

Усиление генерации жидкокристаллического микролазера с помощью однородного жидкокристаллического слоя

Н. М. Штыков, М. И. Барник, Л. М. Блинов, Б. А. Уманский, С. П. Палто¹⁾

Институт кристаллографии РАН, 119333 Москва, Россия

Поступила в редакцию 20 апреля 2007 г.

Показано усиление лазерной генерации от микролазера на холестерическом жидком кристалле с помощью однородно ориентированного слоя нематического жидкого кристалла (НЖК), допированного лазерным красителем. Для НЖК характерна анизотропия оптических свойств, в том числе и коэффициента усиления, что открывает возможность создания усилителей, управляемых слабым электрическим полем.

PACS: 42.60.Da, 42.70.Df, 42.70.Qs

В современной оптике особое внимание привлекают “фотонные структуры” или “фотонные кристаллы” [1], для которых характерно наличие запрещенных зон в спектрах поглощения и испускания света. Фотонные структуры известны и среди жидких кристаллов [2]. Примером является ориентированный слой холестерического жидкого кристалла (ХЖК) с локальной положительной оптической анизотропией и спиральным распределением поля директора (локальной оптической оси). В этом случае в области длин волн $n_{\perp}P \leq \lambda \leq n_{\parallel}P$ (P – шаг спирали, а $n_{\perp, \parallel}$ – принципиальные значения показателей преломления для поляризаций света, перпендикулярно и параллельно директору) возникает запрещенная зона (так называемая, стоп-полоса). Свет одной из циркулярных поляризаций с энергией квантов внутри зоны свободно распространяется вдоль оси спирали, свет противоположной поляризации отражается спиральной структурой. Если такой слой допировать лазерным красителем, спектр люминесценции которого перекрывает стоп-полосу, то лазерную генерацию с узким частотным спектром и наиболее низким порогом по оптической накачке можно получить на краях этой полосы, поскольку именно здесь возникает наиболее глубокая пространственно-распределенная положительная обратная связь и реализуется максимальная плотность квантовых состояний [3–5].

Тонкопленочные лазеры на ХЖК уникальны в том смысле, что они могли бы рассматриваться как микроэлементы единой планарной матричной лазерной структуры, аналогичной дисплею, управляемому электрическим полем. В самом деле, возможность плавной электрической перестройки шага спиральной структуры, а значит, и спектра фотонной зоны

была предсказана де Женом [6], исходя из термодинамических соображений. В действительности, однако, существуют принципиальные трудности не только с плавной раскруткой спирали электрическим полем, но даже и с ее дискретной раскруткой со скачками шага, возможной, например, при температурной перестройке [7]. Эти трудности связаны с топологическими ограничениями, налагаемыми даже на дискретную раскрутку как при изменении температуры [8], так и во внешнем поле [9].

Поэтому представляется целесообразным передать функцию полевого управления интенсивностью и поляризацией излучения от планарного генератора на ХЖК к усилителю на нематическом жидком кристалле (НЖК), оставив за ХЖК способность генерировать пространственно и спектрально узкую лазерную полосу. Дело в том, что НЖК обладают сильной анизотропией оптических свойств, легко управляемых слабым электрическим полем, и обнаруживают целую гамму электрооптических эффектов именно в планарной конфигурации [10]. Менее принципиальным, но не менее важным фактором является более высокая текучесть НЖК и, как следствие, стойкость к образованию радиационных дефектов, позволяющая использовать более высокие энергии накачки, необходимые для усиления генерации ХЖК. В данной работе мы и показываем возможность усиления лазерной генерации холестерического микролазера с помощью планарно ориентированного, анизотропного нематического слоя, допированного красителем.

Результаты эксперимента. На вставке к рис. 1 показана схема установки, использованной для возбуждения лазерной генерации в жидкокристаллическом элементе (Γ) с последующим ее усилением жидкокристаллическим усилителем (Y). В обоих элементах используется продольная схема накачки по отношению к нормали каждого слоя.

¹⁾e-mail: palto@online.ru

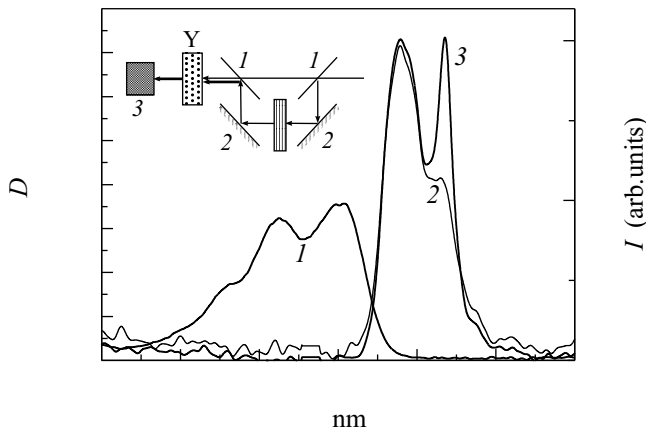


Рис.1. Спектры оптической плотности D (1) и люминесценции I (2, 3) красителя Хромен-3 в матрице ЛЖК-2. Кривые 2 и 3 получены с использованием собирающей свет линзы соответственно при плотностях энергии накачки 7.4 и 11 мДж/см² и нормированы на величину I на $\lambda = 588$ нм. Вставка: схема установки для измерения усиления лазерного излучения. Г – генерирующая жидкокристаллическая ячейка; У – усиливающая жидкокристаллическая ячейка; 3 – CCD спектрометр; 1 – делители пучка; 2 – зеркала

Лазерный генератор (Г) представляет собой ячейку, состоящую из двух стеклянных подложек, зазор между которыми (30 мкм) заполнен специально разработанной нами холестерической смесью ЛЖК-2. Смесью содержит киральную добавку и допирована лазерным красителем Оксазин-17 (концентрация 0.3% по весу). Матрица ЛЖК-2 (без красителя и киральной добавки) прозрачна в диапазоне длин волн $\lambda = 330\text{--}850$ нм и характеризуется принципиальными показателями преломления $n_{\perp} = 1.487$ и $n_{\parallel} = 1.595$ ($t = 24^{\circ}\text{C}$, $\lambda = 560$ нм). Добавление кирального компонента и красителя несколько увеличивает эти значения (примерно на 0.5%). На внутренние поверхности подложек наносились тонкие (~ 0.05 мкм) полиимидные слои, которые натирались для ориентации молекул и получения спиральной структуры поля директора с шагом $P \cong 383$ нм и осью спирали вдоль нормали к подложкам. Спектральное положение стоп-полосы соответствовало диапазону 576–615 нм, полностью перекрываемым спектром люминесценции красителя ($\lambda = 550\text{--}650$ нм). В матрице ЛЖК-2 Оксазин-17 имеет интенсивную полосу поглощения в диапазоне 490–570 нм с максимумом на $\lambda = 540$ нм, что позволяет использовать для оптической накачки вторую гармонику ($\lambda = 532$ нм) лазера на гранате (модель LQ529, Solar, Минск) с импульсами длительностью 11 нс. Генерация возникала на длине волны $\lambda_g = 615.5$ нм, что соответствует

одной из мод на длинноволновом краю стоп-полосы ($\lambda_g \cong Pn_{\parallel}$).

Усиливающий жидкокристаллический элемент У – это ячейка, подобная генерирующей ячейке (Г), но с толщиной ЖК слоя 50 мкм. Важно, что для усиления используется нематический ЖК с однородным распределением поля директора по толщине слоя. Ориентирующие полиимидные слои обеспечивают практически планарную ориентацию директора (угол директора по отношению к поверхностям подложек составляет около 4°). Жидкий кристалл (ЛЖК-2 без киральной добавки) допирован лазерным красителем Хромен-3 с концентрацией 0.25% (по весу). Его спектр поглощения (кривая 1) и спектры люминесценции, измеренные при различных энергиях импульсной накачки (кривые 2 и 3), показаны на рис.1. Видно, как с увеличением энергии накачки в длинноволновой части спектра 610–630 нм возникает явно выраженная полоса суперлюминесценции, соответствующая области максимального усиления.

На рис.2 показаны спектр лазерной генерации W_0 элемента Г на входе элемента У (кривая 1), спектр

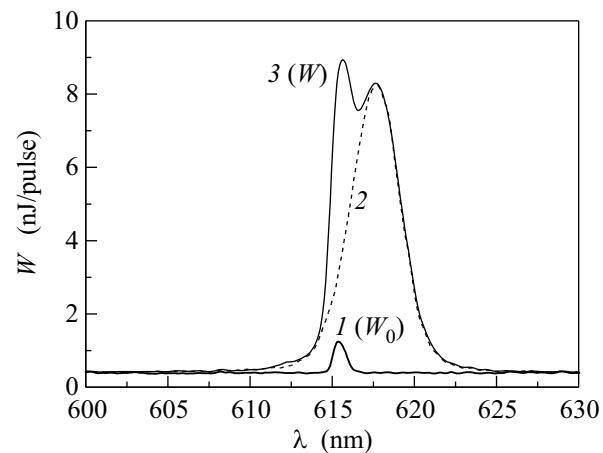


Рис.2. Спектр генерации лазерной ячейки (Г) на $\lambda = 615.46$ нм, измеренный на входе усиливающей ячейки У (кривая 1), а также спектры усиленного излучения на выходе ячейки У в отсутствие (кривая 2) и при наличии (кривая 3) излучения на входе. Плотность энергии накачки $I_p = 41$ мДж/см²

суперлюминесценции на выходе ячейки У в отсутствие излучения W_0 на ее входе (кривая 2), а также спектр W излучения на выходе ячейки У при подаче излучения W_0 на ее вход (кривая 3). Несмотря на то, что длина волны генерации не соответствует спектральному положению максимума суперлюминесценции элемента У, коэффициент усиления $K = W/W_0|_{\lambda=615.5 \text{ нм}}$ оказывается значительным ($K \cong 15$). Заметим, что здесь вклад люминесценции

в области 570–600 нм (см. рис.2) не виден на фоне суперлюминесценции и усиленной генерации, наблюдаемых без использования собирающей линзы.

Коэффициент усиления возрастает с интенсивностью оптической накачки, рис.3 (кривая 1). Примечательно,

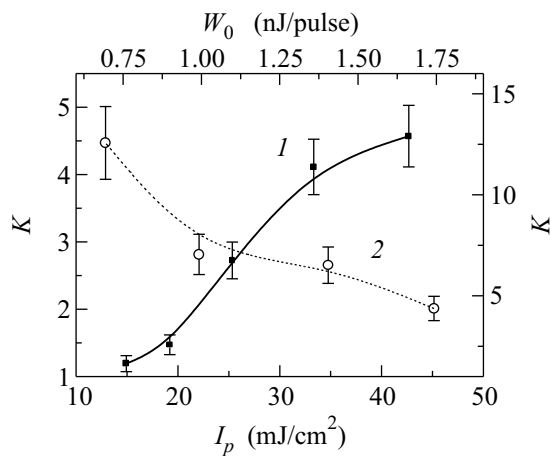


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления лазерного излучения от плотности энергии накачки I_p (кривая 1, масштабы внизу и слева) при фиксированной энергии импульса усиливаемого излучения $W_0 = 1.9$ нДж, и зависимость усиления от W_0 (кривая 2, масштабы вверху и справа) при фиксированной величине $I_p = 41$ мДж/см²

однако, что при фиксированной энергии накачки он уменьшается примерно в 3 раза с энергией усиливаемого импульса W_0 (кривая 2). Такое поведение наблюдается и в традиционных лазерных системах и связывается с эффектом насыщения показателя усиления

$$\gamma = (1/d) \ln K, \quad (1)$$

где d – толщина усиливающего слоя. Эффект насыщения качественно можно охарактеризовать спадом показателя усиления с увеличением энергии выхода излучения W , которая, разумеется, коррелирует с входной энергией W_0 [11]:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + W/W_s}. \quad (2)$$

Здесь γ_0 – интерполяционный показатель усиления в пределе нулевой энергии излучения на выходе, а W_s соответствует энергии на выходе, при которой γ падает в два раза. То, что наш усилитель работает в режиме насыщения, следует также из максимальной величины показателя усиления $\gamma \approx 0.051$ мкм⁻¹ (для $K \approx 13$ на рис.3). Действительно, она достаточно близка к значению максимального показателя поглощения, найденному из рис.2, $k = D \ln 10/d \approx 0.08$ мкм⁻¹, который в свою очередь определяет

максимально возможный показатель γ (без учета анизотропии).

Сильная анизотропия оптических свойств НЖК должна проявляться и в эффекте усиления. В данном случае усиление следует характеризовать двумя принципиальными показателями γ_{\perp} и γ_{\parallel} соответственно для направлений поляризации перпендикулярно и параллельно директору ЖК. Приведенные выше результаты соответствуют поляризации усиливаемого излучения, перпендикулярной директору. На рис.4 приведены результаты измерений, выпол-

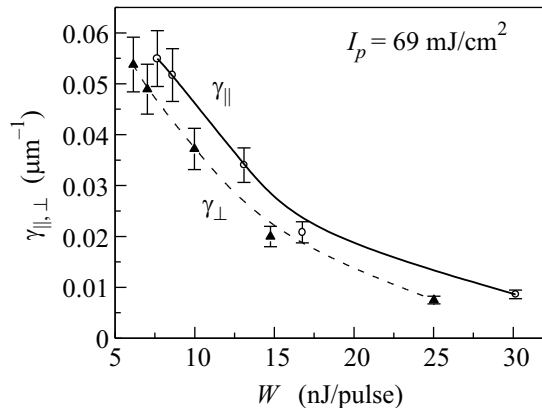


Рис.4. Зависимости принципиальных показателей усиления от энергии усиленного импульса

ненные для двух ортогональных состояний поляризации. Видно, что в нашем случае наблюдается положительная анизотропия, $\gamma_{\parallel} > \gamma_{\perp}$. В частности, при плотности накачки 70 мДж/см² интерполяционные показатели $\gamma_{\parallel,0} = 0.066$ мкм⁻¹ и $\gamma_{\perp,0} = 0.056$ мкм⁻¹. При толщине слоя ЖК $d = 50$ мкм данная анизотропия соответствует отношению коэффициентов усиления $K_{\parallel}/K_{\perp} \approx 1.6$. Это отношение и определяет тот динамический диапазон, в котором можно изменять усиление с помощью электрического поля. Увеличить его можно либо увеличением толщины слоя, либо изменением типа красителя, который обладал бы более высокой анизотропией поглощения и усиления.

В заключение подчеркнем, что анизотропия усиливающих свойств нематических жидких кристаллов имеет особую значимость, так как квантовые усилители на их основе могут быть использованы не только для усиления энергии лазерного излучения ХЖК микролазеров, но и для управления их генерацией с помощью электрического поля.

Работа поддержана в рамках фундаментальных исследований ОФН РАН “Лазерные системы, основанные на новых активных материалах, и оптика структурированных материалов” и гранта

Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-16703. Авторы благодарны Е.А. Лукьянцу и В.И. Алексеевой (НИОПИК) за предоставленные образцы красителей.

-
1. P. Lodahl, A. F. van Driel, I. S. Nikolaev et al., *Nature* **430**, 654 (2004).
 2. K. Busch and J. Sajeev, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 967 (1999).
 3. V.I. Kopp, Z.-Q. Zhang, and A.Z. Genack, *Progr. Quant. Electron.* **27**, 369 (2003).
 4. И. П. Ильчишин, Е. А. Тихонов, В. Г. Тищенко, М. Т. Шпак, *Письма в ЖЭТФ* **32**, 27 (1980).
 5. С. П. Палто, *ЖЭТФ* **130**, 544 (2006).
 6. P. G. de Gennes, *Solid State Commun.* **6**, 163 (1968).
 7. В. А. Беляков, Е. И. Кац, *ЖЭТФ* **118**, 560 (2000).
 8. С. П. Палто, *ЖЭТФ* **121**, 308 (2002).
 9. S. P. Palto and L. M. Blinov, *J. Soc. Elect. Mat. Eng.* **14**, 115 (2005).
 10. L. M. Blinov and V. G. Chigrinov, *Electrooptic effects in Liquid Crystal Materials*, Springer, New York, 1993.
 11. A. Yariv, *Quantum Electronics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.