

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-12-20>

УДК 538.91; 538.971; 537.862

ОСОБЕННОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ CsI:Tl ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ Xe

А. Т. Акилбеков¹, Г. М. Баубекова¹, Р. Н. Асылбаев², А. К. Даулетбекова¹,
Г. М. Аралбаева^{1*}, Ж. Т. Карипбаев¹, К. Бурканова¹

¹⁾ Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ Маргулан университет, Павлодар, Казахстан

* E-mail для контактов: agm_555@mail.ru

Сцинтилляционные кристаллы CsI:Tl широко используются в экспериментах по ядерной физике и физике высоких энергий. В настоящей работе проведено исследование и анализ люминесцентных свойств кристаллов CsI:Tl, вызванных облучением ионами ^{132}Xe с энергией 230 МэВ, до флюенсов ($1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{14}$ ион/см²) при 295 К (ускоритель ДЦ-60, Астана, Казахстан). Исследование проводилось методами оптической абсорбционной и люминесцентной спектроскопии, также времени-разрешенной оптически стимулированной люминесценции. Поверхность исследовалась с помощью атомно-силовой микроскопии. Установлено уменьшение интенсивности сцинтилляционной полосы свечения 553 нм и ее светового выхода с увеличением флюенса. Конверсионная эффективность для исследованных образцов не зависит от флюенса. Таким образом радиационное повреждение не влияет на конверсионную эффективность кристалла CsI:Tl. Формирование треков не снижают конверсионную эффективность кристалла CsI:Tl, но участвуют в сцинтилляционном процессе, вызывая реабсорбцию энергии от Tl^+ -центров, что приводит к деградации светового выхода.

Ключевые слова: монокристалл CsI:Tl, сцинтилляционная люминесценция, ионное облучение, световой выход, конверсионная эффективность, ионные треки.

ВВЕДЕНИЕ

Люминесцентные кристаллы CsI и CsI:Tl известны как очень эффективные сцинтилляционные материалы благодаря широкому использованию в экспериментах по ядерной физике и физике высоких энергий. Обычно CsI:Tl используется для обнаружения ионизирующего излучения, в частности ионов и продуктов деления [1]. Разработка кремниевых фотодиодов большой площади, квантовая эффективность которых соответствовала спектру CsI:Tl, сильно стимулировала использование этого кристалла в экспериментах по ядерной физике для изготовления больших массивов детекторов [2, 3]. По этим причинам в последние годы много работ связано с изучением механизмов переноса энергии, участвующих в сцинтилляционном процессе [4–10] и зависимости светового выхода от концентрации Tl^+ [11, 12]. Действительно, более глубокое знание этих процессов могло бы упростить трудоемкие процедуры калибровки, которые необходимы для настройки детекторных решеток, состоящих из нескольких десятков кристаллов CsI:Tl.

Спектр люминесценции CsI:Tl состоит из широкой полосы с максимумом 550 нм, возникающей в результате рекомбинации автолокализованной дырки, также называемой V_k -центром, с электроном вблизи иона Tl^+ [13, 14]. Вместе с этой полосой присутствуют еще три компонента: плечо при 480 нм, которое иногда приписывают дефектам, связанным с вакансиями [11], но которое, скорее всего, связано с той же рекомбинацией $V_k - e^-$ в другой конфигурации [13, 15], полоса при 400 нм, которую приписывают

оптическому переходу возбужденного состояния Tl^+ [13], и, иногда, пик при 300–310 нм, который связан с переходом чистого кристалла CsI [1, 16]. Последнее излучение широко изучается из-за очень быстрого времени жизни ~ 10 нс, но его происхождение до сих пор остается предметом споров.

Следует также подчеркнуть, что CsI является кристаллом семейства щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) с более высокой радиационной стойкостью. Радиационные повреждения в ЩГК подробно изучались в течение многих десятилетий [17–21]. В настоящее время хорошо известно, что первичные дефекты Френкеля F- и H-центры образуются в результате безизлучательного распада автолокализованных экситонов. Кроме того, заряженные пары Френкеля, т. е. анионные вакансии и междоузельные ионы, так называемые α -I пары (возникают в результате туннельной перезарядки первичных F-H пар [22]. После длительного облучения их концентрация может быть достаточно высокой. Радиационно-индуцированным дефектам в ЩГК со структурой типа CsCl, которые важны для многих применений, уделяется не слишком много внимания. Это особенно важно для кристаллов CsI в связи с их широким использованием в сцинтилляционных детекторах частиц [23–25].

Существует несколько исследований радиационного повреждения кристаллов CsI и CsI:Tl облученных частицами при комнатной температуре [26–33], где анализировались спектры светового выхода или пропускания [34] после облучения ^{60}Co [35–40], ^{137}Cs [41], или протонами с энергией 12 ГэВ [42]. Создание F центров в CsI и CsI:Tl исследовалось при облуче-

нии быстрыми тяжелыми ионами криптона при 15 К в работе [43]. Для изучения кинетики образования дефектов при облучении ионным пучком в кристаллах CsI:Tl с различными концентрациями Tl⁺ была использована люминесценция, индуцированная ионным пучком (IBIL). Кристаллы были облучены H⁺ и ⁴He⁺ с энергией 1,8 МэВ [44].

При облучении CsI быстрыми тяжелыми ионами наблюдаются изменения в люминесценции, связанные с образованием F-центров, которые являются анионными вакансиями, захватывающими электроны. Эти дефекты вызывают понижение прозрачности материала и могут препятствовать сцинтилляционным процессам, также возможно создание поверхностных дефектов (хиллоков) и трещин.

Очевидно, что радиационное повреждение сцинтилляционных материалов ограничивает их применение. В общем случае радиационное повреждение создает центры окраски, которые уменьшают прозрачность, разрушает люминесцентные центры в материале или препятствует образованию люминесцентных центров в материале. Поэтому очень важно знать поведение люминесцентных материалов в сильных полях радиации.

Целью данной работы является исследование и анализ люминесцентных свойств кристаллов CsI:Tl, вызванных облучением быстрыми тяжелыми ионами ксенона с энергиями осколков деления в зависимости от флюенса методами оптической абсорбционной и рентгенолюминесцентной спектроскопии, а также атомно-силовой микроскопии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использовались кристаллы CsI:Tl компании Aliaenson (Германия), выращенные по методу Чохральского. Кристаллы имеют объемно-центрированную кубическую структуру CsCl. Образцы имели размеры 5×5×0,5 мм. Концентрация таллия составила 0,5%. Облучение образцов проводилось на ускорителе ДЦ-60 ионами 220 МэВ ¹³²Xe до флюенсов от 10¹¹ до 10¹³ ион/см², при 300 К. На рисунке 1 и в таблице 1 приведены результаты по расчету параметров иона 230 МэВ ¹³²Xe в кристаллах CsI, рассчитанные с помощью кода SRIM [45], где S_e – удельные ионизационные потери энергии (электронные) и S_n – упругие потери энергии (ядерные), а R – длина пробега иона в кристалле.

Таблица 1. Параметры иона 230 МэВ ¹³²Xe в кристалле CsI

Энергия иона, МэВ	(dE/dx) _{elec} , S _e , кэВ/нм	(dE/dx) _{nuc} , S _n , кэВ/нм	Длина пробега, R, μm
230,00	15,19	0,05729	24,76

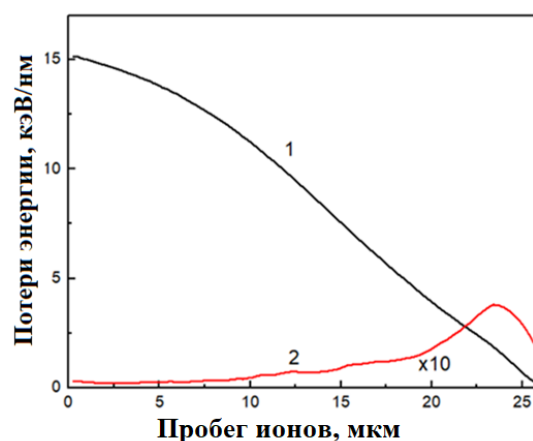


Рисунок 1. Потери энергии ионами 230 МэВ ¹³²Xe в кристалле CsI: 1 – удельные ионизационные потери (электронные потери энергии); 2 – упругие потери энергии (ядерные потери энергии)

Отношение S_e / S_n = 265, то есть ионизационные потери доминируют и электронные возбуждения участвуют в создании радиационных дефектов.

Спектры оптического поглощения были измерены с помощью двухлучевого спектрофотометра T8DCSIS19-2 (Китай) в спектральном интервале 190–900 нм.

Спектры фотолюминесценции и возбуждения были измерены на универсальном спектрофлуориметре CM2203 Солар (Беларусь). Диапазон длин волн от 220 до 920 нм.

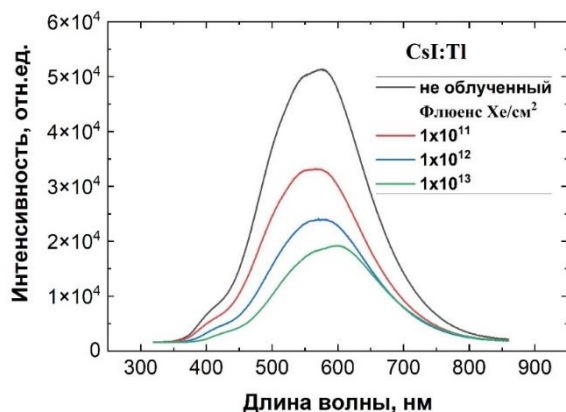
Кинетика затухания люминесценции измерялись с помощью системы с перестраиваемым лазером Laser Ekspla NT ns tunable (2708122) с длительностью импульса 5 нс (Вильнюс, Литва).

Морфология поверхности образцов CsI:Tl исследовалась методом атомно-силовой микроскопии с помощью микроскопа AIST-NT SmartSPM при размерах сканирования 30×30 мкм.

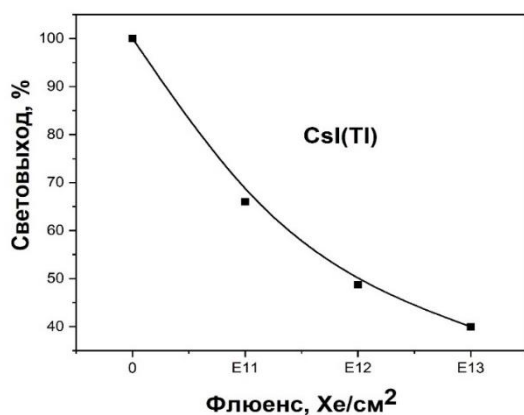
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлены спектры рентгенолюминесценции (РЛ) U = 30 кВ, I = 10 мА кристаллов CsI:Tl, облученных ионами ¹³²Xe с энергией 230 МэВ в зависимости от флюенса (дозы). Как следует из рисунка 2а, во всем исследованном спектральном диапазоне доминирует хорошо известная сцинтилляционная полоса 553 нм (2,24 эВ) центра Tl⁺ [46].

С увеличением флюенса наблюдается уменьшение интенсивности РЛ, а также уменьшается световой выход свечения этого центра. На приведенном рисунке 2б показано изменение световыходов рентгенолюминесценции (в процентах) для ионно-облученных кристаллов CsI:Tl при различных флюенсах ионов. Исходный (необлученный) кристалл взят в качестве эталона с максимальным световыходом, который составляет 100%. При увеличении флюенса наблюдается значительное снижение световыхода.



а)



б)

Рисунок 2. Зависимость спектров РЛ кристаллов CsI:Tl (а) и светового выхода ФЛ (б) от флюенса; образцы облучались ионами 230 МэВ ^{132}Xe при комнатной температуре, $\lambda_{\text{ex}} = 320$ нм

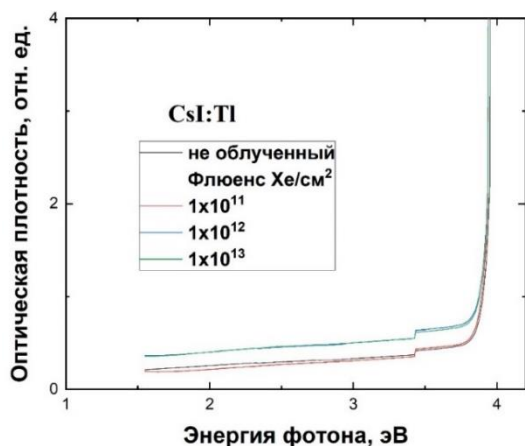


Рисунок 3. Спектр поглощения кристалла CsI:Tl в зависимости от флюенса; образцы облучались ионами 230 МэВ ^{132}Xe , при 295 К

При флюенсе порядка 10^{11} ионов/см² световыход снижается примерно до 75%, а при флюенсе 10^{12} ионов/см² – до 55%, при флюенсе 10^{13} ионов/см² световыход падает до 40%. Падение световыхода с увеличением флюенса может быть связано с образованием

радиационных дефектов в кристалле CsI:Tl. Облучение ионами приводит к повреждению кристаллической решетки, что нарушает процессы рекомбинации электронов и дырок, которые ответственны за люминесценцию. Ионное облучение вызывает накопление дефектов в решетке, таких как вакансии и междоузельные атомы, которые могут действовать как центры рекомбинации, поглощающие энергию, что приводит к уменьшению эффективности световыхода. Световыход РЛ кристаллов CsI:Tl значительно снижается с увеличением флюенса ионов, что указывает на деградацию кристалла под воздействием ионного облучения. Следует отметить, что это известный факт, что воздействие радиации на кристаллы CsI:Tl приводит к ухудшению их сцинтилляционных параметров [47–54].

С ростом флюенса световой выход снижается нелинейно, как показано на рисунке 3. При этом можно утверждать, что уменьшение светового выхода не связано с заметной потерей прозрачности кристалла, который сохраняет практически ту же прозрачность в одном и том же спектральном диапазоне до и после облучения при разных уровнях флюенса, что также иллюстрируется на рисунке 3.

Следует отметить, что в процессе ионного облучения по данным термопары, установленных на мишени кристалл нагревается до температуры $T \approx 370$ К и при таких высоких температурах центры окраски уже не стабильны из-за термической ионизации, поэтому кристалл CsI:Tl оказывается чрезвычайно устойчивым к воздействию радиации.

На рисунке 4 представлены кинетики затухания свечения 553 нм в кристаллах, облученных ионами 230 МэВ ^{132}Xe при 295 К, в зависимости от флюенса. Возбуждение осуществлялось импульсом лазера с длиной волны 320 нм. Закон затухания в аналитической модели времени-разрешенной оптически стимулированной люминесценции (внутрицентральной) подчиняется экспоненциальному закону. Нахождение характеристических времен затухания и соответствующих амплитуд были реализовано по следующей формуле:

$$I_t = \sum_{i=1}^N I_{0i} \cdot \exp(-t / \tau_{i3})$$

где τ_{i3} – характеристическое время затухания i -го компонента свечения (время, в течение которого интенсивность свечения убывает в e раз); I_t – величина сигнала в момент времени t ; I_{0i} – амплитудное (при $t = 0$) значение сигнала компонента с постоянной затухания τ_{i3} ; t – текущая координата времени.

Кинетика затухания ФЛ содержит две компоненты (рисунок 4). В таблице 2 приведены значения τ_1 и τ_2 характеристические времена затухания этих компонент, I_1 и I_2 амплитуды.

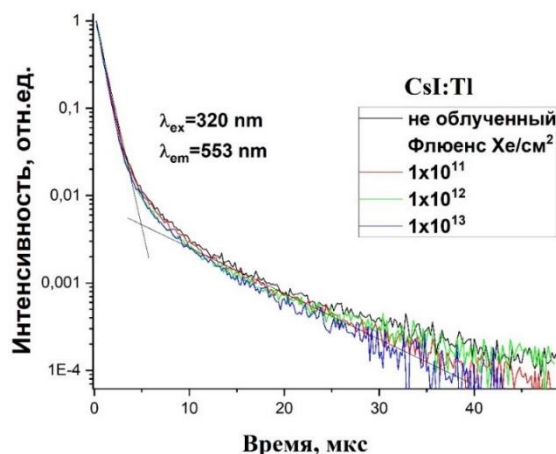


Рисунок 4. Затухание свечения 553 нм в кристаллах, облученных ионами 230 МэВ ^{132}Xe при 295 К, в зависимости от флюенса; возбуждение осуществлялось импульсом лазера с длиной волны 320 нм

Таблица 2. Параметры кинетики затухания фотолюминесценции 553 нм, возбужденной лазерным импульсом с $\lambda_{\text{ex}} = 320$ нм, кристаллов CsI:Tl, облученных ионами 230 МэВ ^{132}Xe при 295 К, в зависимости от флюенса

Флюенс, ион/см ²	I_0	I_0	τ_1 , мс	τ_2 , мс
10^{11}	791498	16916	0,496	2,996
10^{12}	580884	9444	0,47	3,21
10^{13}	602173	13557	0,48	2,73

Из рисунка 4 и таблицы 2 видны изменения в динамике люминесценции ионно-облученных образцов. Значения для τ_1 и τ_2 (время жизни быстрых и медленных компонент затухания) указывают на две фазы рекомбинации: τ_1 (быстрая компонента) – незначительно изменяется при увеличении флюенса, что может свидетельствовать о дефектах, влияющих на быстрые переходы; τ_2 (медленная компонента) – показывает большую изменчивость и указывает на влияние дефектов, созданных ионами, на более медленные процессы релаксации.

С увеличением дозы ионного облучения наблюдается значительное снижение люминесцентных свойств кристалла CsI(Tl). Наиболее заметные изменения происходят при флюенсе $1 \cdot 10^{12}$ и $1 \cdot 10^{13}$ ион/см², что указывает на повреждения кристаллической структуры. Время жизни люминесценции сокращается незначительно, а интенсивность уменьшается, что связано с образованием дефектов и безызлучательных центров рекомбинации.

В работе [55] показано, что в спектре радиационно-индуцированного поглощения (облучение γ -квантами) присутствуют две группы активаторных центров, с первой группой связаны полосы с максимумом: 3,18 эВ и 2,70 эВ. Вторая группа связана с максимумами: 2,88, 2,38, 2,21, 1,48 и 1,26 эВ. Эти два ти-

па активаторных центров окраски представляют собой, согласно авторам, примесь-вакансионные диполи $Tl^0V_a^+$ и $Tl^{2+}V_c^-$. По мнению авторов, деградация светового выхода облученных кристаллов CsI:Tl обусловлена излучательным переносом энергии от Tl^+ к $Tl^0V_a^+$ центрам, свечение которых потушено при температурах выше 200 К, в то время как длинноволновый спектральный сдвиг и изменение кинетики затухания сцинтилляций вызвано безызлучательным резонансным переносом энергии от Tl^+ к $Tl^{2+}V_c^-$ центрам окраски.

При облучении быстрыми тяжелыми ионами эффект деградации может быть обусловлен макродефектами (хиллоки на поверхности и треки), рисунок 5.

На рисунке 5 представлены снимки с атомно-силового микроскопа (АСМ) CsI:Tl, облученного ионами 230 МэВ ^{132}Xe , до флюенса $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² при 295 К. На снимках видно формирование треков, их перекрывание, а также образование хиллоков. Пороговая энергия трекообразования для ЦГК ≥ 5 кэВ/нм, что значительно меньше электронных потерь иона 230 МэВ ^{132}Xe в CsI:Tl (таблица 1). Создание трековых областей приводит к их аморфизации, нарушению свободного движения электронных возбуждений (ЭВ), особенно это касается возможности автолокализации экситонов (АЛЭ). Оптические характеристики экситонов в монокристалле CsI при 4,2 К представлены в таблице 3 [56], где E_g – ширина запрещенной зоны, E_{ex} – максимум полосы поглощения свободных экситонов с $n = 1$, $E_{\text{max}}(\pi, \sigma)$ – максимум люминесценции АЛЭ, τ – время жизни.

Сейчас принята структурная классификация АЛЭ по параметру относительного стока сдвига S_R^0 [57]. При значениях $0,25 < S_R^0 < 0,34$ имеем структуру on-centre, а при значениях $0,35 < S_R^0 < 0,46$ АЛЭ существует как weak off-. Поскольку люминесценция триплетного экситона доминирует, то АЛЭ преимущественно в CsI:Tl в структуре weak off центра. Свободные экситоны до автолокализации проходят расстояние которое принято называть длиной пробега. Длина пробега очень сильно зависит от температуры и при $T = 5$ К, она равна $1000 a$, где a – постоянная решетки, а для температуры 80 К, длина пробега АЛЭ, становится равной $376 a$.

Таким образом, вследствие создания треков и перекрывания треков пространство для свободного движения ЭВ резко сужается, что приводит к уменьшению АЛЭ, а при создании Френкелевских пар дефектов, они из-за невозможности разбегания будут аннигилировать. Поскольку эти дефекты не снижают конверсионную эффективность кристалла CsI:Tl, но участвуют в сцинтилляционном процессе, в виде ре-абсорбции энергии от Tl^+ -центров.

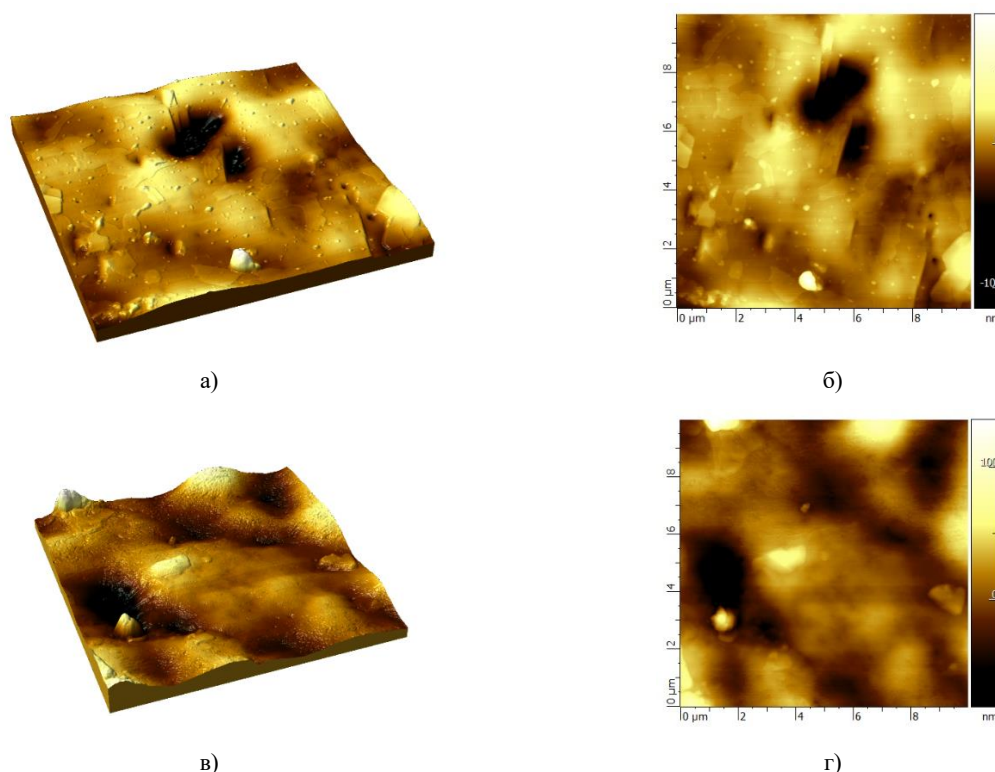


Рисунок 5. АСМ снимки кристаллов CsI:Tl облученных ионами 230 МэВ ^{132}Xe до флюенса $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² при 295 К в 3D формате (а) и в 2D (б; до флюенса $1 \cdot 10^{14}$ ион/см² в 3D формате (в) и в 2D (г)

Таблица 3. Оптические характеристики электронных возбуждений в монокристаллах CsI при 4,2 К [56]

E_g (эВ)	E_{ex} (эВ)	$E_{max}(\pi, \sigma)$ (эВ)/(нм)	$FWHM$ (π, σ) (эВ)	Поляризация	τ (с)	S_R^0	Конфигурация АЛЭ
6,4	5,81	3,68/337 4,27/290	0,51 –	π σ	$1,8 \cdot 10^{-6}$ –	0,367 0,265	слабое центровое смещение, центровое положение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовались особенности люминесценции монокристаллов CsI:Tl, облученного ионами 230 МэВ ^{132}Xe до флюенсов ($1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{14}$ ион/см²) при 295 К. Установлено уменьшение интенсивности РЛ и светового выхода люминесценции 553 нм. Если исходный (необлученный) кристалл обладает световыходом в 100%, то при увеличении флюенса наблюдается значительное снижение световыхода. При флюенсе 10^{11} ионов/см² световыход снижается примерно до 75%, при флюенсе 10^{12} ионов/см² – до 55%, а при флюенсе 10^{13} ионов/см² световыход падает до 40%.

Конверсионная эффективность для исследованных образцов не зависит от флюенса. Это означает, что в сцинтилляционном импульсе, который регистрируется до и после ионного облучения, кристаллом CsI:Tl испускается одинаковое число фотонов, т. е. радиационное повреждение не влияет на конверсионную эффективность кристалла CsI:Tl. Формирование треков не снижают конверсионную эффективность кристалла CsI:Tl, но участвуют в сцинтилляционном

процессе, в виде реабсорбции энергии от Tl^+ -центров, что приводит к деградации светового выхода.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP14870572).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Trefilova L. N. et al. Concentration dependence of the light yield and energy resolution of NaI: Tl and CsI: Tl crystals excited by gamma, soft X-rays and alpha particles // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Vol. 486. – No. 1–2. – P. 474–481. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00756-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00756-8)
2. Gramegna F., Abbondanno U., Andreano A., Bassini R., Bonutti F., Bruno M., Casini G., D'Agostino M., Manzini G., Margagliotti G.V., Mastinu P.F., Milazzo P.M., Moroni A., Squarcini M., Tonetto F., Vannini G., Vannucci L. A telescope with microstrip gas chambers for the detection of charged products in heavy-ion reactions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated

- Equipment. – 1997. – Vol. 389. – No. 3. – P. 474–478.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)01212-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01212-0)
3. Zazubovich S. Physics of halide scintillators // *Radiation Measurements*. – 2001. – Vol. 33. – No. 5. – P. 699–704.
[https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00086-5)
4. Popov A. I., Balanzat E. F centre production in CsI and CsI–TI crystals under Kr ion irradiation at 15 K // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2000. – Vol. 166. – P. 545–549. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00789-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00789-2)
5. Yakovlev V., Trefilova L., Alekseev V. [et al.] Influence of color centers on the luminescent response of radiation-damaged CsI:TI crystal // *Functional Materials*. 2018. – Vol. 25. – No. 1. – P. 13–20
6. Yakovlev V., Trefilova L., Lebedynskiy A. [et al.] Peculiarities of intrinsic luminescence excited by pulsed electron beam in CsI and CsI: CO₃ // *Journal of Luminescence*. – 2017. – Vol. 190. – P. 267–271
7. Ren Guo-Hao, Song Zhao-Hui, ZHANG Zi-Chuan, ZHANG Kan, Yang Fan, LI Huan-Ying, CHEN Xiao-Feng. Luminescence and Decay Time Properties of Pure CsI Crystals[J] // *Journal of Inorganic Materials*. – 2017, – Vol. 32(2). – P. 169–174.
8. Sajjad Shahmaleki, Faezeh Rahmani. Investigation on the scintillation characteristics of CsI(Tl) crystal with Eu dopant: Monte Carlo simulation using GATE code and experimental results // *Optik*. – Vol. 201. – 2020. – P. 163492
9. A. Knyazev, J. Park, P. Golubev, J. Cederkäll, et al. Simulations of light collection in long tapered CsI (TI) scintillators using real crystal surface data and comparisons to measurement // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – Vol. 1003. – 2021. – P. 165302
10. Suzart K.F. et al. Suzart K.F., Velo, A.F., Hamada M. M., Pereira M.C.C., Mesquita C.H. Characterization of the CsI(Tl) Crystalline Scintillating Detector Produced at IPEBraz // *J. Rad. Sci.* – Vol. 09-01A. – 2021. – P. 01–13
11. Amolo G. O., Erasmus R.M., Comins J.D., Derry T.E. Raman and optical absorption studies of proton bombarded CsI // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2006. – Vol. 250. – No. 1–2. – P. 359–362. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2006.04.169>
12. Chowdhury M., Watts S.J., Imrie D.C., McKemey A.K., Holmes-Siedle A.G. Studies of radiation tolerance and optical absorption bands of CsI (TI) crystals // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1999. – Vol. 432. – No. 1. – P. 147–156. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00471-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00471-4)
13. Hamada M. M. et al. Radiation damage of CsI (TI) scintillators: blocking of energy transfer process of Vk centers to TI+ activators // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2002. – Vol. 486. – No. 1–2. – P. 330–335. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00729-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00729-5)
14. Quaranta A. Recent developments of ion beam induced luminescence: radiation hardness study of thin film plastic scintillators // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2005. – Vol. 240. – No. 1–2. – P. 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.06.098>
15. Brecher C., Lempicki A., Miller S.R., Glodo J., Ovechkina E.E., Gaysinskiy V., Nagarkar V.V., Bartram R.H. Suppression of afterglow in CsI: TI by codoping with Eu²⁺—I: Experimental // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2006. – Vol. 558. – No. 2. – P. 450–457. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.119>
16. Fujiwara M. et al. Ion-induced luminescence of silica glasses // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 1996. – Vol. 116. – No. 1–4. – P. 536–541. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(96\)00103-6](https://doi.org/10.1016/0168-583X(96)00103-6)
17. Ishii M., Kobayashi M. Single crystals for radiation detectors // *Progress in crystal growth and characterization of materials*. – 1992. – V. 23. – P. 245–311. [https://doi.org/10.1016/0960-8974\(92\)90025-L](https://doi.org/10.1016/0960-8974(92)90025-L)
18. Agulló-López F. et al. Spectroscopic techniques to investigate aggregation and precipitation of cation impurities in alkali halides: application to impurity hardening and irradiation sensitivity // *Progress in Materials Science*. – 1986. – Vol. 30. – No. 4. – P. 187–286.
19. Johnson R. A., Orlov A. N. (ed.). *Physics of radiation effects in crystals*. – Elsevier, 2012. ISBN: 9780444568038 Elsevier Science Publishers B.V., 1986. – Vol. 13. – P. 723.
20. Itoh N., Tanimura K. Formation of interstitial-vacancy pairs by electronic excitation in pure ionic crystals // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1990. – P. 51. – No. 7. – P. 717–735. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(90\)90145-6](https://doi.org/10.1016/0022-3697(90)90145-6)
21. Bobbink G. J. et al. Study of radiation damage to long BGO crystals // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1984. – Vol. 227. – No. 3. – P. 470–477. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(84\)90203-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(84)90203-1)
22. Dauletbekova A., Elango A. Conversion of F-HA Pairs into α-IA Pairs in KBr: Li and KBr: Na X-Rayed at 80 K // *Physica Status Solidi (b)*. – 1981. – Vol. 108. – No. 2. – P. 299–305. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221080202>
23. Agulló-López F. et al. Spectroscopic techniques to investigate aggregation and precipitation of cation impurities in alkali halides: application to impurity hardening and irradiation sensitivity // *Progress in Materials Science*. – 1986. – Vol. 30. – No. 4. – P. 187–286. [https://doi.org/10.1016/0079-6425\(86\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0079-6425(86)90006-X)
24. Johnson R. A., Orlov A. N. (ed.). *Physics of radiation effects in crystals*. – Elsevier, 2012. ISBN: 9780444568038 Elsevier Science Publishers B.V., 1986. – Vol. 13. – P. 723.
25. Itoh N., Tanimura K. Formation of interstitial-vacancy pairs by electronic excitation in pure ionic crystals // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1990. – V. 51. – №. 7. – P. 717–735. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(90\)90145-6](https://doi.org/10.1016/0022-3697(90)90145-6)
26. Bobbink G. J. et al. Study of radiation damage to long BGO crystals // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1984. – Vol. 227. – No. 3. – P. 470–477. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(84\)90203-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(84)90203-1)

27. Bieler C. et al. Radiation damage of BGO and CsI (Tl) crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1985. – Vol. 234. – No. 3. – P. 435–442. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90988-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90988-X)
28. Schlögl S., Spitzer H., Wittenburg K. Radiation damage of CsI (Tl) crystals in a long term exposure at PETRA // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1985. – Vol. 242. – No. 1. – P. 89–94. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90891-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90891-5)
29. Kobayashi M., Sakuragi S. Radiation damage of CsI (Tl) crystals above 103 rad // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1987. – Vol. 254. – No. 2. – P. 275–280. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90675-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90675-9)
30. Woody C. L. et al. Readout techniques and radiation damage of undoped cesium iodide // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1990. – Vol. 37. – No. 2. – P. 492–499. <https://doi.org/10.1109/23.106667>
31. Woody C. L. et al. Radiation damage in undoped CsI and CsI (Tl) // IEEE transactions on nuclear science. – 1992. – Vol. 39. – No. 4. – P. 524–531. <https://doi.org/10.1109/23.159659>
32. Kobayashi M. et al. Radiation hardness of undoped CsI crystals against high energy protons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Vol. 328. – No. 3. – P. 501–505. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90666-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90666-6)
33. Wei Z., Zhu R. A study on undoped CsI crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Vol. 326. – No. 3. – P. 508–512. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90852-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90852-9)
34. Kobayashi M., Sakuragi S. Radiation damage of CsI (Tl) crystals above 103 rad // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1987. – Vol. 254. – No. 2. – P. 275–280. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90675-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90675-9)
35. Bobbink G. J. et al. Study of radiation damage to long BGO crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1984. – Vol. 227. – No. 3. – P. 470–477. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(84\)90203-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(84)90203-1)
36. Kobayashi M., Sakuragi S. Radiation damage of CsI (Tl) crystals above 103 rad // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1987. – Vol. 254. – No. 2. – P. 275–280. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90675-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90675-9)
37. Woody C. L. et al. Readout techniques and radiation damage of undoped cesium iodide // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1990. – Vol. 37. – No. 2. – P. 492–499. <https://doi.org/10.1109/23.106667>
38. Woody C. L. et al. Radiation damage in undoped CsI and CsI (Tl) // IEEE transactions on nuclear science. – 1992. – Vol. 39. – No. 4. – P. 524–531. <https://doi.org/10.1109/23.159659>
39. Kobayashi M. et al. Radiation hardness of undoped CsI crystals against high energy protons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Vol. 328. – No. 3. – P. 501–505. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90666-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90666-6)
40. Wei Z., Zhu R. A study on undoped CsI crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Vol. 326. – No. 3. – P. 508–512. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90852-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90852-9)
41. Bieler C. et al. Radiation damage of BGO and CsI (Tl) crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1985. – Vol. 234. – No. 3. – P. 435–442. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90988-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90988-X)
42. Kobayashi M. et al. Radiation hardness of undoped CsI crystals against high energy protons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Vol. 328. – No. 3. – P. 501–505. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90666-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90666-6)
43. Popov A. I., Balanzat E. F centre production in CsI and CsI–Tl crystals under Kr ion irradiation at 15 K // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2000. – Vol. 166. – P. 545–549. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00789-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00789-2)
44. Quaranta A. et al. Radiation damage mechanisms in CsI (Tl) studied by ion beam induced luminescence // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2008. – Vol. 266. – No. 12–13. – P. 2723–2728. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.03.195>
45. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM–The stopping and range of ions in matter (2010) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – Vol. 268. – No. 11–12. – P. 1818–1823.
46. Popov A. I., Balanzat E. F centre production in CsI and CsI–Tl crystals under Kr ion irradiation at 15 K // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2000. – Vol. 166. – P. 545–549. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00789-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00789-2)
47. Globus M. E., Grinyov B. V. On the mechanism of gamma-irradiation induced changes in the conversion efficiency of CsI (Tl) scintillators // Functional materials. – 1996. – Vol. 3. – No. 2. – P. 231–232. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.034>
48. Ratner M., Grinyov B., Ratner A. Manifestations of charged lattice defects in excitonic luminescence and control over properties of wide-band scintillation crystals // Radiation measurements. – 2004. – Vol. 38. – No. 4–6. – P. 627–632. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.02.001>
49. Hamada M. M. et al. Radiation damage of CsI (Tl) scintillators: blocking of energy transfer process of V_k centers to Tl⁺ activators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Vol. 486. – No. 1–2. – P. 330–335. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00729-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00729-5)

50. Shpilinskaya L. N. et al. Radiation damage factors of CsI (TI) crystals. – 2000.
51. Beylin D. M. et al. Study of the radiation hardness of CsI (TI) scintillation crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2005. – Vol. 541. – No. 3. – P. 501–515. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.11.023>
52. Chowdhury M. A. H. et al. Studies of radiation tolerance and optical absorption bands of CsI (TI) crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1999. – Vol. 432. – No. 1. – P. 147–156. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00471-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00471-4)
53. Zhu R. Radiation damage in scintillating crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1998. – Vol. 413. – No. 2–3. – P. 297–311. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00498-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00498-7)
54. Longo S., Roney J. M. Radiation hardness of 30 cm long CsI (TI) crystals // Journal of Instrumentation. – 2016. – Vol. 11. – No. 08. – P. P08017. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/08/P08017>
55. Globus M. E., Grinyov B. V. On the mechanism of gamma-irradiation induced changes in the conversion efficiency of CsI(Tl) scintillators // Functional materials. – 1996. – Vol. 3. – No. 2. – P. 231–232.
56. Wu Z., Yang B., Townsend P. D. Radioluminescence and thermoluminescence properties of X-ray-irradiated pure CsI // Journal of luminescence. – 2008. – Vol. 128. – No. 7. – P. 1191–1196. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2007.11.091>
57. Kan'no K., Tanaka K., Hayashi T. New aspects of intrinsic luminescence in alkali halides // Atomic Processes Induced By Electronic Excitation In Non-Metallic Solids- Proceedings Of The Us-japan Seminar. – World Scientific, 1990. – P. 253. <https://doi.org/10.1142/9789814540872>

ЖЫЛДАМ Хе ИОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН CsI:TI КРИСТАЛДАРЫНЫҢ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

А. Т. Акилбеков¹, Г. М. Баубекова¹, Р. Н. Асылбаев², А. К. Даулетбекова¹,
Г. М. Аралбаева^{1*}, Ж. Т. Карипбаев¹, К. Бурканова¹

¹⁾ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КеАҚ, Астана, Қазақстан

²⁾ Мәргұлан университеті, Павлодар, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: agm_555@mail.ru

Сцинтилляциялық CsI:TI кристалдары ядролық физика және жоғары энергиялар физикасы бойынша эксперименттерде кеңінен қолданылады. Бұл жұмыста CsI:TI кристалдарының люминесценция қасиеттері зерттеліп, талданды, олар 230 МэВ ¹³²Xe иондарымен сәулелену нәтижесінде ($1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{14}$ ион/см² флюенстері кезінде) 295 К температурасында зерттелді (Астана қаласындағы ДЦ-60 үдеткіші). Зерттеу оптикалық абсорбция және люминесценция спектроскопиясы әдістерімен, сондай-ақ уақытпен шешілетін оптикалық стимулденген люминесценция әдісімен жүргізілді. Беткі қабаты атом-күштік микроскопия көмегімен зерттелді. Сцинтилляциялық 553 нм толқын ұзындығындағы жарық шығару интенсивтілігінің және оның жарық шығу коэффициентінің флюенс ұлғаюымен төмендегені анықталды. Зерттелген үлгілердің конверсиялық тиімділігі флюенске тәуелсіз. Демек, радиациялық зақымдану CsI:TI кристалының конверсиялық тиімділігіне әсер етпейді. Тректердің түзілуі CsI:TI кристалының конверсиялық тиімділігін төмендетпейді, бірақ сцинтилляциялық процесске қатысады, TI⁺ орталықтарынан энергияның қайта жұтылуы арқылы, бұл жарық шығудың төмендеуіне әкеледі.

Түйін сөздер: CsI монокристалы, сцинтилляциялық люминесценция, иондық сәулелену, жарық шығу, конверсиялық тиімділік, иондық тректер.

LUMINESCENCE FEATURES OF CsI:Tl CRYSTALS IRRADIATED WITH FAST Xe IONS

A. T. Akilbekov¹, G. M. Baubekova¹, R. N. Asylbaev², A. K. Dauletbekova¹,
G. M. Aralbayeva^{1*}, Zh. T. Karipbayev¹, K. Burkanova¹

¹⁾ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²⁾ Margulan University, Pavlodar, Kazakhstan

* E-mail for contacts: agm_555@mail.ru

Scintillation crystals CsI are widely used in nuclear physics and high-energy physics experiments. This work presents the study and analysis of luminescent properties of CsI:Tl crystals induced by irradiation with 230 MeV ¹³²Xe ions up to fluences ($1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{14}$ ions/cm²) at 295 K (DC-60 accelerator, Astana, Kazakhstan). The research was conducted using optical absorption and luminescence spectroscopy methods, as well as time-resolved optically stimulated luminescence. The surface was studied using atomic force microscopy. A decrease in the intensity of the scintillation emission band at 553 nm and its light yield with increasing fluence was established. The conversion efficiency of the studied samples does not depend on fluence. Therefore, radiation damage does not affect the conversion efficiency of the CsI:Tl crystal. Track formation does not reduce the conversion efficiency of the CsI:Tl crystal but participates in the scintillation process through energy reabsorption from Tl⁺ centers, leading to light yield degradation.

Keywords: CsI single crystal, scintillation luminescence, ion irradiation, light yield, conversion efficiency, ion tracks.