

УДК 621.372

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ КВАЗИВОЛНОВОДНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЕ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

Р.Б. АЛАВЕРДЯН, А.В. ВАРДАНЯН, С.Ц. НЕРСИСЯН,
А.Д. ЧИЛИНГАРЯН, Ю.С. ЧИЛИНГАРЯН

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 27 июня 2007 г.)

Экспериментально исследована генерация лазерного излучения в тонком ориентированном слое жидкий кристалл – краситель. Введением в резонатор электроуправляемой, планарно ориентированной жидкокristаллической ячейки осуществлена перестройка длины волны генерации. Исследования проводились в режиме квазिवолноводной генерации.

1. Введение

Миниатюризация, снижение порога, управление длиной волны, а также шириной линии генерации лазера представляют несомненный практический интерес. Значительное снижение порога, укорочение длины волны, а также сужение линии генерации лазера на красителе в жидкокristаллической (ЖК) матрице представляют как физический, так и практический интерес. Физический интерес заключается в том, что мы имеем дело со взаимодействием фазовых переходов различной природы: термодинамическим фазовым переходом между фазами ЖК и излучательным фазовым переходом. Поэтому, в отличие от объемного лазера на красителе в ЖК матрице, исследованного нами ранее [1], привлекательным представляется экспериментальное исследование ориентированной системы краситель – ЖК как лазерноактивной среды.

Теоретически возможность усиления поверхностных волн в плоском диэлектрическом волноводе впервые была показана еще в работе [2]. В настоящее время предложен и практически осуществлен целый ряд активных элементов в виде тонкопленочных волноводов, в которых использованы в основном изотропные растворы красителей. Обзор этих работ можно найти в [3,4]. В работах [5,6] теоретически и экспериментально исследован квазिवолноводный режим генерации в активном изотропном слое.

Квазिवолноводный лазер на красителе представляет собой активный слой с показателем преломления n_2 , заключенный между двумя пассивными

прозрачными диэлектриками с показателями преломления n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$ (рис.1а). В этом случае обычное волноводное распространение не осуществляется из-за отсутствия полного внутреннего отражения (ПВО) на границе слоя. Однако, как экспериментально осуществлено в [7] и подробно теоретически и экспериментально исследовано в [5,6], при достаточном коэффициенте усиления $\alpha > \alpha_{\text{пор}}$ для соответствующих толщин активного слоя d , происходит генерация лазерного излучения в квазिवолноводном активном слое.

В случае малых толщин однородного активного слоя

$$\xi \equiv \left[\frac{\lambda}{2d} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \right]^{-1} \ll 1, \quad (1)$$

где λ – длина волны генерации, получаются следующие пороговые соотношения [5]:

$$\theta = \arccos \left(1 - n_2^2 / n_1^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{пор}} d = 2 \left(n_1^2 / n_2^2 - 1 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где θ – угол выхода излучения генерации в среды с показателем преломления n_1 .

В работах [5,6] показано, что характеристики генерации активного квазिवолноводного слоя большой ($\xi \gg 1$) и малой ($\xi \ll 1$) толщины существенно образом различаются. Например, при $\xi \gg 1$ имеет место многомодовый режим генерации, а при $\xi \ll 1$ генерация является одномодовой.

В настоящей работе экспериментально исследована генерация лазерного излучения в тонком ориентированном слое ЖК – краситель и показана возможность ее управления внутрирезонаторной, электроуправляемой, планарно ориентированной ЖК ячейкой. Исследования проводились в режиме квазिवолноводной генерации.

2. Экспериментальные результаты

В эксперименте по получению квазिवолноводной генерации лазера на красителе в изотропной (спиртовой раствор) и анизотропной (жидкокристаллический раствор) матрице излучение второй гармоники неодимового лазера ($\lambda = 0,53$ мкм) фокусировалось цилиндрической линзой на тонкую пленку смеси красителя. Показатели преломления подложек были больше, чем показатель преломления раствора. Концентрация красителя в растворе подбиралась экспериментально и была $\sim 10^{-3}$ моль/л.

На рис.1а приведена схема тонкопленочного квазिवолноводного лазера на красителе в жидкокристаллической матрице. Пространство между двумя стеклянными подложками с показателем преломления n_1 заполнялось лазерноактивным раствором ЖК и красителя толщиной $d \approx 10$ мкм. Длина

активного слоя $l \approx 10$ мм. Толщина активного слоя задавалась с помощью тефлоновой прокладки. Показатель преломления подложек $n_1 \approx 1,74$ был выбран так, чтобы выполнялось условие $n_1 > n_e, n_o$ во всей области температурного интервала существования мезофазы (n_o, n_e – показатели преломления НЖК для обыкновенной и необыкновенной волн, соответственно).

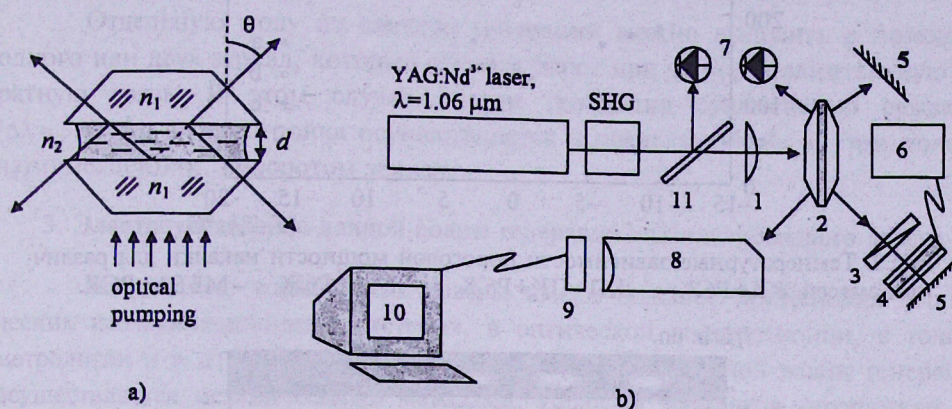


Рис.1. а) Конструкция тонкопленочного квазिवолноводного лазера на красителе; б) схема экспериментальной установки для исследования генерации тонкопленочного лазера на красителе, растворенном в ЖК; ГВГ – кристалл для генерации второй оптической гармоники, 1 – цилиндрическая линза, 2 – квазिवолноводный лазер, 3 – поляризатор, 4 – электроуправляемая ячейка с НЖК, 5 – зеркала, 6 – регулируемый источник напряжения, 7 – фотоприемники, 8 – модернизированный спектрограф ИСП-51 с камерой УФ-90, 9 – CCD-камера, 10 – компьютер, 11 – светоделительная пластинка.

При накачке активного слоя формировались четыре лазерных пучка, которые выходили с двух концов тонкой пленки. Температура ЖК – раствора красителя поддерживалась с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. С помощью зеркал 5 (рис.16) осуществлялась дополнительная обратная связь, которая позволяла перекачивать всю энергию генерации в одну моду. При повороте одного из зеркал можно перестраивать линию генерации в пределах полосы люминесценции красителя.

В качестве активной среды в эксперименте использовались растворы родамина 6Ж (Р6Ж) в ХЖК холестерил пеларгонате (ХП) (с 8% по весу пеларгоновой кислотой (ПК); смесь, использованная нами для объемного ЖК лазера на красителе, см. [1]), и в НЖК ПАА и МББА. На рис.2 приведены температурные зависимости пороговой мощности накачки для квазिवолноводного лазера на красителе. Из рисунка видно, что температурная зависимость пороговой мощности накачки имеет такое же поведение, как и в объемном лазере. Однако понижение порога в области фазового перехода (ФП) получается всего лишь двух-трехкратное по сравнению с областями наибольшей устойчивости фаз.

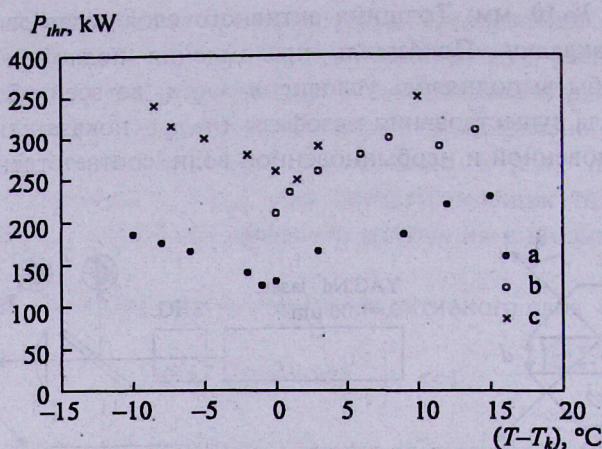


Рис.2. Температурные зависимости пороговой мощности накачки для различных смесей ЖК+Р6Ж; а – ХП+ПК+Р6Ж, б – ПАА+Р6Ж, с – МББА+Р6Ж.

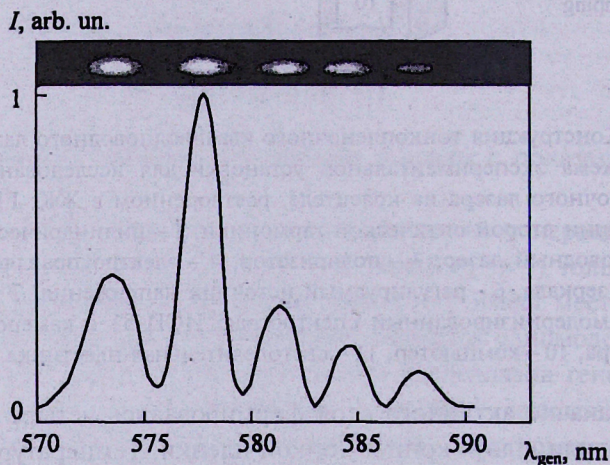


Рис.3. Спектр генерации квазिवолноводного лазера на красителе в ЖК матрице (ХП+ПК+Р6Ж) при температуре 70°C.

В связи с тем, что безразмерный параметр $\xi \gg 1$ (см. формулу (1), в нашем эксперименте $\xi \approx 30$, для МББА со средним показателем преломления $n_2 \approx 1,64$), квазिवолноводный лазер генерировал в многомодовом режиме при интенсивностях накачки несколько больших, чем пороговая. При приближении температуры к температуре фазового перехода жидкого кристалла число мод увеличивалось (при одинаковых значениях мощности накачки). Это объясняется тем, что, с одной стороны, при приближении температуры к критической температуре ФП порог генерации уменьшается, начинают генерироваться и другие моды, а с другой стороны, при приближении температуры к температуре ФП ξ увеличивается, поскольку n_2 уменьшается. Так, если при низких температурах (в глубокой мезофазе) мощность накачки была выбрана так, чтобы генерировала только одна мода, то при температурах, близких к T_k , лазер генерировал одновременно на 3 ÷ 5 модах. На

рис.3 представлена модовая структура (моды пространственно разрешены, т.е. распространяются под разными углами θ_m) и спектр генерации, для смеси родамин 6Ж в холестерил пеларгонате с 8% пеларгоновой кислотой. В эксперименте мода $m=1$ выходила из слоя под углом $\theta_1 \approx 1,3$ рад, что находится в хорошем согласии с расчетным значением $\theta_1 \approx 1,24$ рад, полученным с помощью формулы (2).

Отдельную моду из спектра генерации можно выделить с помощью одного или двух зеркал, которые обеспечивают при этом дополнительную обратную связь. В этом случае спектр генерации существенно сужается ($\Delta\lambda \approx 3+5$ Å), а перестройка осуществляется в пределах 300 Å, внутри полосы люминесценции, поворотом зеркал.

3. Электроуправление длиной волны генерации квазиволноводного лазера

Компактные управляемые лазеры имеют большое применение в оптических коммуникационных системах, в оптической спектроскопии, в точной метрологии и т. д. В большинстве случаев управление длиной волны генерации осуществляется механическими методами, управляя элементом оптической обратной связи: зеркалом или дифракционной решеткой. Однако для практических приложений желательно управлять частотой генерации, изменяя, например, электрическое напряжение, подаваемое на специально установленный внутрирезонаторный элемент [8]. Это дает возможность при необходимости легко программировать управление характеристиками лазерного излучения, используя стандартные методы автоматизации физического эксперимента.

Для электроуправления длиной волны генерации квазиволноводного лазера в нашем эксперименте основным управляющим элементом являлась планарно-ориентированная ячейка с НЖК, которая была установлена между активным квазиволноводным элементом и зеркалом, обеспечивающим дополнительную обратную связь (рис.16). Этот метод основан на электроуправлении двулучепреломлением НЖК. Ячейка с НЖК-5СВ была реализована двумя стеклянными электропроводящими прозрачными подложками, которые специально обрабатывались для планарной ориентации молекул НЖК. Толщина ячейки 70 мкм. Изменение параметров НЖК ячейки в зависимости от приложенного внешнего электрического поля исследовалось отдельно. Для этого ячейка помещалась между двумя скрещенными поляризаторами. Угол между направлением поляризации первого поляризатора и осью легкого ориентирования молекул НЖК на подложках ячейки составлял 45° . Как известно, оптическое пропускание системы в этом случае можно представить в виде $I = I_0 \sin^2(\delta\Phi/2)$, где $\delta\Phi = \Delta n d 2\pi/\lambda$ – фазовый набег между необыкновенной и обыкновенной волнами в слое НЖК, Δn – зависящая от внешнего электрического поля разность показателей преломления для необыкновенной и обыкновенной волн, а d – толщина ячейки. Понятно, что максимумы и минимумы в пропускании появляются, когда $\Delta n d$, соот-

ветственно, равно полуцелому и целому числу, умноженному на λ . На рис.4 приведена зависимость коэффициента пропускания T ячейки от разности потенциалов на подложках. Зондирование ячейки осуществлялось на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм излучением He-Ne лазера. Как видно из рисунка, набег фазы можно регулировать в области $0+17\pi$ изменением напряжения на подложках от 0 до 15 В.

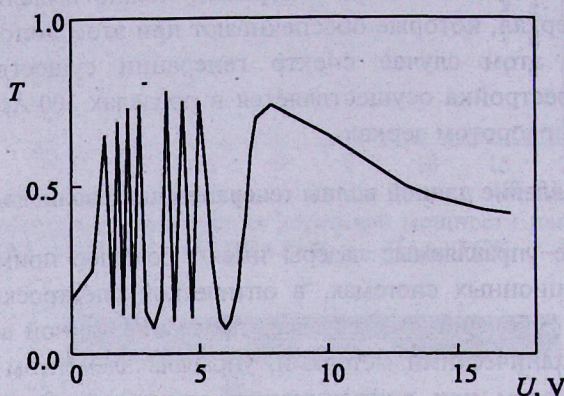


Рис.4. Пропускание НЖК ячейки, установленной между скрещенными поляризаторами, на длине волны 628 нм в зависимости от приложенного напряжения.

В резонаторе квазиволноводного лазера НЖК ячейка была установлена так, что ось легкого ориентирования на подложках либо была параллельна, либо составляла угол 45° с поляризацией лазера. После установки ячейки в резонатор, генерация квазиволноводного лазера значительно ухудшается (интенсивность падает на $15+20\%$, что, по-видимому, обусловлено увеличением потерь резонатора из-за рассеяния излучения генерации в НЖК ячейке).

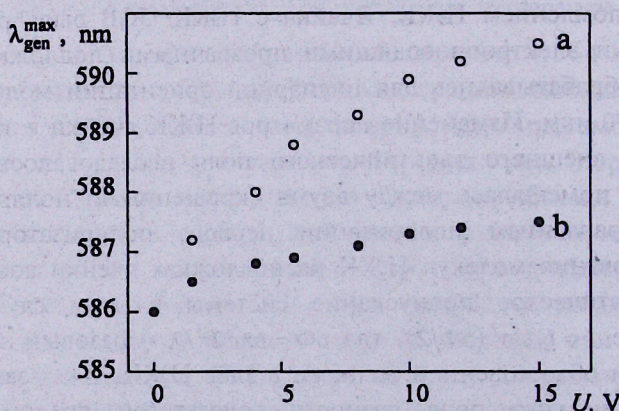


Рис.5. Перестройка длины волны генерации квазиволноводного лазера в зависимости от приложенного на НЖК ячейку напряжения (а – вектор поляризации и директор НЖК параллельны, б – угол, образованный вектором поляризации и директором НЖК, составляет $\sim 45^\circ$).

Рис.5 иллюстрирует полученную в эксперименте перестройку длины волны генерации квазиволноводного лазера вышеуказанным внутрирезонаторным элементом на основе НЖК, с помощью внешнего электрического поля. Как видно из рисунка, предложенный здесь внутрирезонаторный элемент дает возможность для тонкого управления длиной волны генерации в диапазоне $\sim 45 \text{ \AA}$.

4. Выводы

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально показано, что порог генерации тонкопленочного квазиволноводного лазера на красителе в ЖК-матрице резко падает при приближении температуры к критической температуре фазового перехода ЖК.

Установлено, что отдельную моду из спектра генерации можно выделить с помощью одного или двух зеркал, которые обеспечивают при этом дополнительную обратную связь. В этом случае перестройка квазиволноводного лазера осуществляется в пределах $300 \text{ \AA}$, внутри полосы люминесценции, поворотом зеркал.

В настоящей работе экспериментально продемонстрирована также возможность электроуправления длиной волны генерации квазиволноводного лазера на красителе внутрирезонаторным элементом с НЖК ячейкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.С.Акопян, Р.Б.Алавердян, Дж.Х.Григорян, Ю.С.Чилингарян. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 16, 77 (1981).
2. С.А.Раскутин. Радиотехника и электроника, 15, 2527 (1970).
3. Е.М.Золотов, В.А.Киселев, В.А.Сычугов. УФН, 112, 231 (1974).
4. С.М.Аракелян, Ю.С.Чилингарян. Нелинейная оптика жидких кристаллов. М., Наука, 1984.
5. В.М.Арутюнян, Г.П.Джотян, А.В.Карменян. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 15, 379 (1980).
6. V.M.Arutunyan, G.P.Djotyan, A.V.Karmenyan, J.E.Meliksetyan. Opt. Comm., 52, 114 (1984).
7. Б.Я.Коган, В.М.Волков, С.А.Лебедев. Письма в ЖЭТФ, 16, 144 (1972).
8. Y.P.Lan, C.Y.Chen, R.P.Pan, C.L.Pan. Opt. Eng., 43, 234 (2004).

THIN-FILM QUASI-WAVEGUIDE DYE-LASER CONTROLLED WITH LIQUID-CRYSTAL MATRIX

R.B. ALAVERDYAN, H.V. VARDANYAN, S.TS. NERSISYAN,
A.D. CHILINGARYAN, YU.S. CHILINGARYAN

Generation of the laser emission in a liquid crystal-dye oriented thin film is experimentally investigated. Retuning of the generation wavelength is carried out via inputting electrotunable planar-oriented liquid-crystal cell in the laser cavity. Investigations were implemented in the quasi-waveguide generation regime.