

УДК 535.36

**З.М. Микитюк, О.З. Готра\*, О.Є. Сушинський, В.В. Черпак,  
В.Г. Іваницький, Б. Даланбаяр**

Національний університет «Львівська політехніка»,  
кафедра електронних приладів

\* кафедра інформаційно-виміральної техніки

## **БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ РІДКОКРИСТАЛІЧНИЙ СЕНСОР**

© Микитюк З.М., Готра О.З., Сушинський О.Є., Черпак В.В., Іваницький В.Г.,  
Даланбаяр Б., 2001

**Запропоновано використання як оболонки світловоду рідкокристалічного матеріалу, чутливого до дії зовнішніх факторів. Розглянуто нову конструкцію багатофункціонального сенсора на основі планарного хвилеводу та рідкого кристала. Показано перевагу планарного хвилеводу над волоконним світловодом як елемента трансмісії світла завдяки спрощенню процесу орієнтації РК шару та створення сенсорів зовнішніх полів у приладах інтегральної техніки.**

**The using of liquid crystal material which is sensitive to external fields influence as fibre wave guide envelope is suggested. The new construction of multifunction sensor based on planar wave guide and liquid crystal is considered. The advantage of planar wave guide using as transmission line in comparison with fiber one, that is owing to the liquid crystal orientation process simplicity and possibility of external fields sensors creation in integral optics devices are shown.**

### **Вступ**

Одним із напрямків розвитку сенсорної техніки є створення нових методів і пристроїв, призначених для реєстрації та контролю за температурою, тиском, переміщенням, електричними чи магнітними полями. Відомо, що оптоелектронні сенсори фізичних величин використовують ефект впливу вимірюваного сигналу на параметри інформативного світлового потоку. На початку 90-х років значного поширення набуло застосування волоконних світловодів (ВС) у сенсорній техніці. Сьогодні актуальним є використання останніх разом із рідкокристалічними матеріалами завдяки поєднанню таких властивостей світловодів, як малі втрати, еластичність, відсутність впливу електричних чи магнітних полів, малі діаметр та маса, з такою особливістю рідкокристалічних матеріалів, як висока чутливість до зовнішнього впливу. Роботи [1-6] присвячені вивченню волоконних світловодів та дослідженню властивостей рідких кристалів (РК) з метою створення сенсорів, типова конструкція яких базується на використанні РК як чутливого елемента і ВС-лінії трансмісії модульованого сигналу.

Оптоелектронні сенсори на основі рідких кристалів, здатні одночасно реєструвати декілька фізичних величин, отримали назву багатофункціональних сенсорів.

### **Характеристика рідкокристалічних матеріалів, нематичні РК суміші**

При використанні нематичних рідкокристалічних сумішей для заповнення капсули активного елемента сенсора важливе значення має вибір величини показників заломлення

$n_{\perp}$  і  $n_{\parallel}$ . Початкова орієнтація нематика повинна бути гомеотропною, при цьому забезпечується умова повного внутрішнього відбивання, а саме  $n_{\perp} < n_c$ , де  $n_c$  – показник заломлення осердя [7,8].

Дія зовнішнього фактора (температури, тиску, електричного чи магнітного полів) приводить до порушення умови повного внутрішнього відбивання, оскільки молекули рідкого кристала переорієнтовуються, при цьому зменшується значення  $n_{\perp}$  і зростає  $n_{\parallel}$ . Чутливість сенсора з нематичною сумішшю залежить від величини подвійного променезаломлення та довжини заповненого рідким кристалом оголеного осердя [9].

### Індуковані холестерики

Ситуація суттєво змінюється при використанні як активної речовини індукованого холестерика.

Розглянемо деякі оптичні властивості шару індукованого холестеричного рідкого кристала.

Дисперсію розсіювання та інші аномальні оптичні властивості шару індукованого холестеричного рідкого кристала можна пояснити бреггівським розсіюванням на спіральній структурі. Основними оптичними параметрами, що описують шар, є показник заломлення  $n$  і крок індукованої спіралі  $p$ . Як відомо, крок чутливий до зміни температури, величини магнітного та електричного полів.

Показник заломлення в індукованій холестеричній фазі описується як:

$$n = \frac{n_o + n_e}{2} + \Delta n \cos\left(\theta + \left(\frac{d}{p}\right)\right), \quad (1)$$

де  $p$  – крок індукованої спіралі,  $d$  – товщина шару,  $\theta$  – напрямок обертання поляризованої хвилі.

Довжина хвилі при максимальному розсіюванні в індукованому холестеричному рідкому кристалі залежить від кута падіння та кута відбивання.

Довжина хвилі максимального розсіювання має вигляд:

$$\lambda = \lambda_z \cos \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{n}{n'} \sin \Phi_i \right) + \sin^{-1} \left( \frac{n}{n'} \sin \Phi_s \right) \right], \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі максимального розсіювання,  $\lambda_0$  – довжина хвилі максимального розсіювання для випадку нормального падіння хвилі,  $n$  – коефіцієнт заломлення середовища,  $n'$  – коефіцієнт заломлення рідкого кристала 1,5;  $\Phi_i$  – кут падіння,  $\Phi_s$  – кут розсіювання.

У роботі [10] розраховано коефіцієнт відбивання хвилі від шару рідкого кристала при умові селективного відбивання світла.

На рис. 1 зображена розрахована залежність коефіцієнта відбивання світла з круговою поляризацією для тонкого зразка. Ширина смуги з максимальним коефіцієнтом відбивання визначається, як видно з рисунка, величиною  $\Delta\lambda = nP$ , а отже, задає розкид довжин хвиль, для яких буде виконуватись умова селективного відбивання. Як відомо, величина  $\Delta n$  для рідкокристалічних матеріалів змінюється в межах від 0,08 до 0,2. Отже, підбором рідкокристалічного матеріалу можна задати спектральну ширину відбивання випромінювання від шару холестеричного рідкого кристала.

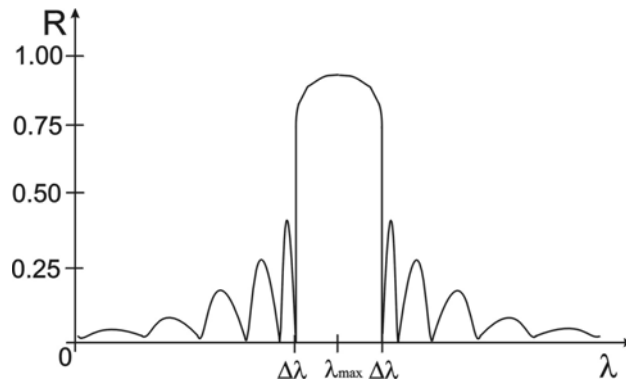


Рис. 1. Залежність величини коефіцієнта відбивання від довжини хвилі падаючого випромінювання

### Вплив зовнішніх полів на крок холестеричної спіралі

Для більшості чистих холестеричних матеріалів крок спіралі зменшується із зростанням температури, причому швидкість зміни суттєво відрізняється для різних рідкокристалічних сумішей (рис. 2).

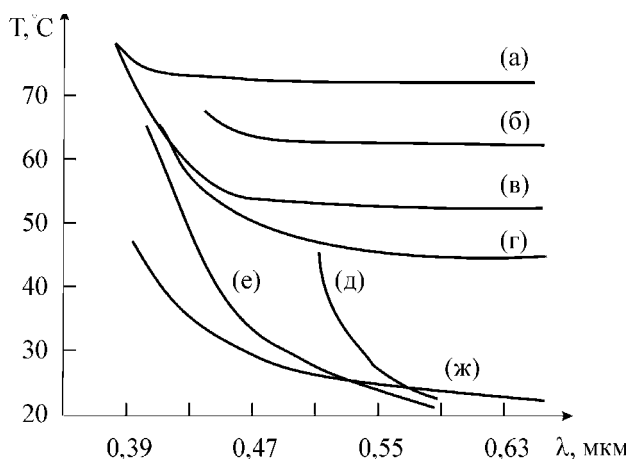


Рис. 2. Температурна залежність довжини хвилі в максимумі розсіювання для ряду сумішей ефірів холестерину і холестериліонаоату:

- а) чистий холестериліонаоат (ХН);
- б) 20 % холестерилгідроціннамату, 80 % ХН;
- в) 20 % холестерилбутирату, 80 % ХН;
- г) 20 % холестерилпропіонату, 80 % ХН;
- д) 20 % холестерилхлориду, 80 % ХН;
- е) 20 % холестерилацетату, 80 % ХН;
- ж) 20 % холестерилметилкарбонату, 80 % ХН

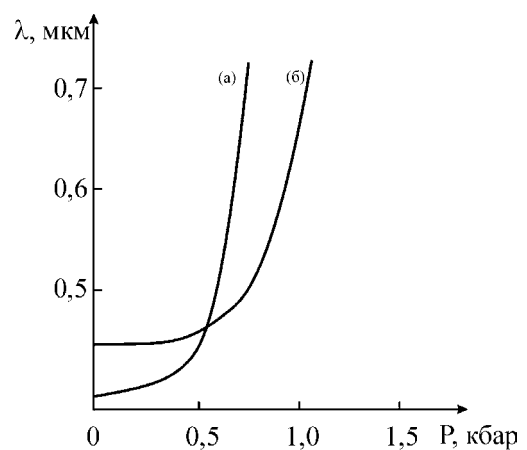


Рис. 3. Залежність довжини хвилі в максимумі розсіювання від тиску для сумішей холестерилолеїлкарбонату (ХОК) і холестерилхлориду (ХХ)

- при кімнатній температурі:
- а) ХОК/ХХ = 74,8/25,2 (мольні проценти),
- б) ХОК/ХХ = 80,1 / 19,9 (мольні проценти)

На даний час синтезовані холестеричні суміші, в яких крок спіралі змінюється в інтервалі, співмірному з шириною спектра видимого світла при зміні температури на 0,1 °С. Фактично існує можливість візуального контролю зміни температури на 0,01 °С.

Рідкокристалічний матеріал потрібно вибрати так, щоби крок спіралі відповідав порядку довжини хвилі видимого світла в необхідному температурному діапазоні. Це досягається синтезом відповідних рідкокристалічних сумішей. Малі зміни температури проявляють себе як зміна кольору розсіяного світла, що може бути використано для візуальної

індикації температури поверхні, візуалізації інфрачервоного випромінювання, оптичної індикації мікрохвильового поля.

Ряд робіт було присвячено вивченню впливу тиску на крок холестеричної спіралі. Як видно з рис. 3, крок спіралі зростає досить швидко з ростом тиску, для даних сумішей величина критичного тиску становить 0,8 та 1,2 кбар.

Зміна кроку холестеричної спіралі залежно від величини магнітного поля проявляється досить добре в холестерико-нематичних сумішах з малим процентним вмістом холестерилацетату. При слабких полях крок спіралі фактично не змінюється, в сильних полях він збільшується до повного розкручування при критичному полі. Величина критичного поля розраховується за формулою:

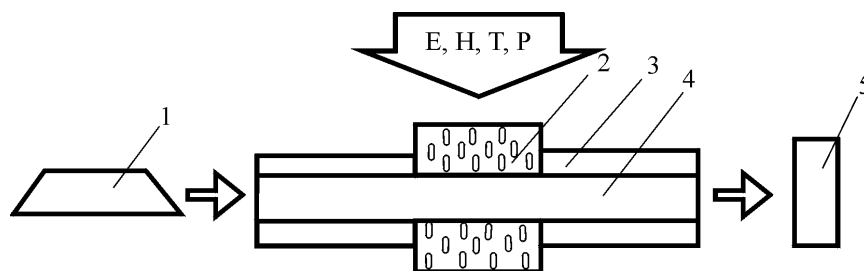
$$H_c = \pi^2 \left( \frac{K_2}{\chi_a} \right) \frac{1}{P_0},$$

і становить приблизно 8 – 10 кГс. Величина критичного поля обернено пропорційна до величини кроку холестеричної спіралі [10].

*Багатофункціональний сенсор на основі світловоду та нематичного рідкого кристала*

У роботах [12] подано один із варіантів конструктивного рішення сенсора на основі волоконного світловоду в поєднанні з рідкими кристалами.

На рис. 4 зображено волоконно-оптичний сенсор, де 1 – джерело випромінювання; 2 – ділянка з видаленою оболонкою, де розміщується капсула з нематичним рідким кристалом, 3 – оболонка світловоду; 4 – осердя світловоду; приймач випромінювання.



*Рис. 4. Схематичне представлення принципу роботи багатофункціонального сенсора на основі волоконного світловоду:*

*1 – джерело випромінювання; 2 – рідкокристалічна комірка; 3 – оболонка світловоду; 4 – осердя світловоду; 5 – приймач випромінювання*

Сенсор працює за таким принципом: світловий потік подається на вхід волоконного світловоду, де поширюється осердям 4. При відсутності впливу зовнішніх чинників (температури, тиску, електричного чи магнітного полів) виконується умова повного внутрішнього відбивання, тому світло поширюється осердям 4 без втрат. Дія вимірюваної величини приводить до зміни показника заломлення рідкокристалічного матеріалу, що, в свою чергу, призводить до порушення умови повного внутрішнього відбивання на ділянці оголеного осердя 3. Світловий потік модулюється втратами випромінювання на ділянці капсули з нематичним рідким кристалом 2. Величина температури, тиску, напруженості електричного чи магнітного полів визначається порівнянням вихідного та вхідного сигналів.

У роботі [6] проведено математичне моделювання сенсора зі змінним показником заломлення чутливого елемента. На рис. 5 зображено розповсюдження випромінювання в такому сенсорі.

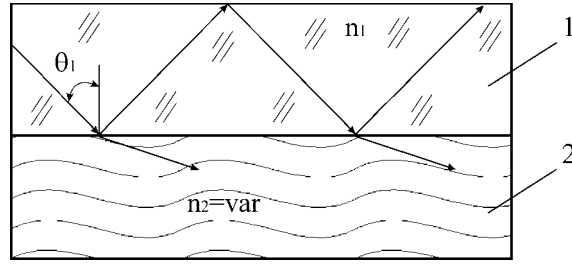


Рис. 5. Схематичне зображення робочої ділянки сенсора зі змінним показником заломлення чутливого елемента

Проведено розрахунок максимальних та мінімальних значень вихідної потужності:

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вих}}}{d\theta_1} d\theta_1. \quad (3)$$

Даний інтеграл можна розділити на дві частини:

1) в діапазоні кутів від  $\theta_{1\text{кр}} = \arcsin(n_{20}/n_1)$  до  $\theta_{1\max}$ , в якому виконується умова повного внутрішнього відбивання;

2) в діапазоні кутів від  $\theta_{1\min}$  до  $\theta_{1\text{кр}}$  умова повного внутрішнього відбивання не виконується, тому

$$\frac{dP_{\text{вих}}}{d\theta_1} = \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}), \quad (4)$$

де

$$R_{\Sigma}(\theta_1, n_2) = 0,5 [R_{\perp n}^k(\theta_1, n_2) + R_{\parallel n}^k(\theta_1, n_2)]. \quad (5)$$

Отже, величини максимальних та мінімальних значень потужності випромінювання можуть бути визначені згідно з виразами:

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20})] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1. \quad (6)$$

Аналогічно визначається мінімальна потужність:

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2)] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}\Delta}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1, \quad (7)$$

де

$$\theta_{1\text{кр}\Delta} = \arcsin[(n_{20} + \Delta n_2) / n_1]. \quad (8)$$

### Багатофункціональний сенсор на основі планарного хвилеводу та індукованого холестерика як чутливого елемента

Використовуючи вищеописані характеристики індукованого холестерика та волоконного хвилеводу, запропоновано нову конструкцію багатофункціонального сенсора. Перевага даної конструкції над попередньо запропонованими полягає у використанні планарного хвилеводу. Це дає можливість створити стійку планарну розсіюючу текстуру холестеричного рідкого кристала.

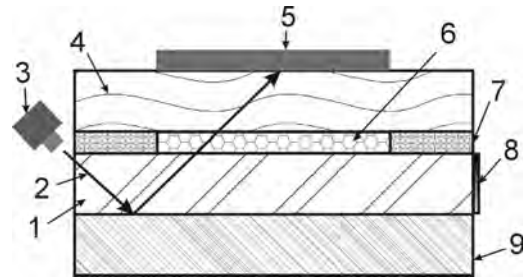


Рис. 6. Конструкція сенсора на основі планарного хвилеводу та комірки з індукованим холестериком:  
 1 – осердя хвилеводу; 2 – вхідне світло; 3 – джерело випромінювання;  
 4 – покривна пластина; 5 – детектор випромінювання;  
 6 – рідкокристалічна комірка; 7 – спейсери; 8 –  $\lambda/4$ -пластина;  
 9 – оболонка хвилеводу

Для функціонування сенсора слід забезпечити виконання таких вимог: співмірність довжини хвилі випромінювання, що поширюється хвилеводом та кроку індукованої спіралі, а саме,  $P = \lambda / n$ ; наявність початкової планарної текстури; вибір матеріалу осердя з показником заломлення меншим, ніж показник заломлення індукованого холестерика [13,14].

За відсутності дії зовнішнього фактора мало б виникнути висвічування променів на ділянці осердя, оточеній рідким кристалом, але наявність селективного відбивання повертає промінь назад у ВС. Зовнішній вплив приводить до зміни кроку індукованої спіралі, що, в свою чергу, порушує умову селективного відбивання  $\lambda = nP$  і викликає винесення світла за межі скловолокна. Зовнішнім фактором, що змінює крок індукованої спіралі  $P$ , є тиск, температура, НВЧ та електромагнітні поля. Зміна величини інтенсивності випромінювання, поданого в хвилевід, є визначальним фактором реєстрації величини зовнішнього впливу.

Для реєстрації тиску необхідно створити мембрану на місці покривної пластини.

### Висновки

В роботі розглянуто характеристики рідкокристалічних сумішей, що використовуються для створення сенсорів магнітного та електричного полів, температури, тиску, наведено графічні залежності зміни кроку холестеричної спіралі під дією температури, тиску, магнітного поля.

Показано переваги використання індукованих холестериків як чутливого елемента сенсора температури над нематичними РК через більшу чутливість холестеричних рідких кристалів до температури та ширшим розкидом залежностей кроку холестеричної спіралі від температури, що дає змогу застосовувати холестеричні рідкі кристали як чутливі елементи сенсорів температури в різних температурних діапазонах та з заданою чутливістю.

Доведено перевагу використання планарного хвилеводу над волоконним світловодом, як елемента трансмісії світла завдяки спрощенню процесу орієнтації РК шару та можливості використання його для створення сенсорів зовнішніх полів у приладах інтегральної оптики. Оскільки для створення початкової планарної текстури необхідно створити гомогенну орієнтацію молекул, що технологічно простіше, використання індукованих холестериків є перспективнішим у сенсорній техніці.

1. G. Okosi et all. *Fibre lightguide sensors*. M.: Mir, 1991. 267 p. 2. Z. Mikityuk, R. Zayats, O. Gotra. *Multifunctional sensor with a liquid crystal probe* // *Proceedings of 2-nd International*

*Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystems, Lviv, 1998. S. 221-224.* 3. T.R. Wolinski, et all. Swiatlowody cieklokryształiczne w monitorowaniu ciśnienia // Referaty i komunikaty IV Konferencji Naukowej “Technologia i Zastosowanie Swiatlowodow”, Krasnobrod’96. T. 2. S. 103-106. 4. W. Wojcik, A. Kotura, S. Przulucki, A. Smolarz, A. Szymczak. Swiatlowodowy czujnik absorpcyjny zanikajacego pola // IV Konferencja Naukowa “Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne” Materiały Konferencyjne. T. II, Poland, 1996. S. 39-42. 5. B. Stadnyk, E. Lychkovsky, W. Kalita, R. Zayats, O. Gotra. Pressure sensors based on electrooptical effects in liquid crystals // Proceedings of 2-nd International Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystems, Lviv, 1998. S. 204-206. 6. V. Busurin, J. Nosov. Optical-fiber sensor: physical principle, application. M.: Energoatomizdat, 1990. 255 p. 7. Беляев В.В., Кузнецов А.Б. Зависимость показателя преломления 4-алкил-4-алкоситоланов от их молекулярного строения. Оптический журнал, 1993. № 7. С. 25-29. 8. Коньяр Жак. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей. Мн.: 1986. 104. С. 9. Dabrowski R. Isothiocyanates and their mixtures with a broad range of nematic phase // Mol. Cryst. Liq. Cryst., Proceedings of the 8th Liquid Crystal Conference of Socialist Countries Part 1 // 1990. Vol. 191. Pp. 17-27. 10. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М., 1982. 11. Андрушко Л.М., Вознесенский В.А. и др. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи К., 1988. 12. Mykytyuk.Z., Lopatynskyy I., Gotra O., Dalanbayar B. Liquid crystal using in optical sensors // Proc. SPIE. № 4425 International Conference on Optoelectronic Informational Technologies “Photonics OSD 2000”, Vinnitsa. 13. Mykytyuk Z., Ivanytskyu V., Glushyk I. Humidity sensor // Abstracts of International Conference on Optoelectronic Informational Technologies “Information – Energy Technologies”, 2001, Vinnitsa. 14. Lopatynskyy I., Cherpak V., Dalanbayar B. Magnetic fibre guide selector // Abstracts of International Conference on Optoelectronic Informational Technologies “Optoelectronic Information – Energy Technologies”, 2001, Vinnitsa, Ukraine.