

**О.Н. Марчило, Л.В. Завьялова, Йо. Наканиши,
Х. Коминами, К. Хара, Б.А. Снопко, С.В. Свечников,
А.Е. Беляев**

КРИСТАЛЛОФОСФОРЫ КРАСНОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$, ПОЛУЧЕННОГО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Разработана золь-гель технология получения кристаллофосфоров красного цвета свечения на основе $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$. Исследованы спектры фото- и катодолюминесценции образцов с различным содержанием активатора Pr^{3+} . Установлено, что концентрация Pr^{3+} 0,2 мол.% и температура отжига 1300 °С обеспечивают максимальную яркость люминесценции. Рассмотрены возможные механизмы повышения излучательной эффективности кристаллофосфоров на основе перовскитовых матриц с ионами РЗЭ. В результате на основе кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ красного цвета получены нанодисперсные катодолуминофоры с высокой, более 1500 кд/м², яркостью свечения. Это позволило на их основе реализовать идею создания оптического конвертера для кремниевых датчиков ультрафиолета.

Ключевые слова: кристаллофосфор, $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}$, золь-гель метод, фотолюминесценция, оптический конвертор, ультрафиолет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение систем визуализации информации в самых различных областях науки и техники предопределяет необходимость поиска новых материалов, удовлетворяющих тем или иным специфическим требованиям. Особенно это относится к люминесцентным материалам красного цвета свечения вследствие сравнительно низкой чувствительности человеческого глаза в этой области спектра. Необходимая для таких систем способность к фото- и, особенно, катодолюминесценции наблюдается у ограниченного класса материалов, таких как оксиды цинка и олова, и обнаружена, кроме прочих, у активированного празеодимом титаната стронция, $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$.

В работах [1-3] был исследован легированный празеодимом кристаллофосфор SrTiO_3 красного цвета свечения, полученный твердофазной реакцией, с целью использования в низковольтных полевых эмиссионных дисплеях. Нами было показано [4], что кристаллофосфоры $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$, кроме того, могут быть изготовлены с использованием золь-гель технологий. Преимуществом данного подхода является получение более однородного по составу продукта по сравнению с твердофазным синтезом, поскольку смешивание исходных веществ в жидкой фазе осуществляется более равномерно.

В связи с этим актуальным является развитие золь-гель технологии и исследование фото- и катодолюминесцентных характеристик полученного этим методом перовскита $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ в зависимости от состава и условий синтеза. Актуальным является также исследование возможностей использования таких материалов в качестве активного элемента электронных устройств различного применения.

2. ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОФОСФОРА $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Для получения кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ золь-гель методом использованы процедуры и режимы, подробно представленные в работе [5]. В качестве исходных веществ использовались химические реактивы компании KOJUNDO CHEMICAL LABORATORY CO., LTD (Япония): SrCl_2 (99,99%), $\text{Ti}(\text{O}-i\text{-C}_3\text{H}_7)_4$ (99,999%), PrCl_3 (99,9%), и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (99,999%). Процесс синтеза осуществлялся в герметичной камере GLAS-COL GLOVE BAG™ Model X-27-27 (США) в атмосфере азота при комнатной температуре. Исходные вещества брали в соотношении, соответствующему составу $\text{Ti}/\text{Sr} = 1$. Концентрация Pr была постоянной (0,2 мол.%), а концентрацию Al изменяли от 0 до 15 мол.%. Исходные вещества растворяли в этиловом спирте и перемешивали в течение 2-х часов до их полного растворения. Выпаривание полученного раствора проводили при помощи магнитной мешалки AS ONE CHS-180 (США) при атмосферном давлении и температуре 80 °С при непрерывном перемешивании до образования гелеобразной массы белого цвета. Данный гель высушивали в сушильном шкафу в атмосфере воздуха при температуре 150 °С. Полученный порошок помещали в муфельную печь SNOL 6.7/1300 (Литва) и отжигали при температурах от 1000 до 1300 °С в течение 3-х часов. После отжига спечённый порошок размалывали в фарфоровой ступке до мелкодисперсного состояния.

В процессе исследования влияния активатора Pr на фазовый состав и структуру полученных кристаллофосфоров изучали спектры рентгеновской дифракции (XRD) образцов с концентрацией Pr в диапазоне от 4 до 10 мол.%. Температура и продолжительность термического отжига составляли 1000 °С и 3 часа соответственно. Результаты этих исследований показаны на рис. 1а.

Из рисунка видно, что с увеличением содержания Pr фазовый состав остается неизменным и содержит 3 кристаллические фазы: SrTiO_3 , SrCl_2 и TiO_2 -рутил. Даже использование высоких концентраций Pr (до 10 мол.%) не приводит к образованию отдельных кристаллических фаз, например Pr_2O_3 или $\text{Pr}_2(\text{SrTiO}_3)_3$. Таким образом, в данном случае образец представляет собой твердый раствор замещения. Наличие промежуточных продуктов реакции – SrCl_2 и TiO_2 -рутил – свидетельствует о том, что данные условия отжига являются неоптимальными, то есть температура 1000 °С и продолжительность термического отжига 3 часа не достаточны для получения монофазы SrTiO_3 . Рост концентрации Pr от 4 до 8 мол.% приводит к равномерному увеличению интенсивности и к уменьшению величины полуширины всех пиков. Это свидетельствует об улучшении кристаллическости материала. Однако при концентрации Pr 10 мол.% наблюдается уменьшение интенсивностей пиков SrTiO_3 .

С целью исследования процесса формирования фазового состава и кристаллической структуры кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ изучены рентгеновские спектры образцов, полученных с одинаковым содержанием Pr и Al (концентрация Pr 0,2 мол.%, концентрация Al 10 мол.%), но при различных температурах отжига (1000 °С, 1150 °С и 1250 °С) (Рис. 1б). Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что фазовый состав существенным образом зависит от температуры отжига золя, в частности, после отжига при температуре 1250 °С образуется исключительно монофазный материал SrTiO_3 . Из рисунка также следует, что содержащиеся Pr и Al исходные вещества в конечном продукте не образуют какое-либо соединение в виде отдельной кристаллической фазы, а встраиваются в кристаллическую решетку SrTiO_3 и замещают Sr и Ti соответственно. Именно такое замещение является наиболее вероятным ввиду близости величин ионных радиусов Pr и Sr, Al и Ti.

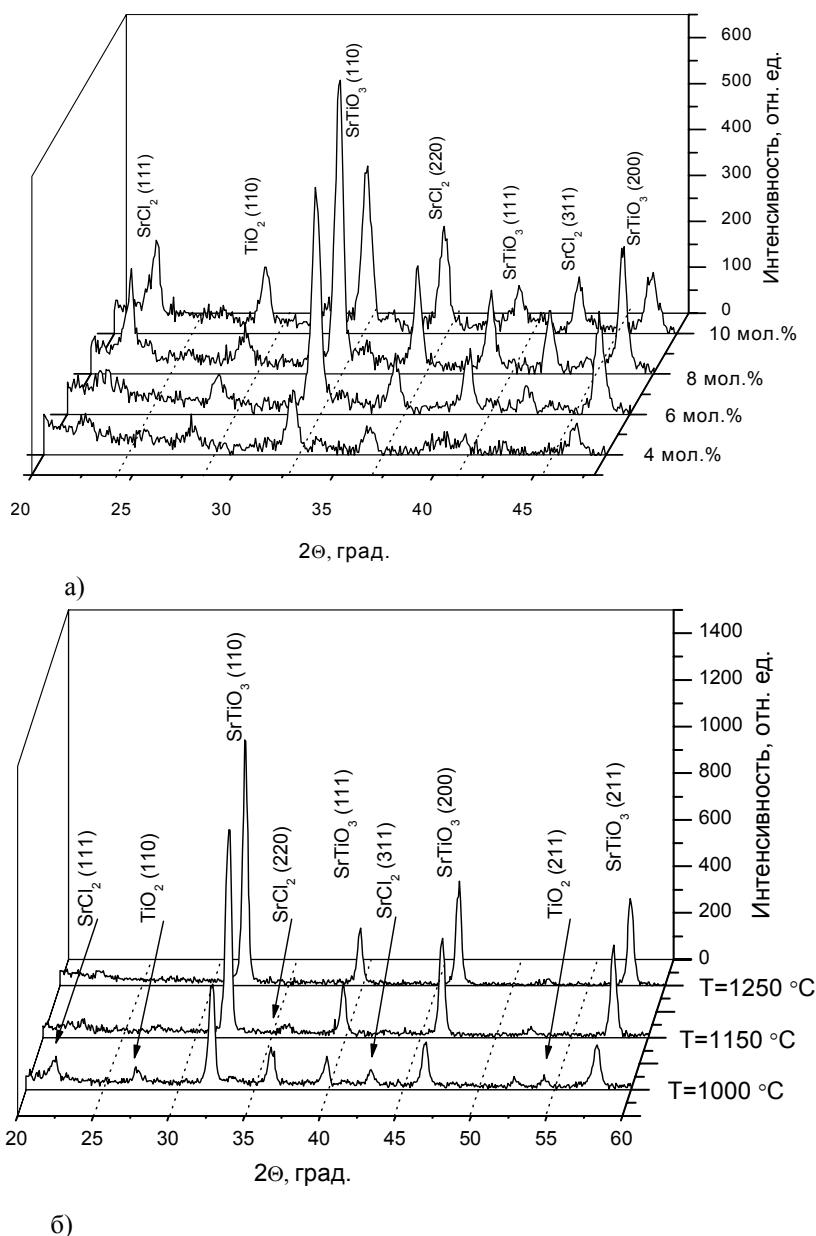


Рис. 1. XRD спектры $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ в зависимости от концентраций Pr (а) и $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ (концентрация Pr 0,2 мол.%, концентрация Al 10 мол.%), отожженных при различных температурах (б).

3. ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Исследования люминесценции материала проводились при помощи фотомультиспектрального анализатора Hamamatsu PMA-12 (Япония) при комнатной температуре. Источником возбуждения для флуоресценции служил He-Cd лазер с длиной волны $\lambda = 325$ нм.

На рис. 2а представлены спектры фотолюминесценции кристаллофосфоров $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ с концентрациями Pr^{3+} в диапазоне от 0,1 до 1,0 мол.%, без добавления Al и отожжённых при температуре 1300 °C, которая обеспечивает максимальную яркость ФЛ [4]. Как показано на рис. 2б, интенсивность главного красного пика при $\lambda = 617$ нм ($^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$) претерпевает существенные изменения в зависимости от концентраций Pr. Так, при увеличении концентрации Pr от 0,1 до 0,2 мол.% наблюдается резкое восьмикратное увеличение максимального значения интенсивности люминесценции для указанного пика.

Однако, дальнейшее увеличение концентрации Pr от 0,2 до 1,0 мол.% приводит к значительному снижению уровня люминесценции. По-видимому, такое поведение излучательных характеристик материала объясняется процессом концентрационного тушения. Эти исследования позволили установить эффективную концентрацию Pr, которая для кристаллофосфора SrTiO₃:Pr³⁺ составляет 0,2 мол.%.

Исследование влияния Al на фотолюминесцентные свойства кристаллофосфора SrTiO₃:Pr³⁺ было проведено при фиксированной эффективной концентрации Pr 0,2 мол.%. Концентрация Al варьировалась в диапазоне от 0 до 15 мол.% (рис. 3).

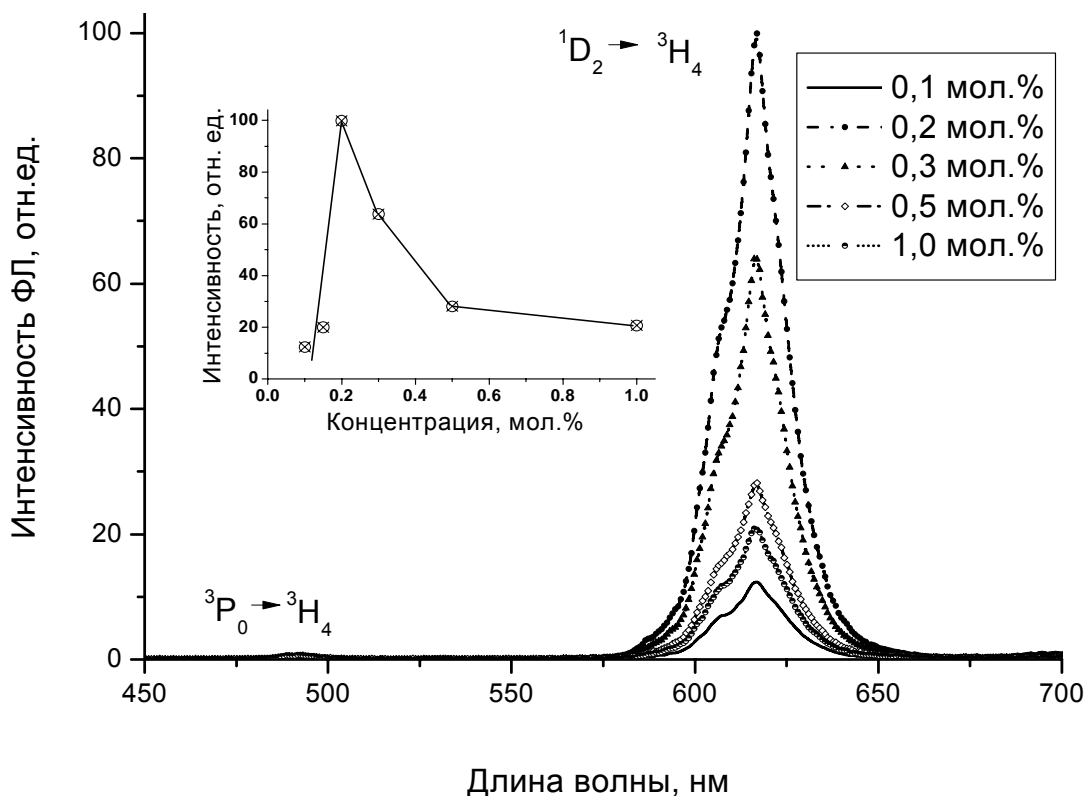


Рис. 2. Спектр фотолюминесценции SrTiO₃:Pr³⁺ при различных концентрациях Pr; вставка: максимальные значения интенсивности фотолюминесценции красного пика при $\lambda = 617$ nm.

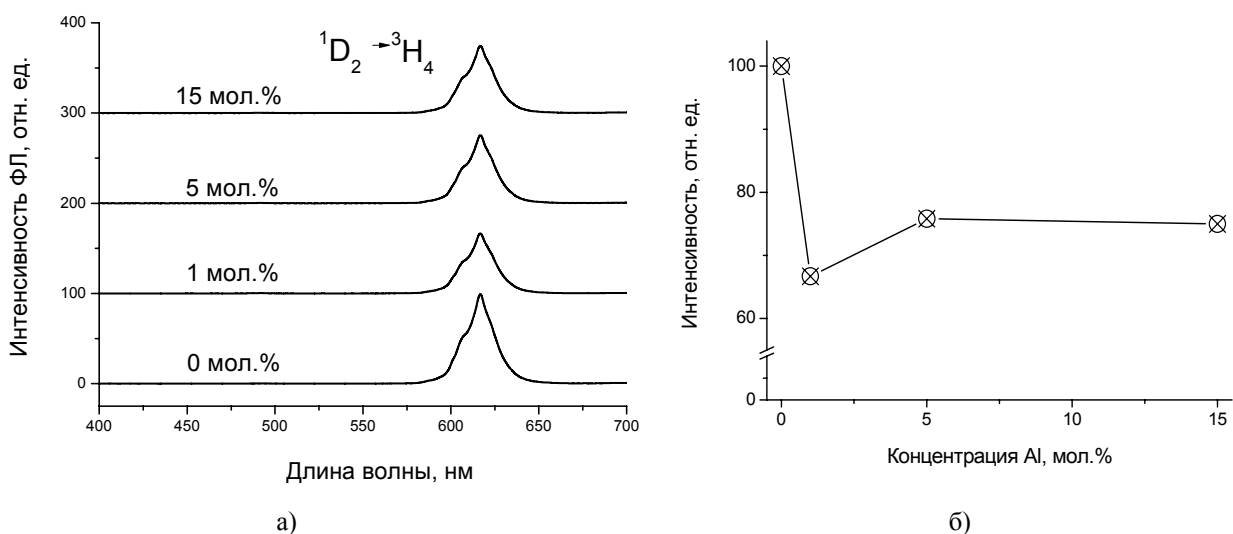


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции SrTiO₃:Pr³⁺,Al, полученные при разных концентрациях Al (а), максимальные значения интенсивности фотолюминесценции красного пика при $\lambda = 617$ nm (б).

На данном рисунке показано, что в противоположность литературным данным [6], добавление Al не только не приводит к значительному, порядка 200 раз, увеличению интенсивности люминесценции основного красного пика, а наоборот, наблюдается значительный, порядка 20%, её спад от первоначального уровня. Таким образом, наибольшей интенсивностью фотолюминесценции обладает образец $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ без добавления Al.

4. КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Спектры катодолюминесценции исследовали в вакууме с.а. $7,8 \times 10^{-9}$ Торр (KIMBALL PHYSICS INC (США)). При исследовании спектров и яркости катодолюминесценции напряжение на аноде изменяли в диапазоне 2–10 кВ при фиксированной плотности тока 60 мкА/см^2 . Исследования влияния различных концентраций Al на яркость кристаллолюминесценции кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ были также выполнены для эффективной концентрации Pr^{3+} 0,2 мол.%. Температура отжига образцов – 1300 °С.

Полученные данные яркости катодолюминесценции принципиально коррелируют с данными, касающимися приведенных спектров фотолюминесценции. Однако добавление Al не приводит к увеличению яркости катодолюминесценции кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$. Более того, аномально высокий уровень яркости кристаллолюминесценции наблюдается для образца, не содержащего Al (рис. 4а). В этом случае яркость достигает 1840 кд/м^2 при напряжении на аноде 10 кВ (рис. 4б). Добавление даже 1 мол.% Al приводит к резкому падению (до семи раз) значения яркости катодолюминесценции. Дальнейшее увеличение концентрации Al от 1 до 15 мол.% не приводит к существенным изменениям яркости. То есть, такие результаты не согласуются с литературными данными, поскольку в работе [6] сообщалось о значительном повышении интенсивности излучения $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ при легировании Al.

Такие различия между полученными результатами и литературными данными, возможно, могут быть объяснены использованием различных методов синтеза материала. По-видимому, помимо компенсации избыточного положительного заряда при замещении Ti^{4+} на Al^{3+} , добавление Al приводит также к сокращению количества планарных дефектов, возникающих в результате приготовления образцов твердофазным методом. Вероятно, при использовании золь-гель метода образуется незначительное количество таких дефектов. Таким образом, кристаллическая решётка SrTiO_3 не нуждается в дополнительной «очистке» от дефектов. А добавление Al приводит только к ухудшению кристалличности основного вещества, что, в свою очередь, ведёт к падению уровня яркости.

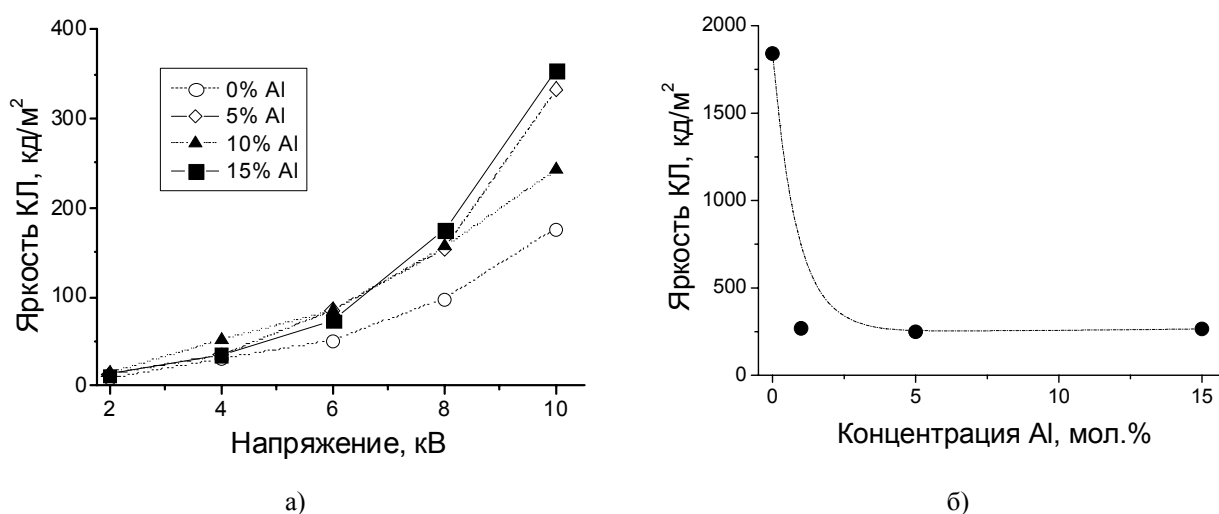


Рис. 4. Яркость катодолюминесценции кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$: а) при различных концентрациях Al в зависимости от напряжения на аноде; б) максимальные значения яркости от концентрации.

Исследование катодолюминесценции в зависимости от времени отжига при температуре 1300 °С показало, что в диапазоне от 3-х до 12-ти часов отжига яркость катодолюминесценции увеличивается всего лишь в 2 раза. При этом абсолютное значение яркости составляет около 1500 кд/м², что можно оценить как достаточно высокое, сравнимое с лучшими результатами в мире. Спектры фотолюминесценции хорошо коррелируют со спектрами катодолюминесценции и характеризуются близкими значениями яркости [5].

5. ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИСТАЛЛОФОСФОРОВ НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТОВЫХ МАТРИЦ С ИОНАМИ РЗЭ

Анализ полученных результатов позволяет выделить три возможных причины, способные оказывать влияние на эффективность люминесценции кристаллофосфора SrTiO₃:Pr³⁺:

- 1) формирование в процессе синтеза планарных дефектов, связанных с фазой SrO, приводящих к тушению люминесценции;
- 2) наличие в образцах примесей трёхвалентного железа Fe³⁺, оказывающих влияние на особенности электронных процессов в самой матрице SrTiO₃;
- 3) нарушение стехиометрического соотношения между Ti и Sr в пользу соединений титана.

Как уже отмечалось выше, изначально низкая люминесцентная эффективность SrTiO₃:Pr³⁺, полученного твердофазным методом, может быть улучшена введением в его состав соактиватора на основе металла III группы. В качестве соактиватора в такой структуре наиболее часто используется алюминий. Функция алюминия и обусловленных его присутствием кислородных вакансий в процессе формирования структуры кристаллофосфора заключается в снятии внутренних напряжений в решетке титаната стронция (вызывающих отклонения от кубической симметрии) и, в конечном счете, предотвращении появления фазы планарных дефектов SrO с уменьшенными межатомными расстояниями.

SrO также может образовываться благодаря нарушениям соотношения Sr/Ti = 1 в локальном объеме ввиду разного размера частиц исходных веществ, используемых при твердофазном методе. Предотвращение появления фазы планарных дефектов SrO приводит к подавлению нерадиационного канала диссипации энергии и стимулирует эффективную передачу возбуждения от матрицы к центрам свечения на основе празеодима.

Материалы титаната стронция, полученные золь-гель методом, в отличие от твердофазного метода, обладают высокой однородностью и незначительными отклонениями от стехиометрического соотношения, Sr/Ti = 1, вследствие особенностей жидкофазного процесса синтеза. В результате этого процесс формирования слоёв SrO подавлен и эффект структурной компенсации Al не оказывает значительного влияния как на строение и характеристики центров излучения, так и на механизмы поглощения и передачи энергии в рассматриваемой системе. Это было показано нами для случая фотолюминесценции кристаллофосфора SrTiO₃:Pr³⁺ [10].

Как показали наши исследования, ионы других металлов, в частности железа Fe³⁺, также оказывают влияние на люминесцентные свойства кристаллофосфора SrTiO₃:Pr³⁺ [10, 11]. Для подтверждения влияния железа Fe³⁺ были синтезированы материалы «без» и «с» добавлением железа: SrTiO₃:Pr³⁺ и SrTiO₃:Pr³⁺,Fe³⁺ соответственно. При фиксированном уровне концентрация [Pr] составляла 0,2 мол.%, а концентрация Fe – 5×10⁻⁵ мол.%. Результаты измерений спектров фотолюминесценции этих образцов показали, что интенсивность полосы при λ = 617 нм для образца, содержащего железо, в 10 раз интенсивнее, чем у образца, не содержащего железо [9].

Таким образом, было показано, что трёхвалентное железо, которое традиционно считалось гасителем люминесценции, в действительности, при определённых условиях может быть её эффективным сенсibilизатором. Предполагается, что вследствие наличия полиэдров $[\text{FeO}_6]$ в системе возникает резонанс между уровнем $^3\text{P}_0$ ионов Pr^{3+} и одним из уровней ионов Fe^{3+} , координированных 6 атомами кислорода. Кроме того, благодаря малому расстоянию между этими соактиватором (Fe), активатором (Pr) и матрицей, они могут соединяться через мостиковые анионы кислорода, что обеспечивает эффективную сенсibilизацию в данной системе. Поэтому сенсibilизация люминесценции может происходить благодаря состоянию переноса заряда $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$. Альтернативный или дополнительный механизм может быть связан с проявлением эффекта Яна–Теллера для центра Fe^{3+} в этих материалах, приводящего к синхронизации процессов переноса энергии и уменьшающего потери на термализацию возбужденных электронных состояний.

Ещё одним фактором, способным оказывать влияние на эффективность люминесценции кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$, может выступать изменение изначального соотношения реагентов вследствие выкипания хлорида стронция SrCl_2 при температурах, близких к 1250–1300 °С. Вероятность этого процесса увеличивается при высокой скорости нагрева реакционного объёма. В результате при достижении температурного диапазона в области 1250–1300 °С не весь SrCl_2 успевает окислиться до SrO . Вследствие этого оставшийся SrCl_2 закипает и покидает реакционную камеру, что в свою очередь, приводит к изменению стехиометрического соотношения между Sr и Ti в матрице SrTiO_3 . Избыток Ti, вероятно, так же, как и алюминий, может препятствовать появлению фазы планарных дефектов в областях SrO , однако не нарушая при этом структуру перовскитной матрицы.

6. ОПТИЧЕСКИЕ КОНВЕРТОРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОФОСФОРА $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ДАТЧИКОВ УЛЬТРАФИОЛЕТА

С целью демонстрации практического применения материалов на основе $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ рассмотрим реализацию оптического конвертера УФ-излучения в излучение видимой области спектра.

Как было показано выше, в спектре люминесценции $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ доминирует узкая высокоэффективная полоса с максимумом $\lambda_{\text{max}} = 617$ нм, которая обусловлена внутренним 4f-переходом Pr^{3+} из возбуждённого состояния $^1\text{D}_2$ в основное состояние $^3\text{H}_4$ [7]. Положение этой полосы хорошо коррелирует с областью наибольшей чувствительности современных кремниевых солнечных батарей. При этом область возбуждения люминесценции занимает практически всю область жесткого ультрафиолета. Действительно, поскольку край полосы возбуждения совпадает с краем полосы фундаментального поглощения SrTiO_3 и соответствует величине запрещённой зоны материала (3,2 эВ) [8], УФ-излучение эффективно возбуждает собственные состояния кристаллической решётки SrTiO_3 и передаётся центрам Pr^{3+} , где и происходит их излучение. Это позволяет реализовать оптический конвертер УФ-излучения в излучение видимой области спектра [12].

Макет датчика УФИ на основе типичного кремниевого диода (ФД-263) со $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ и с тонкоплёночным конвертером, закрепленным на его входном окне, представлен на вставке рис. 5.

Линейный характер зависимости интенсивности люминесценции разработанного конвертера при 617 нм от интенсивности УФ-облучения позволяет его использовать и в качестве универсального датчика уровня ультрафиолета. Поскольку последний не требует для своего функционирования никаких дополнительных устройств, являясь при этом высокостабильным керамическим материалом, возможности его практического применения включают самые различные области техники (включая экстремальные условия эксплуатации) и широкого использования в быту.

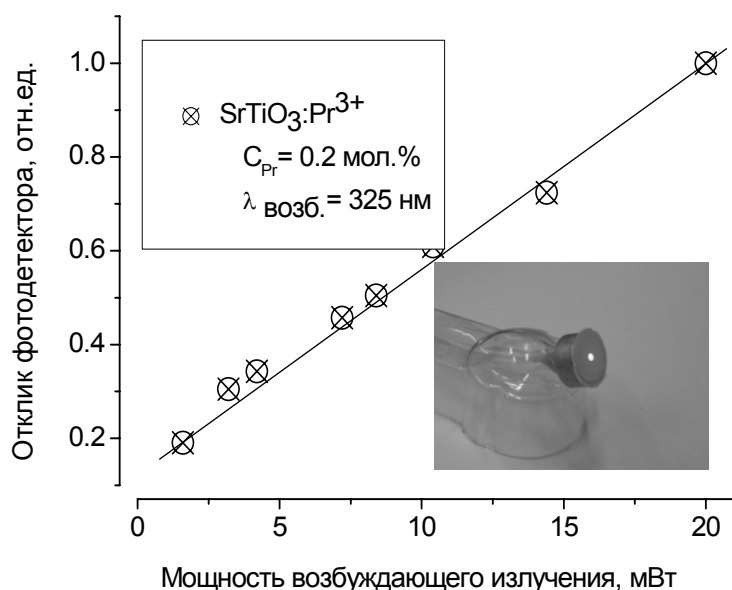


Рис. 5. Зависимость интенсивности фотолюминесценции кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ от мощности УФ-возбуждения; макет датчика УФИ (вставка).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана золь-гель технология получения кристаллофосфоров красного цвета свечения на основе $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$. В результате исследования кристаллической структуры в зависимости от температуры и времени отжига определены оптимальные технологические режимы. Исследованы спектры фото- и катодолюминесценции образцов с различным содержанием активатора Pr^{3+} . Установлено, что концентрация Pr^{3+} 0,2 мол.% и температура отжига 1300 °С обеспечивают максимальную яркость люминесценции. Рассмотрены возможные механизмы повышения излучательной эффективности кристаллофосфоров на основе перовскитовых матриц с ионами РЗЭ. В результате проведенных исследований установлено, что получение нанодисперсных катодолуминофоров на основе кристаллофосфора $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ красного цвета с высокой, более 1500 кд/м², яркостью свечения позволило реализовать на их основе идею создания оптического конвертера для кремниевых датчиков ультрафиолета. Рассмотренный в данной работе подход к разработке простых конвертеров УФИ может быть распространён на широкий круг проблем современной оптоэлектроники и сенсорной техники.

O.N. Marchylo, L.V. Zavyalova, Y. Nakanishi, H. Kominami, K. Hara, S.V. Svechnikov, B.A. Snopok, A.E. Beliaev

RED-EMITTING PHOSPHORS BASED ON $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ PREPARED BY SOL-GEL METHOD

Sol-gel technology for production of red-emitting phosphors based on $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ has been developed. Photo- and cathodoluminescence emission of samples with different contents of the activator Pr^{3+} were investigated. It has been ascertained that the maximum value of brightness of luminescence can be achieved under the optimal concentration of Pr^{3+} equal to 0.2 mol.% and annealing temperature 1300 °C. The possible mechanisms to improve the emission efficiency of crystal-based perovskite matrix with rare-earth ions are discussed as well. Finally, nanodispersed cathodophosphors with high more than 1500 cd/m² brightness have been obtained being based on red-emitting phosphor based on nanostructured crystalline $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$. It allowed practical implementation of the concept of an optical converter for silicon UV sensors.

Keywords: crystal phosphors, $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}$, sol-gel method, photoluminescence, optical converter, ultraviolet.

1. Yamamoto H., Okamoto S., Kobayashi H. Luminescence of rare-earth ions in perovskite-type oxides: from basic research to applications. *J. Lumin.* 2002. **100**. P. 325–332.
2. Okamoto S., Tanaka S., Yamamoto H. Reduction process of Ruddlesden-Popper-type planar faults in $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ by Al addition. *Electrochem. and Solid-State Lett.* 2000. **3**(5). P. 242–244.
3. Kim J.Y., You Y.C. and Jeon D.Y. Investigation of the characteristic changes on $\text{SrTiO}_3:\text{Pr},\text{Al},\text{Ga}$ phosphors during low voltage electron irradiation. *J. Vacuum Sci. & Technol. B.* 2003. **21**(1). P. 536–539.
4. Marchylo O.M., Zavyalova L.V., Nakanishi Y. et al. Synthesis and luminescent properties of $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ phosphors prepared by sol-gel method. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics.* 2009. **12**(4). P. 321–323.
5. Marchylo O.M., Zavyalova L.V., Nakanishi Y. et al. Investigation of luminescent properties inherent to $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ luminophor with Al impurity. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.* 2011. **14**(4). P. 461–464.
6. Okamoto S., Kobayashi H. and Yamamoto H. Effects of Al addition on photoluminescence properties in rare-earth ion-doped SrTiO_3 . *J. Electrochem. Soc.* 2000. **147**(6). P. 2389–2393.
7. Okumura M., Tamatani M., Albessard A.K. et al. Luminescence properties of rare earth ion-doped monoclinic yttrium sesquioxide. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1997. **36**. P. 6411.
8. Inaguma Y., Nagasawa D. and Kanumata T. Photoluminescence of praseodymium-doped $\text{Sr}_{n+1}\text{Ti}_n\text{O}_{3n+1}$. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005. **44**(1B). P. 761–764.
9. Марчило О.Н., Наканиши Й., Коминами Х. и др. Новые высокоэффективные кристаллофосфоры красного свечения, полученные золь-гель методом. *Theoretical Experimental Chemistry.* 2014. **50**(1). С. 29–34.
10. Marchilo O.N., Nakanishi Y., Kominami H., Hara K., Zav'yalova L.V., Svechnikov G.S., Snopok B.A. Optical converters based on ceramic crystal phosphor $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+},\text{Al}$ for silicon sensors of ultraviolet radiation. *Theoretical and Experimental Chemistry.* 2012. **48**, №3. P. 143–148.
11. Marchilo O.N., Nakanishi Y., Kominami H., Hara K., Zav'yalova L.V., Svechnikov S.V., Snopok B.A. Effect of Al^{3+} additives on the microstructure and photoluminescence of $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ phosphors prepared by a sol-gel method. *Theoretical and Experimental Chemistry.* 2013. **49**, №3. P. 158–164.
12. Свечников С.В., Беляев А.Е., Морозовская А.Н., Свечников Г.С., Снопко Б.А., Завьялова Л.В., Марчило О.Н. Наноразмерные катодлюминофоры красного цвета свечения на основе перовскита SrTiO_3 , легированного редкоземельными и переходными ионами. *Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине.* Киев: Академперіодика, 2014. С. 192–197.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины,
проспект Науки, 41,
03680 Киев, Украина

Получено 27.10.16

Исследовательский институт электроники,
Шизуока-университет, 3-5-1 Джохоку,
Нака-ку, Хамамацу 432-8011, Япония