

ЛЬЧИШИН І. П., канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

МАСЛОВ П. Ю.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РЕАЛІЗАЦІЇ РЗЗ-ЛАЗЕРА НА НЕМАТИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛАХ

Вивчено умови реалізації лазера з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ) на основі нематичних рідких кристалів (НРК) при двох схемах збудження. Отримано вузьку лінію на фоні спектру паразитної генерації в схемі з дзеркальною коміркою, що свідчить про наявність РЗЗ. Проаналізовано шляхи оптимізації схем збудження і характеристик активних шарів для виділення вузької лінії генерації РЗЗ-лазера.

The laser's terms realization with the distributed feedback (DFB) based on nematic liquid crystal (NLC) at two schemas of excitation are studied. The narrow lasing line on a background the spectrum of hunting oscillation in scheme with a mirror cell are obtained, that testifies to presence DFB. It was analyzed the scheme's of excitation ways of optimization and characteristics of active layers for the selection narrow lasing line of the DFB-laser.

Вступ

Сьогодні рідкокристалічні лазери активно досліджуються і розробляються в багатьох світових наукових центрах, оскільки існує реальна перспектива їх застосування в новітніх засобах відображення інформації і в лазерній техніці. Нині створені лазери на нематичних рідких кристалах, як з дзеркальним резонатором [1, 2], так і хвилеводного типу [3], а також лазери з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ) на основі холестеричних рідких кристалів (ХРК). Відмінною особливістю РЗЗ-лазера будь-якого типу є відсутність у ньому дзеркального резонатора, а зворотний зв'язок підсилюваного випромінювання здійснюється за рахунок брегівського розсіювання на періодичній структурі, створюваній якимось чином в активному середовищі. РЗЗ-лазери на основі ХРК [4] особливо привабливі для створення нового типу систем відображення інформації з високою яскравістю зображення, оскільки природна періодична структура ХРК, яка забезпечує РЗЗ, дає змогу реалізовувати активне середовище такого лазера у вигляді екрана довільної площі і кривизни.

Однак на сьогодні в такому лазері досить актуальною проблемою є перестроювання частоти генерації. До цього часу в них використовується досить інерційна температурна зміна частоти генерації, оскільки прикладання електричного поля вздовж осі спіралі ХРК приводить до її руйнування. Вирішення такої актуальної проблеми в лазері на рідких кристалах можливе при зміні показника заломлення рідкого кристала нематичного типу під дією електричного поля [5]. Однак РЗЗ-лазер на основі нематичних рідких кристалів (НРК), активованих барвниками, на нинішній час ще не створено. Основним завданням праці було дослідження умов реалізації такого лазера при різних схемах збудження.

Методика експерименту

В експериментах використовувались два типи НРК, обидва комерційні продукти — суміш ЖК-654 і ціанобіфеніл 5СВ, які активувались генерувальними барвниками різних класів. Концентрація барвників в НРК розчині була в межах 0,2—0,3 % (вміст ваговий).

Зразок для дослідження оптичних властивостей і генерації НРК являв собою в одному варіанті комірку, що складається з двох скляних підкладок, на внутрішню сторону однієї з них нанесено дзеркальне алюмінієве покриття, а інша підкладка є прозорою і клиновою, з кутом клина $\approx 3^\circ$. На внутрішніх сторонах обох підкладок знаходиться натертий в одному напрямі шар полімеру — поліамідного лаку (ПАЛ) завтовшки < 1 мкм. Для створення орієнтованого шару НРК планарної текстури він розігрівався до ізотропного стану і капілярними силами втягувався в проміжок між підкладками. Товщина шару НРК у такому варіанті встановлювалась фторопластовими прокладками в межах 200—300 мкм. В іншому варіанті орієнтований шар НРК планарної текстури формувалася між катетною гранню призми повного внутрішнього відбивання (ПВВ) і плоскопаралельною скляною підкладкою, які були вкриті натертим шаром поліамідного лаку (ПАЛ). Товщина шару орієнтованого рідкого кристала у цьому зразку становила 50 мкм.

Спектри пропускання зразків домішкових НРК записувались на спектрофотометрі СФ-20 в поляризованому світлі. Збудження зразків проводилось імпульсним випромінюванням ($\tau_i \approx 18$ нс) другої гармоніки лазера на склі з Nd^{3+} ($\lambda = 530$ нм). Твердотільний лазер працював у режимі одиночних імпульсів з частотою 1 імпульс/хв. Енергія збудження регулювалась нейтральними світлофільтрами і контролювалась калориметром ІМО-2. Спектри генерації і суперфлуоресценції домішкових НРК реєструвались безпосередньо з матового скла в касетній частині спектрографа з оберненою дисперсією 0,6 нм/мм за допомогою веб-камери і наступною їх комп'ютерною обробкою. На матове скло

наклеювалася спеціально розрахована шкала довжин хвиль, яка була прив'язана до реперної лінії 633 нм — лінії генерації He-Ne лазера.

Результати та їх обговорення

Суть ідеї створення РЗЗ-лазера на основі НРК в тому, щоб записувати просторово-періодичну картину випромінювання накачки в активізованому НРК, і одночасно з накачуванням, прикладаючи до рідкого кристала електричне поле, змінювати його показник заломлення для певної поляризації падаючого світла і тим самим частоту лазерної генерації.

Ми використовували дві схеми збудження для створення РЗЗ-лазера на основі НРК. На рис. 1, а зображена схема збудження, в якій просторова періодичність в НРК здійснюється при інтерференції падаючого і відбитого від дзеркальної підкладки променів накачування. Використовуючи в такій планарній комірці НРК з додатною діелектричною анізотропією ($\Delta\epsilon > 0$), при початковій орієнтації оптичної осі НРК, паралельній орієнтувальним підкладкам, прикладаючи електричне поле можна міняти кут нахилу оптичної осі і показник заломлення НРК, що приведе до зміни частоти генерації.

У наведеному варіанті схеми збудження довжина хвилі генерації РЗЗ-лазера на рідкому кристалі (λ_Γ) залежить від кута падіння променя накачування показника заломлення активного середовища, а саме:

$$\lambda_\Gamma = \lambda_n n / (n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}, \quad (1)$$

де λ_n — довжина хвилі збудження; n — показник заломлення активного шару; θ — кут падіння накачування.

Друга схема збудження (рис. 1, б) була стандартною для РЗЗ-лазерів на ізотропних розчинах, з використанням призми ПВВ. У такому варіанті довжина хвилі генерації визначається як:

$$\lambda_\Gamma = \frac{n_p \cdot \lambda_n}{n_{np} \cdot \sin \Theta} = \frac{\sqrt{2} n_p \lambda_n}{\sqrt{n_{np}^2 - \sin^2 i + \sin i}}, \quad (2)$$

де n_p і n_{np} — показники заломлення НРК і призми відповідно; i — кут падіння накачування на діагональну грань призми.

У плані реалізації такої ідеї нами були проведені оцінки параметрів амплітудно-фазової ґратки, яка має реалізуватися в умовах експерименту. Ми оцінили порівняльний вклад у силу зв'язку хвиль у періодичній структурі, яка є основним параметром теорії РЗЗ-лазера [6], амплітудної ґратки підсилення в барвнику і фазової ґратки, яка виникає при поглинанні збуджувального випромінювання в ізотропних розчинах. Для цих оцінок були використані основні співвідношення в теорії РЗЗ-лазерів, відомі рівняння термодинаміки і відомі співвідношення в області фізики лазерів на барвниках, які дали змогу нам визначити кількість тепла, що утворюється при поглинанні лазерного імпульсу накачування.

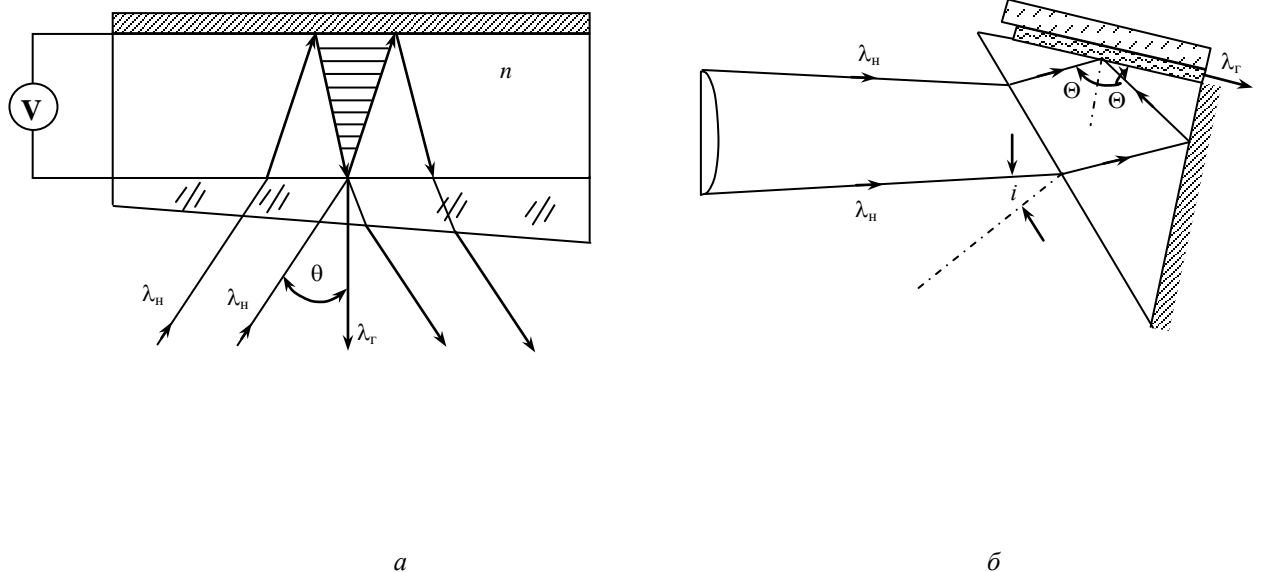


Рис. 1. Схеми збудження РЗЗ-лазера на основі НРК: а — схема з дзеркальною коміркою; б — схема з поворотною призмою

Порівнявши вклад у силу зв'язку окремо амплітудної ґратки коефіцієнта підсилення і фазової ґратки ми встановили переважний вклад в силу зв'язку фазової ґратки і той факт, що вона

визначається в основному тепловою граткою. Хоча ці оцінки були зроблені для ізотропних розчинів, вони справедливі і для рідкого кристала, оскільки сильні нелінійності характерні для них унаслідок ефекту Керра і електрострикції при опроміненні безперервними лазерами, при збудженні наносекундними імпульсами, на 4—5 порядків менше, ніж теплова нелінійність [7]. Тому їх можна не враховувати.

Ці оцінки також показали, що умови для реалізації РЗЗ-лазера на основі домішкових НРК значно гірші порівняно з РЗЗ-лазером на домішкових ХРК, оскільки глибина модуляції показника заломлення (Δn), яка досягається в таких умовах в НРК, на два порядки менша ніж у ХРК і становить 10^{-4} . Для створення такого лазера за схемою рис. 1, а, потрібно максимально збільшувати товщину активного шару і створювати висококонтрастну модуляцію випромінювання накачування.

Раніше [7] ми вивчали особливості генерації РЗЗ-лазера в тонких шарах ізотропних розчинів (родамін 6Ж в етиловому спирті) і встановили, що існують їх оптимальні оптичні густини порядку 3, при яких пороги генерації РЗЗ-лазера мінімальні для малих товщин (200—300 мкм).

Для активації НРК ми використовували різні типи барвників: нейтральні бензантронові і феноленонові, а також іонні поліметинові. Всі вони мали низький квантовий вихід флуоресценції (< 10 %) і лазерна генерація в них не була отримана. Барвники з підходящими спектроскопічними характеристиками для лазерної генерації в НРК при збудженні другою гармонікою неодимового лазера ми знайшли серед класу пірометенових. Вони характеризуються гарною розчинністю в НРК і високим квантовим виходом флуоресценції. Розчин пірометенового барвника № 567 в НРК ЖК-654 з максимумом поглинання 524 нм і максимумом флуоресценції 548 нм має квантовий вихід флуоресценції 98 %. На рис. 2 показано дихроїзм поглинання цього барвника в НРК ЖК-654. Як видно, для поляризації падаючого світла, що збігається з директором рідкого кристала — поглинання барвника максимальне (крива 1), для перпендикулярної поляризації — поглинання мінімальне (крива 2).

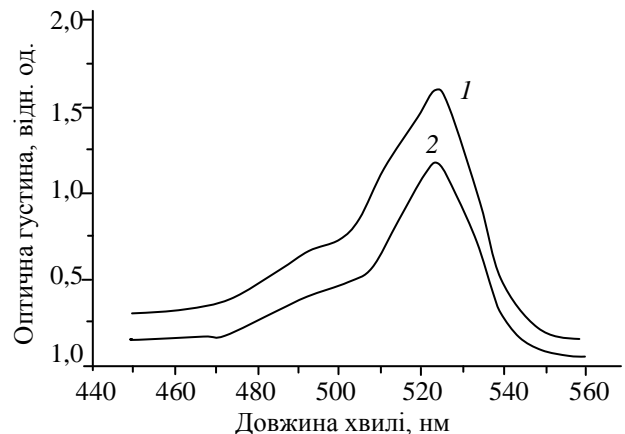


Рис. 2. Дихроїзм оптичного поглинання в пірометеновому барвнику № 567: 1 — поглинання для лінійної поляризації світла вздовж директора НРК; 2 — поглинання для перпендикулярної поляризації падаючого світла

На такому барвнику і була отримана лазерна генерація в НРК за схемою збудження, яка зображена на рис. 1. Використовувався шар домішкового НРК у формі клина, з середньою товщиною 250 мкм. Поріг лазерної генерації здобуто такого самого рівня, як і в розчині родаміну 6Ж в етиловому спирті в такому ж тонкому шарі.

На рис. 3 зображено спектр лазерної генерації домішкового НРК, отриманий з допомогою веб-камери безпосередньо з матової пластини спектрографа при куті збудження 35° . Середня довжина хвилі лазерної генерації становить 554 нм, при ширині спектра близько 4 нм. Як видно з рис. 3, на фоні дифузного спектра паразитної генерації завширшки 4 нм, зумовленого відбиванням від алюмінієвого дзеркала і клиноподібної підкладки, проявляється вузька інтенсивна лінія з довжиною хвилі $\approx 553,3$ нм. Дослідження спектру генерації при варіації кута збудження показали, що характер спектра змінюється і вузька лінія виникає тільки в певному діапазоні кутів збудження ($28\text{—}30^\circ$).

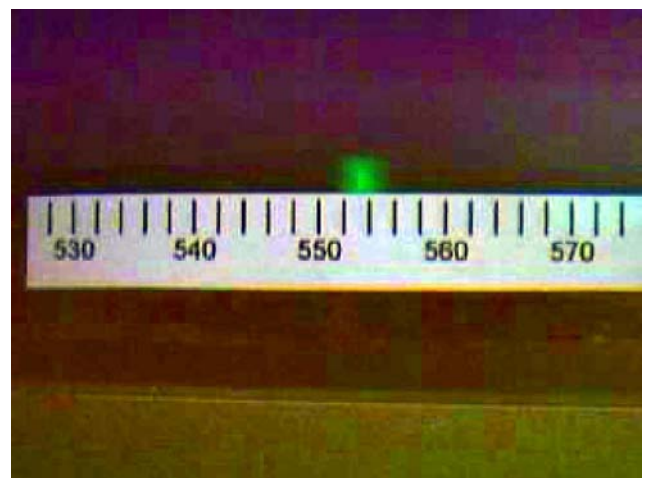


Рис. 3. Спектр генерації НРК ЖК-654, активованого пірометеновим барвником № 567 в умовах збудження, зображених на схемі рис. 1, а

Вивчення умов генерації РЗЗ-лазера на домішковому НРК у комірці з дзеркальною підкладкою показало, що в такій схемі легко виникає паразитна генерація, зумовлена резонатором — дзеркало + клинова підкладка, незважаючи на наявність клину величин

активної речовини і підкладці. Просторово відрізнити паразитну генерацію від генерації РЗЗ-лазера в таких умовах трудно. Для того щоб

повністю виключити паразитну генерацію, ми використали іншу схему з призмою ПВВ. Шар рідкого кристала 5СВ з домішкою пірометенового барвника № 597, з довгохвильовим поглинанням був розміщений між призмою і орієнтувальною прозорою підкладкою. У нашому експерименті реалізовувався випадок, коли показник заломлення рідкого кристала для вертикальної поляризації накачування відповідав n_o . На вихідний торець такої комірки наклеювалася скляна пластинка.

При використанні розчину пірометенового барвника № 597 у 5СВ ми на даний час зареєстрували інтенсивну смугу суперфлуоресценції з максимумом 575 нм і завширшки порядку 4 нм при виставленні призми під кутом 11° (рис. 4). Розрахунок довжини хвилі генерації для кута падіння накачування 11° дав гарний збіг з експериментально спостережуваною смугою суперфлуоресценції.

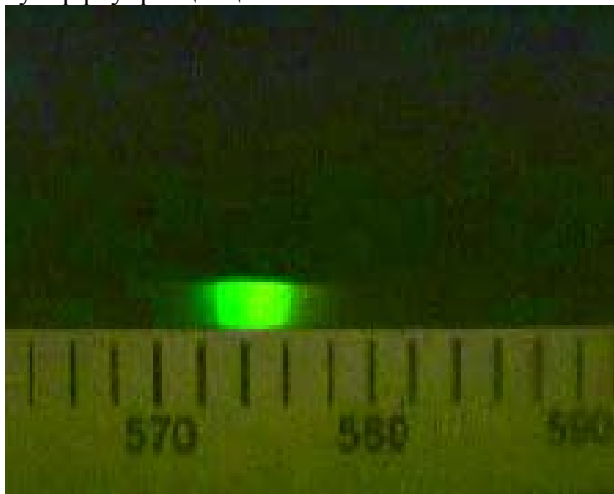


Рис. 4. Спектр генерації НРК 5СВ, активованого пірометеновим барвником № 597 в умовах збудження, зображених на схемі рис. 1, б

експериментальної комірки задля підвищення порога паразитної генерації і використовувати накачування випромінюванням одномодового лазера.

4. Схема накачування с призмою ПВВ перспективна для повного виключення паразитної генерації, однак в ній присутні великі втрати на розсіяння в шарі НРК завдовжки більш ніж 10 мм, тоді як в схемі з дзеркальною коміркою — товщина близько 250 мкм. Крім того, в такій схемі присутні суто технологічні труднощі створення однорідно орієнтованого шару НРК на поверхні призми, що збільшує макроскопічне розсіювання випромінювання генерації.

Автори вдячні проф. Е. А. Тихонову за надання пірометенових барвників і обговорення отриманих результатів.

Робота була частково підтримана цільовою Програмою Президії НАН України (проект ВЦ-138).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ильчишин И. П., Тихонов Е. А., Шпак М. Т., Дорошкин А. А. Письма в ЖЭТФ, 1976. — Т. 24. — С. 336—339.
2. Алексеев Н. Н., Гореленко А. Я., Грожек В. А. и др. Квантовая электроника, 1985. — Т. 12. — С. 2172—2174.
3. Bertolotti M., Sansoni G., Scudiero F. Appl. Opt. — 1979. — V. 18. — P. 528—532.
4. Ильчишин И. П., Тихонов Е. А., Тищенко В. Г., Шпак М. Т. Письма в ЖЭТФ. 1980. — Т. 32. — С. 27—29.
5. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. — М.: Наука, 1978. — С. 384.
6. H Kogelnik, S.V. Shenk. J. Appl. Phys. 1972. — V. 43. — P. 2327—2335.
7. Ilchishin I. P., Maslov P. Yu., Tikhonov E. A. et al. Mol. Cryst. Liq. Cryst. — 2007. — V. 467. — P. 235—245.