

Ж.Р. АЗМАГАНБЕТОВА, А.Ч. ЛУЩИК,  
А. МААРООС, Т.Н. НУРАХМЕТОВ, Б.Ж. ТОКСАНБАЕВ

## ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫЕ И ТУННЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛЮМИНОФОРАХ $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+},\text{Na}^{1+}$

В  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+},\text{Na}^{1+}$  изучены процессы возбуждения свечения  $\text{Tb}^{3+}$ -центров при прямом возбуждении  $\text{Tb}^{3+}$  фотонами 5,9 эВ, передаче примесным центрам энергии от возбужденных (например, фотонами 8,44 эВ) оксианионов, а также при рекомбинации электронов и дырок, создаваемых фотонами с  $h\nu > 9,5$  эВ. Наряду с термостимулированной люминесценцией в  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+},\text{Na}^{1+}$  обнаружены также излучательные туннельные рекомбинации между пространственно разделенными и локализованными электронами и дырками. Обсуждается возможность получение для тербивого свечения выхода  $\eta > 1$  при возбуждении  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+},\text{Na}^{1+}$  излучением ксенонового разряда.

В настоящее время ортосульфаты  $\text{CaSO}_4$ , активированные редкоземельными ионами ( $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ), являются эффективными и широко применяемыми материалами для дозиметрии  $\gamma$ - и рентгеновских (X) лучей. Фосфоры  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ , давно используются в качестве дозиметров вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) радиации [1] и как объекты сравнения при разработке селективных дозиметров быстрых нейтронов [2]. Ведутся исследования различных люминофоров на базе щелочноземельных сульфатов для осветительных приборов и плоских плазменных телевизионных дисплеев [3-6]. К чувствительным методам исследования электронно-дырочных процессов относится метод термостимулированной люминесценции (ТСЛ). Исследование ТСЛ в соединениях со структурой  $\text{CaSO}_4$  посвящены многочисленные работы. Наиболее изучены процессы ТСЛ в  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{CaSO}_4:\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{CaSO}_4:\text{Sm}^{3+}$  фосфорах, облученных X-лучами [7-10]. Радиационные дефекты в номинально чистом кристалле  $\text{CaSO}_4$ , X-облученном при 77 К, исследованы методом ЭПР [10]. Обнаружены два типа  $\text{SO}_4^{2-}$ -радикалов, расположенных около катионных вакансий ( $v_c$ ) и стабильных до 395 и 465 К, соответственно. Общепринято, что дефектообразование в сульфатах щелочноземельных металлов, в частности в  $\text{CaSO}_4$ , связано с распадом возбужденных оксианионных комплексов  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Настоящая работа посвящена исследованию люминесценции (фосфоресценции) во время (после) возбуждения  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+},\text{Na}^{1+}$  фотонами 4-12 эВ, а также ТСЛ люминофоров, предварительно облученных фотонами разных энергий или электронами 5-10 кэВ. Целью работы является выделение основных механизмов передачи энергии, поглощаемой основным веществом люминофора, центрам люминесценции – ионам  $\text{Tb}^{3+}$ , замеща-

ющим близкие по ионному радиусу  $\text{Ca}^{2+}$ . Особое внимание удалено разделению процессов возбуждения линейчатого  $\text{Tb}^{3+}$ -свечения фотонами, вызывающими возбуждение или ионизацию оксианионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , а также выделению на фоне ТСЛ туннельной люминесценции, подробно изученной ранее в щелочногалоидных кристаллах (см., например, [11]).

Объектами исследования были фосфоры  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Na}^{1+}$  где ионы  $\text{Na}^+$  были введены в качестве компенсатора заряда. В дальнейшем люминофор  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}$ (1 моль%), $\text{Na}^{1+}$ (3 моль%) будет именоваться  $\text{CaSO}_4:\text{Tb},\text{Na}-1$ , а  $\text{CaSO}_4:\text{Tb}^{3+}$ (4 моль%), $\text{Na}^{1+}$ (12 моль%) –  $\text{CaSO}_4:\text{Tb},\text{Na}-2$ . Порошки с размерами зерен ~6 мкм были синтезированы в Институте физики Тартуского университета по методике, описанной в [3]. В качестве исходных веществ использовались  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{TbO}_2$ ,  $\text{NaCl}$  и  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$  (для компенсации анионной части). Измельченная шихта прокаливалась два часа при 750°C, после быстрого охлаждения промывалась дистиллированной водой, отфильтровывалась и высушивалась при 130°C.

Измерения производились на двух экспериментальных установках Института физики (детальное описание см. в [12]). При исследовании спектров возбуждения люминесценции и ТСЛ источником ВУФ-радиации являлся разряд водорода в проточной кварцевой лампе, соединенной с монохроматором BMP-2. При измерении спектров возбуждения, путем варьирования ширины щелей вакуумного монохроматора, поддерживалось постоянство числа падающих на объект возбуждающих фотонов. Для нормировки использовалось свечение эталонного фосфора - салицилата натрия - с постоянным квантовым выходом  $\eta = 0,60 \pm 0,03$  в диапазоне 4.5-11.5 эВ. После облучения объекта фотонами разных энергий при

80 или 300 К измерялись кривые ТСЛ (набором фильтров выделялась область 1,8-2,6 эВ, где осуществляются излучательные переходы в  $Tb^{3+}$ ) со скоростью нагрева  $\omega = 10$  К/мин. Для люминофора, предварительного облученного электронным пучком (5 кэВ, 300 нА, пятно  $\sim 2$  мм $^2$ ) при температуре 5 К, ТСЛ измерялась с  $\omega = 10$  К/мин для наиболее интенсивной линии свечения  $Tb^{3+}$  (2,27 эВ), выделяемой двойным монохроматором ДМР-4.

На рис. 1 приведены кривые ТСЛ для двух идентичных люминофоров  $CaSO_4:Tb, Na-1$ . Один образец был предварительно облучен 15 мин при 80 К фотонами с  $h\nu = 10.5$  эВ ( $\sim 10^{14}$  фотонов/см $^2$ ), селективно создающими, как показано в [6], разделенные электроны ( $e$ ) и дырки ( $h$ ). Второй люминофор был облучен при 5 К электронами (5 кэВ, 30 мин), создающими в тонком слое ( $\sim 1-2$  мкм) значительно большую плотность различных электронных возбуждений, чем это делали фотоны 10,5 эВ. Для первого люминофора интенсивность ТСЛ, регистрируемой для  $Tb^{3+}$ -свечения, падала до нуля при нагреве от 390 до 450 К. С другой стороны, под существенно более интенсивной ТСЛ, измеренной для свечения 2,27 эВ в подвергнутом электронному облучению образце, наблюдался «пьедестал» примесного свечения, практически независимого от температуры в области 120-420 К и очень медленно спадающего со временем. Как показали дополнительные эксперименты, вторая стадия «пьедестала» полностью исчезает лишь после прогрева выше 500 К. Отметим, что рост дозы облучения фотонами 10,5 эВ ведет к накоплению созданных и локализованных  $e$  ( $h$ ), а после 30-60 мин облучения наступает насыщение основного пика ТСЛ при  $\sim 235$  К.

Аналогичное свечение, не зависящее от температуры в широкой области, изучено в кристаллах KCl и KBr (см., например, [11]) и несомненно соответствует туннельным рекомбинациям между пространственно разделенными локализованными  $e$  и  $h$ . Туннельная люминесценция (ТЛ) осуществляется без попадания  $e$  и  $h$  в зону проводимости и валентную зону, соответственно. ТЛ пропадает при нагреве образца лишь после термической ионизации электронного или дырочного центров захвата. В KCl к таким центрам относятся автолокализованная дырка, способная к прыжковой миграции лишь после нагре-

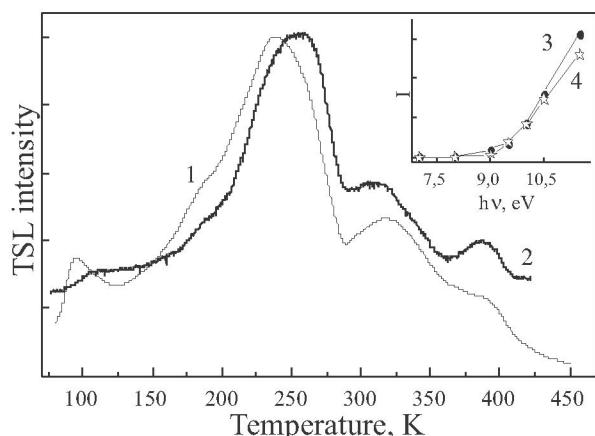


Рис. 1. Нормированные кривые ТСЛ люминофора  $CaSO_4:Tb, Na-1$ , облученного фотонами с  $h\nu = 10.5$  эВ при 80 К (кривая 1) или электронами 5 кэВ при 5 К (2, реальная интенсивность примерно на два порядка выше). На вставке приведены спектры создания пиков ТСЛ  $\sim 235$  (3) и  $185$  К (4). Кривые ТСЛ измерены для свечения  $Tb^{3+}$ ,  $\omega = 10$  К/мин.

ва до  $\sim 210$  К, или дырка, локализованная около  $V_c$  и неподвижная до  $\sim 250$  К [13]. В MgO термическая ионизация дырки, локализованной около  $V_c$ , осуществляется при 420 К. В  $CaSO_4$  автолокализованной дырке соответствует один тип из  $SO_4^{2-}$ -радикалов, изученных методом ЭПР [7,9].

По данным работы [3], подтвержденным и нашими измерениями при прямом фотовозбуждении оксианионов  $SO_4^{2-}$  фотонами 8,44 эВ в спектре излучения зарегистрирована в основном  $^5D_4 \rightarrow ^7F_1$  серия электронных переходов между энергетическими уровнями  $4f^8$  конфигурации  $Tb^{3+}$  ионов. В спектре стационарной катодолюминесценции  $CaSO_4:Tb, Na-1$  тоже доминируют эта серия с наиболее интенсивной линией излучения при 2,27 эВ ( $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ). На рис. 2 приведен спектр фосфоресценции, измеренный после облучения люминофора  $CaSO_4:Tb, Na-1$  электронами 5 кэВ при 5,5 К и последующей паузы, в течение которой идет быстрая фаза затухания послесвечения. При последующем измерении спектра в области 1,8-3,5 эВ затухание фосфоресценции уже незначительно. В спектре такой ТЛ, возникающей при рекомбинации пространственно разделенных локализованных  $e$  и  $h$ , тоже зарегистрирована  $^5D_4 \rightarrow ^7F_1$  серия электронных переходов в  $4f^8$  конфигурации  $Tb^{3+}$  ионов. Кроме интенсивной линия свечения 2,27 эВ в ТЛ видны и менее вероятные переходы с уровня  $^5D_4$  на  $^7F_6$  (2,54 эВ),  $^7F_4$  (2,13 эВ) и  $^7F_3$  (2,02 эВ). Но наиболее важно, что в спек-

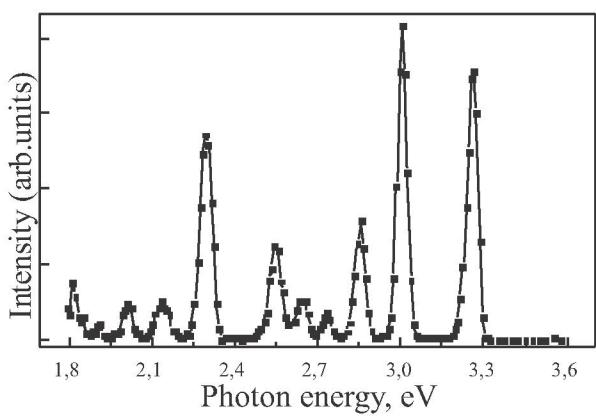


Рис. 2. Спектр фосфоресценции CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-1, измеренный после двухминутного облучения электронами 5 кэВ и 10 мин паузы при 5,5 К

трё ТЛ (туннельной фосфоресценции) видны и интенсивные линии при 2,55-3,35 эВ, связанные с возбуждением Tb<sup>3+</sup> до более высокого по энергии уровня <sup>5</sup>D<sub>3</sub> и последующими излучательными переходами на <sup>7</sup>F<sub>5</sub> (3 эВ, наиболее интенсивная линия) и другие <sup>7</sup>F<sub>J</sub> уровни. Причины различия в процессах возбуждения примесного свечения при передаче ионам Tb<sup>3+</sup> энергии от возбужденного оксианиона или энергии, выделяемой при туннельной рекомбинации пространственно разделенных локализованных *e* и *h*, будут детально рассмотрены в специальной публикации.

Были измерены также кривые ТСЛ фосфора CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-2, облученного при 80 К фотонами с энергией 10 или 11,5 эВ. Как и в образце с меньшей концентрацией Tb<sup>3+</sup> ионов в ТСЛ наблюдаются плохо разрешенные пики при ~110 К, 150, 185 и 235 К. Причем пики 185 и 235 К возникают лишь после облучения фосфоров фотонами с  $h\nu \geq 9,5$  эВ (см. вставку на рис. 1). На рис. 3 для люминофоров с обеими концентрациями тербия приведены спектры возбуждения фосфоресценции равными квантовыми дозами фотонов разных энергий при 80 или 300 К. Как видно из спектров, фосфоресценция в обоих фосфорах появляется после их облучения фотонами с энергией выше 9,5 эВ. Это еще одно экспериментальное подтверждение области начала создания разделенных *e* и *h* (то есть ширины энергетической щели  $E_g$ ) в CaSO<sub>4</sub> (см. также [6]).

На рис. 4 приведены спектр возбуждения для излучения Tb<sup>3+</sup> (в области 2,27 эВ) в CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-1 и CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-2, выделенного комбинацией фильтров. В работах [3,6] широкую

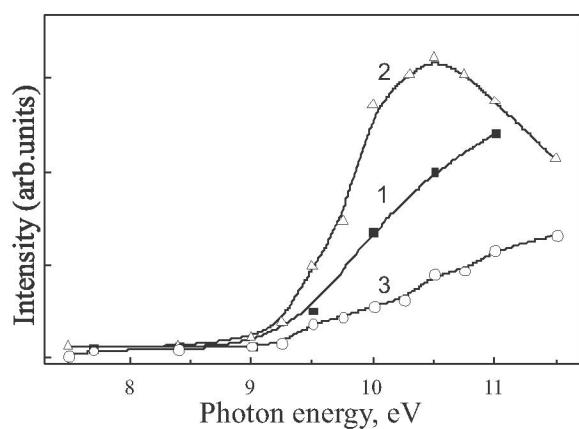


Рис. 3. Спектры возбуждения фосфоресценции для фосфоров CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-1 (кривая 1) и CaSO<sub>4</sub>:Tb, Na-2 (кривые 2 и 3) измеренные при 300 К (1,3) и 80 К (2)

полосу возбуждения с максимумом около 8,4 эВ интерпретируют как фотовозбуждение оксианионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Эта полоса присутствует, как оказалось, в спектрах возбуждения CaSO<sub>4</sub>, легированных не только ионами Tb<sup>3+</sup>, но и имеющими совершенно другие спектры излучения ионами Dy<sup>3+</sup> и Gd<sup>3+</sup>. Предполагается, что в фосфоре CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-2 после возбуждения оксианиона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> фотоном 8,4 эВ энергия может быть передана сразу двум примесным ионам [3,6]. Весьма интенсивная в CaSO<sub>4</sub>:Tb,Na-2 узкая полоса возбуждения в области 5,9 эВ (см. рис. 4) интерпретирована (см. [6] и цитируемую там литературу) как прямое возбуждение Tb<sup>3+</sup>-центров при электронных переходах 4f<sup>8</sup> → 4f<sup>7</sup>4d. Вероятность таких переходов значительно выше, чем для переходов между уровнями 4f<sup>8</sup>-конфигурации. Так как интенсивность свечения Tb<sup>3+</sup>-центров при возбуждении оксианионов ( $h\nu = 8,4$  эВ) значительно выше, чем при прямом возбуждении Tb<sup>3+</sup> фотонами 5,9 эВ, то приведенные на рис. 4 результаты не противоречат предположению [3,6] о возможности получения примесного свечение с квантовым выходом  $\eta > 1$  в CaSO<sub>4</sub> с большой концентрацией тербия (4 мол%). Рассмотрим этот вопрос более подробно.

В настоящее время делаются попытки использовать процессы фотонного умножения [6] или дробления фотонов [3-5] для получения на основе CaSO<sub>4</sub> эффективных спектральных трансформаторов резонансного свечения ксенонового разряда (8,44 эВ) в видимое свечение с квантовым выходом  $\eta > 1$ . Экспериментальные данные, приведенные в настоящей работе, надежно под-

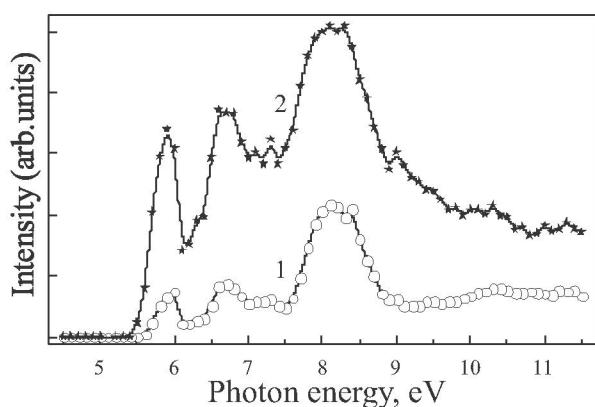


Рис. 4. Спектры возбуждения излучения тербия (545 нм, 2,27 эВ) в  $\text{CaSO}_4\text{:Tb,Na-1}$  (кривая 1) и  $\text{CaSO}_4\text{:Tb,Na-2}$  (2) при 300 К

тврждают определенную в [6] для  $\text{CaSO}_4$  величину  $E_g = 9,5$  эВ. Соответственно, по энергетическим соображениям нельзя получить свечение с  $\eta > 1$  за счет создания одним возбуждающим фотоном 8,44 эВ двух  $e-h$  пар: первичной, образующейся при поглощении фотона, и вторичной, созданной за счет избыточной кинетической энергии горячего электрона проводимости из первичной  $e-h$  пары.

Наши результаты, однако, согласуются с принципиальной возможностью получения  $\text{Tb}^{3+}$ -свечения с  $\eta > 1$  (см. [3,6]) за счет передачи энергии одного возбуждающего фотона с  $h\nu = 8,44$  эВ одному или сразу двум примесным центрам. При передаче энергии одному центру за счет последовательных каскадных переходов возможно испускание двух квантов свечения. Однако, вероятность каскадного излучения в  $\text{CaSO}_4\text{:Tb}^{3+}$  мала [4,5], так как верхний уровень  $^1\text{S}_0$  для 4f $\rightarrow$ 4f переходов расположен выше, чем уровни энергии для переходов, имеющих по правилам отбора большую вероятность. Теоретическую возможность передачи энергии от сенсибилизатора сразу двум люминесцирующим ионам активатора впервые рассмотрел Декстер [14]. Последующая экспериментальная проверка гипотезы на системе  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$  не показала превышения  $\eta = 1$  [15]. Вероятность механизма Декстера низка. Недавно эффект Декстера был предположительно обнаружен для фосфора  $\text{CaSO}_4\text{:Tb}^{3+}, \text{Na}^{1+}$  с 4 моль%  $\text{Tb}^{3+}$ , где эффективность свечения  $\text{Tb}^{3+}$ -центров незначительно превышала единицу при возбуждении резонансным свечением Xe-разряда [3]. Наши экспериментальные данные для

лучшего образца  $\text{CaSO}_4\text{:Tb,Na-2}$  дают для эффективности  $\text{Tb}^{3+}$ -свечения при возбуждении  $h\nu = 8,44$  эВ величину  $\eta = 0,94 \pm 0,05$  (определенна относительно свечения салицилата натрия с  $\eta = 0,60 \pm 0,03$ ). Уже отмечалось, что в нашей системе кроме основной серии излучательных переходов  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_J$  наблюдаются и переходы  $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_J$  (особенно эффективно в фосфоресценции, см. рис. 2). Их учет оставляет возможным получение примесного свечения с  $\eta > 1$  при передаче энергии возбуждающего фотона сразу двум  $\text{Tb}^{3+}$ -центрам люминесценции. К сожалению, основное свечение  $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_J$  лежит в спектральной области, неблагоприятной для человеческого глаза.

Отметим, что величину  $\eta > 1$  для суммарного свечения удалось получить в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Mg,Ti}$  после фотосоздания экситонов фотонами 9 эВ при 80 К [16]. Причем один из двух фотонов, испускаемых после поглощения возбуждающего фотона, был результатом туннельной рекомбинации. Именно поэтому в настоящей работе особое внимание было уделено поиску туннельных переходов в фосфоресценции, которые и были обнаружены в  $\text{CaSO}_4\text{:Tb,Na-1}$  (см. рис. 1, а также [6]). Туннельные переходы в более сложных по структуре сульфатах щелочных металлов исследовались в [17].

Очевидно, что вопрос о возможности получения примесного свечения с  $\eta > 1$  при возбуждении  $\text{CaSO}_4\text{:Tb}^{3+}, \text{Na}^{1+}$  излучением Xe-разряда требует дальнейшего изучения. Нужно учитывать, что наши фосфоры N1 и N2 оказались не достаточно стабильными. Их характеристики несколько меняются при длительном хранении, и еще сильнее - при длительном облучении электронами 5 кэВ при 5 К. Электроны не только возбуждают интенсивную люминесценцию, но и приводят к накоплению дефектов (например, ионов  $\text{SO}_3^-$ ), проявляющихся в высокотемпературных пиках ТСЛ (450-700 К).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельская В.А., Вайнберг Б.И., Разумова Т.К. Простой способ определения пропускания некоторых оптических материалов в шумановской области спектра // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 1. С. 1018-1020.
2. Кузьмин В.В., Лущик Ч.Б., Савиухин Ф.А., Соколов А.Д., Яэк И.В. Термолюминесцентный дозиметр быстрых нейтронов // Атомная энергия. 1967. №22. С. 482-488.
3. Lakshmanan A.R., Kim S.-B., Jang H.M., Kim B.G., Kang B.K., Heo S., Seo D. A quantum-splitting phosphor

exploiting the energy transfer from anion excitons to  $Tb^{3+}$  in  $CaSO_4:Tb,Na$  // Adv.Funct.Mater. 2007. V.17. P. 212-218.

4. Yamashita N., Hamada T., Tanaga M., Katsuki M., Nagakagama M. Photoluminescence and thermiluminescence of  $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $SrSO_4$  and  $BaSO_4$  powder phosphor activated with  $Tb^{3+}$  // Jpn. J.Appl. Phys. 2001. V. 40. P. 6732-6736.

5. Van der Kolk E., Dorenbos P., Vink A.P., Perego R.C. van Eijk C.W.E., Lakshmanan A.R. Vacuum ultraviolet excitation and emission properties of  $Pr^{3+}$  and  $Ce^{3+}$  in MSO (M=Ba, Sr, and Ca) and predicting quantum splitting by  $Pr^{3+}$  in oxides and fluorides // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. 195129.

6. Kudryavtseva I., Liblik P., Lushchik A., Maaroos A., Vasil'chenko E., Azmagambetova Z., Nurakhmetov T., Toxanbayev B.. Electron-hole and excitation processes in  $CaSO_4$  doped with  $Gd^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  and  $Dy^{3+}$  // J. Lumin. 2009. accepted.

7. Calvert R.L., Danby R.J. Thermoluminescence and radioluminescence from Eu- and Sm-doped  $CaSO_4$ . // Phys.Stat.Sol. (a). 1984. V. 83. P. 597-604.

8. Morgan M.D., Stoebe T.G. Thermoluminescent mechanisms in  $CaSO_4:Dy$  single crystals // Radiation Protection Dosimetry. 1986. V. 17. P. 455-458.

9. Danby R.J., Boas J.F., Calvert R.L., Pilbrow J.R. ESR of thermoluminescence centers in  $CaSO_4$  single crystals // J.Phys.C: Solid State Phys. 1982. V. 15. P. 2483-2493

10. Gerome V., Tacconi P., Laproz D., Prevost H., Bauer A. Thermoluminescence of undoped and Dy-doped  $CaSO_4$ : Influence of the preparation methods // Radiation Protection Dosimetry. 1996. V. 65. P. 309-312.

11. Aboltin D.E., Grabovskis V.J., Kangro A.R., Lushchik Ch.B., 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 to 77 K //Phys. Status Solidi (a). 1978.V. 47. P. 667-675.

12. Nakonechnyi S., Körner T., Lushchik A. Lushchik Ch., Babin V., Feldbach E., Kudryavtseva I., Liblik P., Pung L., Vasil'chenko E. Low-temperature excitonic, electron-hole and interstitial-vacancy processes in LiF single crystals // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. P. 379-394.

13. Луцик Ч.Б., Луцик А.Ч.. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989. 263 с.

14. Dexter D.L. A theory of sensitized luminescence in solids // Phys. Rev. 1957. V. 108. P. 630-635.

15. Луцик Н.Е., Луцик Ч.Б., Мершоо И.А., Соовик Х.А.. Миграция энергии и фотонное умножение в кристаллофосфорах, активированных марганцем // Труды ИФА АН ЭССР. 1966. Т. 34, С. 49-67.

16. Lushchik A., Kirm M., Lushchik Ch., Martinson I., Nagirnyi V., Vasil'chenko E., Savikhin F. Multiplication of electronic excitations and prospects for increasing scintillation efficiency in wide-gap crystals // Nucl. Instr. and Meth. A. 2005. V. 537. P. 45-49.

17. Нурахметов Т.Н., Каинарбаев А.Д., Жунусбеков А.М., Токбергенов И.Т. Накопления дефектов в облученных сульфатах щелочных металлов. // Доклады 10-ой международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах», Кемерово, Россия. 2007. Т. 1. С. 123-124.

## Резюме

$CaSO_4:Tb^{3+},Na^{1+}$  люминофорында  $Tb^{3+}$  иондарын 5,9 эВ фотондармен тікелей қоздыру кезінде  $Tb^{3+}$ -центрлерінің сөулеленуі және 8,44 эВ фотондар энергиясымен қозған оксиаиондардан, сондай-ақ  $h\nu > 9,5$  эВ фотондардың әсерінен пайды болған электрондар мен кемтіктердің рекомбинациялануы кезінде бөлінетін энергияның қоспа центрлеріне берілу процестері қарастырылған.  $CaSO_4:Tb^{3+},Na^{1+}$  фосфорының термоынталандырылған люминесценциясы сонымен катар, кеңістіктегі бөлінген және орныққан электрондар мен кемтіктердің арасындағы туннельдік сөүле шығара рекомбинациялануы анықталған. Ксенон разрядының сөулеленуімен  $CaSO_4:Tb^{3+},Na^{1+}$  қоздыру арқылы тербий жарқырауының кванттық шығымын  $\eta > 1$  алу мүмкіндігі талқыланады.

## Summary

In  $CaSO_4:Tb^{3+},Na^{1+}$ , the excitation processes of  $Tb^{3+}$  centres are caused by the direct excitation of  $Tb^{3+}$  by 5.9-eV photons and due to the energy transferred from an excited oxyanion or released at the recombination between electrons and holes formed by photons of  $h\nu > 9,5$  eV. In parallel with thermostimulated luminescence the radiative tunnel recombination between spatially separated localized electrons and holes has been revealed in  $CaSO_4:Tb^{3+},Na^{1+}$ . The prospects for obtaining the efficiency of  $Tb^{3+}$ -emission with quantum yield above unity at the excitation of the phosphor by Xe-discharge emission are analyzed.

Евразийский национальный  
университет им. Л.Н.Гумилева,  
г. Астана;  
Институт физики Тартуского  
университета, г. Эстония

Поступила 14.05.09 г.