

УДК 535.37::621.315.592::(661.865.5+661.866.1)

М. С. ЛЕОНЕНЯ<sup>1</sup>, Е. В. ЛУЦЕНКО<sup>1</sup>, Н. В. РЖЕУЦКИЙ<sup>1</sup>, В. Н. ПАВЛОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
Г. П. ЯБЛОНСКИЙ<sup>1</sup>, Т. Г. НАГИЕВ<sup>2</sup>, Б. Г. ТАГИЕВ<sup>2</sup>, С. А. АБУШОВ<sup>2</sup>, О. Б. ТАГИЕВ<sup>3</sup>

### ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА АКТИВИРОВАННОГО ТРЕХВАЛЕНТНЫМИ ИОНАМИ ПРАЗЕОДИМА ТИОГАЛЛАТА КАЛЬЦИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 10–300 К

<sup>1</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
max.leanenia@gmail.com; e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by; m.rzheutski@ifanbel.bas-net.by;  
v.pavlovskii@ifanbel.bas-net.by; g.yablonskii@ifanbel.bas-net.by  
<sup>2</sup>Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан  
tural@nagiyev.net; bahadur34@mail.ru; said\_abushov@yahoo.com  
<sup>3</sup>Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Баку, Баку, Азербайджан  
oktay58@mail.ru

Изучена фотолюминесценция (ФЛ) халькогенидного полупроводникового соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в интервале температур 10–300 К при возбуждении лазерными импульсами наносекундной длительности на длине волны 456 нм. Спектр ФЛ состоит из серии интенсивных линий на 494, 631, 654 и 741 нм, обусловленных электронными переходами в ионах празеодима с уровня  $^3\text{P}_0$  на  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_2$  и  $^3\text{F}_4$  соответственно. Установлено, что повышение концентрации ионов празеодима в  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  с 3 до 7 ат. % приводит к двукратному возрастанию интегральной интенсивности ФЛ. Температурное тушение ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в диапазоне 10–300 К составило всего лишь 50 и 75 % для 7 и 3 ат. % празеодима соответственно. Установлено, что при 10 К временные постоянные затухания наиболее интенсивных линий ФЛ находятся в интервале  $\tau_e = 3,5\text{--}4,5$  мкс с незначительной по вкладу быстрой компонентой длительностью около 1 мкс при 300 К. С повышением температуры от 10 до 300 К наблюдается сокращение времен затухания не более чем на 0,1 мкс и появление в кинетиках затухания ФЛ быстрой компоненты длительностью от 2,15 до 1,1 мкс в интервале от 220 до 300 К.

*Ключевые слова:* тиогаллат кальция, празеодим, фотолюминесценция, редкоземельный элемент, температурное тушение.

M. S. LEANENIA<sup>1</sup>, E. V. LUTSENKO<sup>1</sup>, M. V. RZHEUTSKI<sup>1</sup>, V. N. PAVLOVSKII<sup>1</sup>, G. P. YABLONSKII<sup>1</sup>,  
T. G. NAGHIYEV<sup>2</sup>, B. G. TAGIEV<sup>2</sup>, S. A. ABUSHEV<sup>2</sup>, O. B. TAGIEV<sup>3</sup>

### PHOTOLUMINESCENCE OF CALCIUM THIOGALLATE ACTIVATED BY TRIVALENT PRASEODYMIUM IONS IN THE TEMPERATURE RANGE 10–300 K

<sup>1</sup>B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
max.leanenia@gmail.com; e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by; m.rzheutski@ifanbel.bas-net.by; v.pavlovskii@ifanbel.bas-net.by;  
g.yablonskii@ifanbel.bas-net.by  
<sup>2</sup>Institute of Physics of NAS of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan  
tural@nagiyev.net; bahadur34@mail.ru; said\_abushov@yahoo.com  
<sup>3</sup>M. V. Lomonosov department of MSU in Baku, Baku, Azerbaijan  
oktay58@mail.ru

The photoluminescence (PL) of the chalcogenide semiconductor compound  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  was studied in the temperature range 10–300 K under nanosecond pulsed laser excitation at 456 nm. The PL spectrum consists of a number of intense lines at 494, 631, 654 and 741 nm, formed by electronic transitions in praseodymium ions from  $^3\text{P}_0$  to  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_2$  and  $^3\text{F}_4$  levels, respectively. It was found that the rise in the concentration of praseodymium ions in  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  from 3 to 7 at. % resulted in a double increase of the PL intensity. Temperature quenching only by 50 and 75 % of the PL intensity of  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  with 7 and 3 at. %  $\text{Pr}^{3+}$  ions concentration, respectively, was obtained in the range 10–300 K. It is shown that at 10 K the decay time constants of the most intense lines of the PL are between 3.9–4.8  $\mu\text{s}$ . The decrease of the PL decay time constants by less than 0.1  $\mu\text{s}$  with increasing the temperature up to 300 K and the appearance of a fast component with a duration constant of about 2.15–1.1  $\mu\text{s}$  in the temperature range 220–300 K were obtained.

*Keywords:* calcium thiogallate, praseodymium, photoluminescence, rare earth element, temperature quenching.

**Введение.** Исследование влияния температуры на интенсивность, спектральный состав и кинетику свечения ионов редкоземельных элементов (РЗЭ) в различных полупроводниковых матрицах позволяет получить важную информацию о пригодности новых люминофоров для их использования в светодиодах и лазерных источниках излучения широкого диапазона спектра. Перспективной матрицей, способной содержать большие концентрации ионов РЗЭ, является тиогаллат кальция ( $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ ). Так, в литературе имеются работы по исследованию люминесцентных свойств соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ , активированного ионами  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  [1–5]. Разработаны высокоэффективные люминофоры желтого свечения с максимумом на 555 нм на основе тиогаллата кальция, активированного ионами  $\text{Eu}^{2+}$  [2; 3]. Они демонстрируют высокую температурную стабильность интенсивности, положения и формы спектра, а также линейность интенсивности ФЛ в широком интервале уровней импульсного оптического возбуждения вплоть до  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> [3]. Спектры ФЛ активированного ионами  $\text{Ce}^{3+}$  тиогаллата кальция состоят из двух полос около 465 и 515 нм в сине-зеленой области [4]. Видимое свечение ионов эрбия в  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  характеризуется набором интенсивных линий в зеленой и красной областях спектра [1].

В литературе представлено всего лишь несколько работ [1; 5], посвященных изучению фотолюминесценции (ФЛ) соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ , активированного ионами  $\text{Pr}^{3+}$ , в которых наблюдался линейчатый спектр ФЛ в сине-зеленой и красной областях спектра. Однако детального изучения влияния температуры на спектры и интенсивности полос и линий люминесценции, а также кинетики свечения различных линий в широком интервале температур не проводилось.

В последнее время в литературе появились также работы по успешному получению генерации лазерного излучения в оранжевой и красной областях спектра на переходах в ионе празеодима в различных широкозонных полупроводниковых матрицах при накачке непрерывным излучением синих InGaN-лазеров [6; 7]. Это способствует повышению практического интереса к детальному изучению фотолюминесцентных свойств соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  и выявлению перспектив его использования в качестве лазерных активных сред. Для установления возможности использования данного соединения в качестве активных сред и люминофоров для светоизлучающих приборов необходимо изучение стабильности его спектров и интенсивностей отдельных линий в широком интервале температур и уровней возбуждения, а также времен жизни наиболее важных электронных переходов. В настоящей работе представлены результаты изучения влияния температуры на спектры, интенсивность и кинетику фотолюминесценции в видимой области спектра поликристаллических порошков  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$ .

**Материалы и методы исследования.** Соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  были синтезированы твердофазной реакцией из бинарных компонентов  $\text{CaS}$  и  $\text{Ga}_2\text{S}_3$ , взятых в стехиометрических соотношениях. Активация ионами  $\text{Pr}^{3+}$  до уровня в 3 и 7 ат. % проводилась внесением в шихту рассчитанных порций фторида празеодима. Исходная смесь бинарных компонентов помещалась в кварцевую ампулу, откаченную впоследствии до  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мм рт. ст. Синтез проводился при 1000 °С в течение одного часа с последующим 10-часовым отжигом при 800 °С. После синтеза проводился дополнительный отжиг в атмосфере аргона с сероводородом. Синтезированные поликристаллы были измельчены в планетарной шаровой мельнице. Экспериментальные образцы изготовлены нанесением слоев (толщиной порядка 500 мкм) полученных микрокристаллических порошков  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  на кварцевые пластинки.

Спектры возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) образцов  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  измерялись при возбуждении монохроматизированным излучением ксеноновой лампы при комнатной температуре. Регистрация при этом осуществлялась с помощью монохроматора с фотоэлектронным умножителем, сигнал с которого поступал на синхронный усилитель и оцифровывался. Температурное тушение и кинетики затухания ФЛ в интервале 10–300 К анализировалось по интегральным и разрешенным во времени спектрам свечения помещенных в гелиевый криостат образцов  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  при возбуждении излучением второй гармоники перестраиваемого  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  лазера с длительностью импульсов 15 нс и частотой следования 10 Гц. Плотность мощности возбуждения составляла 50 кВт/см<sup>2</sup>. Интегральные спектры свечения регистрировались спектрометром, оснащенный линейкой элементов с последовательной зарядовой связью. В случае измерения разрешенных во времени спектров излучение с образцов фокусировалось на вход монохромато-

ра и затем передавалось на стрик камеру. Спектральное и временное разрешение в проведенных экспериментах было 0,07 нм и 0,1 мкс соответственно.

**Результаты и их обсуждение.** Нелегированный тиогаллат кальция обладает слабым широкополосным свечением в зеленой области с максимумом вблизи 500 нм. Активация соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  ионами празеодима с массовой долей 3 и 7 ат. % приводит к появлению ФЛ в диапазоне длин волн 470–760 нм, характеризующейся набором линий, наиболее интенсивные из которых расположены на 494, 631, 654 и 741 нм и, следовательно, обусловлены свечением ионов  $\text{Pr}^{3+}$  (рис. 1). Ширина линий в спектрах ФЛ на половине интенсивности колеблется от 2 до 4,5 нм. Повышение доли содержания ионов празеодима в  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  с 3 до 7 ат. % приводит к двукратному возрастанию интегральной интенсивности ФЛ, за исключением падения интенсивности свечения на 10 % в окрестности 611 нм.

В спектрах возбуждения ФЛ на длине волны 494 нм соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  при температуре 300 К присутствует широкая полоса в диапазоне 260–360 нм с максимумом около 325 нм и интенсивная узкая линия на 456 нм (рис. 1, вставка, переход 1'). Полоса в спектрах ВФЛ около 325 нм типична по форме и положению для нелегированного тиогаллата кальция. Возбуждение в эту полосу приводит к возникновению слабого свечения в зеленой области спектра. Следовательно, в спектрах ВФЛ активированного ионами празеодима соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  данная полоса обусловлена поглощением излучения накачки полупроводниковой матрицей тиогаллата кальция и последующей передачей энергии возбуждения ионам празеодима. Максимум в спектрах возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ)  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$ , при регистрации на 494 нм, приходится на длину волны 456 нм. С ростом концентрации ионов  $\text{Pr}^{3+}$  до 7 ат. % интенсивность линии на 456 нм в спектрах ВФЛ увеличивается по отношению к интенсивности возбуждения на 325 нм, что приводит к более эффективному возбуждению ФЛ через переходы в ионах  $\text{Pr}^{3+}$ .

Основываясь на результатах, представленных в [1; 5–7] по изучению свечения ионов празеодима в различных матрицах, в том числе и в тиогаллате кальция, линейчатый спектр ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в диапазоне длин волн 470–760 нм можно связать с электронными переходами в ионе  $\text{Pr}^{3+}$ , детальная схема которых представлена на вставке рис. 1. Поглощение на длине волны 456 нм (переход 1') соответствует прямому возбуждению носителей с уровня  $^3\text{H}_4$  на уровень  $^3\text{P}_2$  ионов  $\text{Pr}^{3+}$  с последующей безызлучательной релаксацией на уровни  $^3\text{P}_1$ ,  $^3\text{P}_0$  и  $^1\text{D}_2$ .

Электронные переходы с уровня  $^3\text{P}_0$  на  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_2$  и  $^3\text{F}_4$  формируют группу наиболее интенсивных линий в спектре ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  на длинах волн 494 нм (1), 631 нм (4), 654 нм (5) и 741 нм (7) соответственно. На порядок более слабое свечение на длинах волн 537 нм (2) и 688 нм (6) обусловлено переходами с уровня  $^3\text{P}_1$  на  $^3\text{H}_5$  и  $^3\text{F}_3$  соответственно, а на 611 нм (3) – переходом  $^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$ . Интенсивность свечения за счет электронного перехода  $^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$  подвержена концентрационному тушению при повышении доли ионов празеодима в  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  с 3 до 7 ат. %.

Температурное тушение ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  анализировалось по спектрам свечения при возбуждении излучением на длине волны 456 нм, т. е. при прямом возбуждении ионов празеодима через электронный переход  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{P}_2$  (рис. 2). Интегральная по диапазону 470–760 нм интенсивность ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  с массовой долей ионов празеодима 7 ат. % оказалась подвержена тушению всего лишь на 50 % во всем температурном интервале от 10 до 300 К. Для содержания ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в 3 ат. % тушение ФЛ в указанном температурном интервале составило 75 %. В температурном диапазоне 10–300 К соединение  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  демонстрирует исключительно высокую стабильность положения спектральных линий:  $\Delta\lambda < 0,1$  нм.

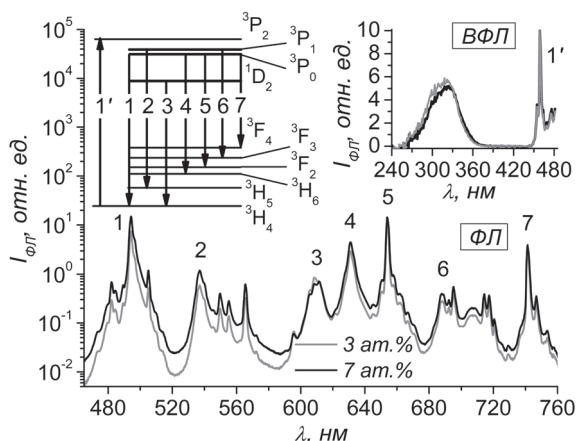


Рис. 1. Спектры ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  при температуре 300 К и возбуждении на длине волны 456 нм для двух концентраций ионов  $\text{Pr}^{3+}$  – 3 и 7 ат. %. На вставке слева представлена схема электронных переходов в ионах  $\text{Pr}^{3+}$  (цифрами указаны переходы, соответствующие линиям в спектрах ФЛ и ВФЛ), справа – спектры ВФЛ при 300 К и регистрации на длине волны 494 нм (нормированы по интенсивности на 456 нм)

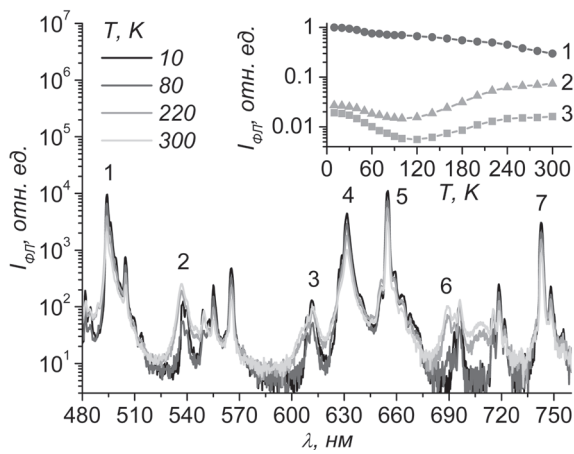


Рис. 2. Спектры ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  (7 ат. %) в интервале температур 10–300 К и возбуждении на длине волны 456 нм. На вставке показаны зависимости интегральной интенсивности свечения линий 1, 2 и 3 от температуры

от 120 до 300 К. В результате, интенсивность свечения на 537 нм (кривая 2) при 300 К в три раза выше величины при 10 К, а на 611 нм (кривая 3) при 300 К равна значению при 10 К. Тем не менее, вклад роста интенсивности свечения на 537 и 611 нм в интервале от 120 до 300 К в общую интегральную ФЛ соединений  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в диапазоне 470–760 нм незначителен.

Обнаруженные различия температурного тушения ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в интервале 10–300 К на отдельных линиях около 494, 537 и 611 нм могут быть вызваны изменениями в процессах безызлучательной релаксации с уровня  $^3\text{H}_4$  на уровни  $^3\text{P}_1$ ,  $^3\text{P}_0$  и  $^1\text{D}_2$ .

Для определения влияния температуры на кинетики затухания ФЛ соединений  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  были измерены карты спектрально-временного распределения свечения при температурах 10, 80, 220 и 300 К и возбуждении излучением наносекундной длительности на длине волны 456 нм (рис. 3, вставка). При температурах 10 и 80 К все линии в спектрах ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  с массовой долей ионов празеодима 3 и 7 ат. % затухают моноэкспоненциально с постоянной времени  $\tau_e$  в интервале 3,9–4,8 мкс. Для ФЛ на длине волны 494 нм (переход  $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_4$ ) при температурах 10 и 80 К постоянные времена затухания  $\tau_e$  составили 4,73 и 4,7 мкс соответственно (рис. 3). При 220 К в кинетике затухания ФЛ на 494 нм обнаружена быстрая компонента со временем 2,15 мкс на фоне медленной с характерным временем 4,7 мкс. Повышение температуры до 300 К сопровождается уменьшением времени быстрой компоненты до 1,1 мкс с ростом ее вклада в кинетику затухания при значении постоянной времени затухания медленной компоненты 4,65 мкс (рис. 3). Идентичное поведение кинетик затухания ФЛ с ростом температуры характерно для линий на 631, 654 и 741 нм.

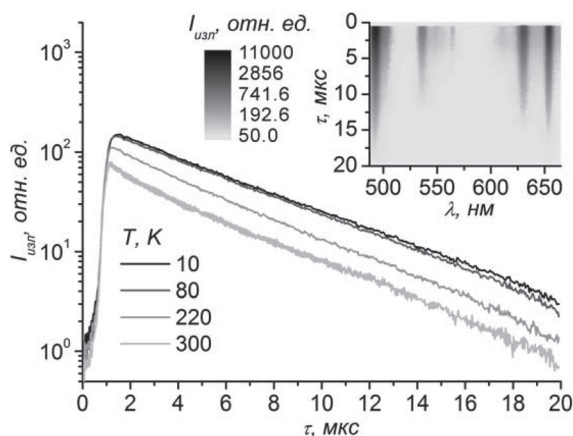


Рис. 3. Кинетики затухания ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  (7 ат. %) на длине волны 494 нм при температурах 10, 80, 220 и 300 К. На вставке – карта спектрально-временного распределения ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  (7 ат. %) при возбуждении на 456 нм и температуре 10 К

Интенсивность ФЛ на длине волны 494 нм, определенная интегрированием в узкой окрестности максимума, уменьшается не более чем на 54 % при повышении температуры от 10 до 300 К (рис. 2, вставка, кривая 1). Ход зависимостей интегральных интенсивностей ФЛ на длинах волн 631 нм (4), 654 нм (5), 741 нм (7) и 494 нм (1) в точности совпадает с кривой температурного тушения ФЛ на 494 нм, т. е. группа линий, формируемых электронными переходами с уровня  $^3\text{P}_0$  на  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_2$  и  $^3\text{F}_4$ , имеет одинаковые зависимости интенсивности ФЛ от температуры. Как показано на рис. 2, зависимости интегральной интенсивности ФЛ на порядок более слабых линий на длинах волн 537 нм (кривая 2) и 611 нм (кривая 3) от температуры характеризуются резким спадом в диапазоне от 10 до 120 К с выходом на минимальное значение при 120 К и ростом в интервале

от 120 до 300 К. В результате, интенсивность свечения на 537 нм (кривая 2) при 300 К в три раза выше величины при 10 К, а на 611 нм (кривая 3) при 300 К равна значению при 10 К. Тем не менее, вклад роста интенсивности свечения на 537 и 611 нм в интервале от 120 до 300 К в общую интегральную ФЛ соединений  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в диапазоне 470–760 нм незначителен.

Обнаруженные различия температурного тушения ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в интервале 10–300 К на отдельных линиях около 494, 537 и 611 нм могут быть вызваны изменениями в процессах безызлучательной релаксации с уровня  $^3\text{H}_4$  на уровни  $^3\text{P}_1$ ,  $^3\text{P}_0$  и  $^1\text{D}_2$ .

Для определения влияния температуры на кинетики затухания ФЛ соединений  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  были измерены карты спектрально-временного распределения свечения при температурах 10, 80, 220 и 300 К и возбуждении излучением наносекундной длительности на длине волны 456 нм (рис. 3, вставка). При температурах 10 и 80 К все линии в спектрах ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  с массовой долей ионов празеодима 3 и 7 ат. % затухают моноэкспоненциально с постоянной времени  $\tau_e$  в интервале 3,9–4,8 мкс. Для ФЛ на длине волны 494 нм (переход  $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_4$ ) при температурах 10 и 80 К постоянные времена затухания  $\tau_e$  составили 4,73 и 4,7 мкс соответственно (рис. 3). При 220 К в кинетике затухания ФЛ на 494 нм обнаружена быстрая компонента со временем 2,15 мкс на фоне медленной с характерным временем 4,7 мкс. Повышение температуры до 300 К сопровождается уменьшением времени быстрой компоненты до 1,1 мкс с ростом ее вклада в кинетику затухания при значении постоянной времени затухания медленной компоненты 4,65 мкс (рис. 3). Идентичное поведение кинетик затухания ФЛ с ростом температуры характерно для линий на 631, 654 и 741 нм.

Таким образом, повышение температуры соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  проявляется в небольшом сокращении времени затухания: меньше 0,1 мкс. При температурах выше 220 К становится заметным появление быстрой компоненты в кинетиках ФЛ  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$ , что может быть связано с термической активацией каналов безызлучательной рекомбинации. Более детальное обсуждение данного эффекта будет возможно после проведения серии планируемых исследований по влиянию уровня возбуждения на эффективность, положения спектров и кинетики свечения соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$ .



**Заключение.** Синтезированные в данной работе халькогенидные полупроводниковые соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  с массовой долей ионов празеодима 3 и 7 ат. % обладают ФЛ в диапазоне длин волн 470–760 нм, характеризующейся серией интенсивных линий на 494, 631, 654 и 741 нм. Установлено, что свечение на этих длинах волн обусловлено электронными переходами в ионах празеодима с уровня  $^3\text{P}_0$  на  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_6$ ,  $^3\text{F}_2$  и  $^3\text{F}_4$  соответственно. В спектрах возбуждения ФЛ при температуре 300 К присутствует интенсивная узкая линия на 456 нм, определенная как переход с уровня  $^3\text{H}_4$  на уровень  $^3\text{P}_2$  ионов  $\text{Pr}^{3+}$ , и широкая полоса в диапазоне 260–360 нм с максимумом около 325 нм, обусловленная поглощением излучения накачки в матрице тиогаллата кальция и последующей передачей энергии возбуждения ионам празеодима. Установлено, что повышение доли содержания ионов празеодима в  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  с 3 до 7 ат. % приводит к двукратному возрастанию интегральной интенсивности ФЛ в диапазоне 470–760 нм. Температурное тушение ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  в диапазоне 10–300 К составило всего лишь 50 % (7 ат. %) и 75 % (3 ат. %). Обнаружена исключительная высокая стабильность положения спектральных линий ФЛ ( $\Delta\lambda < 0,1$  нм) во всем исследуемом температурном интервале. Установлено, что постоянные затухания наиболее интенсивных линий ФЛ соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Pr}^{3+}$  находятся в интервале 3,9–4,8 мкс при 10 К. С повышением температуры от 10 до 300 К наблюдается сокращение времен затухания не более чем на 0,1 мкс и появление в кинетиках затухания ФЛ слабой быстрой компоненты длительностью около 1,1 мкс при 300 К.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики (грант № EIF-BGM-2-BRFTF-1-2012/2013-07/02/1) и Белорусско-республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф13А3-020).

### Список использованной литературы

1. Spectroscopy and Lanthanide Impurity Level Locations in  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Ln}^{3+}$  (Ln = Ce, Pr, Tb, Er, Tm) / A. Bessière [et al.] // J. of The Electrochemical Society. – 2004. – Vol. 151, iss. 12. – P. 254–260.
2. Nazarov, M. Structural and luminescent properties of calcium, strontium and barium thiogallates / M. Nazarov, D. Y. Noh, H. Kim // Materials Chemistry and Physics. – 2008. – Vol. 107. – P. 456–464.
3. Effect of excitation level on the photoluminescence of barium thiogallate activated with europium and cerium ions / V. Z. Zubelevich [et al.] // Zh. Prikl. Spektrosk. – 2011. – Vol. 78, iss. 2. – P. 234–239.
4. Radiative and non-radiative processes of Ce related transitions in  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  and  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  / A. Kato [et al.] // J. of Physics and Chemistry of Solids. – 2003. – Vol. 64. – P. 1511–1517.
5. Photoluminescence of Ce and Pr codoped calcium thiogallate / A. Anedda [et al.] // Physica Status Solidi (C). – 2006. – Vol. 3, iss. 8. – P. 2717–2721.
6. Gün, T. Power scaling of laser diode pumped  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  cw lasers: efficient laser operation at 522:6 nm, 545:9 nm, 607:2 nm, and 639:5 nm / T. Gün, P. Metz, G. Huber // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36, iss. 6. – P. 1002–1004.
7. Diode pumped laser operation and spectroscopy of  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  / F. Reichert [et al.] // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, iss. 18. – P. 20387–20395.

Поступило в редакцию 20.07.2015