

Компактный лазер на красителе со стационарной распределенной обратной связью на основе гелеобразного желатина, допированного эозином Н

В. М. Катаркевич, Т. Ш. Эфендиев

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск;
e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by*

Сообщается о реализации компактного и экологичного лазера на красителе со стационарной распределенной обратной связью (РОС) на основе новой светочувствительной активной среды - геля биополимера (желатин), допированного эозином Н. В таком лазере для получения генерации перестраиваемого узкополосного излучения используются стационарные фазовые пространственные решетки соответствующего субмикронного периода, записанные на различных участках рабочей поверхности геля. Запись пространственных решеток и возбуждение генерации осуществлялись излучением второй гармоники ($\lambda_p = 523,5$ нм) субнаносекундного ($\tau_{0,5} \sim 0,3$ нс) твердотельного Nd:YLF микролазера с диодной накачкой. Диапазон перестройки длины волны генерации РОС-лазера составил 548–597 нм при ширине спектра $\Delta\lambda_L < 0,1$ нм, КПД генерации до $\sim 19\%$ и ресурсе работы отдельной зоны активной среды с решеткой $N > 4 \times 10^4$ импульсов.

Ключевые слова: РОС-лазер на красителе, желатиновый гель, стационарные фазовые пространственные решетки, КПД генерации.

Введение

Среди обширного семейства лазеров на красителях особое место занимают лазеры с распределенной обратной связью (РОС), позволяющие без применения внешнего резонатора и спектрально-селективных элементов получать генерацию узкой линии излучения, перестраиваемой в широкой области спектра. В таких лазерах обратная связь и спектральная селекция излучения обеспечиваются за счет обратного брэгговского рассеяния световых волн на периодической пространственной структуре (решетке) показателя преломления и/или коэффициента усиления, сформированной каким-либо образом в активной среде. Причем указанная решетка может иметь как постоянный (стационарная РОС) [1], так и кратковременный быстро обратимый характер (динамическая РОС) [2]. Хотя наиболее удобной возможностью перестройки длины волны обладают лазеры на красителях с динамической РОС, на практике все более широко востребованными оказываются устройства на основе стационарных решеток. Благодаря предельной компактности, низкой стоимости, независимости ширины линии генерации от спектрального состава и расходимости излучения накачки, РОС-лазеры именно такого типа послужили основой для создания широкого класса миниатюрных интегрально-оптических устройств, включая микрофлюидные, биофотонные, сенсорные устройства, системы типа «lab-on-a-chip» и мн. др. Поэтому дальнейшее совершенствование и развитие таких лазеров является весьма актуальной научной и технической задачей.

Ранее нами был предложен и исследован новый вид самопроявляющегося светочувствительного материала для стационарной фазовой записи – активированный красителем желатиновый гель [3]. В отличие от всех опубликованных работ, посвященных записи фазовых голограмм в желатиновых слоях, в предложенной нами среде бихромат аммония не используется. Такая среда позволяет на слоях толщиной ~ 1 мм осуществлять запись одиночных и мультиплексных голограмм как микронного, так и субмикронного периода с высокими значениями дифракционной эффективности и угловой селективности [4, 5]. На основе данной среды был реализован компактный и

эффективный лазер со стационарной РОС, позволяющий получать генерацию как на фиксированной длине волны, так и на нескольких длинах волн одновременно [6]. Такой лазер является весьма подходящим источником излучения для биологии, медицины и экологии. Однако с точки зрения применения в указанных областях, он не в полной мере удовлетворял такому важному требованию, как экологичность. Это связано с использованием в качестве активной среды РОС-лазера родаминов, большинство из которых являются токсичными соединениями [7].

В настоящей работе сообщается о существенном улучшении экологических характеристик разработанного нами РОС-лазера за счет использования в качестве активной среды эозина Н. Благодаря своей безопасности (Регламент ЕС No. 1272/2008) и уникальным фотохимическим свойствам, данный ксантовый краситель нашел успешное применение в биомедицинской практике [7], в качестве фотосенсибилизатора в регистрирующих средах и других областях [8].

1. Условия эксперимента

В настоящей работе активной средой РОС-лазера служил приготовленный по ранее отработанной технологии [6] водно-спирто-желатиновый гель, допированный красителем эозин Н ($\mu = 691,85$ г/моль). Концентрация желатина и красителя в геле составляла $\sim 0,106$ г/г и $\sim 0,23$ мг/г, соответственно, при концентрации этилового спирта $\sim 0,255$ г/г. Приготовленный раствор заливался в кювету со скошенными окнами и студенился при комнатной температуре в течение не менее одних суток. Кювета с гелем имела размеры $2 \times 2 \times 1,7$ см при объеме активной среды ~ 1 см³. Запись пространственных решеток субмикронного периода в гелевом растворе и последующее возбуждение генерации осуществлялись с помощью излучения 2-й гармоники ($\lambda_p = 523,5$ нм; $\Delta\lambda_{0,5} < 0,005$ нм; $\tau_{0,5} \approx 0,3$ нс) твердотельного Nd:YLF микролазера с диодной накачкой STA-01-8-1047-SH/TH (Standa Ltd., Литва). Размеры контактирующей с входным окном кюветы рабочей поверхности геля составляли $1,3 \times 1,2$ см при размерах облучаемой зоны $1,3 \times 0,026$ см. Коэффициент поглощения раствора на длине волны излучения записи составлял $k \approx 70$ см⁻¹.

Возбуждение в гелевом растворе красителя генерации на основе стационарной РОС осуществлялось при использовании оптической схемы, приведенной на рис. 1.

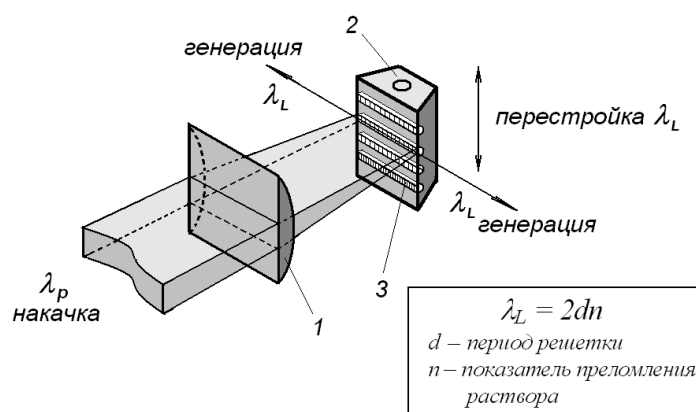


Рис. 1 – Схема возбуждения генерации в лазере на красителе со стационарной РОС:
 1 – цилиндрическая линза; 2 – кювета с гелевым раствором красителя;
 3 – стационарные фазовые пространственные решетки субмикронного периода, записанные в активной среде.

Поперечные размеры зоны возбуждения геля составляли $1,3 \times 0,026$ см. Излучение генерации формировалось в направлении, перпендикулярном штрихам решетки, и представляло собой два симметричных пучка, выводимых через торцевые окна кюветы. Образец с записанными решетками устанавливался на юстируемый держатель, снабженный вертикальной подвижкой. Это позволяло плавно менять зону возбуждения, обеспечивая дискретную перестройку длины волны генерации. Измерение энергетических характеристик излучения накачки и генерации осуществлялось откалиброванными по спектральной чувствительности фотодиодами ФД-24К с двухканальным аналого-цифровым преобразователем ADC20M/10–2. Спектральные характеристики измерялись с помощью автоматизированного спектрографа S3804 (разрешение ~ 0.1 нм) и интерферометра Фабри-Перо ИТ 51-30.

2. Результаты измерений

Прежде всего были определены оптимальные условия записи пространственных решеток, обеспечивающие получение максимального КПД генерации РОС-лазера. В процессе выполнения указанных исследований пространственный период решетки составлял $d = 208$ нм, позволяя получать генерацию на длине волны $\lambda_L = 569$ нм (область максимального усиления красителя). Суммарная энергия импульсов двух интерферирующих пучков записывающего излучения составляла $E_r \approx 21,5$ мкДж (плотности энергии $\varepsilon_r \approx 0,64$ мДж/см²) при энергии импульса возбуждения РОС-лазера $E_p \approx 15$ мкДж.

Установлено, что при увеличении дозы облучения геля E КПД генерации РОС-лазера сначала возрастает, достигая своего максимального значения после воздействия на активную среду ~ 1000 записывающих импульсов ($E_{opt} \sim 0,64$ Дж/см²), а затем начинает плавно падать. При дозе облучения геля $E \sim 1$ Дж/см² пороговая энергия возбуждения РОС-лазера не превышала $E_{thr} \sim 4$ мкДж, а КПД генерации составлял $\eta \sim 6,2$ % ($\eta \sim 12,4$ % при учете энергии двух симметричных пучков). Увеличение энергии возбуждения с $E_p \approx 15$ мкДж до $E_p \approx 42$ мкДж сопровождалось соответствующим возрастанием суммарного КПД генерации с $\eta \sim 12,4$ до $\eta \sim 19$ %.

При записи в различных зонах геля пространственных решеток соответствующего периода в РОС-лазере была осуществлена дискретная перестройка длины волны генерации в области 548–597 нм. При этом ширина спектра генерируемого излучения составляла $\Delta\lambda_L < 0,1$ нм.

Одним из практически важных параметров лазера является ресурс работы, под которым обычно принято понимать число импульсов возбуждения, приводящее к 50 %-му падению первоначального КПД генерации. Было установлено, что при энергии импульсов накачки $E_p \sim 15$ мкДж и частоте их следования $f = 10$ Гц ресурс работы отдельной зоны активной среды с записанной решеткой составляет $N \sim 4,2 \times 10^4$ импульсов. Уменьшение энергии возбуждения сопровождалось соответствующим увеличением ресурса работы лазера.

В целом ряде практических применений требуется излучение на строго определенной длине волны λ_L . В таком случае на различных участках геля может быть записана целая серия пространственных решеток одинакового периода d в количестве, определяемом высотой рабочей поверхности геля H и отдельных зон с решетками h , а также величиной зазора между ними Δh . Применительно к условиям нашего эксперимента ($H = 1,2$ см; $h = 0,026$ см) в предположении значения зазора $\Delta h = 0,01$ см на рабочей поверхности гелевого раствора красителя может быть записано ~ 33 пространственных решеток. В результате их последовательного использования при $E_p \sim 15$ мкДж ресурс работы РОС-лазера составит $\sim 1,4 \cdot 10^6$ импульсов.

Заключение

Таким образом, реализован компактный и экологичный РОС-лазер на основе допированного эозином Н желатинового геля с записанными стационарными фазовыми пространственными решетками. Благодаря возможности получения перестраиваемой по длине волны узкополосной генерации субнаносекундной длительности с достаточно высокой эффективностью и ресурсом работы, такой источник может найти практические применения в различных областях, включая медицину, биологию и экологию.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф20СРБГ-006).

Литература

1. Kogelnik H., Shank C. V. Stimulated emission in a periodic structure. Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18, No. 4. P. 152–154.
2. Shank C. V., Bjorkholm J. E., Kogelnik H. Tunable distributed-feedback dye laser. Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18, No. 9. P. 395–396.
3. Efendiev T.Sh., Katarkevich V.M., Rubinov A.N., Stupak A.P. Spectral–Luminescent and Generation Characteristics of a Gel–Like Gelatin Doped with a Dye. J. Appl. Spectrosc. 2001. V. 68, No. 1. P. 124–129.
4. Efendiev T.Sh., Katarkevich V.M., Rubinov A.N. Recording volume holograms in dye-activated aqueous gelatin gel. Tech. Phys. Lett. 2006. V. 32, No. 11. P.945–947.
5. Katarkevich V.M., Rubinov A.N., Efendiev T.Sh. Highly efficient volume hologram multiplexing in thick dye-doped jelly-like gelatin. Opt. Lett. 2014. V. 39, № 15. P. 4627–4630.
6. Эфендиев Т.Ш., Катаркевич В.М., Каджар Ч.О., Карамалиев Р.А., Измайлов А.Ч. Малогабаритный лазер на красителях со стационарной распределенной обратной связью. Известия НАН Азербайджана. 2009. Т. 29, № 5. С. 67–73.
7. Sabnis R. W. Handbook of Biological Dyes and Stains: Synthesis and Industrial Applications (Edition 1). Wiley. 2010.
8. <https://pcgroup.ru/blog/eozin-i-ego-soli-krasiteli-shirokogo-spektra-primeneniya/>

Compact stationary distributed feedback dye laser based on eosin Y doped jelly-like gelatin

V.M. Katarkevich, T.Sh. Efendiev

*B.I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk;
e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by*

A compact and eco-friendly stationary distributed feedback (DFB) dye laser based on a new photosensitive active medium - eosin Y doped biopolymer (gelatin) gel is realized. In such a laser, to obtain generation of tunable narrow-band radiation, stationary phase spatial gratings of the corresponding submicron period recorded on different areas of the working surface of the gel are used. The spatial gratings recording and the DFB laser excitation were provided by the second harmonic ($\lambda_p = 523,5$ nm) of a diode-pumped solid-state subnanosecond ($\tau_{0.5} \sim 0,3$ ns) Nd:YLF microlaser. The tuning range of the DFB lasing wavelength was 548–597 nm upon a spectrum width of $\Delta\lambda_L < 0.1$ nm, generation efficiency up to ~ 19 % and service life of a separate zone of the active medium with a grating $N > 4 \times 10^4$ pulses.

Keywords: DFB dye laser, gelatin gel, stationary phase spatial gratings, generation efficiency