

## Вынужденное излучение пленок анодного оксида алюминия, допированных родамином 6Ж

Н.Х.Ибраев, А.К.Зейниденов, А.К.Аймуханов, К.С.Напольский

*Исследованы спектральные и люминесцентные свойства красителя родамин 6Ж в пористой матрице анодного оксида алюминия. Пленки с высокоупорядоченной пористой структурой получены методом двухстадийного анодирования. С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что диаметр пор составляет примерно 50 нм, а расстояние между соседними каналами – примерно 105 нм. Толщина пленок равна 55 мкм, а удельная площадь поверхности пористых пленок оксида алюминия, измеренная методом капиллярной конденсации азота, – 15.3 м<sup>2</sup>/г. Измерены спектры поглощения и флуоресценции молекул родамин 6Ж, внедренных в поры анодного оксида алюминия. Установлено, что при возбуждении образцов с поверхностной концентрацией красителя  $0.3 \times 10^{14}$  молек./м<sup>2</sup> излучением второй гармоники Nd:YAG-лазера в продольном варианте с интенсивностью накачки 0.4 МВт/см<sup>2</sup> на фоне спектра лазерно-индуцированной флуоресценции появляется узкая полоса вынужденного излучения с максимумом на длине волны 572 нм. Дальнейшее увеличение интенсивности излучения накачки приводит к сужению полосы вынужденного излучения и увеличению его интенсивности. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность использования пористых пленок анодного оксида алюминия, допированных лазерными красителями, для создания активных элементов квантовой электроники.*

**Ключевые слова:** анодный оксид алюминия, родамин 6Ж, флуоресценция, вынужденное излучение.

### 1. Введение

В качестве твердотельных активных сред лазеров на красителях широко используются полимерные матрицы [1, 2], натриево-боросиликатные пористые стекла [3] и стекла, полученные методом золь-гель [4, 5]. Недостатком полимерных сред является протекание в них радикальных реакций с участием молекул красителей, которые приводят к деструкции матриц [6], кроме того, пористые стекла трудоемки в изготовлении.

В настоящее время активно ведутся исследования по получению лазерной генерации с использованием наноструктурированных материалов, допированных лазерными красителями [7–10]. Молекулы красителей осаждаются на поверхности наночастиц [11, 12] либо внедряются в нанопористые структуры [13, 14]. В цилиндрических микрорезонаторах в таких структурах могут существовать моды высокой добротности благодаря эффекту полного внутреннего отражения электромагнитной волны от стенок резонатора [15]. Вследствие эффективной концентрации электромагнитного поля внутри микрорезонатора скорости радиационных процессов существенно увеличиваются [16]. Если микрорезонаторы заполнить лазерными красителями, то такую систему можно использовать в качестве активной среды для перестраиваемого лазера.

**Н.Х.Ибраев, А.К.Зейниденов, А.К.Аймуханов.** Институт молекулярной нанофотоники, Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова, Республика Казахстан, 100028 Караганда, ул. Университетская, 28; e-mail: asyl-zeinidenov@mail.ru  
**К.С.Напольский.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, химический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 17 апреля 2014 г., после доработки – 4 августа 2014 г.

Одним из перспективных материалов, который может служить активной средой, является пористый анодный оксид алюминия, допированный лазерными красителями. Структура пленок анодного оксида алюминия представляет собой систему упорядоченных пор с плотной упаковкой. Поры располагаются перпендикулярно поверхности пленки, а их диаметр и расстояние между ними можно варьировать путем изменения условий анодирования [17].

Пористый оксид алюминия имеет ряд преимуществ: химическую и термическую устойчивость, прозрачность в видимой области спектра, превосходные адсорбционные свойства, обусловленные большим объемом пор с разветвленной поверхностью [18, 19]. Пленки анодного оксида алюминия широко используются в качестве матриц при создании различных наноструктур темплатным методом [20–22]. Доступные исходные вещества для синтеза таких матриц и простота процесса их изготовления позволяют надеяться на получение лазерно-активных сред с низкой по сравнению с другими лазерными элементами стоимостью.

Известно, что в пористых пленках анодного оксида алюминия имеет место фотолюминесценция в голубой области спектра, свойства которой в значительной степени зависят от состава электролита, используемого при анодировании [23–25]. Спектральный состав излучения анодного оксида алюминия обусловлен образованием F-центров в различных зарядовых состояниях.

Изучение флуоресцентных свойств красителей, внедренных в поры оксида алюминия, проводилось в работах [26, 27]. Увеличение интенсивности флуоресценции родамин 6Ж в матрице оксида алюминия по сравнению с интенсивностью флуоресценции родамин 6Ж в пористых стеклах авторы этих работ связывают с передачей энергии от кислородных вакансий к молекулам люмино-

фора. В работе [28] исследованы оптические и генерационные свойства золь-гельных пленок оксида алюминия, допированных лазерными красителями родамин 6Ж, родамин Б, оксазин 4. Лазерная генерация при ферстеровском переносе энергии от родамина 6Ж к родамину Б наблюдалась в работе [29] в золь-гельных пленках  $Al_2O_3$ . Изучены зависимости эффективности преобразования энергии накачки в энергию вынужденного излучения и максимума его интенсивности от концентрации донора в пленках. Максимальная эффективность составила  $\sim 2.1\%$  в обоих случаях.

Одним из основных недостатков существующих лазерных активных элементов на основе окрашенных полимерных материалов является быстрая деградация их функциональных свойств из-за низкой теплопроводности и недостаточной термической стойкости полимера. Например, коэффициент теплопроводности у широко используемого полиметилметакрилата равен  $0.19 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  [30], что на порядок меньше, чем у пористого оксида алюминия ( $1.6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  [31]). В работе [31] было показано, что мембраны анодного оксида алюминия являются перспективным материалом для создания высокотехнологичных устройств, работающих при повышенных температурах. Пористая структура анодного оксида алюминия не претерпевает значительных изменений и остается стабильной в широком интервале температур вплоть до  $1000^\circ\text{C}$ . Это также одно из преимуществ применения пористого оксида алюминия для создания твердотельных активных элементов перестраиваемых лазеров на красителях. Использование матрицы пористого оксида алюминия будет способствовать быстрому рассеянию тепла, которое возникает при поглощении света в результате внутренней конверсии в молекулах красителя.

В настоящей работе представлены результаты исследования трансформации спонтанной флуоресценции в вынужденное излучение молекул родамина 6Ж, внедренных в пористую матрицу анодного оксида алюминия.

## 2. Подготовка образцов и методика эксперимента

Синтез оксида алюминия осуществлялся в «мягких» условиях, включающих в себя две стадии анодирования при напряжении  $U = 40 \text{ В}$  в растворе щавелевой кислоты ( $0.3 \text{ М}$ ) [32]. В качестве исходного материала были использованы алюминиевые пластины (степень чистоты  $99.99\%$ ) с толщиной  $0.5 \text{ мм}$  и размером  $3.5 \times 3.5 \text{ см}$ . Для увеличения размера кристаллитов алюминия, снятия микронапряжений в образце и последующего достижения лучшей упорядоченности получаемых пор подложки алюминия отжигали в муфельной печи на воздухе в течение  $10 \text{ ч}$  при температуре  $T = 500^\circ\text{C}$ . Для удаления поверхностных дефектов алюминия проводилась его электрохимическая полировка в импульсном режиме в растворе  $\text{CrO}_3$  в  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . После этого образцы промывали в дистиллированной воде и высушивали на воздухе.

Анодирование алюминия осуществлялось в двухэлектродной электрохимической ячейке с использованием источника постоянного тока MPS-7081. Вспомогательным электродом служила платиновая пластина, а рабочим электродом – отполированная алюминиевая фольга. Электролит был получен на основе воды двойной фильтрации и деионизации на водоочистителе AquaMax 360 Basic. Удельное сопротивление воды составляло  $18.2 \text{ МОм}/\text{см}$ .

Полученные матрицы оксида алюминия отделялись от непрореагировавшего алюминия в результате селективного растворения последнего в растворе  $\text{CuCl}_2$  в  $\text{HCl}$ .

Сорбция молекул красителя родамин 6Ж в поры осуществлялась путем выдерживания пленок оксида алюминия в этанольном растворе люминофора с исходной концентрацией  $C' = 10^{-4} \text{ моль}/\text{л}$  в течение  $5 \text{ ч}$  с последующим высушиванием пленок в сушильном шкафу при температуре  $100^\circ\text{C}$  в течение  $1 \text{ ч}$ .

Количество адсорбированных молекул люминофора (поверхностная концентрация\*) определялось по изменению оптической плотности раствора в результате сорбции с помощью выражения

$$C = \frac{N_A C' V}{MS} \left(1 - \frac{D_2}{D_1}\right), \quad (1)$$

где  $V$  – объем раствора;  $C'$  – концентрация раствора красителя;  $D_1$  и  $D_2$  – оптические плотности раствора до и после сорбции;  $S$  – удельная поверхность пористого оксида алюминия;  $N_A$  – число Авогадро ( $6.022 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ );  $M$  – молярная масса красителя ( $479 \text{ г}/\text{моль}$ ).

Удельная поверхность пленки была определена методом ВЕТ (Brunauer–Emmett–Teller) по адсорбции азота с помощью измерительного комплекса Sorbi MS. Удельная площадь поверхности полученных мембран оксида алюминия составила  $15.3 \pm 0.2 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Измерение спектров поглощения и флуоресценции родамина 6Ж в пленке проводилось с использованием спектрофотометра CM2203 (Solar). Кинетика затухания флуоресценции родамина 6Ж измерялась с помощью спектрофлуорометра с пикосекундным разрешением и регистрацией в режиме время-коррелированного счета фотонов. Возбуждение флуоресценции образцов осуществлялось излучением импульсных полупроводниковых лазеров с длинами волн генерации  $\lambda = 375$  и  $488 \text{ нм}$  и длительностями импульсов на полувысоте  $\tau = 40 \text{ пс}$ . Относительная погрешность спектральных измерений с использованием спектрофотометра CM2203 не превышает  $2\%$ . Точность измерения спектров поглощения составляет  $\pm 2 \text{ нм}$ , а точность измерения спектров флуоресценции равна  $\pm 1 \text{ нм}$ .

Измерение спектральных характеристик вынужденного излучения пленок проводилось на установке, схема которой приведена на рис.1. Спектральные характеристики были изучены при возбуждении образцов излучением второй гармоники Nd:YAG-лазера 1 (Solar LQ 215,  $\lambda =$

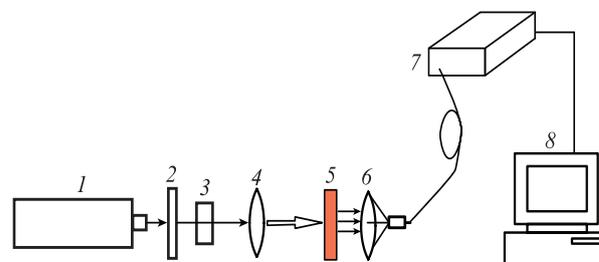


Рис.1. Схема установки для исследования характеристик вынужденного излучения тонких пленок: 1 – лазер LQ 215; 2 – нейтральные фильтры; 3 – диафрагма; 4, 6 – собирающие линзы; 5 – исследуемый образец; 7 – спектрометр AvaSpec-2048; 8 – компьютер.

\* Далее в тексте используется термин концентрация.

532 нм,  $E_p = 90$  мДж,  $\tau = 10$  нс) в продольном варианте. Резонатор был образован двумя стеклянными пластинами, между которыми помещалась пленка 5. Излучение накачки, пройдя через диафрагму 3, фокусировалось линзой 4 на поверхность пленки в виде круга площадью 0.13 см<sup>2</sup>.

Интенсивность излучения накачки варьировалась с помощью нейтральных светофильтров 2 и составляла 0.01–1 МВт/см<sup>2</sup>. Вынужденное излучение фокусировалось собирающей линзой 6 на вход оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 7, подключенного к компьютеру 8. Относительная погрешность определения спектральных характеристик была равна 3%.

Квантовый выход  $\Phi_{fl}$  флуоресценции молекул красителя в порах оксида алюминия был измерен в абсолютных единицах с помощью рефлектометрической сферы AvaSphere-50-REFL (Avantes BV). Погрешность определения  $\Phi_{fl}$  составляла не более 5%.

### 3. Результаты и их обсуждение

Изображения поверхности и поперечного скола образцов, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Leo Supra 50VP, показаны на рис.2. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 7 кВ и рабочем расстоянии 7 мм в условиях высокого вакуума. На поверхности пленки наблюдаются поры с одинаковым диаметром ~50 нм и расстоянием между ними ~105 нм (рис.2,а). На поперечном сколе образца (рис.2,б) видны параллельные прямые каналы, расположенные перпендикулярно поверхности.

На рис.3 приведены спектры поглощения и флуоресценции молекул родамина 6Ж, внедренных в каналы пористой матрицы. Видно, что полоса поглощения красителя в матрице имеет максимум на длине волны  $\lambda = 524$  нм. Фотовозбуждение флуоресценции красителя осуществлялось в полосе поглощения люминофора на  $\lambda = 520$  нм. Спектр флуоресценции имеет максимум на  $\lambda = 572$  нм.

При увеличении концентрации молекул родамина 6Ж наблюдается уменьшение оптической плотности в полосе поглощения мономеров. Наряду с этим на коротковолновом крыле спектра появляется новый максимум (кривая 2), связанный с образованием димеров красителя. Поглощение димеров приводит и к уширению спектра поглощения. Полуширина спектров поглощения мономеров  $\Delta\lambda_{1/2}^{abs} = 42$  нм. С ростом концентрации красителя полоса поглощения уширяется до  $\Delta\lambda_{1/2}^{abs} = 54$  нм. Увеличение концентрации красителя приводит и к тушению флуоресценции родамина 6Ж (кривая 4). Полученные данные характерны для концентрированных жидких и твердых раство-

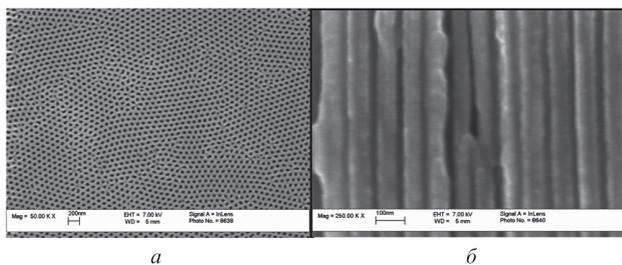


Рис.2. РЭМ-изображения пористой пленки анодного оксида алюминия, полученной методом двухстадийного анодирования в растворе щавелевой кислоты (0.3 М) при напряжении 40 В: нижняя сторона оксидной пленки после удаления барьерного слоя (а) и поперечный скол (б).

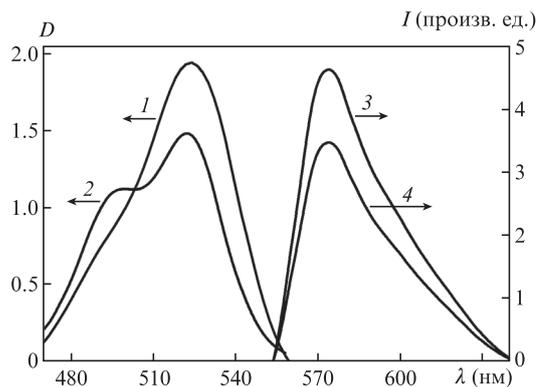


Рис.3. Спектры поглощения (1, 2) и флуоресценции (3, 4) родамина 6Ж в матрице пористого оксида алюминия при концентрации красителя  $0.3 \times 10^{14}$  (1, 3) и  $0.46 \times 10^{14}$  моль/м<sup>2</sup> (2, 4).

ров родамина 6Ж и согласуются с результатами других работ [33].

Таким образом, наблюдаемые изменения спектров поглощения и флуоресценции при увеличении количества адсорбированных молекул в порах оксида алюминия свидетельствуют о том, что в нем имеет место молекулярная агрегация красителя.

На рис.4 приведена зависимость интенсивности флуоресценции люминофора от количества молекул красителя, адсорбированных в порах оксида алюминия. Видно, что интенсивность флуоресценции красителя ( $\lambda = 572$  нм) с ростом концентрации в порах увеличивается до некоторого критического значения, после достижения критической концентрации интенсивность флуоресценции снижается. Оптимальное время сорбции красителя, соответствующее максимальной интенсивности флуоресценции, составило 5 ч. При этом число сорбированных в поры оксида алюминия молекул было равно  $0.3 \times 10^{14}$  молек./м<sup>2</sup>. Уменьшение интенсивности флуоресценции при концентрациях, превышающих критическую, связано с развитием процесса агрегации молекул красителя (рис.3, кривые 2, 4).

В порах оксида алюминия квантовый выход  $\Phi_{fl}$  флуоресценции родамина 6Ж, определенный методом де Мелло для расчета абсолютного квантового выхода смешанных систем [34], составил 0.52. Полученное значение сравнимо с квантовыми выходами свечения красителя в матрицах метилметакрилата (0.53 [35]) и эпоксиполимера (0.67 [36]).

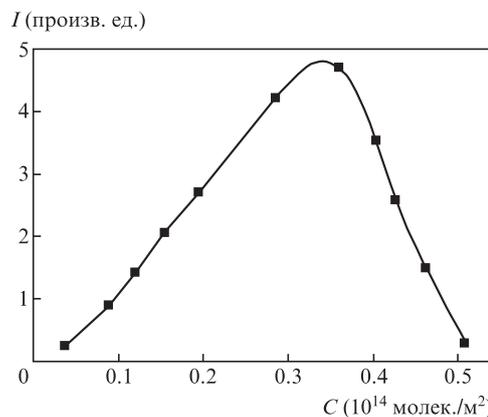


Рис.4. Зависимость интенсивности флуоресценции красителя на  $\lambda = 572$  нм от концентрации адсорбированных молекул.

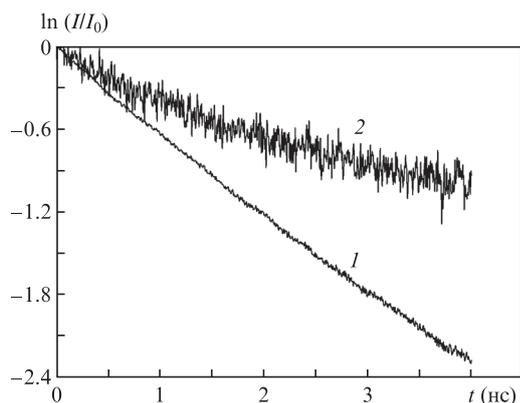


Рис.5. Кинетики затухания флуоресценции родамина 6Ж в пленке пористого оксида алюминия (1) и флуоресценции пористого оксида алюминия (2).

Кинетики затухания флуоресценции молекул родамина 6Ж в пористой пленке оксида алюминия и флуоресценции пленки пористого оксида алюминия приведены на рис.5. Времена жизни возбужденных состояний, рассчитанные по экспоненциальной части кривых затухания, составили 1.7 и 3.3 нс для родамина 6Ж и пористого оксида алюминия соответственно. Возбуждение родамина 6Ж в пористом оксиде алюминия осуществлялось на длине волны  $\lambda = 488$  нм, а возбуждение собственного свечения пористого оксида алюминия – на  $\lambda = 375$  нм.

Вынужденное излучение молекул красителя в пленке анодного оксида алюминия получено в максимуме полосы флуоресценции (рис.6). Из рис.6 видно, что при интенсивности излучения накачки  $P \leq 0.2$  МВт/см<sup>2</sup> наблюдается лишь спектр лазерно-индуцированной флуоресценции красителя (кривые 1, 2). При  $P \sim 0.4$  МВт/см<sup>2</sup> на фоне этого спектра появляется узкая полоса вынужденного излучения с максимумом на длине волны 572 нм (кривая 3). Дальнейшее увеличение интенсивности излучения накачки приводит к увеличению интенсивности вынужденного излучения и сужению его полосы. При достижении  $P = 0.8$  МВт/см<sup>2</sup> интегральная интенсивность вынужденного излучения превышает интенсивность спонтанного излучения (кривая 4), однако полностью подавить спонтанное излучение не удается.

Появление вынужденного излучения при использовании низкодобротного резонатора, образованного двумя

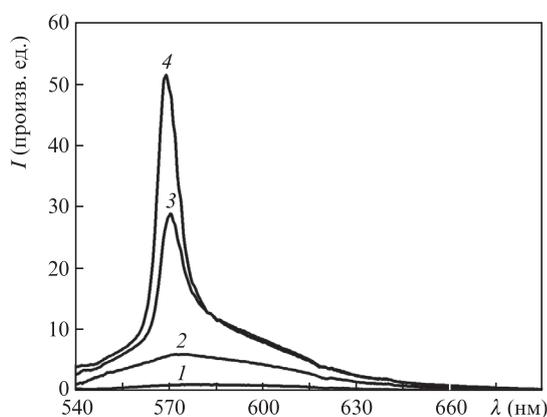


Рис.6. Спектры излучения молекул родамина 6Ж в анодном оксиде алюминия при интенсивностях излучения накачки  $P = 0.04$  (1), 0.2 (2), 0.4 (3) и 0.8 МВт/см<sup>2</sup> (4). Концентрация красителя в пленке составляет  $0.3 \times 10^{14}$  молек./м<sup>2</sup>.

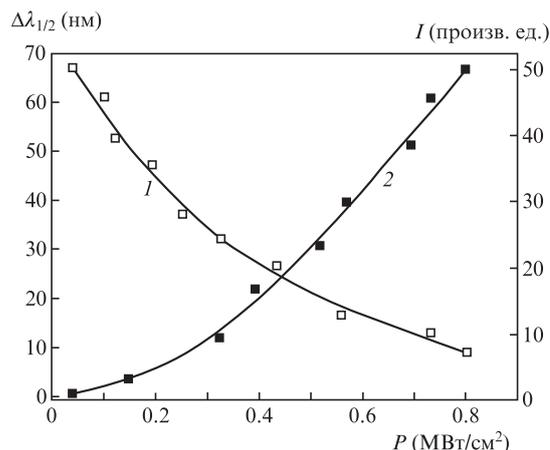


Рис.7. Зависимости полуширины спектра вынужденного излучения (1) и его интенсивности (2) от интенсивности накачки.

стеклянными пластинками, связано с тем, что помимо френелевского отражения от них в изучаемой системе имеет место отражение от стенок цилиндрических пор матрицы, служащих микрорезонаторами. Благодаря эффекту полного внутреннего отражения электромагнитной волны от стенок микрорезонатора в порах концентрируется высокая плотность энергии электромагнитного поля, которая способствует значительному увеличению интенсивности излучения молекул красителя в порах.

Исходя из спектров вынужденного излучения были получены зависимости полуширины полосы излучения  $\Delta\lambda_{1/2}$  и интенсивности свечения пленки от интенсивности накачки (рис.7). При изменении интенсивности накачки от 0.1 до 0.8 МВт/см<sup>2</sup> интенсивность излучения в максимуме спектра увеличивается почти в 50 раз, а  $\Delta\lambda_{1/2}$  уменьшается в 7.4 раза. Сужение полосы излучения с ростом интенсивности возбуждения свидетельствует о преобладании вынужденного излучения над спонтанным.

#### 4. Заключение

В настоящей работе были исследованы спектральные и люминесцентные свойства пленок анодного оксида алюминия с высокоупорядоченной пористой структурой, допированных молекулами красителя родамин 6Ж. Квантовый выход флуоресценции красителя в матрице оксида алюминия равен 0.52. При интенсивности излучения накачки  $P = 0.1$  МВт/см<sup>2</sup> наблюдается лишь спектр лазерно-индуцированной флуоресценции красителя. При достижении  $P = 0.4$  МВт/см<sup>2</sup> на фоне этого спектра появляется узкая полоса вынужденного излучения красителя с максимумом на длине волны 572 нм. При увеличении интенсивности накачки от 0.1 до 0.8 МВт/см<sup>2</sup> интенсивность излучения в максимуме спектра увеличивается почти в 50 раз, а  $\Delta\lambda_{1/2}$  уменьшается в 7.4 раза. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность использования пористых пленок анодного оксида алюминия, допированных лазерными красителями, для создания лазерных активных элементов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (гранты №1196/ГФ и 0319/ГФ2), а также РФФИ (гранты № 14-08-00838\_a, 13-03-91151-ГФЕН\_a, 13-08-12227-офи\_m и 12-03-00795-а). При проведении исследований использовано оборудование Центра коллек-

тивного пользования МГУ им. М.В.Ломоносова «Технологии получения новых наноструктурированных материалов и их комплексное исследование».

1. Майер Г.В., Копылова Т.Н., Светличный В.А. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 53 (2007).
2. Бондар М.В., Пржонская О.В. *Квантовая электроника*, **25**, 9 (1998).
3. Земский В.И., Колесников Ю.Л., Мешковский И.К. *Физика и техника импульсных лазеров на красителях* (СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005, с. 176).
4. Knobbe E.T., Dunn B., Fuqua P.D., Nishida F. *Appl. Opt.*, **29**, 18 (1990).
5. Ye S., Lam K.S., Lam A.K., Lo L. *Appl. Phys. B*, **65**, 109 (1997).
6. Безродный В.И., Деревянко Н.А., Ищенко А.А., Карабанова Л.В. *ЖТФ*, **71**, 72 (2001).
7. Большиков Ф.А., Гарибин Е.А., Гусев П.Е. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 193 (2011).
8. Shin H.W., Cho S.Y., Choi K.H., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 263112 (2006).
9. Costel A., Garcia-Moreno I., del Agua D., et al. *J. Appl. Phys.*, **101**, 731 (2007).
10. Мальцева Е.О., Плеханов А.И. *Вестник НГУ*, **6**, 16 (2011).
11. Алимов О.К., Басиев Т.Т., Орловский Ю.В. и др. *Квантовая электроника*, **38**, 7 (2008).
12. Donchenko V.A., Geints Yu.E., Kharenkov V.A., Zemlyanov A.A. *Opt. Photonics J.*, **3**, 13 (2013).
13. Deshpande A.V., Kumar U. *J. Non-Cryst. Solids*, **355**, 501 (2009).
14. Берер В.Н. *ЖТФ*, **24**, 92 (1998).
15. Брагинский В.Б., Городецкий М.Л., Ильченко В.С. *УФН*, **160**, 157 (1990).
16. Sherstnev V.V., Krier A., Monakhov A.M., Nil G. *Electron. Lett.*, **39**, 916 (2003).
17. Елисеев А.А., Лукашин А.В. *Функциональные наноматериалы* (М.: Физматлит, 2010).
18. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. *УФН*, **177**, 619 (2007).
19. Thompson G.E. *Thin Solid Films*, **297**, 192 (1997).
20. Lukatskaya M.R., Trusov L.A., Eliseev A.A., Lukashin A.V., Jansen M., Kazin P.E., Napolskii K.S. *Chemical Commun.*, **47**, 2396 (2011).
21. Napolskii K.S., Barczuk P.J., Vassiliev S.Yu., Veresov A.G., Tsirlina G.A., Kulesza P.J. *Electrochim. Acta*, **52**, 7910 (2007).
22. Napolskii K.S., Roslyakov I.V., Eliseev A.A., Petukhov D.I., Lukashin A.V., Chen S.-F., Liu C.P., Tsirlina G.A. *Electrochim. Acta*, **56**, 2378 (2011).
23. Tajima S., Baba N., Shimizu K., Mizuki I. *Electrocomponent Sci. Technol.*, **3**, 91 (1976).
24. Комаров Ф.Ф., Мудрый А.В., Власукова Л.А. и др. *Оптика и спектроскопия*, **104**, 272 (2008).
25. Li Z., Huang K. *J. Lumin.*, **127**, 435 (2007).
26. Zhang Z.L., Zheng H.R., Dong J., Yan X.Q., Sun Y., Xu H.X. *Sci. China, Ser. G*, **55**, 767 (2012).
27. Moadhen A., Elhouichet H., Nosova L., Oueslati M. *J. Lumin.*, **126**, 789 (2007).
28. Kobayashi Y., Kurokawa Y., Imai Y. *J. Non-Cryst. Solids*, **105**, 198 (1998).
29. Sasaki H., Kobayashi Y., Muto S., Kurokawa Y. *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** (2), 453 (1990).
30. Assael M.J., Botsion S., Gialou K., Netaxa I.N. *Int. J. Thermophys.*, **26**, 1595 (2005).
31. Росляков И.В., Напольский К.С., Евдокимов П.В. и др. *Нано-системы: физика, химия, математика*, **4**, 120 (2013).
32. Nielsch K., Choi J., Schwirn K., et al. *Nano Lett.*, **2**, 677 (2002).
33. Южаков В.И. *Успехи химии*, **61**, 1114 (1992).
34. De Mello J.C., Wittmann H.F., Friend R.H. *Adv. Mater.*, **9**, 230 (1997).
35. Громов Д.А., Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслюков А.П. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **46**, 1956 (1982).
36. Бермас Т.Б., Борткевич А.В., Костенич Ю.В. *Квантовая электроника*, **21**, 29 (1994).