

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 533.9.08

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ  
РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025 г. А. О. Хурчиев<sup>a\*</sup>, А. В. Скобляков<sup>a</sup>, В. А. Волков<sup>a</sup>,  
М. А. Лапшин<sup>a</sup>, С. А. Высоцкий<sup>a</sup>, А. В. Канцырев<sup>a</sup>, А. А. Голубев<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

\*e-mail: ayuxa@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.03.2025 г.

После доработки 22.04.2025 г.

Принята к публикации 28.04.2025 г.

Детекторные пленки Imaging Plates (IP) широко используются в лазерно-плазменных и радиографических экспериментах для детектирования электронов, ионов и рентгеновского излучения. Применение IP в диагностике плазмы позволяют получить количественную информацию о параметрах плазмы. В настоящей работе представлены результаты калибровки детекторных пленок FujiFilm Imaging Plates BAS-MS и BAS-TR для рентгеновского излучения в диапазоне до 10 МэВ. Калибровка проводилась с помощью радиоактивного позитронного источника Ge-68 и лазерного медицинского сканера Durr Dental VistaScan Mini View.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Широко используемые в экспериментах в области экспериментальной ядерной физики, физики высоких энергий, физики плазмы и др. детекторные пленки Imaging Plates (IP), обладая рядом преимуществ перед такими детекторами, как радиохромные пленки, сцинтилляторы и ПЗС-камеры, обеспечивают стабильную работу в условиях сильных электромагнитных наводок, имеют высокий динамический диапазон ( $10^5$ – $10^6$ ) и хорошее пространственное разрешение (вплоть до десятков микрометров). Кроме того, детекторные пленки IP можно использовать многократно, применяя для промежуточной очистки источник белого света. В качестве чувствительного слоя в IP используется фотостимулированный люминофор  $BaF(Br,I):Eu^{2+}$ . При взаимодействии исследуемого ионизирующего излучения с чувствительным слоем IP создаются пары электрон–дырка. Этот процесс приводит к образованию метастабильных F-центров, преобразуя  $Eu^{2+}$  в  $Eu^{3+}$ . После облучения для съема информации с IP с помощью специализированных оптических сканеров проводится облучение детекторной пленки фотонами с энергией примерно 2 эВ

( $\lambda = 635$  нм). При этом ионы  $\text{Eu}^{3+}$  распадаются до состояния  $\text{Eu}^{2+}$ , испуская фотоны с длиной волны около 390 нм. Данный процесс носит название фотостимулированная люминесценция (Photostimulated Luminescence, PSL) [1, 2]. Кроме чувствительного слоя детекторные пленки включают в себя также дополнительные слои: опорный, магнитный и в зависимости от типа пленки могут быть снабжены защитным полимерным слоем (табл. 1).

**Таблица 1.** Состав слоев детекторных пленок FujiFilm Imaging Plates BAS-MS и BAS-TR

Слой	Тип пленки	
	BAS-MS	BAS-TR
<b>Защитный</b>		
Состав	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}$	Без слоя
Плотность, г/см <sup>3</sup> (Толщина, мкм)	1.66 (9)	–
<b>Чувствительный</b>		
Состав	$\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15}:\text{Eu}^{2+}$	$\text{BaFBr}_{0.85}\text{I}_{0.15}:\text{Eu}^{2+}$
Плотность, г/см <sup>3</sup> (Толщина, мкм)	3.31 (115)	2.85 (50)
<b>Опорный</b>		
Состав	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}$	
Плотность, г/см <sup>3</sup> (Толщина, мкм)	1.66 (190)	1.66 (250)
<b>Магнитный</b>		
Состав	$\text{ZnMn}_2\text{Fe}_5\text{NO}_{40}\text{H}_{15}\text{C}_{10}$	
Плотность, г/см <sup>3</sup> (Толщина, мкм)	2.77 (160)	

Для считывания данных с пленок, в основном, используются промышленные лазерные сканеры [3–11]. В работах [12, 13] было показано, что для получения данных с IP могут быть использованы и лазерные медицинские сканеры, обладающие меньшими габаритами и стоимостью. В данной работе представлены результаты калибровки детекторных пленок Imaging Plates для рентгеновского излучения с использованием лазерного медицинского сканера Durr Dental VistaScan Mini View [14].

## 2. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES

Ранее в работе [15] была проведена абсолютная калибровка чувствительности детекторных пленок FujiFilm Imaging Plates BAS-MS и BAS-TR при регистрации заряженных частиц, измерена зависимость уменьшения фотостимулированной люминесценции пленки в зависимости от времени, прошедшего с момента облучения до момента сканирования (fading effect).

При использовании профессиональных промышленных сканеров для анализа данных с детекторных пленок Imaging Plates получаемые в результате измерения значения представляются в виде единиц PSL. Регистрируемый сигнал в единицах GL (gray level) с медицинского лазерного сканера линейно зависит [12] от традиционно используемого в данной области исследований значений PSL. При этом, как упоминалось ранее, PSL зависит от поглощенной энергии частицы в чувствительном слое. В работе [8] была предложена экспоненциальная модель зависимости чувствительности детекторных пленок от поглощенной энергии  $dE_{\text{dep}}$ :

$$\text{PSL}(E) = \alpha \int_0^W \frac{dE_{\text{dep}}}{dz}(E, z) e^{-z/L} dz = \alpha dE_{\text{dep}}^{\text{eff}}, \quad (1)$$

где  $dE_{\text{dep}}/dz$  – количество энергии, выделяемой падающими и всеми вторичными частицами в люминофорном слое между  $z$  и  $z+dz$ ;  $W$  – толщина слоя люминофора;  $L$  – длина поглощения фотонов фотостимулированного излучения, образованных в процессе сканирования пленки.

При этом коэффициент  $\alpha$  является константой для широкого диапазона энергий и зависит только от типа частицы или излучения. Таким образом, измерив отклик детекторной пленки для одной энергии, можно получить кривую чувствительности для широкого диапазона энергий.

В данной работе для калибровки детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR использовался изотоп германия-68 ( $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ ) типа ПГЛ.1, погрешность активности источника составляет 10%. Германий-68 с вероятностью 100% претерпевает электронный захват, образуя дочерний изотоп галий-68. Он, в свою очередь, претерпевает позитронный распад (вероятность 87%). При аннигиляции позитрона с электроном образуются два гамма-кванта с энергией 511 кэВ.

Радиоактивный источник ПГЛ.1 представляет собой герметичную протяженную капсулу, изготовленную из титана, диаметром 3 мм и длиной 95 мм. На одном из концов капсулы находится изотоп сферической формы диаметром 0.8 мм. С обеих сторон в трубку вставлены заглушки, толщина которых позволяет аннигилироваться всем позитронам, проходящим через них. Таким образом, при калибровке детекторных пленок источник устанавливался перпендикулярно пленке, что обеспечивало регистрацию только гамма-квантов. Время экспозиции варьировалось от 5 до 10 минут, а время, прошедшее от облучения до момента сканирования, – от 1 до 30 минут. Кроме этого, две различные серии измерений проводились с интервалом во времени в 155 дней. Вместе с временем

полураспада изотопа германия-68 ( $T_{1/2} = 271$  день) это привело к двум различным активностям источника в двух сериях измерений: 0.98 МБк и 0.66 МБк. На рис. 1 представлены изображения, полученные от детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR после облучения.

На изображениях (рис. 1), полученных после сканирования, наблюдается равномерно засвеченная центральная область диаметром 3 мм, что соответствует диаметру радиоактивного источника. При обработке данных рассматривалась центральная область на изображении в виде квадрата размером  $0.8 \times 0.8$  мм<sup>2</sup>. Для определения количества частиц, попадающих на детекторную пленку, выполнено моделирование методом Монте-Карло в среде Geant4 [16]. В процессе моделирования использован стандартный физический пакет QGSP\_BIC [17], в который включены электромагнитные и ядерные взаимодействия. Также был подключен низкоэнергетический физический пакет G4EmLivermorePhysics [18] и процессы ядерного распада G4RadioactiveDecayPhysics [19]. Кроме этого, было выполнено моделирование поглощенной энергии  $dE_{\text{dep}}$  фотонов в чувствительном слое детекторных пленок. Таким образом, рассчитав потери энергии в чувствительном слое пленки и вычислив интеграл из формулы (1), а затем разделив значение, полученное при облучении пленки радиоактивным изотопом, на значение интеграла, был вычислен коэффициент  $\alpha$ . Результаты калибровки пленок IP BAS-MS и BAS-TR в диапазоне до 10 МэВ приведены на рис. 2.

В процессе облучения пленок IP в качестве дополнительного детектора использовалась ионизационная камера (ИК) PTW Roos Chamber Type 34001 [20]. Чувствительный объем ИК представляет из себя плоскопараллельную заполненную воздухом ионизационную камеру объемом 0.35 см<sup>3</sup>. Зарегистрированный сигнал с ионизационной камеры составил  $(3.12 \pm 0.05)$  пКл при фоновом уровне  $(1.01 \pm 0.12)$  пКл, что с учетом калибровочного коэффициента ИК дает значение поглощенной дозы 177 мкГр (480 МэВ поглощенной энергии). С помощью моделирования Монте-Карло в среде Geant4 было рассчитано значение потерь энергии в ионизационной камере в расчете на распад одного ядра изотопа германия-68, которое составляет 1.2 эВ. Учитывая, что время экспозиции ИК составляет 300 с, была рассчитана активность источника и получены калибровочные коэффициенты  $\alpha$  для детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR. Сравнение полученных коэффициентов  $\alpha$  для измерений, проведенных с двумя различными активностями радиоактивного источника, и результатов измерения с помощью ионизационной камеры, представлено в табл. 2. Видно, что в пределах погрешности измерений полученные данные совпадают.

**Таблица 2.** Коэффициенты  $\alpha$  для детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR, полученные через пересчет активности источника и с помощью ионизационной камеры PTW Roos Chamber Type 34001

Активность источника	$\alpha$ , GL/кэВ	$\alpha$ , GL/кэВ
	BAS-MS	BAS-TR
0.98 МБк	$8.3 \pm 0.9$	$5.4 \pm 0.7$
0.66 МБк	$8.2 \pm 0.9$	$5.6 \pm 0.6$
PTW	$9.9 \pm 1.0$	$6.0 \pm 0.7$

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе была проведена калибровка детекторных пленок FujiFilm Imaging Plates BAS-MS и BAS-TR для рентгеновского излучения при использовании лазерного медицинского сканера Durr Dental VistaScan Mini View. Калибровка проводилась с помощью радиоактивного источника с изотопом германия-68 при излучении гамма-квантов с энергией 511 кэВ и ионизационной камеры PTW Roos Chamber Type 34001. Получена калибровочная кривая абсолютной чувствительности детекторных пленок для рентгеновского излучения в диапазоне до 10 МэВ. Калибровочный коэффициент  $\alpha$  для детекторной пленки BAS-MS равен  $8.3 \pm 0.9$  GL/кэВ, а для детекторной пленки BAS-TR составляет  $5.5 \pm 0.7$  GL/кэВ. Полученные данные могут быть использованы при проведении количественных спектральных измерений рентгеновского излучения в экспериментах по диагностике плазмы и других экспериментах в области физики высокой плотности энергии в веществе.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

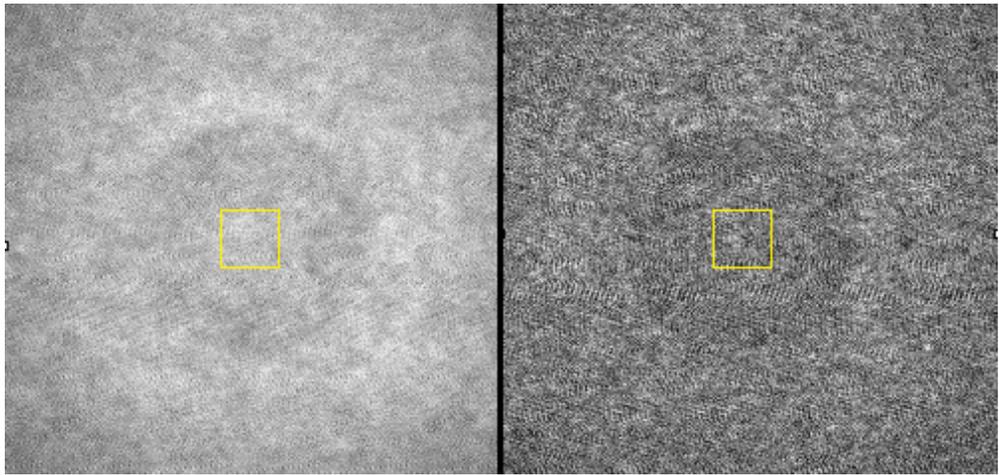
1. Miyahara J., Takahashi K., Amemiya Y., Kamiya N., Satow Y. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1986. V. 246. P. 572. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(86\)90156-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90156-7)
2. Von Seggern H. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1992. V. 322. № 3. P. 467. [https://doi.org/0.1016/0168-9002\(92\)91216-V](https://doi.org/0.1016/0168-9002(92)91216-V)
3. Shaikh A. M. // e-J. Nondestructive Testing. 2017. V. 22(6).
4. Nave G., Sansonetti C. J., Szabo C. I., Curry J. J., Smillie D. G. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 013107. <https://doi.org/10.1063/1.3529879>
5. Meadowcroft A. L., Bentley C. D., Stott E. N. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. <https://doi.org/10.1063/1.3013123>
6. Izumi N., Lee J., Romano E., Stone G., Maddox B., Ma D., Rekow V., Bradley D. K., Bell P. // Proc. SPIE 8850, Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion II. 2013. V. 885006. <https://doi.org/10.1117/12.2024513>
7. Maddox B. R., Park H. S., Remington B. A., Izumi N., Chen S., Chen C., Kimminau G., Ali Z., Haugh M. J., Ma Q. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. <https://doi.org/10.1063/1.3531979>
8. Bonnet T., Comet M., Denis-Petit D., Gobet F., Hannachi F., Tarisien M., Versteegen M., Aléonard M. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 103510. <https://doi.org/10.1063/1.4826084>
9. Holder J. P., Izumi N., Beach M., Ayers M. J., Bell P., Schneider M., Bradley D. K., Kohut T., Ehrlich R., Cohen M., Ramirez R., Thorn D. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. <https://doi.org/10.1063/1.5039363>
10. Golovin D.O., Mirfayzi S.R., Shokita S., Abe Y., Lan Z., Arikawa Y., Morace A., Pikuz T.A., Yogo A. // JINST. 2021. V. 16. P. T02005. doi 10.1088/1748-0221/16/02/T02005
11. Ehrlich Y., Levy I., Fraenkel M. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. <https://doi.org/10.1063/5.0098781>
12. Ingenito F., Andreoli P., Batani D., Boutoux G., Cipriani M., Consoli F., Cristofari G., Curcio A., De Angelis R., Di Giorgio G., Ducret J., Forestier-Colleoni P., Hulin S., Jakubowska K., Rabhi N. // JINST. 2016. V. 11(5). P. C05012. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/05/C05012>
13. Curcio A., Andreoli P., Cipriani M., Claps G., Consoli F., Cristofari G., De Angelis R., Giulietti D., Ingenito F., Pacella D. // JINST. 2016. V. 11. P. C05011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/05/C05011>
14. <https://www.duerrdental.com/en/products/imaging/intraoral-diagnostics/vistascan-mini-view/>

15. Хурчиев А. О., Панюшкин В. А., Скобляков А. В., Канцырев А. В., Голубев А. А., Гаврилин Р. О., Богданов А.В., Ладыгина Е.М., Высоцкий С.А. // ПТЭ. 2023. № 6. С. 46.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816223050294>
16. <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>
17. Geant4 Simulation Toolkit: Physics List Guide.  
<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/fo/PhysicsListGuide.pdf>.
18. Apostolakis J., Giani S., Maire M., Nieminen P., Pia M. G., Urbàn L. Geant4 low energy electromagnetic models for electrons and photons. Technical Report, CERN, CERN/INFN, 1999.
19. Tuli J.K. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1996. V. 369. № 2–3. P. 506.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)80040-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)80040-4)
20. [https://www.ptwdosimetry.com/fileadmin/user\\_upload/Online\\_Catalog/Detectors\\_for\\_Ionizing\\_Radiation/index.html](https://www.ptwdosimetry.com/fileadmin/user_upload/Online_Catalog/Detectors_for_Ionizing_Radiation/index.html)

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Изображения с детекторных пленок IP, полученные при облучении источником  $^{68}\text{Ge}$  (активность 0.98 МБк) в течение 5 минут. Сканирование проведено через 5 минут после облучения. Слева – IP BAS-MS, справа – IP BAS-TR. Квадратом отмечена область интегрирования сигнала.

**Рис. 2.** Калибровочная кривая абсолютной чувствительности детекторных пленок BAS-MS и BAS-TR для рентгеновского излучения.



**Рис. 1**

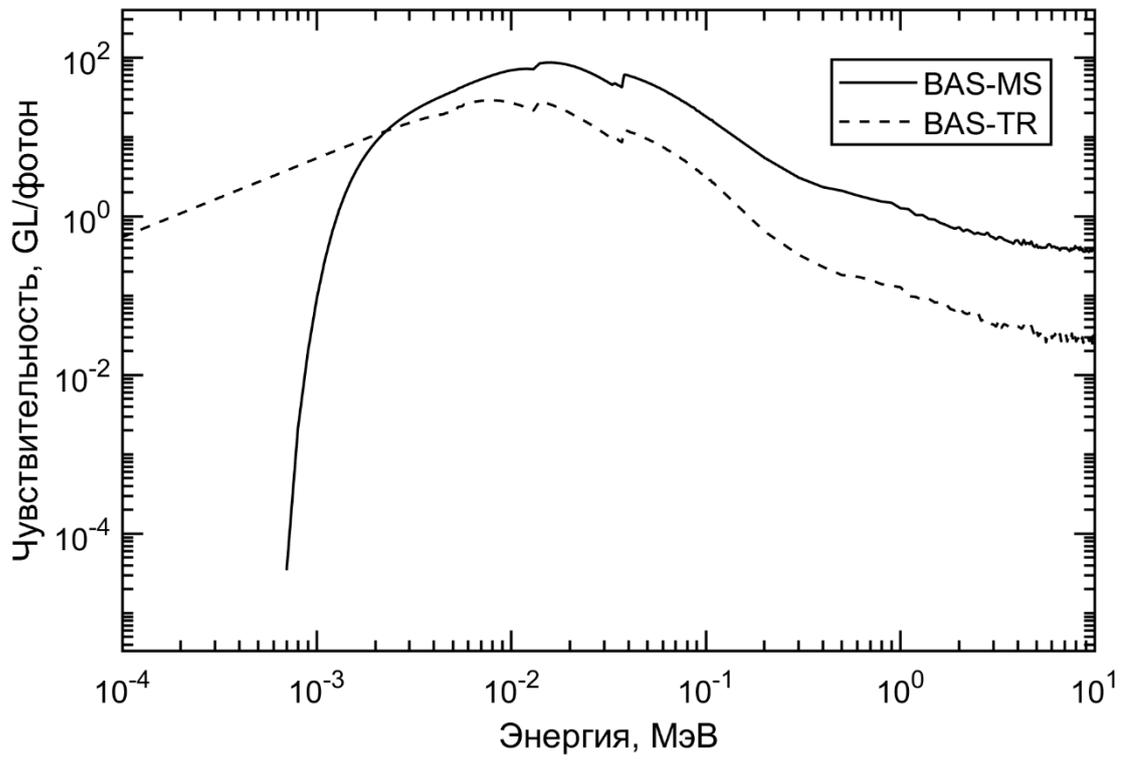


Рис. 2