

**Л.Н. Мясникова, К.Ш. Шункеев, Ж.К. Убаев,
Ш.Ж. Сагимбаева, Ж. Кулбатыр**

Актюбинский региональный государственный университет им. К. Жубанова,
Казахстан, г. Актобе, e-mail: myasnikova_ln@mail.ru

РЕКОМБИНАЦИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ NaCl и NaCl-Li ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. Экспериментальным методом высокочувствительной термоактивационной спектроскопии исследованы спектры термостимулированной люминесценции (ТСЛ) зонноочищенных кристаллов NaCl и NaCl-Li при низкотемпературной (95K) упругой деформации ($\varepsilon = 1\%$) в широком интервале спектра (200–850 нм). В ТСЛ кристалла NaCl доминирующим пиком является V_K -центр, интенсивность которого вдвое возрастает при низкотемпературной деформации и который имеет максимум термического разрушения при 165–170K, сканирование которого соответствует максимуму спектра ТСЛ при 3,5 эВ. Спектры ТСЛ V_K -пика и рентгенолюминесценции совпадают и имеют одну природу – излучательную релаксацию автолокализованных экситонов при рекомбинации подвижных дырок с электронами. В ТСЛ NaCl-Li доминирующими пиками являются F' и $H_A(\text{Li})$ -центры, интенсивность которых усиливается в 10 раз при низкотемпературной деформации и имеющие максимумы термического разрушения при 110K и 125K, соответственно. При сканировании спектров ТСЛ в пиках 110K и 125K зарегистрированы излучения с максимумами при 2,72 эВ и 2,69 эВ. Анализ показывает, что легкий катион лития в решетке NaCl-Li создает локальную деформацию, в результате которой появляются $H_A(\text{Li})$ -центры. Упругая деформация еще больше стимулирует образование $H_A(\text{Li})$ -центров, свидетельством чего является усиление в 13 раз интенсивности пика ТСЛ при 125K.

Ключевые слова: кристалл NaCl, NaCl-Li, термостимулированная люминесценция, туннельная люминесценция, одноосная деформация.

L. Myasnikova, K. Shunkeyev, Zh. Ubayev,
Sh. Sagimbaeva, Zh. Kulbatyr

K. Zhubanov Aktobe Regional State University,
Kazakhstan, Aktobe, e-mail: myasnikova_ln@mail.ru

Recombination luminescence of radiation defects in NaCl and NaCl-Li crystals at low-temperature elastic deformation

Abstract. Using the experimental method of highly sensitive thermoactivation spectroscopy, we studied the spectra of thermally stimulated luminescence (TSL) of purified crystals of NaCl and NaCl-Li under low-temperature (95K) elastic deformation ($\varepsilon = 1\%$) in a wide range of the spectrum (200–850 nm). In the TSL of a NaCl crystal, the dominant peak is an V_K -center, whose intensity doubles during low-temperature deformation and has a maximum of thermal damage at 165–170 K, scanning of which corresponds to the maximum of the TSL spectrum at 3.5 eV. The spectrum of the TSL V_K -peak and the X-ray luminescence coincide and have the same nature – the radiative relaxation of self-trapped excitons upon recombination of mobile holes with electrons. In NaCl-Li TSL, the dominant peaks are F' and $H_A(\text{Li})$ centers, the intensity of which increases 10-fold during low-temperature deformation and having maximum thermal destruction at 110 K and 125 K, respectively. When scanning the TSL spectra at peaks 110K and 125K, we observed radiation with maxima at 2.72 eV and 2.69 eV. An analysis shows that a light lithium cation in the NaCl-Li lattice creates a local deformation as a result of which $H_A(\text{Li})$ centers appear. Elastic deformation further stimulates the formation of $H_A(\text{Li})$ -centers, evidenced by a 13-fold increase in the intensity of the TSL peak at 125K.

Key words: Crystal NaCl, NaCl-Li, thermally stimulated luminescence, tunnel luminescence, uniaxial strain.

А.Н. Мясникова, К.Ш. Шункеев, Ж.К. Убаев,
Ш.Ж. Сагимбаева, Ж. Кулбатыр

К. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік мемлекеттік университеті,
Қазақстан, Ақтөбе қ., e-mail: myasnikova_in@mail.ru

Төментемпературалы серпімді деформация кезіндегі NaCl және NaCl-Li кристалдарындағы радиациялық ақаулардың рекомбинациялық люминесценциясы

Аңдатпа. Сезімталдығы жоғары термобелсенді спектроскопия әдісімен спектрдің кең интервалында (200–850 нм) төмен температуралы (95К) серпімді деформация ($\varepsilon = 1\%$) кезіндегі NaCl және NaCl-Li зоналық тазартылған кристалдардың термостимульденген люминесценция (ТСЛ) спектрлері зерттелді. ТСЛ-да NaCl кристалының басым шыңы төмен температуралы деформация кезінде қарқындылығы екі есе артатын және 165–170К кезінде ең жоғары термиялық бұзылу болатын, сканерлеу 3,5 эВ кезінде ТСЛ спектрінің максимумына сәйкес келетін V_K -орталығы болып табылады. ТСЛ-да V_K -шыңы мен рентгенлюминесценция спектрі сәйкес келеді және табиғаты бірдей – қозғалғыш тесіктер мен электрондардың рекомбинациясы кезінде автолокализацияланған экситондардың сәуле шығару релаксациясы. NaCl-Li ТСЛ-сында төмен температуралы деформация кезінде қарқындылығы 10 есе күшейетін және сәйкес 110К және 125К кезінде термиялық бұзылудың максимумдары бар F және $H_A(Li)$ – орталықтары басым шыңдар болып табылады. ТСЛ спектрлерін 110К және 125К шыңдарында сканерлеу барысында 2,72 эВ және 2,69 эВ кезіндегі максимумдармен сәулелену тіркелген. Талдау NaCl-Li торындағы жеңіл литий катионы, нәтижесінде $H_A(Li)$ -орталықтары пайда болатын жергілікті деформация тудыратынын көрсетеді. Серпімді деформация $H_A(Li)$ -орталықтардың түзілуін одан әрі ынталандырады, оның дәлелі 125К кезінде ТСЛ шыңының қарқындылығының 13 есе күшеюі болып табылады.

Түйін сөздер: NaCl кристалы, NaCl-Li, термостимульденген люминесценция, туннельдік люминесценция, бір осьті деформация.

Введение

Щелочногалоидные кристаллы зарекомендовали себя в качестве модельных объектов, с наиболее простой структурой [1-8]. Они отлично подходят для объяснения физической сущности различных процессов происходящих под действием возмущающих факторов, таких как введение примеси, изменение температуры, облучение радиацией и приложение деформации [9-15].

Классическим представителем щелочногалоидных кристаллов с кубической кристаллической структурой и единственным имеющим природное происхождение является NaCl. Изолированные атомы щелочного металла Na и галоида Cl имеют следующую электронную конфигурацию: $Na^0 - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, $Cl^0 - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$. В матрице NaF ионы соответствующих элементов принимают следующую электронную конфигурацию – $Na^+ - 1s^2 2s^2 2p^6$, $Cl^- - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. В результате валентный электрон, находящийся на внешней оболочке Na^0 , полностью переходит к Cl^0 . Исследования посвященные этому представителю с ярко выраженным ионным типом связи ведутся многие годы [16-17].

Люминесценция АЛЭ при температуре 4,2 К для кристалла NaCl состоит из двух полос с максимумами 5,35 эВ (σ) и 3,36 эВ (π), которые эффективно возбуждаются фотонами с энергией 8,6 эВ и 7,9 эВ, соответствующие созданию электронно-дырочных пар и экситонов [18]. С повышением температуры возбуждения интенсивность люминесценции обеих полос резко тушится [20] и при 100 К доходит до двух порядков относительно 4,2 К.

Аналогичный эффект разгорания люминесценции был обнаружен при селективном возбуждении кристалла NaCl, находящийся при упругой деформации, фотонами с энергией, соответствующей созданию экситонов (8,3 эВ) и электронно-дырочных пар (8,8 эВ) [22]. Эффект усиления интенсивности π -, σ -люминесценций при ВУФ-возбуждении не значителен (2,5 раза), чем при X-возбуждении. Одной из возможных причин наблюдаемых различий при разных способах возбуждения может заключаться в глубинах проникновения ионизирующего излучения в кристаллах. Другая возможная причина различий ВУФ- и X-возбуждений может заключаться в различии энергий электронных возбуждений. При возбуждении светом (7–8,8 эВ) создаются низкоэнергетические

экситоны. Энергия электронных возбуждений в треке кванта рентгеновского излучения намного выше, что должно сказаться на длине их свободного пробега.

Техника эксперимента и объекты исследования

Экспериментальная установка позволяет исследовать спектры рентгенолюминесценции, термостимулированной и туннельной люминесценции, а также спектры термостимулированной люминесценции щелочногалоидных кристаллов в условиях понижения симметрии решетки под постоянным воздействием низкотемпературной деформации. Регистрация рентгенолюминесценции, туннельной люминесценции и спектров термостимулированной люминесценции осуществляется в режиме счета фотонов ФЭУ типа H 8259 фирмы «Hamamatsu» (Япония) в интервале спектра 200-850 нм. Контроллеры монохроматора МСД-2 (ширина щели 1 мм) и медь-константантовой термопары построены на базе высокопроизводительных 32-битных микропроцессоров семейства STM32 с ядром Cortex-M архитектуры ARM производства STMicroelectronics (Швейцария). Автоматизированное сканирование спектров с заданными параметрами осуществляется с помощью программ SpectraSCAN и TermoSCAN.

Установка оснащена металлическим криостатом. Исследуемый объект помещенный внутрь вакуумированного (10^{-4} Торр) криостата охлаждается контактным способом путем заливкой жидкого азота в резервуар криостата. Конструкция криостата позволяет деформировать исследуемый объект, при этом степень деформации задается экспериментатором [19]. Криостат снабжен дополнительными окошками из Be и LiF для облучения кристалла рентгеновской радиацией и регистрации излучения кристалла, соответственно.

Образцы кристалла NaCl и NaCl-Li возбуждались рентгеновскими лучами в течение 60 минут от установки РУП-120 (рентгеновская трубка – W, 3 мА, 100 кВ) в металлическом криостате, откаченном до 10^{-4} Торр при температуре 100 К через бериллиевое окошко толщиной 1 мм. Используемый режим работы трубки практически не приводил к окрашиванию кристаллов и искажению спектров из-за реабсорбции излучения созданными радиацией центрами окраски.

Термостимулированная люминесценция кристаллов NaCl и NaCl-Li измерялась от 100 К до 400 К после длительного (1 час) облучения X-лучами с целью создания повышенной концентрации F-центров и комплементарных с ними дырочных центров окраски (V_K , V_F , V_{KA} -центров). Скорость линейного нагрева образца от 100 К до 400 К составляла 0,2 град/с. Отметим, что температура плавления кристаллов NaCl равна 1074 К.

При сканировании спектра термостимулированной люминесценции с помощью программы Spectra SCAN за 10 секунд в диапазоне от 200 до 700 нм со скоростью 50 нм/с кристалл нагревается на 2 К. Монокристаллы NaCl и NaCl-Li были выращены в Институте физики Тартуского университета по методу Киропулоса в атмосфере инертного гелия [24].

Экспериментальные результаты и дискуссия

Как уже отмечалось во введении, при возбуждении кристаллов NaCl фотонами в области вакуумного ультрафиолета, обеспечивающими прямое оптическое создание анионных экситонов, при температуре 4,2 К были зарегистрированы полосы люминесценции АЛЭ с максимумами при 5,35 эВ (σ) и 3,36 эВ (π) [20,23-24].

На Рис. 1 приведены спектры рентгенолюминесценции кристаллов NaCl-Li, измеренные при 100 К как для недеформированного кристалла (кривая 1), так и для образца, находящегося под воздействием упругой одноосной деформации (кривые 2-3). Видно, что в ненапряженном образце наблюдаются люминесценции автолокализованных экситонов, возмущенных, по-видимому, ионами примеси брома – π (3,9 эВ), а также отчетлива видна σ -люминесценция с максимумом при 5,25 эВ. В кристаллах NaCl-Li, подверженных одноосной упругой деформации до 0,8% при 100 К, интенсивность σ и π -люминесценции АЛЭ возрастает (кривая 2). При увеличении процента деформации до 1,2, рост интенсивности люминесценций продолжается. Однако, при этом резко выделяется люминесценция с максимумом при 3,5 эВ, соответствующей π -свечению АЛЭ. Видно, что увеличение степени относительной деформации кристалла от 0 до 1,5% существенно влияет на интенсивность полос излучения.

Это приводит к эффекту возрастания вероятности автолокализации электронных воз-

буждений в регулярных узлах решетки. Поэтому при деформации снижается интенсивность различных свечений, обусловленных излучательной релаксацией экситонов около примесей из-за сокращения длины свободного пробега экситонов.

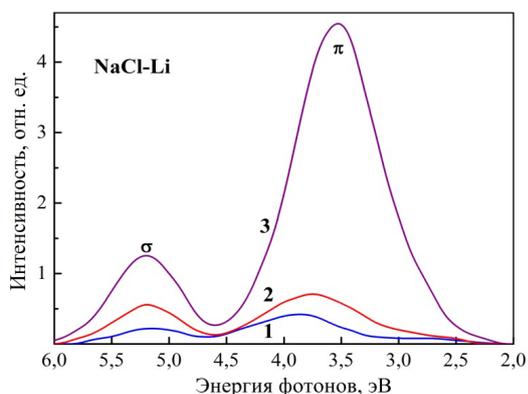


Рисунок 1 – Спектры рентгенолюминесценции кристалла NaCl-Li. Кривая 1 – до деформации, кривая 2 – при деформации 0,8%; кривая 3 – при деформации 1,2%

После окончания рентгеновского облучения кристаллов наблюдается интенсивная туннельная люминесценция. На рис. 2 приведены спектры туннельной люминесценции кристаллов NaCl. До деформации зарегистрировать туннельную люминесценцию при 100 К в кристалле NaCl не удалось (кривая 1). Однако, после воздействия упругой деформации, спектр туннельной люминесценции проявляется отчетливо (кривая 2).

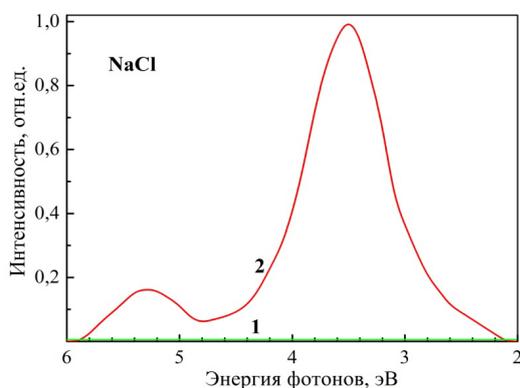


Рисунок 2 – Спектры туннельной люминесценции кристалла NaCl. Кривая 1 – до деформации, кривая 2 – при деформации 1%

Отметим, что по спектральному составу спектры туннельной люминесценции и рентгенолюминесценции кристалла NaCl идентичны. Туннельную люминесценцию щелочногалоидных кристаллов из-за слабой интенсивности возможно регистрировать только при 4,2 К [21]. Это связано с тем, что за туннельную люминесценцию ответственны очень близко расположенные, почти коррелирующие радиационные дефекты, имеющие различные заряды относительно кристаллической решетки, например, F , V_K -пары. Однако, в предварительно упруго-напряженных кристаллах и облученных X-лучами при 100 К создаются такие же повышенные концентрации, туннелирующих одиночных радиационных дефектов [22].

В термостимулированной люминесценции кристалла NaCl доминирующим пиком является V_K -центр, интенсивность которого в 2 раза усиливается при низкотемпературной деформации и имеющий максимум термического разрушения при 165-170К, сканирование которого соответствует максимуму спектра термостимулированной люминесценции при 3,5 эВ. Спектр термостимулированной люминесценции V_K -пика и рентгенолюминесценции совпадают и имеют одну природу – излучательную релаксацию автолокализованных экситонов при рекомбинации подвижных дырок с электронами.

На рис. 3 представлена термостимулированная люминесценция кристаллов NaCl и NaCl-Li. На рисунке 3 приведена термостимулированная люминесценция до деформации (кривая 1). Однако в кристалле NaCl-Li регистрируются пики, относящиеся к F' и $H_A(Li)$ -центрам, интенсивность которых резко усиливается при низкотемпературной деформации и имеющие максимумы термического разрушения при 110К и 125К, соответственно (сравните кривые 2 и 3). При сканировании спектров термостимулированной люминесценции подверженных деформации кристалла NaCl-Li в пиках 110К и 125К зарегистрированы излучения с максимумами при 2,72 эВ и 2,69 эВ (Рис. 4, кривые 1 и 2). При воздействии деформации интенсивность термостимулированной люминесценции кристалла NaCl-Li с максимумом при 170 К соответствующая V_K -центру возрастает, при этом интенсивность V_F -центра в районе 200 К также увеличивается (сравните кривые 2 и 3 рисунка 3).

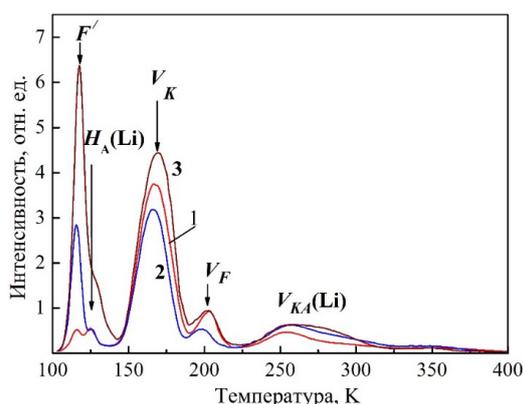


Рисунок 3 – Термостимулированная люминесценция кристаллов NaCl и NaCl-Li. Кривая 1 – до деформации кристалла NaCl, кривая 2 – до деформации кристалла NaCl-Li; кривая 3 – при деформации 1% кристалла NaCl-Li

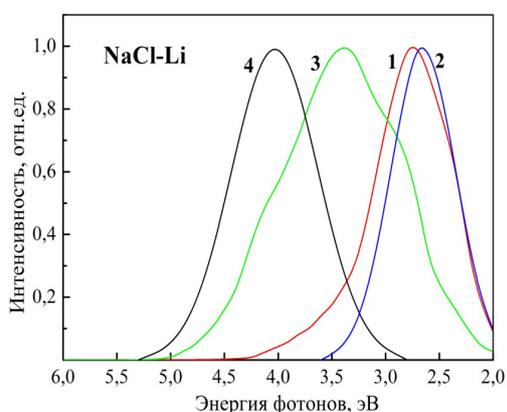


Рисунок 4 – Спектры термостимулированной люминесценции кристалла NaCl-Li при деформации 1%. Кривая 1 – в пике с максимумом при 115 К, кривая 2 – в пике с максимумом при 125 К; кривая 3 – в пике с максимумом при 165 К; кривая 4 – в пике с максимумом при 200 К

Однако, существенно изменяется спектральный состав зарегистрированный в пиках термостимулированной люминесценции деформированного кристалла NaCl-Li при 165 К и 200 К (Рис. 4, кривые 3 и 4). Так спектр термостимулированной люминесценции деформированного кристалла NaCl-Li при 165 К имеет максимум при 3,4 эВ, а при 200 К – 4,0 эВ.

Отметим, что гидростатическое сжатие кристалла не влияет на симметрию решетки, но приводит к изменению энергии различных электронных возбуждений. При всестороннем гидростатическом сжатии наблюдается усиление примесных и свободных экситонных свечений, а люминесценция автолокализованных экситонов в общем случае ослабевает [23, 24].

В работе [25] было продемонстрировано влияние одноосной низкотемпературной упругой деформации на сокращение длины свободного пробега электронных возбуждений до их автолокализации на примере кристалла KI-Tl, в результате чего был зафиксирован эффект перераспределения интенсивностей полос люминесценции в пользу собственных σ - и π -свечений, тогда как интенсивность примесного таллиевого (Tl) свечения существенно ослабевала.

Заключение

Анализ показывает, что легкий катион лития в решетке NaCl-Li создает локальную деформацию в результате, которого появляются $H_A(\text{Li})$ -центры. Упругая деформация еще больше стимулирует образование $H_A(\text{Li})$ -центров, свидетельством которого является усиление интенсивности пика термостимулированной люминесценции при 125 К.

Таким образом, установлено деформационно-стимулированное создание низкотемпературных близкорасположенных радиационных дефектов, зарегистрированные их рекомбинационные люминесценции в спектрах туннельной и термостимулированной люминесценции кристаллов NaCl и NaCl-Li.

Литература

- 1 Lushchik Ch., Lushchik A. Evolution of Anion and Cation Excitons in Alkali Halide Crystals // Physics of the Solid State. – 2018. – Vol. 60. – P. 1487-1505.
- 2 Lushchik A., Lushchik Ch., Vasil'chenko E., Popov A.I. Radiation creation of cation defects in alkali halide crystals: Review and today's concept // Low Temperature Physics. – 2018. – Vol. 44. – No. 4. – P. 357-367.
- 3 Toyozawa Y. Elementary processes in luminescence // J. of Luminescence. – 1976. – Vol. 12/13. – P. 13-21.
- 4 Messaoudi I.S., Zaoui A., Ferhat M. Band-gap and phonon distribution in alkali halides // Phys. Status Solidi B. – 2014. – P. -6.
- 5 Mamula B.P., Kuzmanović B., Ilić M.M., Ivanović N., Novaković N., Bonding mechanism of some simple ionic systems: Bader topological analysis of some alkali halides and hydrides revisited // Physica B: Condensed Matter. – 2018. – Vol. 545. – P. 146-151.

- 6 Chandra B.P., Chandra V.K., Jha Piyush, Patel R.P., Baghel R.N. Possibility of elasto-mechanoluminescence dosimetry using alkali halides and other crystals // *Radiation Measurements*. – 2015. – Vol. 78. – P.9-16.
- 7 Chandra B.P. Mechanoluminescence induced by elastic deformation of coloured alkali halide crystals using pressure steps // *Journal of Luminescence*. – 2008. – Vol. 128. – P.1217–1224.
- 8 Kucharczyk W. Photoelastic effect and density derivative of the refractive index in alkali halides // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1989. – Vol. 50(7). – P.709-712.
- 9 Landman U., Scharf D., Jortner J. Electron Localization in Alkali-Halide Clusters // *Physical review letters*. – 1985. – Vol. 54. – N. 16. – P.1860-1863.
- 10 Hoya J., Laborde J.I., Richard D., Rentería M. Ab initio study of F-centers in alkali halides // *Computational Materials Science*. – 2017. – Vol. 139. –P.1-7.
- 11 Jackson K.A. Local Spin Density Treatment of Substitutional Defects in Ionic Crystals with Self-Interaction Corrections // *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*. – 2015. – Vol. 64. – P.15-27.
- 12 Myasnikova A., Mysovskaya A., Paklin A., Shalaev A. Structure and optical properties of copper impurity in LiF and NaF crystals from ab initio calculations // *Chemical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 633. – P.218-222.
- 13 Shunkeyev K.Sh., Zhanturina N.N., Myasnikova L.N., Sergeyev D.M., Aimaganbetova Z.K., Sagymbaeva Sh.Zh., Ubaev Zh. The nature of luminescence of KI and KI-Na crystals at low temperature deformation after natural decrease in the symmetry of the lattice // *Eurasian J. Phys. Func. Mat.* – 2018. – Vol. 2(3). – P.267-273.
- 14 Shunkeyev K., Myasnikova L., Barmina A., Zhanturina N., Sagimbaeva Sh., Aimaganbetova Z., Sergeyev D. The thermostimulated luminescence in KCl, KBr and KI crystals at elastic and plastic deformation // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 830. – 012138.
- 15 Shunkeyev K., Sergeyev D., Drozdowski W., Brylev K., Myasnikova L., Barmina A., Zhanturina N., Sagimbaeva Sh., Aimaganbetova Z. The deformation stimulated luminescence in KCl, KBr and KI crystals // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 830. – 012139.
- 16 Cabrera-Sanfelix P., Portal D.S., Verdaguer A., Darling G.R., Salmeron M., Arnau A. Spontaneous Emergence emergence of Cl- anions from NaCl(100) at low relative humidity // *J. Phys. Chem. C*. – 2007. – Vol. 111. – P.8000-8004.
- 17 Lushchik A., Lushchik Ch., Nagirnyi V., Shablonin E., Vasil'chenko E. Low-temperature creation of Frenkel defects via hot electron-hole recombination in highly pure NaCl single crystals // *Low Temperature Physics*. – 2016. – Vol. 42. – No. 7. – P.547-551.
- 18 Song S., Williams R.T. *Self-Trapped Excitons*. 2nd ed. – Berlin: Springer, 1996. – 404 p.
- 19 Shunkeyev K., Sarmukhanov E., Bekeshev A., Sagimbaeva Sh., Bizhanova K. The cryostat for deformation of crystals at low temperatures // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2012. – Vol. 400. – 052032.
- 20 Ikezawa M., Kojima T. Luminescence of alkali halide crystals induced by UV-lighten at low temperature // *J. Phys. Soc. Japan*. – 1969. – Vol. 27. – P.1551-1563.
- 21 Aboltin D., Grabovskis V., Kangro A., Lushchik Ch., O'Konnel-Bronin A., Vitol I., Zirap V. Thermally stimulated and tunneling luminescence and frenkel defects recombination in KCl and KBr at 4.2 K to 77 K // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 1978. – Vol. 47. – P.667–675.
- 22 Elango A., Sagimbaeva S., Sarmukhanov E., Savikhina T., Shunkeev K. Effect of uniaxial stress on luminescence of X- and VUV-irradiated NaCl and NaBr crystals // *Radiation Measurements*. – 2001. – Vol. 33, № 5. – P.823–827.
- 23 Nishimura H., Tsujimoto T., Nakayama M., Morita S., Kobayashi M. Spectral changes of the self-trapped exciton luminescence in RbI under hydrostatic pressure // *J. Lumin.* – 1994. – Vol. 62. – P.41-47.
- 24 Lushchik A., Lushchik Ch., Vasil'chenko E., Kirm M., Martinson I. Control of excitonic and electron-hole processes in wide-gap crystals by means of elastic uniaxial stress // *Surf. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 9. – P.299-303.
- 25 Shunkeyev K., Zhanturina N., Aimaganbetova Z., Barmina A., Myasnikova L., Sagymbaeva Sh., Sergeyev D. The specifics of radiative annihilation of self-trapped excitons in a KI-Tl crystal under low-temperature deformation // *Low temperature physics*. – 2016. – Vol. 42. – №7. – P.580-583.

References

- 1 Ch. Lushchik and A. Lushchik, *Physics of the Solid State* 60, 1487-1505 (2018).
- 2 A. Lushchik, Ch. Lushchik, E. Vasil'chenko and A. I. Popov, *Low Temperature Physics* 44, 357-367 (2018).
- 3 Y. Toyozawa, *J. of Luminescence* 12/13, 13-21 (1976).
- 4 I.S. Messaoudi, A. Zaoui and M. Ferhat, *Phys. Status Solidi B*, 1-6 (2014).
- 5 B.P. Mamula, B. Kuzmanović, M.M. Ilić, N. Ivanović and N. Novaković, *Physica B: Condensed Matter* 545, 146-151 (2018).
- 6 B.P. Chandra, V.K. Chandra, Piyush Jha, R.P. Patel and R.N. Baghel, *Radiation Measurements* 78, 9-16 (2015).
- 7 B.P. Chandra, *Journal of Luminescence* 128, 1217–1224 (2008).
- 8 W. Kucharczyk, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 50(7), 709-712 (1989).
- 9 U. Landman, D. Scharf and J. Jortner, *Physical review letters* 54 (16), 1860-1863 (1985).
- 10 J. Hoya, J.I. Laborde, D. Richard and M. Rentería, *Computational Materials Science* 139, 1-7 (2017).
- 11 K.A. Jackson, *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics* 64, 15-27 (2015).
- 12 A. Myasnikova, A. Mysovskaya, A. Paklin and A. Shalaev, *Chemical Physics Letters* 633, 218-222 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2015.05.033>
- 13 K. Shunkeyev, N. Zhanturina, L. Myasnikova, D. Sergeyev, Z. Aimaganbetova, Sh. Sagymbaeva and Zh. Ubaev, *Eurasian J. Phys. Func. Mat.* 2(3), 267-273 (2018).

- 14 K. Shunkeyev, L. Myasnikova, A. Barmina, N. Zhanturina, Sh. Sagimbaeva, Z. Aimaganbetova and D. Sergeev, J. Phys. Conf. Ser. 830, 012138 (2017).
- 15 K. Shunkeyev, D. Sergeev, W. Drozdowski, K. Brylev, L. Myasnikova, A. Barmina, N. Zhanturina, Sh. Sagimbaeva and Z. Aimaganbetova, J. Phys. Conf. Ser. 830, 012139 (2017)
- 16 P. Cabrera-Sanfeliix, D.S. Portal, A. Verdaguer, G.R. Darling, M. Salmeron and A. Arnau, J. Phys. Chem. C, 111, 8000-8004 (2007).
- 17 A. Lushchik, Ch. Lushchik, V. Nagirnyi, E. Shablonin and E. Vasil'chenko, Low Temperature Physics, 42, 547-551 (2016).
- 18 S. Song and R.T. Williams, Self-Trapped Excitons (2nd ed., Springer, Berlin, 1996), 404 p.
- 19 K. Shunkeyev, E. Sarmukhanov, A. Bekeshev, Sh. Sagimbaeva, and K. Bizhanova, J. Phys. Conf. Ser. 400, 052032 (2012). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/400/5/052032>
- 20 M. Ikezawa and T. Kojima, J. Phys. Soc. Japan 27, 1551 (1969).
- 21 D. Aboltin, V. Grabovskis, A. Kangro, Ch. Lushchik, A. O'Konnell-Bronin, I. Vitol and V. Zirap, Phys. Stat. Sol., (a), 47, 667-675 (1978).
- 22 A. Elango, S. Sagimbaeva, E. Sarmukhanov, T. Savikhina and K. Shunkeyev, Radiation Measurements, 33 (5), 823-827 (2001) [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00244-X1](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00244-X1).
- 23 H. Nishimura, T. Tsujimoto, M. Nakayama, S. Morita and M. Kobayashi, J. Lumin. 62, 41-47 (1994).
- 24 A. Lushchik, Ch. Lushchik, E. Vasil'chenko, M. Kirm and I. Martinson, Surf. Rev. Lett. 9, 299-303 (2002).
- 25 K. Shunkeyev, N. Zhanturina, Z. Aimaganbetova, A. Barmina, L. Myasnikova, Sh. Sagimbaeva and D. Sergeev, Low temperature physics, 42, 580-583 (2016).