

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК: 544.171.6; 52–735

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗОБРАЖАЮЩЕГО СПЕКТРОМЕТРА НА БАЗЕ
КОММЕРЧЕСКОЙ КМОП-МАТРИЦЫ SONY IMX265**

**© 2026 г. А. С. Кириченко*, С. В. Кузин, А. А. Перцов,
В. И. Червинский, А. В. Трифонов, Д. А. Золотов, Ю. С. Кривоносов,
И. П. Лобода, А. А. Рева, С. А. Богачёв**

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения

Российской академии наук

Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

**E-mail: kirichenko@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 21.11.2025

После доработки 04.05.2026

Принята к публикации 15.05.2026

Разработан рентгеновский изображающий спектрометр на базе коммерческой матрицы Sony IMX265. Исследованы процессы деградации детектора в результате воздействия коротковолнового ионизирующего излучения. Определены изменения уровней темнового тока в зависимости от радиационной нагрузки при разных значениях температуры. Проведена попытка восстановления характеристик матрицы за счет длительного отжига. Показано, что при интегральной плотности энергии излучения, попавшего на матрицу, порядка 10^7 эрг/см² матрица сохраняет свою работоспособность, а ее характеристики эффективно восстанавливаются за счет отжига, а также при существенном охлаждении при эксплуатации.

1. ВВЕДЕНИЕ

КМОП-матрицы – один из наиболее широко используемых типов устройств для построения изображений в наши дни [1]. При этом диапазон их применения широк: от камер обычных мобильных телефонов до приемников в составе космических

телескопов различных масштабов [2–4]. При этом такие детекторы могут использоваться не только для формирования изображений, но и в качестве спектрометров коротковолнового излучения [5].

Ранее мы изготовили и испытали прототип спектрометра на базе двух коммерческих КМОП-детекторов компании Sony (IMX265 и IMX226) и провели ряд испытаний с целью определения их основных характеристик [6]. Было определено спектральное разрешение в рабочем диапазоне, который включает в себя как минимум интервал от 1 до почти 25 кэВ. По результатам проведенных испытаний в качестве основного варианта детектора была выбрана матрица SONY IMX265. Созданные прототипы могут быть также применены и для космических исследований. Так, сегодня существуют проекты по созданию рентгеновских изображающих спектрометров, выполненных по схеме камеры-обскуры и размещаемых на борту наноспутников [7].

Предполагается, что созданные спектрометры будут использоваться в синхротронных и лабораторных исследованиях, связанных, прежде всего, с рентгеноструктурным [8] и элементным анализом [9], включая рентгеновскую микроскопию [10].

Особенность рабочего энергетического диапазона создаваемого спектрометра заключается в том, что ионизирующее излучение оказывает существенное влияние на характеристики самого устройства, вызывая значительную деградацию его основных параметров [11, 12]. Особенно остро проблема стоит в случае использования устройства в синхротронных исследованиях, сопровождаемых высокой радиационной нагрузкой. Несмотря на то, что КМОП-матрицы становятся все более популярными, в том числе в астрономических экспериментах, число работ, посвященных изучению их радиационной стойкости, не так велико [13, 14], особенно для рентгеновского излучения.

Существуют технологии, позволяющие повысить радиационную стойкость таких устройств. Так в работе [15] рассматривался радиационно-стойкий детектор STAR-250. Рост темновых токов после получения дозы более 100 кГр составил порядка 1.5 нА/см^2 , в то время как сравниваемые с данным устройством стандартные КМОП-матрицы при дозах порядка 0.1 кГр демонстрировали рост темновых токов на 10 нА/см^2 . Необходимо отметить, что с момента выпуска этой работы технологии изготовления КМОП-матриц шагнули далеко вперед, и даже стандартные изделия демонстрируют существенно более высокие характеристики. Кроме того, если рассматривать не эксперименты в космосе, а только наземное применение, когда

возможна смена детектора в случае его выхода из строя, имеет смысл использовать менее радиационно стойкие, но более дешевые матрицы.

С целью определения диапазонов применимости созданного спектрометра была проведена серия испытаний стойкости КМОП-матрицы при разных уровнях радиационной нагрузки. В качестве ключевого параметра, по которому определялась степень повреждения матрицы, был выбран уровень темнового тока. Исследована его зависимость от интегральной плотности энергии излучения (флюенса), попавшего на матрицу поглощаемого излучения, в том числе при разных значениях температур. Также рассмотрен вопрос возможности восстановления характеристик детектора с помощью отжига.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Методика определения радиационной стойкости сводилась к выявлению связи между флюенсом энергии при облучении матрицы и соответствующим увеличением уровня темнового тока в зонах, подвергшихся воздействию, которое определялось как разница между средним значением темнового тока в облученных и необлученных областях.

На рис. 1 показаны экспериментальная установка [16] и испытываемый в работе рентгеновский спектрометр в корпусированном исполнении. Входная апертура спектрометра закрыта непрозрачной черной бумагой для обеспечения дополнительной светоизоляции, поскольку матрица чувствительна к оптическому излучению. Описание спектрометра, принципа действия, методов обработки данных и основных характеристик приведено в работе [6].

Рис. 1. Экспериментальная установка

В качестве источников излучения использовались рентгеновские трубки типа БСВ-42 (АО “Светлана-Рентген”, Россия) [176, 167] с тремя вариантами анодов: медь, молибден, серебро.

Для оценки влияния радиационных нагрузок на темновой ток детектора в фоточувствительной области было выделено 12 локальных зон размером $500 \times 500 \text{ мкм}^2$, каждая из которых подвергалась облучению рентгеновским излучением при различных параметрах. При этом варьировались энергия фотонов и продолжительность засветки. Время облучения различных областей составляло 500 с, 30 мин, 2 ч и 8 ч.

Флюенс энергии определялся на основании скорости счета рентгеновских фотонов, определяемой по данным эталонного детектора Радикон SCSD-4C,

представляющего собой классический сцинтилляционный приемник, работающий в режиме интенсиметра.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведен участок темнового кадра матрицы (двумерное распределение интенсивности), полученный после проведения испытаний, на котором представлены 12 областей, подвергшихся разным уровням облучения. Для лучшего отображения интенсивность приведена в логарифмическом масштабе.

Рис. 2. Темновой кадр матрицы IMX265 после воздействия на нее жесткого рентгеновского излучения.

На рис. 3 показана зависимость увеличения темнового тока в областях, подвергшихся облучению, от соответствующего флюенса энергии излучения. В работе используется флюенс, поскольку на данный момент неизвестна достоверно толщина фоточувствительного слоя.

Рис. 3. Зависимость увеличения темнового тока в областях, подвергшихся облучению, от флюенса энергии падающего излучения

Как можно увидеть, при одном и том же флюенсе увеличение темновых токов более заметно при использовании излучения с меньшей энергией. Это легко объяснимо, поскольку в таком случае выше процент провзаимодействовавших в фоточувствительном слое матрицы фотонов.

Также была получена зависимость увеличения темнового тока в областях, подвергшихся облучению, от температуры матрицы (рис. 4). Для этого спектрометр помещался в климатическую камеру и постепенно охлаждался. Отсутствующие на графике точки соответствуют моменту, когда уровни темновых токов в незасвеченной и засвеченной областях практически одинаковы. Несложно увидеть, что области со временем облучения не дольше получаса практически не демонстрируют увеличения темнового тока даже при комнатной температуре. При этом, если охлаждать приемник до температуры 10 °С и ниже, увеличение темновых токов в засвеченных областях, за исключением областей с экспозицией засветки более 8 ч, практически полностью исчезает.

Рис. 4. Температурная зависимость изменения темнового тока в областях с разными степенями засветки

Если продолжить данную зависимость в область низких температур (рис. 5) в линейном масштабе, то можно увидеть, что темновой ток в засвеченных областях становится меньше, чем на участках матрицы, не подвергавшихся облучению. Чем

дольше область подвергалась засветке, тем ниже температура, при которой возникает данный эффект, и тем больше падает уровень темнового тока при охлаждении.

Рис. 5. Температурная зависимость увеличения темнового тока в областях с разными степенями засветки при охлаждении до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Данный эффект проиллюстрирован на рис. 6. На левой панели приведен фрагмент кадра с областями матрицы, которые подверглись наиболее продолжительному облучению и в которых прирост темнового тока максимален, – изображение получено при комнатной температуре. На правой панели приведен аналогичный фрагмент, однако при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Видно, что при существенном охлаждении матрицы происходит полная инверсия картины – наиболее яркие при комнатной температуре участки становятся темнее, чем фрагменты, не подвергавшиеся облучению, причем самые низкие уровни темнового тока наблюдаются именно на участках с максимальной экспозицией засветки.

Рис. 6. Фрагмент изображений с участками, подвергавшимися облучению в течение 2 и 8 ч.

В работе была проверена возможность восстановления характеристик матриц путем отжига при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом изменения уровней темнового тока контролировались периодически – после 4, 12, и 24 ч нагрева матрицы. Каждое измерение проводилось после остывания детектора до комнатной температуры, после чего процесс отжига продолжался. На рис. 7 приведены результаты исследования влияния отжига на уровень темновых токов в областях, подвергшихся облучению. Как видно, при всех уровнях облучения происходит заметное восстановление характеристик.

Рис. 7. Разница темнового тока в облученных и необлученных областях в зависимости от продолжительности отжига матрицы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные зависимости увеличения темнового тока от флюенса энергии излучения, попадающего на матрицу, позволяют оценивать допустимые потоки и время их воздействия, при которых детектор считается работоспособным. Особенность полезного сигнала заключается в том, что его интенсивность не зависит от времени экспозиции. Построение спектра осуществляется на пофотонном поиске событий на матрице, для каждого из которых проводится интегрирование числа вторичных заряженных частиц в пределах облака его пространственного распределения. Таким образом, уровень темнового тока может быть искусственно снижен за счет уменьшения

времени экспозиции одного кадра. Очевидным минусом такого подхода можно назвать снижение числа регистрируемых фотонов и, как следствие, увеличение продолжительности эксперимента для накопления статистически обеспеченного спектра. Если же речь идет о каком-то динамическом объекте, то уменьшение времени накопления одного кадра может привести к невозможности его исследования.

В работе [6] была проведена калибровка спектрометра по энергии и было получено значение коэффициента, позволяющего переводить цифровые отсчеты в кэВ, – 144.7 отсч/кэВ. Темновые шумы в областях, не подвергавшихся облучению, составляют порядка 10 отсч/с на пиксель. При облучении матрицы в течение 2 ч темновые шумы выросли на 20–30%, а после воздействия на протяжении 8 ч – более чем на порядок. Таким образом, при выборе, например экспозиции 1 с темновой ток матрицы после 8 ч облучения с использовавшимися в работе потоками будет сопоставим с сигналом, который формирует в матрице фотон с энергией 1 кэВ. Высокие значения темнового тока ограничивают рабочий спектральный диапазон прибора со стороны длинноволновой границы, а также снижают его энергетическое разрешение. В зависимости от постановки задачи и приоритетов время экспозиции будет подбираться индивидуально.

Температурные зависимости уровня темнового тока облученных областей показали, что при активном охлаждении он быстро падает, и при температурах в диапазоне примерно от -25 до -30 °С практически не отличается от значений в областях, не подвергавшихся облучению. Таким образом, создание эффективной системы охлаждения спектрометра может существенно увеличить его ресурс.

Было обнаружено, что при существенном охлаждении темновой ток в облученных областях становится меньше, чем в тех участках матрицы, которые не подвергались засветке. При этом эффект прямо зависит от уровня радиационной нагрузки – чем она выше, тем сильнее падает темновой ток в соответствующих областях. Возможно, что при облучении начинают доминировать дефекты с большей энергией активации, что существенно меняет температурную зависимость темнового тока [18]. На изображениях видно, что кластеры дефектов, возникшие при длительном облучении, исчезают при низких температурах – картина становится практически однородной. Возможно, это говорит об эффективном подавлении вклада в темновой ток от объемных дефектов.

Классический метод восстановления кремниевых детекторов после радиационных нагрузок заключается в их длительном нагреве при температурах порядка 100 °С. Было

проанализировано, как время отжига влияет на темновые токи в областях матрицы, подвергавшихся разным уровням облучения. В наименее засвеченных областях (продолжительность засветки 500 с и 30 мин) за первые 4 ч происходило практически полное восстановление матрицы – разница между облученными и необлученными областями практически незаметна. Зоны с максимальной продолжительностью облучения (8 ч) демонстрируют падение темнового тока более чем в 3.5 раза за сутки отжига. Стоит отметить, что темновые токи при комнатной температуре в соответствующих областях все равно остаются на относительно высоком уровне – примерно в 4 раза больше, чем в незасвеченных областях.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена работа по исследованию радиационной стойкости созданного рентгеновского спектрометра на основе КМОП-матрицы IMX265. Показано, что, несмотря на быстрый рост темновых токов при облучении рентгеновским излучением, существуют способы его снижения за счет воздействия внешних факторов.

В первую очередь, охлаждение матрицы до температур в диапазоне примерно от -25 до -30 °C позволяет существенно снизить темновые токи, практически нивелируя все последствия длительного облучения рентгеновским излучением. Также высокую эффективность восстановления демонстрирует отжиг. Было показано, что отжиг в течение 24 ч позволяет существенно снизить темновые токи в облученных областях. Так, за сутки отжига темновой ток в наиболее поврежденных областях уменьшается более чем в 3.5 раза. Таким образом, показано, что при флюенсе энергии порядка 10^7 эрг/см⁻² матрица сохраняет свою работоспособность, а совокупность внешних воздействий, таких как отжиг и охлаждение, позволяет практически полностью компенсировать возникающие в результате радиационной нагрузки повреждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (по соглашению № 075-15-2025-458 от 27.05.2025) в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 г.

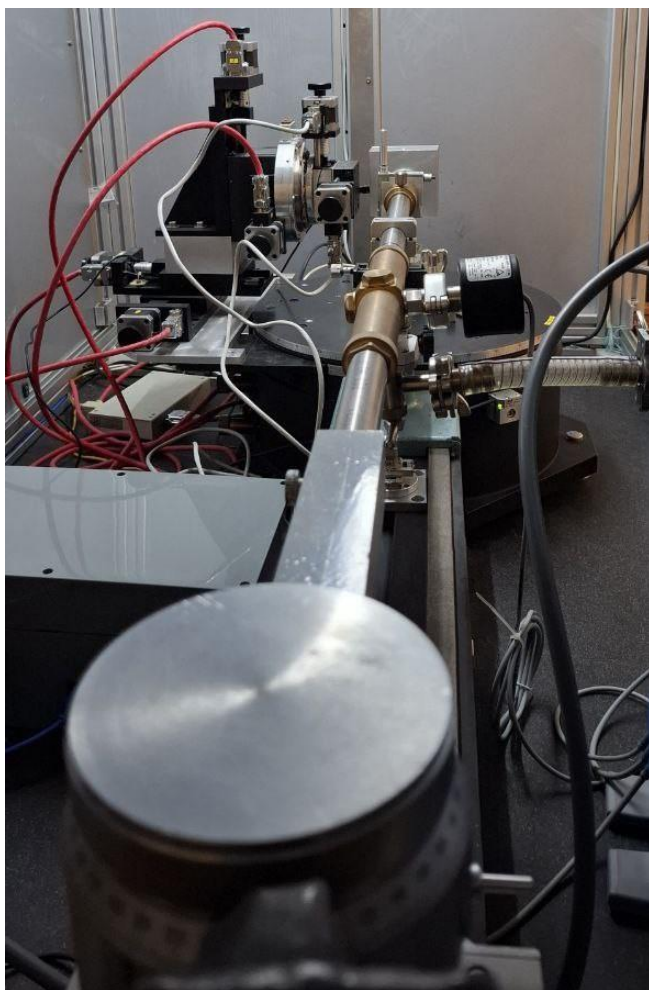
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beletic J.E., Beletic J.W., Amico P.* Scientific Detectors for Astronomy 2005. Dordrecht: Springer, 2005. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4330-9>
2. *De Groof A., Berghmans D., Nicula B. et al.* Sol. Phys. 2008. V. 249. № 1. P. 147. <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9175-y>
3. *Beletic J.W., Blank R., Gulbransen D. et al.* SPIE Proceedings. 2008. V. 7021. P. 70210H. <https://doi.org/10.1117/12.790382>
4. *Pertsov A.A., Dyatkov S.Y., Erkhova N.F. et al.* Instrum. Exp. Tech. 2022. V. 65. № 2. P. 326. <https://doi.org/10.1134/S0020441222020051>
5. *Haro M.S., Bessia F.A., Pérez M. et al.* Radiat. Phys. Chem. 2020. V. 167. P. 108354. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108354>
6. *Kuzin S.V., Kirichenko A.S., Pertsov A.A. et al.* J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2025. V. 19. № 4. P. 935. <https://doi.org/10.1134/S1027451025701356>
7. *Kuzin S.V., Kirichenko A.S., Pertsov A.A. et al.* Tech. Phys. 2024. V. 69. № 3. P. 592. <https://doi.org/10.1134/S106378422402018X>
8. *Bunaciu A.A., Udriștioiu E.g., Aboul-Enein H.Y.* Crit. Rev. Anal. Chem. 2015. V. 45. № 4. P. 289. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
9. *Revenko A., Tsvetyansky A., Eritenko A.* Radiat. Phys. Chem. 2022. V. 197. P. 110157. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110157>
10. *Mizutani R., Suzuki Y.* Micron. 2012. V. 43. № 2-3. P. 104. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2011.10.002>
11. *Tan J., Buttgen B., Theuwissen A.J.P.* ASDAM. 2010. P. 279. <https://doi.org/10.1109/ASDAM.2010.5667007>
12. *Townsend-Rose C., Buggiey T., Ivory J. et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2024. V. 1059. P. 169011. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.169011>
13. *Liu M., Ling Z., Wu Q. et al.* J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2023. V. 9. № 04. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.9.4.046003>
14. *Belloir J., Goiffon V., Virmontois C. et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 2017. V. 64. № 1. P. 27. <https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2641479>
15. *Bogaerts J., Dierickx B., Meynants G. et al.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2003. V. 50. № 1. P. 84. <https://doi.org/10.1109/TED.2002.807251>
16. *Zolotov D.A., Buzmakov A.V., Dyachkova I.G. et al.* Crystallogr. Rep. 2024. V. 69. № 2. P. 279-287. <https://doi.org/10.1134/S1063774524600091>

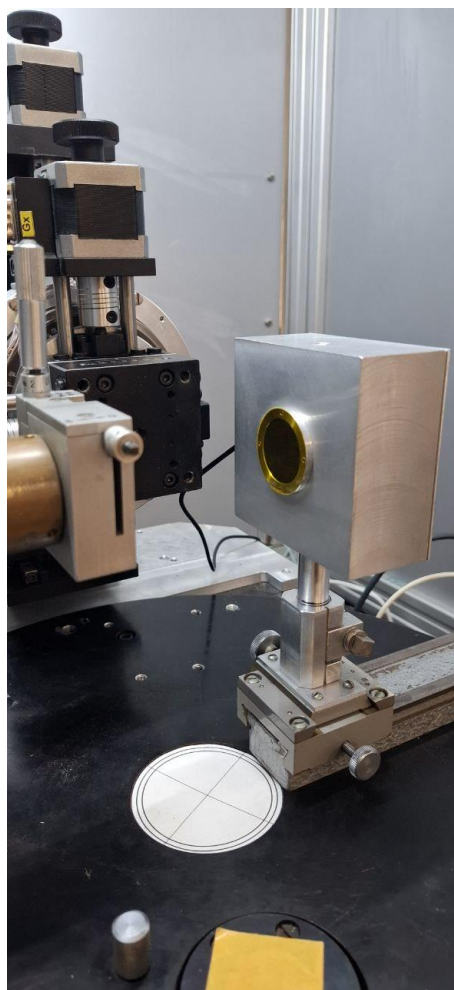
17. *Buzmakov A.V., Asadchikov V.E., Zolotov D.A. et al.* Crystallogr. Rep. 2018. V. 63. № 6. P. 1057-1061. <https://doi.org/10.1134/S106377451806007X>
18. *Widenhorn R., Blouke M.M., Weber A. et al.* SPIE Proceedings. 2002. V. 4669. <https://doi.org/10.1117/12.463446>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Экспериментальная установка: **а** – монохроматор и коллиматор; **б** – корпусированный спектрометр, размещенный перед выходной апертурой источника рентгеновского излучения.
- Рис. 2.** Темновой кадр матрицы IMX265 после воздействия на нее жесткого рентгеновского излучения. Нижний ряд – медный анод, средний ряд – молибденовый анод; верхний ряд – серебряный анод. Продолжительность облучения областей в пределах горизонтальных рядов слева направо составила 500 с, 30 мин, 2 ч и 8 ч соответственно. Кадр приведен в логарифмическом масштабе.
- Рис. 3.** Зависимость увеличения темнового тока в областях, подвергшихся облучению, от флюенса энергии падающего излучения.
- Рис. 4.** Температурная зависимость изменения темнового тока в областях с разными степенями засветки.
- Рис. 5.** Температурная зависимость увеличения темнового тока в областях с разными степенями засветки при охлаждении до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Рис. 6.** Фрагмент изображений с участками, подвергавшимися облучению в течение 2 и 8 ч. Левая панель – при комнатной температуре (изображение приведено в логарифмическом масштабе); правая панель – при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Рис. 7.** Разница темнового тока в облученных и необлученных областях в зависимости от продолжительности отжига матрицы.



(a)



(б)

Рис. 1.

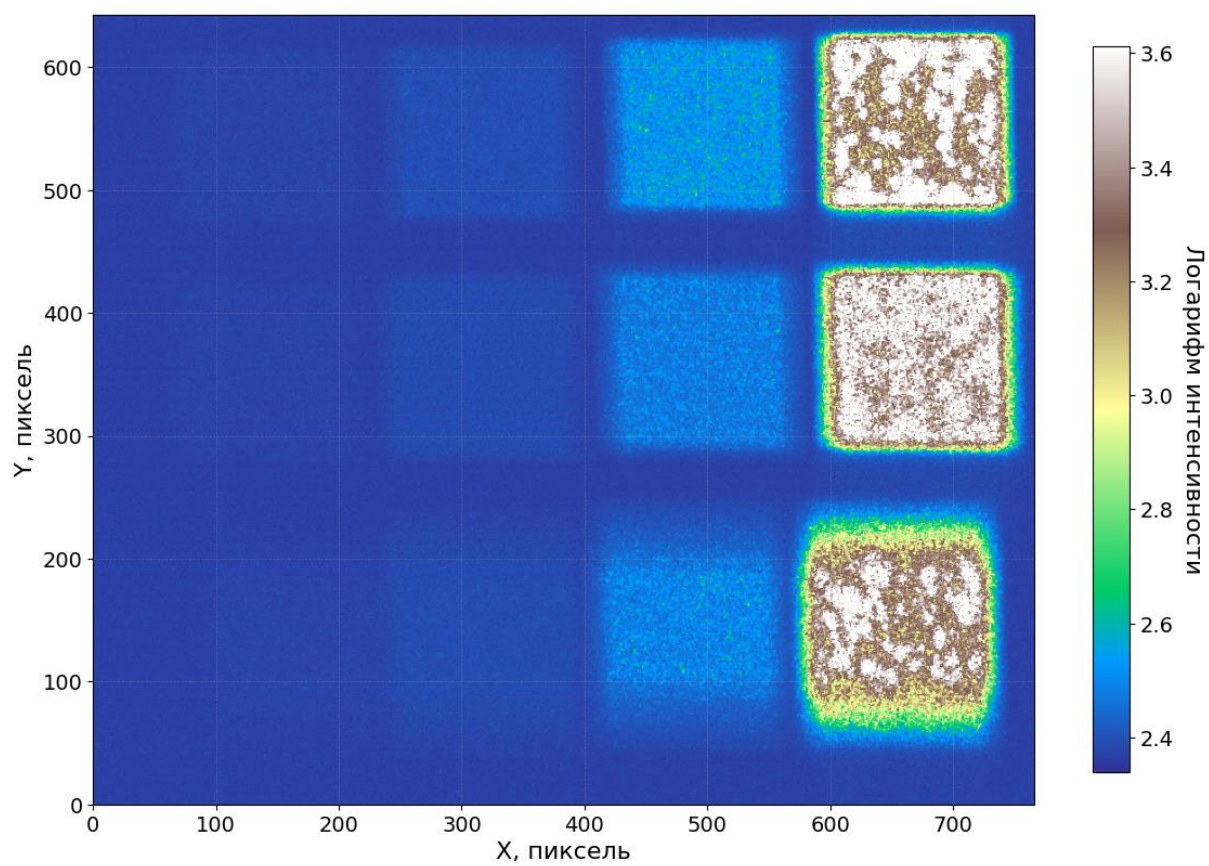


Рис. 2.

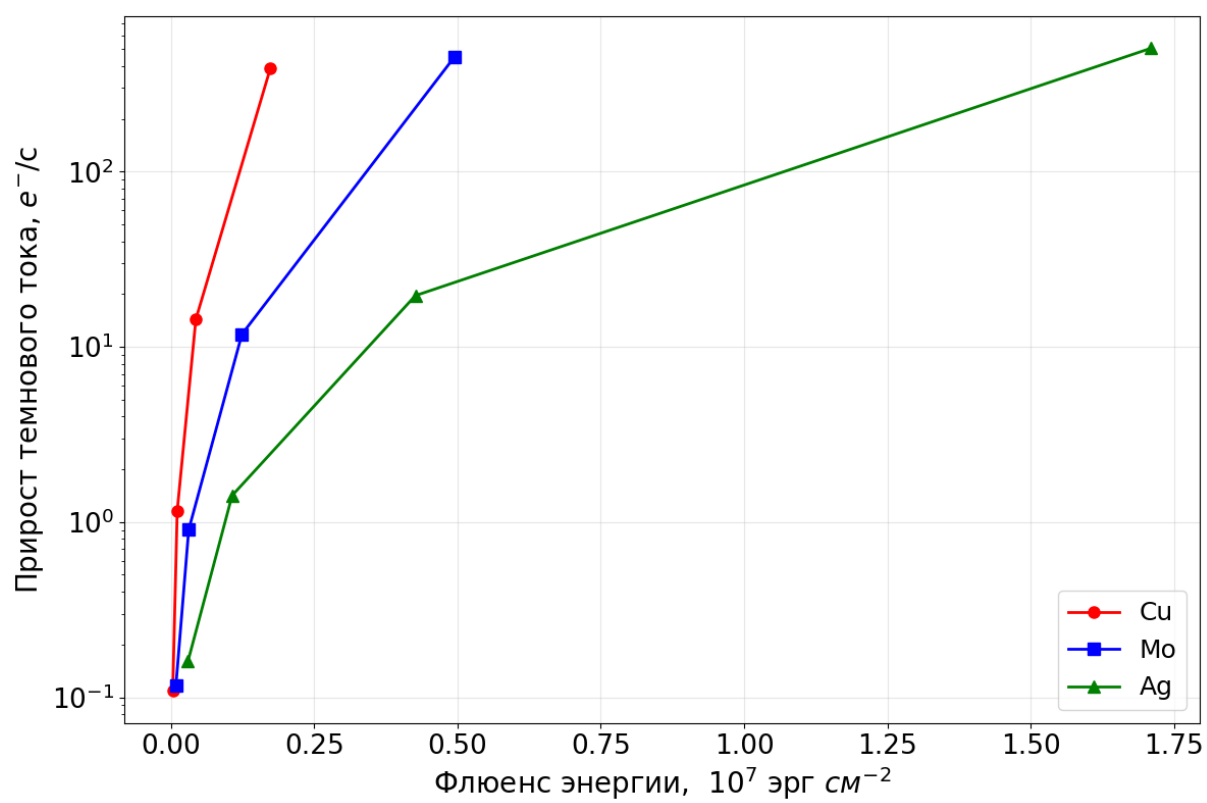


Рис. 3.

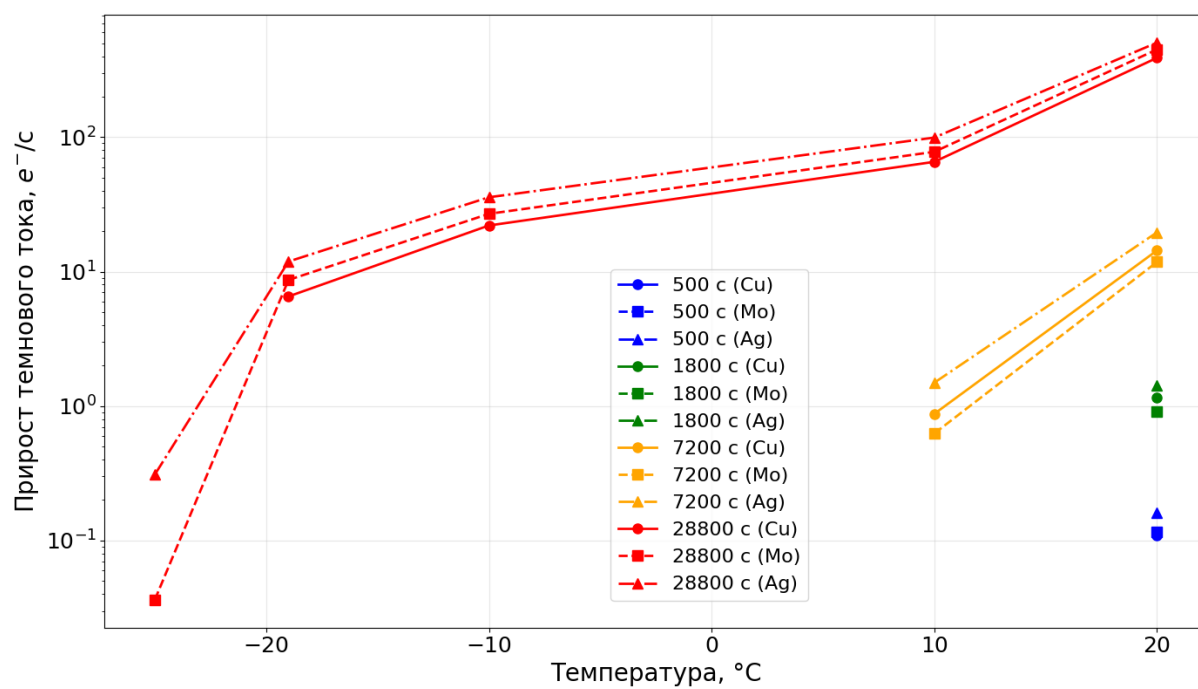


Рис. 4.

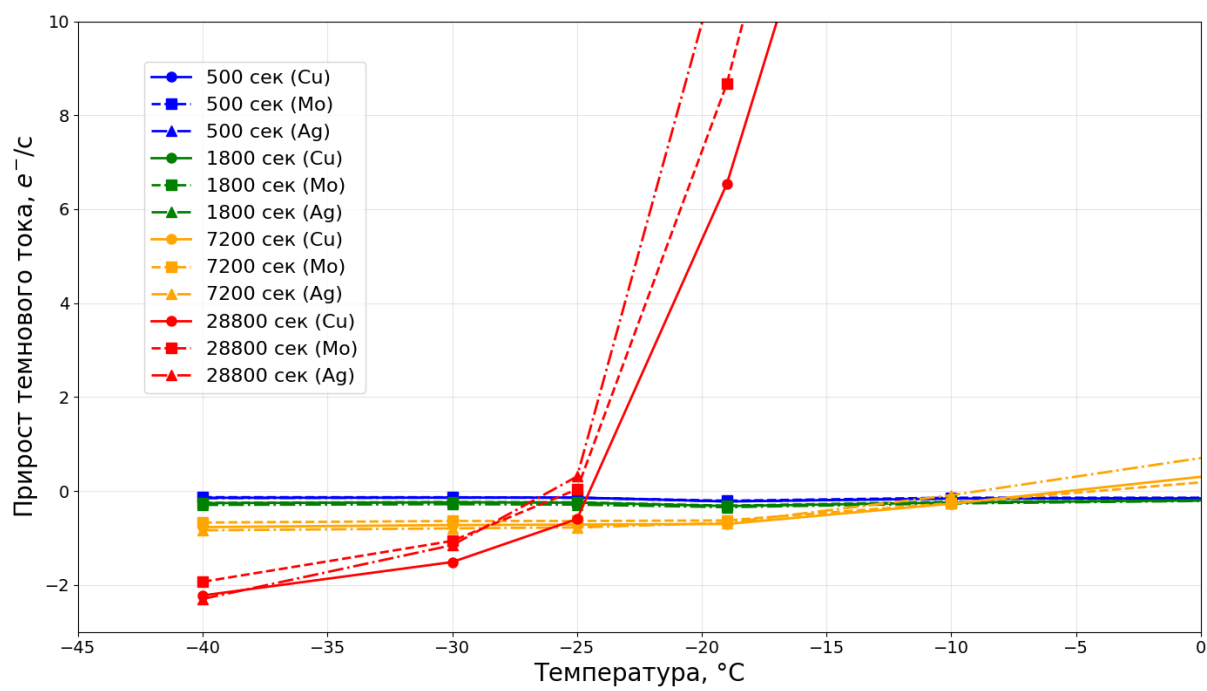
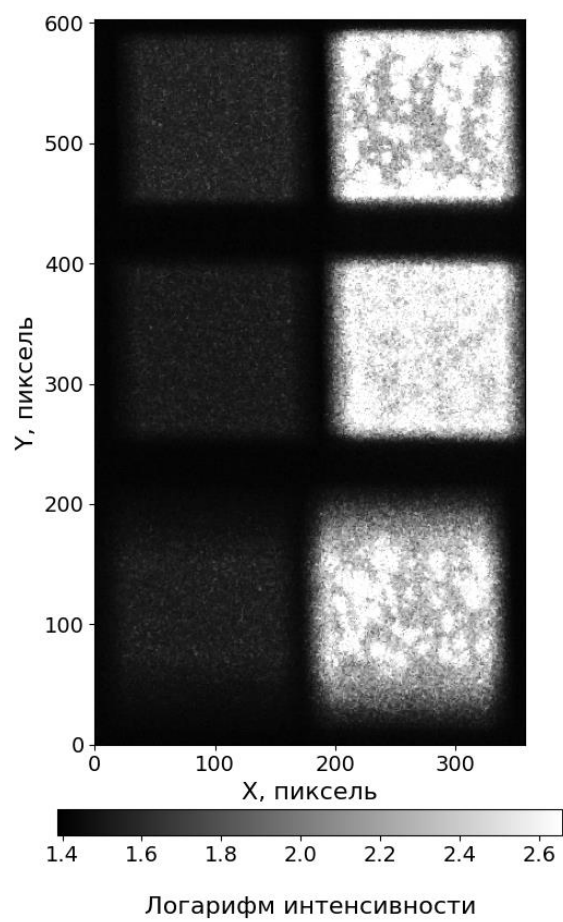
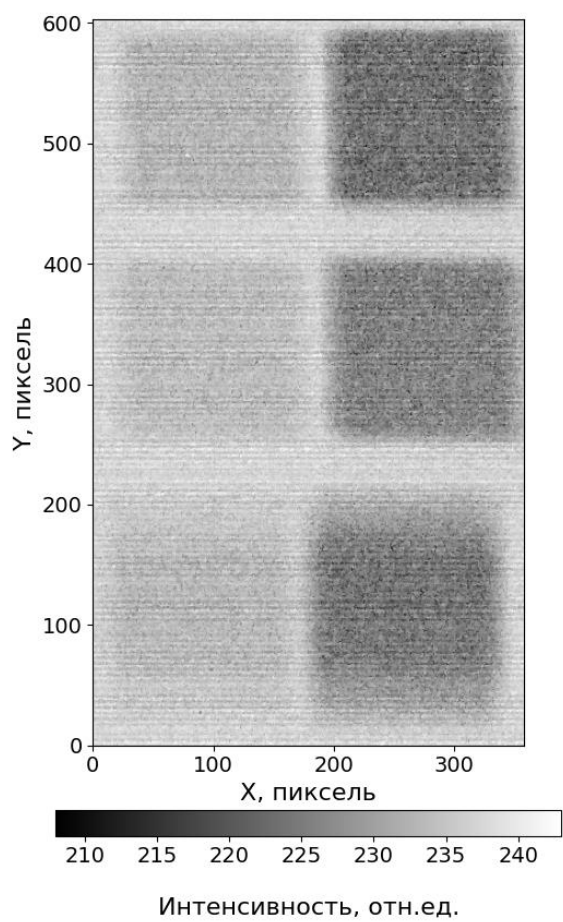


Рис. 5.



(а)



(б)

Рис. 6.

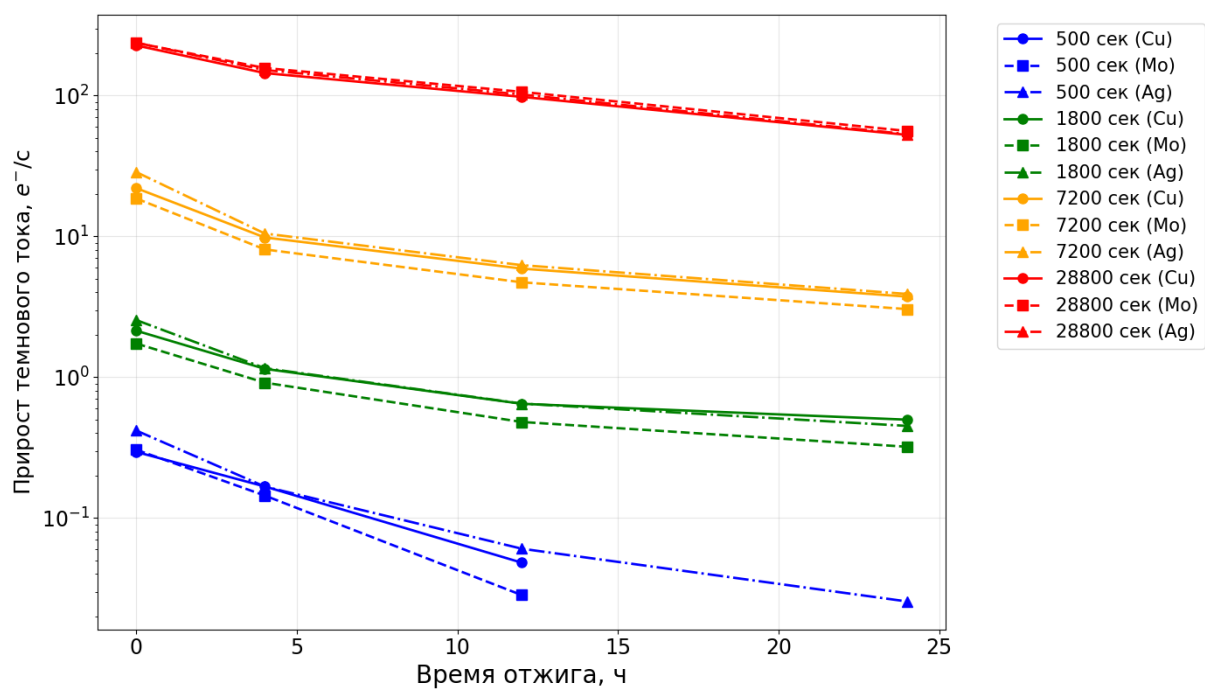


Рис. 7.