

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА**

УДК 533.9.082

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ  
СПЕКТРОМЕТРИИ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

©2023 г. И. А. Бусыгина<sup>а</sup>, И. Г. Григорьева<sup>б</sup>, П. В. Москвич<sup>а</sup>,  
П. Ю. Наумов<sup>б</sup>, Г. Х. Салахутдинов<sup>б,\*</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт приборов

Россия, 140080, Лыткарино, Московская обл. ул. Промзона Тураево, стр. 8

<sup>б</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

\*e-mail: saip07@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 15.03.2023 г.

Принята к публикации 30.07.2023 г.

Разработан и создан спектрометр импульсного высокоинтенсивного рентгеновского излучения на основе термолюминесцентных детекторов. Приведены характеристики различных термолюминесцентных детекторов. Описан усовершенствованный алгоритм измерения спектра импульсного рентгеновского излучения. Представлены экспериментальные результаты исследования спектра рентгеновского излучения плазменных объектов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования спектрального состава импульсного высокоинтенсивного рентгеновского излучения ведутся во многих областях науки и техники [1–9].

Рентгеновская диагностика ядерно-физических объектов является одним из основных методов получения информации о параметрах и протекающих в них физических процессах [1–8].

Рентгеновское излучение импульсных ядерно-физических установок, в том числе и Z-пинчевых установок, характеризуется высокой интенсивностью (более  $10^{16}$  квантов за

вспышку) и малой длительностью ( $\sim 10^{-8}$  с), имеет довольно сложный спектр с максимумом в области одного килоэлектронвольта. Мощные электромагнитные помехи, возникшие в момент образования плазмы, могут исказить рабочий сигнал на стадии его формирования и передачи, это требует разработки специальных мер защиты.

При таких условиях эксперимента классическая спектрометрия отдельных квантов рентгеновского излучения практически невозможна и для получения информации о спектре излучения применяются различные ядерно-физические методы. Одним из таких методов является метод фильтров ослабления (метод «серых» фильтров) [1]. Данный метод основан на спектральной селекции первичного рентгеновского излучения. Селектирующим спектр элементом в данном методе является набор фильтров различной толщины.

В данном методе измеряется кривая ослабления, представляющая собой зависимость энергии  $J(x)$  рентгеновского излучения, прошедшего сквозь фильтр и полностью поглощенной в детекторе, от толщины данного фильтра  $x$ .

Для измерения кривой ослабления  $J(x)$  применяются различные многоканальные спектрометрические системы с предварительным разделением квантов по энергиям с помощью рентгеновских фильтров поглощения. Каналы спектрометра построены по схеме: диафрагма + фильтр поглощения + детектор. По результатам измеренной в эксперименте кривой ослабления проводится восстановление спектров рентгеновского излучения несколькими математическими методами [2].

В спектрометрах для исследования импульсного рентгеновского излучения используются различные детекторы. Одними из наиболее привлекательных детекторов для использования являются термолюминесцентные детекторы (ТЛД) [1]. Принцип действия термолюминесцентных детекторов заключается в том, что образуемые в них под действием ионизирующего излучения носители заряда локализуются в центрах захвата и удерживаются в них длительное время, благодаря чему происходит накопление поглощенной энергии, которая может быть освобождена при нагреве. При нагреве облученного образца ТЛД при температуре 240–300 °С (в зависимости от материала) происходит испускание квантов света (термолюминесценция), количество которых пропорционально поглощенной дозе ионизирующего излучения.

Важно отметить, что ТЛД не подвержены воздействию электромагнитных наводок и обладают линейностью отклика в широком диапазоне поглощенных доз ( $10^5$ ).

В настоящее время выпускаются термолюминесцентные детекторы различного состава ( $\text{GeZrO}_4$  ( $Z=30$ ); фториды лития  $\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$  ( $Z=8.2$ ), кальция  $\text{CaF}_2(\text{Mn})$  ( $Z=16.3$ ), активированные различными элементами, алюмофосфатные стекла) и размеров ( $\varnothing 5 \times 0.9 \text{ мм}^2$ ,  $\varnothing 8 \times 0.9 \text{ мм}^2$ ,  $3.2 \times 3.2 \times 0.89 \text{ мм}^3$ ) [3]. Это позволяет расширить возможность

использования данных детекторов для рентгеновской диагностики плазмы (исследования пространственной структуры плазмы, измерения спектральных и энергетических характеристик рентгеновского излучения плазмы) [4].

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе термолюминесцентных детекторов созданы и успешно работают спектрометрические системы, позволяющие измерять спектр рентгеновского излучения в широком диапазоне энергий от 1.0 КэВ до 1.0 МэВ на различных установках [4, 5].

Созданный малогабаритный помехоустойчивый одноканальный спектрометр имеет габаритные размеры  $\varnothing 5 \times 18$  мм<sup>2</sup> [4, 5]. Конструктивно термолюминесцентные детекторы LiF(Mg,Ti) изготавливаются в виде дисков диаметром 5 мм и толщиной 0.9 мм (толщину детектора можно уменьшить). Следует отметить, что при использовании промышленно изготовленных термолюминесцентных детекторов для диагностики рентгеновского излучения необходимо предварительно отобрать детекторы с одинаковыми параметрами.

Малогабаритный помехоустойчивый одноканальный спектрометр изготовлен на основе сборки из термолюминесцентных детекторов, расположенных друг за другом (рис.1). В данном случае термолюминесцентные детекторы служат фильтрами, осуществляющими селекцию рентгеновского излучения по спектру и детекторами для измерения кривой ослабления.

Рис. 1

Алгоритм, разработанный авторами статьи, используемый для построения кривой ослабления рис.2, детально описан в работах [4, 5]. Кривая ослабления строилась по показаниям термолюминесцентных детекторов с учетом их толщины. Первая точка на кривой ослабления соответствует суммарному сигналу со всех термолюминесцентных детекторов при толщине поглощения, равной нулю. Вторая точка на кривой ослабления соответствует суммарному сигналу со всех термолюминесцентных детекторов за вычетом сигнала с первого детектора, толщина которого в данном случае является толщиной ослабления. Третья точка на кривой ослабления соответствует суммарному сигналу со всех термолюминесцентных детекторов за вычетом сигналов первых двух детекторов и т.д. Таким образом была построена кривая ослабления.

Рис. 2

Восстановление спектров рентгеновского излучения проводилось методом эффективных энергий [2, 3].

Авторами статьи предлагается в дополнение к методу измерения спектра импульсного рентгеновского излучения с помощью кривой ослабления использовать новый метод измерения. Метод так же основан на использовании спектрометра, изготовленного

на основе сборки из  $m$  детекторов ТЛД расположенных друг за другом Предлагаемый метод определения спектра импульсного рентгеновского излучения основан на решении системы уравнений, составленных с учетом поглощенной энергии  $A_i$  рентгеновского излучения в детекторе  $i$ .

Пусть импульс рентгеновского излучения состоит из  $N_1$  квантов с энергий  $E_1$  (монохроматическое излучение). Тогда учитывая, что спектрометр собран из отдельных термолюминесцентных детекторов, можно получить экспериментальные данные по поглощенной энергии рентгеновского излучения в каждом детекторе  $A_i$ . Таким образом мы можем составить линейное уравнение, решение которого позволит определить значение  $E_1N_1$ :

$$A_1 = E_1N_1(1 - \exp(-\mu(E_1)d_1)), \quad (1)$$

$$A_2 = E_1N_1 \exp(-\mu(E_1)d_1)(1 - \exp(-\mu(E_1)d_2)), \quad (2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – энергии излучения, поглощенного в детекторе 1 и в детекторе 2 соответственно. Здесь  $E_1N_1 \exp(-\mu(E_1)d_1)$  – значение энергии излучения, прошедшего детектор 1. Если в сборке  $m$  детекторов, то количество детекторов, через которые проходит рентгеновское излучение  $m-1$ . Таким образом, энергия, поглощенная в детекторе  $i$ , при регистрации импульса рентгеновского излучения, состоящего из  $N_1$  квантов с энергий  $E_1$  (монохроматическое излучение), равна:

$$A_i = E_1N_1 \exp(-\mu(E_1) \sum_{i=1}^{m-1} d_i) (1 - \exp(-\mu(E_1)d_i)). \quad (3)$$

Спектрометр собран из отдельных термолюминесцентных детекторов, и это позволяет получить экспериментальные данные по поглощенной энергии рентгеновского излучения в каждом детекторе  $A_i$ . Таким образом мы можем составить линейное уравнение, решение которого позволит получить гистограмму спектра рентгеновского излучения для числа рентгеновских квантов  $N_1 \dots N_n$  с энергиями  $E_1 \dots E_n$ :

$$A_i = \sum_{n=1}^n E_n N_n \exp(-\mu(E_n) \sum_{i=1}^{m-1} d_i) (1 - \exp(-\mu(E_n)d_i)). \quad (4)$$

Система уравнений состоит из  $m$  уравнений (в сборке  $m$  детекторов), что позволяет восстановить спектр (построить гистограмму) рентгеновского излучения  $E_1 \dots E_n$ .

Применение данного метода на основе решения системы уравнений позволяет получить гистограмму спектра по результатам измерений поглощенной энергии рентгеновского излучения в каждом термолюминесцентном детекторе спектрометра без привлечения математических методов моделирования физических процессов.

Показания с термолюминесцентных детекторов считывались с помощью прибора ДВГ-02ТМ [4] (с помощью данного прибора нагревался детектор и регистрировался термолюминесцентный сигнал).

Калибровка спектрометра проводилась на специальном стенде, в состав которого входили импульсная рентгеновская трубка с набором флуоресцентных эмиттеров и комплект радиоизотопных источников  $\gamma$ -излучения [4, 5, 8].

Для проверки работоспособности спектрометра были измерены дозы поглощенной энергии рентгеновского излучения в каждом детекторе сборки спектрометра (состоящей из 20 детекторов LiF(Mg,Ti)) излучения импульсной рентгеновской трубки. Далее, составлялась система уравнений, решение которой позволяло построить гистограмму спектра рентгеновского излучения за один импульс рентгеновской трубки. Полученная гистограмма спектра сравнивалась со спектром излучения импульсной рентгеновской трубки, измеренной методом амплитудного анализа. Поток рентгеновского излучения проходил через отверстие в свинцовой пластине такого размера, чтобы исключить возможность попадания в полупроводниковый детектор более одного кванта от каждого импульса трубки [7, 8].

Рис. 3

Как следует из рис.3, восстановленный рентгеновский спектр (гистограмма спектра) и спектр импульсной рентгеновской трубки, измеренный методом амплитудного анализа, совпадают с точностью не хуже 5%. Метод составления и решения системы уравнений существенно дополняет метод измерения кривых ослабления.

Таким образом, можно утверждать, что разработанный метод с точностью не хуже 5% может быть применен для измерения импульсного рентгеновского излучения (с учетом того, что термолюминесцентные детекторы обладают линейностью отклика в широком диапазоне поглощенных доз ( $10^5$ )).

Измерение спектров рентгеновского излучения плазмы сильноточных импульсных электрических разрядов на различных установках [7, 8] проводились с использованием как созданного нами спектрометра на основе термолюминесцентных детекторов LiF(Mg,Ti), так и 7-канального спектрометра на основе полупроводниковых детекторов.

Спектрометр, созданный на основе термолюминесцентных детекторов LiF(Mg,Ti), позволяет проводить измерения как одного, так и серии разрядов с дальнейшим усреднением полученной энергии излучения.

Рис. 4

На рис. 4 приведены спектры рентгеновского излучения, измеренные с помощью спектрометра на основе термолюминесцентных детекторов (восстановленные методом составления систем уравнений) (кривая 1) и 7-канального спектрометра на основе полупроводниковых детекторов ( $p-i-n$ -технология, кремниевый чувствительный слой 400

мкм) (восстановленные методом эффективных энергий). Каналы полупроводникового спектрометра были построены по классической схеме: фильтр (бериллиевая фольга) + полупроводниковый детектор [2, 3].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения продемонстрировали хорошую работоспособность и надежность малогабаритного спектрометра, созданного на основе сборки термолюминесцентных детекторов с применением метода восстановления спектров импульсного рентгеновского излучения методом составления систем уравнений.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программы “Приоритет 2030” НИЯУ МИФИ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н.* // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
2. *Carlson G.A. Lorence L.J.* // IEEE Nransactions on Nuclear Science. 1988. V. 35. № 6. P. 1255.
3. *Большаков Е.П., Велихов Е.П., Глухих В.А.*// Атомная энергия. 1982. Т. 53. Вып. 1. С. 14.
4. *Григорьева И.Г., Макаров А.А., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х.* // ПТЭ. 2022. № 4. С. 90. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040115>
5. *Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х.* //ПТЭ. 2015. № 1. С. 100. <https://doi.org/10.7868/S0032816215010279>
6. *Grigoryeva I.G., Kostyushin V.A., Salakhutdinov G.Kh.* // Plasma Physics Reports. 2019. V. 45. №. 11. P. 1066. <https://doi.org/10.1134/S1063780X19110059>
7. *Бащутин О.А., Григорьева И.Г., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х.* // ПТЭ. 2020. № 3. С. 73. <https://doi.org/10.31857/S0032816220030088>
8. *Wang Y., Yonghua Du Y., Hu T.* // Inverse problems in Science and Engineering. 2009. V. 17. №. 2. P. 175. <https://doi.org/10.1080/17415970802082781>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ.

**Рис.1.** а) Термолюминесцентные детекторы LiF(Mg,Ti). б) Спектрометр рентгеновского излучения на основе сборки термолюминесцентных детекторов LiF(Mg,Ti).

**Рис. 2.** а) Алгоритм измерения кривой ослабления:  $J_i$  – поглощенная энергия,  $d_i$  – толщина фильтра,  $A_i$  – сигнал с детектора. б) Кривая ослабления, построенная на основе этого алгоритма.

**Рис. 3.** Спектры излучения рентгеновской трубки: сплошная линия – спектр, измеренный методом амплитудного анализа; гистограмма – восстановленный спектр с учетом составления и решения системы уравнений, измеренный с помощью описанного малогабаритного спектрометра на основе сборки термолюминесцентных детекторов.

**Рис. 4.** Спектры рентгеновского излучения, измеренные с помощью спектрометра на основе термолюминесцентных детекторов (1) и спектрометром с полупроводниковыми детекторами (2).



**Рис.1.**

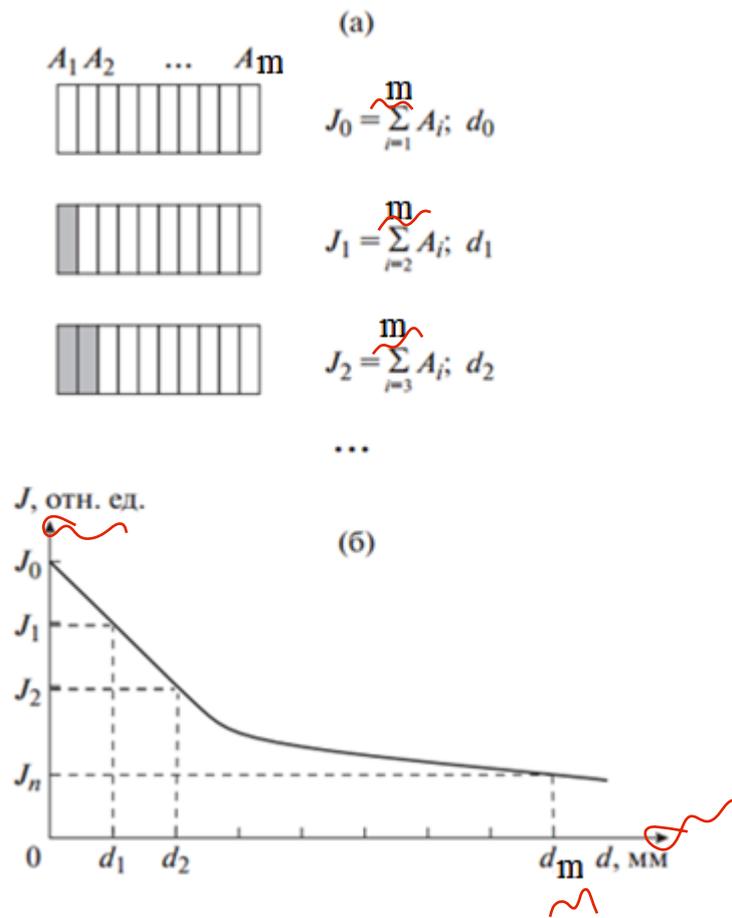


Рис. 2.

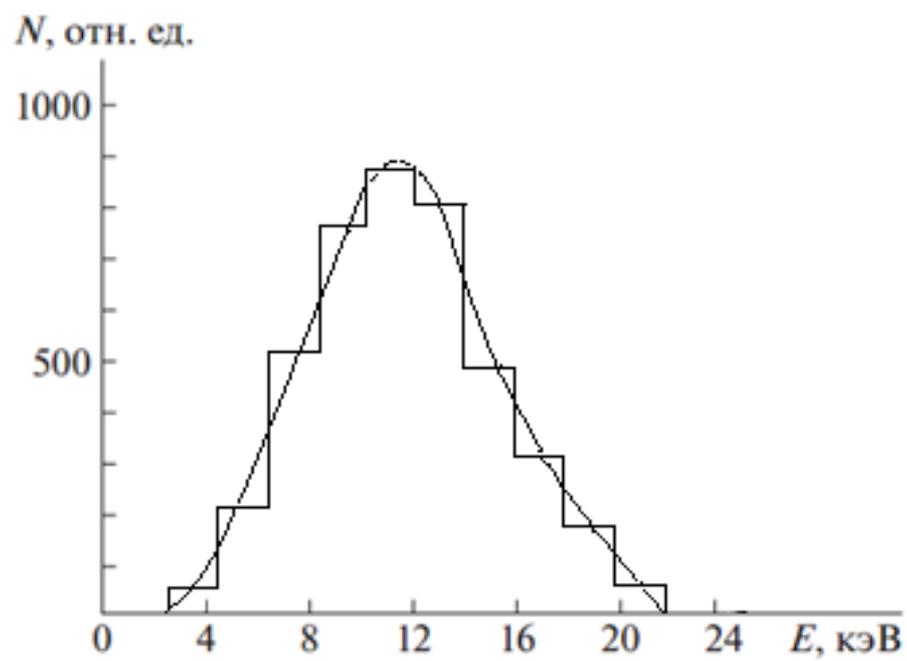


Рис.3.

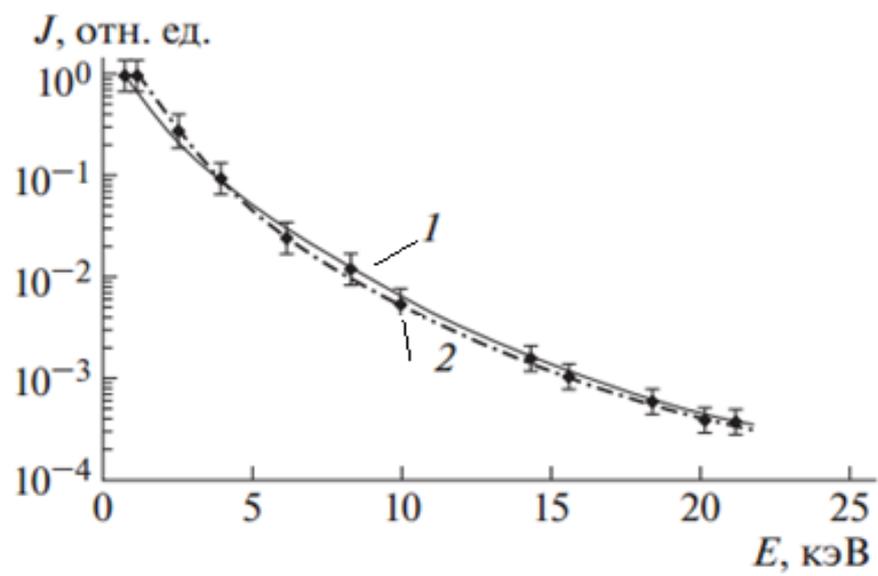


Рис. 4

**Для связи с авторами:**

Салахутдинов Гаяр Харисович

Тел.: 8(915)087-14-93 (моб.)

E-mail: saip07@mail.ru

**ДЛЯ ПЕРЕВОДЧИКА:**

**APPLICATION OF THERMOLUMINESCENT DETECTORS FOR  
PULSED X-RAY SPECTROMETRY**

**©2023 I.A. Busygina<sup>1</sup>, I. G. Grigoryeva<sup>2</sup>, P. V. Moskvich<sup>1</sup>, P.Yu. Naumov<sup>1</sup>,  
G. Kh. Salakhutdinov<sup>2,#</sup>**

<sup>1</sup>JSC "Scientific Research Institute of Devices",  
Russia, 140080, Moscow region, Lytkarino

<sup>2</sup>National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute)  
31 Kashirskoe sh., Moscow, 115409 Russia

<sup>#</sup>e-mail: saip07@mail.ru

**Abstract**—A high-intensity pulsed X-ray spectrometer based on thermoluminescent detectors has been developed and created. The characteristics of various thermoluminescent detectors are given. An improved algorithm for measuring the spectrum of pulsed X-ray radiation is described. Experimental results of the study of the X-ray spectrum of plasma objects are presented.

PACS:52.38 Ph

**Keywords:** X-ray, plasma, absorbing filters method, X-ray spectrometer, mathematical model

## REFERENCES

1. *Vikhrev V.V., Ivanov V.V., Koshelev K.N.* // Sov. J. Plasma Phys., 1982, vol. 8, no. 6, P. 688.
2. *Carlson G.A., Lorence L.J.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1988. Vol. 35. N.6. P. 1255.
3. *Bolshakov E.P., Velikhov E.P., Glukhykh V.A.* // Atomic energy. 1982. V. 53. Issue 1. P.14.
4. *Grigoryeva I.G., Makarov A.A., Korf A.N., Salakhutdinov G.Kh.* // Instruments and Experimental Techniques, 2022, V. 65, No. 4, P. 621.
5. *Balovnev A.V., Grigoryeva I.G., Salakhutdinov G.K.* // Instruments and Experimental Techniques, 2015, Vol. 58, No. 1, P. 98. DOI: 10.1134/S002044121501025X
6. *Grigoryeva I.G., Kostyushin V. A., Salakhutdinov G. Kh.* // Plasma Physics Reports, 2019, V. 45. № 11. P.1066. <https://doi.org/10.1134/S1063780X19110059>
7. *Bashutin O. A., Grigoryeva I. G. Korf A. N., and Salakhutdinov G. Kh.* // Instruments and Experimental Techniques, 2020, Vol. 63, No. 3, P. 355. <https://doi.org/10.1134/S0020441220030082>
8. *Wang Y., Yonghua Du Y., Hu T.* // Inverse problems in Science and Engineering. 2009. V. 17. No. 2. P. 175. <https://doi.org/10.1080/17415970802082781>