

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОДАМИНА 4С В МАТРИЦЕ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Аймуханов А.К., к.ф.-м.н., доцент; Ибраев Н.Х., д.ф.-м.н., профессор;
Зейниденов А.К., магистр; Ахатова Ж.Ж., магистрант
Институт молекулярной нанофотоники
Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова
г. Караганда, Республика Казахстан

В работе исследованы спектральные и люминесцентные свойства красителя родамина 4С в пористой матрице анодного оксида алюминия. Установлено, что при возбуждении пленок анодного оксида алюминия, допированного молекулами родамина 4С второй гармоникой Nd:YAG лазера мощностью $0,8 \text{ МВт/см}^2$ на фоне спектра спонтанной флуоресценции появляется узкая полоса вынужденного излучения с максимумом на длине волны 620 нм.

Ключевые слова: пористый оксид алюминия, родамин 4С, генерационные характеристики.

В настоящее время активно ведутся исследования по получению лазерной генерации на основе наноструктурированных материалов, допированных лазерными красителями [1-4]. Молекулы красителей осаждаются на поверхности наночастиц [5,6], либо внедряются в нанопористые структуры [7,8]. Цилиндрические микрорезонаторы в таких структурах могут поддерживать моды высокой добротности благодаря эффекту полного внутреннего отражения электромагнитной волны от стенок резонатора [9]. Вследствие эффективной концентрации электромагнитного поля внутри микрорезонатора интенсивности радиационных процессов значительно усиливаются [10]. Если микрорезонаторы заполнить лазерными красителями, то такую систему можно использовать в качестве активной среды для перестраиваемого лазера.

В этом аспекте, одним из перспективных материалов, который может быть использован в качестве активной среды является пористый анодный оксид алюминия, допированный лазерными красителями. Структура пленок анодного оксида алюминия представляет систему упорядоченных пор с плотной упаковкой. Поры располагаются перпендикулярно поверхности пленки, а их диаметр и расстояние между ними можно варьировать путем изменения условий анодирования [11].

В настоящей работе представлены результаты исследования трансформации спонтанной флуоресценции в вынужденное излучение молекул родамина 4С, внедренных в пористую матрицу анодного оксида алюминия.

Анодирование алюминия проводили 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 $18,2 \text{ МОм/см}$. Полученные матрицы оксида алюминия отделялись от непрореагировавшего алюминия селективным растворением последнего в растворе CuCl_2 в HCl .

Морфология поверхности и поперечного скола образцов, полученные на растровом электронном микроскопе Leo Supra 50VP, показаны на рисунке 1. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 7 кВ, рабочем расстоянии 7 мм в высоком вакууме. На поверхности пленки наблюдаются поры одинакового диаметра $\sim 50 \text{ нм}$ и с расстоянием между порами около 105 нм (рисунок 1а). На поперечном сколе образца (рисунок 1б) видны параллельные прямые каналы, расположенные перпендикулярно поверхности.

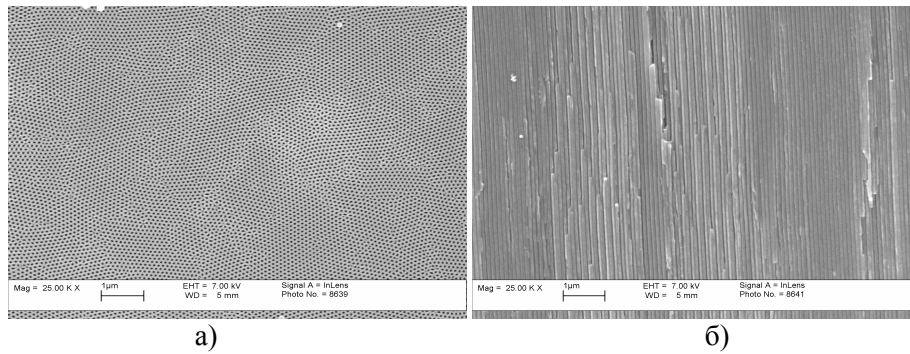


Рисунок 1. РЭМ изображения пористой пленки анодного оксида алюминия, полученной методом двухстадийного анодирования: а) поверхность оксидной пленки после удаления барьерного слоя, б) поперечный срез.

Сорбция молекул родамина 4С в поры осуществлялась путем выдерживания пленок оксида алюминия в этанольном растворе люминофора с исходной концентрацией $C=10^{-4}$ моль/л в течение 3 часов с последующим высушиванием пленок в сушильном шкафу при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа.

Измерение спектров поглощения и флуоресценции родамина 4С в пленке проводили на спектрофотометре CM2203 (Solar). На рисунке 2 показаны спектры поглощения и флуоресценции молекул родамина 4С, внедренных в каналы пористой матрицы. Из рисунка видно, что полоса поглощения красителя в матрице имеет максимум на длине волны $\lambda = 550$ нм. Фотовозбуждение флуоресценции красителя осуществлялось в коротковолновой границе полосы поглощения люминофора на длине волны равной $\lambda = 530$ нм. Спектр флуоресценции имеет максимум на длине волны $\lambda = 578$ нм.

Квантовый выход флуоресценции молекул ($\Phi_{\text{п}}$) родамина 4С в порах оксида алюминия был определен абсолютным методом с помощью рефлектометрической сферы AvaSphere-50-REFL (Avantes BV). Точность определения квантового выхода флуоресценции составляла не более 5%.

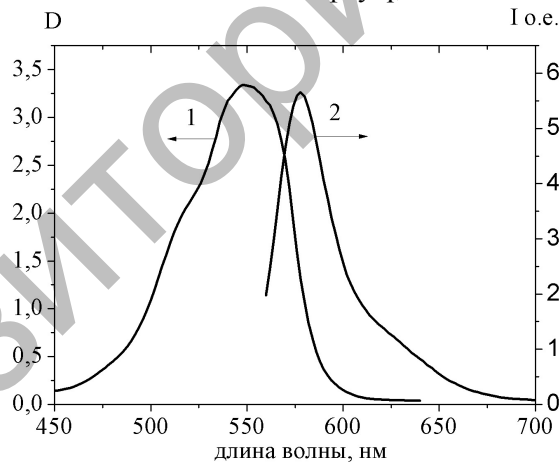
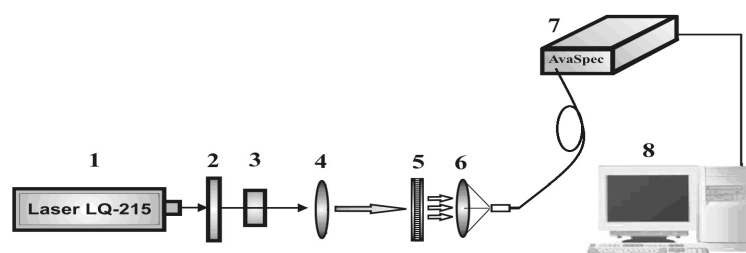


Рисунок 2. Спектры поглощения (1) и флуоресценции (2) родамина 4С в матрице пористого оксида алюминия

В порах оксида алюминия квантовый выход флуоресценции родамина 4С, определенный методом де Мелло для расчета абсолютного квантового выхода смешанных систем [12], составил $\Phi_{\text{п}} = 0,3$.

Измерение спектральных характеристик вынужденного излучения пленок проводили на установке, блок-схема которой приведена на рисунке 3.

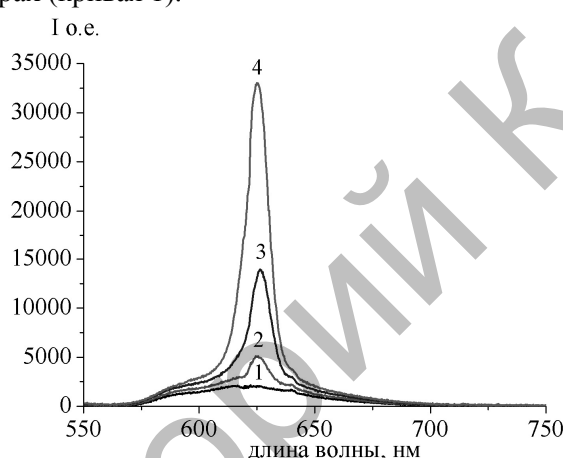
Спектральные характеристики были изучены при возбуждении образцов второй гармоникой Nd:YAG лазера (1) (SOLAR LQ 215, $\lambda_{\text{ген}} = 532$ нм, $E_{\text{имп}} = 90$ мДж, $\tau = 10$ нс) в продольном варианте. Излучение накачки, пройдя диафрагму (3) с помощью линзы (4), фокусировалось на поверхность пленки (5) в виде полосы площадью $0,1\text{ см}^2$. Плотность мощности накачки варьировалась с помощью нейтральных светофильтров (2) и составляла $0,01\text{-}1\text{ МВт/см}^2$. Вынужденное излучение с помощью собирающей линзы (6) фокусировалось на вход оптоволоконна спектрометра AvaSpec-2048. Спектры вынужденного излучения были измерены на спектрометре AvaSpec-2048 (7), подключенному к компьютеру (8). Относительная погрешность определения спектральных характеристик составляла 3%.



1 - лазер LQ 215; 2 - нейтральные фильтры; 3 - диафрагма; 4,6 - собирающая линза; 5 - исследуемый образец; 7 - спектрометр AvaSpec-2048; 8 - компьютер

Рисунок 3. Схема установки для исследования характеристик вынужденного излучения тонких пленок

Вынужденное излучение молекул красителя в пленке анодного оксида алюминия получено в длинноволновой полосе спектра флуоресценции (рисунок 4). Как видно из рисунка 4 при плотности мощности источника накачки до $0,04 \text{ МВт/см}^2$ наблюдается лишь спектр стационарной флуоресценции красителя в порах (кривая 1).



1 - $P = 0,04 \text{ МВт/см}^2$; 2 - $P = 0,2 \text{ МВт/см}^2$; 3 - $P = 0,4 \text{ МВт/см}^2$; 4 - $P = 0,8 \text{ МВт/см}^2$

Рисунок 4. Спектры излучения молекул родамина 6Ж в анодном оксиде алюминия при разных плотностях мощности накачки

При достижении мощности источника накачки порядка $0,2 \text{ МВт/см}^2$ на фоне спектра флуоресценции появляется узкая полоса вынужденного излучения с максимумом на длине волны 625 нм (кривая 2). Дальнейшее увеличение плотности мощности источника накачки приводит к увеличению интенсивности и сужению полосы вынужденного излучения (рисунок 4, кривые 3,4). При достижении плотности мощности накачки значения $0,8 \text{ МВт/см}^2$ составляющая вынужденного излучения превалирует над составляющей спонтанного излучения (кривая 4), однако полностью исключить составляющую спонтанного излучения не удается.

Появление вынужденного излучения при использовании низкодобротного резонатора двух стеклянных пластинок связано с тем, что помимо френелевского отражения от двух стеклянных пластинок в изучаемой системе микрорезонаторами служат стенки цилиндрических пор матрицы. Благодаря эффекту полного внутреннего отражения электромагнитной волны от стенок микрорезонатора в порах концентрируется высокая плотность энергии электромагнитного поля, которая способствует значительному усилению интенсивности излучения молекул красителя в порах.

Из спектров вынужденного излучения были получены зависимости полуширины полосы излучения ($\Delta\lambda_{1/2}$) и интенсивности свечения пленки от плотности мощности накачки (рисунок 5 а,б).

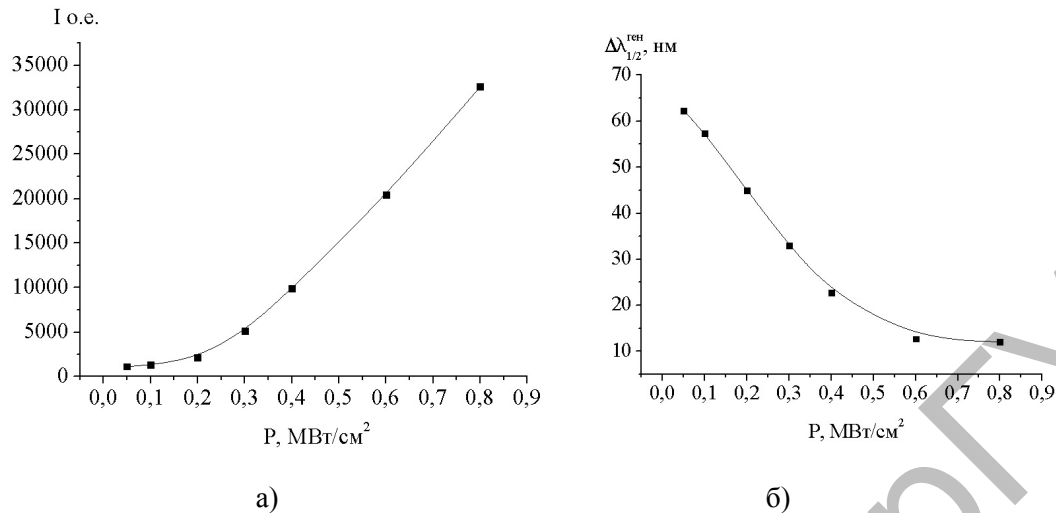


Рисунок 5. Зависимости интенсивности вынужденного излучения (а) и ее полуширины (б) от плотности мощности накачки

При изменении плотности мощности накачки от 0,1 до 0,8 МВт/см² интенсивность излучения в максимуме спектра увеличивается почти в 35 раз, а $\Delta\lambda_{1/2}$ уменьшается в 6,5 раза. Сужение полосы излучения с ростом интенсивности возбуждения свидетельствует о преобладании вынужденного излучения над спонтанным т.е. перехода системы в режим генерации. Дальнейшее увеличение плотности мощности источника накачки приводит к сужению полосы генерации и увеличению ее интенсивности. Порог возникновения вынужденного излучения определялся по касательной из рисунка 5(а) и составил 0,2 МВт/см². Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность использования пористого оксида алюминия для создания активных элементов квантовой электроники.

Литература:

1. Большиков Ф.А., Гарибин Е.А., Гусев П.Е. и др. Квантовая электроника, 41, 3 (2011).
2. Shin H.W., Cho S.Y., Choi K.H. et al. Applied physics letters, 88, 263112 (2006).
3. Costel A., Garcia-Moreno I., del Agua D. et al. Journ. of Applied Physics, 101,731(2007).
4. Мальцева Е.О., Плеханов А.И. Вестник НГУ, 6, 16 (2011).
5. Алимов О.К., Басиев Т.Т., Орловский Ю.В. и др. Квантовая электроника, 38, 7 (2008).
6. Donchenko V.A., Geints Y. E., Kharenkov V.A., Zemlyanov A.A. Optics and Photonics Journal, 3, 13 (2013).
7. Deshpande A.V., Kumar U., Journal of Non-Crystalline Solids 355, 501 (2009).
8. Берег В.Н. ЖТФ, 24,92 (1998).
9. Брагинский В.Б., Городецкий М.Л., Ильченко В.С. Успехи физических наук, 160, 157 (1990).
10. Sherstnev V. V., Krier A., Monakhov A. M., Nil G. Electron. Lett., 39, 916 (2003).
11. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы (М.: Физматлит, 2010, с. 452).
12. De Mello J. C., Wittmann H. F., Friend R. H. Advanced Materials, 9, 230 (1997).

МНОГОМЕРНЫЙ ОПЕРАТОР ЧЕЗАРО В ПРОСТРАНСТВЕ ХАРДИ СО СМЕШАННОЙ НОРМОЙ

Акишев Г. *, д.ф.-м.н., профессор;

Гульманов Н. **, магистр, учитель математики

*Карагандинский государственный университет им. академика Е.А.Букетова

**Назарбаев интеллектуальная школа химико-биологического направления

г. Караганда, Республика Казахстан

В статье доказывается ограниченность многомерного оператора Чезаро в пространстве Харди со смешанной нормой.

Ключевые слова: оператор Чезаро, пространство Харди со смешанной нормой, нормальная функция.