общая схема экспериментальной Станции 1-3 “Быстропротекающие процессы”.

Аналогичные станции для исследования быстропротекающих процессов появляются в Англии, Франции и Германии. Несмотря на то, что они не работают с энергетическими материалами, имеется целый спектр работ по изучению других быстропротекающих процессов [7–12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана концепция Станции 1-3 “Быстропротекающие процессы” (ЦКП “СКИФ”) для измерения малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением.

Особенность предложенной схемы заключается в использовании вигглера в качестве вставного устройства, а также зеркала подавляющего жесткую часть излучения.

На основе полученных экспериментальных данных на Станции будет проводиться реконструкция микро- и макроскопических свойств энергетических материалов, которая позволит решить фундаментальную задачу разработки уравнений состояния энергетических материалов, получить практические знания о распространении детонационных волн в веществе с учетом масштабных эффектов, разобраться в фундаментальных механизмах протекания химических реакций детонационного процесса, а также разработать и развить инновационные методы исследования сверхбыстрых процессов.

Работа была выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП “СКИФ” ИК СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шефер К.И. Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”

Эл. сборник статей. Т. 1. Новосибирск: ФИЦ “Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН”, 2022.

2. Алешаев А.Н., Евдокимов О.В., Зубков П.И. и др. Препринт. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов. ИЯФ 2000-92. Новосибирск. 2000. 51 с.

3. Titov V.M., Prueel E.R., Ten K.A. et al. // *ФГВ*. 2011. Т. 47. № 6. С. 3; *Titov V.M., Prueel E.R., Ten K.A. et al. // Combust. Explos. Shock Waves*. 2011. V. 47. No. 6. P. 615.

4. Prueel E.R., Ten K.A., Tolochko B.P. et al. // *ДАН. Техн. физ.* 2013. Т. 448. № 1. С. 38; *Prueel E.R., Ten K.A., Merzhievskii L.A. et al. // Dokl. Phys.* 2013. V. 58. No. 6. P. 24.

5. Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O. et al. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2013. Т. 77. № 2. С. 254; *Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2013. V. 77. No. 2. P. 230.

6. Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kulipanov G.N. et al. // *УФН*. 2018. Т. 188. № 6. С. 577; *Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Kulipanov G.N. et al. // Phys. Usp.* 2018. V. 61. No. 6. P. 515.

7. Cammarata M., Eybert L., Ewald F. et al. // *Rev. Sci. Instrum.* 2009. V. 80. No. 1. Art. No. 015101.

8. Olbinado M.P., Cantelli V., Mathon O. et al. // *J. Phys. D*. 2018. V. 51. No. 5. Art. No. 055601.

9. Eakins D.E., Chapman D.J. // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. V. 85. No. 12. Art. No. 123708.

10. McMahon M., Zastrau U. Conceptual design report. Dynamic laser compression experiments at the HED instrument of European XFEL. European XFEL N XFEL.EU TR-2017-001, 2017. 175 p.

11. Mason P., Banerjee S., Smith J. et al. // *High Power Laser Sci. Engin.* 2018. V. 6. Art. No. e65.

12. Shen Q., Lee W.-K., Fezzaa K. et al. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*. 2007. V. 582. No. 1. P. 77.

13. Capatina D., D’Amico K., Nudell J. et al. // *AIP Conf. Proc.* 2016. V. 1741. No. 1. Art. No. 030036.

14. Bagge-Hansen M., Lauderbach L., Hodgkin R. et al. // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 117. No. 24. Art. No. 245902.

15. Ten K.A., Titov V.M., Prueel E.R. et al. // Proc. 15th Int. Deton. Symp. (San Francisco, 2014). P. 369.
16. Rubtsov I.A., Ten K.A., Prueel E.R. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 374.
17. Толочко Б.П., Титов В.М., Чернышев А.П. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2007. Т. 15. С. 187.
18. Гордеев В.В., Казутин М.В., Козырев Н.В. и др. // Ползунов. вестн. 2018. № 2. С. 96.
19. Kashkarov A.O., Ershov A.P., Prueel E.R. et al. // Proc. 16th Int. Deton. Symp. (Cambridge, 2018). P. 1517.
20. Ten K.A., Prueel E.R., Kashkarov A.O. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 366.
21. Rubtsov I.A., Ten K.A., Prueel E.R. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 1787. Art. No. 012029.
22. Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Kudryavtsev V.N. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 189.

Conceptual design of the experimental section for measuring time resolved small angle X-ray scattering

I. A. Rubtsov^{a, *}, Ya. V. Zubavichus^a, K. A. Ten^b, E. R. Prueel^b, A. O. Kashkarov^b, K. E. Kuper^a, A. A. Studennikov^a, B. P. Tolochko^c, L. I. Shekhtman^d

^a *Synchrotron Radiation Facility–Siberian Circular Photon Source “SKIF”, Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kol'tsovo, 630559 Russia*

^b *Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

^c *Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, 630128 Russia*

^d *Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, 630090 Russia*

*e-mail: i.a.rubtsov@srf-skif.ru

As part of development of the experimental beamline 1-3 “Fast Processes” of the 4+ generation synchrotron radiation source, a scheme for measuring time resolved small-angle X-ray scattering was worked out. Measuring time resolved small-angle X-ray scattering is extremely relevant today for studying the evolution of carbon particles during the detonation of energy materials, as well as for a number of other tasks.