

І.П. ІЛЬЧИШИН, Є.О. ТИХОНОВ, Т.В. МИКИТЮК

Інститут фізики НАН України
(Просп. Науки, 46, Київ 03680; e-mail: lclas@iop.kiev.ua)**СПЕКТРАЛЬНО-ПРОМЕНЕВІ ОСОБЛИВОСТІ
ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛАЗЕРА НА ХОЛЕСТЕРИЧНИХ
РІДКИХ КРИСТАЛАХ¹**УДК 535.2, 530.182,
621.372.8

Досліджено спектральні-променеві характеристики випромінювання лазера на брегівській структурі холестеричних рідких кристалів (ХРК) при зміні планарної орієнтації. Виявлено, що в ХРК, утворених трикомпонентною сумішшю в'язких ефірів холестерину при ортогональній взаємній орієнтації директорів ХРК на підкладках, виникає дефект спіральної структури. Цей дефект проявляється у вигляді локального провалу в смугі селективного відбивання (СВ), що узгоджується з поведінкою дефектної моди фотонного кристала. За наявності такого дефекту в спіральній структурі відбувається селекція поздовжніх мод з індексами $N = \pm 1$, при якій реалізується одномодовий режим генерації. Встановлено, що просторова кільцева структура випромінювання такого лазера виникає при генерації вищих поздовжніх мод.

Ключові слова: холестеричний рідкий кристал, планарна текстура, спектри генерації, просторова структура мод.

1. Вступ

Активовані барвниками холестеричні рідкі кристали ХРК з природною періодичною структурою вже досить давно відомі в лазерній фізиці [1, 2]. Основною перевагою такого природного структурованого матеріалу, крім утворення оптичного резонатора, є можливість побудови лазера з активним середовищем, яке має довільну площу і кривизну. Такі лазери є перспективними, зокрема для розробки дисплеїв підвищеної яскравості, здатних відображати інформацію в умовах яскравого освітлення.

Розвиток представлень про природу лазерної генерації на цих структурах, що базувався в початковий період виключно на моделі лазера з розподіленним зворотним зв'язком (РЗЗ) [3, 4] з часом був доповнений моделлю фотонних кристалів [5, 6], яка дала відповідь, чому спектр генерації нематиків з індукованою спіраллю, знаходиться на краю смуги селективного відбивання (СВ) ХРК [7–9], а не в центрі з максимумом відбивання. Співвідношення цих моделей генерації в ХРК-лазерах відповідно до “сили фотонного кристала”, що визначається величиною двопронезаломлення, бу-

ло розглянуто в оглядовій роботі [10]. Слід зауважити, що явище локалізації фотонів в періодичній структурі ХРК, яке проявляється у гасінні флуоресценції в напрямку вздовж осі спіралі на частотах СВ, як ознака одноірного фотонного кристала, вперше було зареєстровано в наших роботах поряд з ефектом лазерної генерації [1, 2].

Дослідження ХРК-лазерів, як елементів яскравих новітніх дисплеїв, активно ведуться в багатьох наукових центрах і на нинішній час досягнуто ряд вагомих результатів по генерації на нових ХРК-матеріалах [11–13], по розширенню діапазонів генерації [14] і вивченню їх енергетичних характеристик [15, 16]. Результати сучасних досягнень ХРК-лазерів представлені в недавніх оглядах [10, 17–19].

В останні роки активно досліджуються холестеричні рідкі кристали з дефектами в спіральній структурі, які призводять до появи дефектних мод в забороненій зоні. Дефектом може слугувати порушення фази спіралі ХРК, розміщення між двома шарами ХРК з однорідним кроком спіралі будь-якого ізотропного середовища, локальна зміна кроку спіралі ХРК, створення градієнта кроку

© І.П. ІЛЬЧИШИН, Є.О. ТИХОНОВ,
Т.В. МИКИТЮК, 2018

¹ Роботу представлено на 23-му Міжнародному семінарі-школі “Спектроскопія молекул і кристалів” імені Галини Пучківської.

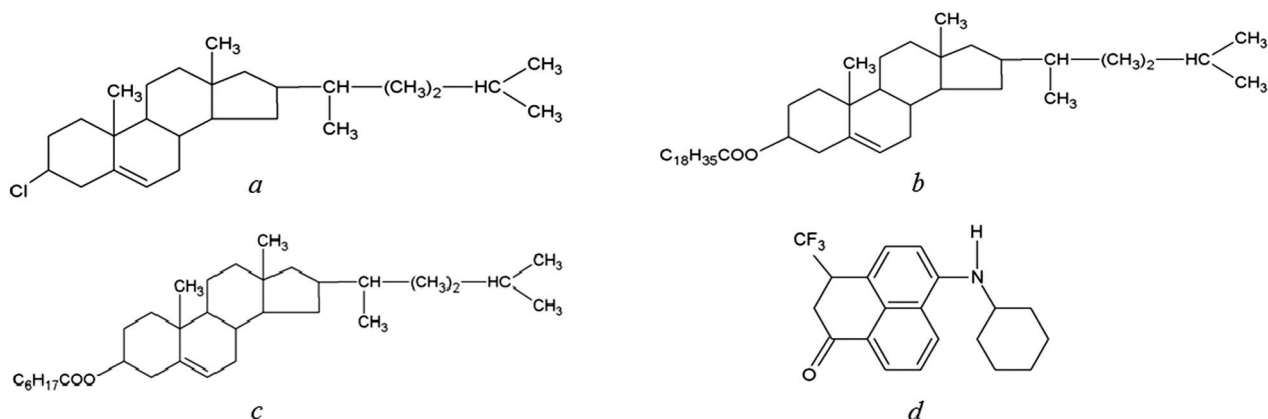


Рис. 1. Хімічна структура матеріалів, що використовуються: *a* – холестерил хлорид; *b* – холестерил пеларгонат; *c* – холестерил олеат; *d* – феноленоновий барвник F490

холестеричної спіралі і т.п. Сучасна теорія лазерної генерації в фотонних ХРК передбачає, що при певних типах дефектів спіральної структури залежно від співвідношення між товщиною дефектного шару і загальною товщиною ХРК, в спектрі СВ можуть виникати один або декілька провалів, які і задають частоту таких “дефектних” мод лазерної генерації в межах смуги СВ [20].

Внаслідок малого співвідношення “товщина/ширина” активного шару, випромінювання ХРК-лазера характеризується великою (не дифракційного походження) кутовою розбіжністю в десятки градусів. З цим співвідношенням зв’язаний і широкий спектр генерації, навіть при генерації нижчих поздовжніх мод. Дискусійними залишаються існуючі трактовки кільцевої структури в променях генерації ХРК-лазера. Потребує подальшого вивчення вплив якості планарної текстури на характеристики генерації ХРК-лазера.

Таким чином, метою представленого дослідження було вивчення зв’язку між спектральними і просторовими характеристиками ХРК-лазера і типами орієнтації директорів на орієнтуючих підкладках, а також впливу якості планарної текстури на характеристики генерації.

2. Експериментальна частина

У ролі ХРК-матриці використовувалась трикомпонентна суміш ефірів холестерину такого складу: 40% холестерил олеату, 35% холестерил пеларгонату і 25% холестерил хлориду з температурною зміною кроку спіралі ≈ 3 нм/град. Суміш ХРК

була активована феноленоновим барвником Ф490 з ваговою концентрацією 0,3%. Структурні формули похідних холестерину і барвника наведені на рис. 1. Суміш ХРК мала ліве закручування спіралі з максимумом смуги селективного відбивання ≈ 600 нм. Величина двоприменезаломлення в трикомпонентній суміші ефірів холестерину становить $\approx 0,04$. За необхідності зміщення положення смуги СВ відносно смуги флуоресценції барвника використовувалась зміна концентрації її компонент. Товщина шару активованого барвником холестерика в орієнтованому зразку планарної текстури становила 45 мкм. Планарна текстура створювалась за допомогою такої стандартної технології. Оскільки суміш ефірів холестерину має високу в’язкість, практично це желеподібна суспензія, і для її орієнтації крім структурованих орієнтуючих підкладок використовується їх взаємний зсув у напрямку натирання [21]. Технологія включає натирання скляних підкладок покритих шаром прозорого електрода (ІТО), а також поліімідним лаком (ПАК). Зсув у напрямку натирання після заповнення зразка проводиться при температурі, близькій до температури фазового переходу. При створенні текстур з ортогональною орієнтацією директорів ХРК на підкладках, замість їх зсуву після охолодження зразка до температури мезофази, використовувався поворот однієї з підкладок на кут $\approx 90^\circ$.

Характеристики генерації досліджувались на типовій експериментальній установці. Оптична накладка ХРК-лазера проводилась другою гармонікою ($\lambda = 530$ нм) лазера на неодимовому склі

з модуляцією добротності і тривалістю імпульса ≈ 20 нс. Випромінювання накачки фокусувалось на комірку з планарно орієнтованим домішковим ХРК в пляму діаметром 0,5 мм, тобто співвідношення діаметр/товщина було $\approx 11,0$. Енергія імпульса накачки змінювалась нейтральними світлофільтрами і контролювалась калориметром ИМО-2. Розрахункова максимальна інтенсивність накачки становила ≈ 27 МВт/см². Спектри лазерної генерації проектувались в фокальній площині спектрографа з оберненою дисперсією 0,6 нм/мм та відображались відеокамерою на моніторі ПК. Просторовий розподіл випромінювання генерації ХРК-лазера в ближній зоні дифракції фотографувався з матового екрану, поле в дальній зоні реєструвалось безпосередньо фотоапаратом з довгофокусним об'єктивом.

Дослідження форми спектрів пропускання стереодних ХРК показує чітку залежність ширини смуги СВ від якості планарної текстури. Краця орієнтація спостерігалася на підкладках з шаром прозорих електродів (ІТО) [21]. Якість планарної текстури впливає на спектри пропускання, в яких спостерігалися відмінності в спектральних ширинах (див. рис. 2). Тут наведено спектр пропускання орієнтованого зразка планарної текстури ХРК, приведеного вище процентного складу при використанні орієнтуючих підкладок з ІТО.

Для планарних текстур з використанням скляних і кварцевих підкладок з шарами прозорих електродів і поліімідного лаку, півширина смуги СВ становить ≈ 22 – 24 нм (рис. 2). При формуванні планарної текстури підкладками лише з поліімідним лаком її якість помітно падає, що проявляється в розширенні смуги СВ (більш ніж на 10%) та падінні величини дифракційного відбивання (рис. 3).

Дослідження спектрів лазерної генерації в стереодних ХРК показує на їх чітку кореляцію з якістю текстури. Як показано на рис. 2 (спектр зверху) для текстури з вузькою смугою СВ при паралельній взаємній орієнтації директорів ХРК, спектр лазерної генерації має три поздовжні моди. Цей спектр розміщений близько до центра смуги СВ, що відповідає моделі генерації зв'язаних хвиль в періодичній структурі [3]. На відміну від звичайного резонатора, збільшення інтенсивності збудження не призводить до збільшення числа поздовжніх мод навіть до інтенсив-

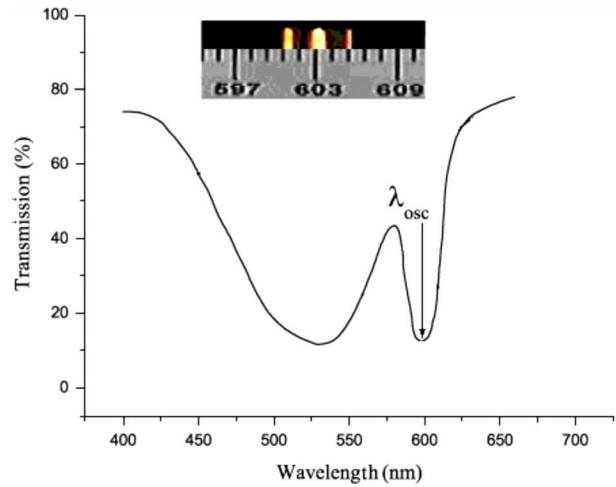


Рис. 2. Спектр пропускання якісної планарної текстури активованого ХРК. Стрілкою показано розміщення спектра генерації. На вставці вверху представлено спектр лазерної генерації в такій структурі. Товщина шару 45 мкм

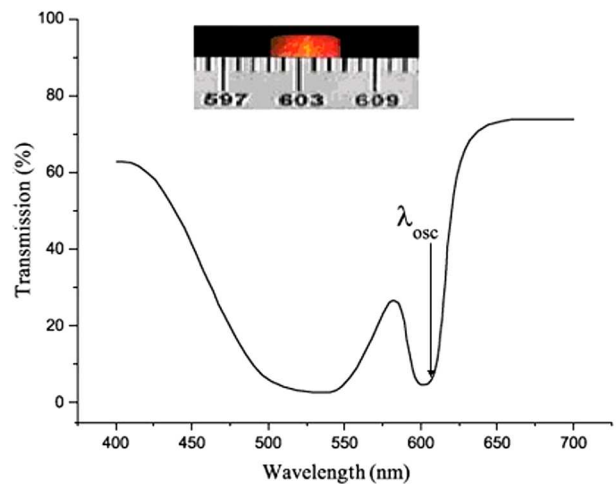


Рис. 3. Спектр пропускання планарної текстури активованого ХРК, сформованого підкладками без ІТО. Стрілкою показано розміщення спектра генерації. На вставці вверху наведено вигляд спектра генерації в такій структурі. Товщина шару 45 мкм

ностей, за яких відбувається руйнування зразка (рис. 4, б).

Необхідно відзначити, що наявність прозорого електрода (ІТО) на орієнтуючій підкладці проявляється лише в ширині смуги СВ і її дифракційній ефективності. Лазерна генерація поза смугою СВ, в умовах неселективного резонатора, створеного прозорими електродами з коефіцієнтами від-

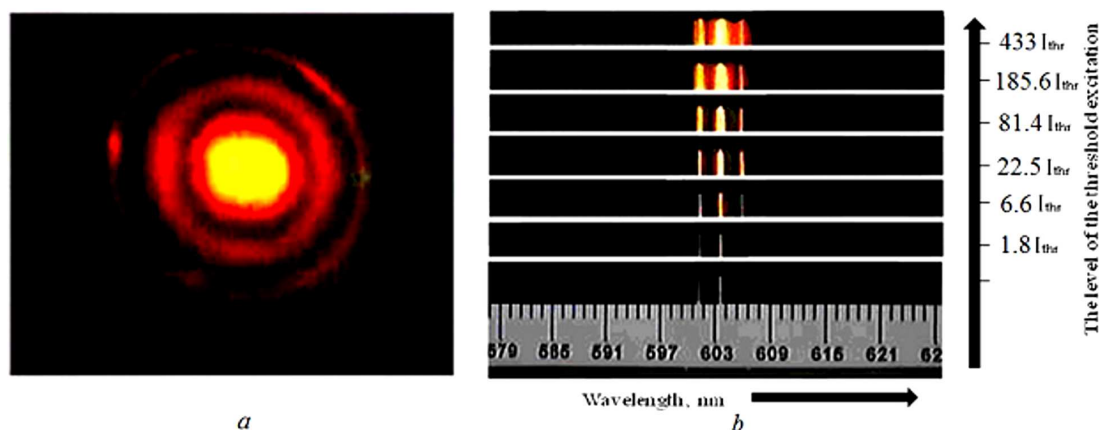


Рис. 4. Кільцева структура лазерного пучка (а) і спектри генерації ХРК-лазера при паралельній орієнтації директорів на підкладках (б). Товщина шару 45 мкм

бівання таких дзеркал $R = 8-10\%$ не виникала за аналогічних умов збудження.

Наявність тільки трьох поздовжніх мод у спектрі лазерної генерації у всьому діапазоні збудження, свідчить про високу селективність спіральної періодичної структури згідно з моделлю [3]. Вона проявляється у подавленні генерації поздовжніх мод з індексами, вищими, ніж $N = \pm 1$ в ХРК-лазері (рис. 4, б). Аналогічний результат було отримано в [22], при дослідженні лазера з розподіленим зворотним зв'язком на спіральній періодичній структурі в інфрачервоній області спектра.

На рис. 3 (вставка зверху) наведені спектри лазерної генерації з таким самим складом компонент ХРК, як і на рис. 2, для планарних текстур, утворених підкладками тільки з шаром поліімідного лаку (без ІТО). Як видно, в них спостерігається незначне, до 3 нм, зміщення спектра лазерної генерації від центра до довгохвильового краю смуги СВ, дискретна модова структура в спектрі змінюється на широку дифузну смугу. При цьому суттєво, в два-три рази, зростає порогова інтенсивність збудження лазерної генерації.

Зазначимо, що в умовах експерименту, при товщині шару ХРК 45 мкм пороги генерації поздовжніх мод з індексами $N = +1$ і $N = -1$ є досить низькими і лише на $\approx 10\%$ перевищують поріг генерації основної брегівської моди. Такі дані були отримані при виведенні смуги СВ в максимум смуги флуоресценції генеруючого барвника Ф490, шляхом зміни процентного складу трикомпонентної суміші ефірів холестерину, що використовує-

ться. Відстань між поздовжніми модами в ХРК-лазері, також як і в інтерферометрі Фабрі-Перо рівна $\Delta\lambda \approx \lambda^2/2nL$, де λ – довжина хвилі основної моди, n – середній показник заломлення ХРК, L – товщина активного шару. При $\lambda = 600$ нм, $n = 1,53$, $L = 45$ мкм і $\Delta\lambda = 2,6$ нм загальна ширина спектра генерації становить $\approx 5,2$ нм і в цих умовах величина підсилення для цих трьох мод практично однакова для широкої смуги флуоресценції барвника (рис. 5, а).

Таким чином, в ХРК-лазері на основі суміші ефірів холестерину практично неможливий режим одномодової генерації.

Сприйнятливіша ситуація для одномодового режиму виникає в ХРК-лазерах з індукованою спіраллю за участю закручуючих домішок до нематичних рідких кристалів (НРК). При двопронезаломленні типових НРК $\Delta n \geq 0,2$, селективне відбивання до 100% і лазерна генерація досягаються вже на товщинах активних шарів в межах від 5 мкм. При такій товщині відстань між поздовжніми модами становить ≈ 23 нм і підсилення на двох сусідніх модах на барвнику з півшириною смуги < 50 нм буде різко відрізнитись. Тому у лазерах на індукованих ХРК існує можливість реалізації одномодового режиму генерації за рахунок селективності підсилення і контролю рівня збудження.

При звичайній планарній орієнтації ХРК-лазер на трикомпонентній суміші ефірів холестерину формує промінь з високою кутовою розбіжністю. Як показано на рис. 4, а, поряд з інтенсивним цен-

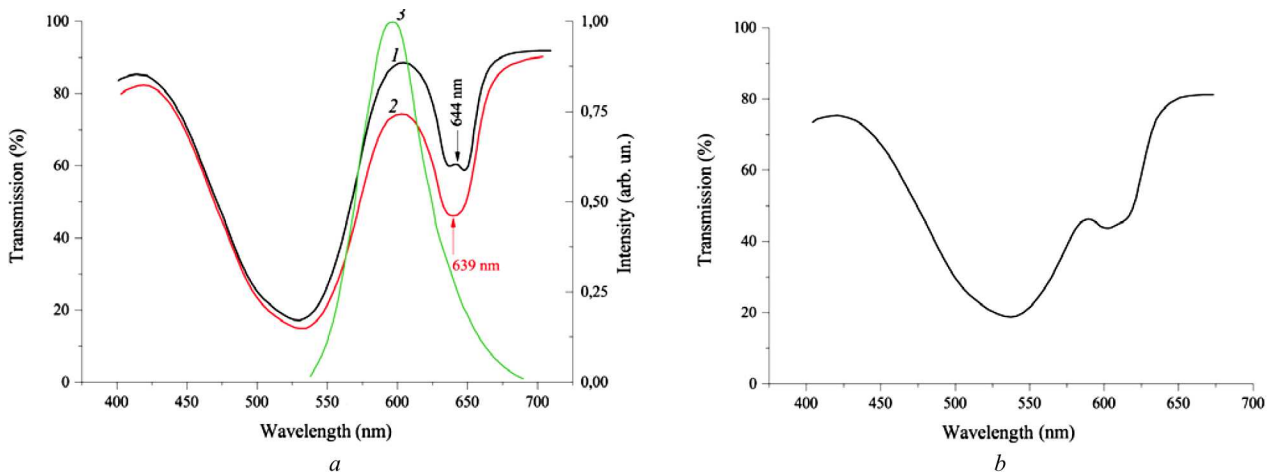


Рис. 5. Спектри пропускання стероїдних ХРК, *a*: 1 – при взаємно-перпендикулярній орієнтації поверхневих шарів на підкладках; 2 – при паралельній орієнтації поверхневих шарів на підкладках; 3 – спектр флуоресценції феноленового барвника Ф490. Температура 26 °С. Товщина шарів 45 мкм; *b* – при взаємно-перпендикулярній орієнтації поверхневих шарів на підкладках. Суміш: 38% холестерил олеат; 33% – холестерил пеларгонат; 29% – холестерил хлорид. Товщина шару 45 мкм. Температура 17,5 °С

тральним керном, спостерігається кільцева структура, з числом кілець, що залежить від інтенсивності збудження. Як встановлено в [23], для товщини активного шару в 45 мкм, кутова розбіжність ХРК-лазера різко зростає від одиниці до 2 десятків кутових градусів при зростанні накачок над порогом більше порядку.

На сьогодні існує поширене уявлення, що причиною кільцевої структури випромінювання ХРК-лазера є його дифракція в активному шарі малої товщини [24]. Схожа кільцева картина може виникати і при утворенні абераційної теплової лінзи, зумовленої локальним лазерним нагріванням поглинаючого шарів різних матеріалів [25].

Наші дослідження [23] показали, що кільцева структура в цій геометрії для променя накачки не виникає. Час встановлення теплової лінзи в цих умовах становить ≈ 100 нс, що 5-разово перевищує тривалість імпульсу накачки і генерації [26]. Можливе світлоіндуковане обертання директора ХРК під дією інтенсивної накачки [27] означало б також зміну кроку спіралі, при цьому неоднорідність вистроювання директора по перерізу опромінюваної зони повинна приводити до зміни спектра генерації в кільцях. Проведені в [23] дослідження показали незмінність довжин хвиль генерації (до $\pm 0,5$ нм) ХРК-лазера в широкому інтервалі інтенсивностей збудження, як у центральному керні,

так і в першому і другому кільцях просторової картини лазерного випромінювання.

У лазерній фізиці також відомий процес утворення кільцевої структури в випромінюванні генерації, зумовлений його розсіянням на оптичних неоднорідностях активного середовища [28]. Це розсіяння при багатократному відбиванні від дзеркал резонатора сприяє утворенню поперечних мод. Порівняння радіусів кілець в пучку випромінювання ХРК-лазера показало узгодження з розрахованими радіусами кілець по залежності, приведеній авторами [28]. На основі цих даних кільцева структура випромінювання генерації ХРК-лазера може розглядатися як поперечні моди брегівського резонатора, утворені внаслідок розсіяння поздовжніх мод на неоднорідностях ХРК.

Для спостереження впливу дифракції на кільцеву структуру пучка ми вивчали спектральні і просторові характеристики генерації ХРК-лазера при одномодовому режимі і при генерації його трьох осьових мод. Для останнього характерні низький поріг генерації і кільцева структура пучка. Одномодовий режим генерації було отримано шляхом створення дефекту в спіральній структурі при ортогональних напрямках.

На рис. 5, *a* наведено спектри пропускання активованого барвником ХРК при взаємно-ортогональних орієнтаціях директорів на підклад-

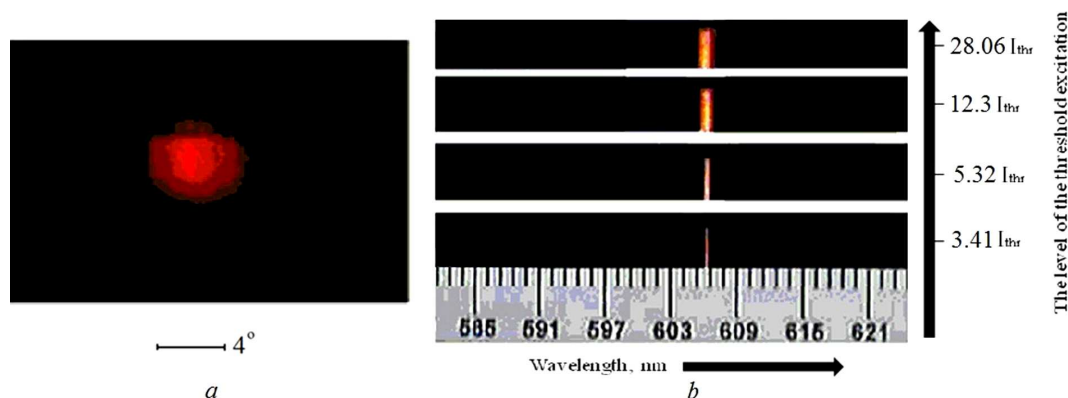


Рис. 6. Кутова розбіжність і спектри генерації ХРК-лазера при ортогональній орієнтації директорів на підкладках: *a* – переріз лазерного пучка; *b* – спектри генерації при варіації інтенсивності збудження. Товщина шару 45 мкм

ках (1) і при паралельній їх орієнтації (2). Як видно, текстура ХРК з ортогональною орієнтацією директорів на підкладках характеризується меншою інтенсивністю дифракції в смузі СВ і зміщенням її центра на 5 нм в довгохвильовий бік. Крім того, в межах смуги СВ реєструється провал для лінійної поляризації світла, який є типовим проявом дефекту спіральної структури [20]. Зазначимо, що вказаний провал в смузі СВ реєструється на відстані до максимуму спектра поглинання ($\lambda = 540$ нм) і до центра смуги СВ, яка перевищує 100 нм. Внаслідок низького підсилення на довжині хвилі провалу ($\lambda = 644$ нм, рис. 5, *a*, крива 3), поріг генерації не досягається. Для його досягнення смуга СВ зміщувалась в бік максимуму флуоресценції барвника (це досягалось зміною процентного складу компонент суміші ХРК або зміною температури).

На рис. 5, *b* наведено спектр пропускання домішкового ХРК, з ортогональними орієнтаціями директорів на підкладках, при суміщенні смуг СВ і максимуму флуоресценції барвника. Як видно, при наближенні смуги СВ до смуги поглинання барвника, відбувається деформація смуги СВ і провал, який ідентифікує дефект спіральної структури, зникає. Вказана особливість спектра пропускання не дає можливості для точної прив'язки довжин хвиль провалу і спектра генерації ХРК-лазера в таких умовах.

У спектрі генерації ХРК-лазера з даною планарною текстурою (рис. 6, *b*) збуджується лише основна поздовжня мода. Ширина спектра генерації зменшується більш ніж на порядок, досяга-

ючи десятих долей нанометра. Просторова картина лазерної генерації в ХРК при взаємно схрещеній орієнтації поверхневих шарів молекул на підкладках не має кільцевої структури. Спостерігається лише центральний kern, а його просторова розбіжність не перевищує трьох кутів градусів. Поріг лазерної генерації в такій текстурі в порівнянні зі звичайною планарною текстурою (з паралельними орієнтаціями директорів на підкладках) є вищим більш ніж на порядок внаслідок меншої дифракційної потужності спіральної ґратки. Активна область з подібною поведінкою просторово локалізована в зоні діаметром до 2 см, обмеженій лініями дисклінацій. Поза межами цієї зони спектр лазерної генерації налічує три моди, а в просторовій картині з'являється кільцева структура. Такі особливості в характеристиках генерації спостерігаються лише у в'язких сумішах ефірів холестерину, для нев'язких індукованих холестериків вони відсутні. Значне підвищення порога в текстурі стероїдних ХРК з ортогональною орієнтацією поверхневих шарів молекул може свідчити про те, що в лазерній генерації бере участь тільки обмежена частина товщини активного шару.

Спостережуваний ефект узгоджується з теоретичним передбаченням [20], для генерації на дефектній моді, яка може утворюватись внаслідок фазового стрибка при повороті орієнтуючої підкладки навколо осі спіралі на 90° . В теоретичних розрахунках, умови для спостереження цього ефекту виникають при розміщенні дефекту посередині товщини активного шару.

Лазерний експеримент з дефектною спіральною структурою в ХРК виключає можливість пояснення кільцевої структури в пучку ХРК-лазера впливом дифракції, оскільки в обох випадках, звичайної планарної текстури і дефектної, апертура пучка залишається незмінною. Таким чином, пояснення кільцевої структури пучка ХРК-лазера, яке було зроблено в [23], залишається дійсним і дозволяє стверджувати, що природа кільцевої структури в пучку генерації ХРК-лазера зумовлена генерацією мод, які поширюються під дискретними кутами до осі резонатора. Дане пояснення знайшло підтвердження в роботі [29], в якій прецизійне вимірювання довжин хвиль генерації ХРК-лазера під кутом 21° до нормалі і в центрі кільцевої картини показало різницю в $\approx 1,9$ нм, що однозначно відкидає дифракційну модель утворення кілець.

3. Висновки

1. Показано, що у в'язких сумішах ефірів холестерину можливе створення дефекту спіралі ХРК при ортогональному розміщенні напрямків директорів на орієнтуючих підкладках. Дефект проявляється у вигляді характерного провалу в межах смуги СВ.

2. Встановлено, що при перпендикулярній орієнтації директорів на ХРК орієнтуючих підкладках виникає і підтримується одномодова генерація при багаторазовому перевищенні порога. Цей метод значно покращує спектральну чистоту і кутову розбіжність випромінювання ХРК-лазера.

3. Взаємозв'язок спектральних і просторових характеристик лазерної генерації в стероїдних ХРК може бути сформульований таким чином: кільцева структура в лазерному випромінюванні зв'язана з генерацією багатьох дискретних мод і зникає при одномодовій генерації. З цього випливає, що природа кільцевої картини в випромінюванні ХРК-лазера відповідає кільцевим модам, які утворюються при розсіянні в ХРК випромінювання позовжніх мод.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом Ф70/127-2017 Державного фонду фундаментальних досліджень та Цільової Програми Президії НАН України, проект ВЦ-188.

1. I.P. Ilchishin, E.A. Tikhonov, V.G. Tishchenko, M.T. Shpak. Generation of a tunable radiation by impurity cholesteric liquid crystals. *JETP Lett.* **32**, 27 (1980).
2. I.P. Ilchishin, A.G. Kleopov, E.A. Tikhonov, M.T. Shpak. Stimulated tunable radiation in an impurity cholesteric liquid crystal. *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* **45**, 13 (1981).
3. H. Kogelnik, S.V. Shank. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers. *J. Appl. Phys.* **43**, 2327 (1972).
4. N.V. Kukhtarev. Cholesteric liquid crystal laser with distributed feedback. *Sov. J. Quantum Electron.* **8**, 774 (1978).
5. E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987).
6. S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987).
7. I.P. Ilchishin, E.A. Tikhonov, A.V. Tolmachev, A.P. Fedoryako, M.T. Shpak. Harmonic distortion of the induced helical structure of the nematic liquid crystal detected by the distributed feedback laser. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **191**, 35 (1990).
8. J.P. Dowling, M. Scalora, M.J. Bloemer, C.M. Bowden. The photonic band edge laser: A new approach to gain enhancement. *J. Appl. Phys.* **75**, 1896 (1994).
9. V.I. Kopp, B. Fan, H.K.M. Vithana, A.Z. Genak. Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals. *Opt. Lett.* **23**, 1707 (1998).
10. I.P. Ilchishin, E.A. Tikhonov. Dye-doped cholesteric lasers: Distributed feedback and photonic bandgap lasing models. *Progress in Quant. Electronics.* **41**, 1 (2015).
11. A.F. Munoz, P. Palfy-Muhoray, B. Taheri. Ultraviolet lasing in cholesteric liquid crystals. *Opt. Lett.* **26**, 804 (2001).
12. J. Schmidtke, W. Stille, H. Finkelmann, S.T. Kim. Laser emission in a dye doped cholesteric polymer network. *Adv. Mater.* **14**, 746 (2002).
13. L.-J. Chen, J.-D. Lina, C.-R. Lee. An optically stable and tunable quantum dot nanocrystal-embedded cholesteric liquid crystal composite laser. *J. Mater. Chem. C* **2**, 4388 (2014).
14. A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili, R. Barberi, R. Bartolino, G. Cipparrone, A. Mazzulla, R. Gimenez, L. Oriol, M. Pinol. Widely tunable ultraviolet-visible liquid crystal laser. *App. Phys. Lett.* **86**, 051107 (2005).
15. I.P. Ilchishin. Optimizing energy output and angular divergence of a DFB laser with cholesteric liquid crystal. *Bull. of the Russ. Acad. of Sci. Phys.* **60**, 494 (1996).
16. K. Dolgaleva, S.K.H. Wei, S.G. Lukishova, Sh.H. Chen, K. Schwertz, R.W. Boyd. Enhanced laser performance of cholesteric liquid crystals doped with oligofluorene dye. *J. Opt. Soc. America.* **25**, 1496 (2008).
17. H. Coles, S. Morris. Liquid-crystal lasers. *Nat. Photonics* **4**, 676 (2010).
18. G.E. Nevskaya, S.P. Palto, M.G. Tomilin. Microlasers on liquid crystals. *Sov. J. Opt. Techn.* **77**, 13 (2010).

19. R. Bartolino, L.M. Blinov. Liquid crystal microlasers (introductory notes). In *Liquid Crystal Microlasers*. Edited by L.M. Blinov, R. Bartolino (Transworld Research Network, Kerala, 2010), p. 1.
20. V.A. Belyakov, S.V. Semenov. Optical defect modes in chiral liquid crystals. *JETP* **112**, 694 (2011).
21. Yu.V. Denisov, V.A. Kizel, E.P. Sukhenko. Investigation of ordering of the mesophase of cholesteric liquid crystals on basis of their optical parameters. *JETP* **71**, 679 (1976).
22. H.P. Preiswerk, M. Lubanski, S. Gnepf, F.K. Kneubuhl. Group theory and realization of a helical distributed feedback laser. *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-19**, 1452 (1983).
23. I.P. Ilchishin, E.A. Tikhonov, M.T. Shpak. Peculiarities of the spatial distribution of the lasing of a distributed feedback laser based on cholesteric liquid crystals. *Ukr. J. Phys.* **33**, 10 (1988).
24. V.I. Kopp, Z.Q. Zang, A.Z. Genack. Lasing in chiral photonics structures. *Progr. Quant. Electron.* **27**, 369 (2003).
25. M.V. Bondar, O.V. Przhonska, E.A. Tikhonov, N.M. Fedotkina. Thermo-optics for the doped elastomers. *Techn. Phys.* **56**, 2465 (1986).
26. I.P. Ilchishin, E.A. Tikhonov, M.T. Shpak. Damage to the planar texture of absorbing cholesteric liquid crystals by pulsed laser radiation. *Sov. J. Quantum Electron.* **17**, 1567 (1987).
27. С.М. Аракелян, Ю.С. Чилингарян. *Нелїнейная оптика жїдких кристаллов* (Наука, 1984).
28. B.P. Stoicheff, A. Szabo. Interference rings in ruby beams. *Appl. Opt.* **2**, 811 (1963).
29. S.P. Palto, N.M. Shtykov, B.A. Umansky, M.I. Barnik, L.M. Blinov. General properties of lasing effect in chiral liquid crystals. *Opto-Electron. Rev.* **14**, 323 (2006).

Одержано 21.03.18

I.P. Ilchishyn, E.A. Tikhonov, T.V. Mykytiuk

SPECTRAL AND SPATIAL FEATURES
OF RADIATION EMITTED BY A CHOLESTERIC
LIQUID-CRYSTAL LASER

S u m m a r y

Spectral characteristics of radiation emitted by a laser operating on the Bragg structure arising in cholesteric liquid crystals (CLCs) have been studied, as well as their variations with a change of the planar CLC orientation. A defect in the helical structure of the CLC formed by a ternary mixture of cholesterol viscous esters is revealed at the mutually orthogonal orientations of the CLC director at the substrates. This defect manifests itself as a local dip in the selective reflection band, which agrees with the behavior of the defect mode in the photonic crystal. Such a defect in the helical structure stimulates the selection of longitudinal modes with the indices $N = \pm 1$, so that the single-mode lasing regime is realized. A spatial ring structure in the laser radiation is found to arise, when higher longitudinal modes are generated.