

З.М. Микитюк, О.Й. Ясиновська, А.В. Вараниця  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних приладів

## РЗЗ-ЛАЗЕРИ НА ОСНОВІ ОДНОВИМІРНИХ ФОТОННИХ КРИСТАЛІВ (ОГЛЯД)

*Ó Микитюк З.М., Ясиновська О.Й., Вараниця А.В., 2008*

Z.M. Mykytyuk, O.Y. Yasynovska, A.V. Varanytsia

## DFB-LASERS ON THE BASIS OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS (REVIEW)

*Ó Mykytyuk Z.M., Yasynovska O.Y., Varanytsia A.V., 2008*

На основі аналізу літературних джерел, з використанням власних робіт авторів розглянуто особливості застосування хіральных фотонних кристалів у РЗЗ-лазерах. Досліджено вплив фотонної забороненої зони, товщини холестеричного зразка та кроку спіралі на генерацію РЗЗ-лазера. Показано залежності порогу лазерної генерації від концентрації барвника, енергії накачування, товщини зразка. Описано методи пере-строювання довжини хвилі за допомогою температури, ультрафіолетового випромінювання та зміни рН. Розглянуто перспективи використання РЗЗ-лазера у дисплеях з підвищеною яскравістю, сенсорах та волоконно-оптичних лініях зв'язку.

On the basis of analysis of literary sources, with the use of authors own works the peculiarities of the use of chiral photonic crystals in DFB-lasers are considered. Influence of the photonic bandgap, cholesteric cell thickness and spiral pitch on the DFB-laser lasing is investigated. The dependences of laser generation threshold on dye concentration, pumping energy, cell thickness are shown. The methods of wave-length tuning by a temperature, ultraviolet radiation and pH change are described. The prospects of the DFB-laser use in displays with the promoted brightness, sensors and fiber-optical flow lines are considered.

### Вступ

Останнім часом значний інтерес становлять фотонні кристали (ФК) – особливий клас штучних структур із періодичною зміною діелектричних властивостей у просторовому масштабі оптичної довжини хвилі. До них належать холестеричні рідкі кристали, хіральні смектики.

Цей напрям сучасного матеріалознавства пов'язаний з можливістю створення світлодіодів з високим ККД, нових типів лазерів з низьким порогом генерації, світлових хвилеводів, оптичних перемикачів, фільтрів, а також пристроїв цифрової обчислювальної техніки на основі фотоніки. У загальному випадку фотонний кристал – це матеріал, структура якого характеризується періодичною зміною показника заломлення [1]. Відомо, що кристали всіх типів можуть розсіювати деяке випромінювання за умови, що параметри ґратки кристала мають такий самий порядок, що і довжина хвилі випромінювання.

Аналогічно, фотонні кристали не пропускають світло з довжиною хвилі, що дорівнює періоду структури фотонного кристала. Ці спектральні діапазони одержали назву “фотонні заборонені зони” (ФЗЗ) [2]. Сьогодні найбільший інтерес становлять фотонні кристали, для яких ФЗЗ лежить у видимій ( $\lambda = 400 - 700$  нм) або в ближній ІЧ ( $\lambda = 1 - 1,5$  мкм) областях [3].

### Особливості РЗЗ-лазерів на хіральных фотонних кристалах

Основна відмінність хіральных ФК від звичайних ФК полягає в тому, що для хіральных ФК фотонна заборонена зона існує тільки для світла з однією круговою поляризацією (при нормальному падінні світла), що збігається зі знаком хіральності середовища. Тут селективне щодо поляризації дифракційне відбивання спостерігається в спектральній області від  $\lambda_1 = Pn_o$  до  $\lambda_2 = Pn_e$ , де  $P$  – крок спіралі,  $n_o$  і  $n_e$  – показники заломлення для звичайного і незвичайного променів відповідно. Світло із оберненою круговою поляризацією не зазнає дифракційного відбивання. ФЗЗ визначає основні характеристики хіральных фотонних кристалів [4].

Природні спіральні структури холестеричного рідкого кристала (ХРК) дозволяють за рахунок їх об'ємної орієнтації і активації барвником, створювати лазери з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ) [5–10]. У РЗЗ-лазерах значення селекторів виконують періодичні відбиваючі структури з періодом, що приблизно дорівнює половині довжини світлової хвилі. Такі періодичні структури для створення зворотного зв'язку, називають також бреггівськими ґратками. У РЗЗ-лазерах ґратка створюється в активному середовищі. Зворотний зв'язок виникає внаслідок бреггівського відбивання, розподіленого рівномірно по всій активній області [11]. Змінюючи період ґратки, легко можна перестроювати частоту генерації в межах спектральної ширини коефіцієнта підсилення активного середовища [12].

У впорядкованій плоскій текстурі ХРК розподілений зворотний зв'язок викликаний круговою поляризацією світла Бреґгівської дифракції у амплітудно-фазовій ґратці, сформованій спіральною структурою (фазова ґратка) і набутою частковою впорядкованістю розчиненого барвника (амплітудна ґратка). Для досягнення генерації під час збудження імпульсним (твердотільним чи газовим) лазером в смугу поглинання домішкового барвника, спектр флуоресценції активуючого ХРК барвника повинен максимально перекриватися зі спектральною областю бреґгівської дифракції на такій періодичній структурі (рис. 1). Довжина ж хвилі генерації визначається періодом бреґгівської ґратки.

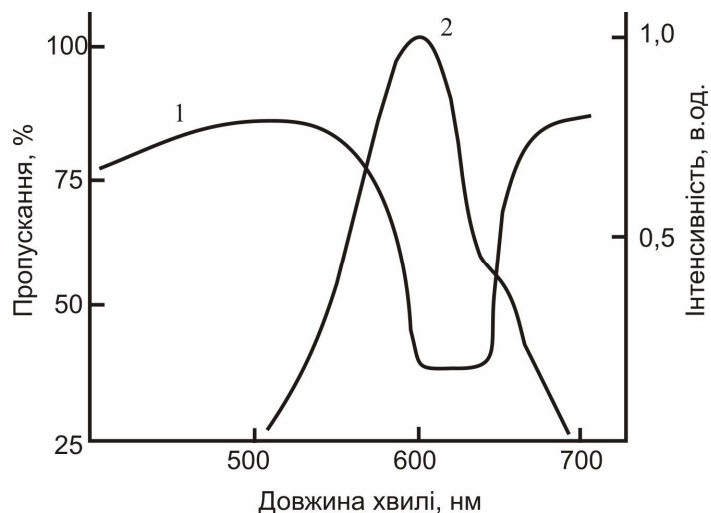


Рис. 1. Спектр пропускання суміші ЖК-654 + 36% холестерилолеату для лінійної поляризації світла (1); Спектр флуоресценції домішкового барвника (2) [14]

Конструктивно лазер РЗЗ на основі ХРК складається з тонкого шару з плоскою текстурою холестерика, з домішкою барвника (рис. 2). Текстура сформована із застосуванням підкладок, які визначають орієнтацію молекул рідкого кристала на їх профільованій поверхні.

Як джерело збудження в такому лазері, використовується когерентне випромінювання іншого лазера [13]. Тривалість імпульсів збудження в цьому випадку повинна бути меншою 100 нс, щоб уникнути руйнування плоскої текстури високопотужним збуджувальним випромінюванням. Для

ХРК на основі сумішей похідних холестерину плоска текстура зберігає високу якість тільки при товщинах, менших 60–70 мкм [14].

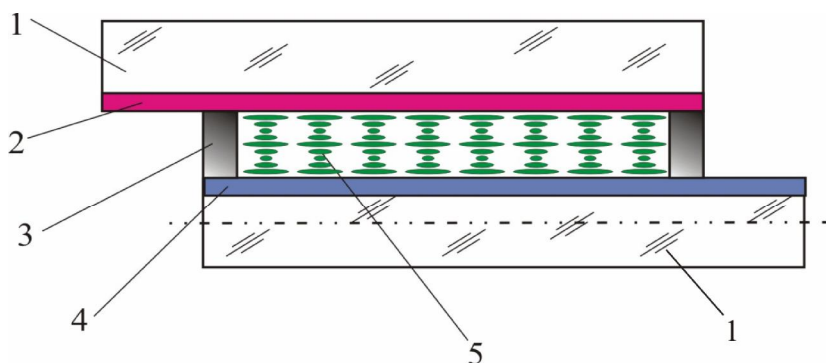


Рис. 2. Схематичне зображення РЗЗ-лазера:  
1 – скляні пластини; 2 – плівка орієнтанта; 3 – спейсер; 4 – смугові електроди;  
5 – холестеричний кристал з домішкою барвника

Холестеричні рідкі кристали є одновимірними фотонними кристалами з фотонною забороненою зоною. Як результат, флуоресцентна емісія в цих матеріалах зменшується у смузі відбивання і збільшується на краях зони (рис. 3). Це збільшення в РЗЗ-лазерах зумовлює низький поріг беззеркальної лазерної генерації на краю зони в різних рідкокристалічних матеріалах.

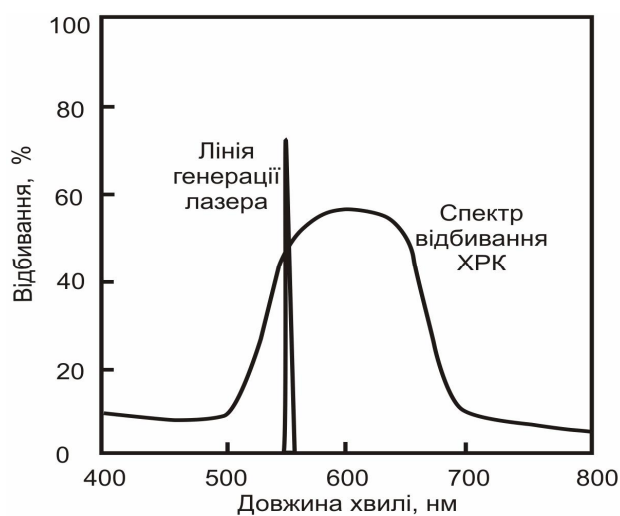


Рис. 3. Спектр відбивання ХРК з барвником і лінія генерації лазера [15]

### Пороги лазерної генерації РЗЗ-лазера

У насичених барвником зразках ХРК найнижчий поріг лазерної генерації розташований на низькому енергетичному краю смуги відбивання [15]. На рис. 4 показано типову залежність інтенсивності лазерного випромінювання від енергії накачування. Інтенсивність досліджувалась для довжини хвилі лазера 608,6 нм. Поріг лазерної генерації становить 64,0 нДж.

Залежність порогу лазерної генерації від концентрації барвника показана на рис. 5. Поріг лазерної генерації має подібну поведінку під час накачування імпульсами наносекундної і пікосекундної тривалості [16].

Досліджено поріг лазерної генерації як функцію товщини зразка для фіксованої концентрації барвника 0,5 %, результати показано на рис. 6. Зі збільшенням товщини зразка довжина хвилі лазерної генерації зміщується на декілька нанометрів у напрямку до краю смуги.

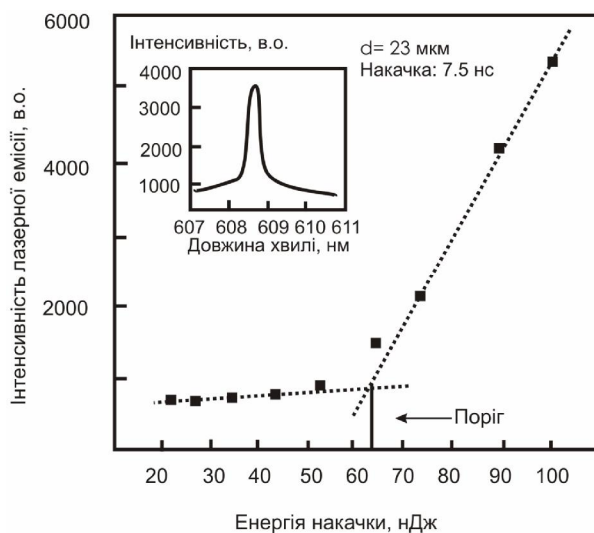


Рис. 4. Залежність інтенсивності емісії лазера на ХРК від енергії накачування [16]

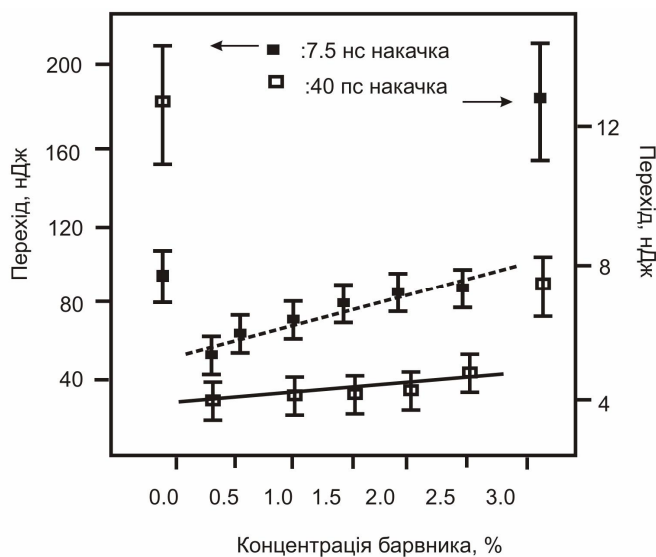


Рис. 5. Залежність порогу лазерної генерації від концентрації барвника з наносекундними і пікосекундними імпульсами накачування [16]

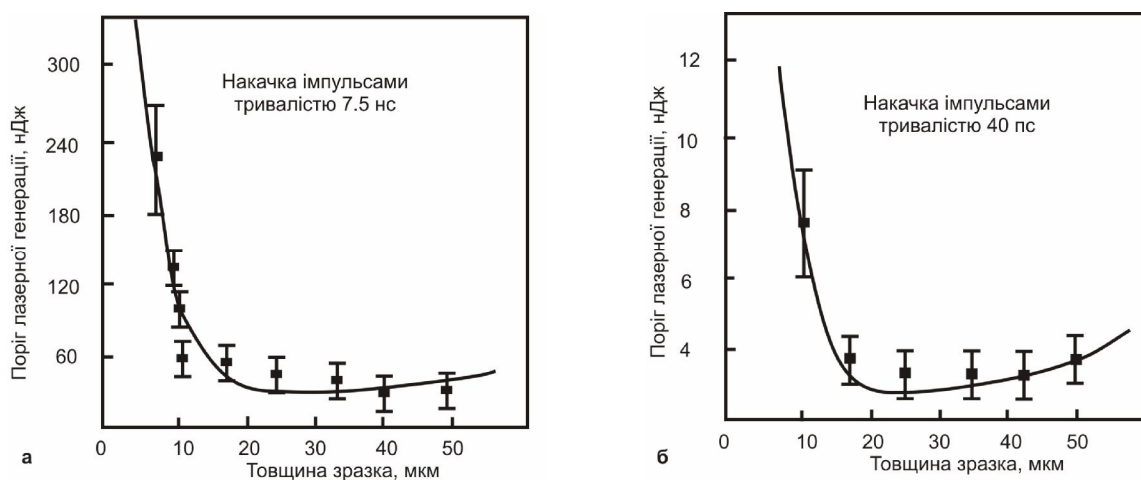


Рис. 6. Порог лазерної генерації як функція товщини зразка: наносекундне накачування (а), пікосекундне накачування (б) [16]

### Спектральні характеристики барвників

Для розширення діапазону настроювання і збільшення ефективності лазерної генерації такого лазера, необхідно досліджувати спектральні особливості барвників, які створюють лазерну генерацію в ХРК, та умови лазерної генерації барвників інших класів у таких середовищах [17, 18].

Основні вимоги до барвників, що використовуються для активації ХРК: високоефективна лазерна генерація і хороша розчинність у цій матриці для гарантування повної абсорбції випромінювання накачування в шарах із товщиною декілька десятків мікрометрів. Також необхідні високі квантові виходи флюоресценції в цих розчинах для гарантування низьких порогів лазерної генерації РЗЗ-лазера. Виконано експеримент з РЗЗ-лазером, що накачувався другою гармонікою лазера  $\text{Nd}^{3+}$  ( $\lambda=530$  нм) з модульованою добротністю. Як ХРК використовували базову суміш похідних холестерину з таким складом: 40% холестерилолеат, 25 % холестерилхлорид, і 35 % холестерилпеларгонат. Плоска текстура ХРК з барвником була утворена між скляними підкладками з шаром  $\text{SnO}_2$ . Під час вивчення характеристик лазерної генерації, концентрація барвників становила 0,3–0,5 %.

Як очевидно з рис. 7 (крива 1), для родаміну 6G, одного з найефективніших лазерних барвників, за концентрації 0,001 % в спектрі абсорбції з'являється короткохвильовий максимум, зміщений на 30 нм щодо максимуму на довжині хвилі  $\lambda = 530$  нм. Зі збільшенням концентрації барвника в плоскій текстурі орієнтованого ХРК, відносна інтенсивність короткохвильових максимумів зростає (рис. 7, крива 2). Максимум при 580 нм у цьому спектрі зумовлюється селективним відбиванням (СВ) плоскої текстури ХРК.

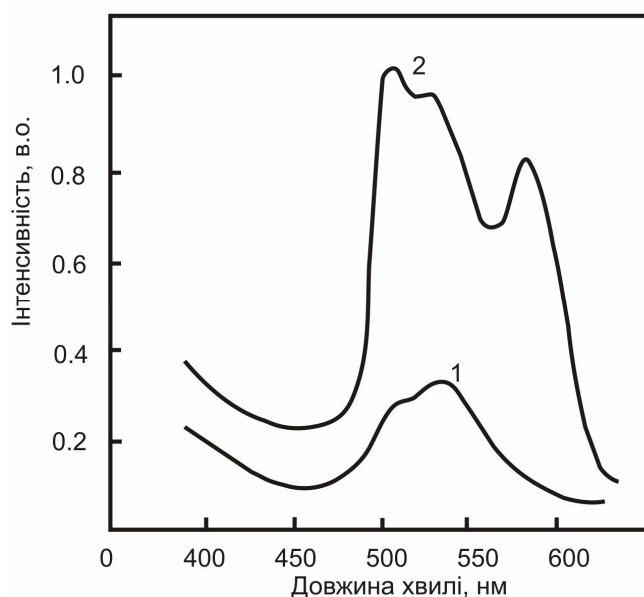


Рис. 7. Спектр абсорбції родаміну 6G в ізо트로пному ХРК (1) при 42 °С . Товщина шару 5 мкм . Концентрація 0.001 %. Спектр абсорбції цього барвника в орієнтованому ХРК (2). Товщина шару 50 мкм, концентрація 0.1 % [19]

Барвники феноленон мають високу фотостабільність у нейтральних середовищах, до яких належать ХРК. В оптичних спектрах абсорбції барвників F 490 і F 427, для яких одержана лазерна генерація з низьким порогом, короткохвильовий проміжок у діапазоні 400 нм відсутній, і абсорбція на краю смуги СВ істотно менша (рис. 8, крива 1).

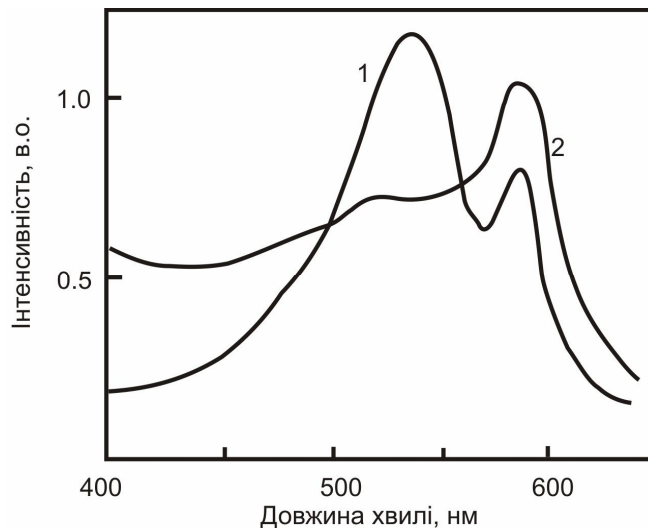


Рис. 8. Спектри абсорбції барвників F490 (1) і F439 (2) в орієнтованому ХРК. Товщина шару 50 мкм, концентрація 0.1% [19]

Цей вид барвників є найперспективнішим для активації ХРК, і на його основі поліпшуються характеристики лазерної генерації РЗЗ-лазера [19, 20].

#### Спектри селективного відбивання холестеричного рідкого кристала

Було досліджено, що на ФЗЗ, а тим самим і на діапазон настроювання лазера, впливають такі параметри ХРК, як товщина рідкокристалічної комірки, коефіцієнт променезаломлення і крок спіралі. Показано, що зі збільшенням  $\Delta n$  смуга селективного відбивання  $\Delta\lambda$  розширюється (рис. 9) [21, 22].

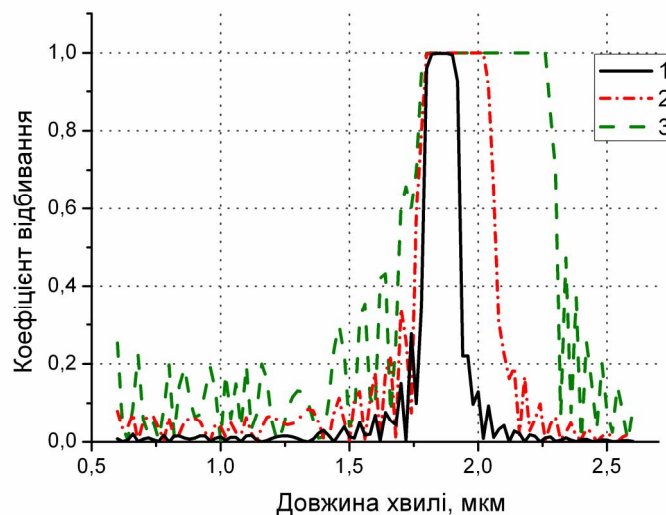


Рис. 9. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК для різних значень двоприменезаломлення: (1)  $\Delta n=0.1$ , (2)  $\Delta n=0.2$ , (3)  $\Delta n=0.4$  [21]

Зі збільшенням товщини від  $d = 1P$  до  $d = 10P$  коефіцієнт відбивання зростає [23]. При товщині  $10P$  коефіцієнт відбивання  $R \sim 0.99$  (рис. 10).

Відповідно, змінюючи крок ХРК, можна змінювати положення і ширину ФЗЗ (рис. 11) [24].

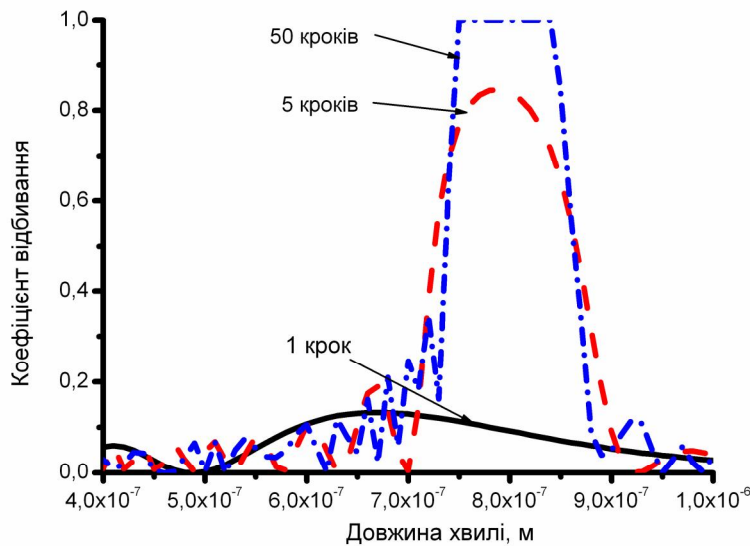


Рис. 10. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК у разі зміни товщини зразка  $d=1P$   $d=5P$ ,  $d=50P$  [23]

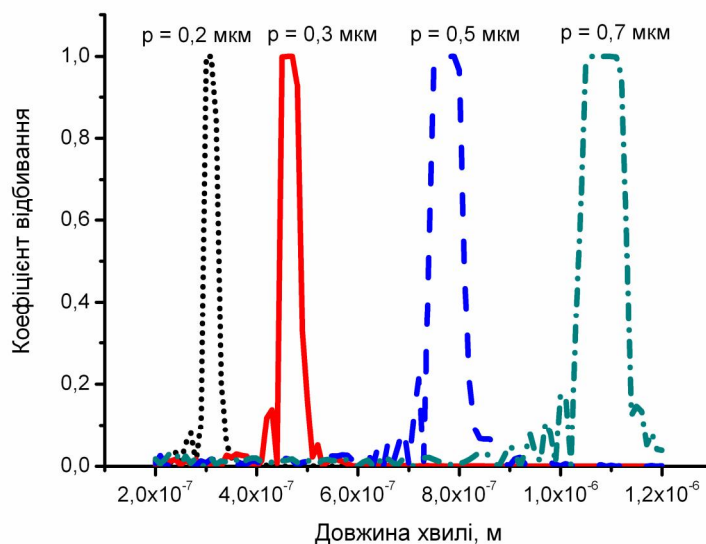


Рис. 11. Обчислені спектри селективного відбивання ХРК у разі зміни кроку спіралі  $P$  [24]

### Методи перестроювання довжини хвилі лазерної генерації

Спіральний крок дуже чутливий до зовнішніх впливів, таких, як електромагнітні поля і температура [25], ультрафіолетове випромінювання (УФ) [26–30] та зміна рН хімічного середовища [31].

Повідомлено про холестеричні плівки, які можна використовувати, як нові первинні перетворювачі сенсорів для високих концентрацій луку і кислоти. Лазерна генерація тонких холестеричних плівок, чутливих до змін у хімічному середовищі, може бути могутнім інструментом для вивчення деталей взаємодії фотонних хіральної матеріалів із забороненою зоною з хімічними сумішами [31].

Рис. 12, а ілюструє спектри пропускання для зразка за різних температур. Зі зростанням температури ФЗЗ хірального зразка зміщується в напрямі коротких довжин хвиль і заборонена зона стає вужчою. Це призводить до збільшення розчинності хіральної домішки в мономерях

під час зростання температури. Збільшення розчиненої хіральної концентрації в мономерах збільшує силу закручення, яка зменшує крок. Двопроменезаломлення ( $\Delta n$ ) зменшується зі збільшенням температури. Оскільки ширина смуги відбивання холестерика пропорційна до  $\rho \Delta n$ , фотонна заборонена зона зменшується зі збільшенням температури. Рис. 12, б ілюструє температурну залежність центральної довжини хвилі ( $\lambda_0$ ) ФЗЗ. Центральна довжина хвилі визначається як  $\lambda_0 = (\lambda_{\text{long}} + \lambda_{\text{short}}) / 2$ , де  $\lambda_{\text{long}}$  і  $\lambda_{\text{short}}$  – довжини хвилі на краях смуги відбивання [32].

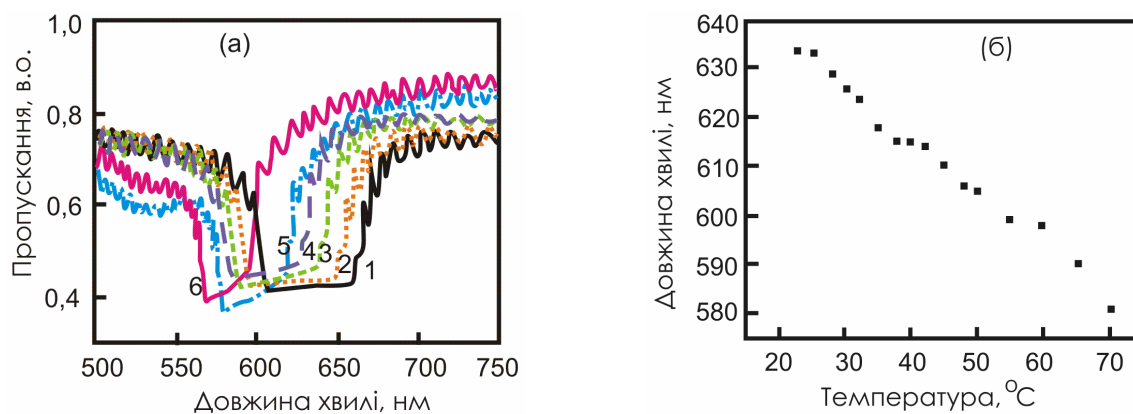


Рис. 12. Смуга селективного відбивання зразка для різних температур. Криві 1–6 відповідають  $T=23, 30, 40, 50, 60, \text{ і } 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , відповідно (а). Залежність середньої довжини хвилі відбивання зразка від температури (б). Товщина зразка  $d=15 \text{ мкм}$  [32]

Зворотні зміни спірального кроку і, відповідно, довжини хвилі смуги селективного відбивання (ССВ) ХПК були досягнуті, використовуючи світлочутливі хіральні азо-молекули (LSAZ) з ізомерами. Під дією УФ випромінювання ці молекули проходять транс-цис-ізомеризацію. Азо-ділянка – це структурна частина хіральних молекул. УФ випромінювання на довжині хвилі 350 нм стимулює переміщення стержнеподібних транс-молекул у зігнуті цис-молекули. Це переміщення зворотне. Зворотне переміщення (від цис- до транс-ізомеру) може бути досягнуте оптичним випромінюванням на більшій довжині хвилі або вимкненням УФ світла. Швидкість початкового (від транс- до цис-) і зворотного перетворень залежить від властивостей матеріалу матриці і найвища в матрицях з малою в'язкістю.

Положення ССВ і емісія лазерної генерації перестроюється зміною інтенсивності УФ випромінювання. УФ випромінювання призводить до транс- і цис-ізомеризації, яка збільшує закручувальну здатність молекул і спричиняє зменшення кроку. За низьких рівнів УФ випромінювання лазерна генерація характеризується переміщенням довжини хвилі лазерної генерації на 15–20 нм для концентрації LSAZ молекул близько 4.5 %. Для нижчої концентрації LSAZ (1.5 %) переміщення довжини хвилі лазерної генерації набагато менше, лише декілька нанометрів. Переміщення довжини хвилі лазерної генерації показано на рис. 13, а для різних інтервалів часу УФ опромінення і концентрації LSAZ 4.5 %. Лазерна генерація відбувається на краю ССВ.

Довжина хвилі лазерної генерації повертається назад до початкової довжини хвилі після того, як УФ випромінювання вимикається (рис. 14, б). Цей процес повільніший, ніж переміщення у напрямку до коротшої довжини хвилі лазерної генерації. Повне відновлення ССВ також вимагає 15–20 хвилин (рис. 14, б) [33].



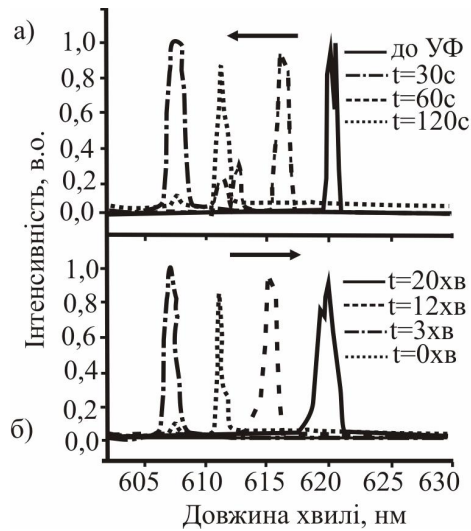


Рис. 13. Зміщення довжини хвилі лазерної генерації у напрямку до коротших довжин хвиль зі збільшенням часу  $t$  УФ випромінювання (а). Зворотнє переміщення довжини хвилі лазерної генерації після вимкнення УФ випромінювання і перебування зразка в темряві протягом  $t$  хвилин (б). Стрілки вказують на напрям переміщення піків лазерної генерації з часом [33]

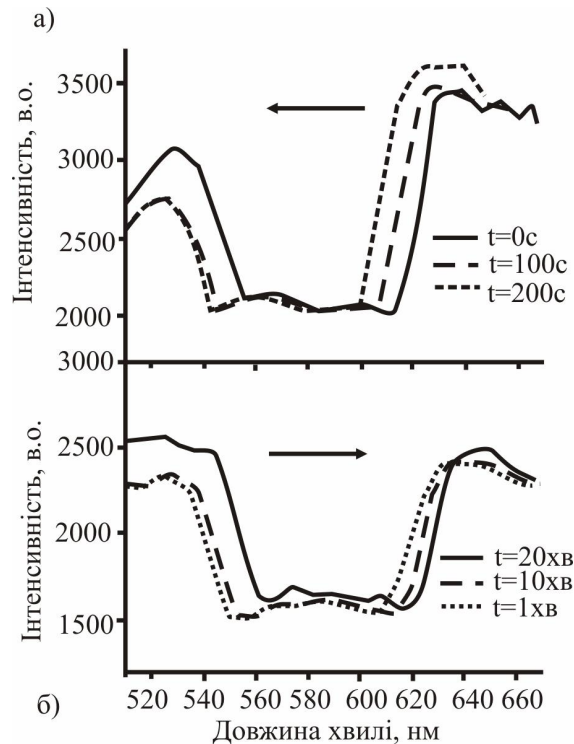


Рис. 14. Зміна положення смуги селективного відбивання під дією УФ випромінювання зі збільшенням часу опромінення  $t$  (а). Відновлення положення смуги селективного відбивання з часом після вимкнення УФ світла (б). Стрілки вказують на напрям змін ССВ з часом [33]

### Перспективи використання РЗЗ-лазерів на основі одновимірних фотонних кристалів

Лазерна генерація на ХРК відкрила їх потенційне застосування в якості оптичних сенсорів. Через те, що довжина хвилі лазерної генерації залежить від властивостей матеріалу холестерика, а ці властивості залежать від зовнішніх чинників, система може використовуватися як давач, де довжина хвилі лазерної генерації забезпечує інформацію про зовнішні чинники. Наприклад,

оскільки крок  $p$  і показники заломлення холестериків залежать від температури, то частота лазерної генерації може використовуватися як первинний перетворювач сенсорів температури.

В [34, 35] досліджено лазер ХРК, розміщений на оптичному волокні з накачуванням лазером через волокно. Емісія лазера спостерігалася від ХРК через волокно, що свідчить про можливість використання ХРК лазера як первинного перетворювача волоконного сенсора.

Схематична установка, що використовується для встановлення лазера ХРК у волокно, показана на рис. 15.

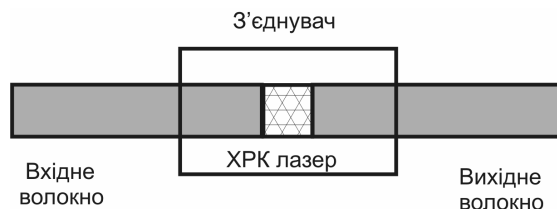


Рис. 15. Схематична установка для встановлення ХРК лазера між двома багатомодовими волокнами [34]

Спектр відбивання суміші холестерика і барвника показано на рис. 16. Пік спектра ( $\lambda = 580$  нм) флюоресценції збігається з низьким краєм енергії смуги відбивання ХРК.

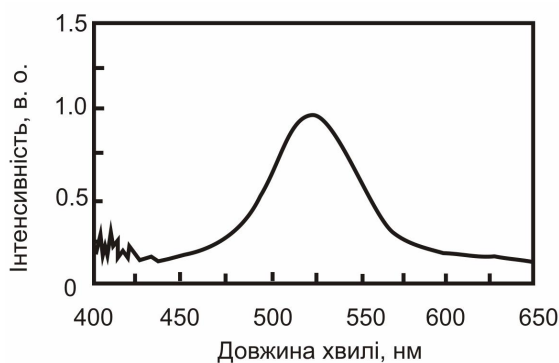


Рис. 16. Спектр відбивання суміші холестерика і барвника [34]

Типовий лазерний спектр емісії показаний на рис. 17. Емісія лазера ХРК відбувалася на 578.67 нм.

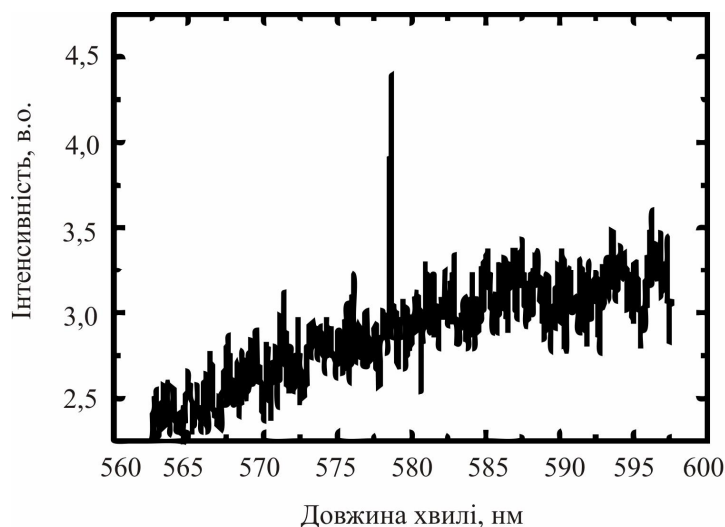


Рис. 17. Емісія волокно-зв'язаного ХРК лазера [34]

## Висновки

- Перевагами РЗЗ-лазера на основі холестеричного рідкого кристала є:
  - конструкція лазера дозволяє поєднати основні функціональні елементи лазера (активне середовище, резонатор і селектор для перестроювання) в одному шарі комірки;
  - можливість підбором певного типу барвника і лазерного збудження отримати лазерне випромінювання різної довжини хвилі.
- Використання холестеричних рідких кристалів дає змогу перестроювати довжину хвилі лазерної генерації, змінюючи крок спіралі Р, який залежить від зовнішніх чинників;
- Частота лазерної генерації залежить від властивостей ХРК матеріалу, а ці властивості дуже чутливі до зовнішніх чинників. Цю систему можна використовувати як сенсор, де довжина хвилі лазерної генерації забезпечує інформацію про зовнішні чинники;

Основною нерозв'язаною задачею сьогодні є створення малогабаритних, ефективних систем накачування такого типу лазерів.

Очевидна простота конструкції і можливість безперервного перестроювання частоти лазерної генерації створює перспективу застосування такого лазера в областях, де передусім потрібні дешеві, прості і компактні джерела когерентного випромінювання з частотною перебудовою.

1. Слепов Н. Фотонные кристаллы // *Электроника, наука, технология, бизнес.* – 2/2000. – С. 32–35. 2. Yablunovich E. *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – 58. – P. 2059. 3. Бирюков А.С., Дианов Е.М. Сб. трудов Уч.-науч. центра волок.-опт. матер. и устр. – 2002. – 5. – P. 6. 4. Геворгян А.А. Эффект потери поляризационной зависимости дифракционного отражения в хиральных фотонных кристаллах при наличии анизотропного дефекта // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32, № 16. – С. 18–27. 5. Шибаяев В.П. кристаллы или загадочные жидкости // *Соросовский Образовательный журн.* – 1996. – № 11. – С. 37–46. 6. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты / Под ред. В.П. Шибаяева. – Новосибирск: Наука, 1994. – 183 с. 7. Azzam R M.A. // *Appl. Phys. Lett.* – 1992. – 61. – P. 3118–3120. 8. Kopp V.I., Genack A.Z. Lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals // *LEOS NEWSLETTER.* April, 1999. – P. 8–10. 9. Kopp V.I., Zhang Z-Q, Genack A.Z. Lasing in chiral photonic structures // *Quantum Electron.* – 2003. – 27. – P. 369–416. 10. Сонин А.С., Шибаяев И.Н. Структурная упорядоченность и свойства холестерических псевдокапсулированных пленок // *Журн. физической химии.* – 1981. – Т. 55, № 5. – С. 1263–1267. 11. Наний О.Е. Оптические передатчики с перестраиваемой длиной волны излучения для DWDM сетей связи. Часть 2 // *Lightwave Russian Edition.* – 2006. – № 3. – С. 53–56. 12. Афанасьев А.А., Михневич С.Ю. Спектрально-пороговые характеристики РОС-лазера с синусоидальной модуляцией коэффициента связи // *Квантовая электроника.* – 2004. – Т. 34, № 4. – С. 315–319. 13. Andro Chanishvili, Guram Chilaya, Gia Petriashvili, Riccardo Barberi, Roberto Bartolino, Gabriella Cipparrone, a) and Alfredo Mazzulla Laser emission from a dye-doped cholesteric liquid crystal pumped by another cholesteric liquid crystal laser // *Applied Physics Letters.* – 18 October 2004. – Vol. 85, no. 16. – P. 3378–3380. 14. Ilchishin I.P., Tikhonov E.A. and Shpak M.T. Peculiarities of the spatial distribution of the lasing of a distributed feedback laser based on cholesteric liquid crystals // *Ukrainskij Fizicheskij Zhurn.* – 1988. – 33. – P. 10–16. 15. Shibaev P.V., Kopp V.I., Genack A.Z. Photonic Materials Based on Mixtures of Cholesteric Liquid Crystals with Polymers // *J. Phys. Chem. B* 2003, 107. – P. 6961–6964. 16. Cao W., Marino A., Abbate G., Palffy-Muhoray P., Taheri B.: Lasing Thresholds of Cholesteric Liquid Crystals Lasers // *Electronic-Liquid Crystal Communications.* – October 16, 2004. 17. Finkelmann H., Kim S. T., Munoz A. F., Palffy-Muhoray P., and Taheri B. Tunable mirrorless lasing in cholesteric liquid crystalline elastomers. // *Advanced Materials.* – 2001. – 17. – P. 1069–1072. 18. Zhou Y., Huang Y., Lin T-H., Chen L-P., Hong Q., and Wu S-T. Direction controllable linearly polarized laser from a dye-doped cholesteric liquid crystal. // *OPTICS EXPRESS.* – 12 June 2006. – Vol. 14, No.–

P. 5571–5580. 19. Ilchishin I.P. Spectral and thresholds lasing characteristics of the dye doped steroid cholesteric liquid crystals. *Electronic-Liquid crystal Communications // Electronic-Liquid crystal Communications*. – 2 May 2005. – P. 1–8. 20. Ilchishin I.P., Maslov P.Yu., Tikhonov E.A., Lipnitsky S.O. Lasing in the dye doped nematic liquid crystal at the dynamic distributed feedback // *Electronic-Liquid Crystal Communications*. – 21 August, 2006. – P. 1–10. 21. Мукитюк З.М., Фечан А.В., Ясиновська О.Й. Вплив параметрів холестеричних рідких кристалів на смугу селективного відбивання світла в РЗЗ-лазерах // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2007. – № 592. – С. 128–133. 22. Mykytyuk Z., Fechan A., Sushynsky O., Yasynovska O. Cholesteric Liquid Crystals in Distributed Feedback Lasers // *Proceedings of the IX<sup>th</sup> International Conference CADSM 2007, Lviv – Polyana, Ukraine, 2007*. – 104 p. 23. Мукитюк З., Ясиновська О., Коцун В., Вараниця А. Моделирование фотонной забороненої зони в холестеричних рідких кристалах // *Технічні вісті*. – 2007. – С. 128–129. 24. Sushynskyy O., Yasynovska O., Varanytsia A. Foton Band Gap In Segnetoelectrical Liquid Crystals // *VIII International Electronic And Telecommunications Conference Of Students And Young Scientific Workers. Warsaw – Bemowo 7–8 November 2007*. – P. 51. 25. Huang Y., Zhou Y., Doyle C. and Shin-Tson Wu. Tuning the photonic band gap in cholesteric liquid crystals by temperature-dependent dopant solubility // *OPTICS EXPRESS*. – 6 February 2006. – Vol. 14, No. 3. – P. 1236–1242. 26. Bobrovsky A., Boiko N., Shibaev V., Wendorff J. Photoinduced textural and optical changes in a cholesteric copolymer with azobenzene-containing side groups // *Liquid Crystals*. – 2004. – 31. – P. 351–359. 27. Fuh A.Y. G., Lin T.H., Lasing in chiral photonic liquid crystals and associated frequency tuning // *Optics Express*. – 2004. – 12. – P. 1857–1863. 28. Furumi S., Yokoyama S., Otomo A., Mashiko S. Phototunable photonic bandgap in a chiral liquid crystal laser device // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – 84. – P. 2491–2493. 29. Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., Cipparrone G. and other. Widely tunable ultraviolet-visible liquid crystal laser // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – 86, 051107(1)-051107(3). 30. Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., Cipparrone G., Mazzulla A., Oriol L. Lasing in dye-doped cholesteric liquid crystals: Two New Tuning Strategies // *Adv. Mat.* 2004. – 16. – P. 791–795. 31. Shibaev P.V., Madsen J., Genack A.Z. Lasing and Narrowing of Spontaneous Emission from Responsive Cholesteric Films // *Chem. Mater.* – 2004. – 16. – P. 1397–1399. 32. Huang Y., Chen Liang-Pin, Doyle Charlie, Zhou Ying, and Shin-Tson Wu. Spatially tunable laser emission in dye-doped cholesteric polymer films // *APPLIED PHYSICS LETTERS*. – 12 September 2006. – 89. 33. Peter V. Shibaev, R. Lea Sanford, Daniel Chiappetta, Valery Milner, Azriel Genack, Alexei Bobrovsky. Light controllable tuning and switching of lasing in chiral liquid crystals // *OPTICS EXPRESS*. – 4 April 2005. – Vol. 13, No. 7. – P. 2358–2363. 34. Moreira M.F., Carvalho I.C.S., Valente L.C.G., Pally-Muhoray P., Taheri B., Munoz A.F. Fiber Coupled Cholesteric Liquid Crystal Laser // *Brazilian Journal of Physics*. – June, 2002. – Vol. 32, no. 2B. – P. 455–457. 35. Moreira M.F., Carvalho I.C.S., Cao W., Bailey C., Taheri B., Palfy-Muhoray P. Cholesteric liquid-crystal laser as an optic fiber-based temperature sensor // *Applied Physics Letters*. – 4 October 2004. – Vol. 85, no. 14. – P. 2691–2693.