

УДК 544.016.2, 535.012

М. Е. Карякин¹, А. С. Крупин¹, А. А. Князев¹, Ю. Г. Галяметдинов^{1,2}

**НЕМАТИЧЕСКИЕ СМЕСИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИ(9,9-ДИ-*n*-ОКТИЛФЛУОРЕНИЛ-2,7-ДИИЛА)
И ЛАНТАНИДОМЕЗОГЕНА**

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. К. Маркса, д. 68, 420015 Казань, Россия. E-mail: karyakin-maksim@list.ru

²Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН,
Сибирский тракт, д.10/7, 420029 Казань, Россия

Получены жидкокристаллические смеси на основе комплекса трис[1-(4-транс-(4-пропилциклогексил)фенил)-октан-1,3-дионо]-[5,5'-дигептадецил-2,2'-бипиридин]европия (**Eu(CPDk_{3.5})₃Vpy₁₇₋₁₇**) и проводящего поли(9,9-ди-*n*-октилфлуоренил-2,7-диил) полимера (PFO). Установлено, что полученные смеси относятся к изоморфным системам типа I Розебома с непрерывным твердым раствором и проявляют нематический мезоморфизм при любом соотношении компонентов. При охлаждении до комнатных температур ЖК-смеси стекловались с сохранением упаковки заданной в мезофазе. С помощью ориентирующих подложек был создан планарно-ориентированный пленочный материал на основе ЖК-смеси, содержащей 10 мол. % PFO и 90 мол. % комплекса **Eu(CPDk_{3.5})₃Vpy₁₇₋₁₇**. Дихроичное соотношение фотолюминесценции *R* (отношение интенсивностей люминесценции при 0° и 90°) полученного материала составляет 5,4 на длине волны 438 нм и 3,2 на длине волны 613 нм. Установлено, что полученные пленочные материалы способны изменять цвет люминесценции от светло-красного до темно-синего в зависимости от длины волны УФ-облучения или при изменении угла между плоскостью поляризатора и направлением ориентации молекул. Таким образом, показана возможность получения ориентированных пленок лантаноидсодержащих ЖК-смесей с управляемой поляризацией и цветом люминесценции.

Ключевые слова: жидкокристаллические смеси, нематики, комплекс европия(III), полимер, поляризованная люминесценция.

DOI: 10.18083/LCAppl.2021.3.32

М. Е. Karyakin¹, А. S. Krupin¹, А. А. Knyazev¹, Yu. G. Galyametdinov^{1,2}

**NEMATIC MIXTURES WITH CONTROLLED POLARIZED LUMINESCENCE BASED
ON (9,9-DI-*n*-OCTYLFLUORENYL-2,7-DIYL) POLYMER AND LANTHANIDOMESOGEN**

¹Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx St., Kazan, 420015, Russia

²Kazan E. K. Zavoisky Physical Technical Institute, 10/7 Sibirsky Tract, Kazan, 420029, Russia
E-mail: karyakin-maksim @list.ru

Liquid crystal mixtures based on the tris [1-(4-trans-(4-propylcyclohexyl)phenyl)-octane-1,3-diono]-[5,5'-dihexadecyl-2,2'-bipyridine]europium complex (**Eu(CPDk_{3.5})₃Vpy₁₇₋₁₇**) and the conducting poly(9,9-di-*n*-octylfluorenyl-2,7-diyl) polymer (PFO) were obtained. It was found that the resulting mixtures with a continuous solid solution belong to isomorphic systems of the Roseboom type I and exhibit nematic mesomorphism at any ratio of components. Upon cooling to room temperature, the LC mixtures were vitrified with the preservation of the mesophase packing. Using the orienting substrates, a planar-oriented film material based on an LC mixture containing 10 mol. % of PFO and 90 mol. % of the **Eu(CPDk_{3.5})₃Vpy₁₇₋₁₇** complex was created. The dichroic ratio of photoluminescence *R* (it is the ratio of the luminescence intensities at 0° and 90°) of the obtained material is 5.4 at a

wavelength of 438 nm and 3.2 at a wavelength of 613 nm. It was found that the obtained film materials are capable of changing the luminescence color from light red to dark blue, depending on the UV irradiation wavelength or upon changing the angle between the polarizer plane and the molecular orientation direction. Thus, the possibility of obtaining oriented films of lanthanide-containing liquid-crystal mixtures with controlled polarization and luminescence color has been shown.

Key words: liquid crystal mixture, nematic, europium(III) complex, polymer, polarized luminescence.

Введение

Последнее десятилетие большое количество научных работ и практических изысканий направлено на получение и исследование новых люминесцентных материалов, перспективных для применения в различных оптоэлектронных устройствах отображения информации, фотонных сред, световых панелей и т.д. [1, 2]. В настоящее время большое внимание уделяется люминесцентным материалам обладающим поляризованным излучением в связи с развитием дисплейных технологий, 3D-графики и устройств молекулярной электроники. Одними из наиболее перспективных соединений являются полупроводниковые полимеры благодаря термической и химической стабильности, хорошим технологическим свойствам, простоте получения тонких однородных пленок. При этом, многочисленные исследования показали, что полимерные органические материалы обладают широкими эмиссионными спектрами, в связи с чем довольно сложно добиться точной цветопередачи. Решением данной проблемы является использование их композитов с редкоземельными соединениями, обладающими монохроматической люминесценцией [3–5]. Одним из способов получения материалов такого рода является включение ионов лантаноидов в полимерную матрицу: полиэтилен, азополимеры, полифлуорены (PFs) и т.д. [6, 7]. В этом аспекте полифлуорены представляют собой особенно привлекательное семейство органических полупроводниковых материалов, обладающих жидкокристаллическими свойствами, высокой эффективностью люминесценции и высокими значениями коэффициента поляризации (> 53) [8]. Однако, несмотря на большое число работ по созданию и исследованию оптических свойств материалов на основе полифлуоренов, содержащих лантаноиды, имеется ряд ограничений, затрудняющих их использование, а именно: высокая температура перехода в жидкокристаллическое состояние, окисление и разложение полимера [9]. При этом допирование полимерной матрицы возможно только небольшими коли-

чествами редкоземельных комплексных соединений, что связано с их кристаллизацией в пленке композита [10, 11].

Альтернативным способом получения композитных материалов с высокой термо- и фотостабильностью является использование жидкокристаллических комплексов лантаноидов (III) – лантанидомезогенов [12]. Наличие очень редкой для лантанидомезогенов нематической фазы позволяет получать композитные материалы со сниженной температурой перехода в ЖК-состояние практически при любых соотношениях компонентов. Более того, анизометричная форма молекул лантанидомезогенов и наличие ЖК-свойств, позволяют получать композитные материалы с более равномерным и упорядоченным распределением компонентов, в которых практически отсутствуют кристаллические дефекты, и как следствие, происходит увеличение эффективности люминесценции [13]. Это расширяет возможности изменения структуры и свойств композитов с полимерами и позволяет получать среды с монохромной поляризованной люминесценцией высокой эффективности.

Эксперимент

Полимер *поли(9,9-ди-*n*-октилфлуоренил-2,7-диил)* (PFO) с молекулярной массой $M_w \geq 20\,000$, *Нейлон 6*, *Европия(III) хлорид гексагидрат* были приобретены у компании *Sigma Aldrich*. Жидкокристаллические свойства были изучены методом поляризационной оптической микроскопии. Температуры фазовых переходов определяли на поляризационном оптическом микроскопе *Olympus-BX51* с нагревательной системой *Linkam* и дифференциальном сканирующем калориметре *DSC 1 Star system* фирмы *Mettler Toledo* в режиме нагревания и охлаждения со скоростью сканирования $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Спектры возбуждения и поляризованной люминесценции были сняты на спектрофлуориметре *Cary Eclipse Varian* с использованием поляризационных фильтров.

СНН элементный микроанализ проводили с помощью *CE Instruments EA-1110*. Рентгенофлуоресцентный микроанализ проводили с помощью микро-РФ спектрометра *Bruker M4 Tornado*.

Синтез трис[1-(4-транс-(4-пропилциклогексил)фенил)-октан-1,3-дионо]-[5,5'-дигептадецил-2,2'-бипиридин]европия

Синтез комплекса проводили по методике, описанной ранее в литературе [14–17]. 3 ммоль β-дикетона (*1-(4-транс-(4-пропилциклогексил)фенил)-октан-1,3-дион*), 1 ммоль основания Льюиса (*5,5'-дигептадецил-2,2'-бипиридин*) и 3 ммоль *КОН* растворяли в 15 мл спирта при температуре 60 °С. К полученному раствору, при постоянном перемешивании, медленно прибавляли 2 мл горячего спиртового раствора, содержащего 1 ммоль $\text{EuCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$. Образовавшийся светло-желтый осадок выделяли горячим фильтрованием, промывали спиртом и сушили при температуре 50 °С в вакуумном шкафу в течении суток. Выход: 0,105 г (70 %), $T_{\text{пл.}}$ 147 °С. $\text{C}_{113}\text{H}_{175}\text{EuN}_2\text{O}_6$. Вычислено, %: С 75,00; Н 9,75; N 1,55; Eu 8,40. Найдено, %: С 74,67; Н 10,02; N 1,52; Eu 8,50.

Получение ориентированных пленок композита PFO–комплекс Eu(III)

Тонкие ориентированные пленки композита были получены путем напыления при вращении

раствора, содержащего 90 мас. % комплекса Eu(III) и 10 мас. % полимера PFO в толуоле, на вращающуюся кварцевую подложку с определенным рельефом поверхности, спонтанно формирующим планарную гомогенную ориентацию жидкого кристалла. Рельеф поверхности получали путем натирания кварцевой подложки, покрытой слоем полимера «Нейлон б» по известной методике [18, 19]. После этого, пленки отжигали в течении 15 минут при температуре 115 °С и давлении 20 мбар для удаления растворителя и последующего выравнивания полимерных цепей в нематической ЖК-мезофазе.

Результаты и их обсуждение

На основе проводящего полимера *поли(9,9-ди-н-октилфлуоренил-2,7-диил)* (PFO) (рис. 1, б) и *трис[1-(4-транс-(4-пропилциклогексил)фенил)-октан-1,3-дионо]-[5,5'-дигептадецил-2,2'-бипиридин]европия* $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3-5})_3\text{Vpy}_{17-17}$ (рис. 1, а) были получены лантаноидсодержащие ЖК-смеси с широким интервалом существования нематической мезофазы и низкой температурой кристаллизации.

Комплекс $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3-5})_3\text{Vpy}_{17-17}$ являлся полиморфным и проявлял смектический и нематический мезоморфизм.

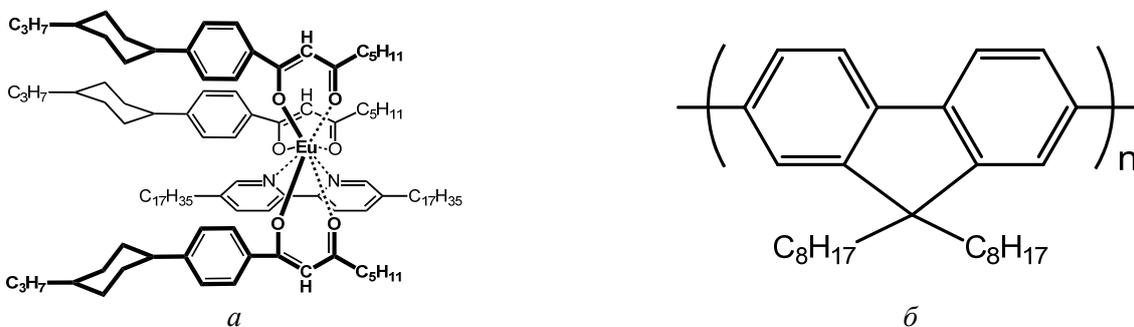


Рис. 1. Структура комплекса $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3-5})_3\text{Vpy}_{17-17}$ (а) и полимера PFO (б)

Fig. 1. Structure of $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3-5})_3\text{Vpy}_{17-17}$ (а) complex and PFO polymer (б)

Структура лантанидомезогена подбиралась таким образом, чтобы обеспечить достаточно близкие температуры существования нематической фазы компонентов. Фазовая диаграмма полученных смесей представлена на рис. 2. Температурный интервал существования нематической фазы комплекса $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3-5})_3\text{Vpy}_{17-17}$ и полимера

PFO составлял 103–139 °С и 170–270 °С, соответственно. Полученные смеси проявляли нематический мезоморфизм при любом соотношении компонентов. Однако, при содержании комплекса Eu(III) более 75 мол. %, помимо нематической фазы, в смеси начинал проявляться смектический А мезоморфизм.

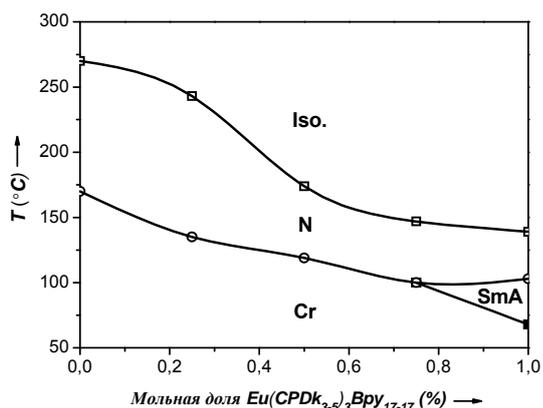


Рис. 2. Фазовая диаграмма смеси полимер PFO – лантанидомезоген $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3.5})_3\text{Bpy}_{17-17}$

Fig. 2. Phase diagram of the PFO polymer – lanthanidomesogen $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3.5})_3\text{Bpy}_{17-17}$ mixture

По виду диаграммы можно предположить, что смеси относятся к изоморфным системам типа I Розебома с непрерывным твердым раствором [20]. Стоит отметить, что при охлаждении до комнатных температур ЖК-смеси стекловались с сохранением упаковки заданной в мезофазе. Поэтому на следующем этапе были получены тонкие планарно-ориентированные пленки на основе ЖК-смеси, содержащей 10 мол. % PFO и 90 мол. % комплекса $\text{Eu}(\text{CPDk}_{3.5})_3\text{Bpy}_{17-17}$. Выбор этой смеси был обусловлен низкой температурой существования нематической фазы и схожими значениями интенсивности люминесценции полимера PFO и комплекса европия(III).

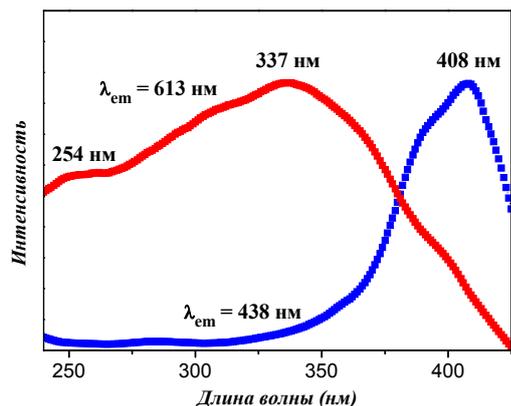


Рис. 3. Спектры возбуждения ориентированной пленки композита $\text{Eu}(\text{III})$ – PFO при $\lambda_{\text{em}} = 438$ нм и $\lambda_{\text{em}} = 613$ нм

Fig. 3. Excitation spectra of the oriented film of the $\text{Eu}(\text{III})$ – PFO composite at $\lambda_{\text{em}} = 438$ nm и $\lambda_{\text{em}} = 613$ nm

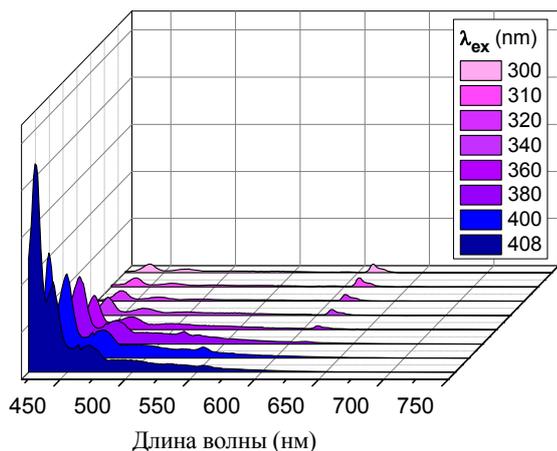
При изучении люминесцентных свойств полученных пленочных материалов было установлено, что в спектрах возбуждения отчетливо наблюдаются две широкие полосы с тремя максимумами при 254 нм, 337 нм и 408 нм (рис. 3), которые относятся к поглощению основания Льюиса (bpy_{17-17}), β -дикетона ($\text{CPDk}_{3.5}$) и полимера PFO, соответственно. Наличие разнесенных максимумов возбуждения позволило селективно сенсibilизировать люминесценцию иона $\text{Eu}(\text{III})$ и полимера PFO (рис. 4, а).

При облучении пленки композита на длине волны 337 нм в спектрах люминесценции присутствуют характеристические пики переходов иона $\text{Eu}(\text{III})$ в диапазоне от 450 до 750 нм. Основной пик излучения (613 нм) и ряд хорошо разрешенных вторичных максимумов (580, 593, 653, 702 нм), соответствуют переходам с $^5\text{D}_0$ уровня возбужденного состояния на подуровни $^7\text{F}_J$ основного мультиплета ($J = 0-4$). С другой стороны, при возбуждении УФ-светом с длиной волны 408 нм в спектрах наблюдается синяя люминесценция полимера PFO при 438, 465 и 497 нм (0–0, 0–1 и 0–2 электронно-колебательные переходы) [21]. Более того, варьируя длину волны возбуждения люминесценции в диапазоне от 320 нм до 410 нм можно получать различный цвет люминесценции.

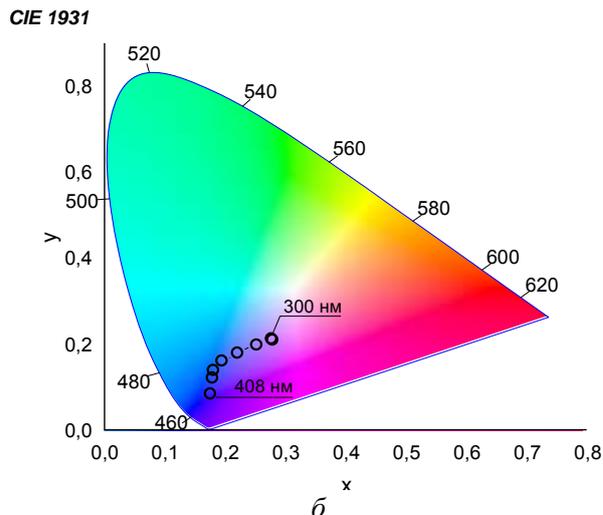
Так, например, пленка композита PFO– $\text{Eu}(\text{III})$ визуально демонстрирует сиреневый цвет излучения при возбуждении на длине волны 360 нм (рис. 4, б). Таким образом, полученные пленочные материалы способны изменять цвет люминесценции от светло-красного до темно-синего в зависимости от длины волны УФ-облучения.

Изучение поляризованной люминесценции полученных пленочных материалов были проведены с помощью спектрофлуориметра *Cary Eclipse Varian*, оснащенного поляризационными фильтрами на стороне детектора. Спектры поляризованной люминесценции были сняты при различных углах между плоскостью поляризации фильтра и направлением ориентации молекул композитной пленки. Возбуждение люминесценции пленок композитов проводили деполаризованным излучением на длине волны 360 нм.

На рисунке 5 представлены спектры люминесценции пленки композита при параллельной и перпендикулярной ориентации молекул относительно плоскости поляризации фильтра детектора.



а



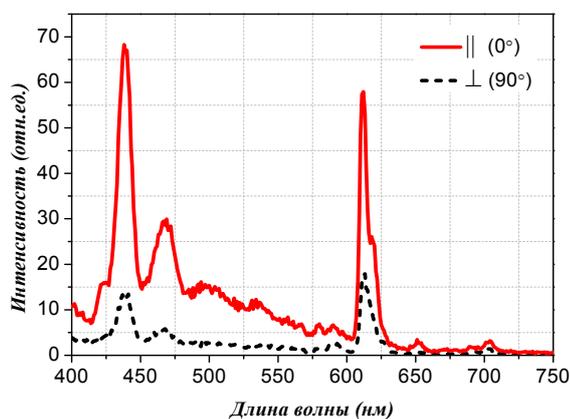
б

Рис. 4. Спектры люминесценции пленки, содержащей 10 мол. % PFO и 90 мол. % Eu(III) при разной длине волны возбуждения (а), координаты цветности свечения пленки при различном возбуждении люминесценции (б)

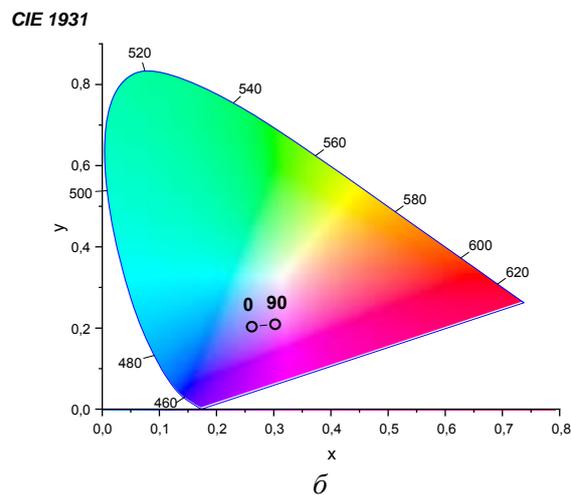
Fig. 4. Luminescence spectra of the film containing 10 mol. % of PFO and 90 mol. % of Eu(III) at different excitation wavelengths (a), CIE diagram of the film at different excitation wavelengths (b)

При параллельной ориентации в спектрах наблюдается интенсивная люминесценция полимера PFO при 438 нм и комплекса Eu(III) при 613 нм. При изменении угла поляризации на 90° интенсивность люминесценции существенно уменьшается и остается постоянной, что свидетельствует о наличии в пленке части неориентированных молекул ком-

плекса Eu(III) и PFO. Дихроичное соотношение фотолюминесценции R (отношение интенсивностей люминесценции при 0° и 90°) для PFO составляет 5,4 на длине волны 438 нм, тогда как для Eu(III) $R = 3,2$ на длине волны 613 нм. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными ранее для металлomezоенов [8].



а



б

Рис. 5. Спектры поляризованной люминесценции (при $\lambda_{ex} = 360$ нм) пленки, содержащей 10 мол. % PFO и 90 мол. % Eu(III) при параллельной (\parallel) и перпендикулярной (\perp) ориентации молекул относительно плоскости поляризатора (а), координаты цветности свечения пленки при параллельной (0°) и перпендикулярной (90°) ориентации молекул относительно плоскости поляризатора (б)

Fig. 5. Polarized luminescence spectra (at $\lambda_{ex} = 360$ nm) of the film containing 10 mol. % PFO and 90 mol. % Eu(III) at parallel (\parallel) and perpendicular (\perp) orientation of molecules relative to the polarizer plane (a), CIE diagram of the film at parallel (0°) and perpendicular (90°) orientation of molecules relative to the polarizer plane (b)

Так же стоит отметить, что различная степень ориентации молекул приводит к изменению соотношения интенсивностей люминесценции комплекса Eu(III) и полимера PFO. В результате происходит изменение цвета люминесценции полученной пленки композита при изменении угла между плоскостью поляризатора и направлением ориентации молекул (рис. 4, б).

Выводы

На основе мезогенного комплекса европия(III) и полимера PFO были получены и исследованы гомогенные ЖК-системы, проявляющие нематический мезоморфизм в широком интервале температур. Показана возможность получения ориентированных пленок лантаноидсодержащих ЖК-смесей с регулируемой поляризацией люминесценции. Дихроичное соотношение поляризованной фотолюминесценции полученной системы составляет 5,4 на длине волны 438 нм и 3,2 на длине волны 613 нм. Установлено, что, изменяя длину волны возбуждающего излучения или угол между направлением ориентации молекул и плоскостью поляризатора, можно существенно изменять цвет фотолюминесценции полученных источников поляризованного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-73-10091) и с использованием оборудования ЦКП «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Список литературы / References

1. Liu J., Yang Z., Ye B., Zhao Z., Ruan Y., Guo T., Xu S. A review of stability-enhanced luminescent materials: fabrication and optoelectronic applications. *J. Mater. Chem. C*, 2019, **7** (17), 4934–4955. DOI: 10.1039/C8TC06292G.
2. da Rosa P.P.F., Kitagawa Y., Hasegawa Y. Luminescent lanthanide complex with seven-coordination geometry. *Coord. Chem. Rev.*, 2020, **406**, 213153. DOI: 10.1016/j.ccr.2019.213153.
3. Hasegawa Y., Nakanishi T. Luminescent lanthanide coordination polymers for photonic applications. *Rsc. Adv.*, 2015, **5** (1), 338–353. DOI: 10.1039/C4RA09255D.
4. de Bettencourt-Dias A. Lanthanide-based emitting materials in light-emitting diodes. *Dalt. Trans.*, 2007, **22**, 2229–2241. DOI: 10.1039/B702341C.
5. Li Y., Bian Y., Yan M., Thapaliya P.S., Johns D., Yan X., Jiang J. Mixed (porphyrinato)(phthalocyaninato) rare-earth (III) double-decker complexes for broadband light harvesting organic solar cells. *J. Mater. Chem.*, 2011, **21** (30), 11131–11141. DOI: 10.1039/C1JM11246E.
6. Hasegawa M., Ishii A. Thin-film formation for promoting the potential of luminescent lanthanide coordination complexes. *Coord. Chem. Rev.*, 2020, **421**, 213458. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213458.
7. Wu S., Yu X., Huang J., Shen J., Yan Q., Wang X., Zhang Q. Optically controllable polarized luminescence from azo-polymer films doped with a lanthanide complex. *J. Mater. Chem.*, 2008, **18** (27), 3223–3229. DOI: 10.1039/B802198H.
8. Wang Y., Shi J., Chen J., Zhu W., Baranoff E. Recent progress in luminescent liquid crystal materials: design, properties and application for linearly polarised emission. *J. Mater. Chem. C*, 2015, **3** (31), 7993–8005. DOI: 10.1039/C5TC01565K.
9. Bliznyuk V.N., Carter S.A., Scott J.C., Klarner G., Miller R.D., Miller D.C. Electrical and photoinduced degradation of polyfluorene based films and light-emitting devices. *Macromolecules*, 1999, **32** (2), 361–369. DOI: 10.1021/ma9808979.
10. Liu Y., Wang Y., Li C., Huang Y., Dang D., Zhu M., Cao Y. Red polymer light-emitting devices based on an oxadiazole-functionalized europium(III) complex. *Mater. Chem. Phys.*, 2014, **143** (3), 1265–1270. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.11.032.
11. Liu Y., Li J.D., Li C., Song J.G., Zhang Y.L., Peng J.B., Wang X.Y., Zhu M.X., Cao Y., Zhu W.G. Highly efficient sharp red electroluminescence from europium complex-doped poly (9,9-dioctylfluorene) devices. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **433** (4–6), 331–334. DOI: 10.1016/j.cplett.2006.11.070.
12. Джабаров В. И., Князев А. А., Николаев В. Ф., Галыметдинов Ю. Г. Анизотропия магнитной восприимчивости жидкокристаллических комплексов лантаноидов // *Журн. физ. химии*. 2011. Т. 85, № 8. С. 1568–1572. [Dzhabarov V.I., Knyazev A.A., Nikolaev V.F., Galyametdinov Y.G. Anisotropy of the magnetic susceptibility of mesogeneous lanthanide complexes. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2011, **85** (8), 1450–1453. DOI: 10.1134/S0036024411080085].
13. Knyazev A.A., Karyakin M.E., Krupin A.S., Romanova K.A., Galyametdinov Y.G. Influence of Eu(III) complexes structural anisotropy on luminescence of doped conjugated polymer blends. *Inorg. Chem.*, 2017, **56** (11), 6067–6075. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b02825.
14. Knyazev A.A., Lobkov V.S., Galyametdinov Y.G. Liquid-crystalline complex of Eu III β -diketonate with 5,5"-di(heptadecyl)-2,2"-bipyridine. *Russ. Chem. Bull.*, 2004, **53** (4), 942–943.

15. Knyazev A.A., Dzhabarov V.I., Lapaev D.V., Lobkov V.S., Haase W., Galyametdinov Y.G. New nematogenic β -diketones for synthesis of lanthanidomesogens. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2010, **80** (4), 756–760.
DOI: 10.1134/S1070363210040122.
16. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Krupin A.S., Galyametdinov Yu.G. UV laser-induced enhancement of photoluminescence intensity in vitrified terbium (III) β -diketonate complex film in air. *Luminescence*, 2018, **194**, 407–413. **DOI:** 10.1016/j.jlumin.2017.10.067.
17. Карякин М. Е., Ковшик А. П., Добрун Л. А., Полушин С. Г., Князев А. А., Галяметдинов Ю. Г. Жидкокристаллические смеси на основе мезогенного комплекса гадолиния и нематических жидких кристаллов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2019. Т. 19, № 4. С. 67–76. [Karyakin M.E., Kovshik A.P., Dobrun L.A., Polushin S.G., Knyazev A.A., Galyametdinov Y.G. Liquid crystalline mixtures consisting of mesogenic gadolinium complex and nematic liquid crystals. *Liq. Cryst. and their Appl.* 2019, **19** (4), 67–76. (in Russ.).
DOI: 10.18083/LCAppl.2019.4.67].
18. Whitehead K.S., Grell M., Bradley D.D.C. Highly polarized blue electroluminescence from homogeneously aligned films of poly(9,9-dioctylfluorene). *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76** (20), 2946–2948.
DOI: 10.1063/1.126525.
19. Sirringhaus H., Wilson R.J., Friend R.H., Inbasekaran M., Wu W., Woo E.P., Bradley D.D.C. Mobility enhancement in conjugated polymer field-effect transistors through chain alignment in a liquid-crystalline phase. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77** (3), 406–408.
DOI: 10.1063/1.126991.
20. Молочко В. А., Пестов С. М. Фазовые равновесия и термодинамика систем с жидкими кристаллами. М.: ИПЦ МИТХТ, 2003. 242 с. [Molochko V.A., Pestov S.M. Phase transition and thermodynamics of liquid crystal systems. Moscow, IPC МИТХТ, 2003, 242 p. (in Russ.)].
21. Renzi W., Franchello F., Cordeiro N.J., Pelegati V.B., Cesar C.L., Laureto E., Duarte J.L. Analysis and control of energy transfer processes and luminescence across the visible spectrum in PFO: P3OT blends. *J. Mater. Sci.: Mater. Electr.*, 2017, **28** (23), 17750–17760.
DOI: 10.1007/s10854-017-7714-8.

Поступила 20.04.2021 г.

Received 20.04.2021

Принята 21.06.2021 г.

Accepted 21.06.2021