ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 1, с. 115–118

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.082.5

О ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПЛАСТИН ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ

© 2025 г. А. В. Емельянов[a],*, Д. А. Вихляев[a], С. Д. Девятков[a], Д. С. Носуленко[a], Е. А. Пряхина[a]

[a] Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина Российского федерального ядерного центра
Россия, 456770, Снежинск, Челябинская обл., ул. Васильева, 13

** e-mail: dep5@vniitf.ru*

Поступила в редакцию 13.05.2024 г.
После доработки 14.05.2024 г.
Принята к публикации 08.07.2024 г.

Представлена система считывания фотолюминесцентных экранов с запоминанием, позволяющая получать изображения с более высоким пространственным разрешением по сравнению с промышленными сканерами. Экспериментально определено, что в диапазоне 6–25 кэВ пространственное разрешение созданной системы считывания не зависит от энергии квантов и составляет $\delta = 13 \pm 2$ мкм.

DOI: 10.31857/S0032816225010158, **EDN:** GHQXRT

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве координатно-чувствительных детекторов (КЧД) ионизирующего излучения широкое распространение получили фотолюминесцентные экраны с запоминанием (ФЭЗ) на основе $BaF(Br,I):Eu^{2+}$. В англоязычной литературе эти детекторы называют image plates, или IP. Принцип действия и достоинства ФЭЗ подробно описаны во многих работах (см., например, [1, 2]).

Одна из основных характеристик КЧД – пространственное разрешение. В фотолюминесцентных экранах оно зависит от считывающего устройства и составляет 50–100 мкм при использовании серийно выпускаемых сканеров, тогда как характерный размер кристаллов чувствительного слоя, влияющий на пространственное разрешение, равен примерно 6 мкм. С одной стороны, относительно малое разрешение ограничивает применение ФЭЗ в некоторых экспериментах, например при исследовании быстропротекающих процессов методом контактной радиографии на мощных лазерных установках. С другой стороны, сочетание высокой чувствительности, широкого динамического диапазона, малых габаритов и нечувствительности к электромагнитным наводкам выделяет ФЭЗ среди других координатно-чувствительных детекторов, используемых при проведении данных исследований.

В работе описан способ, позволяющий улучшить пространственное разрешение ФЭЗ при регистрации изображений в рентгеновских лучах.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА СЧИТЫВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЭКРАНОВ

В промышленных сканерах считывание изображения, образованного ионизирующим излучением, происходит посредством сканирования поверхности ФЭЗ He-Ne-лазером. Испускаемое при этом фотолюминесцентное излучение с длиной волны 390 нм регистрируется фотоэлектронным умножителем. В данном случае пространственное разрешение ограничивается рассеянием лазерного пучка в чувствительном слое и размером единичного элемента считывающей линейки сканера [3].

Для получения данных с фотолюминесцентных экранов создана система, в которой, в отличие от традиционного способа последовательного сканирования, реализовано одновременное считывание всего изображения. На рис. 1 представлена схема считывающей системы.

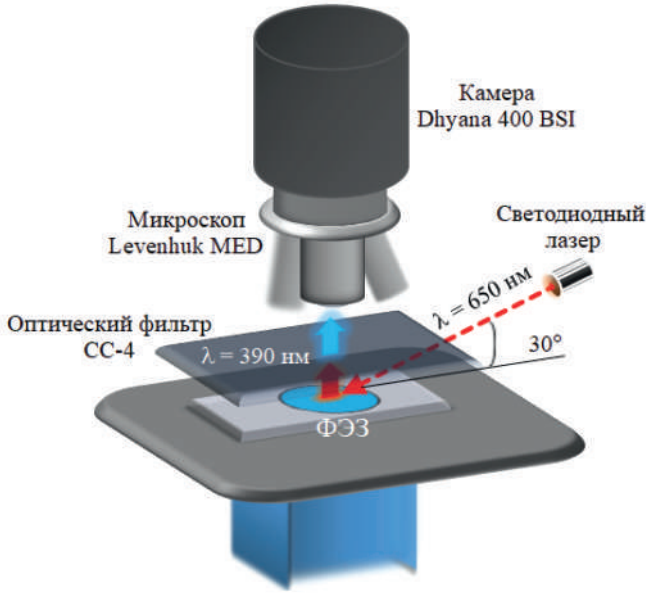

Рис. 1. Схема считывающей системы.

В центр поля зрения микроскопа Levenhuk MED помещается интересующая область ФЭЭ, которая облучается светодиодным лазером (λ = 650 нм, $P \approx$ 10 мВт), сфокусированным в пятно 2×4 мм^2. Угол между осью лазерного пучка и плоскостью экрана составляет 30°. Создаваемое фотолюминесцентное излучение попадает в оптическую систему микроскопа и регистрируется камерой Dhyana 400 BSI, закрепленной вместо штатной камеры. Для подавления рассеянного лазерного излучения перед объективом микроскопа устанавливается фильтр СС-4 толщиной 3 мм, коэффициент пропускания которого представлен на рис. 2.

Для апробации предлагаемой системы фотолюминесцентный экран Fuji BAS-TR2025 (чувствительный слой $BaFBr_{0.85}I_{0.15}$ толщиной 60 мкм, $\rho = 2.61$ г/см^3, без защитного лавсанового слоя [2]) закрывался тест-объектом и облучался рентгеновскими квантами со средней энергией примерно 8 кэВ. В качестве тест-объекта применялась металлическая фольга с овальными ячейками размером 50×200 мкм^2, показанная на рис. 3.

Зарегистрированное изображение считывалось сканером Typhoon FLA 7000 с минимально возможным разрешением 20 пар линий/мм (размер пикселя 25 мкм) и предлагаемой системой. Полученные результаты приведены на рис. 4.

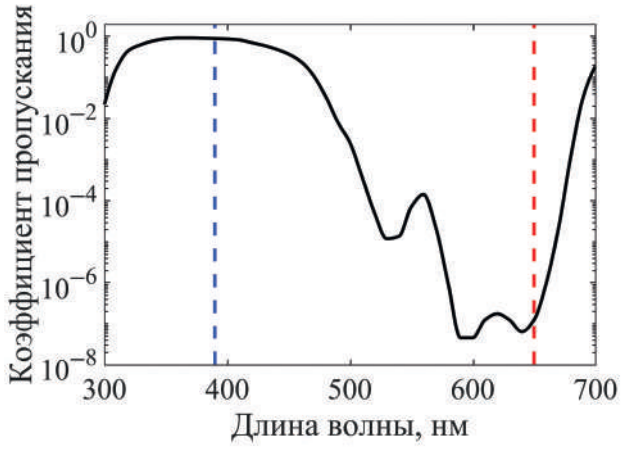

Рис. 2. Коэффициент пропускания фильтра СС-4 толщиной 3 мм.

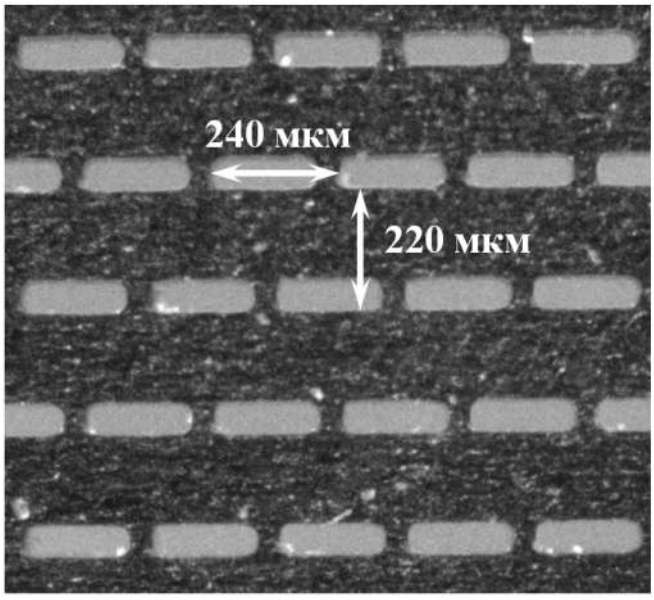

Рис. 3. Изображение тест-объекта под микроскопом.

Как видно на рисунке, предлагаемая система считывания позволяет получать изображения с лучшим пространственным разрешением по сравнению с промышленным сканером. Такой результат достигается за счет малого размера элементов светочувствительной матрицы и большого коэффициента увеличения микроскопа. Неизбежным следствием использования микроскопа является относительно малая величина поля зрения, не превышающая 4×4 мм^2. Несмотря на это, такое поле зрения приемлемо для экспериментов на мощных лазерных установках.

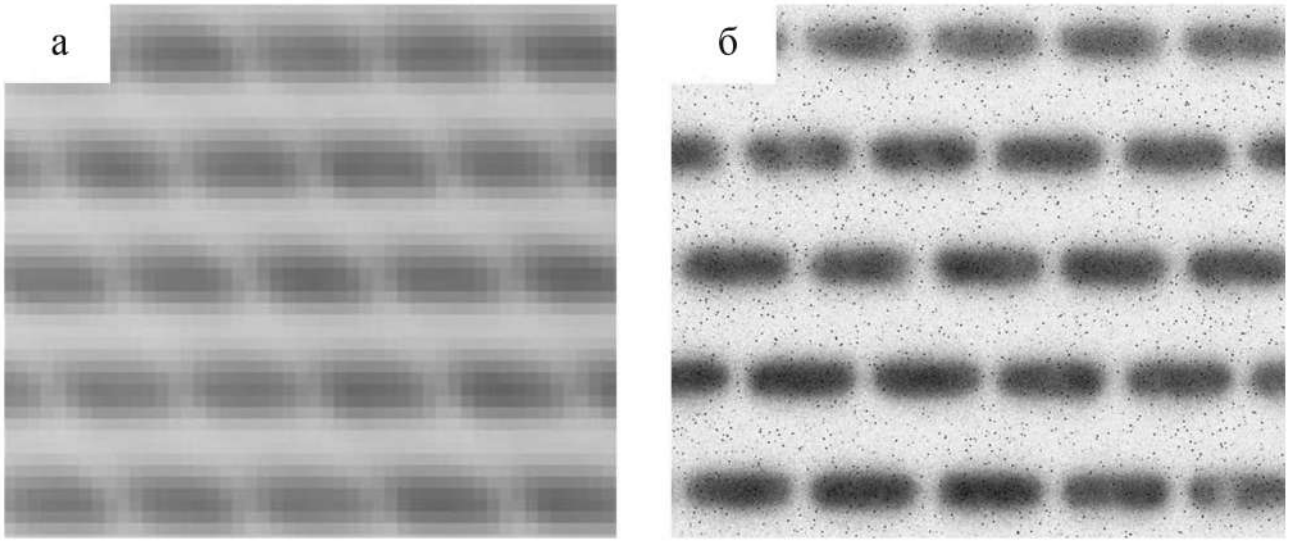

Рис. 4. Полученные результаты: **а** – сканер Typhoon FLA 7000 (размер пикселя 25 мкм), **б** – предлагаемая система считывания.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СОЗДАННОЙ СИСТЕМЫ

Пространственное разрешение созданной системы определялось по функции края. Схема измерений приведена на рис. 5.

Фотолюминесцентный экран Fuji BAS-TR2025 устанавливался вплотную за вольфрамовой фольгой толщиной 200 мкм и облучался рентгеновским излучением установки ДРОН-7. Для выделения узкого участка спектра тормозного излучения использовались селективные фильтры. Параметры фильтров, ускоряющее напряжение рентгеновской трубки $U_{тр}$ и средняя энергия квантов $E_{ср}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры экспериментов

Фильтр	Толщина фильтра, мг/см^2	$U_{тр}$, кВ	$E_{ср}$, кэВ
Fe	32.5	9	6.4
Zn	48.6	13	8.4
C_8H_7Br	206	18	11.9
Zr	158	24	16.1
Sn	295	37	25.6

Зарегистрированные изображения на всех фотолюминесцентных экранах последовательно считывались с помощью созданной системы

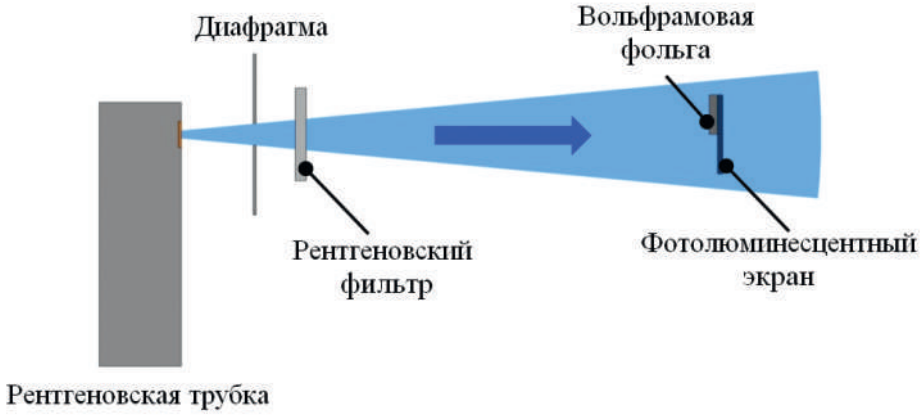

Рис. 5. Схема измерения пространственного разрешения.

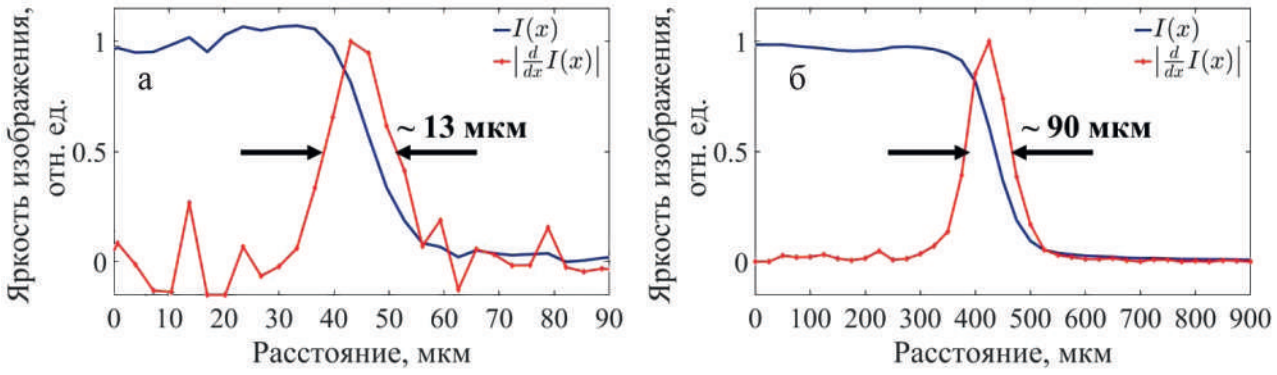

Рис. 6. Профили изображений и их производные при энергии квантов около 11.9 кэВ: **а** – предлагаемая система считывания, **б** – сканер Typhoon FLA 7000 (размер пикселя 25 мкм).

и сканера Typhoon FLA 7000. На рис. 6 приведены профили изображений при $E_{ср}$ = 11.9 кэВ. В качестве оценки пространственного разрешения использовалась ширина на полувысоте производной профиля изображения.

По результатам экспериментов определено, что в диапазоне 6–25 кэВ пространственное разрешение предлагаемой системы считывания не зависит от энергии квантов и составляет $\delta = 13 \pm 2$ мкм; при считывании изображения сканером Typhoon $\delta \sim 90$ мкм. Ранее в работе [4] при сканировании изображений с помощью сканера Typhoon FLA 8000 (размер пикселя 25 мкм) определено, что пространственное разрешение для Fuji BAS-TR2025 составляет 94 ± 2 мкм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения данных с фотолюминесцентных экранов создана система считывания на основе микроскопа Levenhuk MED 25, камеры Dhyana 400 BSI и светодиодного лазера (λ = = 650 нм). В отличие от традиционного способа последовательного сканирования, в предложенной системе реализовано одновременное считывание всего изображения с участка размером 16 мм^2. Такое поле зрения приемлемо для экспериментов на мощных лазерных установках.

Пространственное разрешение созданной системы определялось по функции края. Для этого частично закрытый вольфрамовой фольгой толщиной 200 мкм фотолюминесцентный экран Fuji BAS-TR2025 облучался рентгеновским излучением, генерируемым установкой ДРОН-7. Энергия квантов варьировалась в диапазоне 6–25 кэВ с помощью селективных фильтров и прикладываемого к рентгеновской трубке ускоряющего напряжения.

По результатам экспериментов определено, что в диапазоне 6–25 кэВ пространственное разрешение предлагаемой системы считывания не зависит от энергии квантов и составляет $\delta = 13 \pm 2$ мкм. Такое высокое пространственное разрешение достигается за счет малого размера элементов светочувствительной матрицы камеры и большого коэффициента увеличения микроскопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amemiya Y., Matsushita T., Nakagawa A., Satow Y., Miyahara J., Chikawa J.-I.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1988. V. 266. P. 645. https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90458-5
2. *Meadowcroft A.E., Bentley C.D., Stott E.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. 113102. https://doi.org/10.1063/1.3013123
3. *Izumi N., Snavely R., Gregori G.J., Koch A., Park H.-S., Remington B.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. 10E325. https://doi.org/10.1063/1.2351924
4. *Fiksel G., Marshall F.J., Mileham C., Stoeckl C.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. 086103. https://doi.org/10.1063/1.4739771