

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118

УДК 538.958

## Органические светоизлучающие диоды с новыми красителями на основе кумарина

Анна Владимировна Осадченко<sup>1</sup>✉, Андрей Александрович Ващенко<sup>2</sup>,  
Иван Александрович Захарчук<sup>3</sup>, Даниил Саюзович Дайбаге<sup>4</sup>,  
Сергей Александрович Амброзевич<sup>5</sup>, Никита Юрьевич Володин<sup>6</sup>,  
Дмитрий Андреевич Чепцов<sup>7</sup>, Сергей Михайлович Долотов<sup>8</sup>,  
Валерий Федорович Травень<sup>9</sup>, Антон Игоревич Авраменко<sup>10</sup>,  
Светлана Леонидовна Семенова<sup>11</sup>, Александр Сергеевич Селюков<sup>12</sup>

<sup>1,3,4,5,12</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005,  
Российская Федерация

<sup>1,4,12</sup> Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация

<sup>2,4,5</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация

<sup>6,7,8,9</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская  
Федерация

<sup>10,11</sup> Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва,  
125190, Российская Федерация

<sup>1</sup> [anna.vl.osadchenko@gmail.com](mailto:anna.vl.osadchenko@gmail.com)✉, <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

<sup>2</sup> [vashchenkoaa@lebedev.ru](mailto:vashchenkoaa@lebedev.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>

<sup>3</sup> [zakharchukia@yandex.ru](mailto:zakharchukia@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

<sup>4</sup> [daibagya@mail.ru](mailto:daibagya@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

<sup>5</sup> [s.ambrozevich@mail.ru](mailto:s.ambrozevich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

<sup>6</sup> [nikita9963@ya.ru](mailto:nikita9963@ya.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7801-9399>

<sup>7</sup> [dchepcov@yandex.ru](mailto:dchepcov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>

<sup>8</sup> [dolsm@mail.ru](mailto:dolsm@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0022-0535>

<sup>9</sup> [valerii.traven@gmail.com](mailto:valerii.traven@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>

<sup>10</sup> [anton1905@internet.ru](mailto:anton1905@internet.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>

<sup>11</sup> [s.l.semenova@internet.ru](mailto:s.l.semenova@internet.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6899-1347>

<sup>12</sup> [selyukov@lebedev.ru](mailto:selyukov@lebedev.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты исследования люминесцентных свойств органических светоизлучающих диодов на основе новых люминесцентных соединений, содержащих кумариновый фрагмент. **Метод.** Изготовление светоизлучающих диодов проведено методами центрифугирования и термического напыления в вакууме в условиях чистой комнаты. Измерение характеристик светодиодов выполнено методами оптической спектроскопии, а также электрическими методами. **Основные результаты.** Экспериментально показано, что формирование активного слоя светодиода на основе люминесцентных соединений, содержащих кумариновое ядро, приводит к образованию димеров, спектр люминесценции которых существенно отличается от спектра исходного соединения в растворе толуола. Преобразование структуры соединения привело к изменению вольтамперных характеристик результирующего устройства и спектров свечения. Данные измерения возникли из-за различий электронной структуры исследуемых соединений, а также разницы значений подвижностей носителей заряда и высот потенциальных барьеров, возникающих на гетерогранице с другими рабочими слоями светодиода. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут служить основой для систематизации знаний о зависимости свойств новых люминесцентных соединений, в состав которых входит кумариновое ядро, от их структуры. Структуры, разработанные в рамках работы, могут стать прототипами для промышленно выпускаемых светоизлучающих устройств, излучающих в том числе белый свет.

© Осадченко А.В., Ващенко 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. 2022

### Ключевые слова

кумариновые красители, органические светоизлучающие диоды, электролюминесценция, связь структура-свойства, вольтамперные характеристики

### Благодарности

Исследование проведено в рамках проекта РФФИ 20-02-00222 А.

**Ссылка для цитирования:** Осадченко А.В., Ващенко 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. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118

## Organic light-emitting diodes with new dyes based on coumarin

Anna V. Osadchenko<sup>1✉</sup>, Andrey A. Vashchenko<sup>2</sup>, Ivan A. Zakharchuk<sup>3</sup>, Daniil S. Daibagya<sup>4</sup>,  
Sergey A. Ambrozevich<sup>5</sup>, Nikita Yu. Volodin<sup>6</sup>, Dmitry A. Cheptsov<sup>7</sup>, Sergey M. Dolotov<sup>8</sup>,  
Valery F. Traven<sup>9</sup>, Anton I. Avramenko<sup>10</sup>, Svetlana L. Semenova<sup>11</sup>, Alexander S. Selyukov<sup>12</sup>

<sup>1,3,4,5,12</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

<sup>1,4,12</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

<sup>2,4,5</sup> Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>6,7,8,9</sup> Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation

<sup>10,11</sup> Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation

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

<sup>2</sup> vashchenkoa@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>

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

<sup>4</sup> daibagya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

<sup>5</sup> s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

<sup>6</sup> nikita9963@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7801-9399>

<sup>7</sup> dchepcov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>

<sup>8</sup> dolsm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0022-0535>

<sup>9</sup> valerii.traven@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>

<sup>10</sup> anton1905@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>

<sup>11</sup> s.l.semenova@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6899-1347>

<sup>12</sup> selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

### Abstract

The results of studying the luminescent properties of organic light-emitting diodes based on new luminescent compounds containing a coumarin fragment are presented. The light-emitting diodes were fabricated by spin-coating and thermal evaporation in an argon atmosphere in a clean room. Measurements of the LED characteristics were carried out by optical spectroscopy, as well as by electrical methods. It has been experimentally shown that deposition of an OLED active layer based on luminescent compounds containing a coumarin core can lead to the formation of dimers, the luminescence spectra of which differ significantly from the corresponding spectra of the original materials in toluene. A variation in the structure of the compound leads to a change in both the current-voltage characteristics of the resulting device and the luminescence spectra. These changes appeared due to the difference in the electronic structure of these materials as well as due to different values of charge carrier mobilities and the potential barriers at the heterointerface with other OLED layers. The results obtained may serve as the basis for systematizing knowledge about the dependence of the properties of new luminescent materials, which include a coumarin core, on their structure. The developed structures can become prototypes for industrially produced light-emitting devices that specifically emit white light.

### Keywords

coumarin dyes, organic light-emitting diodes, electroluminescence, structure-properties relationship, current-voltage characteristics

### Acknowledgements

The study was carried out within the RFBR project 20-02-00222 А.

**For citation:** Osadchenko A.V., Vashchenko A.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Ambrozevich 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). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118

### Введение

Одна из актуальных задач в последнее время — создание эффективных, стабильных и долговечных источников излучения для задач освещения и индикации. Одним из подходов к решению данной задачи

является изготовление органических светоизлучающих диодов на основе как органических [1, 2], так и неорганических [3–6] люминесцентных материалов. Использование подобных устройств позволяет добиться высоких значений яркости свечения с поверхности большой площади. Кроме того, дисплеи на основе ор-

ганических светодиодов обладают существенным преимуществом перед жидкокристаллическими панелями, поскольку они имеют максимально возможный угол обзора, а также широкий цветовой охват.

Тем не менее, к настоящему времени не решена проблема подбора надежных и в то же время дешевых материалов, обеспечивающих высокие показатели эффективности свечения. Используемые в промышленных образцах люминесцентные материалы, как правило, построены на основе металлоорганических комплексов [7, 8], в свой состав включающих металлы платиновой группы [9–11]. Эти соединения оказываются дорогими не только в силу стоимости исходных прекурсоров, но и из-за большой стоимости синтеза. В настоящей работе исследованы органические светоизлучающие диоды, изготовленные на основе новых люминесцентных материалов, содержащих кумариновый фрагмент. Эти материалы дешевы и могут быть исключительно перспективными благодаря процессам термостимулированной задержанной флуоресценции [12].

### Техника эксперимента

Для изготовления светодиодов в соответствии с методикой, представленной в работе [13], были синтезированы два новых соединения, содержащих кумариновое ядро. К кумариновому ядру в положение 3 были прикреплены массивные заместители на основе: антрацена ((E)-3-(3-(антрацен-9-ил)акрилоил)-2H-хромен-2-он (соединение А) и карбоксильной группы (этил 7-(диэтиламино)-2-оксо-2H-хромен-3-карбоксилат (соединение В) с добавлением в положение 7 диэтиламинной группы (рис. 1).

Спектры экстинкции получены для растворов исследованных соединений в толуоле с концентрацией  $2,5 \cdot 10^{-3}$  мг/мл с помощью спектрофотометра Perkin-ElmerLambda 45, чувствительного в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Измерения проведены в кварцевых кюветках с длиной оптического пути 10 мм и прозрачных — в диапазоне 200–2000 нм.

Измерения спектров люминесценции при электрическом или оптическом возбуждении выполнены с помощью волоконного мини-ПЗС-спектрометра OceanOpticsMaya 2000 Pro, с рабочим диапазоном длин волн 200–1100 нм. Для оптического возбуждения применялся лазер PicoQuantLDH-C 400, работающий в

импульсном режиме с длительностью импульса 75 пс, частотой следования импульсов 40 МГц, и излучающий на длине волны 405 нм. В качестве образцов использованы те же растворы, что и при измерении спектров экстинкции.

Изготовление органических светоизлучающих диодов произведено в условиях чистой комнаты, оборудованной перчаточными боксами с аргоновой атмосферой, содержащей не более 100 ppm кислорода и 300 ppm воды. В боксах проведены операции нанесения тонких пленок из жидкой фазы методом центрифугирования (spin-coating). Методом центрифугирования на диоды нанесены слои органического дырочного инжектирующего слоя PEDOT:PSS из водного раствора, дырочного транспортного слоя poly-TPD из раствора в хлорбензоле, а также исследованных люминесцентных соединений из раствора в толуоле. Нанесение электродов, а также электронного транспортного слоя TPVi осуществлено с помощью встроенной в аргоновый перчаточный бокс напылительной установки LeyboldUnivex 300, позволяющей нанести нескольких рабочих слоев различных материалов без нарушения вакуума. В качестве катода последовательно нанесены два слоя: LiF толщиной 1 нм и Al — 100 нм. В качестве анода использованы стеклянные подложки с предварительно нанесенным слоем оксида индия-олова (ITO) производства LumTec (Тайвань).

Измерение вольтамперных характеристик выполнено с помощью установки на основе вольтметра В7-78/1, амперметра Keithley 6485, а также линейного стабилизированного источника питания MotechPPS 2017, управляемого с помощью персонального компьютера.

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерения спектров экстинкции и флуоресценции соединений А и В представлены на рис. 2. У соединения А край поглощения наблюдается в области  $25\,000\text{ см}^{-1}$ , а в области  $28\,000\text{--}30\,000\text{ см}^{-1}$  видно плато с характерным значением коэффициента экстинкции порядка  $1,0 \cdot 10^4\text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . С увеличением волнового числа заметно существенное увеличение оптического поглощения. При этом максимум флуоресценции у соединения А расположен в области  $17\,700\text{ см}^{-1}$  и имеет ширину на полувысоте порядка  $3000\text{ см}^{-1}$ , он оказывается существенно сдвинутым по отношению к краю поглощения на  $7300\text{ см}^{-1}$ . Отметим,

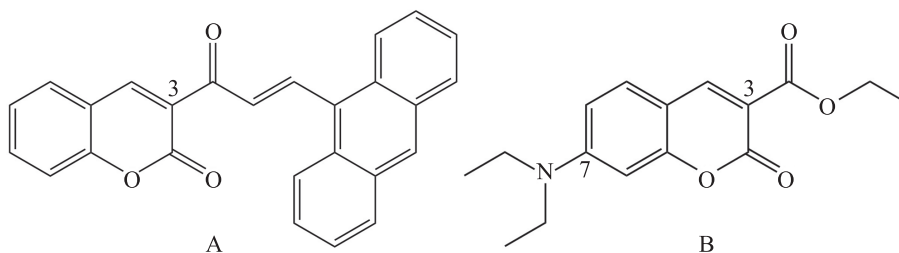


Рис. 1. Структурные формулы исследованных соединений: (E)-3-(3-(антрацен-9-ил)акрилоил)-2H-хромен-2-он (А); этил 7-(диэтиламино)-2-оксо-2H-хромен-3-карбоксилат (В)

Fig. 1. Structural formulas of the studied compounds: (E)-3-(3-(anthracen-9-yl)acryloyl)-2H-chromen-2-one (А), ethyl 7-(diethylamino)-2-oxo-2H-chromen-3-carboxylate (В)

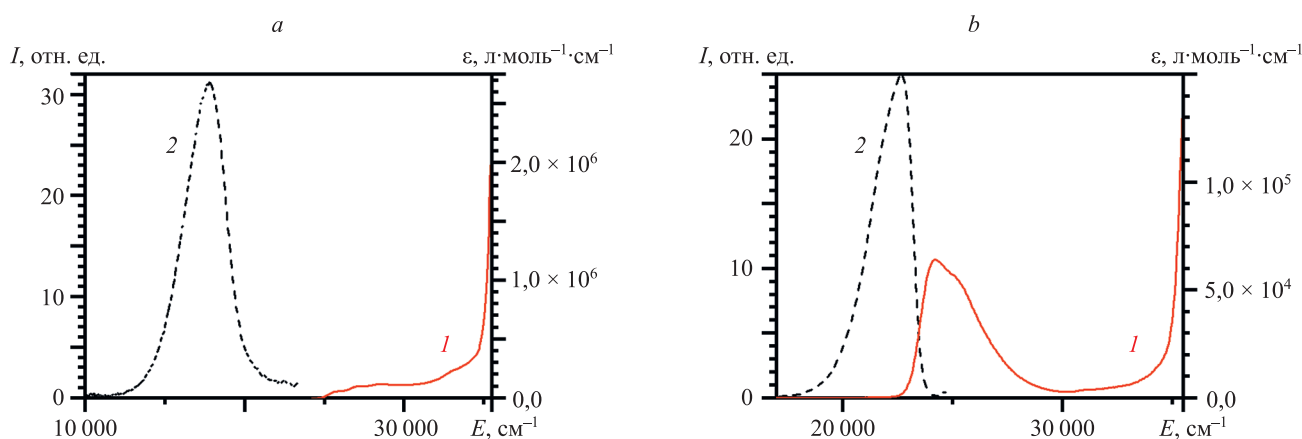


Рис. 2. Спектры экстинкции (кривая 1) и флуоресценции (кривая 2) для соединений А (а) и В (б). *I* — интенсивность, *E* — энергия,  $\epsilon$  — коэффициент экстинкции

Fig. 2. Extinction (curve 1) and fluorescence (curve 2) spectra for compounds A and B

что это может быть связано с изменением конформации сложной молекулы, содержащей кумариновый и антраценовый фрагменты, при поглощении кванта возбуждения [14].

У соединения В максимум поглощения наблюдается в области  $24\,300\text{ см}^{-1}$ , при этом его ширина на полувысоте составляет  $2900\text{ см}^{-1}$ . Полоса имеет сложную структуру и состоит как минимум из двух элементарных полос. Возникновение более высокоэнергетической полосы обусловлено, предположительно, образованием димеров в исследованном растворе [15]. Максимум флуоресценции расположен зеркально и находится в области  $22\,700\text{ см}^{-1}$ , а его ширина на полувысоте составляет  $2100\text{ см}^{-1}$ . Положение бесфонной линии находится в области  $23\,400\text{ см}^{-1}$ . Величина коэффициента экстинкции в максимуме поглощения составляет  $6,4 \cdot 10^4\text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . В области  $30\,000\text{ см}^{-1}$  коэффициент экстинкции падает до значений порядка  $2,7 \cdot 10^3\text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а затем, с ростом волнового числа, увеличивается.

Исследование электролюминесценции проведено на образцах светоизлучающих диодов, имеющих

следующую структуру: ИТО/PEDOT:PSS (50 нм)/poly-TPD (20 нм)/исследуемое соединение/TPBi (20 нм)/LiF (1 нм)/Al (100 нм). Спектры электролюминесценции изготовленных структур представлены на рис. 3, а.

В спектре электролюминесценции светодиода на основе соединения А, полученном при напряжении 6,5 В, наблюдается максимум в области  $17\,200\text{ см}^{-1}$ , что практически полностью соответствует положению максимума полосы флуоресценции соединения при оптическом возбуждении. Отметим, что видно небольшое увеличение ширины полосы на полувысоте, которая составила  $3200\text{ см}^{-1}$ . В области  $22\,000\text{--}28\,000\text{ см}^{-1}$  наблюдается слабое свечение, связанное с люминесценцией транспортного слоя TPBi, повторяющего спектр флуоресценции этого слоя [16].

В спектре электролюминесценции устройства, изготовленного на основе соединения В, при приложении напряжения 5 В наблюдаются два ярко выраженных максимума в областях  $21\,600$  и  $18\,300\text{ см}^{-1}$ . Первый максимум соответствует максимуму флуоресценции при оптическом возбуждении, наблюдавшемуся в области  $22\,700\text{ см}^{-1}$ , и сдвинут в низкоэнергетическую

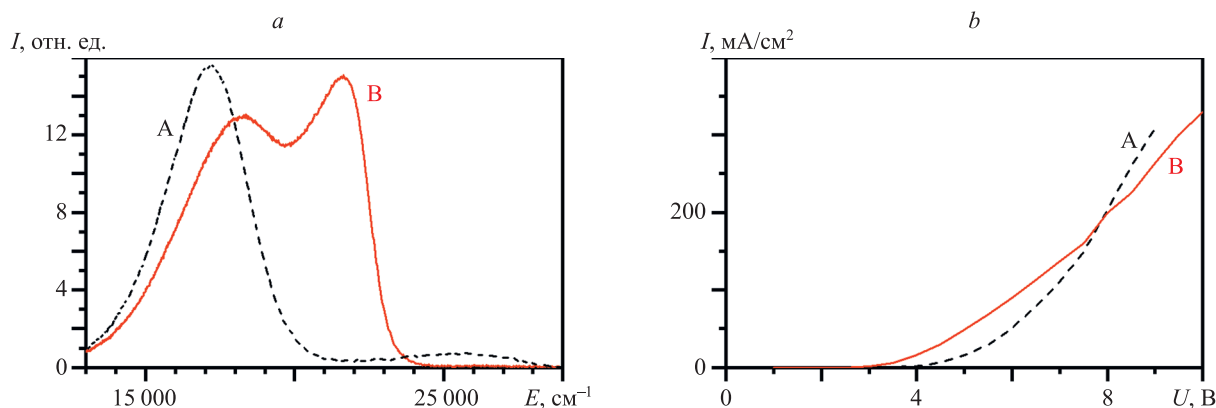


Рис. 3. Спектры электролюминесценции (а) и вольтамперные характеристики (б) светодиодных структур, изготовленных на основе соединений (А) и (В)

Fig. 3. Electroluminescence spectra (a) and current–voltage characteristics (b) of LED structures based on compounds (A) and (B)

область на  $1100 \text{ см}^{-1}$ . Второй максимум не наблюдался в спектре флуоресценции растворов и связан с образованием димеров [17] при изготовлении излучающего слоя светодиода.

Вольтамперные характеристики исследованных светодиодных структур представлены на рис. 3, *b*, и имеют характерный для органических светодиодов нелинейный вид. Видно, что напряжение включения светодиода, изготовленного на основе соединения А, равно примерно 3 В, а для соединения В — 4 В. Полученная разница предположительно связана с различием величин подвижностей носителей заряда в исследуемых соединениях [18]. Также разница может определяться различными высотами потенциальных барьеров [19], возникающих на границах с другими слоями светодиодов.

## Заключение

В работе изготовлены источники света нового поколения — органические светоизлучающие диоды на основе новых люминесцентных соединений, содержащих кумариновое ядро. Экспериментально показано, что в ряде случаев в активном слое светодиода могут формироваться димеры, которые существенным образом изменяют спектр электролюминесценции по сравнению с люминесценцией при оптическом возбуждении. Это может оказаться преимуществом, особенно в случае, когда необходимо создать источники белого свечения. Полученные результаты являются основой для установления связи между структурой и люминесцентными свойствами новых кумариновых соединений. Существенное отличие спектров электролюминесценции свидетельствует о важности изготовления светодиодных структур, поскольку процессы люминесценции в них могут существенным образом отличаться от тех, что наблюдаются при оптическом возбуждении.

## Литература

- Luo J., Rong X.F., Ye Y.Y., Li W.Z., Wang X.-Q., Wang W. Research progress on triarylmethyl radical-based high-efficiency OLED // *Molecules*. 2022. V. 27. N 5. P. 1632. <https://doi.org/10.3390/molecules27051632>
- Corrêa Santos D., Vieira Marques M.F. Blue light polymeric emitters for the development of OLED devices // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2022. V. 33. N 16. P. 12529–12565. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08333-3>
- Palomaki P. Quantum Dots + OLED = Your Next TV: Formerly rival technologies will come together in new Samsung displays // *IEEE Spectrum*. 2022. V. 59. N 1. P. 52–53. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2022.9676350>
- Lee S., Hahm D., Yoon S.Y., Yang H., Bae W.K., Kwak J. Quantum-dot and organic hybrid light-emitting diodes employing a blue common layer for simple fabrication of full-color displays // *Nano Research*. 2022. V. 15. N 7. P. 6477–6482. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4204-y>
- 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.
- 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.
- Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Rare earths: jewels for functional materials of the future // *New Journal of Chemistry*. 2011. V. 35. N 6. P. 1165–1176. <https://doi.org/10.1039/C0NJ00969E>
- Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Lanthanide luminescence for functional materials and bio-sciences // *Chemical Society Reviews*. 2010. V. 39. N 1. P. 189–227. <https://doi.org/10.1039/B905604C>
- Liang A., Ying L., Huang F. Recent progresses of iridium complex-containing macromolecules for solution-processed organic light-emitting diodes // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2014. V. 24. N 6. P. 905–926. <https://doi.org/10.1007/s10904-014-0099-8>
- Wei Q., Fei N., Islam A., Lei T., Hong L., Peng R., Fan X., Chen L., Gao P., Ge Z. Small-molecule emitters with high quantum efficiency: mechanisms, structures, and applications in OLED devices // *Advanced Optical Materials*. 2018. V. 6. N 20. P. 1800512. <https://doi.org/10.1002/adom.201800512>
- Jin J., Zhu Z., Yan J., Zhou X., Cao C., Chou P.-T., Zhang Y.-X., Zheng Z., Lee C.-S., Chi Y. Iridium (III) phosphors-bearing functional 9-phenyl-7, 9-dihydro-8h-purin-8-ylidene chelates and blue

## References

- Luo J., Rong X.F., Ye Y.Y., Li W.Z., Wang X.-Q., Wang W. Research progress on triarylmethyl radical-based high-efficiency OLED. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 1632. <https://doi.org/10.3390/molecules27051632>
- Corrêa Santos D., Vieira Marques M.F. Blue light polymeric emitters for the development of OLED devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, vol. 33, no. 16, pp. 12529–12565. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08333-3>
- Palomaki P. Quantum Dots + OLED = Your Next TV: Formerly rival technologies will come together in new Samsung displays. *IEEE Spectrum*, 2022, vol. 59, no. 1, pp. 52–53. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2022.9676350>
- Lee S., Hahm D., Yoon S.Y., Yang H., Bae W.K., Kwak J. Quantum-dot and organic hybrid light-emitting diodes employing a blue common layer for simple fabrication of full-color displays. *Nano Research*, 2022, vol. 15, no. 7, pp. 6477–6482. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4204-y>
- 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>
- 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>
- Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Rare earths: jewels for functional materials of the future. *New Journal of Chemistry*, 2011, vol. 35, no. 6, pp. 1165–1176. <https://doi.org/10.1039/C0NJ00969E>
- Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Lanthanide luminescence for functional materials and bio-sciences. *Chemical Society Reviews*, 2010, vol. 39, no. 1, pp. 189–227. <https://doi.org/10.1039/B905604C>
- Liang A., Ying L., Huang F. Recent progresses of iridium complex-containing macromolecules for solution-processed organic light-emitting diodes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2014, vol. 24, no. 6, pp. 905–926. <https://doi.org/10.1007/s10904-014-0099-8>
- Wei Q., Fei N., Islam A., Lei T., Hong L., Peng R., Fan X., Chen L., Gao P., Ge Z. Small-molecule emitters with high quantum efficiency: mechanisms, structures, and applications in OLED devices. *Advanced Optical Materials*, 2018, vol. 6, no. 20, pp. 1800512. <https://doi.org/10.1002/adom.201800512>
- Jin J., Zhu Z., Yan J., Zhou X., Cao C., Chou P.-T., Zhang Y.-X., Zheng Z., Lee C.-S., Chi Y. Iridium (III) phosphors-bearing functional 9-phenyl-7, 9-dihydro-8h-purin-8-ylidene chelates and blue

- hyperphosphorescent OLED devices // *Advanced Photonics Research*, 2022, V. 3, N 7. P. 2100381. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100381>
12. Chen J.X., Liu W., Zheng C.J., Wang K., Liang K., Shi Y.-Z., Ou X.-M., Zhang X.-H. Coumarin-based thermally activated delayed fluorescence emitters with high external quantum efficiency and low efficiency roll-off in the devices // *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, V. 9, N 10. P. 8848–8854. <https://doi.org/10.1021/acsaami.6b15816>
  13. Traven V.F., Cheptsov D.A. Sensory effects of fluorescent organic dyes // *Russian Chemical Reviews*, 2020, V. 89, N 7. P. 713. <https://doi.org/10.1070/RCR4909>
  14. Huang D., Chen Y., Zhao J. Access to a large stokes shift in functionalized fused coumarin derivatives by increasing the geometry relaxation upon photoexcitation: An experimental and theoretical study // *Dyes and Pigments*, 2012, V. 95, N 3. P. 732–742. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2012.04.024>
  15. Drexhage K.H. *Dye Lasers*. Springer-Verlag, 1973. 285 p.
  16. 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>
  17. Kotchpradist P., Prachumrak N., Sunonnam T., Tarsang R., Namuangruk S., Sudyoadsuk T., Keawin T., Jungstittiwong S., Promarak V. N-coumarin derivatives as hole-transporting emitters for high efficiency solution-processed pure green electroluminescent devices // *Dyes and Pigments*, 2015, V. 112. P. 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2014.06.032>
  18. Sahoo R.K., Atta S., Singh N.D., Jacob C. Influence of functional derivatives of an amino-coumarin/MWCNT composite organic hetero-junction on the photovoltaic characteristics // *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, V. 25. P. 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.001>
  19. Yadav R.A.K., Dubey D.K., Chen S.Z., Liang T.W., Jou J.-H. Role of molecular orbital energy levels in OLED performance // *Scientific Reports*, 2020, V. 10, N 1. P. 9915. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66946-2>
- hyperphosphorescent OLED devices. *Advanced Photonics Research*, 2022, vol. 3, no. 7, pp. 2100381. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100381>
12. Chen J.X., Liu W., Zheng C.J., Wang K., Liang K., Shi Y.-Z., Ou X.-M., Zhang X.-H. Coumarin-based thermally activated delayed fluorescence emitters with high external quantum efficiency and low efficiency roll-off in the devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, vol. 9, no. 10, pp. 8848–8854. <https://doi.org/10.1021/acsaami.6b15816>
  13. Traven V.F., Cheptsov D.A. Sensory effects of fluorescent organic dyes. *Russian Chemical Reviews*, 2020, vol. 89, no. 7, pp. 713. <https://doi.org/10.1070/RCR4909>
  14. Huang D., Chen Y., Zhao J. Access to a large stokes shift in functionalized fused coumarin derivatives by increasing the geometry relaxation upon photoexcitation: An experimental and theoretical study. *Dyes and Pigments*, 2012, vol. 95, no. 3, pp. 732–742. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2012.04.024>
  15. Drexhage K.H. *Dye Lasers*. Springer-Verlag, 1973, 285 p.
  16. 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>
  17. Kotchpradist P., Prachumrak N., Sunonnam T., Tarsang R., Namuangruk S., Sudyoadsuk T., Keawin T., Jungstittiwong S., Promarak V. N-coumarin derivatives as hole-transporting emitters for high efficiency solution-processed pure green electroluminescent devices. *Dyes and Pigments*, 2015, vol. 112, pp. 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2014.06.032>
  18. Sahoo R.K., Atta S., Singh N.D., Jacob C. Influence of functional derivatives of an amino-coumarin/MWCNT composite organic hetero-junction on the photovoltaic characteristics. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, vol. 25, pp. 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.001>
  19. Yadav R.A.K., Dubey D.K., Chen S.Z., Liang T.W., Jou J.-H. Role of molecular orbital energy levels in OLED performance. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 9915. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66946-2>

#### Авторы

**Осадченко Анна Владимировна** — студент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; ассистент, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, [anna.vl.osadchenko@gmail.com](mailto:anna.vl.osadchenko@gmail.com)

**Ващенко 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](mailto:vashchenkoa@lebedev.ru)

**Захарчук Иван Александрович** — студент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, [zakharchukia@yandex.ru](mailto:zakharchukia@yandex.ru)

**Дайбаге Даниил Саюзович** — студент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; ассистент, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация; 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](mailto:daibagya@mail.ru)

**Амброзевич Сергей Александрович** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, [s.ambrozevich@mail.ru](mailto:s.ambrozevich@mail.ru)

**Володин Никита Юрьевич** — студент, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, [sc 57672535600](https://orcid.org/0000-0002-7801-9399), <https://orcid.org/0000-0002-7801-9399>, [nikita9963@ya.ru](mailto:nikita9963@ya.ru)

**Чепцов Дмитрий Андреевич** — кандидат химических наук, старший преподаватель, Российский химико-технологический универ-

#### Authors

**Anna V. Osadchenko** — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Assistant, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, [anna.vl.osadchenko@gmail.com](mailto:anna.vl.osadchenko@gmail.com)

**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](mailto:vashchenkoa@lebedev.ru)

**Ivan A. Zakharchuk** — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, [zakharchukia@yandex.ru](mailto:zakharchukia@yandex.ru)

**Daniil S. Daibagya** — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Assistant, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation; 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](mailto:daibagya@mail.ru)

**Sergey A. Ambrozevich** — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, [s.ambrozevich@mail.ru](mailto:s.ambrozevich@mail.ru)

**Nikita Yu. Volodin** — Student, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation, [sc 57672535600](https://orcid.org/0000-0002-7801-9399), <https://orcid.org/0000-0002-7801-9399>, [nikita9963@ya.ru](mailto:nikita9963@ya.ru)

**Dmitry A. Cheptsov** — PhD (Chemistry), Senior Lecturer, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian

ситет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, [sc 56711985600](https://orcid.org/0000-0002-9774-7922), <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>, [dchepcov@yandex.ru](mailto:dchepcov@yandex.ru)

**Долотов Сергей Михайлович** — кандидат химических наук, учебный мастер, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, [sc 6602502141](https://orcid.org/0000-0002-0022-0535), <https://orcid.org/0000-0002-0022-0535>, [dolsm@mail.ru](mailto:dolsm@mail.ru)

**Травень Валерий Федорович** — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, [sc 57208522812](https://orcid.org/0000-0002-2204-7438), <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>, [valerii.traven@gmail.com](mailto:valerii.traven@gmail.com)

**Авраменко Антон Игоревич** — научный редактор, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, 125190, Российская Федерация, [sc 57208522812](https://orcid.org/0000-0002-0374-6428), <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>, [anton1905@internet.ru](mailto:anton1905@internet.ru)

**Семенова Светлана Леонидовна** — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, 125190, Российская Федерация, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0001-6899-1347), <https://orcid.org/0000-0001-6899-1347>, [s.l.semenova@internet.ru](mailto:s.l.semenova@internet.ru)

**Селюков Александр Сергеевич** — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; старший преподаватель, Московский политехнический университет, Москва, 107023, Российская Федерация, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, [selyukov@lebedev.ru](mailto:selyukov@lebedev.ru)

Federation, [sc 56711985600](https://orcid.org/0000-0002-9774-7922), <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>, [dchepcov@yandex.ru](mailto:dchepcov@yandex.ru)

**Sergey M. Dolotov** — PhD (Chemistry), Training Master, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation, [sc 6602502141](https://orcid.org/0000-0002-0022-0535), <https://orcid.org/0000-0002-0022-0535>, [dolsm@mail.ru](mailto:dolsm@mail.ru)

**Valery F. Traven** — D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation, [sc 57208522812](https://orcid.org/0000-0002-2204-7438), <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>, [valerii.traven@gmail.com](mailto:valerii.traven@gmail.com)

**Anton I. Avramenko** — Scientific Editor, Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation, [sc 57208522812](https://orcid.org/0000-0002-0374-6428), <https://orcid.org/0000-0002-0374-6428>, [anton1905@internet.ru](mailto:anton1905@internet.ru)

**Svetlana L. Semenova** — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0001-6899-1347), <https://orcid.org/0000-0001-6899-1347>, [s.l.semenova@internet.ru](mailto:s.l.semenova@internet.ru)

**Alexander S. Selyukov** — PhD (Physics & Mathematics), Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Senior Lecturer, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, [selyukov@lebedev.ru](mailto:selyukov@lebedev.ru)

*Статья поступила в редакцию 18.08.2022*

*Одобрена после рецензирования 12.10.2022*

*Принята к печати 30.11.2022*

*Received 18.08.2022*

*Approved after reviewing 12.10.2022*

*Accepted 30.11.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»