

# Переключение длины волны генерации в золь-гельном лазере с динамической распределенной обратной связью

**В.Г.Баленко**, А.Н.Труфанов, Б.А.Уманский, С.М.Долотов, В.А.Петухов

*Предложена схема переключения длины волны лазерной генерации активных центров в золь-гельной матрице, возбуждаемой излучением внешнего лазера. Распределенная обратная связь создавалась в процессе накачки с помощью прямоугольной призмы за счет интерференции прямого и отраженного излучения накачки. Длина волны генерации определяется периодом интерференционной картины, который зависит от угла схождения интерферирующих лучей. Управление осуществляется с помощью жидкокристаллической ячейки, изменяющей поляризацию излучения накачки, и двулучепреломляющей призмы, результирующим действием которых является изменение угла схождения интерферирующих лучей и, как следствие, изменение периода интерференционной картины и длины волны возбуждаемого излучения.*

**Ключевые слова:** лазер на красителях, золь-гельная матрица, динамическая распределенная обратная связь, жидкокристаллическая ячейка.

## 1. Введение

В лазерной технике, особенно в области информационных технологий, широкое распространение получили миниатюрные твердотельные лазеры на активных центрах. Возбуждение излучения в этих лазерах может осуществляться как электрическим током, так и излучением другого лазера. Обратная связь в таких структурах создается с помощью периодического изменения оптических параметров активной среды – так называемой распределенной обратной связи (РОС) [1]. При этом генерируемое излучение распространяется вдоль (активного) слоя, допированного активными центрами, т. е. в данном случае реализуется волноводный режим генерации.

Регулярная модуляция оптических параметров активного слоя может быть постоянной, в виде не меняющегося во времени периодического изменения показателя преломления по образцу. Такая РОС называется морфологической. Кроме того, в случае накачки излучением другого лазера модуляция оптических параметров может возникать только в процессе накачки, например мо-

дуляция коэффициента усиления активной среды. Такая РОС называется динамической или светоиндуцированной и может быть получена при возбуждении активного слоя через периодическую маску (голографическую решетку) или при интерференции пучков когерентного излучения накачки. Распределенная обратная связь, полученная в результате интерференции пучков излучения накачки, имеет еще одно название – голографическая РОС.

Волноводные лазеры могут генерировать в тонких слоях жидких растворов красителей [2, 3], в допированных красителями полимерах [4–6], в жидкокристаллических (ЖК) слоях с красителями [7–9] и в стеклянных матрицах с внедренными в них активными центрами, полученными с помощью золь-гельного процесса [10, 11].

В настоящее время наблюдается значительный интерес к разработке твердотельных лазеров на активных центрах вследствие перспективности их применения в фотонных технологиях, включая дисплейную и лазерную технологии, а также в телекоммуникации. Твердотельные лазеры на активных центрах с динамической РОС генерируют короткие импульсы с узкими линиями излучения и, следовательно, являются перспективными компактными когерентными источниками света. Тонкопленочные волноводные лазеры необходимы для эффективного встраивания в планарные волноводные схемы. В большинстве практических применений в интегральной оптике прямоугольные диэлектрические волноводы являются наиболее часто используемой структурой, на которой основаны многие активные или пассивные устройства (волноводные фильтры, оптические переключатели, мультиплексоры и т. д.).

Стеклянные волноводы имеют определенные преимущества перед полимерными благодаря более высокому показателю преломления. Такой показатель преломления делает возможным изготовление волноводных пленок на большом количестве подложек (боросиликатных стеклах, кварце, плавленом кварце, полимерах и т. д.), а прозрачность в коротковолновой части спектра

**В.Г.Баленко**. ФГУП «Государственный научный центр "НИОПИК"», Россия, 123995 Москва, ул. Б.Садовая, 1, корп. 4; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

**А.Н.Труфанов**. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

**Б.А.Уманский**. Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова РАН, Россия, 119333 Москва, Ленинский просп., 59; e-mail: umanskii@yahoo.com

**С.М.Долотов**. ООО «НПФ "Альфа-Аконис"», Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Лихачевский пр., 5

**В.А.Петухов**. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 24 мая 2011 г.

позволяет получать лазерную генерацию в УФ и синезеленой частях спектра. Неорганические стекла, допированные активными центрами, могут быть изготовлены методом низкотемпературной золь-гельной технологии. Золь-гельный метод хорошо подходит для изготовления активных элементов, т. к. в стеклянную матрицу может быть внедрено большое количество различных типов активных центров, например редкоземельные элементы, полупроводники, органические красители и т. п.

Длина волны генерации  $\lambda_g$  при голографическом методе накачки определяется условием Брэгга и зависит от показателя преломления активной среды  $n$  и угла схождения интерферирующих лучей  $2\theta$ :

$$\lambda_g = \frac{n\lambda_p}{M \sin \theta}, \quad (1)$$

где  $\lambda_p$  – длина волны излучения накачки;  $M$  – порядок брэгговской дифракции. Соответственно управление длиной волны лазерной генерации при голографическом методе накачки может осуществляться путем изменения либо эффективного показателя преломления активной среды, либо угла схождения возбуждающих пучков.

Управление длиной волны лазерной генерации в волноводном лазере при голографическом способе накачки посредством механического изменения угла падения пучка накачки было продемонстрировано в работах [10, 11]. Кроме того, длина волны лазерной генерации может быть изменена с помощью электрического поля, воздействующего, например, на ориентацию жидкого кристалла (ЖК), являющегося активной средой [7, 8]. Следует отметить, что управление длиной волны генерации с помощью электрического поля имеет значительные преимущества перед механическим управлением в скорости, надежности и в простоте реализации. Однако твердотельные лазеры удобнее в применении, чем жидкостные. В данной работе мы предложили и реализовали метод переключения длины волны генерируемого излучения в твердотельном лазере на основе золь-гельной матрицы с красителем с помощью электрического поля, изменяющего угол падения пучка накачки.

## 2. Методика эксперимента

На рис.1 изображена схема лазерного элемента, поясняющая способ получения лазерной генерации с переключаемой длиной волны излучения при изменении угла падения пучка накачки. Возбуждение осуществляется второй гармоникой излучения  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера с помощью прямоугольной призмы. Пучок накачки проходит через поляризатор 1 и расширяется телескопической системой, состоящей из двух линз – отрицательной (2) и положительной (3). Затем он фокусируется цилиндрической линзой 4 в узкую тонкую полоску и проходит через электрооптический дефлектор 5. Далее пучок падает на гипотенузную грань прямоугольной призмы 6 с нанесенным на одну из ее катетных граней отражающим слоем 7. На другой катетной грани установлен образец золь-гельной стеклянной пластины 9, допированной активными центрами (красителем родамин 4С), который находится в оптическом контакте, обеспеченном иммерсионным слоем (силиконовым маслом), с гранью призмы 8. Часть излучения накачки падает непосредственно на грань, контактирующую с золь-гельным образцом. Другая

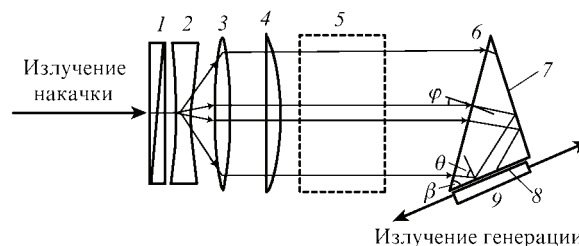


Рис.1. Схема лазерного элемента:

1 – поляризатор для создания необходимой линейной поляризации света; 2 – отрицательная линза; 3 – положительная линза; 4 – цилиндрическая линза; 5 – электрооптический дефлектор; 6 – прямоугольная призма; 7 – отражающий слой прямоугольной призмы; 8 – слой силиконового масла, обеспечивающий оптический контакт золь-гельного образца с призмой; 9 – золь-гельный образец, допированный активными центрами.

часть излучения сначала падает на перпендикулярную грань призмы с нанесенным слоем хрома, далее отражается от нее и также падает на грань, контактирующую с образцом, создавая интерференционную картину. Эта картина представляет собой чередующиеся темные и светлые полосы с периодом  $d$ , определяемым формулой

$$d = \frac{\lambda_p}{2n_1 \sin\{\beta - \arcsin[(\sin \varphi)/n_1]\}}. \quad (2)$$

Здесь  $n_1$  – показатель преломления материала призмы;  $\beta$  – угол призмы, прилегающий к катетной грани, на которой происходит интерференция света;  $\varphi$  – угол падения пучка накачки на гипотенузную грань. Возникает генерация излучения, длина волны которого определяется условием Брэгга (1):

$$\lambda_g = \frac{n\lambda_p}{n_1 M \sin\{\beta - \arcsin[(\sin \varphi)/n_1]\}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что изменение угла падения пучка накачки  $\varphi$  на грань призмы приведет к изменению периода модуляции накачки и соответственно к изменению длины волны генерируемого излучения.

Длина волны генерируемого излучения переключается с помощью электрооптического дефлектора (см. рис.1), управляемого электрическим полем и состоящего из ЖК твист-ячейки и призмы из двулучепреломляющего материала, схема которого представлена на рис.2. Жидкокристаллическая ячейка содержит стеклянные подложки 1, изготовленные из стекла К8. На внутренние поверхности стекол нанесены прозрачные электроды 3, которые представляют собой слои, состоящие из окиси индия и окиси олова. Стеклянные подложки разделены тefлоновыми прокладками 2, задающими толщину ЖК слоя  $d$ . Между стеклами находится нематический жидкий кристалл (НЖК) 6 марки ЖКМ-1289 (НИОПИК). Показатели преломления ЖКМ-1289  $n_{||}$  и  $n_{\perp}$  для направлений, параллельного и перпендикулярного директору ЖК, составляют 1.678 и 1.510 соответственно. Прозрачные электроды покрыты ориентирующим слоем полиимда для создания планарной (в плоскости слоя) ориентации ЖК на поверхности стекол. Направление ориентации задается натиранием поверхностей во взаимно перпендикулярных направлениях на каждом из стекол. Такая ЖК ячейка называется твист-ячейкой. К прозрачным элект-

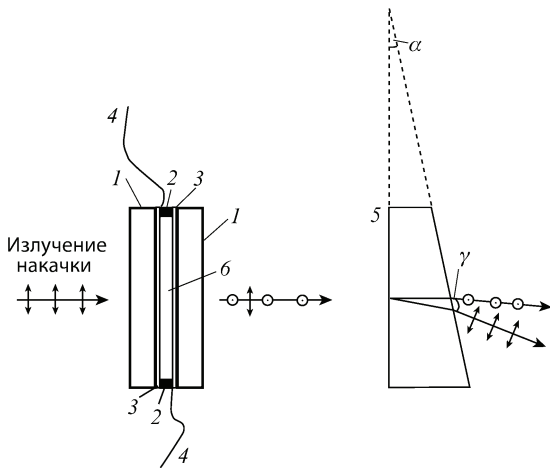


Рис.2. Схема электрооптического дефлектора:

1 – стекло; 2 – прокладки, задающие толщину ЖК слоя; 3 – прозрачные токопроводящие покрытия; 4 – соединительные провода для подачи напряжения на ячейку; 5 – призма из двулучепреломляющего материала; 6 – НЖК.

родам припаяны соединительные провода 4 для подачи напряжения на ячейку.

Принцип действия дефлектора следующий. Пучок линейно поляризованного излучения накачки с длиной волны  $\lambda_p$  после цилиндрической линзы падает на ЖК твист-ячейку. Если параметры НЖК и толщина ячейки удовлетворяют условию Могена  $\lambda_p \ll (n_{||} - n_{\perp})d$ , то твист-ячейка изменяет направление поляризации линейно поляризованного света, прошедшего через нее, на  $90^\circ$ . При подаче напряжения на твист-ячейку НЖК изменяет свою ориентацию с планарно-закрученной на гомеотропную. В этом случае прошедший через твист-ячейку свет сохраняет направление исходной поляризации. Таким образом, с помощью твист-ячейки осуществляется переключение направления линейной поляризации света на  $90^\circ$ .

После прохождения через твист-ячейку линейно поляризованный свет проходит через прямоугольную призму 5 (рис.2) из двулучепреломляющего материала с углом при вершине  $\alpha$ . В общем случае в призме распространяются два луча – обыкновенный и необыкновенный, углы преломления которых определяются показателями преломления для этих лучей  $n_o$  и  $n_e$  соответственно. Можно выбрать направление линейной поляризации луча и направления главных осей двулучепреломляющего материала таким образом, что в призме будет распространяться только один луч – обыкновенный или необыкновенный. На рис.2 изображена призма из двулучепреломляющего материала 5, оптическая ось которого параллельна большой катетной грани призмы и перпендикулярна малой. Если на большую катетную грань падает нормально к поверхности линейно поляризованный свет с направлением поляризации, параллельным оптической оси материала призмы, то в призме будет распространяться только один необыкновенный луч. Если же поляризация падающего луча перпендикулярна оптической оси, то в призме будет распространяться только один обыкновенный луч. Угол  $\gamma$  между обыкновенным и необыкновенным лучами на выходе из призмы определяется соотношением

$$\gamma \approx \alpha(n_e - n_o). \quad (4)$$

Таким образом, при преклоении напряжения на твист-ячейке изменяется поляризация излучения накачки на выходе из нее, а на выходе двулучепреломляющей призмы изменяется угол падения пучка накачки на лазерный элемент и тем самым длина волны генерируемого излучения.

### 3. Результаты эксперимента

Излучение накачки, представляющее собой вторую гармонику излучения  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ -лазера и поляризованное в плоскости рис.2 (направление поляризации обозначено стрелками), падает на ЖК ячейку. При нулевом напряжении на ячейке свет изменяет свою поляризацию на ортогональную и на выходе из ячейки имеет поляризацию, перпендикулярную плоскости рис.2 (направление поляризации обозначено кружочками с точками). При подаче напряжения на ячейку свет на выходе из нее сохраняет исходную поляризацию в плоскости рис.2. Далее свет падает на призму из двулучепреломляющего материала (кальцита  $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ) с показателями преломления  $n_e = 1.660$  и  $n_o = 1.487$  (угол при вершине призмы  $\alpha = 15^\circ$ ) и отклоняется на некоторый угол, зависящий от направления поляризации света. Угол  $\gamma$  между лучами со взаимно перпендикулярными направлениями поляризации в соответствии с формулой (4) составляет  $\sim 2^\circ 35' 42''$ . Далее пучок излучения накачки с той или иной поляризацией падает на гипотенузную грань прямоугольной призмы 6 из стекла К8 с углом при вершине  $\beta = 60^\circ$  (рис.1). Такая геометрия лазерного элемента позволяет получать генерацию в спектральной области вблизи 600 нм для 1-го порядка дифракции Брэгга. На катетную грань призмы 6, составляющую угол  $30^\circ$  с гипотенузной гранью, нанесено отражающее покрытие из хрома. Коэффициент отражения равен  $\sim 70\%$ . Активный элемент (золь-гельное стекло) размером  $10 \times 10 \times 2$  мм допированный лазерным красителем родамин 4С с концентрацией  $6 \times 10^{-5}$  М, прикреплен к другой катетной грани с помощью иммерсионной жидкости. При угле падения пучка накачки на гипотенузную грань  $\varphi = 0$  длина волны генерации  $\lambda_g$  в соответствии с формулой (3) составляет 592.0 нм. При подаче напряжения на ЖК ячейку угол падения пучка накачки изменяется на  $2^\circ 35' 42''$ , а длина волны генерации равна 602.7 нм. Спектры генерации для лазерного элемента данной геометрии приведены на рис.3.

Если угол при вершине двупреломляющей призмы из кальцита составляет  $\sim 4^\circ$ , то угол  $\gamma$  между пучками излучения со взаимно перпендикулярными направлениями поляризации в соответствии с формулой (4) равен  $\sim 41' 31''$ , а угол падения пучка накачки  $\varphi$  при нулевом напряжении на ЖК ячейке составляет  $4^\circ$ . При этом длина волны генерации  $\lambda_g = 608.8$  нм (в соответствии с формулой (3)). При подаче напряжения на ЖК ячейку угол падения пучка накачки изменяется на  $41' 31''$ , а длина волны генерации равна  $\sim 612.0$  нм. Спектры генерации для лазерного элемента данной конструкции приведены на рис.4.

Таким образом, длины волн перестраиваемой лазерной генерации могут варьироваться в широком диапазоне спектра, который зависит от выбора красителя и исходного угла падения пучка накачки  $\varphi$ . Разность переключаемых длин волн зависит от геометрии призмы и показателей преломления двулучепреломляющего мате-

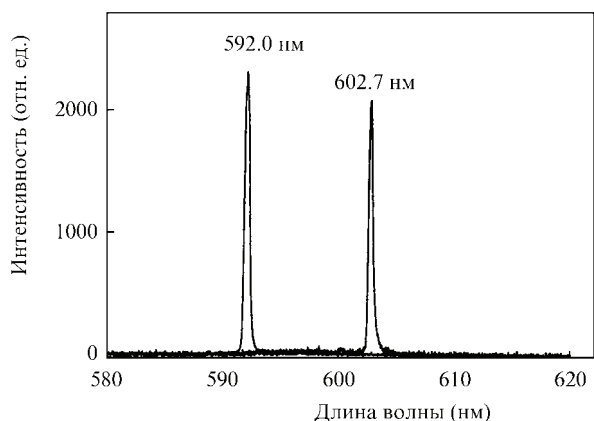


Рис.3. Спектры генерации излучения лазерного элемента с двулучепреломляющей призмой с углом при вершине  $\alpha = 15^\circ$ . Длина волны генерации  $\lambda_g$  при нулевом напряжении на ЖК ячейке составляет 592.0 нм, а при включенном напряжении – 602.7 нм.

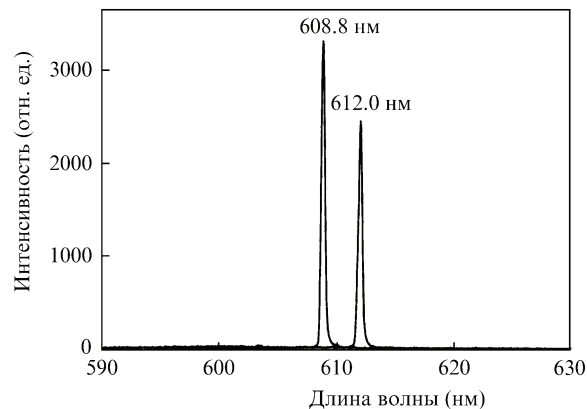


Рис.4. Спектры генерации излучения лазерного элемента с двулучепреломляющей призмой с углом при вершине  $\alpha = 4^\circ$ . Длина волны генерации  $\lambda_g$  при нулевом напряжении на ЖК ячейке составляет 608.8 нм, а при включенном напряжении – 612.0 нм.

риала. Время переключения данного устройства определяется временем срабатывания ЖК твист-ячейки.

1. Kogelnik H., Shank C.V. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 152 (1971).
2. Shank C.V., Bjorkholm J.E., Kogelnik H. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 395 (1971).
3. Bjorkholm J.E., Shank C.V. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 306 (1972).
4. Катаркевич В.М., Рубинов А.Н., Рыжечкин С.А., Эфендиев Т.Ш. *Квантовая электроника*, **21**, 934 (1994).
5. Maeda N., Oki Y., Imamura K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 2146 (1997).
6. Rocha L., Dumarcher V., Denis C., Raimond P., Fiorini C. *J. Appl.*

*Phys.*, **89**, 3067 (2001).

7. Matsui T., Ozaki M., Yoshino K. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 422 (2003).
8. He G.S., Lin T.-Ch., Hsiao V.K.S., Cartwright A.N., Prasad P.N., Natarajan L.V., Tondiglia V.P., Jacubiak R., Vaia R.A., Bunning T.J. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2733 (2003).
9. Уманский Б.А., Барник М.И., Блинов Л.М., Лазарев В.В., Палто С.П., Штыков Н.М., Яблонский С.В., Яковлев С.В. Патент RU 2 341 856 (2006).
10. Zhu X.-L., Lam S.-K., Lo D. *Appl. Opt.*, **39**, 3104 (2000).
11. Balenko V.G., Vitukhnovskii A.G., Drobysh A.I., Kovtun A.V., Leontovich A.M., Mizin V.M., Shalin A.F. *J. Rus. Laser Res.*, **24**, 399 (2003).