4. Radiometer Model 501 UVA Radiometer // EniseyLab. – URL: https://eniseylab.ru/oborudovanie/solarlight/ozonometr/radiometr-model-501-uva-radiometer
5. Ritchie H., Roser M. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? // Our World in Data. – 2023. – 13 November.
6. Angélil O., Stone D.A., Tadross M. et al. Attribution of extreme weather to anthropogenic greenhouse gas emissions: sensitivity to spatial and temporal scales // Geophysical Research Letters. – 2014. – Vol. 41, No. 6. – P. 2150–2155. DOI: 10.1002/2014GL059234.
7. Zhao S. Is global warming mainly caused by anthropogenic greenhouse gas emissions? // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2011. – Vol. 33, No. 21. – P. 1985–1992. DOI: 10.1080/15567030903515013.
8. Tsai K.T., Lin T.P., Hwang R.L. et al. Carbon dioxide emissions generated by energy consumption of hotels and homestay facilities in Taiwan // Tourism Management. – 2014. – Vol. 42. – P. 13–21.
9. Лубсанова Т.М. Дыхание почв Селенгинского среднегорья // Пространственно-временная организация почвенного покрова: теоретические и прикладные аспекты: материалы международной научной конференции. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 270–272.
10.Saxena P., Sonwani S., Saxena P. et al. Criteria air pollutants: environmental and health effects // Air Pollutants and Their Environmental and Health Impacts. – 2019. – P. 49–82.
11.Microscopic threat: PM10 and PM2.5 particles // MSULAB. – URL: https://www.msulab.ru/knowledge/air/microscopic-threat-particles-pm10-and-pm2-5/ (дата обращения: 31.05.2026).

**Рецензент: биология илимдеринин кандидаты, профессор Атанаев Т.Б.**

УДК:538.93
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-404-321

**Шункеев К.Ш., Сагимбаева Ш.Ж., Кенжебаева А.А., Жумабаев Д.Д., Убаев Ж.К., Тайиров М.М.**
К.Жубанов атындагы Актөбө аймактык университети, Актөбө ш., Казакстан,
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
**Шункеев К.Ш.,[1]Сагимбаева Ш.Ж.,[1]Кенжебаева А.А.,[1]Жумабаев Д.Д.,[1] Убаев Ж.К.,[1]Тайиров М.М.[2]**
Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, г. Актобе, Казахстан,[1]
КНУ имени Жусупа Баласагына[2]
**Shunkeyev K.Sh., Sagimbayeva Sh.Zh., Kenzhebayeva A.A., Zhumabayev D.D., Ubaev Zh.K., Taiirov M.M.**
K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan,
KNU Jusup Balasagyn

ORCID 0009-0003-5764-5264[2]

## БРИДЖМАН ЫКМАСЫНА НЕГИЗДЕЛГЕН АРГОН АТМОСФЕРАСЫНДА ЩЕЛОЧТУК-ГАЛОГЕНДҮҮ КРИСТАЛЛДАРДЫ ӨСТҮРҮҮНҮН САНАРИПТИК ТЕХНОЛОГИЯСЫ
## ЦИФРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЩЕЛОЧНОГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА БРИДЖМАНА
## DIGITAL TECHNOLOGY FOR ALKALI HALIDE CRYSTALS GROWTH VIA THE BRIDGMAN METHOD IN AN ARGON ATMOSPHERE

**Кыскача мүнөздөмө:** Щелочтук-галогендүү кристаллдарды (ЩГК) тазалоо жана өстүрүү процесси KCl:Li кристаллынын мисалында эксперименталдык кристалл өстүрүүчү түзүлүштө (Across International, АКШ) көрсөтүлдү. Процесс төмөнкү ырааттуу этаптарды камтыды: (i) чийки зат салынган кварц ампуласы жайгаштырылган кварц реакторунда терең статикалык вакуумду ($10^{-3}$ Па же $10^{-6}$ Торр) түзүү; (ii) агрессивдүү галогендүү буулардын бууланууу таасирин басаңдатуу максатында бөлмө температурасында жогорку тазалыктагы аргонду 0,3÷0,5 бар деңгээлине чейин киргизүү. Бул учурда расплав температурасына (770÷800 °C) жеткенде басымдын 1,1÷1,3 бар деңгээлине чейин жогорулашы эсепке алынган. Кристалл өстүрүү процесси SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) системасынын протоколуна жана MCGS (Monitor and Control Generated System) адам-машина интерфейси (HMI) платформасына ылайык так жүргүзүлдү. Мунун натыйжасында «өтө ысык» кристаллды 20÷30 °C/саат ылдамдыкта жай муздатуу режими биринчи жолу ишке ашырылды. Бул көрсөткүч окшош кристалл өстүрүү системаларынан айырмаланып турат. Жаңы комплекстүү кристалл өстүрүү системасы салттуу конструкциялардан айырмаланып төмөнкүлөрдү талап кылбайт: (i) ампулаларды ширетип жабуу үчүн кварцедув лабораторияларын, анткени чийки зат салынган кварц ампуласы кварц реакторунун ичинде вакуум шартында жайгашат; (ii) түзүлүштү кошумча суу менен муздатууну, себеби кристаллдашуу борбору термоблок аркылуу камсыздалып, кварц түтүгүнүн уч жактары ысык зонадан алыстатылган. Сыноо режиминде жаңы өстүрүлгөн KCl:Li кристаллдарынын рентгенолюминесценция спектрлери литий иондорунун концентрациясына жараша катталды. Натыйжада люминесценциянын жарык чыгышын жогорулатуу боюнча күтүлгөн эффект аныкталды. Бул эффект литий иондорунун талаасында электрон-тешик жуптарынын рекомбинациясы менен шартталат. Алынган натыйжа сцинтилляциялык детекторлордун илимий негиздерин иштеп чыгуу үчүн маанилүү параметр болуп саналат.

**Аннотация:** Продемонстрирован процесс очистки и выращивания щелочногалоидных кристаллов (ЩГК) на примере кристалла KCl:Li на экспериментальной установке для выращивания кристаллов (производство компании Across International, США) посредством выполнения следующих последовательных операций: (i) создание глубокого статического вакуума ($10^{-3}$ Па или $10^{-6}$ Торр) в кварцевом реакторе, содержащем кварцевую ампулу с исходным сырьем; (ii) введение высокочистого аргона при комнатной температуре до уровня 0,3÷0,5 бар с расчётом достижения давления 1,1÷1,3 бар при температуре расплава (770÷800 °C), что использовалось как технологический приём подавления испарения агрессивных галогенных паров. Процесс выращивания осуществлялся строго в соответствии с протоколом систем SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) и MCGS (Monitor and Control Generated System) - платформы человеко-машинного интерфейса (HMI). Благодаря этому впервые была реализована технология медленного охлаждения «сверхгорячего» кристалла со скоростью 20÷30 °C/ч, что отличается от режимов, применяемых в аналогичных системах выращивания кристаллов. Новая комплексная система выращивания кристаллов, в отличие от традиционных конструкций, не требует: (i) кварцедувных лабораторий для запаивания ампул, поскольку сырьё в кварцевой ампуле находится под вакуумом внутри кварцевого реактора; (ii) дополнительного водяного охлаждения установки, так как центр кристаллизации обеспечивается термоблоком, а концевые участки кварцевой трубы удалены от горячей зоны. В тестовом режиме зарегистрированы спектры рентгенолюминесценции свежевыращенных кристаллов KCl:Li в зависимости от концентрации ионов лития. В результате выявлен ожидаемый эффект увеличения светового выхода люминесценции, обусловленный рекомбинацией электронно-дырочных пар в поле ионов лития. Полученный результат является важным параметром для разработки научных основ сцинтилляционных детекторов.

**Abstract:** The process of purification and growth of alkali halide crystals (AHC) was demonstrated, using a KCl:Li crystal as an example, on an experimental crystal growth installation (manufactured by Across International, US) using the following sequential steps: (i) creating a deep static vacuum ($10^{-3}$ Pa or $10^{-6}$ Torr) in a quartz reactor containing a quartz ampoule with raw materials; (ii) adding high-purity argon at room temperature to a level of 0.3÷0.5 bar with the expectation of obtaining 1.1÷1.3 bar upon reaching the melt

temperature (770÷800°C), as a technological method for suppressing the effect of evaporation of aggressive halogen vapors. The growth process was carried out strictly according to the SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system protocol and the MCGS (Monitor and Control Generated System) human-machine interface (HMI) platform. This enabled the first slow cooling of the "super-hot" crystal at a rate of 20–30°C/hour, unlike similar crystal growth systems. Unlike traditional crystal growth systems, the new integrated crystal growth system does not require: (i) quartz tubes for sealing the ampoules, as the raw material is contained in a quartz ampoule under vacuum in a quartz reactor; (ii) additional water cooling of the system, as the crystallization center is provided by a thermal block and the ends of the quartz tube are removed from the hot zone. In test mode, X-ray luminescence spectra of freshly grown KCl:Li crystals were recorded as a function of lithium ion concentration. As a result, the expected effect of increasing the luminescence yield was discovered, which essentially involves the recombination assembly of electron-hole pairs in the lithium field. This is an important parameter for developing the scientific foundations of scintillation detectors.

**Негизги сөздөр:** щелочтук-галогендүү кристалл (ЩГК); монокристалл; өстүрүү; Бриджман ыкмасы; рентгенолюминесценция (РЛ); радиациялык дефекттер; экситон сымал люминесценция (ЭСЛ).

**Ключевые слова:** щелочногалоидный кристалл (ЩГК); монокристалл; выращивание; метод Бриджмана; рентгенолюминесценция (РЛ); радиационные дефекты; экситоноподобная люминесценция (ЭПЛ).

**Keywords:** alkali halide crystal (AHC); single crystal; growth; Bridgman method; X-ray luminescence (XRL); radiation defects; exciton-like luminescence (ELL).

Результаты многолетнего исследования поведения электронных возбуждений в ЩГК [1; 2; 3] становятся основой активной разработки сцинтилляторов нового поколения и совершенствования классических сцинтилляторов для их использования в компьютерной и позитронно-эмиссионной томографии, системах визуализации изображений [4; 5; 6; 7; 8]. Одновременно продолжается поиск дозиметрических материалов, примером которых могут служить термолюминесцентные дозиметры на основе монокристаллов LiF. Благодаря тканеэквивалентности LiF к гамма-излучению такие термолюминесцентные дозиметры успешно применяются в радиобиологии, лучевой терапии, а также при биологической защите от нейтронов ядерных реакторов [9; 10; 11; 12; 13]. Отметим, что в качестве главных дозиметрических используют высокотемпературные пики термостимулированной люминесценции (ТСЛ) с максимумами при 473 К (детектор TLD-100) и 490 К (TLD-700H) [7; 8; 9; 14; 15; 16].

Активное применение современных материалов, включая криодетекторы и нанотрубки различной формы [17; 18; 19; 20; 21], также стимулирует фундаментальные исследования в условиях целенаправленного воздействия локальной [22; 23; 24; 25], одноосной [26; 27] и гидростатической деформаций [28; 29; 30].

Многообразие фундаментальных исследований требует соответствующих образцов для поиска функциональных материалов. В настоящее время существует острая необходимость выращивания кристаллов с заданными физико-химическими свойствами, отвечающими стратегическому направлению исследований по разработке и улучшению сцинтилляционных и дозиметрических характеристик.

Нами зарегистрирован эффект повышения выхода рентгенолюминесценции в полосах 2,8 эВ и 3,1 эВ, возрастающий с увеличением концентрации ионов натрия и температуры образца. Данный эффект интерпретируется как результат сборки коррелированных электронно-дырочных (e–h) пар вблизи ионов натрия с последующей излучательной релаксацией из экситоноподобного состояния [31].

На основании экспериментальных данных по усилению выхода рентгенолюминесценции, обнаруженному на примере кристалла KCl:Na, проанализированы возможные условия проявления

данного эффекта в ряду хлоридов щелочных металлов, допированных катионами-гомологами меньшего размера по сравнению с собственным катионом решётки [22; 31].

Из анализа следует: во-первых, плотность кристаллов увеличивается в ряду NaCl (2,1 г/см³) → KCl (2,2 г/см³) → RbCl (2,76 г/см³) → CsCl (3,97 г/см³), что создаёт благоприятные условия для максимального поглощения энергии ионизирующего излучения; во-вторых, увеличивается соотношение радиусов собственных катионов к допированным катионным примесям: KCl:Na (1,36) → RbCl:Na (1,5) → CsCl:Na (1,7), что способствует формированию глубокой потенциальной ямы для сборки электронно-дырочных пар.

На предлагаемой установке успешно выращены ряд кристаллов, в том числе KCl:Na и RbCl:Na в диапазоне концентрации ионов натрия – 100÷1000 ppm. Сложным для выращивания является кристалл KCl:Li. Это связано с тремя причинами: во-первых, LiCl по сравнению с NaCl является супер гигроскопичным и требует обращения исключительно в атмосфере инертного газа (аргон, гелий), во-вторых, коэффициент встройки лития в матрицу KCl и RbCl очень низкий ($k_{Li}$ = 0.02) по сравнению с натрием ($k_{Na}$= 0.3), что затрудняет процесс активирования (допирования), в-третьих, соотношение радиусов калия и лития существенно различается – KCl:Li (1.95) или ( $\frac{r(K^+)}{r(Li^+)} = 1,95$ ).

В этой связи процедуры выращивания кристаллов будут демонстрироваться на примере кристалла KCl:Li.

Очистка и выращивание кристаллов осуществлены на универсальной экспериментальной установке по выращиванию кристаллов производства компании «Across International» (США) [32].

Экспериментальная установка по выращиванию кристаллов (рисунок 1) отличается от аналогов введением современных подходов, как по конструкции, так и по содержанию процесса роста кристаллов, в результате которого становится возможным выращивание в условиях атмосферы инертного газа (азот, гелий и т.д.) после создания высокого технического вакуума ($10^{-6}$Торр) широкого круга монокристаллов: полупроводников (германий (Ge), теллурид кадмия (CdTe), селенид цинка (ZnSe) и антимонид индия (InSb)); щелочногалоидных кристаллов и фторидов редкоземельных металлов ($CaF_2$ и $BaF_2$) в качестве оптических и лазерных материалов, а также сцинтилляторов (NaI, CsI) и дозиметров (LiF).



**Рисунок 1. Экспериментальная установка по выращиванию кристаллов методом Бриджмана в аргоновой атмосфере после создания высокого технического вакуума ($10^{-6}$ Торр)**

Центральным узлом установки является длинная кварцевая труба длиной 145 см, внутри которой размещается кварцевая ампула с сырьём для выращивания кристаллов, подвешиваемая к верхней части установки (рисунок 1). Верхний и нижний концы кварцевой трубы герметизируются специальными фланцами с использованием вакуумно-плотных соединений. В традиционной конструкции вакуумирование кварцевой ампулы с сырьём осуществлялось путём её запаивания в кварцедувных лабораториях, что в новой конструкции не требуется. Удалённость концевых участков кварцевой трубы от горячей зоны печи, температура которой достигает 1200 °C, а также высокий вакуум $10^{-6}$ Торр позволяют отказаться от дополнительного водяного охлаждения установки [32].

Вакуумирование кварцевой трубы до уровня $10^{-6}$ Торр осуществляется современными безмасляными форвакуумным (IDP 7 Agilent) и турбомолекулярным (KYKY FF 100/300) насосами, управляемыми и контролируемыми специальными вакуумными устройствами. Они поддерживают работоспособность системы в течение длительного времени - 30÷50 часов - в процессе роста кристаллов.

Управление установкой осуществляется через цифровой многосегментный контроллер серии Eurotherm 3204 [32], который позволяет по заданной программе поддерживать температурный режим печи между зонами и обеспечивает её вертикальное перемещение с различными скоростями на протяжении всего цикла: от плавного нагрева до рабочих температур, гомогенизации расплава, роста и завершающего отжига кристаллов.

Eurotherm 3204 представляет собой цифровой PID-регулятор температуры, который напрямую подключается к термопарам и управляет нагревателями, обеспечивая задание температурных параметров и поддержание стабильных температурных плато. Это критически важно для формирования дефектной структуры и равномерного роста кристалла.

В Eurotherm сегмент включает 2 этапа: «разгон» – контролируемое изменение температуры; «выдержка» – фиксация температуры на заданном значении. Если физически первая стадия отвечает за диффузию и подвижность атомов и ионов, а также формирование и релаксацию дефектов, то вторая стадия – за завершенность фазовых превращений, стабилизируя структуру перед следующим сегментом.

Заданная температура выдержки не изменяется во времени, поэтому выдержка формально представляет собой изотермический режим. Однако в реальных условиях, в строгом термодинамическом смысле, данный режим следует рассматривать как квазиизотермический вследствие воздействия множества факторов. Тем не менее средняя температура остаётся постоянной и отсутствует целенаправленный температурный градиент, поскольку на данном этапе не предусматривается программное изменение уставки, как во время разгона. Стабильность выдержки зависит от параметров PID-регулятора (в нашем случае ошибка регулирования не превышает ±1–2 °C при корректной настройке), а также от правильно выбранной скорости нагрева и охлаждения, поскольку при интенсивном ramping интегральная составляющая может накапливать ошибку, вследствие чего при достижении заданной температуры возникает эффект перерегулирования.

Другой особенностью программирования в системе Eurotherm является возможность отключения отдельных этапов. Например, в сегменте первичного нагрева сырья, предназначенного для дегазации и удаления влаги, выдержка не требуется, поскольку структура материала ещё не формируется. При выходе на рабочий температурный диапазон, когда происходит выравнивание температурного поля и активируется ионная подвижность, сырьё подготавливается к высокотемпературной фазе, поэтому выдержка становится обязательной для обеспечения последующего равномерного роста кристалла. Формирование расплава осуществляется в высокотемпературном сегменте, где происходят плавление и гомогенизация, при этом оба этапа также являются обязательными.

Диспетчерское управление режимами работы, включая сбор и отображение параметров оборудования (скорость, положение и др.) в режиме реального времени, осуществляется системой SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), средой функционирования которой является MCGS

(Monitor and Control Generated System) - платформа человеко-машинного интерфейса (HMI) [32]. Роль MCGS заключается в управлении технологическим процессом посредством ввода оператором команд и установок, а также отображения состояния приводов, датчиков и аварийных сигналов.

При одной загрузке сырья без герметизации вакуумной системы установка обеспечивает работу в трёх режимах: во-первых, очистку от кислородсодержащих примесей (OH, $O_2$, $H_2O$ и др.); во-вторых, очистку от примесей, коэффициент встройки которых отличается от единицы ($k << 1$), методом перекристаллизации («зонной плавки»); в-третьих, выращивание как чистых, так и допированных кристаллов длиной 5÷10 см. Диаметр кристалла определяется диаметром кварцевой ампулы и может составлять 20, 30, 40 и 50 мм.

Технология очистки и выращивания щелочногалоидных кристаллов (ЩГК) подробно изложена в обзоре Гиндиной и соавт. [33], при этом основные положения данной технологии реализованы в представленной экспериментальной установке, позволяющей последовательно выбирать режимы эксплуатации.

Очистка от кислородсодержащих примесей (OH, $O_2$, $H_2O$ и др.) осуществлялась путём высушивания порошкообразного сырья KCl при температуре 80÷85 °C в течение длительного времени (до одних суток) под высоким вакуумом. Для этого для трёх зон задавалось одинаковое значение температуры (80÷85 °C). Турбомолекулярный насос (KYKY) обеспечивает достижение высокого вакуума порядка $10^{-6}$ Торр, необходимого для удаления остаточных газов (кислорода, азота и др.), которые могут окислять расплав или встраиваться в кристаллическую решётку выращиваемого образца.

Обязательным условием эффективной очистки от кислородосодержащих примесей является температура сырья KCl (не выше $100^0$C), так как выше этой температуры образуются оксиды, что затрудняет очистку от кислородосодержащих примесей.

Таким образом, подходящий температурный режим и высокий вакуум стимулируют максимальную очистку сырья от кислородосодержащих примесей, индикатором которого является постепенный рост уровня вакуума.

Перед началом выращивания кристаллов необходима предварительная очистка сырья не только от кислородосодержащих примесей (OH, $O_2$, $H_2O$), но и от щелочноземельных($Ca^{2+}$, $Sr^{2+}$, $Ba^{2+}$) и поливалентных примесей($Al^{3+}$, $Sm^{3+}$ $Eu^{3+}$ и т.д.).

Наиболее зарекомендованным методом очистки является метод зонной плавки, основанный на равновесном распределении примеси между фазами расплав-кристалл [33]. При этом эффективная очистка ЩГК возможна в том случае, если коэффициент (k) кристаллизации (распределение, встройки), равный отношению концентрации примеси в кристалле ($C_{кр.}$) и расплаве ($C_{расп}$), значительно отличается от единицы:

$$k = \frac{C_{кр}}{C_{расп}} < 1.$$

Сущность зонной плавки состоит в том, что по слитку длиной L перемещается расплавленная зона длиной l, в результате чего примеси вытесняются в направлении перемещения зоны, так как $k<1$, и в расплаве становится больше концентрации примеси, чем в кристалле.

Метод зонной плавки максимально эффективен для очистки кристаллов от тех примесей, коэффициент встройки в которых меньше единицы ($k<1$) [33]. Расчеты показывают, что при $k = 0,2$ после проходов 10 зон кристалл должен очищаться от таких примесей на 3 порядка, а после бесконечного числа проходов – до 6 порядков. Поскольку для щелочноземельных металлов, кислородосодержащих примесей щелочных металлов коэффициент встройки в ЩГК находится в пределах от 0,019 до 0,2, то для них можно обеспечить высокий уровень очистки методом зонной плавки, что показывает результаты пламенной фотометрии.

Таким образом, метод перекристаллизации, который реализуется установкой, позволяет получать ЩГК с очень низкой концентрацией щелочноземельных и поливалентных примесей (до уровня $10^{-2}$

ppm). После завершения очистки сырья от кислородосодержащих примесей печь переходит в режим зонной плавки. Для этого кварцевая ампула с сырьем перемещается в первую (верхнюю) зону, и задается также одинаковое значение температуры выше точки плавления сырья (например, для KCl выше 770ºC). После достижения заданных температур печь с малой скоростью (1-3 мм/ч) начинает перемещаться вверх. При проходе трех зон сырье в кварцевой ампуле превращается в расплав, а в межзонных пространствах – в кристаллическое состояние.

Однако, даже при наиболее благоприятных условиях нельзя ожидать очистки ЩГК от катионов и анионов гомологов больше, чем на порядок. Например, KCl от рубидия и брома, так, как k>0,7. Поэтому для получения методом зонной плавки ЩГК с повышенной чистотой требуется предварительная очистка основания от примесей гомологов. Для очистки щелочногалоидного сырья от примесей гомологов, которые имеют близкий к единице коэффициент распределения и меньшее сродство к электрону, чем галоид оснований, предлагается обработка их в расплавленном состоянии газообразным галоидом, входящим в состав основного вещества.

После процедуры очистки сырья от кислородсодержащих (OH, $O_2$, $H_2O$), щелочноземельных ($Ca^{2+}$, $Sr^{2+}$, $Ba^{2+}$) и поливалентных ($Al^{3+}$, $Sm^{3+}$, $Eu^{3+}$ и др.) примесей без нарушения герметичности системы и сохранения высокого вакуума начинается процесс выращивания кристалла, состоящий из следующих этапов:

1. При сохранении высокого технического вакуума ($10^{-6}$ Торр после отсоединения от вакуумной системы) в кварцевый реактор подаётся инертный газ аргон высокой чистоты марки 6.0 (99,9998 %) до уровня 0,3–0,5 бар при комнатной температуре с целью подавления процесса испарения сырья при высоких температурах. Основное требование заключается в том, чтобы давление расширенного аргона при высоких температурах (примерно 1,1–1,3 бар) было немного выше атмосферного давления (>1,0 бар). В этом случае исключается эффект подсоса воздуха извне, что является важным условием процесса выращивания кристалла. Иными словами, давление аргона внутри кварцевого реактора будет несколько выше внешнего давления и не представляет опасности для окружающей среды. В результате перечисленных операций сырьё KCl в кварцевой ампуле помещается в аргоновую среду.

2. Осуществляется нагрев трёх зон до рабочих температур (столбцы 1 и 2 таблицы 1). Для кристаллической матрицы KCl с целью сокращения эксплуатационного времени установки и формирования оптимальной «горячей зоны» в центре трёх зон разработан температурный профиль по аналогии с методом зонной плавки: первая зона - 800 °C, вторая зона - 785 °C, третья зона - 750 °C. Температура плавления кристалла KCl составляет 770 °C. При скорости нагрева 5 °C/мин рабочий режим достигается за 150÷160 минут (столбец 3 таблицы 1), после чего начинается этап выдержки при заданных температурах (столбцы 4–6 таблицы 1).

3. Продолжительность первичной выдержки, как правило, составляет 120÷130 минут, что необходимо для полной гомогенизации сырья, находящегося в кварцевой ампуле (столбец 4 таблицы 1).

4. Процесс выращивания кристалла начинается после задания необходимых параметров: скорости перемещения кварцевой ампулы (3 мм/ч), направления движения кварцевой ампулы (вверх или вниз), а также продолжительности процесса выращивания (1800 минут, строка 5), которая должна соответствовать времени выдержки заданных температур, установленных контроллерами для трёх зон.

5. Процесс охлаждения выращенного кристалла с заданной скоростью (20÷30 °C/ч) осуществляется при помощи контроллеров, обеспечивающих программное регулирование температуры трёх зон в синхронном режиме. Следует отметить, что замедленное охлаждение свежевыращенного кристалла в течение 2150 минут (строка 6), по сравнению с естественным охлаждением, является важным параметром для снятия термических напряжений в кристалле, что отсутствует в аналогичных установках для выращивания кристаллов.

Таким образом, без учёта предварительной очистки сырья на процесс выращивания кристалла KCl:Li при длине кварцевой ампулы 90 мм требуется более 70,5 часов (около 3 суток). На рисунке 2 представлены монокристаллы KCl:Li, выращенные по вышеописанной технологии.

**Таблица 1. Карта времени роста кристаллов (на примере, KCl:Li)**

| № | Темпе-ратура зон (°C) | Время (в минутах) Достижение рабочей температуры | Гомогенизация с учетом поправки | Рост кристалла со скоростью 3 мм/час. Длина ампулы – 90 мм. | Синхрони зация |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1-зона | 800 | 160 | 120 | | |
| 2-зона | 785 | 157 | 123 | 1 800 | 2 150 |
| 3-зона | 750 | 150 | 130 | | |

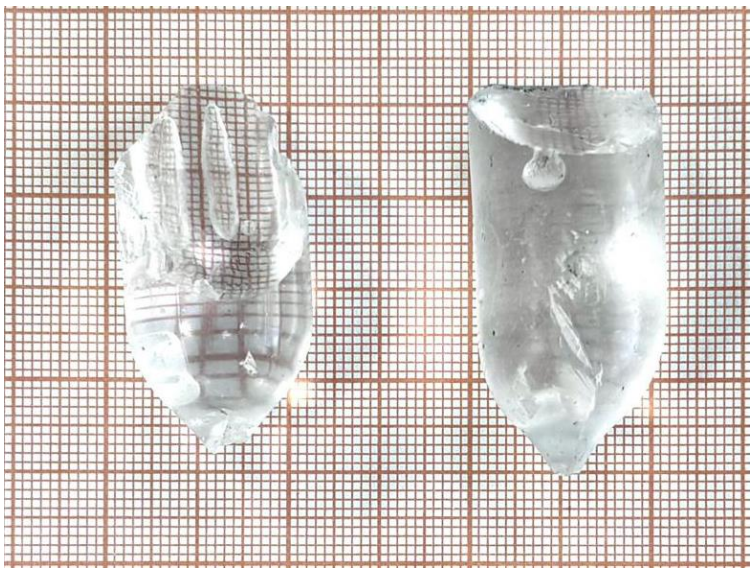


**Рисунок 2. Кристаллы KCl:Li, выращенные по методу Бриджмана в статическом режиме вакуумирования ($10^{-6}$ Торр) реактора с последующим созданием аргонной среды (1.1-1.3 бар) по заданной через HMI циклограмме**

Кристаллы KCl:Li выращивались на основе специально очищенного от кислородсодержащих примесей (OH) и анионов-гомологов (Br) сырья KCl с добавлением предварительно осушенного в вакууме порошка LiCl. Процедура взвешивания и перемешивания порошков KCl:LiCl осуществлялась в специальном боксе в атмосфере инертного газа, поскольку порошок LiCl является гигроскопичным. Исходная концентрация порошка LiCl в шихте (кварцевой ампуле), содержащей порошок KCl, составляла $1\times10^4$ ppm**.** С учётом коэффициента встройки лития (k = 0,023) в кристаллическую решётку KCl:Li максимальная концентрация ионов лития ($Li^+_k$) оценивалась в пределах 200 ppm. Полученное максимальное значение концентрации ионов лития (200 ppm) в KCl:Li согласуется с результатами пламенно-фотометрического анализа.

Концентрация лития определялась методом пламенной фотометрии на одноканальном фотометре модели M410 производства Sherwood Scientific (United Kingdom) [34] с использованием специального светового фильтра, обеспечивающего максимальное пропускание основной резонансной линии излучения атома лития (с максимумом при 670,8 нм) в процессе сжигания аэрозольной смеси раствора KCl:Li. По результатам абсорбционной спектроскопии уровень очистки от OH составил менее 0,1 ppm, что на три порядка выше по чистоте по сравнению с исходным сырьём.

Таким образом, вышеописанные технологии очистки и выращивания в условиях высокого технического вакуума ($10^{-6}$ Торр), аргоновой атмосферы, а также программное медленное охлаждение (более 35 часов) направлены на получение кристаллов высокой чистоты и структурного совершенства.

Радиационные дефекты создавались при комнатной температуре под воздействием тормозного рентгеновского излучения установки РУП-120 (с W-антикатодом), работающей в режиме 3 мА и 100 кВ при дозовой экспозиции 0,5÷1,0 Gy.

Регистрация спектров рентгенолюминесценции (РЛ), туннельной люминесценции (ТЛ) и термостимулированной люминесценции (ТСЛ) кристаллов проводилась с использованием высокоапертурного монохроматора MSD-2 и фотоумножителя Hamamatsu H8259-01, работающего в режиме подсчёта фотонов. Сканирование спектров кристаллов в диапазоне 6,0–1,5 эВ выполнялось с помощью программного обеспечения SpectraScan [35]. РЛ регистрировалась во время облучения кристаллов рентгеновскими лучами, а ТЛ - после завершения облучения ионизирующим излучением, как правило, при низких температурах.

Известно [1; 2], что в чистом кристалле KCl при низких температурах (4,2 К) интенсивность люминесценции при 2,3 эВ, интерпретируемая как люминесценция АЛЭ, достигает максимального значения, которое уменьшается с ростом температуры кристалла и к 40 К практически исчезает. В данной спектральной области в KCl наблюдаются люминесценция ЭВ, локализованных вблизи одиночных анионных вакансий (α-люминесценция при 2,6 эВ) [2; 36; 37], дивакансий (d-люминесценция при 3,1 эВ) [36; 38], квартетов вакансий (q-люминесценция при 3,4 эВ) [38], а также F′- и VK-центров (туннельная люминесценция при 3,8 эВ) [22; 39; 40]. В кристаллах KCl:Na также установлена люминесценция ЭПО, локализованных в поле одиночных (2,8 эВ) и парных (3,1 эВ) примесных ионов натрия [35].

Нами в спектре РЛ чистого кристалла KCl при комнатной температуре (300 К) зарегистрированы очень слабые неэлементарные полосы излучения с максимумами при 3,05÷3,2 эВ и 2,6÷2,8 эВ (кривая 1 рисунка 3).

Широкая полоса излучения характеризует суммарный вклад вышеуказанных взаимоконкурирующих люминесценций, связанных с неконтролируемыми вакансионными дефектами [36; 37; 38] или примесями [35]. Не исключено, что в зонно-очищенном кристалле KCl сохраняются следы катионов-гомологов (Li, Na), проявляющиеся люминесценцией ЭПО в их окружении [22; 31; 35].

В спектре РЛ кристалла KCl:Li, допированного крайне малой концентрацией ионов лития - до 50 ppm, появляется доминирующая полоса излучения с максимумом при 2,8 эВ, интенсивность которой существенно, более чем в 70 раз, превышает интенсивность соответствующей полосы в спектре РЛ чистого кристалла KCl (сравните кривые 1 и 2 на рисунке 3; таблица 1).

С ростом концентрации лития в кристалле KCl:Li интенсивность полосы излучения при 2,8 эВ продолжает увеличиваться. По сравнению с чистым кристаллом KCl она возрастает: при концентрации 100 ppm - в 179 раз; при концентрации 150 ppm - в 325 раз; при концентрации 200 ppm - в 433 раза (кривые 2, 3, 4 и 5 на рисунке 3; таблица 2).

С увеличением концентрации лития в кристаллах KCl:Li проявляется дополнительная полоса люминесценции с максимумом при 3,16 эВ, по-видимому, связанная с люминесценцией ЭПО в поле парных ионов лития по аналогии с кристаллом KCl:Na [35].

Из таблицы 2 следует, что экспериментальная установка для выращивания кристаллов (производство компании Across International, США) позволяет задавать концентрацию примеси, например лития, при одной загрузке, поскольку реализуется режим зонной плавки (перекристаллизации). В результате концентрация примеси в матрице KCl распределяется таким образом, что она увеличивается по длине кварцевой ампулы - до 70 мм - от центра кристаллизации, то есть от точки соприкосновения конусообразного дна кварцевой ампулы с термоблоком. В центре кристаллизации, на дне кварцевой ампулы, практически отсутствуют даже следы лития (строка 1); в средней части концентрация лития заметно повышается (строки 2 и 3), а в верхней части увеличивается до 200 ppm (строки 4 и 5). Напомним, что коэффициент встройки лития в матрицу KCl крайне низкий: k = 0,023 [33].

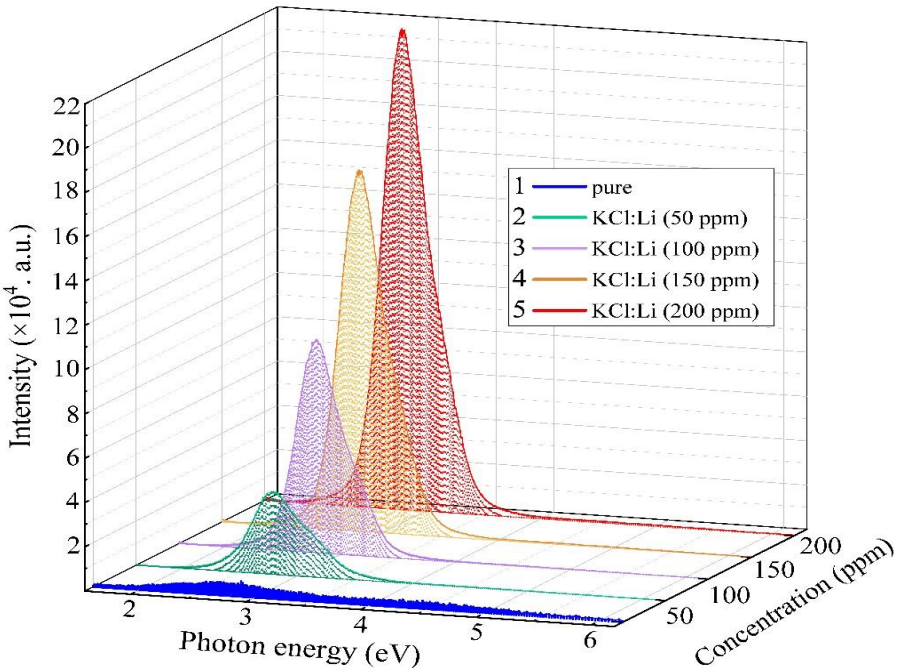



**Рисунок 3. Спектры рентгенолюминесценции кристаллов при 300К:**

1– KCl (чистый), 2 – KCl:Li (50 ppm), 3 – KCl:Li (100 ppm), 4 – KCl:Li (150 ppm), 5 – KCl:Li (200 ppm).

**Таблица 2. Зависимость интенсивности спектров рентгенолюминесценции кристаллической матрицы KCl, измеренных при комнатной температуре, от концентрации лития**

| № | Кристаллы | Соотношение интенсивностей ($I_{KCl:Li}$ / $I_{KCl}$) в области 2.8 eV | Соотношение интенсивностей ($I_{KCl:Li}$ / $I_{KCl}$) в области 3.1 eV |
|---|---|---|---|
| 1 | KCl (эталонный) | 1 | 1 |
| 2 | KCl:Li (50 ppm) | 75 | 65 |
| 3 | KCl:Li (100 ppm) | 179 | 141 |
| 4 | KCl:Li (150 ppm) | 325 | 231 |
| **5** | **KCl:Li (200 ppm)** | **433** | **309** |

В заключение отметим, что в кристалле KCl:Li (200 ppm) полосы излучения при 2,8 эВ и 3,1 эВ (кривая 4 рисунка 1) интенсивнее по сравнению с кристаллом KCl (кривая 1 рисунка 1) соответственно в 433 и 309 раз (таблица 1).

Эти экспериментальные результаты показывают, что полосы излучения с максимумами при 2,8 эВ и 3,1 эВ, коррелирующие с ростом концентрации лития в кристалле KCl:Li, с высокой вероятностью можно отнести к излучению ЭПО в поле одиночных и парных ионов лития соответственно. Об этом свидетельствует линейный рост интенсивности излучения с максимумами при 2,8 эВ и 3,1 эВ при увеличении концентрации лития, что характерно для люминесценции ЭПО в поле одиночных (2,8 эВ) и парных (3,1 эВ) ионов лития.

Интегральный спектр РЛ кристалла KCl:Li (150 ppm) разложен на гауссовы составляющие с максимумами при 3,16 эВ и 2,8 эВ; полуширины полос излучения составляют $\Delta 3{,}16 = 0{,}41$ эВ и $\Delta 2{,}8 = 0{,}36$ эВ (рисунок 4).

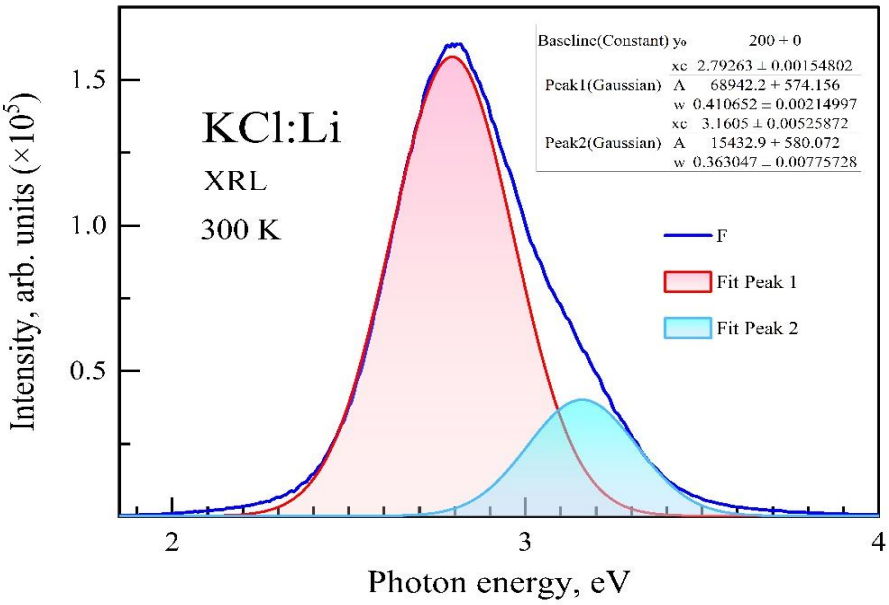



**Рисунок 4.** Спектр рентгенолюминесценции кристалла KCl:Li (150 ppm), разложенный на две гауссовы составляющие с максимумами при 2.8 эВ и 3.1 эВ. Регистрация спектров осуществлена при 300 К

На вставке к рисунку 4 представлены исходные данные, полученные в результате разложения полос на гауссовы составляющие, с указанием максимумов полос излучения, значений их полуширины, а также погрешностей расчётов, выполненных с использованием программы Origin.

Особое внимание привлекают зарегистрированные интенсивные спектры люминесценции при 2,8 эВ и 3,1 эВ в кристаллах KCl:Li, отсутствующие в чистых кристаллах KCl, а также эффект дальнейшего роста их интенсивности с увеличением концентрации лития (рисунок 3) при комнатной температуре (300 К), когда люминесценция экситонной природы с максимумом при 2,3 эВ уже потушена.

На основании наших предыдущих работ [34; 35] и результатов настоящего исследования можно предположить, что столь интенсивная люминесценция при 2,8 эВ и 3,1 эВ именно при высоких температурах (300–400 К) возможна за счёт сборки электронно-дырочных пар (e–h) в поле лёгких ионов лития ($Li^+$).

Данная формулировка будет справедлива только после проведения экспериментов по направленному воздействию на электронную и/или дырочную компоненту ЭПО, излучательная релаксация которого завершается в поле лития. При этом целесообразно выделить два вида рекомбинационной люминесценции в зависимости от подвижной компоненты: дырочно-электронную рекомбинационную люминесценцию - при рекомбинации нерелаксированных дырок с локализованными электронами; электронно-дырочную рекомбинационную люминесценцию - при рекомбинации свободных электронов с автолокализованными дырками.

Таким образом, на базе экспериментальной установки для выращивания кристаллов производства компании Across International (США) разработана уникальная технология очистки от кислородсодержащих, щелочноземельных и поливалентных примесей, а также выращивания ЩГК на примере KCl:Li в условиях глубокого технического вакуума ($10^{-3}$ Па или $10^{-6}$ Торр) с добавлением высокочистого аргона марки 6.0 (99,999 %) до уровня 0,3 бар.

Аргон необходим для подавления эффекта испарения при высоких температурах расплава - около 800 °C. Испарение может привести к крайне нежелательным последствиям: галогенные пары образуют агрессивную среду, загрязняющую всю вакуумную систему, включая безмасляные

турбомолекулярные и абсорбционные насосы, вплоть до их отказа, а также вызывают существенное снижение массы сырья и содержания допированных изовалентных лёгких катионов.

Разнообразие термических режимов, управляемых многосегментными контроллерами серии Eurotherm 3204, обеспечивает возможность составления циклограммы для чистых и смешанных кристаллов с использованием двух или трёх зон. Особенно важно, что впервые реализован режим медленного охлаждения выращенного кристалла со скоростью 20÷30 °C/ч.

Уникальная механика перемещения кварцевой ампулы с сырьём управляется системой SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), средой функционирования которой является MCGS (Monitor and Control Generated System) - платформа человеко-машинного интерфейса (HMI).

Регистрация спектров рентгенолюминесценции свежевыращенных кристаллов KCl:Li в зависимости от концентрации ионов лития выявила ожидаемый эффект повышения светового выхода. Данный эффект обусловлен рекомбинационной сборкой электронно-дырочных пар в поле лития и является важным параметром для разработки научных основ сцинтилляционных детекторов.

**Список использованной литературы**


1. Song K.S., Williams R.T. Self-Trapped Excitons. – Berlin: Springer, 2013. – DOI: 10.1007/978-3-642-85236-7.
2. Lushchik C.B., Lushchik A.Ch. Decay of electronic excitations with defect formation in solids. – Moscow: Nauka, 1989.
3. Aluker E.D., Lusis D.Yu., Chernov S.A. Electronic excitations and radioluminescence of alkali halide crystals. – Riga: Zinatne, 1979.
4. Lee S., Lee J., Kim G., Ye S.J. Estimating $^{10}$B and $^{14}$N doses using a pair of LiF-based TLD-600 and TLD-700 as an alternative to gold activation method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2023. – Vol. 1050. – Art. 168141. – DOI: 10.1016/j.nima.2023.168141.
5. Behmadi M., Mohammadi S., Ravari M.E. et al. Neutron dosimetry with a pair of TLDs for the Elekta Precise medical linac and the evaluation of optimum moderator thickness for the conversion of fast to thermal neutrons // Nuclear Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 56, № 2. – P. 753–761. – DOI: 10.1016/j.net.2023.11.014.
6. Iliaskou C., Gainey M., Thomann B. et al. Development of a TLD-100-based setup for in vivo dosimetry in intraoperative electron beam radiation therapy (IOERT): an experimental and clinical evaluation // Zeitschrift für Medizinische Physik. – 2025. – DOI: 10.1016/j.zemedi.2025.04.007.
7. Saeedian E., Shakerian M., Sanayei A.Z., Rakeb Z., Sina S. Thermoluminescence dosimetry in small animal digital radiography, the dose to animals, and their adopters // Radioprotection. – 2025. – Vol. 60, № 1. – P. 57–64. – DOI: 10.1051/radiopro/2024035.
8. Alizadeh M., Mohseni M., Farhood B. et al. Thermoluminescent characteristics of GR-200, TLD-700H and TLD-100 for low dose measurement: linearity, repeatability, dose rate and photon energy dependence // Journal of Biomedical Physics and Engineering. – 2022. – Vol. 12, № 2. – P. 111–116. – DOI: 10.31661/jbpe.v0i0.1247.
9. Lee S., Lee J., Kim G., Ye S.J. Estimating $^{10}$B and $^{14}$N doses using a pair of LiF-based TLD-600 and TLD-700 as an alternative to gold activation method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2023. – Vol. 1050. – Art. 168141. – DOI: 10.1016/j.nima.2023.168141.
10. Behmadi M., Mohammadi S., Ravari M.E. et al. Neutron dosimetry with a pair of TLDs for the Elekta Precise medical linac and the evaluation of optimum moderator thickness for the conversion of fast to thermal neutrons // Nuclear Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 56, № 2. – P. 753–761. – DOI: 10.1016/j.net.2023.11.014.
11. Iliaskou C., Gainey M., Thomann B. et al. Development of a TLD-100-based setup for in vivo dosimetry in intraoperative electron beam radiation therapy (IOERT): an experimental and clinical evaluation // Zeitschrift für Medizinische Physik. – 2025. – DOI: 10.1016/j.zemedi.2025.04.007.

12.Saeedian E., Shakerian M., Sanayei A.Z., Rakeb Z., Sina S. Thermoluminescence dosimetry in small animal digital radiography, the dose to animals, and their adopters // Radioprotection. – 2025. – Vol. 60, № 1. – P. 57–64. – DOI: 10.1051/radiopro/2024035.
13.Alizadeh M., Mohseni M., Farhood B. et al. Thermoluminescent characteristics of GR-200, TLD-700H and TLD-100 for low dose measurement // Journal of Biomedical Physics and Engineering. – 2022. – Vol. 12, № 2. – P. 111–116. – DOI: 10.31661/jbpe.v0i0.1247.
14.Salah N., Sahare P.D., Rupasov A.A. Thermoluminescence of nanocrystalline LiF:Mg,Cu,P // Journal of Luminescence. – 2007. – Vol. 124. – P. 357–364. – DOI: 10.1016/j.jlumin.2006.04.004.
15.Horowitz Y.S., Oster L., Eliyahu I. The saga of the thermoluminescence mechanisms and dosimetric characteristics of LiF:Mg,Ti (TLD-100) // Journal of Luminescence. – 2019. – Vol. 214. – Art. 116527. – DOI: 10.1016/j.jlumin.2019.116527.
16.Baghani H.R., Goli M., Koushki E., Robatjazi M. Impact of titanium dopant concentration on structure, optical band gap and thermoluminescence properties of LiF:Mg,Ti // Results in Optics. – 2025. – Vol. 18. – Art. 100778. – DOI: 10.1016/j.rio.2025.100778.
17.Prouzová Procházková L., Hájek F., Buryi M. et al. Radiation stability of nanocomposite scintillators // Radiation Physics and Chemistry. – 2025. – Vol. 237. – Art. 112991. – DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.112991.
18.Lagha Ameur Z., Lonski P., Kron T. Carbon loaded TLDs: utility in radiotherapy // Radiation Measurements. – 2026. – Art. 107626. – DOI: 10.1016/j.radmeas.2026.107626.
19.Li X., Yu J., Fan Y. et al. Aggregation-induced emissive scintillators: a new frontier for radiation detection and imaging // Nano-Micro Letters. – 2025. – Vol. 17, № 1. – Art. 160. – DOI: 10.1007/s40820-025-01671-x.
20.Mangthong P., Kohout M., Ponseca C.S. Jr. et al. Hybrid detectors for high-energy radiation based on borosilicate glass scintillator doped with $Gd^{3+}$ covered by photosensitive $TiO_2$ layer // Radiation Physics and Chemistry. – 2025. – Vol. 237. – Art. 113010. – DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.113010.
21.Patil A.A., Lại T.K.L., Lee C.C., Chiu Y.P., Liu Z.X., Lin C.J., Peng W.P. Enhancing mass analysis of ultra-high molecular weight polystyrene: a comparative study of copper and silver salts with MALDI mass spectrometry // Analytical Methods. – 2025. – Vol. 17, № 8. – P. 1754–1764. – DOI: 10.1039/D4AY02077D.
22.Shunkeyev K., Aimaganbetova Z., Myasnikova L., Maratova A., Ubaev Z. Mechanisms of radiation defect formation in KCl crystals under the influence of local and plastic deformation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2021. – Vol. 509. – P. 7–11. – DOI: 10.1016/j.nimb.2021.10.010.
23.Shunkeyev K., Maratova A., Myasnikova L., Sagimbayeva S., Zhanturina N. The specificity of intrinsic luminescence of a CsI crystal under the influence of low-temperature elastic deformation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2021. – Vol. 509. – P. 1–6. – DOI: 10.1016/j.nimb.2021.10.009.
24.Shunkeyev K., Kenzhebayeva A., Sagimbayeva S., Syrotych Y., Zorenko Y. Luminescence of CsI:Na crystal scintillator under synchrotron radiation excitation // Journal of Luminescence. – 2025. – Vol. 284. – Art. 121308. – DOI: 10.1016/j.jlumin.2025.121308.
25.Li Y., Cotlet M., Hadar I., Guo P. Broadband emission in alkali halides triggered by $Sb^{3+}$ doping // Chemical Communications. – 2024. – Vol. 60, № 99. – P. 14806–14809. – DOI: 10.1039/d4cc04021j.
26.Kohzuki Y., Ohgaku T. Deformation luminescence of X-ray-irradiated KCl:$Eu^{2+}$ single crystals by compression // Journal of Luminescence. – 2023. – Vol. 253. – Art. 119469. – DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.119469.
27.Barth M., Lorke W., Möhler E. Uniaxial stress dependence of the static dielectric constant // Reprint Edition / ed. by E. Görlich. – Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2022. – P. 457–460.
28.Qi W., Xu W., Abdugopur H., Lu G., Wei L., Li P., Gao M. Structural phase transition and physical properties in NaBr under high pressure // Physics Letters A. – 2025. – Vol. 538. – Art. 130351. – DOI: 10.1016/j.physleta.2025.130351.

29.Mahlik S., Malinowski M., Grinberg M. High-pressure and time-resolved luminescence spectra of $Gd_3Ga_5O_{12}:Pr^{3+}$ crystal // Optical Materials. – 2011. – Vol. 33. – P. 1525–1529. – DOI: 10.1016/j.optmat.2011.02.001.
30.Mahlik S. High-pressure study of phosphors emission // Phosphor handbook: experimental methods for phosphor evaluation and characterization / ed. by R.-S. Liu, X. Wang. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2022. – P. 419–545. – DOI: 10.1201/9781003098669.
31.Shunkeyev K., Tilep A., Sagimbayeva S., Lushchik A., Ubaev Z., Myasnikova L., Zhanturina N., Aimaganbetova Z. The enhancement of exciton-like luminescence in KCl single crystals under local and uniaxial elastic lattice deformation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2022. – Vol. 528. – P. 20–26. – DOI: 10.1016/j.nimb.2022.08.002.
32.Across International. 1200 °C 3-zone crystal growth tube furnace with Kanthal heating elements, swing open chamber [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.acrossinternational.com/1200c-3-zone-crystal-growth-tube-furnace-with-kanthal-heatingelements-swing-openchamber.html (дата обращения: 23.05.2026).
33.Gindina R., Maaroos A., Ploom L., Jaanson N. Development of the method of preparing KCl and KBr crystals containing impurities // Electronic Excitations and Defects in Ionic Crystals. – Tartu: Academy of Sciences of the Estonian SSR, Institute of Physics, 1979. – P. 45–89.
34.Sherwood Scientific Ltd. Model 410 flame photometer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sherwood-scientific.com/products/model-410/ (дата обращения: 23.05.2026).
35.Shunkeyev K., Tilep A., Sagimbayeva S., Lushchik A., Ubaev Z., Myasnikova L., Zhanturina N., Aimaganbetova Z. The effect of instability of KCl:Na single crystals // Crystals. – 2023. – Vol. 13. – Art. 364. – DOI: 10.3390/cryst13020364.
36.Lushchik C., Kolk J., Lushchik A., Lushchik N., Taiirov M., Vasilchenko E. Decay of excitons into long-lived F, H and α, I pairs in KCl // Physica Status Solidi B. – 1982. – Vol. 114. – P. 103–111. – DOI: 10.1002/pssb.2221140112.
37.Onaka R., Fujita I., Fukuda A. Alpha centers in alkali halides // Journal of the Physical Society of Japan. – 1963. – Vol. 18 (Suppl. II). – P. 263–268.
38.Vasilchenko E., Sarmukhanov E., Shunkeyev K., Elango A. Electronic excitations localized in KBr and KI crystals near vacancy defects of different sizes // Physica Status Solidi B. – 1992. – Vol. 174, № 1. – P. 155–163. – DOI: 10.1002/pssb.2221740115.
39.Shunkeyev K., Sagimbayeva S., Ubaev Z., Kenzhebayeva A. Mechanisms for enhancing luminescence yield in KBr crystals under the influence of low-temperature uniaxial elastic deformation // Crystals. – 2024. – Vol. 14. – Art. 698. – DOI: 10.3390/cryst14080698.
40.Aboltin D.E., Grabovskis V.J., Kangro A.R., Lushchik C., O'Konnel-Bronin A.A., Vitol I.K., Zirap V.E. Thermally stimulated and tunneling luminescence and Frenkel defect recombination in KCl and KBr at 4.2–77 K // Physica Status Solidi A. – 1978. – Vol. 47, № 2. – P. 667–675. – DOI: 10.1002/pssa.2210470239.

**Благодарность.** Исследовательская работа была профинансирована Комитетом Науки МНиВО РК (Грантовые проекты AP26100001 и AP23488688).

**Рецензент: доктор физико-математических наук, профессор Осмоналиев К.**