



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-59-66>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.8.032.36

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛЮМИНОФОРНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

ЗЕЛЕНИНА Е.В.<sup>1,2</sup>, ПЕЧЕРЦЕВА Е.А.<sup>1,2</sup>, БАХМЕТЬЕВ В.В.<sup>1</sup>, СЫЧЕВ М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Поступила в редакцию 31 октября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** В статье представлена разработка технологии нанесения люминофорных покрытий регулируемой толщины с целью создания твердотельных радиолюминесцентных источников света (ТРИС). Технология ТРИС является альтернативой существующей в настоящее время технологии газонаполненных радиолюминесцентных источников света. Ключевая идея состоит в связывании целевого радионуклида в твердотельной матрице и совмещении ее с люминофором. Вследствие малой длины пробега бета-частиц трития в твердой матрице, технология люминофорных покрытий должна обеспечивать как можно более тесный контакт между люминофором и тритиевым бета-источником. Основными требованиями к люминофорным покрытиям в контексте создания ТРИС являются: прочность закрепления на подложке, равномерность нанесения, радиационная и температурная стойкость. Проведено сравнение различных способов нанесения люминофорных покрытий по их влиянию на рабочие характеристики (яркость и интенсивность) ТРИС. Разработана модифицированная методика осаждения люминофорного покрытия из суспензии в растворе жидкого калиевого стекла на основе золь-гель процесса. Экспериментальным путем установлен оптимальный состав раствора и получены образцы люминофорных покрытий различной толщины на стеклянных подложках. Толщина покрытия регулировалась массой люминофора в суспензии. Представленная методика позволяет осаждать равномерные люминофорные покрытия из суспензии без использования диспергаторов. Была определена оптимальная толщина люминофорного покрытия для достижения максимальной яркости в ТРИС, после чего были изготовлены экспериментальные образцы ТРИС с осаждением люминофорного экрана непосредственно на тритиевый бета-источник. Показано, что предлагаемая технология позволяет получить прочные и равномерные люминофорные покрытия и усовершенствовать технологию ТРИС.

**Ключевые слова:** радиолюминесцентные источники света, радиолюминесценция, тритий, цинксulfидные люминофоры, радиолюминофоры, катодолюминофоры, золь-гель метод, люминофорные покрытия.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Зеленина Е.В., Печерцева Е.А., Бахметьев В.В., Сычев М.М. Усовершенствованная технология люминофорных экранов для твердотельных радиолюминесцентных источников света. Доклады БГУИР. 2019; 7(125): 59-66.

## ADVANCED TECHNOLOGY OF LUMINOPHOR SCREENS FOR SOLID RADIOLUMINESCENT LIGHT SOURCES

ELENA V. ZELENINA<sup>1,2</sup>, EKATERINA A. PECHERTSEVA<sup>1,2</sup>, VADIM V. BAKHMETYEV<sup>1</sup>,  
MAXIM M. SYCHOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State Institute of Technology, Material Science Department,  
Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation*

*Submitted 31 October 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract.** The article observes different methods of coating the phosphor screens on the tritiated titanium matrices for creating the solid-state radioluminescent light sources (SRLS). Technology of SRLS is alternative to the existing technology of the gas-filled radioluminescent light sources. The main idea of SRLS is in bonding the working isotope (tritium) in the solid matrix and combining it with the phosphor. The key problem of SRLS is to provide the closest contact between the tritiated carrier matrix and phosphor screen. The basic requirements for the phosphor screens for SRLS would be the strength of fixation on the plate, uniformity and radiological and thermal stability. There have been made a comparison of various techniques of coating and fixing the phosphor screens by their effect on spectral and brightness characteristics of SRLS. The improved sol-gel technique of suspended sedimentation of phosphor screen from the potassium water glass binder solution was developed. The composition of the solution was established experimentally and we get the strong and uniform experimental prototypes of the glass coated phosphor screens of various thickness. The developed technology allows to deposit the strong and uniform phosphor coatings without using any additional dispersing agents. Screen thickness regulates by the amount of phosphor in the suspension. Also the optimal thickness of the phosphor screen, giving the maximum luminescence intensity was determined. The two laboratory prototypes of solid-state radioluminescent light sources were manufactured by coating the phosphor directly on the tritium  $\beta$ -source.

**Keywords:** radioluminescent light sources, radioluminescence, tritium, zinc-sulphide, radiophosphors, cathodophosphors, sol-gel method, phosphor coating.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Zelenina E.V., Pechertseva E.A., Bakhmetyev V.V., Sychov M.M. Advanced technology of luminophor screens for solid radioluminescent light sources. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 59-66.

### Введение

Радиолуминесцентные источники света (РИС) являются перспективным энергосберегающим типом изделий, востребованных во многих областях человеческой деятельности благодаря своей энергетической автономности и долговечности. В настоящее время основной технологией РИС является производство газонаполненных источников – стеклянных трубок, покрытых с внутренней стороны слоем люминофора и заполненных радиоактивным газом. Действующим радиоизотопом в таких РИС является тритий, чистый бета-излучатель с периодом полураспада 12,3 года, испускающий электроны со средней энергией 5,6 кэВ и максимальной порядка 18 кэВ, завоевавший популярность благодаря своей относительной безопасности и низкой стоимости [1]. Основным недостатком газонаполненных РИС является возможность утечки радиоактивного газа вследствие хрупкости стеклянных трубок, а также необходимость регулирования давления внутри трубки [2]. Твердотельные радиолуминесцентные источники света, очевидно, лишены этих недостатков. Основная идея ТРИС состоит в связывании целевого радионуклида в твердотельной матрице и совмещении ее с люминофором. Подобный подход позволяет снизить радиологическую опасность, избавиться от технологических трудностей, связанных с закачкой радиоактивного газа в трубку, и получить радиолуминесцентные светоисточники самых разных форм и размеров [3].

Поскольку пробег бета-частиц при распаде трития в газообразной среде достигает нескольких сантиметров, а в твердотельной матрице составляет всего несколько микрометров [2, 4], то основным условием для повышения эффективности ТРИС является достижение максимально тесного контакта люминофора с тритированной матрицей-носителем, который способен обеспечить прочные и тонкослойные люминофорные покрытия. Также важной задачей для ТРИС является подбор оптимальной толщины люминофорного покрытия, обеспечивающей максимальную яркость свечения – слишком тонкое покрытие не даст достаточной яркости, а слишком толстое покрытие поглотит весь излучаемый свет [5]. Поэтому разработка методики нанесения прочных и равномерных люминофорных покрытий регулируемой толщины является важной и актуальной задачей.

Основными требованиями к люминофорным покрытиям в контексте создания ТРИС являются: прочность закрепления на подложке, равномерность нанесения, радиационная и температурная стойкость. Для РИС хорошо себя зарекомендовали неорганические цинксulfидные люминофоры [6], благодаря высокой радиационной стойкости и стабильности характеристик по сравнению, например, с органическими люминофорами, демонстрирующими быструю деградацию под действием ионизирующего излучения [7, 8]. Люминофоры в РИС преобразуют энергию ускоренных электронов в видимое или ультрафиолетовое излучение, и яркость светового источника будет зависеть от энергии электронов, длины их пробега, а также, в немалой степени, от состояния поверхности частиц люминофора [4], состава, толщины и равномерности люминофорного покрытия.

Одним из способов получения люминофорного покрытия на подложке является осаждение из суспензии с использованием золь-гель процесса. Этот метод является единственным процессом, подходящим для нанесения монослоя [9]. Согласно данной технологии, в колбу, расположенную горизонтально и чуть под наклоном, помещается водный раствор электролитов. Затем в колбу через перфорированную воронку быстро добавляется суспензия порошка люминофора в водном растворе силиката калия. После этого раствор оставляется в покое до тех пор, пока весь люминофор не осядет на дно. После связывания люминофора с подложкой оставшийся раствор аккуратно сливается так, чтобы избежать любых повреждений для образовавшегося слоя. Затем осевший на дне слой высушивается потоком воздуха. В настоящей статье представлены результаты изготовления люминофорных покрытий золь-гель методом, с возможностью регулирования толщины покрытия. Изучено влияние толщины экрана на рабочие характеристики ТРИС и определена оптимальная толщина покрытия.

### Методика проведения эксперимента

В проведенном эксперименте тритиевая матрица-носитель представляла из себя подложку из нержавеющей стали с напыленным на нее титановым покрытием толщиной 0,5 мкм. При помощи вакуумной установки тритирования на титановое покрытие из газовой фазы был сорбирован тритий. Таким образом было получено четыре тритиевых источника ионизирующего излучения площадью 1 см<sup>2</sup> с паспортной активностью 420 МКи каждый. Ток ионизации составил 19 нА.

Для эксперимента были взяты неорганические цинксulfидные радио- и катодолуминофоры: промышленные радиолуминофоры ФК-2; ФК-3; ФК-4; з-3/11; з-16/3; ж-2/1, (НПФ «Люминофор», г. Ставрополь, Россия) и промышленный цинксulfидный катодолуминофор P31-G1A (Kassei Optonics, Japan).

Размер зерна (дисперсность люминофора) и состояние поверхности люминофорного покрытия были измерены при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH. Элементный состав люминофоров определен при помощи приставки для элементного анализа Oxford Instruments INCA x-act 51-1385-046. На спектрофлуориметре AvaSpec-3648 для ТРИС образцов были получены спектры люминесценции – относительный выход квантов с поверхности источника в определенном диапазоне длин волн. Значения яркости при возбуждении ионизирующим излучением для источника площадью 1 см<sup>2</sup> были измерены на радиометре IL 1700. Были проведены эксперименты по разработке технологии создания и нанесения модифицированных люминофорных покрытий сначала на стеклянные подложки, а затем на титановую матрицу-носитель, содержащую тритий.

## Результаты и их обсуждение

На первом этапе эксперимента был осуществлен предварительный отбор люминофоров с наилучшими спектрально-яркостными характеристиками. В предварительном испытании слой люминофора наносился на клейкую ленту и крепился к тритированной матрице-носителю, обеспечивая плотное прилегание слоя люминофора непосредственно к тритиевому источнику. Поверхностная плотность слоя люминофора определялась весовым методом, и средние значения рассчитывались по результатам десяти измерений.

Определено влияние дисперсности люминофоров на поверхностную плотность, т. е. толщину люминофорных слоев, полученных в идентичных условиях. Рис. 1 демонстрирует увеличение поверхностной плотности люминофорного покрытия с увеличением размера зерен люминофора, вследствие более высокой скорости оседания более крупных частиц.

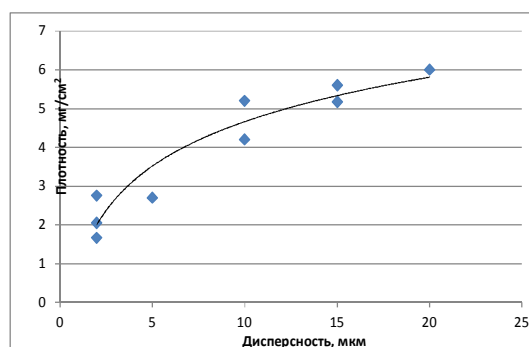


Рис. 1. Зависимость плотности люминофорного покрытия от размера зерна люминофора

Fig. 1. Phosphor mass density and phosphor grain size relationship

На рис. 2 и в табл. 1 представлены результаты предварительных испытаний по отбору люминофоров с наилучшими спектрально-яркостными характеристиками.

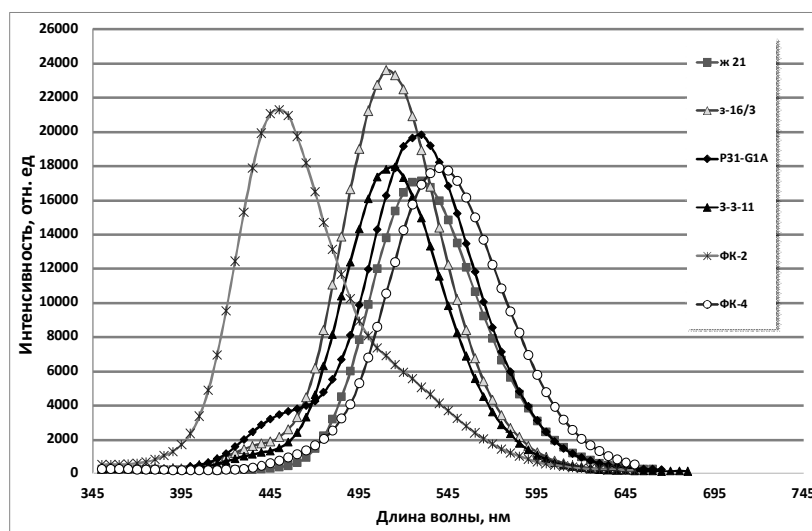


Рис. 2. Спектры люминесценции цинксульфидных люминофоров при возбуждении на тритиевом источнике активностью 420 мКи

Fig. 2. Zinc-sulphide phosphors luminescence spectra excited by tritium source of 420 mCi activity

Результаты спектрального анализа показывают, что наибольшая интенсивность люминесценции наблюдается для радиолюминофоров ФК-2 и з-16/3. Также высокую интенсивность демонстрируют образцы P31-G1A и ФК-4, показавшие, согласно данным табл. 1, наивысшие значения яркости.

**Таблица 1.** Характеристики радио- и катодолуминофоров  
**Table 1.** Preselection characteristics of the cathode- and radiophosphors

Люминофор Phosphor type	Яркость*, отн. ед. Brightness, relative values.	Цвет свечения Emission color	Размер зерна, мкм Grain size, $\mu\text{m}$	Поверхностная плотность. мг/см <sup>2</sup> Surface mass density, mg/cm <sup>2</sup>	Состав люминофора Phosphor composition
P31-G1A	27	зеленый	1–3	1,66	ZnS:Cu
FK-4	27	желтый	1–3	2,05	(Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> )S: Cu
G-2,1	23	желтый	10–15	5,20	(Zn <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> )S:Cu (Cd 5,7 % масс.)
Z-16/3	22	зеленый	15–20	5,17	ZnS:Cu,Mg (1,9 % масс.)
Z-3/11	22	зеленый	1–3	2,76	ZnS:Cu,Mg (3,96 % масс.)
FK-2	7	синий	5–10	2,70	ZnS:Cu

\*яркость рассчитана как среднее значение по результатам десяти измерений

Таким образом, по результатам предварительного отбора, для дальнейших испытаний были выбраны: катодолуминофор P31-G1A (ZnS:Cu) и радиолуминофор FK-4 (ZnS-CdS:Cu), показавшие наилучшее согласие по спектрально-яркостным характеристикам и имеющие наименьший размер зерна и, следовательно, наименьшую поверхностную плотность, гарантирующую высокую равномерность люминофорного покрытия.

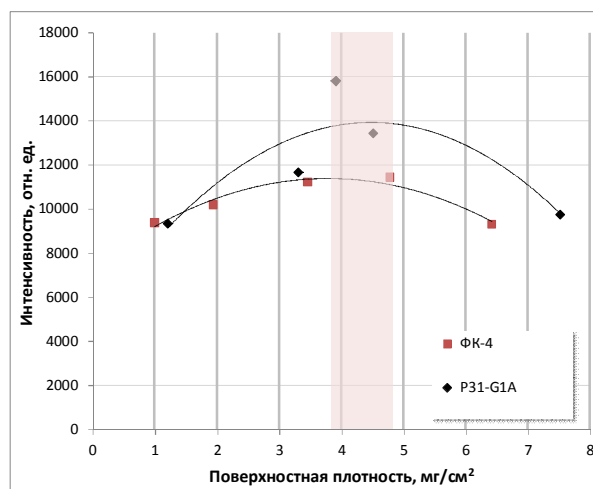
Для отобранных люминофоров был испытан метод нанесения люминофорного покрытия путем золь-гель осаждения из суспензии по методике, описанной в [10]. Исходная смесь приготавливалась на основе водного раствора силиката калия с добавлением электролита в качестве коагулятора, а также полимерного поверхностно-активного вещества (ПАВ), действующего как диспергатор. компоненты суспензии размалывались, при помощи шаровой мельницы, в растворе ПАВ при последовательном добавлении электролита-коагулятора и связующего – силиката калия. далее частицы люминофора осаждались из приготовленной суспензии, образуя люминофорный экран. пав, в качестве диспергатора, покрывает зерна люминофора полимерной пленкой, защищающей частицы от слипания и комкования, что должно обеспечить максимальную равномерность покрытия.

Для ускорения процесса закрепления частиц люминофора на подложке использовался электролит – коагулятор Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Авторами был модифицирован данный способ, так как при его реализации было установлено, что присутствие ПАВ в растворе гасит действие коагулятора Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, поэтому от использования ПАВ было решено отказаться. Из-за того что цинк-сульфидные люминофоры без использования ПАВ очень плохо смачиваются водой, было решено использовать калиевое жидкое стекло в качестве как связующего, так и диспергатора. Экспериментальным путем были установлены оптимальные концентрации связующего и коагулятора в составе суспензии. Полученный раствор коагулировал постепенно, в течение, примерно, 30–60 мин, что являлось достаточным временем для осаждения люминофора на стеклянную подложку. После 30 мин сушки на воздухе подложка с люминофором помещалась в сушильный шкаф и сушилась там при температуре 120 °С в течение часа.

Модифицированная технология, основанная на золь-гель методе, позволяет наносить ровные люминофорные покрытия, имеющие хорошее сцепление с подложкой без применения специальных диспергирующих агентов. Толщина люминофорного покрытия регулируется массой люминофора в суспензии [11]. По данной методике, для двух отобранных ранее люминофоров, были изготовлены 2 серии образцов люминофорных покрытий на стеклянных подложках с пятью различными толщинами люминофорного слоя, осажденного из суспензий, содержащих 0,025, 0,05, 0,075, 0,1 и 0,2 г люминофора на 50 мл суспензии соответственно, измерены спектральные и яркостные характеристики при возбуждении тритиевым источником излучения и установлена оптимальная толщина люминофорного покрытия.

Из данных рис. 3, показывающего зависимость интенсивности люминесценции от толщины покрытия для обоих люминофоров, можно определить оптимальную поверхностную плотность покрытия, которая составляет 4–5 мг/см<sup>2</sup>.



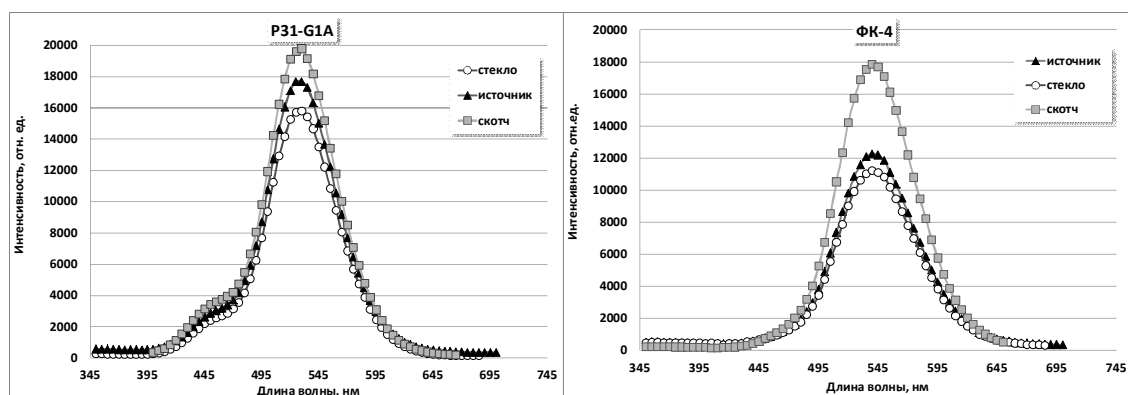
**Рис. 3.** Зависимость интенсивности люминесценции от поверхностной плотности люминофорного покрытия для различных люминофоров при возбуждении на тритиевом источнике активностью 420 мКи

**Fig. 3.** Luminescence intensity versus phosphor screen surface mass density at exiting by tritium  $\beta$ -source of 420 mCi of activity

Далее люминофорные покрытия (ЛФ-покрытия) оптимальной толщины были по той же методике нанесены на тритиевые источники излучения. В результате были изготовлены два опытных образца ТРИС, и для них также были сняты спектрально-яркостные характеристики. В табл. 2 и на рис. 4 проведено сравнение характеристик при различных способах крепления ЛФ-покрытия: на клейкую ленту, как это делалось при предварительном отборе люминофоров; на стеклянные подложки, как это делалось в опыте подбора оптимальной толщины покрытия; и, наконец, при непосредственном нанесении покрытия на тритиевый источник.

**Таблица 2.** Параметры ТРИС при различных способах крепления ЛФ-покрытия на тритиевый источник  
**Table 2.** SRLS Parameters at different methods of phosphor screen fixation to the tritium  $\beta$ -source

Люминофор Phosphor type	Яркость, отн. ед. Brightness, arbitrary values		
	Клейкая лента (поверхностная плотность 2,1 мг/см <sup>2</sup> ) Sticky tape (phosphor surface mass density 2,1 mg/cm <sup>2</sup> )	Стеклянная подложка (оптимальная поверхностная плотность 4,5 мг/см <sup>2</sup> ) Glass (optimal surface mass density 4,5 mg/cm <sup>2</sup> )	Тритиевый источник (оптимальная поверхностная плотность 4,5 мг/см <sup>2</sup> ) Tritium source (optimal surface mass density 4,5 mg/cm <sup>2</sup> )
P31-G1A	27,4	18	21
FK-4	2,7	13	15



**Рис. 4.** Спектры люминесценции ТРИС при различных способах нанесения люминофорного покрытия: а – катодолуминофор P31-G1A; б – радиолуминофор FK-4

**Fig. 4.** SRLS luminescence spectra at various methods of phosphor screen fixation: a – cathodophosphor P31-G1A; b – radiophosphor FK-4

Можно видеть, что, вследствие обволакивания зерен люминофора связующей суспензией при креплении на стекло, происходит 20 % снижение яркости по сравнению с креплением люминофора на клейкую ленту. Нанесение ЛФ-покрытий непосредственно на источник продемонстрировало 15 % рост яркости по сравнению с креплением люминофора на стекло. Это объясняется тем, что нанесение ЛФ-покрытия непосредственно на источник обеспечивает более тесный контакт люминофора и тритированной матрицы и, учитывая малый пробег бета-частиц в веществе, естественно, способствует более тесному контакту бета-частиц с центрами свечения люминофора.

Результаты СЭМ, приведенные на рис. 5, ясно демонстрируют, что использованная технология нанесения ЛФ-покрытия препятствует стеканию связующего в процессе осаждения люминофора и способствует равномерному обволакиванию зерен связующей суспензией. Согласно данным СЭМ, толщина ЛФ-покрытия составила 18–25 мкм.

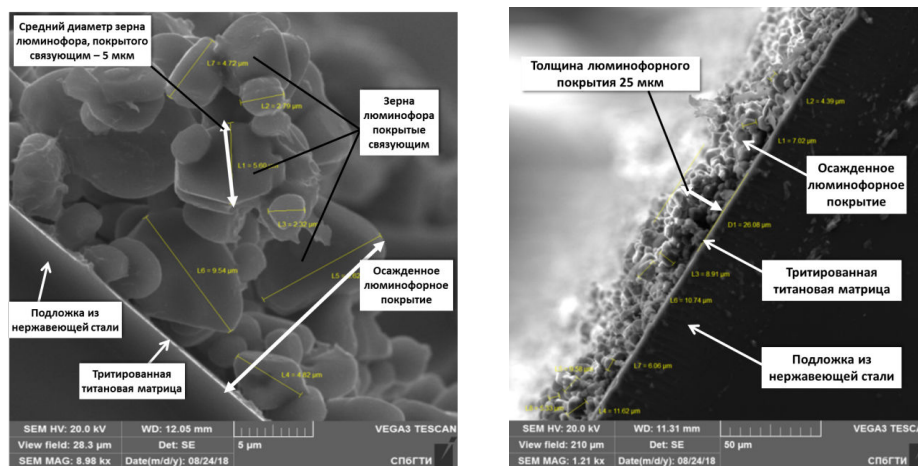


Рис. 5. Микрофотографии ЛФ-покрытия, нанесенного методом осаждения из суспензии  
Fig. 5. Suspended phosphor screen microphotographs

### Заключение

Разработана методика нанесения ЛФ-покрытий регулируемой толщины с использованием золь-гель технологии на тритиевые источники ионизирующего излучения, позволяющая получать более равномерные покрытия по сравнению с методикой, используемой в настоящее время в промышленности.

При испытаниях на тритиевом источнике изучены спектрально-яркостные характеристики и установлена оптимальная толщина ЛФ-покрытия, составившая 4–5 мг/см<sup>2</sup>.

Установлено, что закрепление ЛФ-покрытия непосредственно на тритиевый источник дает 15 % рост по яркости по сравнению с креплением на стекло.

### Список литературы/References

1. Ellefson R.E. High pressure bulk-phosphor tritium lamps. Technology transfer conference proceedings, 1990, U. S. DOE Washington, DC 20585.
2. Bower K.E. Polymers, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries. 1. New York, CRCPress LLC, 2002.
3. Zelenina E.V., Sychoy M.M., Kostylev A.I., Ogurtsov K.A. Prospects for the development of tritium-based solid-state radioluminescent light sources. Radiochemistry. 2019; 61:1, DOI: 10.1134/S1066362219010089.
4. Rodnyi P.A. Physical processes in inorganic scintillators. 1. New York, CRCPress LLC, 1997.
5. Zelenina E.V., Bakhmetyev V.V., Sychoy M.M. Optimized technique of phosphor screens coating for the tritium radioluminescent light sources. IX conf. «Radiochemistry 2018», book of thesis, Saint-Petersburg. 2018. <http://radiochemistry2018.ru>.
6. William M. Yen, Marvin J. Weber. Inorganic phosphors: compositions, preparation, and optical properties. New York, CRCPress LLC, 2004.
7. Tompkins J.A. et al. Tritide based radioluminescent light sources in radioluminescent lighting technology. Technology transfer conference proceedings, 1990, U. S. DOE Washington, DC 20585.

8. Renschler C.L., Gill J.T., Walko R.J., Ashley C.S., Shepodd T.J., Reed S.I., Malone G.M., Leonard L.E., Ellefson R.E. and Clough R.L. Solid-State radioluminescent lighting. *Radiat. Phys. Chem.* 1994; 44: 6
9. Shionoya S., Yen W.M. (Eds.). *Phosphor Handbook*. 2. New York, CRC Press LLC, 2006.
10. Baranovsky V.I. *Manufacturing technology of receiving electron-beam tubes*. 2. Moscow, Energy, 1970.
11. Zelenina E., Bakhmetyev V., Pechertseva E., Sychov M.A. modified sol-gel technique of phosphor screens preparation for tritium solid-state radioluminescent light sources (SRLS). *J. of Sol-Gel Science and Technology*. 2019. doi:10.1007/s10971-019-05022-2.

### Вклад авторов

Зеленина Е.В. выдвинула идею эксперимента, выполнила планирование эксперимента, координирование работ, изготовление тритиевых источников, а также анализ спектров и анализ данных.

Печерцева Е.А. выполнила изготовление люминофорных экранов, снятие спектров, измерение яркости, электронную микроскопию, первичный анализ данных.

Бахметьев В.В. обеспечил теоретическую и практическую базу для изготовления люминофорных экранов, научное сопровождение эксперимента.

Сычев М.М. выполнил научное и научно-техническое сопровождение эксперимента, контроль и проверку результатов анализа данных, принял участие в интерпретации результатов.

### Authors contribution

Zelenina E.V. put forward the idea of the experiment, completed the design of the experiment, coordinated work, the manufacture of tritium sources, as well as the analysis of spectra and data analysis.

Pechertseva E. A. performed the manufacture of phosphor screens, taking spectra, measuring brightness, electron microscopy, primary data analysis.

Bakhmetyev V.V. provided a theoretical and practical basis for the manufacture of phosphor screens; scientific support of the experiment.

Sychov M.M. performed scientific and technical support of the experiment, control and verification of the results of data analysis, took part in the interpretation of the results.

### Сведения об авторах

Зеленина Е.В., аспирант кафедры теоретических основ материаловедения, начальник отдела инновационного развития АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» СПбТИ(ТУ).

Печерцева Е.А., студент кафедры радиационной технологии, инженер отделения технологии изотопов АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» СПбТИ(ТУ).

Бахметьев В.В., к.х.н., заведующий лабораторией, доцент кафедры теоретических основ материаловедения СПбТИ(ТУ).

Сычев М.М., д.т.н., заведующий кафедрой, профессор кафедры теоретических основ материаловедения СПбТИ(ТУ).

### Information about the authors

Zelenina E.V., PG student of the Department of Theoretical Foundations of Materials Science, head of the Department of Innovative Development of Radium Institute named after V. G. Khlopina SPbTI (TU).

Pechertseva E.A., student of the Department of Radiation Technology, engineer of the Department of Isotope Technology of JSC Radium Institute them. V. G. Khlopina SPbTI (TU).

Bakhmetyev V.V., Ph.D., head of Laboratory, Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Materials Science, SPbTI (TU).

Sychov M.M., D.Sci, head of Department, Professor, Department of Theoretical Foundations of Materials Science, SPbTI (TU).

### Адрес для корреспонденции

190013, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный технологический институт  
(технический университет)»  
тел. 8-921-406-19-98;  
e-mail: elena.v.zelenina@gmail.com  
Зеленина Елена Владимировна

### Address for correspondence

190013, Russian Federation,  
Saint-Petersburg, Moskovsky av., 26,  
Saint-Petersburg State Institute of Technology,  
Materials Science Department  
tel. 8-921-406-19-98;  
e-mail: elena.v.zelenina@gmail.com  
Zelenina Elena Vladimirovna