

И. С. Дианов<sup>1,2</sup>, А. И. Плеханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН  
пр. Акад. Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: ily470@yandex.ru

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

## ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ОПАЛОПОДОБНЫХ СТРУКТУРАХ

Исследованы особенности лазерной генерации в трехмерных фотонных кристаллах на основе наноструктур кремнезема – в объемных опалах и тонких монокристаллических пленках. Показано, что в объемных опалах возникает «случайная» лазерная генерация, при которой системой обратной связи служит дефектная структура образца. Установлено, что в тонких монокристаллических пленках реализуется случай лазерной генерации с распределенной обратной связью, обусловленной периодической кристаллической структурой фотонного кристалла. Лазерная генерация в тонких монокристаллических пленках имеет почти в три раза меньшее значение порога и более острую направленность, чем в случае использования объемных опалов.

*Ключевые слова:* трехмерный фотонный кристалл, «случайная» лазерная генерация, распределенная обратная связь.

### Введение

В настоящее время все больший интерес представляют исследование, создание и эксплуатация новых материалов, технологий и устройств для передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий. Одним из наиболее перспективных примеров таких материалов являются фотонные кристаллы (ФК), на основе которых возможно изготовление низкороговых лазеров, эффективных и дешевых сенсоров и волноводов и т. д. [1; 2]. Такие структуры обладают оптической запрещенной зоной [3; 4]. Это означает, что свет с длиной волны, лежащей в некотором диапазоне (порядка нескольких десятков нанометров), практически не может пройти через кристалл и почти полностью отражается. Основным материалом, из которого изготавливают ФК, является кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ).

В настоящее время производят объемные ФК и тонкие пленки [5–7]. Получаемые таким образом искусственные опалы представляют собой трехмерные дифракционные решетки с периодом, лежащим в оптическом диапазоне спектра.

На сегодняшний день лазерная генерация в объемных фотонных кристаллах изучена довольно подробно [8–12]. Обратная связь в таких системах обусловлена наличием относительно плотной дефектной структуры, на которой образуются кольцевые резонаторы. Независимость этих резонаторов позволила изготовить перестраиваемый в оптическом диапазоне лазер [12].

Напротив, явление лазерной генерации в тонких пленках опала на данный момент практически не исследовалось. Но по сравнению с объемными опалами тонкие пленки имеют такие преимущества, как монокристаллическость, гораздо более низкая плотность дефектов (на несколько порядков),

---

\* Работа осуществлялась при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ, грант НШ-4339.2010.2 и СО РАН, интеграционный проект №17.

Авторы выражают благодарность Д. В. Калинину за предоставление фотонно-кристаллических пленок опала.

высокий коэффициент отражения [7]. Все это делает тонкие фотонно-кристаллические пленки более привлекательными для приложений, в частности для изготовления компактных, низкопороговых лазеров.

### Объект исследования и описание установки

В работе исследовались как объемные (размером  $\sim 10 \times 5 \times 5$  мм) искусственные опалы из монодисперсных сферических частиц кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) диаметром  $d \sim 250$  нм (максимальный коэффициент отражения  $R \sim 70\%$  на длине волны 560 нм), так и тонкие пленки опала (размером  $\sim 1,5 \text{ см} \times 0,5 \text{ см} \times 30$  мкм), которые имели максимальный коэффициент отражения  $R \sim 90\%$  на длине волны 592 нм. Тонкая пленка опала представляла собой порядка двадцати слоев монодисперсных сферических частиц кремнезема диаметром 270 нм, упакованных в гранецентрированную кубическую решетку. Образцы фотонных кристаллов были изготовлены в Институте геологии и минералогии СО РАН.

Готовые ФК пропитывались этиловым раствором органического красителя родамин 6G с концентрацией 1 ммоль/л. Во избежание осаждения лишнего красителя на поверхности образцов капля раствора помещалась на самом краю образца, а затем проникала внутрь под действием капиллярных сил.

Образцы, инфильтрованные красителем, возбуждались второй гармоникой пикосекундного Nd:YAG-лазера. Длительность импульсов составляла 9 пс, при частоте повторения 5 Гц, длина волны возбуждающего излучения – 532 нм. Спектральные измерения лазерной генерации производились с помощью спектрографа Avantes с волоконным вводом излучения. Спектральное разрешение во всех измерениях составляло 0,7 нм.

### Лазерная генерация в объемном искусственном опале

При относительно низкой плотности мощности накачки (диаметр лазерного пучка составил 2 мм) наблюдалась широкополосная люминесценция раствора красителя. При превышении некоего порога, а именно  $19 \text{ МВт/см}^2$ , спектр деформировался, появ-

лялась узкая линия на длине волны 565 нм (рис. 1). Ширина линии на полувысоте составляла 3,8 нм. Лазерная генерация наблюдалась во всем диапазоне углов регистрации, т. е. в угле с раствором  $180^\circ$ , без значительного изменения интенсивности. Спектральное положение линии было сдвинуто в синюю область по отношению к положению максимума люминесценции красителя. Похожая ситуация наблюдалась в работе [13] в системе «родамин 6G – порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ». Данная особенность объясняется зависимостью эффективности рассеяния света на дефектной структуре опала от длины волны. Чем меньше длина волны фотона, тем эффективней он рассеивается, тем более длинный оптический путь проходит в среде. Этот эффект смещает максимум усиления (результат соотношения коэффициента усиления активной среды и оптической длины пути фотона) в синюю область.

При использовании собирающей линзы ( $f = 10$  см), позволившей уменьшить пятно накачки на ФК до размера порядка нескольких сотен микрон, стало возможным наблюдать модовый состав данной лазерной генерации. На рис. 2 показаны три спектра, полученные при падении лазерного луча накачки на разные участки образца. Среднее межмодовое расстояние составило 2,6 нм.

Данная генерация имеет природу случайной лазерной генерации. Обратная связь здесь обеспечивается сильным рассеянием на хаотической дефектной структуре опала. При большой плотности рассеивателей (когда длина свободного пробега фотона ненамного превышает длину волны) волна может вернуться к исходному рассеивателю

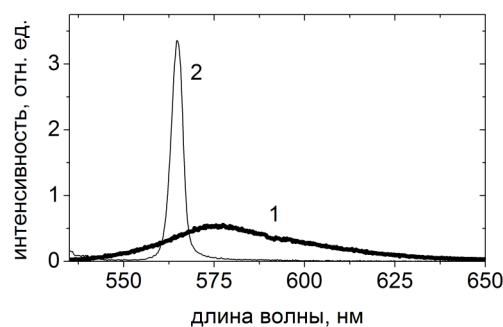


Рис. 1. Спектры люминесценции красителя родамин 6G и лазерной генерации в объемном искусственном опале. Интенсивность накачки превышает пороговую в 3 раза (1 – люминесценция, 2 – лазерное излучение)

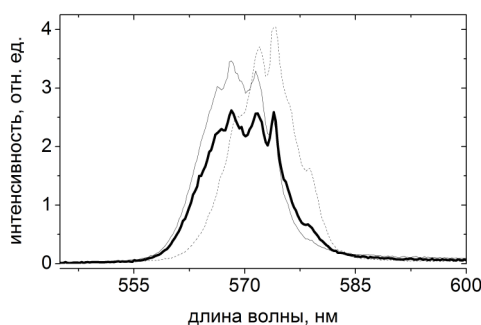


Рис. 2. Модовый состав лазерной генерации при накачке разных областей объемного опала

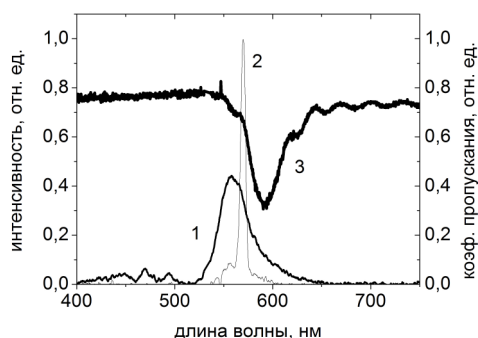


Рис. 3. Спектры пропускания тонкой пленки опала (жирная кривая), люминесценции красителя родамин 6G и лазерной генерации в тонкой пленке. Интенсивность накачки превышает пороговую в 2,5 раза (1 – люминесценция, 2 – лазерная генерация, 3 – коэффициент пропускания тонкой пленки)

и образовать замкнутую петлю – резонатор. Из полученного значения межмодового расстояния получается характерная длина петли резонатора:  $L = \lambda^2 / \Delta\lambda \sim 100$  мкм.

### Лазерная генерация в тонких монокристаллических пленках опала

При относительно низкой плотности мощности накачки наблюдалась широкополосная люминесценция раствора красителя. При превышении некоего порога, который здесь составил  $6 \text{ МВт/см}^2$  (что в 3 раза меньше по сравнению с генерацией в объемном опале), спектр деформировался, появлялась узкая линия на длине волны 570 нм (рис. 3). Ширина линии на полувысоте составляла 5 нм. Лазерная генерация наблю-

далась в угле с раствором  $60^\circ$ . Спектральное положение линии было сдвинуто в красную область по отношению к положению максимума люминесценции красителя и коррелировало с положением коротковолнового крыла стоп-зоны фотонно-кристаллической пленки.

В данном случае реализуется лазерная генерация с распределенной обратной связью. Распределенным резонатором здесь является периодическая кристаллическая структура ФК. Хорошо известно [14], что в состояниях, расположенных вблизи края запрещенной зоны ФК, групповая скорость света стремится к нулю. Это может трактоваться как значительное увеличение оптической длины пути фотона в среде за счет многократного отражения на периодической структуре кристалла. Также известно [15], что в фотонных кристаллах свет локализуется в части среды с меньшим показателем преломления в состояниях, расположенных именно на коротковолновом краю запрещенной зоны. В нашем случае меньшим показателем преломления обладает раствор красителя – активная среда, что и способствует возникновению лазерной генерации.

### Заключение

Таким образом, в случае объемных опалов, инфильтрованных органическим красителем, получена лазерная генерация, обусловленная относительно большим количеством дефектов структуры. Спектральное положение линий лазерной генерации имеет синий сдвиг по отношению к положению максимума спектра фотолюминесценции красителя (что определяется зависимостью эффективности рассеяния света от длины волны). Модовый состав случайной лазерной генерации в объемном опале зависит от места облучения образца. Анализ межмодового расстояния в спектре случайной генерации позволил оценить характерную длину резонатора 100 мкм, что приблизительно в 200 раз больше длины волны света.

При использовании монокристаллических тонких ФК пленок реализуется случай лазерной генерации с распределенной обратной связью, возникающей на периодической фотонно-кристаллической структуре. Спектральное положение линии лазерной генерации коррелирует с положением коротковолнового края стоп-зоны опала, что согласуется с теоретическими представлениями. Значение порога лазерной генерации

6 МВт/см<sup>2</sup> оказалось почти в три раза меньше по сравнению со случаем использования объемных опалов, а лазерное излучение в системе «тонкая пленка опала – раствор красителя родамин 6G» имеет более узкую диаграмму направленности лазерного излучения, чем в системе «объемный опал – раствор красителя родамин 6G».

Следует заметить, что пленочные низкороговые лазеры с распределенной обратной связью весьма перспективны для создания сверхчувствительных оптических сенсоров. В частности, порог генерации пленочного лазера на основе полифлуорена с распределенной обратной связью сильно зависит от присутствия незначительных концентраций (10 ppb) паров взрывчатых веществ [16].

### Список литературы

1. Нелин Е. А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 3.
2. Белотелов В. И., Звездин А. К. ФК и другие метаматериалы. М.: Бюро Квантум, 2006.
3. John S. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2486.
4. Yablonovich E. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 2059.
5. Norris D. J., Arlinghaus E. G., Meng L. et al. Opaline Photonic Crystals: How Does Self-Assembly Work? // Adv. Mater. 2004. Vol. 16. P. 1393–1399.
6. Serdobintseva V. V., Kalinin D. V., Danilyuk A. F. et al. Supramolecular Crystal Growth in Concentrated Suspensions of Charged Monodisperse Spherical Silica Particles // React. Kinet. Catal. Lett. 1999. Vol. 68. No. 2. P. 313.
7. Плеханов А. И., Калинин Д. В., Сердобинцева В. В. Нанокристаллизация монокристаллических пленок опала и пленочных опаловых гетероструктур // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1–2. С. 233.
8. Frolov S. V., Vardeny Z. V., Zakhidov A. A. et al. Laser-Like Emission in Opal Photonic Crystals // Optics Communications. 1999. Vol. 162. P. 241–246.
9. Shkunov M. N., DeLong M. C., Raikh M. E. et al. Photonic Versus Random Lasing in Opal Single Crystals // Synthetic Metals. 2001. Vol. 116. P. 485–491.
10. Алимов О. К., Басиев Т. Т., Орловский Ю. В. и др. Преобразование люминесценции лазерных красителей в вынужденное излучение в опаловой матрице // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 7. С. 665–669.
11. Polson R. C., Chipouline A., Vardeny Z. N. Random Lasing in  $\pi$ -Conjugated Films and Infiltrated Opals // Advanced Materials. 2001. Vol. 13. No. 10. P. 760–764.
12. Shkunov M. N., DeLong M. C., Polson R. C. et al. Tunable, Gap-State Lasing in Switchable Directions for Opal Photonic Crystals // Advanced Functional Materials. 2002. Vol. 12. No. 1. P. 21–26.
13. Noginov M. A., Noginova N. E., Caulfield H. J. et al. Line Narrowing in the Dye Solution with Scattering Centers // Opt. Commun. 1995. Vol. 118. P. 430–437.
14. Dowling J. P., Scalora M., Bloemer M. J. et al. The Photonic Band Edge Laser: A New Approach to Gain Enhancement // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. P. 4.
15. Bechger L., Lodahl P., Vos W. L. Directional Fluorescence Spectra of Laser Dye in Opal and Inverse Opal Photonic Crystals // J. Phys. Chem. B. 2005. Vol. 109. P. 9980–9988.
16. Yang Y., Turnbull A. G., Samuel D. W. Sensitive Explosive Vapor Detection with Polyfluorene Lasers // Advanced Functional Materials. 2010. Vol. 20. P. 1–5.

Материал поступил в редколлегию 29.11.2010

I. S. Dianov, A. I. Plekhanov

### LASING IN OPAL-LIKE STRUCTURES

The features of lasing in three-dimensional photonic crystals like bulk opals and single-crystalline thin films based on silica nanospheres have been investigated. Random lasing in bulk opals with defect structure as feedback system has been showed. The realization of DFB-lasing in single-crystalline thin films with the periodic structure of photonic crystal as feedback system has been established. Radiation directivity has been narrower and lasing threshold has been almost three times less in the case of using single-crystalline thin films as compared to ones in the case of using bulk opals.

*Keywords:* 3D photonic crystal, random lasing, distributed feedback.