

Ж.К. Убаев\*, К.Ш. Шункеев

Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актюбе, Казахстан

\*e-mail: nczhiger@mail.ru

## ОПТИЧЕСКОЕ СОЗДАНИЕ И РЕКОМБИНАЦИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОКОЛОНАТРИЕВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В КРИСТАЛЛЕ KCl-Na

**Аннотация.** В кристалле KCl-Na экспериментально продемонстрированы излучательные релаксации с максимумом при 2,8 эВ автолокализованного экситона в поле натрия при прямом оптическом создании околонатриевого экситона с энергией фотонов 7,62 эВ, при дырочно-электронной рекомбинации в процессе рентгеновского возбуждения в области температур от 150 К до 300 К, а также электронно-дырочной рекомбинации при оптической стимуляции в области спектра  $F^{\prime}$ -центров (1,5 эВ) при 90 К, предварительно облученного рентгеновскими лучами кристалла.

Усиление интенсивности излучения при 2,8 эВ кристалла KCl-Na при рентгеновском возбуждении в области температур от 150 К до 300 К, когда потушены все экситоноподобные излучения, интерпретируется за счет увеличения длины свободного пробега нерелаксированной дырки от  $60a$  до  $600a$ , где  $a$  - постоянная решетки.

Таким образом, в кристалле KCl-Na экспериментально реализованы уникальные возможности создания автолокализованного электронного возбуждения в поле легкого иона натрия – тремя механизмами – экситонной, дырочно-электронной рекомбинации и электронно-дырочной рекомбинации, излучательная релаксация которого заканчивается люминесценцией с максимумом при 2,8 эВ.

**Ключевые слова:** KCl-Na, легкий катион, автолокализованный экситон, дырочно-электронная рекомбинация, электронно-дырочная рекомбинация.

**Введение.** Высокий квантовый выход сцинтилляции щелочногалоидных кристаллов (ЩГК) при сохранении прозрачности в широком интервале спектра может улучшаться путем управления предраспадным состоянием автолокализованного анионного экситона на первичные радиационные дефекты и излучения [1-5].

В этом направлении проведена серия оригинальных экспериментов при непосредственном воздействии на каналы распада электронных возбуждений (ЭВ) в ЩГК путем понижения симметрии решетки одноосной упругой и пластической, а также локальной деформации за счет различных размеров, как катионов-гомологов, так и анионов-гомологов [6-9].

При сверхвысоких давлениях в соединениях NaCl обнаружены стехиометрические явления, не подчиняющиеся классическим закономерностям [10].

Релаксационные процессы ЭВ чувствительны к симметрии окружающих частиц, и поэтому экспериментально можно создать экстремальные условия для детального исследования релаксации ЭВ в ЩГК [6, 11-13].

В данной работе приведены оригинальные результаты по прямому оптическому созданию анионных экситонов и рекомбинационное формирование автолокализованных экситонов (АЛЭ) в поле легкого катиона-натрия в кристалле KCl-Na.

**Техника эксперимента.** Эксперименты при 4,2 К с использованием вакуумно-ультрафиолетовой (ВУФ) спектроскопии были проведены в Институте физики Тартуского университета Эстонии.

Спектры рентгенолюминесценции (РЛ) кристаллов регистрировались с использованием рентгеновской установки РУП-120, работающей в режиме 3 мА и 100 кВ. Сканирование спектров излучения кристаллов осуществлялось с помощью светосильного монохроматора МСД-2 и фотоэлектронного умножителя типа Н 8259 фирмы «Hamamatsu», работающего в режиме счета фотонов, управляемого специальной программой SpectraSCAN. Скорость

сканирования 50 нм/с. Температурная зависимость РЛ кристаллов осуществлялась со скоростью нагрева кристалла – 0,05 К/с.

Все кристаллы KCl и KCl-NaCl с различной концентрацией NaCl были синтезированы в Институте физики Тартуского университета Эстонии по комплексной методике очистки и выращивания ЩГК [14], которая позволяет уменьшить содержание основных примесных ионов до уровня  $10^{-4} \div 10^{-6}$  моль%.

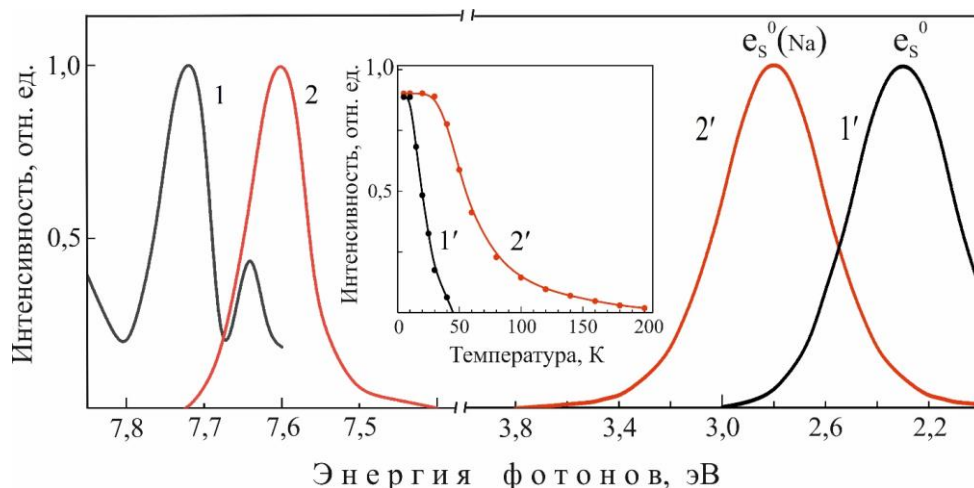
Упругая деформация кристаллов осуществлялась в специальном криостате при низких температурах (90 К) в пределах до 1% относительной деформации [15].

**Результаты и обсуждение. 1. Прямое оптическое создание автолокализованных экситонов в поле легкого натрия в кристалле KCl-Na.** Для кристалла kcl при низких температурах 4,2 к известны спектры возбуждения, состоящие из двух максимумов при 7,72 эВ и 7,66 эВ, люминесценции автолокализованного экситонного (собственного) с максимумом при 2,3 эВ [1-2]. слабый максимум при 7,66 эВ в спектре возбуждения люминесценции при 2,3 эВ характеризует автолокализацию экситонов в поле неконтролируемых примесей, вакансионных дефектов и локальных деформаций [1-2].

На рисунке 1 представлены при 4,2 К спектры возбуждения (кр.1) люминесценции АЛЭ с максимумом при 2,3 эВ (кр.1') кристалла KCl и спектры возбуждения (кр.2) люминесценции АЛЭ в поле натрия с максимумом при 2,8 эВ (кр.2') кристалла KCl-Na.

Из рис. 1 следует, что люминесценцию с максимумом при 2,8 эВ, которая эффективно возбуждается при 7,62 эВ, можно считать излучательной релаксацией АЛЭ в поле легкого катиона натрия  $e_s^0(Na)$  в кристалле KCl-Na при 4,2 К. Главным аргументом этого предположения является тот факт, что интенсивность спектра возбуждения люминесценции при 2,8 эВ имеет корреляцию с концентрацией натрия в KCl-Na и доминирует над фоном неконтролирующих дефектов (ср. кр. 2 и 2' рис. 1).

Исследование температурной зависимости интенсивности люминесценции с максимумом при 2,8 эВ в кристалле KCl-Na при возбуждении фотонами с энергией 7,6 эВ показывает, что она имеет продолжительный температурный ход тушения от 4,2 К до 200 К (кривая 2' на вставке рис. 1), в отличие от интенсивности люминесценции автолокализованного экситона в регулярных узлах решетки с максимумом при 2,3 эВ, которая тушится уже при 50 К (кривая 1' на вставке рис. 1).



**Рисунок 1.** Спектры возбуждения при 4,2 К (кр.1) люминесценции АЛЭ с максимумом при 2,3 эВ (кр.1') кристалла KCl и спектры возбуждения (кр.1) люминесценции с максимумом при 2,8 эВ (кр.2') кристалла KCl-Na.

На вставке: Температурное тушение люминесценции автолокализованного экситона (2,3 эВ) в регулярных узлах решетки (1) и околонатриевого (2) экситона (2,8 эВ) в кристалле KCl-Na при ВУФ-возбуждений с энергией фотонов при 7,7 эВ и 7,6 эВ, соответственно.

Это означает, что при температуре выше 50 К в кристалле KCl-Na автолокализованные экситоны в регулярных узлах решетки уже не существуют, о чем свидетельствует исчезнувшее собственное излучение с максимумом при 2,3 эВ.

Дальнейшее температурное тушение люминесценции при 2,8 эВ в кристалле KCl-Na показывает, что при 80К остается еще 25% от первоначальной интенсивности, а при 200 К наступает полное температурное тушение (кривая 2' на вставке рис.1).

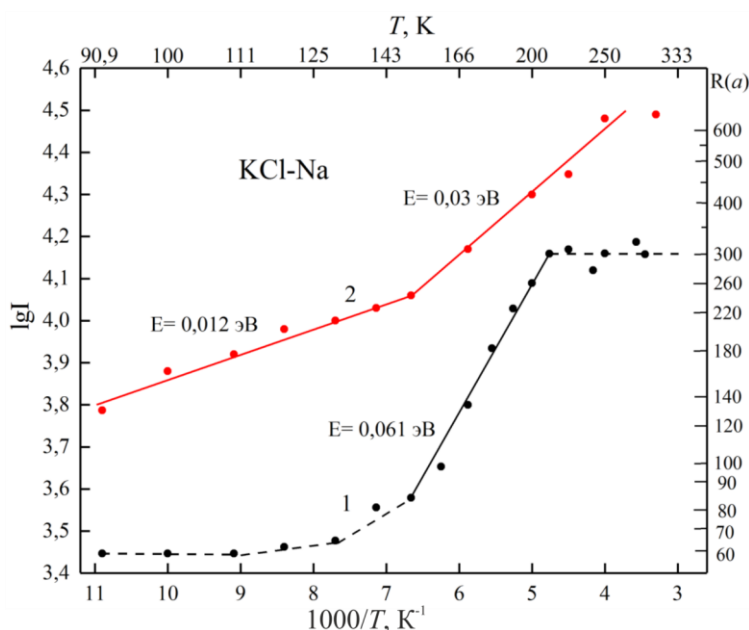
Из сравнения кривых температурного тушения люминесценции АЛЭ в регулярных узлах решетки с максимумом при 2,3 эВ (кривая 1' на вставке рис. 1) и АЛЭ около натрия с максимумом при 2,8 эВ (кривая 2' на вставке рис. 1) следует, что в кристалле KCl-Na при температуре 4,2 К сосуществуют два вида автолокализованного экситона, как собственный АЛЭ, так и околонатриевый АЛЭ, а выше температуры от 50 К до 150÷200 К создается только околонатриевый АЛЭ. Итак, анализ температурного тушения люминесценции позволяет оценить температурный диапазон оптического создания свободного экситона в кристалле KCl-Na.

Таким образом, в кристалле KCl-Na при 4,2 К экспериментально продемонстрировано оптическое создание свободных экситонов в поле легкого катиона натрия при фотовозбуждении в ВУФ-области спектра с энергией фотонов 7,62 эВ, излучательная релаксация которых заканчивается с характерной полосой люминесценции с максимумом при 2,8 эВ и полушириной 0,56 эВ.

## 2. Дырочно-электронная рекомбинация в поле легкого натрия в кристалле KCl-Na.

Из экспериментальных результатов ВУФ-спектроскопии следует, что в кристалле KCl-Na непосредственно с энергией фотонов при 7,62 эВ оптически создается АЛЭ в поле легкого катиона натрия -  $e_s^0(Na)$ , и его излучательная релаксация сопровождается люминесценцией с максимумом при 2,8 эВ в интервале температур - 150÷200 К.

В кристалле KCl-Na под воздействием рентгеновских лучей, создающих преимущественно электронно-дырочные пары (90%), в отличие от вакуумно-ультрафиолетовой радиации, селективно создающей анионные экситоны, зарегистрировано усиление интенсивности рентгенолюминесценции (РЛ) с максимумом 2,8 эВ в интервале температур - 150÷200 К (Рис. 2), когда полностью потушено свечение АЛЭ около натрия, созданное непосредственно прямым ВУФ-возбуждением (кривая 2' на вставке рис.1).



**Рисунок 2.** Температурная зависимость интенсивности рентгенолюминесценции при 2,8 эВ кристалла KCl-Na в отсутствии (1) и под воздействием низкотемпературной упругой деформации (2) в координатах Аррениуса

На рис. 2 приведена температурная зависимость интенсивности рентгенолюминесценции при 2,8 эВ кристалла KCl-Na в координатах Аррениуса. Следует напомнить, что рентгеновское возбуждение в ЩГК до 90% создает не релаксированные электронно-дырочные пары, в отличие от вакуумно-ультрафиолетовой радиации, селективно создающие анионные экситоны.

Обнаруженный нами рост интенсивности РЛ при 2,8 эВ в кристалле KCl-Na начинается от 140 К до 250 К (кривая 1 рис.2) в том температурном интервале, когда тушится излучение при 2,8 эВ, созданное прямым оптическим ВУФ-возбуждением с энергией фотонов при 7,62 эВ (кривая 2' на вставке рис.1), т.е. их температурный ход имеет антикорреляционный характер.

По линейному участку нарастания интенсивности РЛ 2,8 эВ в интервале температур 150→210 К (кривая 1 рис.2) оценена энергия активации (0,061 эВ), что на порядок меньше энергии прыжковой диффузии  $V_k$  – центров (0,54 эВ) в кристалле KCl. Это означает, что разгорание РЛ при 2,8 эВ с увеличением температуры не связано с термической делокализованной дыркой, а скорее всего за счет пробега нерелаксированных дырок в процессе рентгеновского облучения. Ниже температуры 150 К дырки эффективно автолокализуются, только незначительная доля доходит до натрия, а с ростом температуры доля автолокализованных дырок стремительно уменьшается, что дает увеличение концентрации нерелаксированных дырок в решетке.

Сравнительный анализ длины свободного пробега нерелаксированной дырки и экситона в кристалле KCl показывает, что при 80 К длина свободного пробега нерелаксированной дырки до автолокализации составляет до 60-90 $a$  [16], то есть существенно превышает длину свободного пробега экситона ( $2a$ ) в кристалле KCl [1-2]. Причем с ростом температуры длина свободного пробега экситонов сокращается, а нерелаксированной дырки – увеличивается и при комнатной температуре (300К) достигает до 1000 $a$  [16].

На основании этих данных нами отождествляется интенсивность рентгенолюминесценции при 2,8 эВ с длиной свободного пробега нерелаксированных дырок –  $R(a)$  в кристалле KCl-Na. Зеркально противоположной стороне логарифмической зависимости интенсивности –  $\lg I$  представлены соответствующие значения длины свободного пробега нерелаксированных дырок –  $R(a)$  (правая часть рисунка 2).

После таких преобразований становится очевидным, что рост интенсивности рентгенолюминесценции при 2,8 эВ в кристалле KCl-Na в температурном интервале от 150→210 К напрямую связан с увеличением длины свободного пробега нерелаксированных дырок. Из рис. 2 (кривая 1) следует, что в температурном интервале 100К-210К в 5 раз увеличивается  $R(a)$ .

Самым интересным, на наш взгляд, являются экспериментальные результаты по воздействию упругой деформации на длину свободного пробега нерелаксированных дырок, представленные на рис. 2 (кривая 2), из которого следует, что даже при низких температурах (90-125 К) длина свободного пробега нерелаксированных дырок  $R(a)$  имеет 140 $a$ , т.е. в 2 раза больше, чем в отсутствии деформации (сравните кривые 1 и 2 рис.2), где,  $a$  – постоянная решетки.

В упругодеформированных кристаллах KCl-Na по сравнению с недеформированными длина свободного пробега нерелаксированных дырок в интервале температур 100-300 К может увеличиваться в 10 раз, составляя значение 600 $a$  (сравните кривые 1 и 2 на рис.2).

В процессе рентгеновского облучения, когда в решетке создается поток свободных электронов и дырок, локальная деформация со стороны легкого натрия является центром последовательной дырочно-электронной рекомбинации с образованием экситон-подобного образования в поле натрия, а ее дальнейшая релаксация заканчивается излучением с максимумом при 2,8 эВ.

**3. Электронно-дырочная рекомбинация в поле легкого натрия в кристалле KCl-Na.** В кристалле KCl-Na под действием рентгеновского облучения при 80 К создается набор радиационных дефектов –  $I_A(Na)$ ,  $H_A(Na)$ ,  $F'$ ,  $V_K$ ,  $V_{KA}(Na)$ ,  $V_F$ ,  $Cl_3^- (V_2)$  и  $F$ -центры, которые

имеют температуру отжига при 143 К, 130 К, 200 К, 210 К, 265 К, 235К и 360-400 К, соответственно. Из всех радиационных дефектов  $F$  и  $F'$  - центры являются электронными, которые имеют полосы поглощения с максимумами при 2,3 эВ и 1,5 эВ, соответственно.

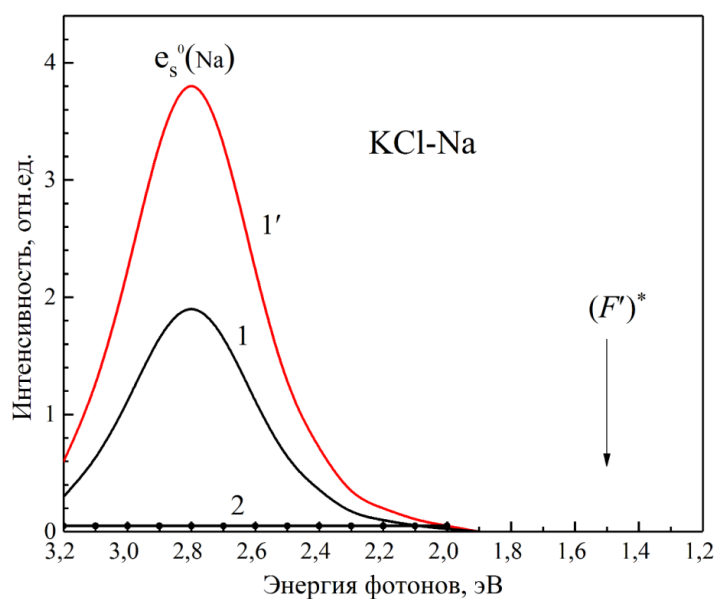
Суть эксперимента по обнаружению электронно-дырочной рекомбинации в поле натрия заключается в следующем: кристаллы KCl и KCl-Na облучаются рентгеновскими лучами при 80 К в изодозовом режиме с целью накопления вышеперечисленных радиационных дефектов, а затем через решеточный монохроматор МДР-12 с применением набора светофильтров осуществляется при 80 К оптическая стимуляция  $F'$ -центров в спектральной области при 1,5 эВ (823 нм).

На рисунке 3 приведен спектр излучения при оптической стимуляции в  $F'$ -полосе поглощения (1,5 эВ), предварительно облученного в изодозовом режиме рентгеновскими лучами при 80 К кристаллов KCl-Na(1) и KCl (2).

В кристалле KCl-Na (рис. 3, кр. 1) оптическая стимуляция в области спектра 1,5 эВ приводит к разрушению  $F'$ -центров ( $F' \rightarrow F + e^-$ ), в результате чего высвобожденные электроны от  $F'$ -центров легко могут рекомбинировать с неподвижными  $V_{KA}(Na)$ -центрами с образованием  $e^- + e_s^+(Na) \rightarrow e_s^0(Na)$ , которые проявляются с характерными излучениями при 2,8 эВ.

В кристалле KCl (рис. 3, кр.2) в тех же условиях эксперимента аналогичное излучение не зарегистрировано. В принципе высвобожденные электроны от  $F'$ -центров могут и рекомбинироваться с аналогичным дырочным  $V_K$  – центром, представляющим собой автолокализованную дырку в регулярной решетке, как в кристалле KCl, так и в кристалле KCl-Na. Однако, в спектре излучения при оптической стимуляции (вспышки)  $F'$ -центров в обоих кристаллах не зарегистрировано излучение, ответственное за электронно-дырочную рекомбинацию ( $e^- + V_K$ ) в регулярных узлах решетки, кроме излучения при 2,8 эВ в кристалле KCl-Na.

Экспериментально установлено, что в кристалле KCl-Na эффект электронно-дырочной рекомбинации усиливается при упругой деформации за счет накопления  $F'$ -центров (кривая 1' рис.3).



**Рисунок 3.** Спектры излучения при оптической стимуляции в  $F'$ -полосе поглощения (1,5 эВ), предварительно облученного по 30 минут рентгеновскими лучами при 90 К кристаллов KCl-Na в отсутствии деформации (1), при деформации до 1% (1') и KCl (2).

Таким образом, в кристалле KCl-Na экспериментально зарегистрирован эффект электронно-дырочной рекомбинации в поле легкого натрия при оптической стимуляции  $F'$ -полосе поглощения (1,5 эВ). В процессе рекомбинации свободных электронов с автолокализованными дырками в поле натрия формируется экситоноподобное образование в поле легкого натрия, излучательная релаксация которого заканчивается идентично люминесценции АЛЭ в поле натрия с максимумом при 2,8 эВ.

**Заключение.** В настоящей работе на базе кристалла KCl-Na были реализованы излучательная релаксация экситонно-подобного образования в поле натрия имеющая полосу люминесценции с максимумом при 2,8 эВ тремя способами:

во-первых, путем оптического создания в ВУФ-области спектра с энергией фотонов 7,62 эВ в температурном интервале 4,2÷200 К, во-вторых, путем дырочно-электронного формирования при рентгеновском облучении в температурном диапазоне при 150-250 К, в-третьих, путем электронно-дырочного формирования при оптической  $F'$  - стимуляции предварительно облученного рентгеновскими лучами кристаллов при 90К.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МОН РК (ИРН AP08855672).

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Lushchik Ch., Lushchik A. Evolution of Anion and Cation Excitons in Alkali Halide Crystals // *Phys. 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] Kaplunov I.A., Kropotov G.I., Rogalin V.E., Shakhmin A.A. On the Transparency of Alkali-Halide Crystal in the Terahertz Spectral Range // *Optics and Spectroscopy.* – 2020. – Vol. 128 (10). – P. 1583-1587.

[4] Kuzovkov V.N., Popov A.I., Kotomin E.A., Vasil'chenko E., Lushchik A. Theoretical analysis of the kinetics of low-temperature defect recombination in alkali halide crystals // *Fizika Nizkikh Temperatur.* – 2016. – Vol. 42. – P. 588-593.

[5] Bryukvina L., Ivanov N., Nebogin S. Relationships between lithium and sodium nanoparticles and color centers formation in LiF and NaF crystals with hydroxide and magnesium ions impurities // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* – 2018. – Vol. 120. - P. 133-139.

[6] Babin V., Elango A., Kalder K., Maaros A., Shunkeev K., Vasil'chenko E., Zazubovich S. Luminescent defects created in alkali iodides by plastic deformation at 4.2K // *J. Lumin.* – 1999. – Vol. 81. – P. 71-77.

[7] Shunkeyev K., Myasnikova L., Barmina A., Zhanturina N., Sagimbaeva S., Aimaganbetova Z., Sergeyev D. The thermostimulated luminescence of radiation defects in KCl, KBr and KI crystals at elastic and plastic deformation // *J. of Physics: Conference Series.* – 2017. Vol. 830(1). - 012138.

[8] Myasnikova L., Shunkeyev K., Zhanturina N., Ubaev Zh., Barmina A., Sagimbaeva Sh., Aimaganbetova Z. Luminescence of self-trapped excitons in alkali halide crystals at low temperature uniaxial deformation // *Nucl. Instrum. Meth. B.* – 2020. Vol. 464. P. 95-99.

[9] Shunkeyev K., Zhanturina N., Aimaganbetova Z., Barmina A., Myasnikova L., Sagymbaeva S., Sergeyev D. The specifics of radiative annihilation of self-trapped excitons in a KI-Tl crystal under low-temperature deformation // *Low Temp. Phys.* 2016. Vol. 42. P. 580-583.

[10] Zhang W., Oganov A.R., Goncharov A.F., Zhu Q., Boulfelfel S.E., Lyakhov A.O., Stavrou E., Somayazulu M., Prakapenka V.B., Konopkova Z. Unexpected Stable Stoichiometries of Sodium Chlorides // *Science.* - 2013. - Vol. 342. - P. 1502–1505.

[11] Babin V., Bekeshev A., Elango A., Kalder K., Maaros A., Shunkeev K., Vasilchenko E., Zazubovich S. Effect in uniaxial stress on luminescence of undoped and thallium-doped KI and RbI crystals // *J. Physics: Condensed Matter.* – 1999. – Vol. 11. – P. 2303-2317.

[12] Shunkeyev K., Zhanturina N., Shunkeev S., Sagimbaeva S. The bonding mechanisms of electron-hole pairs in KCl crystal at lattice symmetry lowering by cation-homologs and low temperature elastic stress // *Известия вузов. Физика.* - 2014. - Т. 57, №12/3. - С. 36-42.

[13] 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. Physics: Conf. Series.* - 2017. – Vol. 830. – 012139.

[14] Гиндина Р.И., Маароос А.А., Плом Л.А., Янсон Н.А. Разработка методики получения кристаллов KCl и KBr с содержанием примесей  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  // *Труды ИФ АН ЭССР.* - 1979. - Т. 49. - С. 45–89.

[15] Shunkeyev K., Sarmukhanov E., Bekeshev A., Sagimbaeva S., Bizhanova K. The cryostat for deformation of crystals at low temperatures // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2012. – Vol. 400(5). – 052032.

[16] Алукер Э.Д., Лусис Д.Ю., Чернов С.А. Электронные возбуждения и радиолюминесценция щелочногалогидных кристаллов. -Рига, "Зинатне", 1979. - 251 с.

## REFERENCES

[1] Lushchik Ch., Lushchik A. Evolution of Anion and Cation Excitons in Alkali Halide Crystals // *Phys. 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] Kaplunov I.A., Kropotov G.I., Rogalin V.E., Shakhmin A.A. On the Transparency of Alkali-Halide Crystal in the Terahertz Spectral Range // *Optics and Spectroscopy.* – 2020. – Vol. 128 (10). – P. 1583-1587.

[4] Kuzovkov V.N., Popov A.I., Kotomin E.A., Vasil'chenko E., Lushchik A. Theoretical analysis of the kinetics of low-temperature defect recombination in alkali halide crystals // *Fizika Nizkikh Temperatur.* – 2016. – Vol. 42. – P. 588-593.

[5] Bryukvina L., Ivanov N., Nebogin S. Relationships between lithium and sodium nanoparticles and color centers formation in LiF and NaF crystals with hydroxide and magnesium ions impurities // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* – 2018. – Vol. 120. - P. 133-139.

[6] Babin V., Elango A., Kalder K., Maaros A., Shunkeyev K., Vasil'chenko E., Zazubovich S. Luminescent defects created in alkali iodides by plastic deformation at 4.2K // *J. Lumin.* – 1999. – Vol. 81. – P. 71-77.

[7] Shunkeyev K., Myasnikova L., Barmina A., Zhanturina N., Sagimbaeva S., Aimaganbetova Z., Sergeyev D. The thermostimulated luminescence of radiation defects in KCl, KBr and KI crystals at elastic and plastic deformation // *J. of Physics: Conference Series.* – 2017. Vol. 830(1). - 012138.

[8] Myasnikova L., Shunkeyev K., Zhanturina N., Ubaev Zh., Barmina A., Sagimbaeva Sh., Aimaganbetova Z. Luminescence of self-trapped excitons in alkali halide crystals at low temperature uniaxial deformation // *Nucl. Instrum. Meth. B.* – 2020. Vol. 464. P. 95-99.

[9] Shunkeyev K., Zhanturina N., Aimaganbetova Z., Barmina A., Myasnikova L., Sagymbaeva S., Sergeyev D. The specifics of radiative annihilation of self-trapped excitons in a KI-Tl crystal under low-temperature deformation // *Low Temp. Phys.* 2016. Vol. 42. P. 580-583.

[10] Zhang W., Oganov A.R., Goncharov A.F., Zhu Q., Boulfelfel S.E., Lyakhov A.O., Stavrou E., Somayazulu M., Prakapenka V.B., Konopkova Z. Unexpected Stable Stoichiometries of Sodium Chlorides // *Science.* - 2013. - Vol. 342. - P. 1502–1505.

[11] Babin V., Bekeshev A., Elango A., Kalder K., Maaros A., Shunkeyev K., Vasilchenko E., Zazubovich S. Effect in uniaxial stress on luminescence of undoped and thallium-doped KI and RbI crystals // *J. Physics: Condensed Matter.* – 1999. – Vol. 11. – P. 2303-2317.

[12] Shunkeyev K., Zhanturina N., Shunkeyev S., Sagimbaeva S. The bonding mechanisms of electron-hole pairs in KCl crystal at lattice symmetry lowering by cation-homologs and low temperature elastic stress // *Известия вузов. Физика.* - 2014. - Т. 57, №12/3. - С. 36-42.

[13] 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. Physics: Conf. Series.* - 2017. – Vol. 830. – 012139.

[14] Gindina R.I., Maaros A.A., Ploom L.A., YAanson N.A. Razrabotka metodiki polucheniya kristallov KCl i KBr s soderzhaniem primesej  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  // *Trudy IF AN ESSR.* – 1979. – Т. 49. – С. 45–89.

[15] Shunkeyev K., Sarmukhanov E., Bekeshev A., Sagimbaeva S., Bizhanova K. The cryostat for deformation of crystals at low temperatures // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – Vol. 400(5). – 052032.

[16] Aluker E.D., Lusic D.YU., Chernov S.A. Elektronnyye vzbuzhdeniya i radiolyuminescenciya shchelochnogaloidnyh kristallov. -Riga, "Zinatne", 1979. - 251 s.

**Ж.К. Убаев\*, К. Ш. Шункеев**

Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

\*e-mail: nczhiger@mail.ru

### **KCl-Na КРИСТАЛЫНЫҢ НАТРИЙ МАҢЫНДАҒЫ ЭКСИТОНДАРДЫ ОПТИКАЛЫҚ ӨНДІРУ ЖӘНЕ РЕКОМБИНАЦИЯЛЫҚ ЖИНАҚТАУ**

**Андатпа.** KCl-Na кристалының натрий өрісіндегі өздігінен қармалған экситонның 2,8 эВ максимумда радиациялық релаксациялануы, фотон энергиясы 7,62 эВ болатын натрийге жақын экситонды тікелей оптикалық құру кезінде, 150 К – 300 К температура диапазонында рентгендік қозу жағдайындағы кемтікті-электрон рекомбинациясы, сондай-ақ алдын-ала рентген сәулелерімен сәулелендірілген кристалл, 80 К температурада (1,5 эВ)  $F'$  - центрі аумағындағы спектрлер оптикалық ынталандыру кезінде электронды-кемтік рекомбинациясы эксперименталды түрде көрсетілді.

Рентгендік қоздыру кезіндегі KCl-Na кристалының 2,8 эВ кезіндегі сәулелену қарқындылығының барлық экситон тәрізді сәулелену сөнген кезде температурасы 150 К-300 К аралығында, еркін жүру жолының 60  $a$  - 600  $a$  аралығында ұзаруымен түсіндіріледі, мұндағы  $a$  - тордың тұрақтысы.

Осылайша, KCl-Na кристалында жеңіл натрий ионының аймағында өздігінен қармалған электронды қозуды құрудың бірегей мүмкіндіктері эксперименталды түрде үш механизммен жүзеге асады – экситондық, кемтікті-электрондық рекомбинация және электронды-кемтіктік рекомбинация, оның радиациялық релаксациясы 2,8 эВ максимумдық люминесценциямен аяқталады.

**Негізгі сөздер:** KCl-Na, жеңіл катион, өздігінен қармалған экситон, кемтікті-электрон рекомбинациясы, электронды-кемтік рекомбинациясы.

**Zh. Ubayev\*, K. Shunkeyev**

K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan

\*e-mail: nczhiger@mail.ru

### **THE OPTICAL CREATION AND RECOMBINATION ASSEMBLY OF NEAR-SODIUM ELECTRON EXCITATIONS IN KCl-Na CRYSTAL**

**Abstract.** The radiative relaxations of self-trapped excitons with a maximum at 2.8 eV in the sodium field are experimentally demonstrated in KCl-Na crystal – at direct optical creation of a near-sodium exciton with a photon energy of 7.62 eV, at electron – hole recombination in the process of X-ray excitation in the temperature range from 150 K to 300 K, as well as electron-hole recombination at optical stimulation in  $F'$  - centers spectrum region (1.5 eV) at 90 K in crystal, pre-irradiated by X.

The increase in the radiation intensity at 2.8 eV of KCl-Na crystal at X-ray excitation in the temperature range from 150 K to 300 K, when all exciton-like radiation is quenched, is interpreted by increasing the free path of the unrelaxed hole from 60  $a$  to 600  $a$ , where  $a$  is the lattice constant.

Thus, in KCl-Na crystal, unique possibilities of self-trapped electronic excitation creation in the field of a light sodium ion are experimentally realized by three mechanisms – exciton, hole-electron recombination, and electron-hole recombination, the radiative relaxation of which ends by luminescence with a maximum at 2.8 eV.

**Keywords:** KCl-Na, light cation, self-trapped exciton, hole-electron recombination, electron-hole recombination.