

УДК 620.17, 531.728

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-82-94>**Влияние квантовых точек CdSe/CdS/ZnS на эффективность светодиодных устройств****А.П. Кузьменко¹✉, В.В. Родионов¹, А.И. Колпаков¹, Д.С. Белкин¹,
Е.Г. Есаулкова¹, А.С. Сизов¹, Д.П. Аникин²**

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Русид
территория Северная промзона, участок 95, г. Армавир 352900, Российская Федерация

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Определить влияние красных коллоидных квантовых точек со структурой CdSe/CdS/ZnS на световую отдачу и индекс цветопередачи светодиодных устройств.

Методы. Проведены микроскопические, флуоресцентные и микрорентгеноспектральные исследования силиконового композита с красными коллоидными квантовыми точками CdSe/CdS/ZnS и люминофорным порошком иттрий-алюминиевого граната в составе белых светодиодов с одним чипом InGaN в качестве источника возбуждения 453,7 нм. Гониофотометрические измерения пространственного распределения силы света совместно со спектроколориметром позволили определить световую отдачу и индекс цветопередачи белых светодиодов.

Результаты. Полученная в данной работе порошковая смесь частиц иттрий-алюминиевого граната с нанесенными на их поверхность в виде островковой пленки красными коллоидными квантовыми точками со структурой CdSe/CdS/ZnS, стабилизированными триоктилфосфином и триоктилфосфиноксидом, и длинами волны максимумов люминесценции в диапазоне от 590 до 630 нм в условиях промышленного производства позволила изготовить более 100 белых SMD-светодиодов с улучшением световой отдачи на 11%. Для холодного и нейтрального белого света с координатами цветности от $x = 0,332$ и $y = 0,318$ до $x = 0,404$ и $y = 0,401$ в цветовом пространстве CIE 1931 индекс цветопередачи R_a белых светодиодов с квантовыми точками превышал 90 при значениях показателя красного цвета R_9 от 63 до 81.

Заключение. В данной работе показана эффективность использования для белых светодиодов красных коллоидных квантовых точек на основе полупроводников II-VI групп с квантовым выходом не менее 50% при контролируемой концентрации, соответствующей навеске порошка иттрий-алюминиевого граната, за счёт отсутствия сдвига люминесценции до ИК-области, собственного нитридного люминофору CaAlSiN₃.

Ключевые слова: люминофоры; иттрий-алюминиевый гранат; квантовые точки; белый светодиод.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (з/з 2020 № 0851–2020–0035), в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» (Соглашение № 075–15–2021–1213).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Влияние квантовых точек CdSe/CdS/ZnS на эффективность светодиодных устройств / А.П. Кузьменко, В.В. Родионов, А.И. Колпаков, Д.С. Белкин, Е.Г. Есаулкова, А.С. Сизов, Д.П. Аникин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 82–94. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-82-94>.

Поступила в редакцию 12.12.2024

Подписана в печать 20.01.2025

Опубликована 20.03.2025

Effect of CdSe/CdS/ZnS quantum dots on the efficiency of LED devices

Aleksander P. Kuzmenko¹✉, Vladimir V. Rodionov¹, Artem I. Kolpakov¹,
Dmitry S. Belkin¹, Elizaveta G. Esaulkova¹, Aleksandr S. Sizov¹, Dmitry P. Anikin²

¹ Southwest State University,
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² RUSID
Severnaya Promzona territory, sec. 95/5, Armavir 352900, Russian Federation

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose of research. To determine the influence of red colloidal quantum dots with the CdSe/CdS/ZnS structure on the luminous efficiency and color rendering index of LED devices.

Methods. Microscopic, fluorescent and micro-X-ray studies of a silicone composite with red colloidal quantum dots CdSe/CdS/ZnS and phosphor powder of yttrium-aluminum garnet in white LEDs with a single InGaN chip as a 453.7 nm excitation source were carried out. Goniophotometric measurements of the spatial distribution of luminous intensity together with a spectroradiometer made it possible to determine the luminous efficiency and color rendering index of white LEDs.

Results. The powder mixture of yttrium aluminum garnet particles obtained in this work with red colloidal quantum dots with a CdSe/CdS/ZnS structure stabilized with trioctylphosphine and trioctylphosphine oxide applied to their surface in the form of an island film and with wavelengths of luminescence maxima in the range from 590 to 630 nm under industrial production conditions made it possible to manufacture more than 100 white SMD LEDs with an improvement in luminous efficiency by 11%. For cold and neutral white light with chromaticity coordinates from $x = 0.332$ and $y = 0.318$ to $x = 0.404$ and $y = 0.401$ in the CIE 1931 color space, the color rendering index R_a of white LEDs with quantum dots exceeded 90 with red color index R_9 values from 63 to 81.

Conclusion. This paper shows the efficiency of using red quantum dots based on II-VI semiconductors for white LEDs with a quantum yield of at least 50% at a controlled concentration corresponding to the yttrium-aluminum garnet powder weight, due to the absence of a luminescence shift to the IR region, which is characteristic of the CaAlSiN₃ nitride phosphor.

Keywords: phosphors; yttrium-aluminum garnet; quantum dots; white LED.

Funding: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (G/Z 2020 No. 0851-2020-0035), as part of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Kolpakov A.I., Belkin D.S., Esaulkova E.G., Sizov A.S., Anikin D.P. Effect of CdSe/CdS/ZnS quantum dots on the efficiency of LED devices. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(1):81–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-82-94>.

Received 12.12.2024

Accepted 20.01.2025

Published 26.03.2025

Введение

Устройство белых светодиодов, начиная с первых прототипов в 1995 г. [1] на основе иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) [2], принципиально не отличается от современных, отвечающих высоким требованиям к их световой отдаче и индексу цветопередачи. Совершенствование белых светодиодов для создания высококачественного излучения, как правило, происходит варьированием концентрации [3], размеров и состава люминесцентных порошков [4] в силиконовом компаунде, покрывающего один или несколько синих светоизлучающих чипов из нитридов галлия и индия. Для повышения индекса цветопередачи R_a , зависящего от показателей цветов $R_1 - R_8$ и отражающего воспроизведение насыщенных красных цветов R_9 белых светодиодов [5], используют красный нитридный люминофор [6], значительно снижающий световую отдачу [7] при тепловом сдвиге спектра люминесценции до ИК-области [8]. Более эффективными (до 88%) в преобразовании света являются кадмиевые квантовые точки (КТ), имеющие экстремумы зоны проводимости и валентной зоны (тип II) [9], с оболочками ядра, полученными с помощью метода последовательной ионно-слоевой адсорбции (SILAR) [10].

Введение в белые светодиоды красных КТ перспективно и приводится в многочисленных обзорных работах [11]. Так в [12] сообщается о белых светодиодах с отдачей более 39% на основе красных квантовых точек CdSe с оболочкой из 20 монослоев CdS и квантовым выходом до 98% при ширине на половине высоты максимума излучения 20 нм. Красные квантовые точки ZnCdSe/ZnSe [13] могут быть

синтезированы методом низкотемпературного зародышеобразования с высокотемпературным формированием оболочки и удалением ловушечного состояния [14] для получения квантовой эффективности до 94% [15] с последующим введением в белый светодиод для достижения световой отдачи более 170 лм/Вт [16].

Присутствие разного рода органических растворителей и влаги в коллоидных системах КТ существенно ограничивает применение их в белых светодиодах из-за агрессивного воздействия на внутренние электронные компоненты [17], высокой оптической чувствительности силиконового компаунда и потери эффективности оптического смешивания (до 13%) для гибридной светодиодной системы [18]. Во избежание потери световой отдачи белых светодиодов необходима разработка схемы совместного введения порошковых люминофоров и коллоидных квантовых точек в силиконовый компаунд. Это обуславливает значимость данного исследования создания островковой пленки из квантовых точек на поверхность частиц ИАГ для минимизации потери эффективности их люминесценции в белых светодиодах.

Материалы и методы

Для белых светодиодов наиболее используемыми порошковыми люминофорами являются активированный ионами церия иттрий-алюминиевый гранат и сходные по морфологическим свойствам иттрий-алюминий-галлиевый гранат и иттрий-гадолиний-алюминиевый гранат со средним размером частиц 12 мкм [4], находящихся одновременно в силиконовом компаунде из смеси полисилоксана,

силсесквиоксана, силиконовой смолы и фенилметилциклосилоксанов. Вместо красного нитридного люминофора CaAlSiN_3 [2] в настоящей работе использованы полученные методом горячей инъекции и стабилизированные триоктилфосфином и триоктилфосфиноксидом в ксилоле КТ со структурой «ядро/оболочка/оболочка» CdSe/CdS/ZnS , квантовым выходом не менее 50%, длинами волны максимумов люминесценции 590 – 630 нм и полной шириной на полувысоте до 43 нм [19].

Гомогенизированный силиконовый компаунд с квантовыми точками и порошковыми люминофорами ИАГ вводился пневматическим диспенсером SM-EX2 в инженерные сборки SMD-светодиодов (рис. 1) с установленным в них чипом длиной волны излучения 453,7 нм для последующего отверждения в течение 60 минут при 150°C. В условиях промышленного производства ООО «Русид» (г. Армавир) были получены более 100 светодиодов мощностью 0,45 Вт и увеличенным красным смещением спектра излучения за счёт кадмиевых КТ.

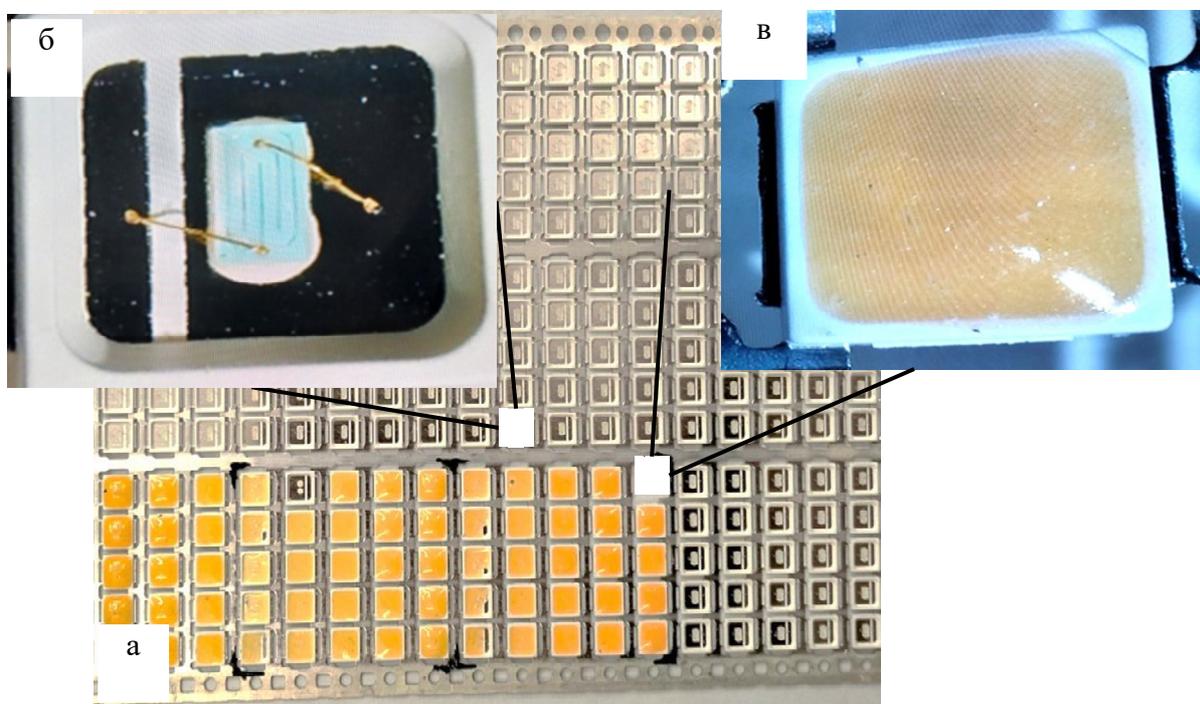


Рис. 1. Инженерная сборка (а) с пустыми распаянными корпусами (б) и SMD-светодиодами с КТ (в) при увеличении 50 раз

Fig. 1. Engineering assembly (a) with empty soldered cases (b) and SMD-LEDs with QD (c) at 50 magnification

Для измерения силы света и его пространственного распределения в белых светодиодах с квантовыми точками использован гониофотометр с калибровкой по методу РТ-МК-5188-448-2023 от ФБУ «Ростест-Москва», адаптированного для SMD-светодиодов в соответствии с Technical report МКО CIE127-2007

«Measurements of LED's», ГОСТ Р 54350 и ГОСТ Р 55702 в спектральном диапазоне до 800 нм при силе света от 0,1 кд [20]. Расчёт световой отдачи и освещённости [21] за вычетом теневого фона и индекса цветопередачи R_a [22] с показателем R_9 [23], а также коррелированной цветовой

температуры (КЦТ) [24] в кельвинах проводился при дополнительном использовании спектроколориметра ТКА-ВД/2.

Результаты и их обсуждение

Объем коллоидного раствора V_p квантовых точек для белого светодиода, наносимых на частицы ИАГ в виде одного островкового слоя с учетом соотношения их диаметров $D_{КТ} \ll D_{ИАГ}$, площадей внешней поверхности ИАГ $S_{ИАГ} = \pi(D_{ИАГ})^2$ и поперечного сечения КТ $S_{КТ} = \pi(D_{КТ})^2/4$ при полной массе $M_{ИАГ}$ (г) определялся из условия (мл):

$$V_p < \frac{4\rho_{КТ}D_{КТ}M_{ИАГ}}{C_{КТ}\rho_{ИАГ}D_{ИАГ}}. \quad (1)$$

Для КТ и ИАГ в (1) плотности $\rho_{КТ} \sim \rho_{ИАГ}$ и диаметры $D_{КТ} \approx 4$ нм, $D_{ИАГ} \approx 12$ мкм на примере общепринятой типовой концентрации КТ $C_{КТ} = 5$ мг/мл

$$V_p < \frac{M_{ИАГ}}{K}, \quad (2)$$

где коэффициент $K \approx 6$ г/мл.

Для получения однородного состава силиконовый компаунд смешивался в лабораторном вакуумном гомогенизаторе с порошком ИАГ, на поверхностях частиц которого при соблюдении условия (2) закреплены КТ в виде небольших сегментов – островков (рис. 2). Формирование островков подтверждается как электронно-микроскопическими изображениями частиц ИАГ (рис. 3, а), так и распределением кадмия, входящего в состав КТ, с повышенным его содержанием в островках (рис. 3, б), обнаруженных с помощью микрорентгеноспектрального анализа при энергии 3,133 эВ для линии $L\alpha_1$ кадмия (рис. 3, в) при возбуждении электронным пучком растрового (сканирующего) микроскопа JEOL JSM6610LV.

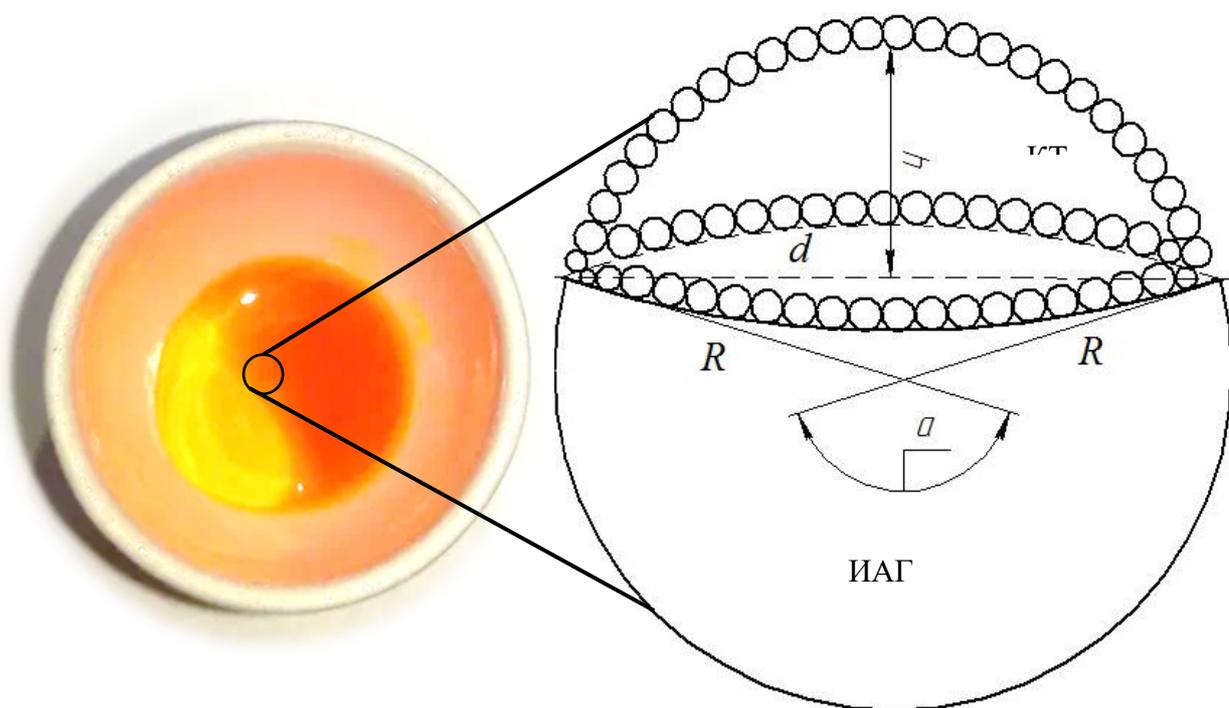


Рис. 2. Суспензия ИАГ с КТ в ксилоле со схематичной иллюстрацией частицы люминофора ИАГ с осажденным островком пленки из КТ

Fig. 2. QD+YAG suspension in xylene with a schematic illustration of a YAG phosphor particle with a deposited island of QD film

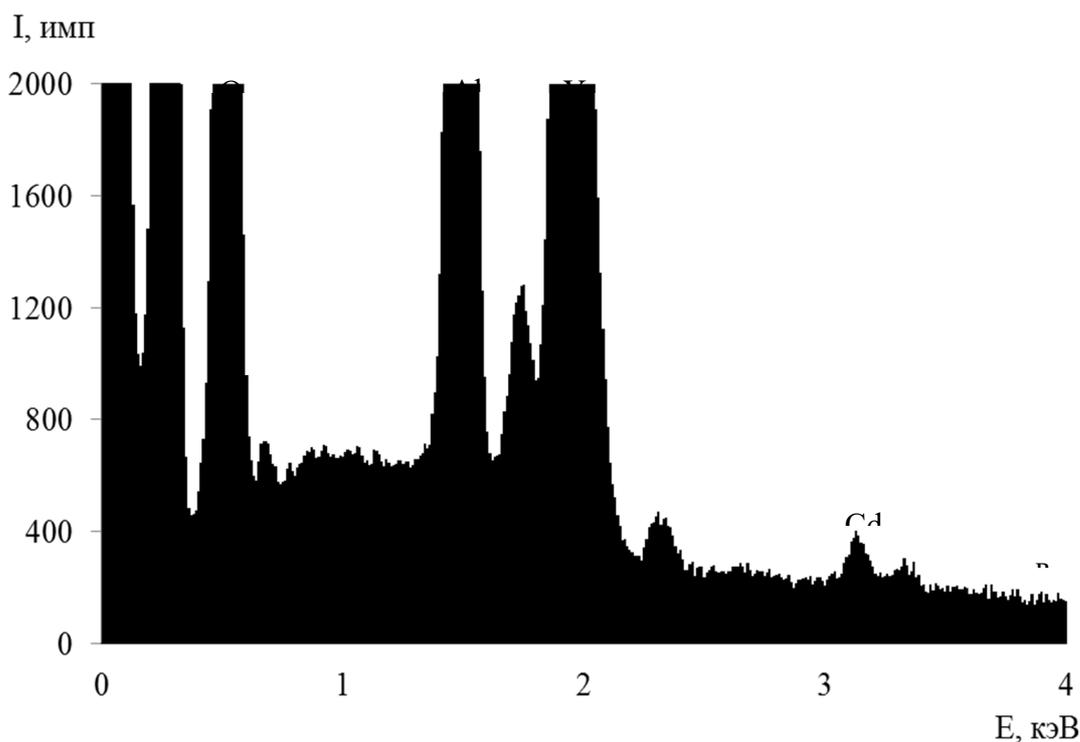
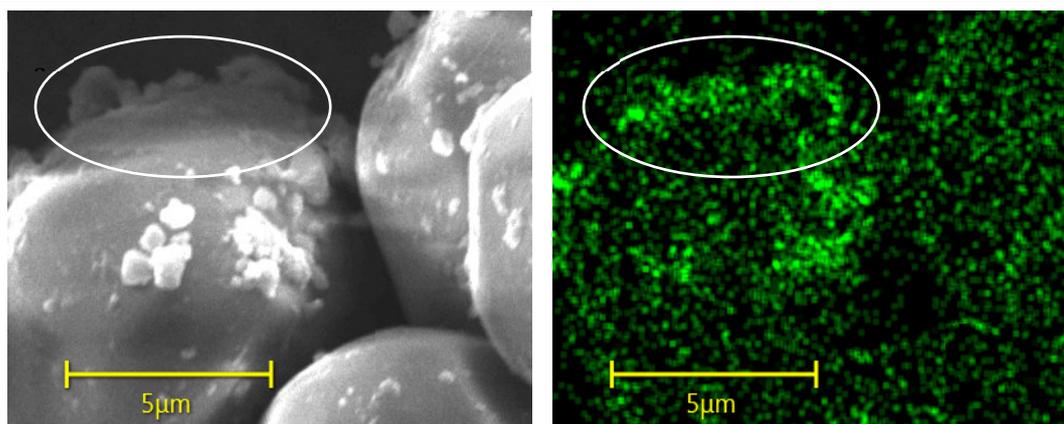


Рис. 3. Электронная микрофотография (а), полученная в режиме вторичной электронной эмиссии, распределение кадмия (б) с указанием островков КТ и энергодисперсионный спектр участка с КТ (в)

Fig. 3. Electron micrograph (a) obtained in the secondary electron emission mode and the distribution of cadmium (b) with indication of the QD islands and the energy dispersive spectrum of the QD islands (c)

Площадь сегмента из КТ (см. рис. 2) на сферических частицах ИАГ равна: $S_{\text{сер}} = \pi D_{\text{ИАГ}} h$, где $D_{\text{ИАГ}} = 2R$, R – радиус частицы ИАГ; h – высота сегмента островка на ней, равная $h = R(1 - \cos\alpha/2)$; α – телесный угол, соответствующий диаметру островка d , определяемый формулой $\alpha = \pi d/R$. Окончательно

$$S_{\text{сер}} = 2\pi R \left(1 - \cos\left(\frac{\pi d}{2R}\right)\right). \quad (3)$$

Так как R в (3) не менее чем в несколько раз больше d (см. рис. 3, а), то площадь островков красных КТ $S_{\text{сер}}$ пренебрежимо меньше площади частиц ИАГ $S_{\text{ИАГ}}$: $S_{\text{сер}} \ll S_{\text{ИАГ}}$, т. е. поглощение возбуждения синего светодиода на красных КТ будет низким и предельный световой поток $J_{\text{пр}}$, падающий на поверхность частицы ИАГ, будет определяться

количеством n и вероятностью излучения α_1 её центров свечения [2]:

$$J_{\text{пр}} = \alpha_1 n. \quad (4)$$

Высокие значения полученных светотехнических характеристик R_a и E для

белых светодиодов с ИАГ и КТ, показанные в таблице 1, подтверждают отсутствие существенного поглощения синего излучения красными КТ и предельную люминесценцию ИАГ в соответствии с (4).

Таблица 1. Средние значения координат цветности x и y , коррелированной цветовой температуры T_c , индекса цветопередачи R_a , показателя R_9 и освещенности E при различном времени t дозирования силиконового компаунда с ИАГ и КТ

Table 1. Average values of x and y chromaticity coordinates, correlated color temperature T_c , color rendering index R_a , R_9 index and illuminance E at different dosing times t of silicone compound with YAG and KT

t, c	x	y	T_c, K	R_a	R_9	$E, \text{лк}$	Тип белого света
0,5	0,332	0,318	5611	93	81	584	Холодный
0,6	0,369	0,364	4269	93	70	560	Нейтральный
0,8	0,404	0,401	3619	92	63	518	

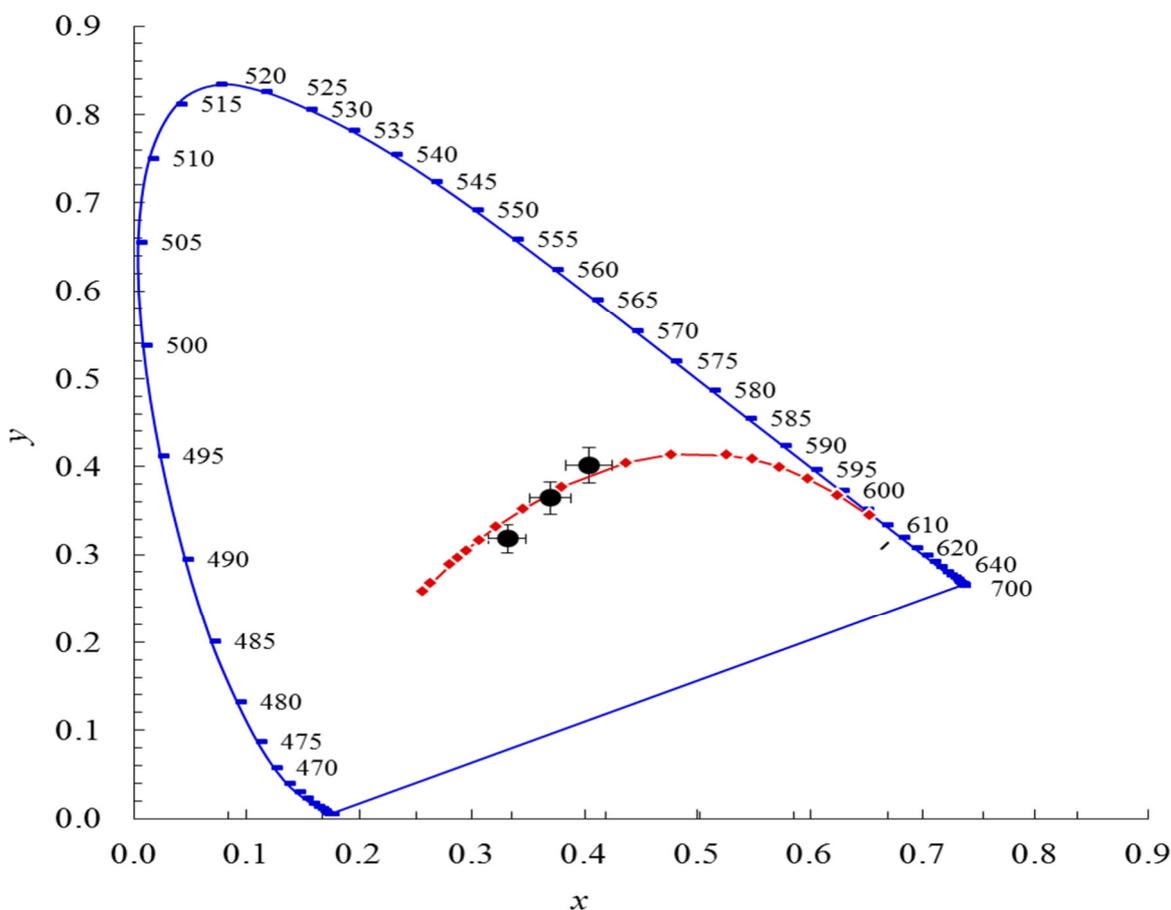


Рис. 4. Цветовое пространство с указанием локуса Планка в координатах цветности для излучения белых светодиодов с КТ

Fig. 4. Color space with Planck locus in chromaticity coordinates for white LED emission with QD

На рисунке 4 показаны экспериментальные координаты цветности белых светодиодов с одним полупроводниковым чипом и силиконовым компаундом на основе порошкового люминофора ИАГ с КТ. Измерение индексов цветопередачи и КЦТ происходило при температуре радиатора светодиодов не более 50°C , что типично для ламп комнатного освещения [21]. Светодиод на основе КТ демонстрирует улучшение преобразования по сравнению с коммерческими светодиодами на основе красного нитридного люминофора: при сопоставимой КЦТ от 3619 до 5611 К (см. табл. 1) рост индекса цветопередачи R_a составил до 93 при R_9 от 63 до 81. При этом существенная агрегация КТ и оптическое рассеяние между КТ и люминофором ИАГ не наблюдалось. Сдвиг цвета белых светодиодов с ИАГ и КТ в исследуемом диапазоне КЦТ (см. табл. 1) составляет от $x = 0,332$ и $y = 0,318$ до $x = 0,404$ и $y = 0,401$ в цветовом пространстве CIE 1931 (см. рис. 4), что сопоставимо с коммерческими светодиодами на основе красного нитридного люминофора. Сопоставление световой отдачи светодиодов с ИАГ и КТ выбранной КЦТ с аналогичными на основе красного люминофора демонстрирует прирост до 11%. Данные светодиодов с неопределяемой КЦТ и выходящей за пределы холодного белого цвета не представлены.

Выводы

Современные светодиодные устройства, основанные на люминесценции порошка ИАГ, возбуждаемого одним или несколькими полупроводниковыми чипами, имеют возможность для дальнейшего развития с целью улучшения световой отдачи и индекса цветопередачи при использовании коллоидного раствора КТ без необходимости его непосредственного впрыска в силиконовый компаунд. В данной работе

получена порошковая смесь, в которой квантовые точки CdSe/CdS/ZnS, покрытые триоктилфосфином и триоктилфосфиноксидом и находящиеся в растворе ксилола с длиной волны максимумов люминесценции в диапазоне от 590 до 630 нм, наносились на поверхности частиц наполнителя – ИАГ. Полученные белые светодиоды с увеличением красного смещения спектра за счёт кадмиевых КТ демонстрируют улучшение световой отдачи на 11% по сравнению с белыми светодиодами на основе красного нитридного люминофора. Для холодного и нейтрального белого света индекс цветопередачи R_a превышал значение 90 при R_9 с 63 до 81. Таким образом, в данной работе продемонстрирована перспективность использования красных КТ на основе полупроводников II-VI для белых светодиодов с их концентрацией в соответствии с условием (2) для частиц ИАГ.

Обращает на себя внимание, что расширяющийся спектр практических применений КТ включает их применение не только в рассмотренной области, но и фотовольтаике, где они используются в качестве фотоэлементов, но и также в качестве материалов для создания термоэлектрических элементов [25]. Отличительная особенность термоэлементов на их основе сопряжена с соотношениями длины свободного пробега носителей заряда внутри КТ, которые оказываются значительно больше размеров самих точек. В такой ситуации удастся разделить влияние теплопроводности и электропроводности. При этом достигаются уникальные сочетания этих характеристик, когда при росте электропроводности снижается теплопроводность и возрастает коэффициент Зеебека, что обуславливает повышение термоэлектрической добротности. В этой связи можно заключить, что КТ выступают многообещающими кандидатами для термоэлектрических приложений следующего поколения.

Список литературы

1. Prospects for LED lighting / S. Pimputkar, J.S. Speck, S.P. DenBaars, S. Nakamura // *Nature photonics*. 2009. Vol. 3, no. 4. P. 180–182. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.32>.
2. Кузьменко А.П., Аникин Д.П., Родионов В.В. Влияние структурных свойств люминофоров на повышение индекса цветопередачи белого светодиода // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 3. С. 93–108.
3. The influence of different conditions on the luminescent properties of YAG:Ce phosphor formed by combustion / Z. Yang, X. Li, Y. Yang, X. Li // *Journal of Luminescence*. 2007. Vol. 122. P. 707–709. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.01.266>.
4. Влияние концентрации Ce^{3+} и размеров кристаллических частиц YAG на фотолюминесценцию / Е.А. Новиков, А.П. Кузьменко, В.В. Родионов, В.М. Емельянов, Д.П. Аникин, Ю.А. Неручев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2024. Т. 14, № 1. С. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-59-75>.
5. George N.C., Denault K.A., Seshadri R. Phosphors for solid-state white lighting // *Annual Review of Materials Research*. 2013. Vol. 43. P. 481–501. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-073012-125702>.
6. Боровский Е. Светодиоды OSCONIQ S 3030 QD на квантовых точках // *Современная светотехника*. 2019. № 5. С. 14–15.
7. Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges / F.P. García de Arquer, D.V. Talapin, V.I. Klimov, Y. Arakawa, M. Bayer, E.H. Sargent // *Science*. 2021. Vol. 373, no. 6555. P. eaaz8541. <https://doi.org/10.1126/science.aaz8541>.
8. Хофманн М., Рочева В. Новый светодиод для наружного освещения // *Полупроводниковая светотехника*. 2021. № 3. С. 4–7.
9. Wood V., Bulović V. Colloidal quantum dot light-emitting devices // *Nano reviews*. 2010. Vol. 1, no. 1. P. 5202. <https://doi.org/10.3402/nano.v1i0.5202>.
10. Cadmium-free and efficient type-II InP/ZnO/ZnS quantum dots and their application for LEDs / G.O. Eren, S. Sadeghi, Jalali H. Bahmani, M. Ritter, M. Han, I. Baylam [et al.] // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13, no. 27. P. 32022–32030. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscami.1c08118>.
11. White-light-emitting diodes with quantum dot color converters for display backlights / E. Jang, S. Jun, H. Jang, J. Lim, B. Kim, Y. Kim // *Advanced materials*. 2010. Vol. 22, no. 28. P. 3076–3080. <https://doi.org/10.1002/adma.201000525>.
12. Kim N.H., Jeong J., Chae H. White light emission with quantum dots: a review // *Applied Science and Convergence Technology*. 2016. Vol. 25, no. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.5757/ASCT.2016.25.1.1>.
13. Dual-color emitting quantum-dot-quantum-well CdSe-ZnS heteronanocrystals hybridized on InGaN/GaN light emitting diodes for high-quality white light generation / S. Nizamoglu, E Mutlugun., T. Özel, H.V. Demir, S. Sapra, N. Gaponik [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92, no. 11. P. 113110-1–113110-3. <https://doi.org/10.1063/1.2898892>.
14. High-performance white light-emitting diodes over 150 lm/W using near-unity-emitting quantum dots in a liquid matrix / A. Onal, G.O. Eren, S. Sadeghi, R. Melikov, M. Han, O. Karatum [et al.] // *ACS Photonics*. 2022. Vol. 9, no. 4. P. 1304–1314. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscphotonics.1c01805>.
15. Song W.S., Yang H. Efficient white-light-emitting diodes fabricated from highly fluorescent copper indium sulfide core/shell quantum dots // *Chemistry of Materials*. 2012. Vol. 24, no. 10. P. 1961–1967. <https://doi.org/10.1021/cm300837z>.

16. Quantum dot enabled efficient white LEDs for wide color gamut displays / A. Onal, G.O. Eren, R. Melikov, L. Kaya, S. Nizamoglu // *Advanced Materials Technologies*. 2023. Vol. 8, no. 9. P. 2201799. <https://doi.org/10.1002/admt.202201799>.
17. Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots / X. Dai, Z. Zhang, Y. Jin, Y. Niu, H. Cao, X. Liang [et al.] // *Nature*. 2014. Vol. 515, no. 7525. P. 96–99. <https://doi.org/10.1038/nature13829>.
18. Jun S., Lee J., Jang E. Highly luminescent and photostable quantum dot–silica monolith and its application to light-emitting diodes // *Acs Nano*. 2013. Vol. 7, no. 2. P. 1472–1477.
19. Оглукова К.Д., Родионов В.В. Получение люминесцентных наночастиц с квантовыми точками // *Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства: сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции*. Курск: Университетская книга, 2023. С. 189–192.
20. Трепачев А.В., Родионов В.В., Аникин Д.П. Исследование спектральной характеристики фотоэлемента // *Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства: сборник научных статей Международной научно-практической конференции*. Курск: Университетская книга, 2021. С. 246–249.
21. A photometric investigation of ultra-efficient LEDs with high color rendering index and high luminous efficacy employing nanocrystal quantum dot luminophores / T. Erdem, S. Nizamoglu, X.W. Sun, H.V. Demir // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, no. 1. P. 340–347. <https://doi.org/10.1364/OE.18.000340>.
22. High-performance, solution-processed, and insulating-layer-free light-emitting diodes based on colloidal quantum dots / Z. Zhang, Y. Ye, C. Pu, Y. Deng, X. Dai, X. Chen [et al.] // *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30, no. 28. P. 1801387. <https://doi.org/10.1002/adma.201801387>.
23. Quantum-dot light-emitting diodes with Fermi-level pinning at the hole-injection/hole-transporting interfaces / M. Xu, D. Chen, J. Lin, X. Lu, Y. Deng, S. He [et al.] // *Nano Research*. 2022. Vol. 15, no. 8. P. 7453–7459. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4260-3>.
24. Efficient quantum-dot light-emitting diodes featuring the interfacial carrier relaxation and exciton recycling / Y. Tian, Z.Y. Qin, S.J. Zou, Y.Q. Li, Y. Wang, W. Wang [et al.] // *Materials Today Energy*. 2021. Vol. 20. P. 100649. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100649>.
25. Manna A., Ray N. Recent progress in photovoltaic and thermoelectric applications of coupled colloidal quantum dot solids: insights into charge transport fundamentals // *Nano Express*. 2024. Vol. 5. P. 012005.

References

1. Pimputkar S., Speck J.S., DenBaars S.P., Nakamura S. Prospects for LED lighting. *Nature photonics*. 2009;3(4):180-182. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.32>.
2. Kuzmenko A.P., Anikin D.P., Rodionov V.V. Influence of structural properties of phosphors on increasing the color rendering index of a white LED. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2021;11(3):93–108. (In Russ.)
3. Yang Z., Li X., Yang Y., Li X. The influence of different conditions on the luminescent properties of YAG:Ce phosphor formed by combustion. *Journal of Luminescence*. 2007;122:707-709. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.01.266>.
4. Novikov E.A., Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Emelianov V.M., Anikin D.P., Neruchev Yu.A. Influence of Ce³⁺ concentration and size of YAG crystalline particles on photoluminescence. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii =*

Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2024;14(1):59-75. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-59-75>.

5. George N.C., Denault K.A., Seshadri R. Phosphors for solid-state white lighting. *Annual Review of Materials Research.* 2013;43:481-501. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-073012-125702>.

6. Borovsky E. OSCONIQ S 3030 QD LEDs on quantum dots. *Sovremennaya svetotekhnika = Modern lighting engineering.* 2019;(5):14-15. (In Russ.)

7. García de Arquer F.P., Talapin D.V., Klimov V.I., Arakawa Y., Bayer M., Sargent E.H. Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges. *Science.* 2021;373(6555):eaaz8541. <https://doi.org/10.1126/science.aaz8541>.

8. Hofmann M., Rocheva V. New LED for outdoor lighting. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Semiconductor lighting technology.* 2021;(3):4-7. (In Russ.)

9. Wood V., Bulović V. Colloidal quantum dot light-emitting devices. *Nano reviews.* 2010;1(1):5202. <https://doi.org/10.3402/nano.v1i0.5202>.

10. Eren G.O., Sadeghi S., Bahmani Jalali H., Ritter M., Han M., Baylam I., et al. Cadmium-free and efficient type-II InP/ZnO/ZnS quantum dots and their application for LEDs. *ACS Applied Material s & Interfaces.* 2021;13(27):32022-32030. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c08118>.

11. Jang E., Jun S., Jang H., Lim J., Kim B., Kim Y. White-light-emitting diodes with quantum dot color converters for display backlights. *Advanced materials.* 2010;22(28):3076-3080. <https://doi.org/10.1002/adma.201000525>.

12. Kim N. H., Jeong J., Chae H. White light emission with quantum dots: a review. *Applied Science and Convergence Technology.* 2016;25(1):1-6. <https://doi.org/10.5757/ASCT.2016.25.1.1>.

13. Nizamoglu S., Mutlugun E., Özel T., Demir H.V., Sapra S., Gaponik N., et al. Dual-color emitting quantum-dot-quantum-well CdSe-ZnS heteronanocrystals hybridized on InGaN/ GaN light emitting diodes for high-quality white light generation. *Applied Physics Letters.* 2008;92(11):113110-1–113110-3. <https://doi.org/10.1063/1.2898892>.

14. Onal A., Eren G.O., Sadeghi S., Melikov R., Han M., Karatum O., et al. High-performance white light-emitting diodes over 150 lm/W using near-unity-emitting quantum dots in a liquid matrix. *ACS Photonics.* 2022;9(4):1304-1314. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsphotonics.1c01805>.

15. Song W.S., Yang H. Efficient white-light-emitting diodes fabricated from highly fluorescent copper indium sulfide core/shell quantum dots. *Chemistry of Materials.* 2012;24(10):1961-1967. <https://doi.org/10.1021/cm300837z>.

16. Onal A., Eren G.O., Melikov R., Kaya L., Nizamoglu S. Quantum dot enabled efficient white LEDs for wide color gamut displays. *Advanced Materials Technologies.* 2023;8(9):2201799. <https://doi.org/10.1002/admt.202201799>.

17. Dai X., Zhang Z., Jin Y., Niu Y., Cao H., Liang X., et al. Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots. *Nature.* 2014;515(7525):96-99. <https://doi.org/10.1038/nature13829>.

18. Jun S., Lee J., Jang E. Highly luminescent and photostable quantum dot–silica monolith and its application to light-emitting diodes. *Acs Nano.* 2013;7(2):1472-1477.

19. Oglukova K.D., Rodionov V.V. Production of luminescent nanoparticles with quantum dots. In: *Aktual'nye voprosy nauki, nanotekhnologii, proizvodstva: sbornik nauchnykh statei 3-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Current issues of science, nanotechnology, and manufacturing: collection of scientific articles of the 3rd International Scientific and Practical Conference.* Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. P. 189-192. (In Russ.)

20. Trepachev A.V., Rodionov V.V., Anikin D.P. Study of the spectral characteristics of a photocell. In: *Aktual'nye voprosy nauki, nanotekhnologii, proizvodstva: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Current issues of science, nanotechnology, and manufacturing: collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2021. P.246-249. (In Russ.)

21. Erdem T., Nizamoglu S., Sun X.W., Demir H.V. A photometric investigation of ultra-efficient LEDs with high color rendering index and high luminous efficacy employing nanocrystal quantum dot luminophores. *Optics Express*. 2010;18(1):340-347. <https://doi.org/10.1364/OE.18.000340>.

22. Zhang Z., Ye Y., Pu C., Deng Y., Dai X., Chen X., et al. High-performance, solution-processed, and insulating-layer-free light-emitting diodes based on colloidal quantum dots. *Advanced Materials*. 2018;30(28):1801387. <https://doi.org/10.1002/adma.201801387>.

23. Xu M., Chen D., Lin J., Lu X., Deng Y., He S., et al. Quantum-dot light-emitting diodes with Fermi-level pinning at the hole-injection/hole-transporting interfaces. *Nano Research*. 2022;15(8):7453-7459. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4260-3>.

24. Tian Y., Qin Z.Y., Zou S.J., Li Y.Q., Wang Y., Wang W., et al. Efficient quantum-dot light-emitting diodes featuring the interfacial carrier relaxation and exciton recycling. *Materials Today Energy*. 2021;20:100649. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100649>.

25. Manna A., Ray N. Recent progress in photovoltaic and thermoelectric applications of coupled colloidal quantum dot solids: insights into charge transport fundamentals. *Nano Express*. 2024;5:012005.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Aleksander P. Kuzmenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Родионов Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

Vladimir V. Rodionov, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

Колпаков Артем Игоревич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru, ORCID: 0009-0004-8571-8544

Artem Ig. Kolpakov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru, ORCID: 0009-0004-8571-8544

Белкин Дмитрий Сергеевич, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: dim.belkin2012@ya.ru,
ORCID: 0009-0005-4031-4957

Dmitry S. Belkin, Post-Graduate Student, South-
west State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: dim.belkin2012@ya.ru,
ORCID: 0009-0005-4031-4957

Есаулкова Елизавета Георгиевна, студент
кафедры нанотехнологий, микроэлектроники,
общей и прикладной физики, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Lipovyumed.iplesen.00@bk.ru,
ORCID: 0009-0003-7351-3771

Elizabeth G. Esaulkova, Student of the Depart-
ment of Nanotechnology, Microelectronics and
Engineering Physics, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: Lipovyumed.iplesen.00@bk.ru,
ORCID: 0009-0003-7351-3771

Сизов Александр Семёнович, доктор техни-
ческих наук, профессор кафедры информаци-
онных систем и технологий, Юго-Западный
государственный университет, г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: sizov@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8110-9929

Alexander S. Sizov, Doctor of Sciences (Engine-
ering), Professor of the Department Engineering
Program, Southwestern State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: sizov@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8110-9929

Аникин Дмитрий Петрович, генеральный
директор ООО «РУСИД», г. Армавир,
Российская Федерация,
e-mail: dmitriy.anikin@rusid.pro,
ORCID 0009-0003-4708-722X

Dmitry P. Anikin, General Manager of LLC
"RUSID", Armavir, Russian Federation,
e-mail: dmitriy.anikin@rusid.pro,
ORCID 0009-0003-4708-722X