

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

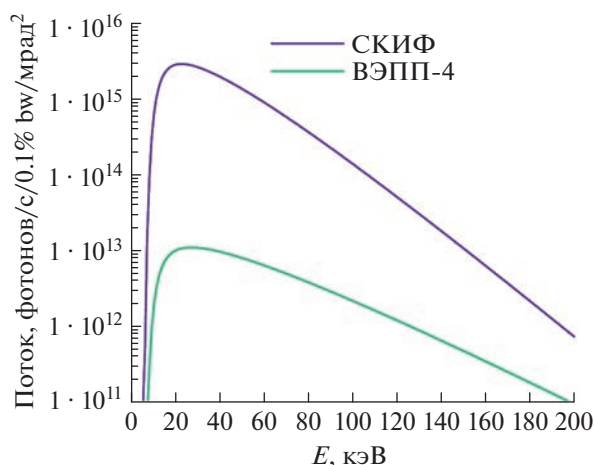


Рис. 1. Спектральная характеристика источника (с учетом поглощения в выходных окнах фронтенда).

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 проемжутке 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

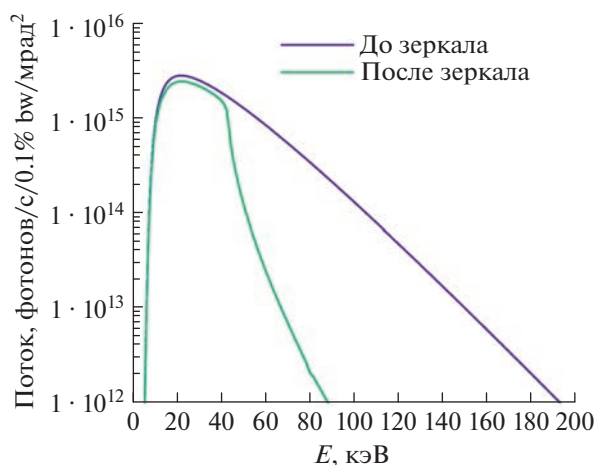


Рис. 2. Спектр излучения до и после зеркала.

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].

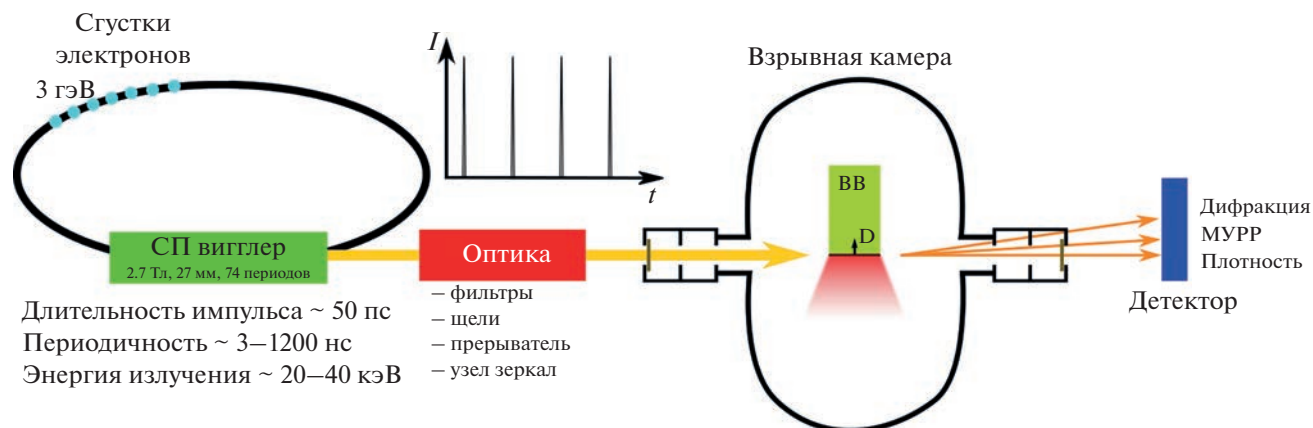


Рис. 3. Общая схема экспериментальной Станции 1-3 “Быстропротекающие процессы”.

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 реакциях 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 синбирского 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. Титов В.М., Прууэл Э.Р., Тен К.А. и др. // ФГВ. 2011. Т. 47. № 6. С. 3; Titov V.M., Pruuel E.R., Ten K.A. et al. // Combust. Explos. Shock Waves. 2011. V. 47. No. 6. P. 615.
4. Прууэл Э.Р., Тен К.А., Толочко Б.П. и др. // ДАН. Техн. физ. 2013. Т. 448. № 1. С. 38; Pruuel E.R., Ten K.A., Merzhievskii L.A. et al. // Dokl. Phys. 2013. V. 58. No. 6. P. 24.
5. Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 254; Ten K.A., Pruuel E.R., Kashkarov A.O. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. 2013. V. 77. No. 2. P. 230.
6. Аульченко В.М., Жуланов В.В., Кулипанов Г.Н. и др. // УФН. 2018. Т. 188. № 6. С. 577; Aul'chenko 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., Hodgins 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.