

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576

УДК 538.958

Электр люминесценция новых координационных соединений ионов европия с β -дикетонами, уксусной и масляной кислотами

Анна Владимировна Осадченко¹✉, Сергей Александрович Амброзевич²,
Иван Александрович Захарчук³, Андрей Александрович Ващенко⁴,
Даниил Саузович Дайбаге⁵, Александр Вячеславович Рыжов⁶,
Дмитрий Николаевич Певцов⁷, Николай Валерьевич Певцов⁸,
Александр Сергеевич Селюков⁹

^{1,2,3,4,5,9} Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация

^{6,7,8} ООО «Химтех», Москва, 129626, Российская Федерация

⁷ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141701, Российская Федерация

⁷ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, 142432, Российская Федерация

¹ anna.vl.osadchenko@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

² s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

³ zakharchukia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

⁴ vashchenkoaa@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>

⁵ daibagya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

⁶ rigov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4244-8968>

⁷ pevtsov.dn@mipt.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3191-5591>

⁸ 3372@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8286-8782>

⁹ selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

Аннотация

Введение. Представлены результаты создания и исследования органических светоизлучающих светодиодов на основе координационных соединений ионами европия (Eu^{3+}) с β -дикетонами и уксусной и масляной кислотами. Актуальность работы обусловлена активным поиском новых материалов для создания оптоэлектронных устройств с высокими люминесцентными характеристиками. Одной из таких характеристик является высокая чистота цвета, которая достигается за счет использования материалов с узкополосной люминесценцией, например, соединений на основе ионов Eu^{3+} . **Метод.** Синтезированные комплексы на основе Eu^{3+} с 1,1,1-трифтор-4-фенил-2,4-бутандионом и уксусной $\text{Eu}(\text{Cl})(\text{Btfa})(\text{CH}_3\text{COO})$ (соединение 1), а также масляной $\text{Eu}(\text{Btfa})_2(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COO})$ (соединение 2) кислотами. Светодиоды синтезированных соединений изготовлены при помощи комбинированной методики, включающей методы центрифугирования и термического напыления в вакууме. Характеристики светодиодов измерены методами оптической спектроскопии. Для исследования оптических свойств комплексов порошкообразные образцы соединений 1 и 2 помещались между двух кварцевых подложек. Спектры фотолюминесценции регистрировались с помощью спектрометра СДЛ-1, светодиода, с длиной волны излучения 365 нм и фотоэлектронного умножителя, работающего в линейном режиме. Спектры электролюминесценции получены при помощи спектрометра Ocean Optics Maya 2000 PRO. **Основные результаты.** В спектре фотолюминесценции исследованных комплексов наблюдалась характерная для ионов Eu^{3+} линейчатая структура. В спектре электролюминесценции также присутствует излучение, характерное для ионов Eu^{3+} . Помимо него в коротковолновой области наблюдается дополнительная широкая полоса с максимумом излучения на длине волны 390 нм и с шириной на полувысоте 61 нм. Рабочее напряжение светодиода составило 10 В. Для исследованных светодиодов наблюдалось характерное «холодное» белое свечение. **Обсуждение.** В спектрах фото- и электролюминесценции для исследованных комплексов обнаружены следующие основные переходы: ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0$ (максимумы на длинах волн $\lambda_1 = \lambda_2 = 580$ нм для соединений 1 и 2), ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ (расщепленная полоса, с максимумами на длинах волн $\lambda_1 = 587$ нм, $\lambda_2 = 593$ нм,

$\lambda_3 = 600$ нм для соединения 1 и $\lambda_1 = 592$ нм, $\lambda_2 = 599$ нм для соединения 2), ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (расщепленная полоса, с максимумами на длинах волн $\lambda_1 = 614$ нм, $\lambda_2 = 619$ нм, $\lambda_3 = 623$ нм для соединения 1 и $\lambda_1 = 614$ нм, $\lambda_2 = 618$ нм, $\lambda_3 = 620$ нм для соединения 2), ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ (расщепленная полоса, с максимумами на длинах волн $\lambda_1 = 648$ нм, $\lambda_2 = 652$ нм, $\lambda_3 = 655$ нм для соединения 1 и $\lambda_1 = 652$ нм, $\lambda_2 = 655$ нм для соединения 2). Наблюдаемая в спектре электролюминесценции широкая полоса, возникает за счет вклада дырочного транспортного слоя и обусловлена сквозным протеканием носителей заряда через активный излучающий слой, что приводит к возникновению рекомбинации в PVK слое OLED. Анализ вольт-амперных характеристик изготовленных устройств показал, что для них характерны два основных режима проводимости: ограничение тока пространственным зарядом (0–7 В) и ограничение, обусловленное процессами захвата носителей заряда (7–23 В). Результаты данной работы могут быть использованы при производстве устройств промышленного освещения.

Ключевые слова

фотолуминесценция, электролюминесценция, OLED, европий, Eu^{3+} , β -дикетоны, координационные соединения, уксусная кислота, масляная кислота

Ссылка для цитирования: Осадченко А.В., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Ващенко А.А., Дайбаге Д.С., Рыжов А.В., Певцов Д.Н., Певцов Н.В., Селюков А.С. Электролюминесценция новых координационных соединений ионов европия с β -дикетонами, уксусной и масляной кислотами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 4. С. 570–576. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576

Electroluminescence of new coordination compounds of europium ions with β -diketones, acetic and butyric acids

Anna V. Osadchenko¹, Sergey A. Ambrozevich², Ivan A. Zakharchuk³,
 Andrey A. Vashchenko⁴, Daniil S. Daibagya⁵, Alexandr V. Ryzhov⁶, Dmitry N. Pevtsov⁷,
 Nikolai V. Pevtsov⁸, Alexandr S. Selyukov⁹

^{1,2,3,4,5,9} Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

^{6,7,8} Limited Liability Company “Khimtekh”, Moscow, 129626, Russian Federation

⁷ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701, Russian Federation

⁷ Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, 142432, Russian Federation

¹ anna.vl.osadchenko@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

² s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

³ zakharchukwork@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

⁴ vashchenkoaa@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>

⁵ daibagya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

⁶ rigov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4244-8968>

⁷ pevtsov.dn@mipt.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3191-5591>

⁸ 3372@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8286-8782>

⁹ selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

Abstract

In this work, organic light-emitting LEDs based on Eu^{3+} coordination compounds with β -diketones and acetic and butyric acids were created and studied. At the moment, an active search is underway for new materials to create optoelectronic devices with high luminescent characteristics. One of these characteristics is high color purity and it can be achieved through the use of materials with narrow-band luminescence, for example, compounds based on Eu^{3+} ions. Complexes based on Eu^{3+} with 1,1,1-trifluoro-4-phenyl-2,4-butanedione and acetic $\text{Eu}(\text{Cl})(\text{Btfa})(\text{CH}_3\text{COO})$ (compound 1), butyric $\text{Eu}(\text{Btfa})_2(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COO})$ (compound 2) acids were synthesized. The LEDs of the synthesized compounds were manufactured using a combined technique including the method of centrifugation and the method of thermal spraying in vacuum. The characteristics of the LEDs were measured by optical spectroscopy. To study the optical properties of the complexes, the powder was placed between two quartz substrates. Photoluminescence spectra were recorded using a SDL-1 spectrometer, an LED with a wavelength of 365 nm and a photoelectronic multiplier operating in linear mode. Electroluminescence spectra were obtained using the Ocean Optics Maya 2000 PRO spectrometer. A linear structure characteristic of Eu^{3+} ions was observed in the photoluminescence spectrum of the studied complexes. In the electroluminescence spectrum, radiation characteristic of Eu^{3+} ions is also observed, in addition to it, an additional wide band with a maximum at a wavelength of 390 nm and a half-height width of 61 nm is observed in the short-wavelength region. The operating voltage of the LED was 10 V. A characteristic “cold” white glow was observed for the studied LEDs. In the spectra of photos- and electroluminescence the following main transitions were found for the studied complexes: ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$ (maxima at wavelengths $\lambda_1 = \lambda_2 = 580$ nm for compounds 1 and 2), ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ (split band, with maxima at wavelengths $\lambda_1 = 587$ nm, $\lambda_2 = 593$ nm, $\lambda_3 = 600$ nm for the compound 1 and $\lambda_1 = 592$ nm, $\lambda_2 = 599$ nm for compound 2), ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (split band, with maxima at wavelengths $\lambda_1 = 614$ nm, $\lambda_2 = 619$ nm, $\lambda_3 = 623$ nm for compound 1 and $\lambda_1 = 614$ nm, $\lambda_2 = 618$ nm, $\lambda_3 = 620$ nm for junction 2), ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ (split band, with maxima at wavelengths $\lambda_1 = 648$ nm, $\lambda_2 = 652$ nm, $\lambda_3 = 655$ nm for junction 1 and $\lambda_1 = 652$ nm, $\lambda_2 = 655$ nm for compound 2). The wide band observed in the electroluminescence spectrum arises due to the contribution of the hole transport layer, due to the through flow of charge carriers through the active radiating layer, which leads to recombination in the PVK OLED layer. An analysis of the volt-ampere characteristics of the manufactured devices showed that they are characterized by two main conduction modes: the first corresponds to a limitation of the current by a spatial charge (0–7 V), the second

is a limitation due to the processes of capture of charge carriers (7–23 V). The results of this work can be used in the production of industrial lighting.

Keywords

photoluminescence, electroluminescence, OLED, Europium, Eu³⁺, β -diketones, coordination compounds, acetic acid, butyric acid

For citation: Ryzhov A.V., Pevtsov D.N., Pevtsov N.V., Selyukov A.S. Electroluminescence of new coordination compounds of europium ions with β -diketones, acetic and butyric acids. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 570–576 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576

Введение

Органические светоизлучающие диоды (Organic Light-Emitting Diode, OLED) являются неотъемлемой частью современных технологий и применяются в том числе для создания дисплеев, а также в осветительных системах [1–4]. Обусловлено это тем, что светодиоды позволяют создать устройства с широким углом обзора с низкой себестоимостью и высокой энергоэффективностью, также подобные устройства могут быть изготовлены на гибких подложках [5]. Тем не менее, разработка новых устройств с высоким индексом цветопередачи остается актуальной задачей и на сегодняшний день. Кроме того, повышение эффективности оптоэлектронных устройств тесно связано с улучшением люминесцентных характеристик люминофоров, лежащих в их основе. В этой связи комплексы лантаноидов (Ln³⁺) с органическими лигандами в последние десятилетия привлекают внимание широкого круга исследователей, поскольку они обладают узкополосной люминесценцией и длительными временами релаксации возбуждения [6, 7]. Однако для редкоземельных металлов и их соединений обычно наблюдаются малые значения молярного коэффициента экстинкции (от 1 до 10 л·моль⁻¹·см⁻¹). Несмотря на это, возможно частичное снятие запрета для $f-f$ переходов в ионах Ln³⁺ путем введения различных лигандов в их координационную сферу. Эти лиганды действуют как «антенны», способствующие эффективно поглощению ультрафиолетового излучения и улучшению эффективности люминесценции ионов Ln³⁺. Соединения на основе ионов европия (Eu³⁺) среди красных излучателей показали себя весьма успешно. Среди бесчисленного множества лигандов особое место занимают β -дикетоны, которые выделяются благодаря относительно простому методу синтеза и широкополосному поглощению [8]. Кроме того, узкие линии люминесценции Eu³⁺-содержащих соединений обеспечивают возможность создания источников света с более высоким качеством цветопередачи [9, 10]. Цель настоящей работы — исследовать излучательные и электрофизические характеристики OLED-устройств на основе комплексов Eu³⁺ с β -дикетонами и уксусной и масляной кислотами.

Техника эксперимента

В работе исследован потенциал применения двух гетеролигандных комплексов Eu³⁺ с 1,1,1-трифтор-4-фенил-2,4-бутандионом (Btfa) и уксусной Eu(Cl)(Btfa)(CH₃COO) (соединение 1), а также масляной Eu(Btfa)₂(CH₃(CH₂)₃COO) (соединение 2) кислотами

в качестве материала активного излучающего слоя OLED.

Соединения синтезированы следующим образом. В трехгорлую колбу объемом 2,0 л, снабженную мешалкой, капельной воронкой и обратным холодильником, загружалось расчетное количество 1,1,1-трифтор-4-фенил-2,4-бутандиона (Btfa) и 0,02 моль уксусной либо масляной кислоты для соединений 1 или 2 в 300 мл изопропилового спирта. Смесь нагревалась при перемешивании до полного растворения компонентов. В отдельном стакане приготавливался раствор 0,02 моль хлорида европия в 200 мл изопропилового спирта, который затем вводился в колбу при интенсивном перемешивании. Реакционную массу перемешивали при нагревании еще 1 ч и охлаждали до комнатной температуры. Затем по каплям добавляли требуемое количество (0,04 моль или 0,06 моль) раствора аммиака в 200 мл деионизированной воды до устойчивого значения pH реакционной системы равного 7–8 и тщательно перемешивали еще 4 ч. Полученная пульпа выдерживалась в течение 12 ч, а затем фильтровалась под вакуумом и промывалась на фильтре деионизированной водой до нейтральной реакции промывных вод. Отмытый осадок сушили в вентилируемом сушильном шкафу при 50 °С до постоянной массы.

Для измерения спектров фотолуминесценции (ФЛ) использовались порошкообразные образцы соединений 1 и 2, которые помещали между кварцевыми стеклами КУ-1, пропускающими свет в диапазоне длин волн от 200 нм.

В состав экспериментальной установки для измерения спектров ФЛ входил диод с длиной волны излучения 465 нм, дифракционный спектрометр СДЛ-1 с двумя дифракционными решетками с количеством штрихов 600 штрихов/мм и фотоумножитель ФЭУ-79, чувствительный в диапазоне длин волн 300–850 нм, работавший в линейном режиме. Спектры электрорлюминесценции (ЭЛ) были получены при помощи спектрометра Ocean Optics Maya 2000 Pro с рабочей областью длин волн 200–1100 нм.

По методике, описанной в работе [3], были созданы светодиоды со структурой ITO/PEDOT:PSS/PVK/соединение 1 или 2/TPBi/LiF/Al, где ITO — оксид индия-олова, PEDOT:PSS — поли(3,4-этилендиокситиофен) полистирол сульфат, PVK — Poly(N-vinylcarbazole), TPBi — 2,2',2''-(1,3,5-бензинитрил)-трис(1-фенил-1-Н-бензимидазол). Отличие методики от [3] в том, что в качестве слоя с дырочной проводимостью использован PVK, наносившийся с помощью центрифуги с отжигом при 220 °С в течение 30 мин. В качестве исследуемых образцов использованы комплексы Eu³⁺

с Вtfa и уксусной и масляной кислотами, которые наносили из раствора в ацетоне с концентрацией порядка 5 г/л методом центрифугирования.

Результаты и их обсуждение

Спектры ФЛ соединений ионов Eu^{3+} с β -дикетонами и уксусной и масляной кислотами (рис. 1, непрерывные кривые) имели линейчатую структуру. В данных спектрах наблюдаются характерные для ионов Eu^{3+} пики, соответствующие следующим: ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ (расщепленная полоса, с максимумами на длинах волн $\lambda_1 = 587$ нм, $\lambda_2 = 593$ нм, $\lambda_3 = 600$ нм для соединения 1 и $\lambda_1 = 592$ нм, $\lambda_2 = 599$ нм для соединения 2); ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ (расщепленная полоса, с максимумами на длинах волн $\lambda_1 = 614$ нм, $\lambda_2 = 619$ нм, $\lambda_3 = 623$ нм для соединения 1 и $\lambda_1 = 614$ нм, $\lambda_2 = 618$ нм, $\lambda_3 = 620$ нм для соединения 2); ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$ (расщепленная полоса, с максимумами на длинах волн $\lambda_1 = 648$ нм, $\lambda_2 = 652$ нм, $\lambda_3 = 655$ нм для соединения 1 и $\lambda_1 = 652$ нм, $\lambda_2 = 655$ нм для соединения 2). Подобная линейчатая структура проявляется и в спектрах излучения, изготовленных на основе исследованных соединений OLED, что свидетельствует о том, что данные соединения проявляют ЭЛ. Кроме того, в спектрах ЭЛ также наблюдается широкая полоса, имеющая мак-

симум в области длин волн 390 нм и ширину на полувысоте 61 нм, которая не свойственна ионам Eu^{3+} . Данная особенность спектра может быть связана с ЭЛ одного из транспортных слоев: TPVi (электронный) или PVK (дырочный). Выполненное сравнение полученных результатов с научными данными по ЭЛ устройств с использованием исследуемых веществ показал, что наблюдаемая дополнительная полоса в спектрах ЭЛ, изготовленных OLED обусловлена именно вкладом слоя PVK [11], поскольку TPVi излучает в более коротковолновой области спектра [12]. Возникновение ЭЛ одного из транспортных слоев объясняется частичным сквозным протеканием отрицательных носителей заряда сквозь активный излучающий слой, которое приводит к возникновению рекомбинации в слое PVK.

Для исследуемых комплексов на основе ионов Eu^{3+} с β -дикетонами и уксусной и масляной кислотами были оценены координаты цветности в рамках модели МКО 1931 [13]. Исходя из цветовой диаграммы (рис. 2), для исследованных комплексов наблюдается «холодное» белое свечение, что обусловлено синергизмом спектрального состава излучения PVK (синяя спектральная область) и Eu^{3+} (красная спектральная область). Помимо этого, были рассчитаны основные колориметрические параметры (таблица).

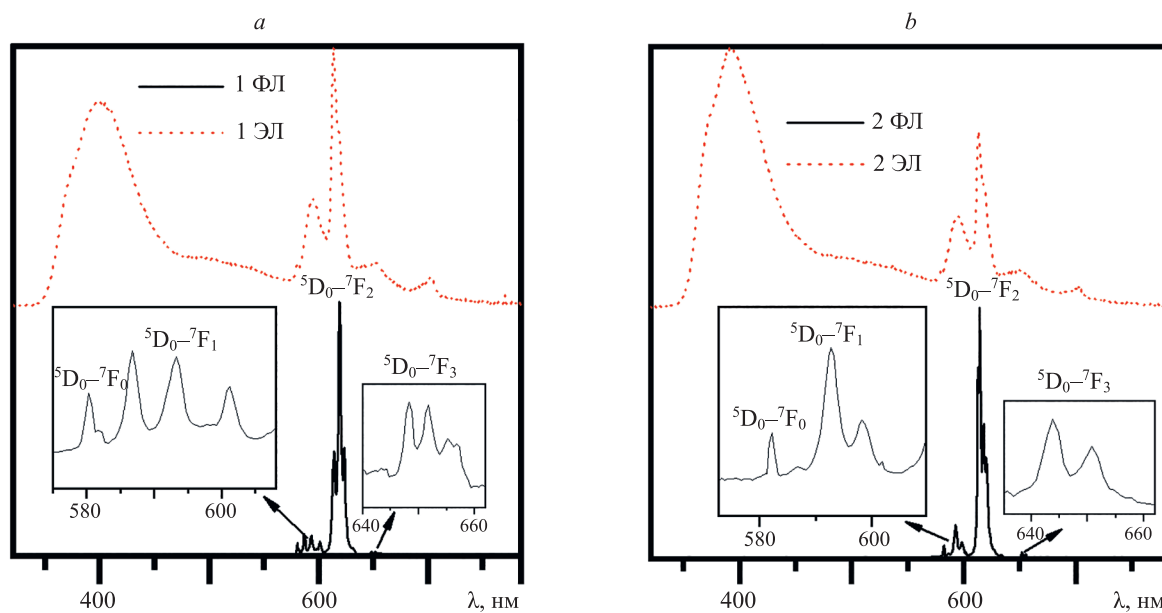


Рис. 1. Спектры фото (ФЛ)- и электролюминесценции (ЭЛ) для соединений 1 (a) и 2 (b)
 Fig. 1. Spectra of photoluminescence and electroluminescence of compounds 1 (a) and 2 (b)

Таблица. Основные параметры излучения исследованных светодиодов на основе комплексов Eu^{3+} с β -дикетонами и уксусной (соединение 1) и масляной (соединение 2) кислотами

Table. The main parameters of the studied LEDs based on Eu^{3+} with β -diketones and acetic (compound 1) and butyric (compound 2) acid

Соединение	Цветовые координаты (x, y)	Чистота света CP, %	Доминирующая длина волны λ^* , нм	Цветовая температура T_c , К
1	(0,32; 0,25)	64	619	4942
2	(0,34; 0,25)	66	620	5637

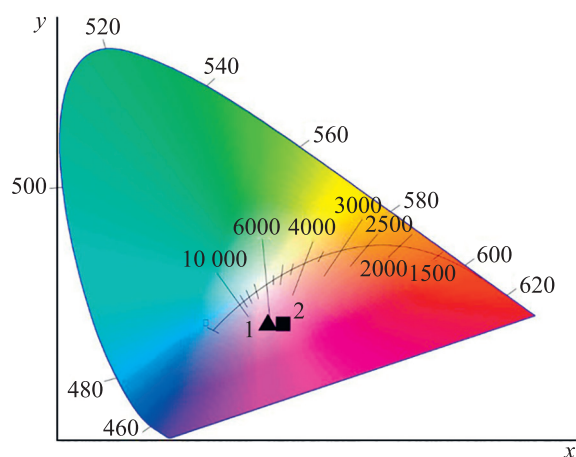


Рис. 2. Хроматическая диаграмма OLED на основе комплексов Eu^{3+} с β -дикетонами и уксусной (1) и масляной (2) кислотами в рамках модели МКО 1931

Fig. 2. OLED chromatic diagram based on Eu^{3+} complexes with β -diketones and acetic and butyric acids, CIE model 1931

Также были исследованы электрофизические характеристики устройств, изготовленных на основе соединений 1 и 2. Получены вольтамперные характеристики для светодиодов. Как известно, в вакуумной и сильноточной электронике описание проводимости часто сводится к модели пространственно-ограниченного заряда, при этом плотность тока зависит от напряжения как $J \propto V^2$ [14]. Подобная ситуация реализуется в настоящей работе при 0–7 В, т. е. проводимость ограничена пространственным зарядом. При напряжениях свыше 7 В (при 23 В получен пробой структуры) проводимость ограничивалась процессами захвата зарядов ловушками (кривая имела вид $J \propto V^n$) [15], что согласуется с другими результатами для OLED на основе металлоорганических соединений [16].

Литература

1. Вашченко А.А., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Селюков А.С., Васильев Р.Б., Соколик М.С. Органический светоизлучающий диод на основе плоского слоя полупроводниковых нанопластинок CdSe в качестве эмиттера // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 100. № 2. С. 94–98. <https://doi.org/10.7868/S0370274X14140045>
2. Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Вашченко А.А., Васильев Р.Б., Соколик М.С. Электролюминесценция коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. Т. 147. № 4. С. 687–701.
3. Осадченко А.В., Вашченко А.А., Захарчук И.А., Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Володин Н.Ю., Чепцов Д.А., Долотов С.М., Травень В.Ф., Авраменко А.И., Семенова С.Л., Селюков А.С. Органические светоизлучающие диоды с новыми красителями на основе кумарина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 6. С. 1112–1118. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118>
4. Kim J.-Y., Joo C.-W., Lee J., Woo J.-C., Oh J.-Y., Baek N.-S., Chu H.-Y., Lee J.-I. Save energy on OLED lighting by a simple yet powerful technique // RSC Advances. 2015. V. 5. N 11. P. 8415–8421. <https://doi.org/10.1039/C4RA10434J>
5. Pode R. Organic light emitting diode devices: An energy efficient solid state lighting for applications // Renewable and Sustainable

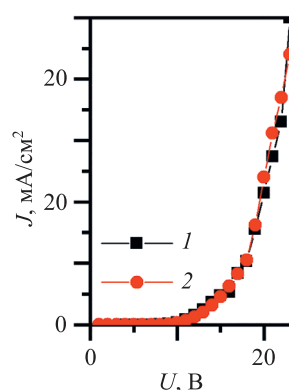


Рис. 3. Вольтамперные характеристики OLED на основе комплексов Eu^{3+} с β -дикетонами и уксусной (1) и масляной (2) кислотами

Fig. 3. Current-voltage characteristic OLED based on Eu^{3+} complexes with β -diketones and acetic (1) and butyric (2) acids

Заключение

В работе созданы и исследованы органические светоизлучающие диоды на основе новых координационных соединений ионов Eu^{3+} с β -дикетонами и уксусной и масляной кислотами. В спектрах их электролюминесценции наблюдалось как свечение комплексов ионов Eu^{3+} с характерным линейчатым видом спектра с основными переходами типа $5D_0 \rightarrow 7F_j$ (красная область спектра), так и свечение дырочного транспортного слоя PVK (синяя область спектра), обусловленное дисбалансом дырочного и электронного токов. Анализ колориметрических свойств показал, что подобный сложный спектральный состав излучения позволяет получить светодиоды с «холодным» белым свечением. Результаты работы могут быть использованы при изготовлении источников освещения с характерным белым свечением.

References

1. Vashchenko A.A., Vitukhnovskii A.G., Lebedev V.S., Selyukov A.S., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. Organic light-emitting diode with an emitter based on a planar layer of CdSe semiconductor nanoplatelets. *JETP Letters*, 2014, vol. 100, no. 2, pp. 86–90. <https://doi.org/10.1134/S0021364014140124>
2. Selyukov A.S., Vitukhnovskii A.G., Lebedev V.S., Vashchenko A.A., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. Electroluminescence of colloidal quasi-two-dimensional semiconducting CdSe nanostructures in a hybrid light-emitting diode. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2015, vol. 120, no. 4. pp. 595–606. <https://doi.org/10.1134/S1063776115040238>
3. Osadchenko A.V., Vashchenko A.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Ambrozovich S.A., Volodin N.Yu., Cheptsov D.A., Dolotov S.M., Traven V.F., Avramenko A.I., Semenova S.L., Selyukov A.S. Organic light-emitting diodes with new dyes based on coumarin. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1112–1118. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118>
4. Kim J.-Y., Joo C.-W., Lee J., Woo J.-C., Oh J.-Y., Baek N.-S., Chu H.-Y., Lee J.-I. Save energy on OLED lighting by a simple yet powerful technique. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 11, pp. 8415–8421. <https://doi.org/10.1039/C4RA10434J>
5. Pode R. Organic light emitting diode devices: An energy efficient solid state lighting for applications. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews. 2020. V. 133. P. 110043. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110043>
6. Kitagawa Y., Tsurui M., Hasegawa Y. Steric and electronic control of chiral Eu(III) complexes for effective circularly polarized luminescence // *ACS Omega*. 2020. V. 5. N 8. P. 3786–3791. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03613>
 7. Tanwar V., Singh S., Gupta I., Kumar P., Kumar H., Mari B., Singh D. Preparation and luminescence characterization of Eu(III)-activated Forsterite for optoelectronic applications // *Journal of Molecular Structure*. 2022. V. 1250. P. 131802. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131802>
 8. Varaksina E.A., Taydakov I.V., Ambrozevich S.A., Selyukov A.S., Lyssenko K.A., Jesus L.T., Freire R.O. Influence of fluorinated chain length on luminescent properties of Eu³⁺ β-diketonate complexes // *Journal of Luminescence*. 2018. V. 196. P. 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.12.006>
 9. Ilmi R., Zhang D., Dutra J.D.L., Dege N., Zhou L., Wong W.-Y., Raithby P.R., Khan M.S. A tris β-diketonate europium(III) complex based OLED fabricated by thermal evaporation method displaying efficient bright red emission // *Organic Electronics*. 2021. V. 96. P. 106216. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106216>
 10. Kozlov M.I., Kuznetsov K.M., Goloveshkin A.S., Burlakin A., Sandzhieva M., Makarov S.V., Ilina E., Utochnikova V.V. Solution-processed OLED based on a mixed-ligand europium complex // *Materials*. 2023. V. 16. N 3. P. 959. <https://doi.org/10.3390/ma16030959>
 11. Wang P., Chai C., Wang F., Chuai Y., Chen X., Fan X., Zou D., Zhou Q. Single layer light-emitting diodes from copolymers comprised of mesogen-jacketed polymer containing oxadiazole units and PVK // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. 2008. V. 46. N 5. P. 1843–1851. <https://doi.org/10.1002/pola.22529>
 12. Yin Y., Lü Z., Deng Z., Liu B., Mamytbekov Z.K., Hu B. White-light-emitting organic electroluminescent devices with poly-TPD as emitting layer // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2017. V. 28. N 24. P. 19148–19154. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7871-9>
 13. Дайбаге Д.С., Захарчук И.А., Осадченко А.В., Селоков А.С., Амброзевич С.А., Скориков М.Л., Васильев Р.Б. Люминесцентные и колориметрические свойства ультратонких наносвитков селенида кадмия // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2023. Т. 50 № 11. С. 83–91.
 14. Zhu Y.B., Geng K., Cheng Z.S., Yao R.H. Space-charge-limited current injection into free space and trap-filled solid // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021. V. 49. N 7. P. 2107–2112. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3084461>
 15. Pope M., Swenberg C.E. *Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers*. Oxford University Press, 1999. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195129632.001.0001>
 16. Liu J., Liang Q.-B., Wu H.-B. Synthesis, photophysics, electrochemistry, thermal stability and electroluminescent performances of a new europium complex with bis(β-diketone) ligand containing carbazole group // *Luminescence*. 2017. V. 32. N 3. P. 460–465. <https://doi.org/10.1002/bio.3206>
 6. Kitagawa Y., Tsurui M., Hasegawa Y. Steric and electronic control of chiral Eu(III) complexes for effective circularly polarized luminescence. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 8, pp. 3786–3791. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03613>
 7. Tanwar V., Singh S., Gupta I., Kumar P., Kumar H., Mari B., Singh D. Preparation and luminescence characterization of Eu(III)-activated Forsterite for optoelectronic applications. *Journal of Molecular Structure*, 2022, vol. 1250, pp. 131802. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131802>
 8. Varaksina E.A., Taydakov I.V., Ambrozevich S.A., Selyukov A.S., Lyssenko K.A., Jesus L.T., Freire R.O. Influence of fluorinated chain length on luminescent properties of Eu³⁺ β-diketonate complexes. *Journal of Luminescence*, 2018, vol. 196, pp. 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.12.006>
 9. Ilmi R., Zhang D., Dutra J.D.L., Dege N., Zhou L., Wong W.-Y., Raithby P.R., Khan M.S. A tris β-diketonate europium(III) complex based OLED fabricated by thermal evaporation method displaying efficient bright red emission. *Organic Electronics*, 2021, vol. 96, pp. 106216. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106216>
 10. Kozlov M.I., Kuznetsov K.M., Goloveshkin A.S., Burlakin A., Sandzhieva M., Makarov S.V., Ilina E., Utochnikova V.V. Solution-processed OLED based on a mixed-ligand europium complex. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 959. <https://doi.org/10.3390/ma16030959>
 11. Wang P., Chai C., Wang F., Chuai Y., Chen X., Fan X., Zou D., Zhou Q. Single layer light-emitting diodes from copolymers comprised of mesogen-jacketed polymer containing oxadiazole units and PVK. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2008, vol. 46, no. 5, pp. 1843–1851. <https://doi.org/10.1002/pola.22529>
 12. Yin Y., Lü Z., Deng Z., Liu B., Mamytbekov Z.K., Hu B. White-light-emitting organic electroluminescent devices with poly-TPD as emitting layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, no. 24, pp. 19148–19154. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7871-9>
 13. Daibagya D.S., Zakharchuk I.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., Ambrozevich S.A., Skorikov M.L., Vasiliev R.B. Luminescence and colorimetric properties of ultrathin cadmium selenide nanoscrolls. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, no. 11, pp. 510–514. <https://doi.org/10.3103/S1068335623110118>
 14. Zhu Y.B., Geng K., Cheng Z.S., Yao R.H. Space-charge-limited current injection into free space and trap-filled solid. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 7, pp. 2107–2112. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3084461>
 15. Pope M., Swenberg C.E. *Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers*. Oxford University Press, 1999. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195129632.001.0001>
 16. Liu J., Liang Q.-B., Wu H.-B. Synthesis, photophysics, electrochemistry, thermal stability and electroluminescent performances of a new europium complex with bis(β-diketone) ligand containing carbazole group. *Luminescence*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 460–465. <https://doi.org/10.1002/bio.3206>

Авторы

Осадченко Анна Владимировна — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, anna.vl.osadchenko@gmail.com

Амброзевич Сергей Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, s.ambrozevich@mail.ru

Захарчук Иван Александрович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukia@yandex.ru

Вашченко Андрей Александрович — кандидат физико-математических наук, заведующий отделом, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 35800121600](https://orcid.org/0000-0003-2084-5900), <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>, vashchenkoa@lebedev.ru

Authors

Anna V. Osadchenko — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, anna.vl.osadchenko@gmail.com

Sergey A. Ambrozevich — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, s.ambrozevich@mail.ru

Ivan A. Zakharchuk — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukia@yandex.ru

Andrey A. Vashchenko — PhD (Physics & Mathematics), Head of Department, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 35800121600](https://orcid.org/0000-0003-2084-5900), <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>, vashchenkoa@lebedev.ru

Дайбаге Даниил Саюзович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57673090900](https://orcid.org/0000-0003-1944-1546), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, daibagya@mail.ru

Рыжов Александр Вячеславович — заместитель директора по разработке новых продуктов, ООО «Химтех», Москва, 129626, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-4244-8968>, rigov@mail.ru

Певцов Дмитрий Николаевич — химик-технолог, ООО «Химтех», Москва, 129626, Российская Федерация; инженер-технолог, Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141701, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, 142432, Российская Федерация, [sc 57258474900](https://orcid.org/0000-0002-3191-5591), <https://orcid.org/0000-0002-3191-5591>, pevtsov.dn@mipt.ru

Певцов Николай Валерьевич — директор по разработке новых продуктов, ООО «Химтех», Москва, 129626, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-8286-8782>, 3372@bk.ru

Селоков Александр Сергеевич — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, selyukov@lebedev.ru

Daniil S. Daibagya — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57673090900](https://orcid.org/0000-0003-1944-1546), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, daibagya@mail.ru

Alexandr V. Ryzhov — Deputy Director for New Product Development, Limited Liability Company “Khimtekh”, Moscow, 129626, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-4244-8968>, rigov@mail.ru

Dmitry N. Pevtsov — Chemical Technologist, Limited Liability Company “Khimtekh”, Moscow, 129626, Russian Federation; Process Engineer, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701, Russian Federation; Junior Researcher, Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, 142432, Russian Federation, [sc 57258474900](https://orcid.org/0000-0002-3191-5591), <https://orcid.org/0000-0002-3191-5591>, pevtsov.dn@mipt.ru

Nikolai V. Pevtsov — Director for New Product Development, Limited Liability Company “Khimtekh”, Moscow, 129626, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-8286-8782>, 3372@bk.ru

Alexandr S. Selyukov — PhD (Physics & Mathematics), Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, selyukov@lebedev.ru

Статья поступила в редакцию 04.06.2024
Одобрена после рецензирования 19.06.2024
Принята к печати 24.07.2024

Received 04.06.2024
Approved after reviewing 19.06.2024
Accepted 24.07.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»