

02

## Спектроскопические свойства полимерных пленок, активированных супрамолекулярным наноалмазным комплексом европия с батофенантролином

© В.А. Лапина, Т.А. Павич, П.П. Першукевич

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,  
220072 Минск, Беларусь

e-mail: p.persh@ifanbel.bas-net.by

Поступила в Редакцию 21.12.2018 г.

В окончательной редакции 21.12.2018 г.

Принята к публикации 15.03.2019 г.

Впервые с использованием супрамолекулярного алмазсодержащего комплекса европия (III) с батофенантролином получены новые люминесцентные пленки, с высокой эффективностью преобразующие УФ излучение в диапазоне длин волн 220–410 nm в люминесценцию ионов европия, с возможностью регулирования степенью монохроматичности излучения в главной полосе излучения ионов  $\text{Eu}^{3+}$  с максимумом 615 nm. Установлено, что форма спектров возбуждения, полуширина главной полосы испускания 615 nm (переход  ${}^5D_0-{}^7F_2$ ), значения квантовых выходов (в пределах  $\sim 0.3-0.8$ ) зависят от типа материала матрицы. Предлагаемые оптические материалы могут найти применение при разработке различных светоизлучающих устройств: экранов, индикаторов, солнечных концентраторов, органических светодиодов, лазерных сред.

**Ключевые слова:** люминесцирующие полимерные пленки, алмазосодержащие комплексы европия (III), преобразование УФ излучения.

DOI: 10.21883/OS.2019.08.48035.370-18

### Введение

В настоящее время существует большая заинтересованность в получении полимерных и металлоорганических материалов, в частности, с использованием редкоземельных элементов (РЗЭ), для технологий фотоники и оптоэлектроники. Известно использование комплексных соединений европия (III) в виде оптически активных твердотельных матриц для лазеров [1], в качестве светотрансформирующих покрытий [2] и концентраторов энергии в солнечных элементах [3–5], в органических светодиодах [1,6–9], в качестве меток для флуоресцентного иммуноанализа [1,10], в люминесцентных датчиках температуры [11–13], в качестве индикаторов радиационного излучения [14]. Развитие нанотехнологий дало новый толчок для разработки перспективных материалов с использованием РЗЭ, в частности ионов европия (III), обладающих набором полезных свойств, таких как однородность, прозрачность, фотостабильность, хорошая адгезия при сохранении высокой эффективности люминесценции. Ряду исследовательских групп удалось добиться значительных успехов в разработке таких материалов [15–20], в которых в качестве матриц использовались органические [16–19] или неорганические полимеры, например органо-неорганические гибридные материалы в виде гель-стекол [15,20].

В большом количестве работ при разработке новых полимерных материалов применялся двухлигандный  $\beta$ -дикетонатный комплекс европия (III) с трис(теноилтрифторацетон)ом и 1,10-фенантролином ( $\text{Eu}(\text{TТА})_3\text{phen}$ ). Кроме  $\text{Eu}(\text{TТА})_3\text{phen}$ , большой ин-

терес представляет комплекс европия (III) с батофенантролином ( $\text{Eu}(\text{bphen})_2(\text{NO}_3)_3$ , далее  $\text{EuB}$ ), характеризующийся высокой интенсивностью люминесценции [21,22], фото- и термостойкостью [21]. Известно также, что благодаря своим полупроволниковым свойствам  $\text{EuB}$  используется в светодиодных устройствах [9,23].

В нашей недавней работе [24] сообщалось о возможности получения поликристаллов (порошков) супрамолекулярного комплекса европия (III) с батофенантролином  $\text{Eu}(\text{bphen})_2(\text{NO}_3)_3$ , в котором в качестве структурообразующего элемента были использованы наноалмазы (ND, nanodiamonds) детонационного синтеза. Было показано, что полученный комплекс стабилен, способен преобразовывать излучение УФ диапазона в видимый свет, обладает эффективной люминесценцией в области 615 nm. Поскольку для практического использования наиболее востребованными являются прозрачные материалы в твердом состоянии, целью настоящей работы явилась разработка светотрансформирующих прозрачных материалов в виде пленок, преобразующих УФ излучение в видимый свет, активированных разработанным нами супрамолекулярным алмазсодержащим комплексом европия с батофенантролином,  $\text{ND-Eu}(\text{bphen})_2(\text{NO}_3)_2$  (далее  $\text{ND-EuB}$ ), введенным в различные полимерные матрицы и гель-стекло.

### Образцы и методы эксперимента

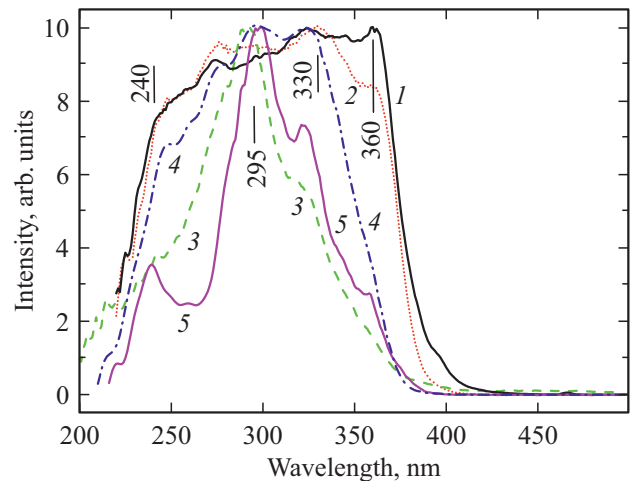
Синтез комплекса  $\text{ND-EuB}$  описан в работе [24]. Для изготовления люминесцентных пленочных композитов в

качестве твердотельной матрицы использовались такие полимеры, как полистирол (PS), поливинилбутираль (PVB), полиметилметакрилат (PMMA) и полиакрилонитрид (PAN) фирмы Aldrich. Концентрация комплекса в поливочных растворах составляла 0.1 wt.% в полимере. Люминесцентный композит получали путем диспергирования комплекса в 10%-ном растворе полимера при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке с последующим гомогенизированием в ультразвуковой ванне (42 kHz) в течение 30 min при 40°C. Полученную композицию наносили на кварцевые подложки методом полива из раствора при помощи „мажущей“ фильеры с дальнейшим высушиванием в сушильной камере в течение 24 h при 35°C. Полученные таким образом люминесцентные пленки имели толщину 20–70  $\mu\text{m}$ .

Тонкие гель-пленки (до 20  $\mu\text{m}$ ), полученные золь-гель методом, были получены из раствора методом центрифугирования (spin-on films). Реакционная смесь содержала фенилтриметоксисилан (phenyltrimethoxysilane, PTMS), диметилдиэтоксисилан (dimethyldiethoxysilane, DMDES), воду, этанол в мольном соотношении PTMS:DMDES:H<sub>2</sub>O:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH = 1:1:5:10. После тщательного перемешивания смеси на магнитной мешалке в течение 6 h добавляли порошок ND–EuB в мольном соотношении 0.015 к золь-гель раствору и гомогенизировали в ультразвуковой (42 kHz) ванне в течение 1 h при 40°C. Для полного прохождения процесса гидролиза реакционную смесь выдерживали при комнатной температуре в течение суток. Далее пленкообразующий раствор разливался по подложке, после чего осуществлялось быстрое раскручивание до скорости 2000 rpm. Подложки с полученными пленками сушились путем медленного повышения температуры (1°C/min) до 120°C в течение 20 min.

Измерения скорректированных спектров люминесценции (СЛ) и спектров возбуждения люминесценции (СВЛ) проводились на модернизированном спектрофлуориметрическом комплексе СДЛ-2 (ЛОМО, СССР), основанном на монохроматорах возбуждения и регистрации соответственно МДР-12 и МДР-23. В качестве источника возбуждения использовалась ксеноновая лампа ДКсШ-120. Регистрация светового сигнала после прохождения монохроматора осуществлялась с помощью охлаждаемого фотоумножителя ФЭУ-100 (диапазон 230–800 nm) в режиме счета фотонов.

Квантовые выходы прозрачных пленок оценивались относительным методом. В качестве эталона использовалась прозрачная пленка Eu(TTA)<sub>3</sub>phen в PMMA ( $\phi_F = 0.68$ ). Спектры поглощения и пропускания исследуемых пленок измерялись на спектрофотометре Cary-500 Scan UV-Vis-NIR (Varian, США, Австралия). Регистрация кинетики затухания свечения производилась импульсным методом с помощью цифрового осциллографа BORDO 221 (полоса пропускания 150 MHz). Источником возбуждения служила импульсная ксеноновая лампа (длительность импульса  $\sim 2 \mu\text{s}$ ,  $\lambda_{\text{exc}} \sim 350 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_{1/2} \sim 20 \text{ nm}$ ). Ввиду близости к экспоненте кривых



**Рис. 1.** Спектры возбуждения люминесценции порошков (1, 2) и пленок (3–5) из PMMA (3), PAN (4) и SOL-GEL (5): 1 — комплекс EuB; 2–5 — супрамолекулярный комплекс с наноалмазами ND–EuB ( $\lambda_{\text{мон}} = 615 \text{ nm}$ ).

затухания люминесценции  $I(t)$  средние времена затухания  $\tau_0$  каждого из исследуемых объектов были достаточно близки к временам экспоненциального затухания  $\tau_e$ , определяемым по наклону зависимости  $\ln I(t)$  от времени  $t$ . Исследование топографии поверхности образцов проводилось на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) в составе многофункционального комплекса NanoFlex (Solar LS, Беларусь).

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1–4 и в таблице представлены основные результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств полученных нами образцов. На рис. 1 сопоставлены СВЛ поликристаллов исходного комплекса EuB (кривая 1) и комплекса с наноалмазами ND–EuB (кривая 2), а также пленок, активированных комплексом ND–EuB, введенным в полимеры PMMA, PAN и гель-стекло (далее также гель-пленки или SOL-GEL). СВЛ всех образцов получены при регистрации в максимуме полосы электродипольного перехода  $^5D_0-^7F_2$  каждого из полимерных образцов (615 nm). Как видно из рис. 1, СВЛ всех образцов представляют собой широкие структурные полосы, расположенные в УФ области (от 200 до 410 nm) с главными максимумами вблизи 360, 330, 290, 295 и 298 nm соответственно для образцов поликристаллов с EuB и ND–EuB, а также пленок с внедренным комплексом ND–EuB в PMMA, PAN и SOL-GEL. Видно, что степень структурности СВЛ зависит от вида матрицы. Наибольшей полушириной обладает СВЛ образца ND–EuB в PAN (кривая 4). Наибольшей степенью структурности обладает СВЛ образца ND–EuB в гель-стекле (кривая 5).

Значения времен затухания  $\tau_0$  и квантовых выходов  $\varphi$  исследуемых объектов при  $\lambda_{\text{exc}} = 350 \text{ nm}$  и  $\lambda_{\text{мон}} = 615 \text{ nm}$

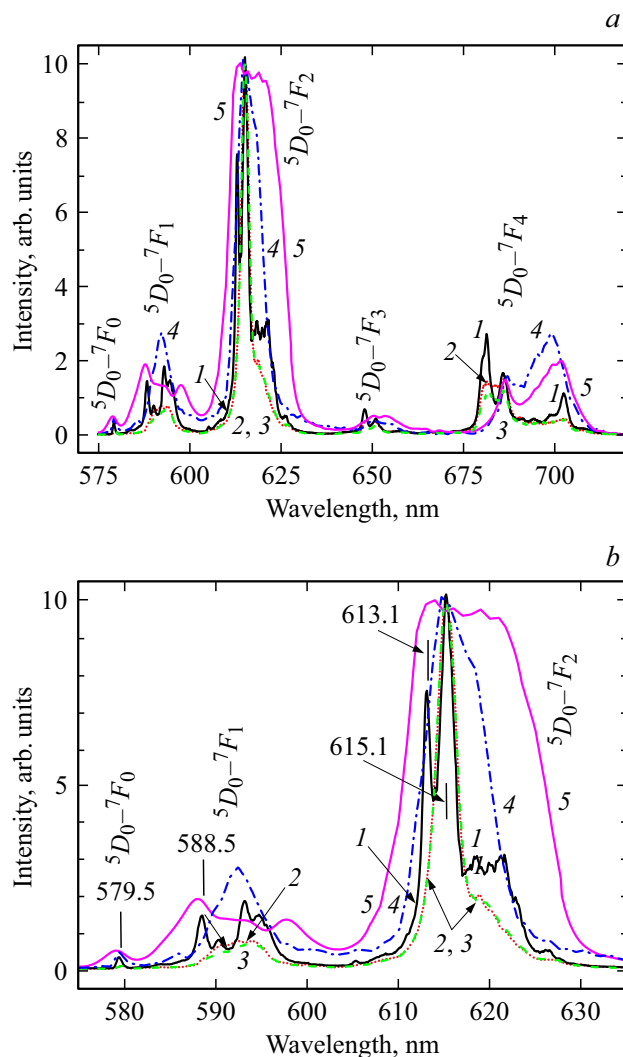
Образец	EuB	ND–EuB	ND–EuB in PS	ND–EuB in PVB	ND–EuB in PMMA	ND–EuB in PAN	ND–EuB in SOL-GEL
$\tau_0$ , ms	1.24	0.90	0.95	1.06	1.12	0.95	1.03
$\varphi$	0.93	0.85	0.58	0.46	0.37	0.30	0.78

Примечание. Значения  $\varphi$  для пленок следует рассматривать как оценочные, приближительные.

Большинство полос возбуждения образцов ND–EuB в матрицах совпадает с полосами поликристаллического образца. К таковым относятся полосы вблизи 360, 325, 295 и 240 nm. Однако в зависимости от вида полимера наблюдаются и существенные различия. Некоторые полосы, характерные для поликристаллических образцов, исчезают при введении ND–EuB в матрицы. Так, в спектрах СВЛ полосы в области 360 nm не проявляются для комплекса ND–EuB в PMMA и PAN, а в золь-гель-стекле, наоборот, эта полоса отчетливо видна. В области 275 nm полосы ND–EuB в PMMA и в SOL-GEL полностью отсутствуют, а образец ND–EuB в PAN обладает такой полосой.

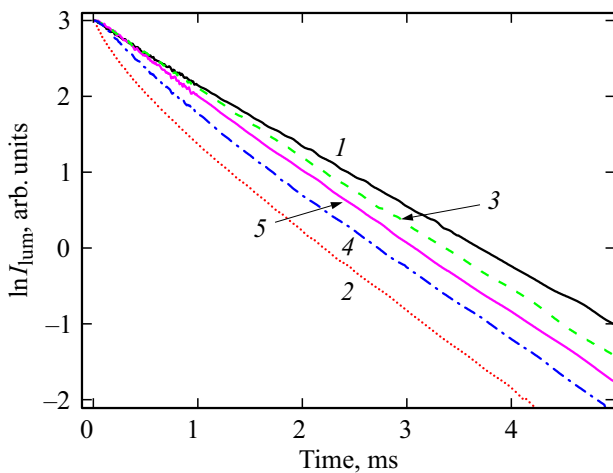
Следует также заметить, что СВЛ исследованных нами образцов ND–EuB в PS и PVB (на рис. 1 не показаны) смещены относительно СВЛ ND–EuB в PMMA соответственно в длинноволновую и коротковолновую области. С учетом вышесказанного диапазон возбуждения красной люминесценции ионов  $\text{Eu}^{3+}$  простирается от 220 до 410 nm.

Как видно из рис. 2, *a, b*, спектры люминесценции (СЛ) достаточно разнообразны и также зависят от вида матрицы. Различие между СЛ EuB и ND–EuB (кривые 1 и 2) обсуждено в нашей предыдущей работе [24]. Согласно [24], это различие связано с симметрией локального кристаллического поля, действующего на ионы  $\text{Eu}^{3+}$ . СЛ пленки ND–EuB в PMMA (кривая 3) практически совпадает со спектром поликристаллического образца ND–EuB (кривая 2). Форма спектров ND–EuB в PS и PVB (на рисунках не показана) аналогична. От спектров этой группы образцов в полимерных матрицах сильно отличается поведение спектра ND–EuB в PAN. Так, в области полос магнитно-дипольного  ${}^5D_0-{}^7F_1$ -перехода форма спектра (и особенно интенсивность) группы линий образца ND–EuB в PAN значительно отличается от аналогичных характеристик группы линий ND–EuB в PMMA (на рис. 2, *b* кривые 3 и 4). В области полос „сверхчувствительного“ электродипольного перехода  ${}^5D_0-{}^7F_2$  полуширина главной полосы  $\Delta\lambda_{1/2}$  (длина волны максимума 615.1 nm) ND–EuB в PAN почти в 3 раза превосходит аналогичную величину ND–EuB в PMMA. Сильные различия по форме и интенсивности спектров для обсуждаемых образцов наблюдаются и в области полос  ${}^5D_0-{}^7F_3$ ,  ${}^5D_0-{}^7F_4$ -переходов. Например, для образца ND–EuB в PMMA и в PAN соотношение интенсивностей на длинах волн  $\sim 685$  и  $\sim 700$  nm противоположно, а относительная интенсивность всей группы полос образца ND–EuB в PMMA явно ниже аналогичной величины для образца ND–EuB в PAN (на рис. 2, *a* кривые 3 и 4).



**Рис. 2.** Спектры люминесценции в широком (*a*) и узком (*b*) спектральных диапазонах порошков (1, 2) и пленок (3–5) из PMMA (3), PAN (4) и SOL-GEL (5): 1 — комплекс EuB; 2–5 — супрамолекулярный комплекс с нанодиамазами ND–EuB ( $\lambda_{\text{exc}} = 350 \text{ nm}$ ).

Среди исследованных образцов своим особенным спектром наиболее выделяется образец ND–EuB в SOL-GEL. Прежде всего это относится к полуширине главной полосы  ${}^5D_0-{}^7F_2$ -перехода (рис. 2, кривая 5). Так, полуширина этой полосы в SOL-GEL составляет 17 nm против 3.5 и 9 nm в PMMA и PAN. Кроме того, в области  ${}^5D_0-{}^7F_1$ -перехода спектр группы полос существенно отличается по сравнению с этой характери-



**Рис. 3.** Логарифмы кривых затухания люминесценции порошков (1, 2) и пленок (3–5) из PMMA (3), PAN (4) и SOL-GEL (5): 1 — комплекс EuB; 2–5 — супрамолекулярный комплекс с наноалмазами ND–EuB. ( $\lambda_{\text{exc}} = 350 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{mon}} = 615 \text{ nm}$ ).

стикой для всех исследуемых нами образцов. В области полос  ${}^5D_0-{}^7F_3$ - и  ${}^5D_0-{}^7F_4$ -переходов спектр ND–EuB в SOL-GEL не совпадает ни с одним из спектров исследуемых нами образцов, однако в некоторой степени по форме и соотношению интенсивности полос подобен спектру ND–EuB в PAN. Как нам представляется, необычно большую полуширину полосы 615 nm в PAN (и особенно в SOL-GEL) можно объяснить более сильным взаимодействием комплекса с матрицей, например большим числом взаимодействующих групп атомов.

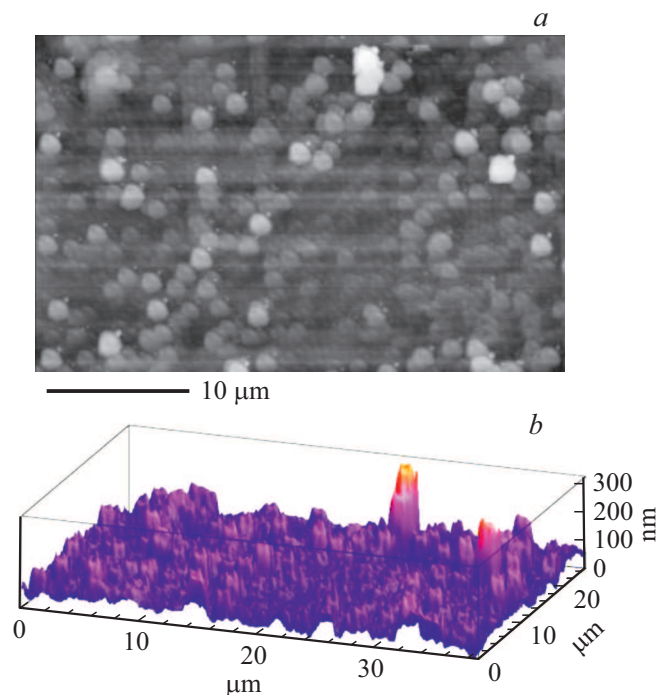
Результаты по измерению кинетики затухания люминесценции  $I(t)$  исследуемых образцов показаны на рис. 3 и в таблице. Из представленных данных видно, что наиболее медленным затуханием ( $\tau_0^{\text{EuB}} = 1.24 \text{ ms}$ ) характеризуется порошок EuB, а наиболее быстрым и неэкспоненциальным — порошок ND–EuB ( $\tau_0^{\text{ND–EuB}} = 0.90 \text{ ms}$ ). По сравнению с ND–EuB в ряду матриц PAN, SOL-GEL, PMMA происходит постепенное возрастание  $\tau_0$ . В таком же порядке снижается степень неэкспоненциальности кривых затухания. Определенные нами параметры затухания по конечной стадии затухания  $\tau_e$  достаточно близки к средним временам затухания  $\tau_0$ , так как степень неэкспоненциальности кривых затухания достаточно мала. Например, согласно [24], при аппроксимации кривых двумя экспонентами для EuB среднее время затухания  $\tau_0^{\text{EuB}} = 1.24 \text{ ms}$ , а  $\tau_e^{\text{EuB}} = 1.27 \text{ ms}$ .

Оцененные нами значения квантовых выходов  $\tau$  (таблица) для ND–EuB в матрицах достаточно велики. Наибольшим значением квантового выхода характеризуется ND–EuB в SOL-GEL ( $\phi_{\text{SG}} = 0.78$ ), наименьшим — в PAN ( $\phi_{\text{PAN}} = 0.30$ ). Как следует из таблицы, значения квантовых выходов  $\phi$  не всегда располагаются в порядке возрастания  $\tau_e$ .

На рис. 4, *a, b* и 5, *a, b* представлены микрофотографии пленок для образцов, полученных в SOL-GEL и в PAN.

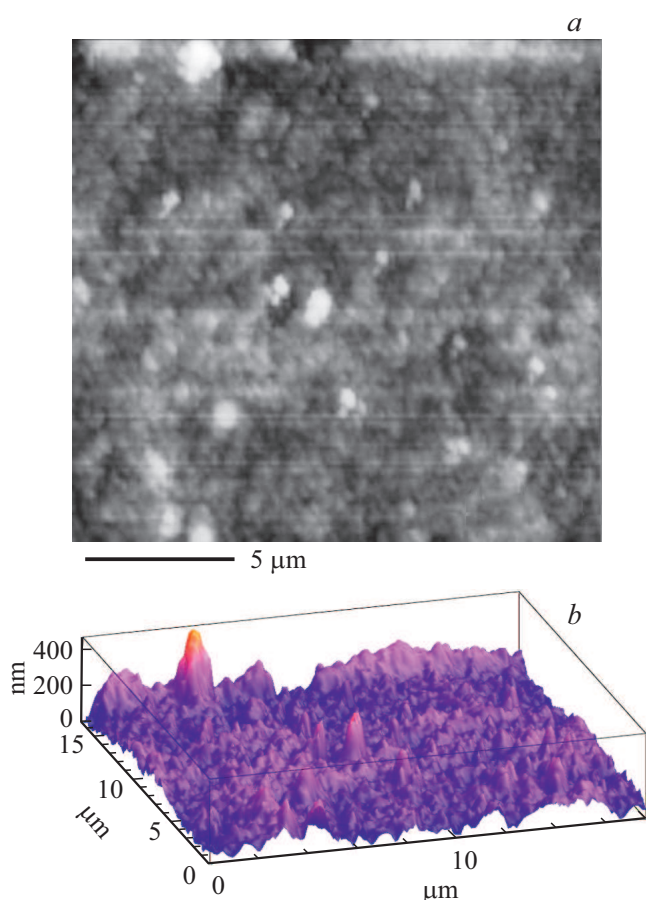
Для образца в SOL-GEL (рис. 4, *a, b*) видно, что пленка достаточно однородна по геометрии и имеет шероховатость с регулярным рельефом поверхности. Из рис. 4, *b* видно, что частицы комплекса распределены в матричном материале в виде сферических частиц с размером до  $1 \mu\text{m}$ , близко расположены к друг другу и образуют цепочечные структуры с плотной упаковкой. Такое взаимное расположение частиц определяется как химией матричного материала, так и структурой и химией поверхности самого комплекса. Поверхностный рельеф пленки просматривается в виде микро- и наноструктур, близких по форме и размерам (выступы, углубления, впадины), т.е. в виде достаточно регулярно профилированных сдвоенных столбчатых структур. Такая структура может обеспечить повышенную адгезию поверхности пленки к другим твердым поверхностям (эффект „сухой“ адгезии). При сопоставлении рис. 4, *a* и 4, *b* видно, что наблюдаются также выступы больших размеров, что свидетельствует об агрегации частиц комплексов в агломераты разной величины, вплоть до  $2.5 \mu\text{m}$ .

Топография поверхности для PAN-пленки (рис. 5, *a, b*) выглядит по-другому. Пленка имеет отличную от SOL-GEL топографию поверхности: распределение частиц в пленке не так однородно, размер частиц в целом значительно меньше, в среднем латеральный размер частиц составляет  $0.2 \mu\text{m}$ , видно образование агрегатов в среднем до  $0.6 \mu\text{m}$ , форма частиц не имеет такой четко выраженной сферической формы, как на рис. 4, *a*, частицы не образуют цепочечных структур, а расположены достаточно хаотично. Поверхностный рельеф пленки просматривается в основном в виде небольших впадин и углублений и имеет наноразмерный характер. Выступы



**Рис. 4.** Микрофотографии частиц супрамолекулярного комплекса ND–EuB в гель-пленке: 2D (*a*) и 3D (*b*) изображения.





**Рис. 5.** Микрофотографии частиц супрамолекулярного комплекса ND–EuB в PAN-пленке: 2D (а) и 3D (b) изображения.

больших размеров (в среднем до 250 nm) обусловлены агрегатами наночастиц.

В ряду матриц PS, PVB, PMMA, PAN и SOL-GEL величина пропускания  $T$  в видимой области ( $\lambda = 500$  nm) приблизительно составила 57, 78, 81, 75 и 89% при толщине пленок соответственно около 70, 60, 60, 50 и 20  $\mu\text{m}$  и концентрации активатора  $10^{-4}$  M, что свидетельствует о хорошем светопропускании полученных нами пленок.

Оценка фотостабильности пленок осуществлялась после облучения их светом ксеноновой лампы ДКсШ-120 через фильтр ПС-11, имеющий две полосы пропускания: первую в УФ области, 220–420 nm и вторую в красной и ИК областях, 650–3000 nm. После прохождения через фильтр измеренная величина уровня облученности образца составляла  $\sim 0.4$  W/cm<sup>2</sup>. Время облучения — 1 h. Фотостабильность образцов после облучения оценивалась по изменению СВЛ относительно исходных. Оказалось, что наименее фотостабильными показали себя пленки на основе PS и PMMA, наиболее фотостабильными — на основе гель-стекла. Например, после облучения интенсивность СВЛ пленок на основе PS и PMMA уменьшалась на 15–20%, также происходило некоторое слабое размытие структуры спектров. Для гель-пленок наблюдалось слабое смещение СВЛ

в коротковолновую область за счет падения интенсивности на длинноволновом склоне спектра (на 5–7%) и примерно таком же возрастании ее на коротковолновом. Наблюдаемые изменения СВЛ свидетельствуют о сравнительно хорошей фотостабильности пленок, так как уровень облученности в УФ области был достаточно высоким: в диапазонах 220–300, 300–350 и 350–420 nm соответственно около 12, 72 и 127 mW/cm<sup>2</sup>.

## Заключение

Проведено исследование свойств люминесцентных материалов в виде пленок, полученных путем введения в различные полимеры или гель-стекло супрамолекулярного алмазсодержащего комплекса европия (III) с батофенантролином. В этом комплексе структурообразующим элементом служили нанодиамазы детонационного синтеза. В качестве матрицы-хозяина использовались такие полимеры как PS, PVB, PMMA, PAN и SOL-GEL. Из представленных результатов видно, что полученные нами пленки являются эффективными преобразователями УФ излучения в диапазоне 220–410 nm в люминесценцию ионов европия  $\text{Eu}^{3+}$  на длине волны около 615 nm. Об этом также свидетельствуют оценки квантовых выходов  $\varphi$ , значения которых в ряду PS, PVB, PMMA, PAN и SOL-GEL составляют 0.58, 0.46, 0.37, 0.30 и 0.78. При этом четко прослеживается влияние матрицы (вида полимера) на положение и форму полос возбуждения. Наибольшей шириной полосы возбуждения характеризуется пленка на основе PAN. Полуширина главной полосы излучения (переход  ${}^5D_0$ – ${}^7F_2$ ) также зависит от вида матрицы и в том же ряду матриц составляет 3.5, 3.5, 3.5, 9.0 и 17.0 nm. С учетом того, что состав пленок можно варьировать, можно утверждать о возможности регулирования степени монохроматичности света в области 615 nm. Очевидно, что с повышением полуширины полосы 615 nm возрастает и относительный вклад излучения на этой длине волны в полный спектр излучения ионов  $\text{Eu}^{3+}$ . Таким образом, подбор типа полимера для синтезированных нами материалов открывает возможность управления формой полос поглощения и излучения в заданном спектральном диапазоне.

В целом микрофотографии, полученные на сканирующем зондовом микроскопе, свидетельствуют о возможности получения пленок с достаточно высокой однородностью, что обусловлено морфологией частиц полученного комплекса и высокой степенью его диспергирования в матричном материале. Известно, что диспергирование алмазсодержащего комплекса в объеме матрицы безусловно приводит к усилению механической прочности пленок (с учетом свойств ND-частиц). Присутствие ND-частиц также увеличивает адгезию пленок к поверхности за счет взаимодействий между частицами ND и поверхностью.

По совокупности свойств исследованных материалов можно утверждать, что все они могут найти свою нишу

для использования в зависимости от конкретных областей возможного применения. Наиболее перспективной, на наш взгляд, является матрица на основе геля-стекла.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Binnemans K.* Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths / Ed. by Gschneidner K.A., Jr., Bünzli J.-C.G., Pecharsky V.K. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 107–272.
- [2] *Юрпе Т.А., Рудя Л.И., Климова Н.В., Шаманин В.В.* // ФТП. 2003. Т. 37. № 7. С. 835.
- [3] *Fukuda T., Kato S., Kin E., Okaniwa K., Morikawa H., Honda Z., Kamata N.* // Opt. Mater. 2009. V. 32. P. 22–25.
- [4] *Binnemans K.* Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths / Ed. by Bünzli J.-C.G., Pecharsky V.K. Newnes, 2013. V. 44. P. 169–282.
- [5] *Gavriluta A., Fix T., Nonat A., Slaoui A., Guillemoles J.-F., L.J.* // J. Mater. Chem. A, 2017. V 5. P. 14031–14040.
- [6] *Kido J., Okamoto Y.* // Chem. Rev. 2002. V. 102. N 6. P. 2357.
- [7] *Sun P.P., Duan J.P., Lih J.J., Cheng C.H.* // Adv. Func. Mater. 2003. V. 13. N 9. P. 683.
- [8] *Pereira A., Conte G., Gallardo H., Zucco C., Quirino W., Legnani C., Cremona M., Bechtold I.* // J. of the Soc. for Inform. Display. 2011. V. 19. N 11. P. 793.
- [9] *Zhao B., Zhang H., Miao Y., Wang Z., Gao L., Wang H., Hao Y., Xu B., Li W.* // J. Mater. Chem. C, 2017. Iss. 46. P. 12182.
- [10] *Hadjichristov G.B., Stefanov I.L., Stanimirov S.S., Petkov I.K.* // Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 7501 :23. 2009.
- [11] *Mitsuishi M., Kikuchi Sh., Miyashita T., Amao Y.* // J. Mater. Chem. 2003. V. 13. P. 2875.
- [12] *Brites C.D.S., Lima P.P., Silva N.J.O., Millán A., Amaral V.S., Palacio F., Carlos L.D.* // Adv. Mater. 2010. V. 22. P. 4499–4504.
- [13] *Kozak M., Kalota B., Tkaczyk S., Tsvirko M.* // Журн. прикл. спектр. 2014. Т. 81. N 4. С. 622.
- [14] *Gameiro C.G., da Silva Jr.E.F., Alves S., de Sá G.F., Santa-Cruz P.A.* // Mat. Sci. Forum. 1999. V. 315–317. P. 249.
- [15] *Аксенова Н.А., Глаголев Н.Н., Шашкова В.Т., Зайченко Н.Л., Кольцова Л.С., Мардалейшвили И.Р., Шенюк А.И., Тимашев П.С., Западинский Б.И., Соловьева А.Б.* // ЖФХ. 2008. Т. 82. № 9. С. 1759.
- [16] *Moudat O., Rowan B.C., Alamiry M., Richardson P., Richards B.S., Jones A.C., Robertson N.* // Chem. Commun. 2009. V. 43. P. 6649.
- [17] *Knyazev A.A., Karyakin M.E., Krupin A.S., Romanova K.A., Galyametdinov Yu.G.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. P. 639–645.
- [18] *Лапаев Д.В., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г. Никуфоров В.Г., Джабаров В.И., Лобков В.С.* // Вестн. технологич. университета. 2017. Т. 20. № 18. С. 26.
- [19] *Lunstrook K., Driesen K., Nockemann P., Görtler-Walrand C., Binnemans K., Bellayer S., Le Bideau J., Vioux A.* // Chem. Mater. 2006. V. 18 (24). P. 5711–5715.
- [20] *Levchenko V., Reisfeld R.* // Opt. Mater. 2017. V. 74. N 12. P. 187190.
- [21] *Киреев С.В., Иванов Р.А., Формановский А.А., Егоров А.А., Кузьмина Н.П.* // Журн. неорг. химии. 2003. Т. 48. № 6. С. 903.
- [22] *Azab H.A., Al-Deyab S.S., Anwar Z.M., Ahmed R.Gh.* // J. Chem. Eng. Data. 2011. V. 56. P. 833.
- [23] *Бочков М.А., Витухновский А.Г., Тайдаков И.В., Ващенко А.А., Кацаба А.В., Амброзевич С.А., Брунков П.Н.* // ФТП. 2014. Т. 48. № 3. С. 384.
- [24] *Лапина В.А., Павич Т.А., Першукевич П.П.* // Опт. и спектр. 2017. Т. 122. № 2. С. 241–251.