

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ СО СТАЦИОНАРНОЙ  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

**Т.Ш.ЭФЕНДИЕВ<sup>1</sup>, В.М.КАТАРКЕВИЧ<sup>1</sup>, Ч.О.КАДЖАР<sup>2</sup>,  
Р.А.КАРАМАЛИЕВ<sup>3</sup>, А.Ч.ИЗМАЙЛОВ<sup>2</sup>**

*Институт Физики им.Б.И.Степанова НАН Беларуси<sup>1</sup>  
220072, Беларусь, г.Минск, пр.Независимости, 68  
Институт физики НАН Азербайджана<sup>2</sup>  
AZ 1143, г.Баку, пр.Г.Джавида,33  
Бакинский Государственный Университет<sup>3</sup>  
AZ 1148, г.Баку, ул.З.Халилова,23*

Приведены результаты исследований генерационных характеристик компактного лазера на красителях со стационарной распределенной обратной связью (РОС) на основе желатинового геля, допированного красителем родамин 6Ж. С целью обеспечения генерации на основе РОС в активной среде была осуществлена запись стационарных пространственных решеток требуемого периода с помощью излучения 2-й гармоники ( $\lambda=532\text{нм}$ ) наносекундного АИГ:Nd-лазера. При оптическом возбуждении геля излучением 2-й гармоники наносекундного АИГ:Nd-лазера, а также излучением субнаносекундного Nd-LSB микролазера с диодной накачкой ( $\lambda=531\text{нм}$ ) в РОС-лазере получено узкополосное излучение генерации как на одной, так и одновременно на нескольких длинах волн в спектральной области 554÷598нм с максимальным КПД преобразования по энергии до 30%. Благодаря своей низкой стоимости, простоте и достаточно высоким выходным характеристикам реализованный РОС-лазер представляется весьма перспективным для применения в медицине, биологии и экологии.

**ВВЕДЕНИЕ**

Для решения ряда спектроскопических задач, где не нужна большая мощность излучения, желательна иметь надежный и простой по конструкции лазер со спектральной шириной линии излучения в несколько десятых долей ангстрема и хорошей воспроизводимостью параметров. Весьма подходящими для этих целей являются лазеры на красителях с распределенной обратной связью (РОС).

В настоящее время достигнут значительный прогресс в исследовании и разработке таких лазеров. Реализован целый ряд оптических схем РОС-лазеров, продемонстрированы такие их достоинства, как малая спектральная ширина линии излучения, широкий диапазон перестройки, высокий КПД, возможность получения генерации импульсов пикосекундной и фемтосекундной длительности как при пикосекундном, так и наносекундном возбуждении [1-11]. Следует также отметить простоту конструкции, технологичность в производстве и удобство в эксплуатации таких лазеров. Создание РОС-лазеров с высокими выходными характеристиками обусловило их применение в научных исследованиях [12-15].

До настоящего времени на практике использовались лазеры на красителях с динамической РОС. Как известно, ширина спектра генерации такого РОС-лазера существенно зависит от монохроматичности накачки. Уширение линии генерации  $\Delta\lambda_L$  РОС-лазера связано с шириной спектра накачки  $\Delta\lambda_p$  соотношением

$$\Delta\lambda_L = (\lambda_L/\lambda_p) \Delta\lambda_p, \quad (1)$$

где  $\lambda_p$  и  $\lambda_L$  - длины волн излучения накачки и генерации.

При увеличении спектра накачки до нескольких ангстрем интерференционная структура в области взаимодействия пучков накачки настолько размывается, что РОС становится неэффективной и вместо лазерного эффекта наблюдается только усиленная люминесценция. Прямая зависимость характеристик РОС-лазера от спектрального состава накачки ограничивает

возможности получения узких спектральных линий в излучении лазера на красителях и ухудшает его энергетическую и спектральную стабильность. В этом отношении РОС-лазер со стационарной решеткой обладает преимуществом, так как спектральная ширина линии генерации такого лазера не зависит от ширины спектра и расходимости излучения источника накачки. При этом такой лазер имеет минимальные габариты, так как его размер, по существу, совпадает с размером активной среды.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нами реализован лазер на красителях со стационарной РОС на основе допированного красителем желатинового геля. В отличие от всех опубликованных работ, посвященных записи фазовых голограмм в желатиновых слоях, в предложенной нами среде бихромат аммония не используется. Установлено, что такая среда позволяет записывать стационарные объемные решетки с высоким пространственным разрешением. Запись решеток осуществляется излучением импульсного лазера. Предложенная среда обладает свойством самопроявления и, тем самым, не требует постэкспозиционной обработки [16]. Интерференционная структура проявляется в материале по мере записывания решетки. Записанные решетки достаточно долговечны и сохраняют свои свойства в течение многих месяцев. Такие решетки обеспечивают достаточно эффективную распределенную обратную связь и позволяют получать генерацию излучения с узкой спектральной линией. Длина волны генерации такого лазера определяется периодом стационарной решетки  $d$  и показателем преломления геля  $n$

$$\lambda_L = 2dn. \quad (2)$$

В экспериментах использовались слои водно-глицерино-желатинового геля, допированного красителем. Способ приготовления такого геля сводился к следующему. Приготавливался раствор красителя в глицерине при комнатной температуре. Концентрация красителя родамин 6Ж в растворе составляла  $8.3 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Три части раствора красителя смешивались с 5.5 частями дистиллированной воды. Полученный раствор добавлялся к 1 части (по весу) желатина, который набухал в нем в течение 2 часов при комнатной температуре в защищенном от света месте. Затем водно-глицерино-желатиновый раствор нагревался до температуры  $t = 50^{\circ}\text{C}$  и при тщательном периодическом перемешивании выдерживался в течение 1 часа при этой температуре. Приготовленный таким образом раствор (концентрация красителя при этом составляла  $C \sim 2.5 \cdot 10^{-4}$  моль/л) заливался в кювету со скошенными окнами и студенился при комнатной температуре в течение не менее одних суток.

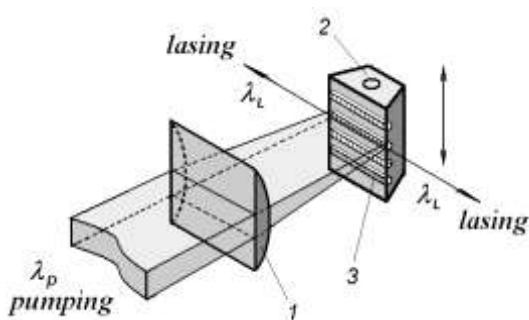
Запись пространственных решеток в приготовленном геле осуществлялась двумя сходящимися пучками излучения второй гармоники АИГ:  $\text{Nd}^{+3}$ -лазера при использовании оптической схемы, описанной в [17]. Спектральная ширина излучения второй гармоники составляла  $\Delta\lambda_{0.5} \approx 6 \cdot 10^{-3}$  нм, энергия импульса достигала  $E_r \sim 20$  мДж, длительность  $\tau_{0.5} \approx 17$  нс, частота следования импульсов  $f$  – до 50 Гц. Размеры входной грани кюветы с гелем составляли  $1.2 \times 2$  см, а размеры облучаемой зоны на поверхности геля –  $1 \times 0.01$  см.

Измерение энергетических характеристик излучения накачки и генерации осуществлялось калиброванными по спектральной чувствительности фотодиодами ФД-24К с двухканальным аналого-цифровым преобразователем ADC20M/10–2. Спектральные характеристики измерялись с помощью автоматизированного спектрографа S3804 (спектральное разрешение  $\sim 0.1$  нм) и интерферометра Фабри-

Перо ИТ 51-30. Измерение временных характеристик осуществлялось с помощью электронно-оптической камеры "Агат-СФ3" с временным разрешением до 1.9пс.

Возбуждение генерации в гелевом растворе красителя на основе стационарной РОС осуществлялось излучением второй гармоники наносекундного АИГ:Nd<sup>3+</sup>-лазера, а также микролазера с диодной накачкой STA-01SH3 [18]. Параметры излучения наносекундного лазера приведены выше. Длительность одиночного импульса излучения второй гармоники ( $\lambda=531\text{нм}$ ) микролазера STA-01SH3 составляла  $\tau_{0.5}\sim 0.5\text{нс}$ , энергия импульса  $\sim 50\text{мкДж}$ , частота следования импульсов до кГц.

Пучок излучения второй гармоники, предварительно расширенный десятикратным телескопом, а затем сфокусированный с помощью цилиндрической линзы в горизонтальную полоску, направлялся по нормали на поверхность слоя геля с записанной решеткой (Рис.1). Поперечные размеры зоны возбуждения геля составляли  $1\times 0.01\text{см}$ . Излучение генерации формировалось в направлении перпендикулярном штрихам решетки и представляло собой два симметричных пучка, выводимых через торцевые окна кюветы. Образец с записанной решеткой устанавливался на юстируемый держатель, снабженный вертикальной подвижкой.



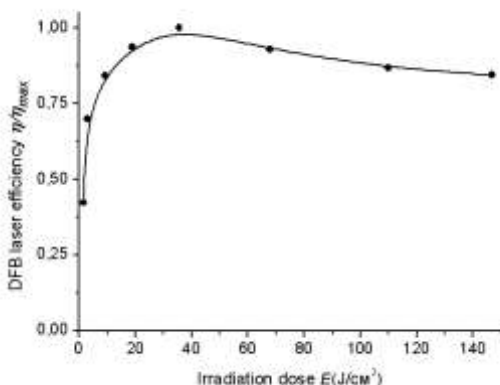
Это позволяло плавно менять зону возбуждения, обеспечивая получение большего ресурса работы.

**Рис.1.**

Схема возбуждения генерации в лазере на красителях со стационарной РОС: 1 – цилиндрическая линза; 2 – кювета с гелевым раствором красителя; 3 – стационарная фазовая решетка соответствующего периода, записанная в активной среде.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

На Рис.2 представлена измеренная зависимость относительного КПД генерации  $\eta/\eta^{max}$  от дозы облучения геля при записи решетки. Видно, что при увеличении дозы облучения КПД генерации РОС-лазера возрастает, достигая своего



максимального значения при  $E\sim 35\text{Дж/см}^2$ . Пороговая энергия возбуждения в этом случае составляла  $E_{th}\sim 25\text{мкДж}$ . Дальнейшее увеличение экспозиции приводило к плавному снижению эффективности генерации лазера и возрастанию порога.

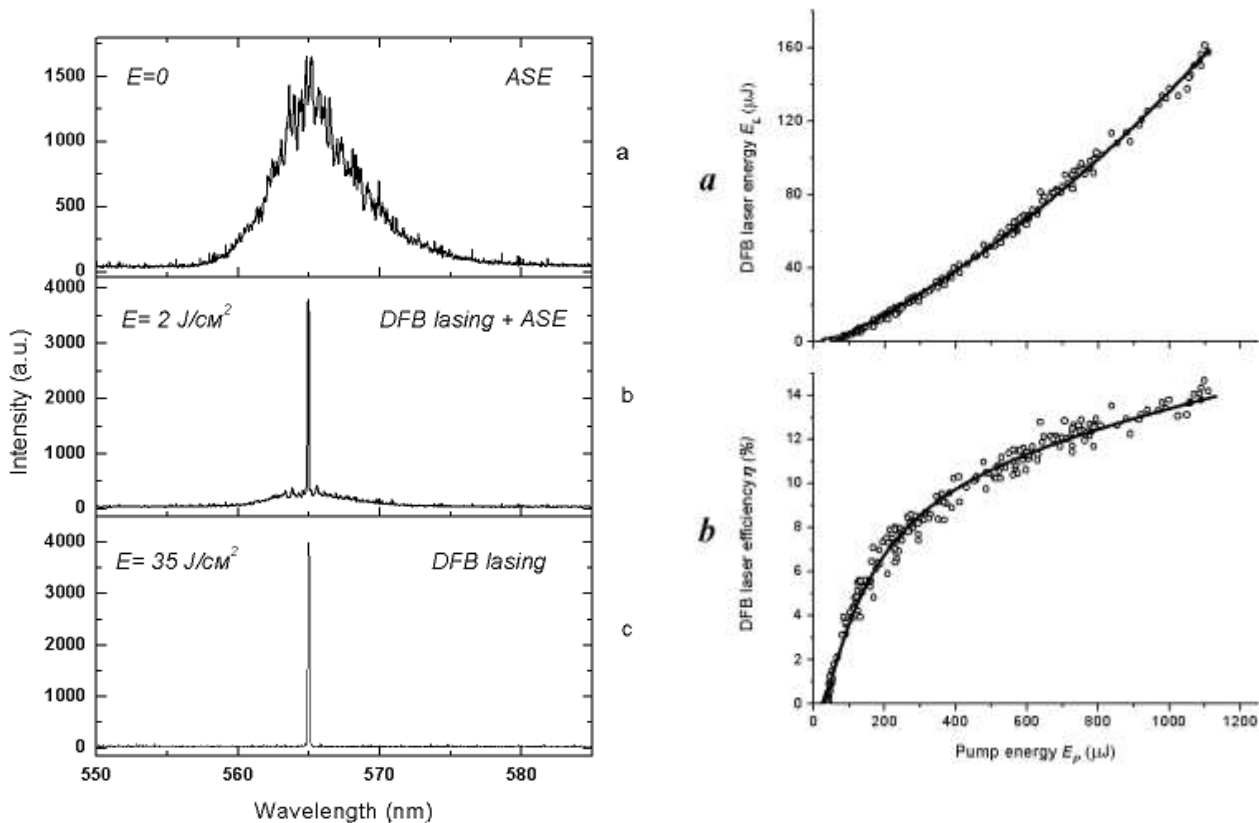
**Рис.2.**

Зависимость КПД генерации РОС-лазера от дозы облучения геля при записи решетки (период решетки  $d=201.8\text{нм}$ ; плотность энергии импульсов записи  $\varepsilon\approx 25\text{мДж/см}^2$ ).

Рис.3 демонстрирует влияние дозы облучения гелевого раствора красителя  $E$  при записи стационарной фазовой решетки на спектр выходного излучения такой активной среды. Из представленного рисунка видно, что при наличии в активной среде пространственной решетки достаточно высокой эффективности фон

усиленного спонтанного излучения (УСИ) в выходном излучении РОС-лазера отсутствует.

При использовании набора решеток соответствующего периода, записанных в различных зонах геля, была легко реализована дискретная перестройка длины волны генерации РОС-лазера в диапазоне 554 ÷ 598 нм. Это достигалось при плавном перемещении кюветы с гелем в вертикальной плоскости относительно



фиксированного пучка накачки (Рис.1). Минимальный шаг перестройки в нашем случае составлял ~0.05 нм.

**Рис.3.**

Спектр выходного излучения активированного родамином 6Ж желатинового геля в зависимости от дозы облучения среды  $E$  при записи стационарной пространственной решетки (период решетки  $d=201.8$  нм;  $\lambda_L=565$  нм; энергия импульса накачки  $E_P \sim 200$  мкДж).

**Рис.4.**

Зависимость энергии (а) и КПД генерации РОС-лазера на стационарной решетке (б) от энергии накачки ( $\lambda_L=565$  нм).

Результаты измерений зависимости энергии и КПД генерации РОС-лазера от энергии возбуждения представлены на Рис.4 (при этом учитывалась энергия лишь одного из двух симметричных пучков). Из приведенного рисунка видно, что указанные зависимости носят нелинейный характер и при используемых значениях энергии возбуждения ( $E_P \leq 1.1$  мДж) КПД генерации достигает  $\eta \sim 14\%$ .

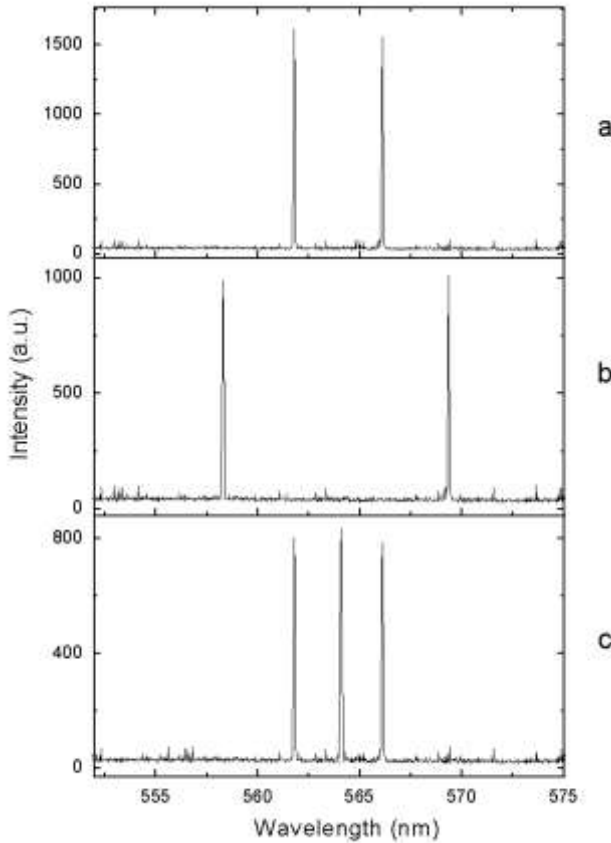
Известно, что энергетические характеристики РОС-лазера при наносекундном возбуждении могут быть значительно улучшены при использовании внешнего зеркала, возвращающего один из пучков генерации в активную среду. Тем самым достигается однонаправленный вывод генерируемого излучения. В нашем случае

при использовании внешнего алюминиевого зеркала порог генерации понижался почти в 2 раза (до  $E_{th} \approx 14 \text{ мкДж}$ ), а КПД генерации достигал  $\eta \sim 28 \div 30\%$ .

При возбуждении РОС-лазера на допированном красителем геле излучением второй гармоники наносекундного АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$ -лазера и не слишком больших превышениях порога ( $E_p/E_{th} \leq 5 \div 6$ ) спектральная ширина линии генерации составляла  $\Delta\lambda_L \leq 0.01 \text{ нм}$ . При дальнейшем увеличении накачки линия уширялась до значения  $\Delta\lambda_L = 0.03 \div 0.06 \text{ нм}$ . Температурная чувствительность длины волны генера-

ции исследованного геля составляла  $d\lambda/dT \approx 0.065 \text{ нм/град}$ , что более чем в 3 раза меньше аналогичной характеристики традиционного РОС-лазера на этанольных растворах красителей.

В ряде случаев при проведении спектроскопических исследований необходимо иметь лазерное излучение одновременно на двух или более длинах волн. Проведенные нами исследования показали, что в разработанном лазере со стационарной РОС данная задача может быть решена чрезвычайно простым способом – путем записи в одном и том же объеме активной среды пространственных решеток различного периода. Запись пространственных решеток различного периода осуществлялась изменением угла интерференции двух пучков записывающего излучения. В лазере со стационарной РОС получена устойчивая генерация одновременно на двух и трех длинах волн в пределах полуширины контура усиления активной среды (Рис.5).



**Рис.5.**

Одновременная генерация в лазере на красителях со стационарной РОС двух (а, б) и трех (в) линий излучения примерно одинаковой интенсивности, распространяющихся в одном канале.

Пороговое энергетическое условие генерации для волны  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) имеет вид

$$\sigma_{ei} N = \frac{1}{\tau_{ni}}, \quad (3)$$

где  $N$  – концентрация молекул в возбужденном состоянии,  $\sigma_{ei}$  – сечение вынужденного излучения молекул красителя на длине волны генерации  $\lambda_i$ ,  $\tau_{ni}$  – время жизни фотона в резонаторе определяемое формулой

$$\tau_{ni} = \frac{n_i L^3 \Delta n_i^2}{2c \lambda_i^2}, \quad (4)$$

здесь  $n_i$  и  $\Delta n_i$  показатель преломления и его амплитуда модуляции, соответствующие длине волны  $\lambda_i$ ,  $L$  – длина периодической решетки,  $c$  – скорость света в вакууме.

Согласно формулам (3) и (4) возможно получение одновременной генерации на нескольких различных длинах волн  $\lambda_i$  (соответствующим сечениям  $\sigma_{ei}$ ) с близкими интенсивностями путем подстройки соответствующих амплитуд модуляции показателя преломления  $\Delta n_i$ . Именно таким образом на эксперименте была реализована одновременная генерация в РОС-лазере двух и трех линий излучения примерно одинаковой интенсивности (Рис.5). Доза облучения гелевого раствора красителя при записи пространственных решеток различного периода подбиралась таким образом, чтобы интенсивность излучения РОС-лазера на каждой из одновременно генерируемых линий была примерно одинаковой. Минимальное расстояние между одновременно генерируемыми линиями излучения составляло примерно 0,09нм при спектральной ширине отдельных линий равной 0,01нм. Следует отметить, что пучки генерации, соответствующие различным частотам, пространственно полностью совпадают, что весьма удобно с точки зрения практического использования многочастотного излучения. В пределах рабочей поверхности геля могут быть записаны пространственные решетки различного периода в любой комбинации. Тем самым достигается возможность дискретной перестройки длины волны генерации с любым шагом (вплоть до 0.05нм) в пределах контура усиления красителя по заранее заданной программе.

Важным параметром лазера является ресурс работы. При энергии импульса накачки  $E_p \sim 0.1$ мДж после воздействия на активную среду  $\sim 6 \cdot 10^3$  возбуждающих импульсов энергия генерации понижалась всего на 20%. На рабочей поверхности геля возможна запись примерно 70 стационарных решеток. При поочередном использовании всех зон ресурс работы может составлять  $\sim 10^7$  импульсов при практически неизменной выходной энергии генерации.

При возбуждении геля с родамином 6Ж излучением 2-ой гармоники ( $\lambda_p=531$ нм) микролазера STA-01SH3 получена генерация излучения со спектральной шириной 0.01÷0.03нм, эффективностью преобразования до  $\sim 28\%$  и высокой энергетической стабильностью – 2÷4%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований продемонстрировано, что РОС-лазер на основе допированного красителем желатинового геля со стационарной решеткой позволяет получать узкополосную генерацию с достаточно высокими выходными характеристиками. Ширина спектра излучения такого лазера не зависит от ширины спектра и расходимости излучения источника накачки, что делает его особенно удобным для практических применений. При этом имеется простая возможность одновременной коллинеарной генерации на нескольких частотах. На базе данной среды могут быть также реализованы варианты, обеспечивающие как непрерывную, так и дискретную, по заданному закону, перестройку длины волны излучения. РОС-лазеры такого типа могут найти практические применения в медицине, биологии и экологии.

Работа выполнена в рамках азербайджанско-беларусского проекта на тему: «Компактные РОС- лазеры для экологических и спектроскопических применений» (2008-2009г.г.).

1. C.V.Shank, J.E.Bjorkholm, H.Kogelnik, *Appl. Phys. Lett.*, **18** (1971) 395.
2. Т.Ш.Эфендиев, А.Н.Рубинов, *ЖПС*, **21** (1974) 526.
3. А.Н.Рубинов, Т.Ш.Эфендиев, *ЖПС*, **27** (1977) 634.
4. Zs. Bor, *IEEE J. Quantum Electron*, **QE-16** (1980) 517.
5. А.Н.Рубинов, Т.Ш.Эфендиев, *Квантовая электроника*, **9** (1982) 2359.

6. A.N.Rubinov, T.Sh.Efendiev, *Optica Acta*, **32** (1985)1291.
7. Е.А.Ермилов, И.М.Гулис, *Квантовая электроника*, **31** (2001) 857.
8. N.Khan, T.A.Hall, *Optics Comms.*, **228** (2003) 177.
9. R.Sailajaa, P.B.Bisht, *Organic Electronic*, **8** (2007) 175.
10. F.Chen, D.Gindre, J.-M.Nunzi, *Opt.Lett.*, **32** (2007) P.805.
11. Y.Chen, Zh.Li, Zh.Zhang, D.Psaltis, A.Schere, *Appl. Phys. Letts.*, **91** (2007) P.051109-1.
12. P.P.Yaney, Dahv A.V.Kliner, Paul E.Schrader, Roger L. Farrow, *Review of Scientific Instruments*, **71** (2000) 1296.
13. N.Takeyasu, N.Deguchi, M.Tsutsumikawa, J.Matsumoto, T.Imasaka, *Anal. Sci.*, **18** (2002) 243.
14. Y.Oki, S.Miyamoto, M.Maeda, N.J.Vasa, *Optics Letters*, **27** (2002)1220.
15. T.Ushimura, S.Kawanabe, Y.Maeda, T.Imasaka, *Analytical Sciences*, **22** (2006) 1291.
16. Т.Ш.Эфендиев, В.М.Катаркевич, А.Н.Рубинов, *Письма в ЖТФ*, **32** №21 (2006) 62.
17. Ш.Эфендиев, В.М.Катаркевич, А.Н.Рубинов, *Способ создания светочувствительной среды для записи объемных голограмм излучением второй гармоники АИГ:Nd-лазера*, Патент №9613, Республики Беларусь.
18. [http://www.standa.lt/products/catalog/lasers\\_laser\\_accessories?item=190&prod=diode\\_pumped\\_nd\\_lsb\\_solid\\_state\\_micro\\_laser](http://www.standa.lt/products/catalog/lasers_laser_accessories?item=190&prod=diode_pumped_nd_lsb_solid_state_micro_laser)

#### **KIÇIK QABARITLI STASIONAR PAYLANMIŞ ƏKS RABİTƏLİ BOYA LAZERI**

**T.Ş.ƏFENDİYEV, V.M.KATARKEVİÇ, Ç.O.QACAR, R.A.KƏRƏMƏLİYEV, A.Ç.İZMAYLOV**

Rodamin 6G boyası hopdurulmuş jelatin gel əsasında kompakt stasionar paylanmış əks rabitəli (PƏR) lazerin generasiya xarakteristikalarının tədqiqi nəticələri verilmişdir. PƏR lazerdə generasiya yaratmaq üçün nanosaniyəli AİG:Nd lazerinin 2-ci harmonikası ( $\lambda=531\text{nm}$ ) ilə fəal mühitdə tələb olunan periodlu stasionar faza qəfəsləri qeyd olunmuşdur. AİG:Nd lazerinin 2-ci harmonikası və həmçinin diodla həyəcanlaşdırılan subnanosaniyəli Nd-LSB ( $\lambda=531\text{nm}$ ) microlazeri ilə optik həyəcanlaşdırma nəticəsində PƏR lazerdə həm nazik zolaqlı bir və həm də 554÷598nm spektral intervalda eyni zamanda bir heçə dalğa uzunluğunda enerjisinin maksimal çevrilmə f.i.ə. 30% qədər olan generasiya alınmışdır. Alınmış PƏR lazerin ucuzluğu, sadəliyi və kifayət qədər yüksək xarakteristikaları onun tibbdə biologiyada və ekologiyada tətbiqlərini olduqca perspektivli edir.

#### **COMPACT DYE LASER WITH A STATIONARY DISTRIBUTED FEEDBACK**

**T.Sh.EFENDIYEV, V.M.KATARKEVICH, Ch.O.QAJAR, R.A.KARAMALIYEV,  
A.Ch.IZMAILOV**

The output characteristics of a compact dye laser with a stationary distributed feedback (DFB) on the basis of gelatinous gel doped with a dye rhodamine 6G have been presented. To provide the DFB laser action, stationary spatial gratings of necessary periods have been recorded inside the active medium using the 2-nd harmonic radiation ( $\lambda=532\text{nm}$ ) from the nanosecond Nd-YAG laser. A DFB laser has been optically pumped with frequency-doubled nanosecond Nd-YAG laser as well as with diode-pumped subnanosecond Nd-LSB micro laser ( $\lambda=531\text{nm}$ ) providing narrow-linewidth radiation ( $\Delta\lambda\sim 0.01\text{nm}$ ) both at a single and several frequencies simultaneously in the spectral range of 554÷598nm with energy conversion efficiency up to ~30% . Thanks to its low cost, simplicity and rather high output characteristics, a DFB laser has realized seems to be a very promising one for application in medicine, biology, and ecology.