

## ИЗМЕРЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА MEDIPIX

*К. А. Иванов*<sup>1,\*</sup>, *И. Н. Цымбалов*<sup>1,2,\*\*</sup>, *А. М. Лапик*<sup>2</sup>,  
*А. Л. Полонский*<sup>2</sup>, *А. В. Русаков*<sup>2</sup>, *А. А. Туринге*<sup>2</sup>,  
*О. П. Иванов*<sup>3</sup>, *А. Б. Савельев-Трофимов*<sup>1</sup>, *В. Г. Недорезов*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>3</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Разработан метод измерения спектров тормозного рентгеновского излучения электронов, ускоренных в лазерной плазме, с использованием матриц Medipix. По сравнению с обычно применяемыми для таких измерений детекторами на основе сцинтиллятора и ФЭУ, использование матрицы позволяет накопить спектр за гораздо меньшее время. Благодаря этому возможен динамический контроль за характеристиками рентгеновского излучения и быстрая перестройка параметров лазерного источника для получения максимальных выхода и энергии рентгеновских квантов. Приведены результаты измерений рентгеновских спектров на тераваттном фемтосекундном лазерном комплексе МЛЦ МГУ для различных режимов взаимодействия лазерного излучения с плазмой.

A method for measuring the bremsstrahlung X-ray spectra of the electrons accelerated in laser plasma using Medipix matrices has been developed. In comparison with the scintillators and photomultiplier detectors commonly used for such measurements, the use of the matrix allows accumulating the spectrum in a much shorter time. This makes possible dynamic control of the X-ray radiation characteristics and rapid adjustment of the laser source parameters to obtain the maximum yield and energy of X-ray radiation. The results of measurements of X-ray spectra on the ILC MSU terawatt femtosecond laser complex for various laser–plasma interaction regimes are presented.

PACS: 29.30.Kv; 29.40.Gx; 29.40.Wk; 52.38.Kd; 52.38.Ph; 52.59.Px

---

\*E-mail: akvonavi@gmail.com

\*\*E-mail: ivankrupenin2@gmail.com

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия прогресс в развитии фемтосекундных лазерных систем привел к появлению новых методов лазерно-плазменного ускорения электронов [1,2], которые позволяют создавать компактные яркие источники тормозного рентгеновского излучения. На таких источниках проводятся эксперименты по фоторасщеплению ядер [3], генерации позитронов [4], получению изображений методом фазового контраста [5]. Для проведения расчетов выхода продуктов фотоядерных реакций или позитронов необходимо знать спектр рентгеновского излучения такого источника. Обычно для этого используются сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов NaI или CsI. Для корректного измерения спектра необходимо, чтобы такой детектор работал в одноквантовом режиме. Поскольку процессы ускорения в лазерной плазме происходят на временном масштабе  $\sim 1$  пс, генерируемый рентгеновский импульс также является очень коротким, а значит, за один лазерный импульс возможно получить информацию только об одном попавшем в сцинтиллятор кванте. Это значит, что для набора информативного спектра необходимо накопить сигналы от большого числа лазерных выстрелов (порядка 10 000). Использование матрицы Medipix сокращает время накопления до 100 лазерных выстрелов, что позволяет динамически оценивать спектр и менять параметры эксперимента для достижения максимального выхода и энергии рентгеновского излучения.

В данной работе измерялись тормозные спектры быстрых электронов, полученных при взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса с твердотельной мишенью. К основному фемтосекундному импульсу был добавлен опережающий его наносекундный, создаваемый еще одним лазером. Наносекундный импульс создавал на поверхности мишени преплазменный слой, с которым взаимодействовал основной импульс. Характер взаимодействия можно было изменять, варьируя задержку между импульсами и вещество мишени.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве источника основного лазерного импульса в наших экспериментах использовалась лазерная система Ti:Sa (длина волны — 800 нм, частота повторения импульсов — 10 Гц, максимальная энергия импульса — 50 мДж, минимальная длительность импульса — 50 фс, минимальный диаметр фокусировки — 2,5 мкм, максимальная интенсивность на мишени —  $5 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, уровень контраста на пикосекундной временной шкале —  $10^{-8}$ ). Излучение фокусировалось внеосевым параболическим зеркалом ( $F \sim 5$  см) на молибденовую или пластиковую мишень. Для создания на

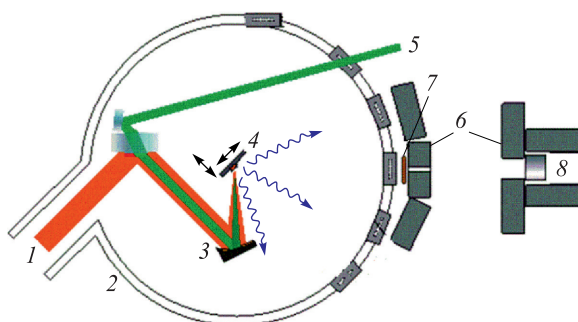


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — фемтосекундное лазерное излучение; 2 — вакуумная камера; 3 — внеосевое параболическое зеркало; 4 — мишень; 5 — излучение наносекундного импульса; 6 — свинцовый коллиматор; 7 — металлические фильтры; 8 — камера Medipix

поверхности мишени слоя преплазмы использовался лазер Nd:YAG (длина волны — 1064 нм, частота повторения импульсов — 10 Гц, максимальная энергия импульса — 200 мДж, длительность импульса — 10 нс и максимальная интенсивность на мишени —  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>). Меняя задержку между импульсами первого и второго лазеров в интервале от  $-50$  нс до  $+10$  нс, можно варьировать плотность преплазменного слоя в широком диапазоне значений. Размер фокального пятна составляет 70 мкм при фокусировке линзой с фокусным расстоянием 15 см.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Фемтосекундное лазерное излучение (1) заводилось в вакуумную камеру (2), откачиваемую форвакуумным насосом, с остаточным давлением газа порядка  $10^{-2}$  Торр. Излучение попадало на внеосевое параболическое зеркало ( $F/D = 3$ ) с золотым покрытием (3) и фокусировалось на мишень в виде гладкой пластины железа (4) под углом  $45^\circ$  к нормали к поверхности мишени. Излучение наносекундного лазера (5) фокусировалось на поверхность мишени по оптическому тракту фемтосекундного излучения через параболическое зеркало, диаметр пятна фокусировки составлял около 20 мкм при энергии 100 мДж. Ускоренные в поверхностном плазменном слое электроны попадали вглубь мишени, где и генерировалось тормозное излучение.

## ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ

Для измерения спектров жесткого рентгеновского излучения нами был использован абсолютно калиброванный по энергии матричный детектор ионизирующего излучения Medipix ModuPix. Матрица имеет физический размер

пикселя  $55 \times 55$  мкм и общее их количество  $256 \times 256$  шт. Полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы серии Medipix [6] представляют собой гибридные детекторы, в которых плоский полупроводниковый сенсор соединен со слоем считывающей электроники. Сенсор — это полупроводниковая пластина размером  $14 \times 14$  мм (используются кремний (Si), арсенид галлия (GaAs), теллурид кадмия (CdTe)), в которой падающее излучение или частицы создают электронно-дырочные пары носителей заряда. Заряд собирается с электродов каждого пикселя сенсора и переносится в слой считывающей электроники, изготовленной на основе технологии комплементарной структуры металл–оксид–полупроводник. Попадание одиночного кванта на детектор приводит к засветке одного или нескольких соседних пикселей (за счет рассеяния квантов высокой энергии), суммируя вклад которых можно определить энергию каждого кванта с точностью порядка 10%. Калибровка по энергии проводилась на источнике Cs с линией 662 кэВ (рис. 2, а). При светимости источника  $\sim 10^4$  квантов/с детектором было зафиксировано за интегральное время накопления 150 с и телесном угле регистрации 1 рад порядка 10 000 событий, что дает эффективность при энергии 661 кэВ порядка 5%, что в целом находится в хорошем согласии с теоретической калибровочной кривой, представленной на рис. 2, б [7].

Большое количество пикселей позволяет регистрировать в одном кадре сразу большое количество квантов (при условии не перекрывания двух соседних засвеченных областей на матрице) и измерять спектр плазмы за ограниченное количество выстрелов (порядка нескольких сотен). Для обеспечения необходимой загрузки детектора он был отодвинут на расстояние порядка 1 м от плазмы, а также во избежание попадания шумовых рассеянных квантов на пути от плазмы до детектора был сооружен рентгеновский коллиматор

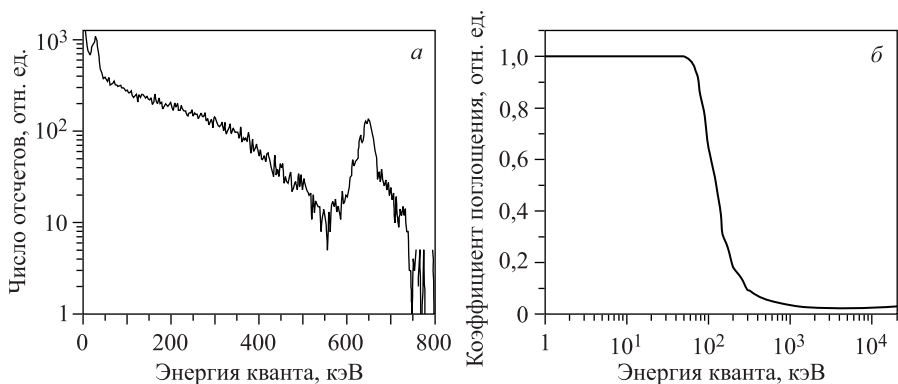


Рис. 2. а) Отклик детектора на источник Cs-137 с линией 662 кэВ. б) Коэффициент поглощения детектора на чипе CdTe толщиной 1 мм

из двух свинцовых блоков толщиной 5 см с отверстиями, соответствующими угловому размеру матрицы. Чтобы отсеять большой поток низкоэнергетичных квантов, в коллиматор вставлялся свинцовый лист толщиной 1 мм.

Из функции поглощения видно, что кванты с энергией более 200 кэВ регистрируются с очень невысокой вероятностью. С учетом экспоненциально спадающего спектра лазерной плазмы это приводит к тому, что регистрация кванта с энергией больше 200 кэВ ничтожно мала. В совокупности с фильтром, отсекающим кванты с энергией менее 100 кэВ, это дает уникальную возможность измерять спектр плазмы в диапазоне 50–200 кэВ, который чаще всего оказывается закрыт для детектирования другими методами: полупроводниковые детекторы с высоким разрешением (порядка 100 кэВ) рассчитаны на диапазон до 30–50 кэВ, в то время как громоздкие сцинтилляционные детекторы необходимо сильно закрывать от потока квантов менее 500 кэВ, чтобы вывести их в одноквантовый режим накопления спектра. Более того, если принимать во внимание то обстоятельство, что кванты с энергией до 200 кэВ преимущественно испытывают фотоэлектронное поглощение в веществе, то это, по большому счету, избавляет от необходимости проведения сложного Монте-Карло-моделирования для учета событий комптоновского рассеяния, рождения пары, когерентного томсоновского рассеяния. Необходимо лишь учесть функцию поглощения детектора. Тем не менее нами было проведено такое моделирование [8] для исправления спектральных искажений.

На рис. 3 изображены спектры жесткого рентгеновского излучения плазмы для разных случаев облучения мишени. В случае отсутствия предимпульса выход наименьший; включение наносекундного предимпульса на металлической

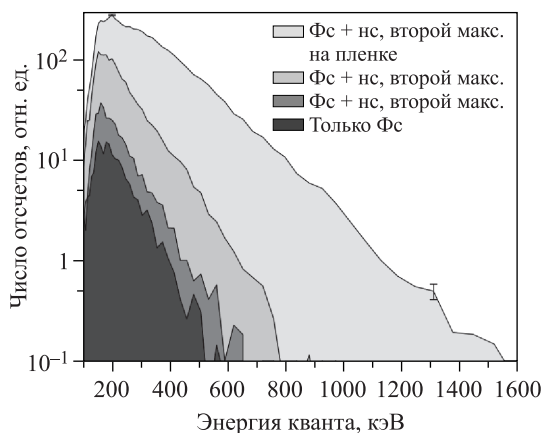


Рис. 3. Спектры жесткого рентгеновского излучения плазмы для различных режимов облучения

мишени позволяет значительно увеличить количество и энергию рентгеновских квантов; наибольший выход и энергия получены на пленочных мишенях. Подробный разбор различных режимов взаимодействия с твердотельной мишенью приведен в [9]. Характерный спад в начале спектров связан с наличием свинцового фильтра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена методика измерения спектров тормозного рентгеновского излучения ускоренных в лазерной плазме электронов. Основным преимуществом этого метода является высокая скорость накопления спектра (несколько сотен лазерных выстрелов) по сравнению с обычными методами ( $\sim 10\,000$  лазерных выстрелов). Недостатком используемого детектора является спад чувствительности при энергиях более 1 МэВ. С учетом невысокой временной стабильности лазерно-плазменных источников и необходимости поиска оптимальных параметров в ходе эксперимента использование таких матричных детекторов является крайне выгодным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-02-00213).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ledingham K. W. D., Spencer I., McCanny T., Singhal R. P., Santala M. I. K., Clark E., Watts I., Beg F. N., Zepf M., Krushelnick K., Tatarakis M., Dangor A. E., Norreys P. A., Allott R., Neely D., Clark R. J., Machacek A. C., Wark J. S., Cresswell A. J., Sanderson D. C. W., Magill J.* // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 899.
2. *Malka G., Miquel J. L.* // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 77. P. 75.
3. *Tsymbalov I. N., Volkov R. V., Eremin N. V., Ivanov K. A., Nedorezov V. G., Paskhalov A. A., Polonskij A. L., Savel'ev A. B., Sobolevskij N. M., Turinge A. A., Shulyapov S. A.* // *Phys. At. Nucl.* 2017. V. 80, No. 3. P. 397–401.
4. *Gorlova D. A., Nedorezov V. G., Ivanov K. A., Savel'ev A. B., Turinge A. A., Tsymbalov I. N.* // *Quant. Elect.* 2017. V. 47, No. 6. P. 522–527.
5. *Najmudin Z., Kneip S., Bloom M. S., Mangles S. P. D., Chekhlov O., Dangor A. E., Döpp A., Ertel K., Hawkes S. J., Holloway J., Hooker C. J., Jiang J., Lopes N. C., Nakamura H., Norreys P. A., Rajeev P. P., Russo C., Streeeter M. J. V., Symes D. R., Wing M.* // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2014. V. 372, No. 2010. P. 20130032.
6. <https://medipix.web.cern.ch/>
7. [www.nist.gov/](http://www.nist.gov/)
8. *Ivanov K. A., Shulyapov S. A., Turinge A. A., Brantov A. V., Uryupina D. S., Volkov R. V., Rusakov A. V., Djilkibaev R. M., Nedorezov V. G., Bychenkov V. Yu., Savel'ev A. B.* // *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 53, No. 2. P. 116–121.
9. *Ivanov K. A., Tsymbalov I. N., Shulyapov S. A., Krestovskikh D. A., Brantov A. V., Bychenkov V. Yu., Volkov R. V., Savel'ev A. B.* // *Plasma Phys.* 2017. V. 24, No. 6. P. 063109.