



УКРАЇНА

(19) UA (11) 93033 (13) C2
(51) МПК (2011.01)
G01N 21/17 (2011.01)
G02F 1/13

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РІДКОКРИСТАЛІЧНОЇ КОМІРКИ

1

(21) а200704065
(22) 12.04.2007
(24) 10.01.2011
(46) 10.01.2011, Бюл.№ 1, 2011 р.
(72) ВАЛЮХ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ, ВАЛЮХ ІРИНА ВОЛОДИМИРІВНА, СЛОБОДЯНЮК ОЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ
(73) ВАЛЮХ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ
(56) US 6081337; 27.06.2000
US 5532823; 2.07.1996
UA 77409 C2; 15.12.2006
US 5239365; 24.08.1993
US 5966195; 12.10.1999
JP 2004348054; 09.12.2004
US 6757062 B2; 29.06.2004
JP 2001159751 A; 12.06.2001
JP 4080641 A; 13.03.1993
JP 11084335; 26.03.1999
(57) 1. Спосіб вимірювання параметрів рідкокристалічної комірки, за яким колімований пучок лінійно поляризованого світла направляють по нормалі до поверхні рідкокристалічної комірки, розміщеної з можливістю її обертання навколо осі, що співпадає із згаданою вище нормаллю, при цьому пучок світла, яке поширюється від рідкокристалічної комірки після взаємодії з нею, а саме, пучок світла, що пройшло через рідкокристалічну комірку або відбилося від неї, пропускають через лінійний аналізатор, площа пропускання якого утворює кут ϕ з вектором поляризації згаданого вище лінійно поляризованого світла, і вимірюють потужність цього пучка світла принаймні на одній довжині хвилі, який відрізняється тим, що потужність пучка світла за аналізатором вимірюють при різних орієнтаціях рідкокристалічної комірки, які здійснюють шляхом її обертання навколо згаданої осі, діленням вимірної потужності пучка світла за аналізатором на суму потужностей пучка світла за аналізатором, виміряних при двох довільних взаємно ортогональних положеннях аналізатора, і таким чином визначають нормовану потужність пучка світла за аналізатором на цій довжині хвилі, знаходять максимальні та мінімальні значення нормованої потужності пучка світла за аналізатором і довжини хвиль, при яких ці значення досягаються, і за цими значеннями розрахунковим шляхом визначають параметри рідкокристалічної

2

комірки, такі як добуток різниці головних показників заломлення Δn рідкого кристала на товщину d шару рідкого кристала, що заповнює рідкокристалічну комірку, кут закрутки директора рідкого кристала ϕ , кут між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристала в шарі рідкого кристала поблизу його поверхні, на яку падає світло, ϕ .
2. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що рідкокристалічна комірка є прозорою, а світло, яке поширюється від рідкокристалічної комірки після взаємодії з нею, є світлом, що пройшло крізь рідкокристалічну комірку.
3. Спосіб за п. 2, який відрізняється тим, що нормовану потужність світла вимірюють на різних довжинах хвиль і отримують таким чином спектр нормованої потужності T , а кут закрутки директора рідкого кристала ϕ та добуток різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d\Delta n$ знаходять як розв'язання системи рівнянь

$$X \left(1 - \frac{X^2}{\phi^2} \right) \operatorname{ctg} X = 1$$

та

$$\sin^2 X \left(1 - \frac{\phi^2}{X^2} \right) = T_{\max} - T_{\min}$$

де $X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda} \right)^2}$, а λ - це довжина хвилі,

при якій різниця між максимальним та мінімальним значеннями нормованої потужності пучка світла $T_{\max} - T_{\min}$ досягає найбільшого значення.

4. Спосіб за п. 2, який відрізняється тим, що виміри проводять для фіксованої довжини хвилі λ_f і визначають кут β між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристала в шарі рідкого кристала поблизу його поверхні, на яку падає світло, за формулою

(13) C2

(11) 93033

(19) UA

$$\beta_k = \frac{1}{2} \left(\gamma - \phi + k \frac{\pi}{2} \right) \pm \frac{1}{4} \arccos \frac{2T - T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}},$$

де k - ціле число із набору цілих чисел $-2, -1, 0, 1, 2$, T - виміряна нормована потужність світла для орієнтації рідкокристалічної комірки, для якої визначають кут β , T_{\max} , T_{\min} - відповідно максимальне та мінімальне значення нормованої потужності, які досягаються при обертанні згаданої вище рідкокристалічної комірки, причому у вищеведеній формулі знак "+" або "-" та значення k вибирають такими, щоб отримане значення β_k було найближчим до очікуваного або щоб величина потужності, розрахована з використанням цього значення β_k , мала величину, найближчу до вимірної.

5. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що нормовану потужність світла вимірюють на різних довжинах хвиль і отримують таким чином спектр нормованої потужності $T(\lambda)$, знаходять таку орієнтацію рідкокристалічної комірки, при якій згадана нормована потужність набуває екстремального (максимального або мінімального) значення, знаходять значення другої похідної нормованої потужності по довжині хвилі λ принаймні в одній точці екстремуму за формулою

$$T(\lambda) = \cos^2 \phi + \gamma \sin^2 \phi \sin^2 2\phi - \beta + \gamma \sin 2\phi + \frac{\phi}{2X} \sin 2X \phi \sin 2\phi + \gamma \phi^2 \frac{\sin^2 X \phi \sin 2\phi}{X^2 \phi \sin 2\phi} \cos 2\phi - \beta + \gamma \cos 2\phi,$$

в якому $X(\phi, \lambda) = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda} \right)^2}$ є найближчим до

значення ρ , обчисленого вище з виміряного спектра нормованої потужності світла, причому, якщо існує декілька пар значень ϕ та $d \Delta n$, для яких розраховане значення ρ є близьким до обчисленого вище з виміряного спектра нормованої потужності світла, то вибирають такі значення ϕ та $d \Delta n$, що є найближчими до очікуваних, або такі, при яких наведений вище аналітичний вираз $T(\lambda)$ дає значення нормованої потужності світла, найближче до виміряного.

6. Спосіб за одним із пунктів 2, 3 або 5, який **відрізняється** тим, що кут β між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристала в шарі рідкого кристала поблизу його поверхні, на яку падає світло, визначають так: для орієнтації рідкокристалічної комірки, що відповідає максимальному або мінімальному значенню нормованої потужності світла, добирають таке ціле число k із набору цілих чисел $-2, -1, 0, 1, 2$, щоб отримане за формулою

$$\beta_k = \frac{1}{2} \left(\gamma - \phi + k \frac{\pi}{2} \right)$$

значення β_k цього кута було найближчим до очікуваного або щоб величина нормованої потужності

$$\rho = \frac{T(\lambda_e + \Delta\lambda) + T(\lambda_e - \Delta\lambda) - 2T(\lambda_e)}{\Delta\lambda^2},$$

де $T(\lambda_e + \Delta\lambda)$, $T(\lambda_e - \Delta\lambda)$, $T(\lambda_e)$ є значення нормованої потужності світла, виміряні на довжинах хвиль $\lambda_e + \Delta\lambda$, $\lambda_e - \Delta\lambda$, λ_e , відповідно, а λ_e - довжина хвилі, при якій має місце згаданий вище екстремум, $\Delta\lambda$ - малий спектральний інтервал, величина якого не менша за мінімальний спектральний інтервал, який може бути надійно вимірний, після чого визначають кут закрутки директора рідкого кристала ϕ та добуток різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ як такі, при яких значення другої похідної згаданої нормованої потужності по довжині хвилі λ розраховане за формулою

$$\rho = \frac{\partial^2 T(\lambda)}{\partial \lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_e},$$

де $T(\lambda)$ - аналітичний вираз для спектра нормованої потужності пучка світла за аналізатором:

світла, розрахована з використанням значення β_k цього кута, мала величину, найближчу до вимірної нормованої потужності світла.

7. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що кут ϕ закрутки директора рідкого кристала рідкокристалічної комірки визначають так: для орієнтації рідкокристалічної комірки, що відповідає максимальному або мінімальному значенню нормованої потужності світла, добирають таке ціле число k із набору цілих чисел $-2, -1, 0, 1, 2$, щоб отримане за формулою

$$\phi_k = \gamma - 2\beta + k \frac{\pi}{2}$$

значення ϕ_k цього кута було найближчим до очікуваного, або щоб величина потужності, розрахована з використанням значення ϕ_k цього кута мала величину, найближчу до вимірної нормованої потужності світла, β - наперед відоме значення кута між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристала в шарі рідкого кристала поблизу його поверхні, на яку падає світло.

8. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що нормовану потужність світла вимірюють на фіксованій довжині хвилі λ_f , кут закрутки директора рідкого кристала рідкокристалічної комірки визначають за формулою

$$\phi_k = \gamma - 2\beta + k \frac{\pi}{2} \pm \frac{1}{2} \arccos \frac{2T - T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}},$$

де k - ціле число із набору цілих чисел $-2, -1, 0, 1, 2$, T - виміряна потужність світла для орієнтації рідкокристалічної комірки, яку описують кутом β , T_{\max} , T_{\min} - відповідно максимальне та мінімальне значення потужності світла, які досягаються при обертанні згаданої вище рідкокристалічної комірки, причому у вищенаведеній формулі знак "+" або "-" та значення k вибирають такими, щоб отримане значення ϕ_k було найближчим до очікуваного або, щоб величина потужності, розрахована з використанням значення ϕ_k цього кута мала величину, найближчу до вимірної, β - наперед відоме значення кута між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристала в шарі рідкого кристала поблизу його поверхні, на яку падає світло.

9. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що світло, яке поширюється від рідкокристалічної комірки після взаємодії з нею, є світло, що відбилося від рідкокристалічної комірки.

$$-X^3 \cos^3 X + X^2 \cos^2 X \sin X + X(X^2 - 2\phi^2) \cos X \sin^2 X + 2\phi^2 \sin^3 X = 0,$$

$$\text{де } X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda}\right)^2}, \quad \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} d \Delta n, \quad \lambda - \text{довжина}$$

хвилі згаданого локального мінімуму або максимуму, причому серед розв'язань згаданої вище системи рівнянь вибирають те розв'язання, що дає значення кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ та добутку різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ найбільш близькі до очікуваних, або те розв'язання, що дає значення кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ та добутку різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ такі, використання яких при розрахунку нормованої потужності світла за аналізатором, найбільш близьке до виміряного.

11. Спосіб за п. 9, який **відрізняється** тим, що потужність світла вимірюють на різних довжинах хвиль і в отриманому таким чином спектрі потужності пучка світла за аналізатором $R(\lambda)$ знаходять залежність від довжини хвилі λ нормованої різниці між максимальним R_{\max} та мінімальним R_{\min} значеннями потужності світла, кут закрутки директора рідкого кристала ϕ , добуток товщини шару рідкого кристала на різницю головних показників заломлення рідкого кристала $d \Delta n$ і частотну дисперсію згаданої різниці головних показників заломлення $\Delta n(\lambda)$ рідкого кристала знаходять шляхом апроксимації згаданої вище залежності формулою

10. Спосіб за п. 9, який **відрізняється** тим, що потужність світла вимірюють на різних довжинах хвиль і за отриманим таким чином спектром нормованої потужності пучка світла $R(\lambda)$ знаходять залежність від довжини хвилі λ різниці між її максимальним R_{\max} та мінімальним R_{\min} значеннями, визначають довжину хвилі та величину цієї різниці $R_{\max} - R_{\min}$ принаймні для одного з локальних мінімумів або максимумів залежності цієї різниці від довжини хвилі λ , і розрахунковим шляхом визначають кут закрутки директора рідкого кристала ϕ та добуток різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ як розв'язання системи рівнянь

$$R_{\max} - R_{\min} = \left(\Gamma \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right)$$

та

$$R_{\max} - R_{\min} = \left(\Gamma \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right).$$

де $X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda}\right)^2}$, $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} d \Delta n$, а частотна дисперсія різниці показників заломлення подана формулою Коші

$$\Delta n(\lambda) = \Delta n(\lambda_0) + B \left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_0^2} \right) + C \left(\frac{1}{\lambda^4} - \frac{1}{\lambda_0^4} \right), \quad \text{де}$$

$\Delta n(\lambda_0)$ наперед відоме значення різниці показників заломлення для деякої опорної довжини хвилі λ_0 , а B і C є числові коефіцієнти, що відповідають найкращій апроксимації.

12. Спосіб за п. 9, який **відрізняється** тим, що при напрямку пропускання аналізатора, ортогональному до напрямку вектора лінійної поляризації колімованого пучка світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та при рівномірному її обертанні спектр потужності світла, що відбилося від рідкокристалічної комірки, вимірюють на різних довжинах хвиль з усередненням на проміжку часу, значно більшому за період обертання рідкокристалічної комірки, і в отриманому таким чином усередненому за часом спектрі нормованої потужності пучка світла за аналізатором $S(\lambda)$ визначають довжину хвилі принаймні одного локального мінімуму або максимуму, і розрахунковим шляхом знаходять кут закрутки директора рідкого кристала ϕ та добуток різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ як розв'язань системи рівнянь

$$S(\lambda) = \left(\Gamma \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right)$$

та

$$-X^3 \cos^3 X + X^2 \cos^2 X \sin X + X(X^2 - 2\phi^2) \cos X \sin^2 X + 2\phi^2 \sin^3 X = 0,$$

$$\text{де } X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda_m} \right)^2}, \quad \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} d \Delta n, \quad \text{а } \lambda_m \text{ - дов-}$$

жина хвилі локального мінімуму або максимуму, причому серед розв'язань згаданої вище системи вибирають ті, значення яких є найближчими до очікуваних величин кута закрутки молекул рідкого кристала ϕ та добутку різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ або такі, щоб величина нормованої потужності пучка світла за аналізатором, розрахована з використанням цих значень, мала величину, найближчу до вимірної.

13. Спосіб за п. 9, який **відрізняється** тим, що при напрямку пропускання аналізатора, ортогональному до напрямку вектора лінійної поляризації колімованого пучка світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та при рівномірному її обертанні спектр нормованої потужності світла, що відбився від рідкокристалічної комірки, вимірюють на різних довжинах хвиль з усередненням на проміжку часу, значно більшому за період обертання рідкокристалічної комірки, і в отриманому таким чином усередненому за часом спектрі нормованої потужності пучка світла за аналізатором $S(\lambda)$ кут закрутки директора рідкого кристала ϕ , добуток товщини шару рідкого кристалу на різницю головних показників заломлення рідкого кристала $d \Delta n$ і частотну дисперсію згаданої різниці головних показників заломлення $\Delta n(\lambda)$ рідкого кристала знаходять шляхом апроксимації виміряного спектра нормованої потужності пучка світла за аналізатором $S(\lambda)$ формулою:

$$S(\lambda) = \left(\Gamma \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right),$$

$$\text{де } X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n(\lambda)}{\lambda} \right)^2}, \quad \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} d \Delta n, \quad \text{а частотна}$$

дисперсія різниці показників заломлення подана формулою Коші

$$\Delta n(\lambda) = \Delta n(\lambda_0) + B \left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_0^2} \right) + C \left(\frac{1}{\lambda^4} - \frac{1}{\lambda_0^4} \right), \quad \text{де}$$

$\Delta n(\lambda_0)$ - наперед відоме значення різниці показників заломлення для деякої опорної довжини хвилі λ_0 , а B і C є числові коефіцієнти, що відповідають найкращій апроксимації.

14. Спосіб за одним з пунктів 10, 11, 12, 13, який **відрізняється** тим, що знаходять таке положення рідкокристалічної комірки, при якому для фіксованої довжини хвилі λ нормована потужність пучка світла за аналізатором приймає максимальне або мінімальне значення, при цьому кут β між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристала в шарі рідкого кристала поблизу його поверхні, на яку падає світло, визначають за формулою

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{\phi}{X} \tan X \right) + \gamma \right],$$

якщо згадана вище нормована потужність пучка світла приймає мінімальне значення, або за формулою

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{\phi}{X} \tan X \right) + \gamma \right] \pm \frac{\pi}{4},$$

якщо згадана вище нормована потужність пучка світла приймає максимальне значення, причому знак "+" або "-" вибирають такими, щоб отримане значення β було найближчим до очікуваного, у

$$\text{згаданих вище формулах } X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda} \right)^2}.$$

15. Спосіб за одним з пунктів 5, 6, 10-13, який **відрізняється** тим, що товщину рідкокристалічної комірки знаходять шляхом ділення значення добутку різниці головних показників заломлення рідкого кристала на товщину шару рідкого кристала $d \Delta n$ на наперед відому різницю головних показників заломлення Δn .

16. Спосіб за будь-яким із попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що колімований пучок лінійно поляризованого світла є квазімонохроматичним.

17. Спосіб за п. 16, який **відрізняється** тим, що квазімонохроматичне світло отримують від джерела зі спектром, неперервним у широкому діапазоні довжин хвиль, шляхом пропускання його через вузькосмуговий світлофільтр або через монохроматор.

18. Спосіб за п. 16, який **відрізняється** тим, що квазімонохроматичне світло є світлом від джерела зі змінною довжиною хвилі випромінювання, наприклад, лазера зі змінною довжиною хвилі випромінювання.

19. Спосіб за п. 16, який **відрізняється** тим, що вимірювання спектра потужності світла, що пропускають через аналізатор, здійснюють спектрометром.

Винахід стосується рідкокристалічної оптоелектроніки, а саме способів визначення параметрів рідкокристалічних комірок, а саме оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною світловими хвилями, що розповсюджуються в рідкому кристалі (добутку товщини комірки на різницю головних показників заломлення), товщини комірки (товщини шару рідкого кристалу, що заповнює комірку), частотної дисперсії різниці головних показників заломлення рідкого кристалу, кута закрутки директора рідкого кристалу (кута закрутки переважного напрямку орієнтації молекул рідкого кристалу), напрямку орієнтації директора рідкого кристалу поблизу поверхні, на яку падає світло. Винахід також може бути застосований для вимірювання параметрів тонких прозорих анізотропних шарів. Рідкокристалічна комірка є основним структурним елементом у різноманітних оптоелектронних пристроях. Основні параметри рідкокристалічних дисплеїв, а саме яскравість, контрастне відношення, часи реакції та релаксації залежать від оптичної різниці ходу між ортогонально поляризованими світловими хвилями, яка виникає при проходженні світла через шар рідкого кристалу, що заповнює комірку, кута закрутки директора та кута між площиною поляризації світла, що падає на шар рідкого кристалу та напрямком орієнтації директора рідкого кристалу на поверхні цього шару.

Відомі способи вимірювання параметрів рідкокристалічних комірок, а саме оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною світловими хвилями (добутку товщини комірки на різницю головних показників заломлення), товщини шару рідкого кристалу, що заповнює комірку, частотної дисперсії різниці головних показників заломлення рідкого кристалу, кута закрутки директора рідкого кристалу, напрямку орієнтації директора рідкого кристалу біля поверхні, на яку падає світло, переважно засновані на вимірюванні одного чи декількох із згаданих вище параметрів, в той час, як решта параметрів має бути наперед відома.

Цей недолік частково усувається в способі вимірювання оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною світловими хвилями, що розповсюджуються в рідкому кристалі та кута закрутки директора, описаному в патенті US6081337, що є найближчим аналогом винаходу, і який полягає в тому, що на рідкокристалічну комірку, яка розміщена між двома поляризаторами, нормально до її поверхні спрямовують пучок світла з неперервним спектром у широкому діапазоні довжин хвиль і вимірюють спектр світла, що провзаємодіяло з рідкокристалічною коміркою. Для визначення параметрів прозорої рідкокристалічної комірки рідкокристалічну комірку обертають навколо напрямку розповсюдження світла та знаходять таку довжину хвилі λ_0 у спектрі спостережуваного світла, для якої спостережувана потужність дорівнює нулю при будь-якому положенні рідкокристалічної комірки. При цьому для прозорої комірки вихідний поляризатор обертають одночасно з коміркою, та знаходять таке його положення, коли потужність світла на довжині хвилі λ_0 у спектрі спостережува-

ного світла дорівнює нулю. При вимірюванні параметрів відбиваючої комірки поляризатор і аналізатор схрещені. Оптичну різницю ходу $d\Delta n$ визначають за формулою:

$$d\Delta n = \lambda_0 \sqrt{m^2 - \left(\frac{\phi}{\pi}\right)^2} \quad (1)$$

де m - ціле число довжин хвиль, які складають оптичну різницю ходу при $\phi = 0$, ϕ - кут закрутки директора рідкого кристалу.

Для комірок з товщинами від 2 до 10 мкм число m може приймати значення від 1 до 4. Конкретне значення m обирають, виходячи з наперед відомого приблизного значення товщини комірки таким чином, щоб розраховане за формулою (1) значення було найближче до наперед відомого приблизного значення. Кут закрутки директора прозорої комірки визначається з формули:

$$\phi = \theta_2 - \theta_1 \pm \frac{\pi}{2} \pm \pi \quad (2)$$

де θ_2 , θ_1 - кути орієнтації площин поляризації вхідного та вихідного поляризаторів, відповідно. Для відбивної рідкокристалічної комірки кут закрутки директора запропонованим способом (US Patent 6081337) визначити неможливо.

Недоліками цього способу є те, що 1) необхідно обертати одночасно вихідний поляризатор та рідкокристалічну комірку; 2) необхідно мати спектрометр, який вимірює спектр у реальному масштабі часу; 3) якщо чутливість спектрометра залежить від стану поляризації падаючого на його вхід випромінювання, то обертання вихідного поляризатора може призвести до значної похибки вимірювання; 4) значення різниці головних показників заломлення рідкого кристалу має бути відомим для всіх довжин хвиль оптичного діапазону, в якому проводять виміри; 5) спосіб можна застосувати лише у випадку, коли оптична різниця ходу кратна довжині хвилі з цього діапазону. Окрім того, у випадку відбивної комірки цей спосіб не дозволяє виміряти кут закрутки директора.

Задачею винаходу є розширення функціональних можливостей відомого способу визначення параметрів рідкокристалічної комірки, а саме спрощення процесу вимірювання оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями (добутку товщини комірки на різницю головних показників заломлення) і кута закрутки директора рідкого кристалу в прозорій рідкокристалічній комірці, а також забезпечення можливості вимірювання кута закрутки директора у відбивній рідкокристалічній комірці, напрямку орієнтації директора рідкого кристалу біля поверхні, на яку падає світло, та частотної дисперсії різниці головних показників заломлення рідкого кристалу, що заповнює рідкокристалічну комірку, при довільних взаємних орієнтаціях рідкокристалічної комірки, напрямку вектора лінійної поляризації світла, що падає на неї, та напрямку пропускання вихідного поляризатора.

Зазначений технічний результат досягають за рахунок того, що колімований пучок лінійно поля-

ризованого світла направляють по нормалі до поверхні рідкокристалічної комірки, розміщеної з можливістю її обертання навколо осі, що співпадає з згаданою вище нормаллю. При цьому пучок світла, який поширюється від рідкокристалічної комірки після взаємодії з нею, а саме, пучок світла, що пройшло через рідкокристалічну комірку або відбилося від неї, пропускають через лінійний аналізатор, площина пропускання якого утворює деякий кут (γ) з вектором поляризації згаданого вище лінійно поляризованого світла. Потім при різних орієнтаціях рідкокристалічної комірки, які здійснюють шляхом її обертання навколо згаданої осі, вимірюють потужність пучка світла за аналізатором, принаймні, на одній довжині хвилі. Цю виміряну потужність пучка світла за аналізатором ділять на суму потужностей пучка світла за аналізатором, виміряних для двох довільних взаємно ортогональних положень аналізатора і таким чином визначають нормовану потужність пучка світла за аналізатором на цій довжині хвилі. Потім знаходять максимальні та мінімальні значення нормованої потужності пучка світла за аналізатором і довжини хвиль, при яких ці значення досягаються. За знайденими максимальним та мінімальними значеннями нормованої потужності пучка світла за аналізатором і довжинами хвиль, при яких ці значення досягаються, розрахунковим шляхом визначають параметри рідкокристалічної комірки, такі як добуток різниці головних показників заломлення (Δn) рідкого кристалу на товщину (d) шару рідкого кристалу, що заповнює рідкокристалічну комірку, кут закрутки директора рідкого кристалу ϕ , кут між вектором поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку та напрямком директора рідкого кристалу в шарі рідкого кристалу поблизу його поверхні, на яку падає світло, (β).

Далі спосіб докладно пояснюється із залученням фігур зображення та формул для визначення параметрів рідкокристалічних комірок, а саме оптичної різниці ходу, що є добутком різниці головних показників заломлення рідкого кристалу на товщину шару рідкого кристалу ($d\Delta n$), товщини шару рідкого кристалу, що заповнює комірку, (d), дисперсії різниці головних показників заломлення рідкого кристалу ($\Delta n(\lambda)$), кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ , кута між напрямком поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку та напрямком директора рідкого кристалу в шарі рідкого кристалу поблизу його поверхні, на яку падає світло, (β).

На Фіг.1 подано схему способу вимірювання, відповідно до винаходу, згаданих вище параметрів рідкокристалічної комірки в режимі на пропускання.

На Фіг.2 неперервними кривими показано типові залежності нормованої спектральної потужності $T(\lambda)$ світла, що пройшло через рідкокристалічну комірку та аналізатор у схемі, наведений на Фіг.1, для різних орієнтацій рідкокристалічної комірки від оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями в рідкому кристалі, виміряної в довжинах хвиль, тобто від відношення $d\Delta n/\lambda$, а штриховою кривою показано різницю між

максимальним та мінімальним значеннями нормованих спектральних потужностей світла ($T_{\max}-T_{\min}$).

На Фіг.3 показано типові залежності різниці максимального та мінімального значень спектральних потужностей світла, що пройшло через рідкокристалічну комірку та аналізатор у схемі, наведений на Фіг.1, ($T_{\max}-T_{\min}$) від оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями, виміряної в довжинах хвиль ($d\Delta n/\lambda$) при різних орієнтаціях рідкокристалічної комірки.

На Фіг.4 показано залежності максимумів різниці максимального та мінімального значень спектральних потужностей світла, що пройшло через прозору рідкокристалічну комірку та аналізатор у схемі, наведений на Фіг.1, ($T_{\max}-T_{\min}$), які відповідають різним значенням числа m ($m=0, 1, 2, 3$), наведеного у формулі (1), від величини кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ .

На Фіг.5 показано положення екстремумів (максимумів \max та мінімумів \min) різниці між максимальним та мінімальним значеннями спектральних потужностей ($T_{\max}-T_{\min}$) світла, що пройшло через рідкокристалічну комірку та аналізатор у схемі, наведений на Фіг.1, у координатах кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ та оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями, виміряної в довжинах хвиль ($d\Delta n/\lambda$).

На Фіг.6 неперервними кривими показано типові спектральні потужності $T(\lambda)$ світла, що пройшло через рідкокристалічну комірку та аналізатор у схемі, наведений на Фіг.1, для різних орієнтацій рідкокристалічної комірки. Штриховою кривою зображено різницю між максимальним та мінімальним значеннями спектральних потужностей ($T_{\max}-T_{\min}$).

На Фіг.7 показано типову залежність значення другої похідної в точці максимуму нормованої спектральної потужності світла $T(\lambda)$, що пройшло через рідкокристалічну комірку та аналізатор у схемі, наведений на Фіг.1, при куті між площиною пропускання поляризатора-аналізатора та напрямом вектора поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, $\gamma=90^\circ$, від кута закрутки директора ϕ та оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями, виміряної в довжинах хвиль ($d\Delta n/\lambda$).

На Фіг.8 подано схему способу вимірювання, відповідно до винаходу, згаданих вище параметрів рідкокристалічної комірки в режимі на відбивання.

На Фіг.9 неперервними кривими показано типові залежності нормованих потужностей світла, які виміряні за схемою Фіг.8, від оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями, виміряної в довжинах хвиль, ($d\Delta n/\lambda$) та штриховою кривою різницю між максимальним та мінімальним значеннями цих потужностей.

На Фіг.10 показано типові залежності різниці максимального та мінімального значень потужностей світла ($R_{\max}-R_{\min}$) які виміряні за схемою Фіг.8, від оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями, виміряної в довжинах хвиль, ($d\Delta n/\lambda$) при різних значеннях кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ .

На Фіг.11 показано залежності значень локальних мінімумів нормованої різниці між максимальною та мінімальною спектральними потужностями ($R_{\max}-R_{\min}$), які виміряні за схемою Фіг.8, від величини кута закрутки директора ϕ .

На Фіг.12 показано залежності значень нормованої різниці між максимальною та мінімальною спектральними потужностями ($R_{\max}-R_{\min}$), виміряних за схемою Фіг.8, у точках її локальних максимумів, від величини кута закрутки директора ϕ .

Спосіб вимірювання за винаходом параметрів рідкокристалічної комірки, а саме добутку різниці головних показників заломлення рідкого кристалу на товщину шару рідкого кристалу ($d\Delta n$), товщини шару рідкого кристалу, що заповнює комірку, (d), дисперсії різниці головних показників заломлення рідкого кристалу ($\Delta n(\lambda)$), кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ , кута між напрямком поляризації світла, що падає на рідкокристалічну комірку, та напрямком директора рідкого кристалу в шарі рідкого кристалу поблизу його поверхні, на яку падає світло, (β) полягає в тому, що колімований пучок лінійно поляризованого світла 1 з вектором поляризації 2 направляють по нормалі до поверхні рідкокристалічної комірки 3, розміщеної з можливістю обертання навколо осі, що співпадає з згаданою вище нормаллю, при цьому світло, яке поширюється від рідкокристалічної комірки 3 після взаємодії з нею, а саме, світло, що пройшло через рідкокристалічну комірку (Фіг.1) або відбилося від неї (Фіг.8), пропускають через лінійний аналізатор 4, який є лінійним поляризатором, і вимірюють потужність світла 5, принаймні, на одній довжині хвилі при різних орієнтаціях рідкокристалічної комірки 3, які здійснюють шляхом її обертанням навколо згаданої осі. При цьому кут між напрямком пропускання лінійного аналізатора 4 та вектором поляризації світла 2 є γ . Згадану вище виміряну потужність пучка світла 5 за аналізатором ділять на суму потужностей світла, які виміряні при двох довільних взаємно ортогональних положеннях аналізатора, і отримують, таким чином, нормовану потужність пучка світла за аналізатором на цій довжині хвилі. У виміряних залежностях нормованої потужності від орієнтації рідкокристалічної комірки 3 визначають максимальні та мінімальні значення нормованої потужності. Виміри виконують на різних довжинах хвиль світла 1 і знаходять такі довжини хвиль, при яких згадана вище нормована потужність досягає екстремального (максимального або мінімального) значення як функція довжини хвилі та орієнтації рідкокристалічної комірки 3. Одна з можливих схем, за якою колімований пучок світла 1 падає по нормалі на поверхню рідкокристалічної комірки 3, як це показано на Фіг.8а, наведена на Фіг.8б, в якій використовують розщеплювач пучка світла 6. Фахівцю зрозуміло, що коефіцієнти відбивання та пропускання розщеплювача можуть залежати від стану поляризації світла, яке падає на розщеплювач, і що цей факт має бути врахований, щоб мінімізувати його вплив на точність вимірів або оптимальним вибором станів поляризації або внесенням відповідних поправок до результатів вимірів. У схемі на Фіг.8б на-

прям вектора поляризації пучка світла, що падає на розщеплювач 6, обрано паралельним площині падіння на світлоподільну частково відбивну поверхню розщеплювача, від якої пучок частково відбивається, внаслідок чого його вектор поляризації 2 залишається паралельним площині падіння на світлоподільну частково відбивну поверхню розщеплювача. Частина пучка проходить крізь світлоподільну поверхню (не показано на Фіг.8б). Іншим оптимальним вибором напрямку вектора поляризації пучка світла, що падає на розщеплювач 6, є напрямком ортогональний до площини падіння на світлоподільну частково відбивну поверхню розщеплювача 6. При проходженні через розщеплювач 6 світла відбитого від рідкокристалічної комірки 3 поправку необхідно вносити лише тоді, коли пропускання розщеплювача 6 різне для лінійно поляризованого світла з векторами поляризації паралельним і перпендикулярним площині падіння на світлоподільну частково відбивну поверхню розщеплювача 6.

Також можливо використовувати схеми, коли колімований пучок світла 1 падає на поверхню рідкокристалічної комірки під кутом близьким до нормалі.

Фахівцю також повинно бути зрозуміло, що в силу симетрії оптичних систем, які зображено на Фіг.1 та Фіг.8, а також внаслідок того, що величина френелівських відбивань від рідкокристалічної комірки 3 істотно не змінюється внаслідок її обертання, то виміряні потужності світла 5 для двох орієнтацій рідкокристалічної комірки 3, кут між якими кратний 90° , рівні між собою. Це означає, що кут β може бути виміряний з точністю до 90° .

У загальному випадку світло, що пройшло крізь прозору рідкокристалічну комірку, при вимірюванні в режимі пропускання (Фіг.1), буде еліптично поляризоване. Стан поляризації цього світла залежить від товщини комірки d , різниці головних показників заломлення рідкого кристалу Δn , кута закрутки директора ϕ і для кожної довжини хвилі λ визначається нормованим вектором Джонса:

$$\vec{V}_{out} = \frac{R}{I} \begin{pmatrix} \cos \beta \left(\cos X - i \frac{\Gamma \sin X}{2X} \right) + \sin \beta \phi \frac{\sin X}{X} \\ \sin \beta \left(\sin X + i \frac{\Gamma \sin X}{2X} \right) - \cos \beta \phi \frac{\sin X}{X} \end{pmatrix} \quad (3)$$

де R - матриця повороту на кут закрутки директора рідкого кристалу ϕ , β - кут між вектором лінійної поляризації світла 2, що падає на рідкокристалічну комірку та напрямком директора рідкого кристалу в шарі рідкого кристалу поблизу його поверхні, на яку падає світло,

$$X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda} \right)^2}, \quad I(\lambda) - \text{потужність світла 5 на}$$

довжині хвилі λ . Світло на виході рідкокристалічної комірки буде лінійно поляризоване, якщо виконується, принаймні, одна із двох умов:

$$\sin X = 0 \quad (4)$$

або

$$\frac{\phi}{X} \operatorname{tg} X = \operatorname{tg} 2\beta \quad (5)$$

З першої умови (співвідношення (4)) випливає, що стан поляризації світла на виході рідкокристалічної комірки не залежить від взаємної орієнтації вектора лінійної поляризації світла 2, що падає на рідкокристалічну комірку 3, та рідкокристалічної комірки, в той час як за другою умовою (співвідношення (5)) світло на виході комірки буде мати лінійну поляризацію лише при певній орієнтації рідкокристалічної комірки щодо вектора лінійної поляризації світла. 2, що падає на рідкокристалічну комірку 3. Розв'язком рівняння (4) є співвідношення (1). Типові виміряні за схемою Фіг.1 залежності нормованої на одиницю потужності світла від відношення оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями до довжини хвилі $(d\Delta n/\lambda)$ при різних орієнтаціях рідкокристалічної комірки 3 показано на Фіг.2 неперервними кривими. Максимальна можлива різниця між двома згаданими вище потужностями $(T_{\max}-T_{\min})$ зображена штриховою кривою.

Існує декілька способів знаходження розрахунковим шляхом потужності світла, що пройшло крізь прозору рідкокристалічну комірку 3 та лінійний аналізатор 4 у схемі, яка зображена на Фіг.1.

Наприклад, рідкокристалічну комірку представляють у вигляді багатоплощинної структури і застосовують матричний метод Джонса, Мюллера, Беремана, чи інший розрахунковий метод. Також згадана вище потужність світла після нормування може бути описана аналітичним виразом для коефіцієнта пропускання рідкокристалічної комірки, розміщеної між двома лінійними поляризаторами [P. Yeh, C. Gu, Optics of Liquid Crystal Displays, Hardcover, 1999]:

$$T = \cos^2 \phi + \gamma \sin^2 X \sin 2\phi - \beta + \gamma \sin 2\beta + \frac{\phi}{2X} \sin 2X \sin 2\phi + \gamma \cos 2\beta - \phi^2 \frac{\sin^2 X}{X^2} \cos 2\phi - \beta + \gamma \cos 2\beta \quad (6)$$

Нормування вимірної потужності світла на довжині хвилі λ виконують за формулою

$$T(\lambda) = \frac{I_{\parallel}(\lambda)}{I_{\parallel}(\lambda) + I_{\perp}(\lambda)}$$

де $I(\lambda)$ - потужність світла 5 на довжині хвилі λ , $I_{\parallel}(\lambda)$ та $I_{\perp}(\lambda)$ потужності світла 5 на довжині хвилі λ , які виміряли для довільних двох взаємно ортогональних положень аналізатора 4. Величина $I_{\parallel}(\lambda) + I_{\perp}(\lambda)$ пропорційна повній потужності пучка світла, що падає на аналізатор 4. В силу довільності вибору взаємно ортогональних положень аналізатора 4, для відшукування нормованої потужності світла на довжині хвилі λ , можна користуватися формулою

$$T(\lambda) = \frac{I_{\parallel}(\lambda)}{I_{\parallel}(\lambda) + I_{\perp}(\lambda)},$$

де під $I_{\perp}(\lambda)$ тепер треба розуміти потужність світла 5 на довжині хвилі λ , яку виміряли для положення аналізатора 4 ортогонального до того, при якому вимірювали величину $I(\lambda)$.

Різниця $T_{\max}-T_{\min}$ між максимальним (T_{\max}) та мінімальним (T_{\min}) значеннями згаданих вище но-

рмованих потужностей є величина, яка задовольняє виразу:

$$T_{\max} - T_{\min} = \sin^2 X \left(1 - \frac{\phi^2}{X^2} \right) \quad (7)$$

Типові залежності величини $T_{\max}-T_{\min}$ відношення оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями в рідкому кристалі до довжини хвилі $\left(\frac{d\Delta n}{\lambda} \right)$ для різних значень кута закрутки ди-

ректора наведено на Фіг.3. Ці залежності досягають мінімальних значень, що дорівнюють нулю, на довжинах хвиль λ_0 , що визначаються співвідношенням (1), а максимумами задовольняють рівнянню

$$X \left(1 - \frac{X^2}{\phi^2} \right) \operatorname{ctg} X = 1 \quad (8)$$

Оскільки різниця $T_{\max}-T_{\min}$ залежить від двох змінних $\left(\frac{d\Delta n}{\lambda} \right)$ та ϕ , то значення максимуму

$T_{\max}-T_{\min}$ при фіксованому $\frac{d\Delta n}{\lambda}$ є функцією лише

ϕ . Залежності максимальних величин різниці $T_{\max}-T_{\min}$, що відповідають різним значенням 0, 1, 2, 3, 4 числа m , яке входить до рівняння (1), від ϕ як розв'язків системи рівнянь (7) та (8) зображено на Фіг.4. Для того, щоб одночасно знайти кут закрутки директора рідкого кристалу та добуток різниці головних показників заломлення рідкого кристалу на товщину шару рідкого кристалу $(d\Delta n)$ рідкокристалічної комірки 3, необхідно знайти спектр різниці між максимальним та мінімальним значеннями нормованих потужностей світла 5 $(T_{\max}(\lambda)-T_{\min}(\lambda))$. Після цього необхідно знайти значення, принаймні, одного із максимумів цієї різниці та довжину хвилі $\tilde{\lambda}$, на якій цей максимум спостерігається.

Кут закрутки директора рідкого кристалу визначають за величиною знайденого значення або як розв'язок системи рівнянь (7) та (8). Графічні залежності, які задовольняють системи рівнянь (7) та (8), зображено на Фіг.4. При відомих значеннях кута ϕ та довжини хвилі $\tilde{\lambda}$, на якій спостерігають максимум, добуток різниці головних показників заломлення рідкого кристалу на товщину шару рідкого кристалу $(d\Delta n)$ рідкокристалічної комірки 3 знаходять як розв'язок одного з рівнянь (7) або (8).

Графічні залежності, що є розв'язками рівняння (4), яке описує положення мінімумів (\min), та рівняння (7), яке описує положення максимумів (\max), зображено на Фіг.5. Наступний приклад пояснює сказане вище. Спектральні потужності світла на виході прозорої рідкокристалічної комірки виміряні за схемою, що зображена на Фіг.1, наведено на Фіг.6. Різницю між максимальним та мінімальним значеннями цих потужностей $T_{\max}(\lambda)-T_{\min}(\lambda)$ показано штриховою лінією. Ця різниця має два максимуми на довжинах хвиль $\lambda_0=461,3\text{нм}$ та $\lambda=687,2\text{нм}$. Максимум при $\lambda=461,3\text{нм}$ дорівнює

0,958, максимум при $\lambda=687,2\text{нм}$ дорівнює 0,893. Із графічних залежностей, які зображені на Фіг.4 і які є розв'язками системи рівнянь (7) та (8), видно, що кут закрутки директора рідкого кристалу $\phi=90,8^\circ$. При цьому максимум на довжині хвилі $\lambda_0=461,3\text{нм}$ відповідає другому інтерференційному порядку ($m=2$), а максимум на довжині хвилі $\lambda=687,2\text{нм}$ відповідає першому інтерференційному порядку ($m=1$). Розв'язки рівняння (8) для $\lambda=461,3\text{нм}$ та $\phi=90,8^\circ$ є $d\Delta n$ 1,130мкм, а для $\lambda=687,2\text{нм}$ $d\Delta n=0,974\text{мкм}$.

Кут β між вектором поляризації світла 2 та напрямком директора рідкого кристалу в шарі рідкого кристалу поблизу його поверхні, на яку падає світло, пов'язаний з кутом закрутки ϕ та нормованою потужністю світла T , що вимірюють на одній фіксованій довжині хвилі λ , співвідношенням:

$$\beta_k = \frac{1}{2} \left(\gamma - \phi + k \frac{\pi}{2} \right) \pm \frac{1}{4} \arccos \frac{2T - T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (9)$$

де k - ціле число із набору цілих чисел -2, -1, 0, 1, 2, T - виміряна нормована потужність світла для орієнтації рідкокристалічної комірки, для якої визначають кут β , T_{\max}/T_{\min} - відповідно максимальне та мінімальне значення нормованої потужності, які досягаються при обертанні згаданої вище рідкокристалічної комірки, причому у вищенаведеній формулі знак «+» чи «-» та значення k обирають такими, щоб отримане значення β_k було найближчим до очікуваного, або, щоб величина нормованої потужності, розрахована з використанням цього значення β_k , мала величину, найближчу до виміряної.

Потужність світла 5, що вимірюють за схемою Фіг.1, досягає свого максимального або мінімального значення незалежно від довжини хвилі при виконанні співвідношення:

$$\phi = \gamma - 2\beta \pm k \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

де k - число із набору цілих чисел -2, -1, 0, 1, 2. Вираз (10) застосовують для визначення кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ , коли кути β та γ наперед відомі, або для визначення кута β , коли наперед відомі ϕ та γ . При цьому число k вибирають таким, що величина ϕ (або β) набувала значення найближчого до очікуваного, або таким, щоб величина потужності, розрахована з використанням значення β_k за формулою (6) або іншим розрахунковим методом мала величину, найближчу до виміряної. Наприклад, вимірювання здійснювали за схемою, наведеною на Фіг.1. Кут γ при цьому дорівнював 60° . Отримані нормовані спектральні потужності (або пропускання) зображено на Фіг.6. Мінімальне значення потужності досягається, коли $\beta=29,6^\circ$. Максимальне значення спектральної потужності буде при $\beta=74,6^\circ$. Згідно з формулою (10) кут закрутки директора ϕ може приймати одне з наступних значень: $-179,2^\circ$, $-89,2^\circ$, $0,8^\circ$, $90,8^\circ$, $180,8^\circ$. Комірка була виготовлена з таким розрахунком, щоб кут закрутки директора дорівнював $\phi=90^\circ$. Із наведених вище можливих значень ϕ величина $90,8^\circ$ є найближчою до очіку-

ваного результату. З іншого боку, якщо значення $d\Delta n$ наперед відоме, то кут ϕ з наведеної вище послідовності можна знайти як такий, при якому розраховані спектральні потужності є близькими до виміряних.

Кривина кривої спектральної залежності потужності світла 5 при вимірюванні у режимі на пропускання (Фіг.1) є функцією кута закрутки директора рідкого кристалу ϕ та відношення оптичної різниці ходу між звичайним та незвичайним хвилями до довжини хвилі $\left(\frac{d\Delta n}{\lambda} \right)$. У точках екстремумів (λ_e)

ця кривина ρ дорівнює другій похідній виразу (6) по λ :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \lambda^2} \bigg|_{\lambda=\lambda_e} = \rho \quad (11)$$

Графік функції $\rho \left(\phi, \frac{d\Delta n}{\lambda_e} \right)$ при фіксованому

значенні γ та такій орієнтації рідкокристалічної комірки, коли потужність світла 5 досягає максимального чи мінімального значення, є кривою. У цьому випадку кожному значенню ρ будуть відпо-

відати певні фіксовані комбінації $\frac{d\Delta n}{\lambda_e}$ та ϕ , що дає можливість за обчисленою величиною ρ одночасно визначити $\frac{d\Delta n}{\lambda_e}$ та ϕ . Оптичну різницю ходу

Δn знаходять як добуток величини $\frac{d\Delta n}{\lambda_e}$ та значення довжини хвилі λ_e екстремума, для якого була знайдена ρ . Типові залежності ρ від $\frac{d\Delta n}{\lambda_e}$ та ϕ

наведено на Фіг.7. Для знаходження ϕ і $\frac{d\Delta n}{\lambda_e}$ дос-

татньо співставити виміряну величину ρ з розрахованим значенням. Для знаходження ρ може бути використана формула:

$$\rho = \frac{T(\lambda_e + \Delta\lambda) + T(\lambda_e - \Delta\lambda) - 2T(\lambda_e)}{\Delta\lambda_e^2} \quad (12)$$

де $T(\lambda_e + \Delta\lambda)$, $T(\lambda_e - \Delta\lambda)$, $T(\lambda_e)$ є значення нормованої потужності світла виміряної на довжинах хвиль $\lambda_e + \Delta\lambda$, $\lambda_e - \Delta\lambda$, λ_e , відповідно, λ_e - довжина хвилі, при якій має місце згаданий вище екстремум, а $\Delta\lambda$ - деякий малий спектральний інтервал, величина якого не менша за мінімальний спектральний інтервал, який може бути надійно виміряний (наприклад, мінімальна різниця довжин хвиль двох спектральних ліній, яку може розрізнити спектрометр або напівширина його апаратної функції).

Наприклад, виміряне за формулою (12) значення другої похідної кривої, що описує максимальну спектральну потужність серед набору спектральних потужностей, представлених на Фіг.6, у точці максимуму при $\lambda_e=475\text{нм}$, $T(\lambda_e)=1$ дорівнює $-27,9$. Розраховане за формулою (11) ρ приймає це

значення (-27.9) при $\frac{d\Delta n}{\lambda_e} = 1,507$ та $\phi = 8,2^\circ$, при

$$\frac{d\Delta n}{\lambda_e} = 2,338 \text{ та } \phi = 90,8^\circ, \text{ при } \frac{d\Delta n}{\lambda_e} = 3,362 \text{ та}$$

$\phi = 80,3^\circ$. Серед наведених вище значень

$$\frac{d\Delta n}{\lambda_e} = 2,338 \text{ (} d\Delta n = 1,111 \text{ мкм для } \lambda = 475 \text{ нм)} \text{ та}$$

$\phi = 90,8^\circ$ є найближчим до очікуваного.

Для підвищення точності вимірів, а також для визначення частотної дисперсії $d\Delta n(\lambda)$, необхідно виміряти значення другої похідної максимальної та мінімальної спектральної потужності в інших точках екстремумів, і співставити виміряні результати з розрахованими даними. Для рідкокристалічної комірки, спектральні потужності якої зображено на Фіг.6, згадані вище точки екстремумів лежать на $\lambda = 456 \text{ нм}$, $\lambda = 475 \text{ нм}$, $\lambda = 537 \text{ нм}$, $\lambda = 582 \text{ нм}$, $\lambda = 671 \text{ нм}$.

Іншою задачею винаходу є розширення функціональних можливостей відомого способу визначення параметрів відбивної рідкокристалічної комірки за рахунок додаткового вимірювання кута закрутки директора рідкого кристалу (кута закрутки директора), частотної дисперсії різниці головних показників заломлення рідкого кристалу, напряму орієнтації директора рідкого кристалу поблизу поверхні, на яку падає світло, а також спрощення процесу вимірювання.

Спектральна потужність світла 5, яку вимірюють у режимі на відбивання, як це показано на Фіг.8, задовольняє рівнянню

$$P(\lambda) = I(\lambda) \cdot (1 - r_F) r_R R + r_F \sin^2 \gamma \quad (13)$$

де $I(\lambda)$ - спектральна потужність світла 1 на довжині хвилі λ , r_F - френелівський коефіцієнт відбивання світла від верхньої (як показано на Фіг.8) підкладки рідкокристалічної комірки 3 (наприклад, скло або плівка), r_R - це коефіцієнт відбивання світла від нижньої дзеркальної поверхні (як показано на Фіг.8) рідкокристалічної комірки 3, R визначають за формулою

$$R = \cos^2 \gamma \left(\cos^2 X - \frac{(\Gamma - 4\phi^2)}{4X^2} \sin^2 X \right) + \left(\frac{\Gamma \sin X}{X} \right)^2 \left(\cos \phi \beta + \gamma \cos X + \frac{\phi}{X} \sin \phi \beta + \gamma \right)^2$$

де $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} d\Delta n$.

Типові спектри нормованої потужності відбитого світла 5, отримані за схемою Фіг.8 при різних орієнтаціях комірки 3, показано на Фіг.9 неперервними кривими. Штрихова крива описує різницю між максимально можливим та мінімально можливим значеннями потужностей світла 5 ($R_{\max} - R_{\min}$).

Нормовану на одиницю різницю потужностей між максимальним та мінімальним значеннями описують формулою:

$$R_{\max} - R_{\min} = \left(\frac{\Gamma \sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right) \quad (14)$$

Характерною особливістю цієї різниці є те, що вона не залежить від кута між напрямком поляризації 2 світла, що падає на рідкокристалічну комірку 3, та напрямком директора рідкого кристалу в шарі рідкого кристалу поблизу вхідної (передньої недзеркальної поверхні), на яку падає світло, (β).

Типові залежності згаданої вище різниці (співвідношення (14)) від параметра $\frac{d\Delta n}{\lambda}$ при різних значеннях ϕ зображено на Фіг.10.

Згадана вище різниця (співвідношення (14)) приймає нульові значення в глобальних мінімумах, коли виконується умова (4) та має місце співвідношення (1). Спектральні положення максимумів та локальних мінімумів різниці $R_{\max} - R_{\min}$ задовольняють рівнянню:

$$-X^3 \cos^3 X + X^2 \cos^2 X \sin X + X(X^2 - 2\phi^2) \cos X \sin^2 X + 1\phi^2 \sin^3 X = 0 \quad (15)$$

Так як різниця $R_{\max} - R_{\min}$ залежить від двох змінних ($\frac{d\Delta n}{\lambda}$ та ϕ), то значення максимуму R_{\max}

R_{\min} при фіксованому значенні $\frac{d\Delta n}{\lambda}$ є функцією

лише ϕ . Залежності значень різниці $R_{\max} - R_{\min}$ в її локальних мінімумах від ϕ як розв'язок системи рівнянь (14) та (15) наведено на Фіг.11. На Фіг.11 показано мінімуми, які відповідають $m=0$, $m=1$, $m=2$, $m=3$, та $m=4$. Залежності локальних максимумів $R_{\max} - R_{\min}$, які відповідають $m=0$, $m=1$ та $m=2$, від ϕ як розв'язок системи рівнянь (14) і (15) зображено на Фіг.12.

Кут закрутки директора рідкого кристалу ϕ визначають із значення різниці $R_{\max} - R_{\min}$ у локальних мінімумах або максимумах за допомогою залежностей, графіки яких зображено на Фіг.11 та Фіг.12, або як розв'язок системи рівнянь (14) та (15). Значення оптичної різниці ходу між звичайним та незвичайним хвилями ($d\Delta n$) рідкокристалічної комірки 3, яку виміряно в режимі на відбивання, знаходять як розв'язок системи рівнянь (14) та (15) при довжині хвилі 2, на якій спостерігають локальні максимуми або мінімуми. Спектральна потужність світла 5 виміряна за схемою Фіг.8, має мінімуми, які задовольняють виразу:

$$\frac{\phi}{X} \operatorname{tg} X = \operatorname{tg}(2\beta - \gamma) \quad (16)$$

За відомими значеннями ϕ , X та γ визначають кут β за формулою (16)

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{\phi}{X} \operatorname{tg} X \right) + \gamma \right]$$

якщо згадана вище нормована потужність пучка світла приймає мінімальне значення, або за формулою

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{\phi}{X} \tan X \right) + \gamma \right] \pm \frac{\pi}{4},$$

якщо згадана вище нормована потужність пучка світла приймає максимальне значення, причому знак «+» або «-» обирають такими, щоб отримане значення β було найближчим до очікуваного.

Для довжини хвилі, при якій має місце максимум або локальний мінімум залежності $R_{\max}-R_{\min}$ оптичну різницю ходу між звичайним та незвичайним хвилями ($d\Delta n$), кут закрутки директора рідкого кристалу ϕ , та кут між напрямком поляризації 2 та напрямком орієнтації директора біля поверхні рідкого кристалу (β) знаходять як розв'язок рівнянь (14)-(16).

Наприклад, максимум у спектрі відбивання рідкокристалічної комірки 3 співпадає з максимумом $R_{\max}-R_{\min}$ на довжині хвилі $\lambda=500\text{nm}$ при цьому значення $R_{\max}-R_{\min}$ дорівнює 0,9. Із графічної залежності, зображеної на Фіг.12, яка є розв'язком системи рівнянь (14), (15), видно, що $\phi=88,4^\circ$ або $\phi=227,2^\circ$. Вірне значення ϕ з цих двох буде те, яке або найближче до очікуваного або таке, при якому виміряні спектральні потужності співпадають з розрахованими за формулою (13). Нехай очікуваний кут 90° , тоді $\phi=88,4^\circ$. Оптичну різницю ходу між звичайним та незвичайним хвилями ($d\Delta n$) знаходять як розв'язок рівняння (14) або (15) при $\lambda=500\text{nm}$. Розв'язок рівняння (15) при $\phi=88,4^\circ$ для глобального максимуму є $\frac{d\Delta n}{\lambda}=0,449$, або при $\lambda=500\text{nm}$ $d\Delta n=0,898\text{мкм}$.

Якщо час експозиції при вимірюванні спектральної потужності світла 5 у режимі відбивання (Фіг.8) значно більший, ніж час, за який рідкокристалічна комірка 3 при рівномірному обертанні зробить, принаймні, один оберт або якщо при вимірюванні використовують усереднення по виміряних спектрах, сумарний час вимірювання яких значно більший, ніж час, за який рідкокристалічна комірка 3 при рівномірному обертанні зробить, принаймні, один оберт, то потужність світла 5 задовольняє формулі:

$$S(\gamma) = \left(\frac{1}{2} \left(\Gamma \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right) + \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + \Gamma^2} \sin^2 \gamma \right) \quad (17)$$

Якщо площа пропускання аналізатора 4 перпендикулярна до напрямку вектора поляризації 2, то нормована спектральна потужність світла 5 задовольняє формулі:

$$S = \left(\Gamma \frac{\sin X}{X} \right)^2 \left(\cos^2 X + \frac{\phi^2}{X^2} \sin^2 X \right) \quad (18)$$

Положення максимумів цієї спектральної залежності описують умовами (4) та (16).

Частотну дисперсію різниці головних показників заломлення ($\Delta n(\lambda)$) рідкого кристалу в рідкокристалічній комірці 3, визначають за допомогою

апроксимації отриманих значень Δn для різних довжин хвиль, застосовуючи відому формулу Коші

$$\Delta n(\lambda) = \Delta n(\lambda_0) + B \left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_0^2} \right) + C \left(\frac{1}{\lambda^4} - \frac{1}{\lambda_0^4} \right),$$

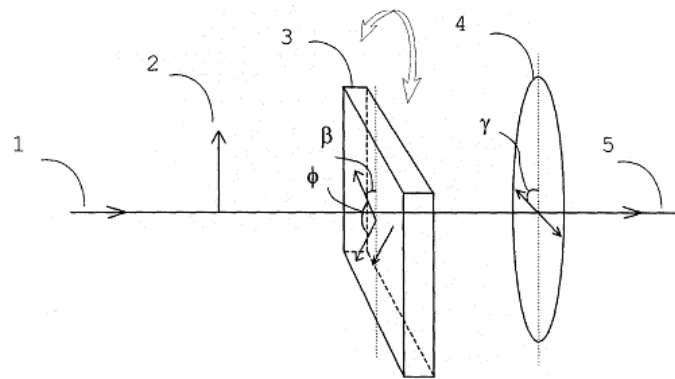
де $\Delta n(\lambda_0)$ відоме значення різниці показників заломлення для довжини хвилі λ_0 , а B і C є числові коефіцієнти, що відповідають найкращій апроксимації.

Відповідно до ще одного аспекту винаходу отриману функцію різниці $R_{\max}-R_{\min}$ або спектральної потужності 5 апроксимують виразом, представленим формулою (14) і за параметрами ϕ , $d\Delta n$, B , C , які відповідають найкращій апроксимації, визначають параметри рідкокристалічної комірки, а саме, кут закрутки директора ϕ , різницю ходу між звичайною та незвичайною хвилями $d\Delta n$ та дисперсію різниці головних показників заломлення Δn рідкого кристалу, представлену формулою Коші, де B , C - коефіцієнти.

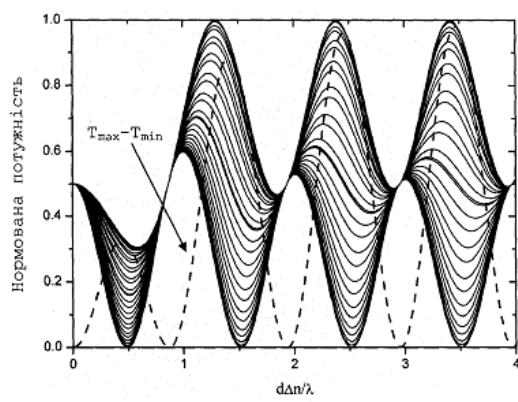
Товщину рідкокристалічної комірки визначають шляхом ділення значення оптичної різниці ходу між звичайною та незвичайною хвилями $d\Delta n$ на відому різницю головних показників заломлення Δn .

Існує декілька способів вимірювання потужності світла 5 на різних довжинах хвиль у схемах, що наведені на Фіг.1 та Фіг.8. Наприклад, якщо пучок світла 1 є квазімонохроматичним, то для світла 5 вимірюють потужність для середньої довжини хвилі цього квазімонохроматичного пучка світла. Якщо середню довжину хвилі пучка світла 1 поступово змінювати, то часова зміна потужності світла 5 буде відповідати його спектральній потужності. Згадане вище квазімонохроматичне світло може бути світлом від джерела зі спектром, неперервним у широкому діапазоні довжин хвиль, пропущеним через монохроматор, середню довжину хвилі смуги пропускання якого можна змінювати. Також згадане вище квазімонохроматичне світло може бути світлом від джерела зі змінною довжиною хвилі випромінювання, наприклад, лазера зі змінною довжиною хвилі випромінювання. Якщо згаданий вище колімований пучок світла 1 має неперервний спектр у широкому діапазоні довжин хвиль, то вимірювання спектру потужності світла 5 здійснюють спектрометром.

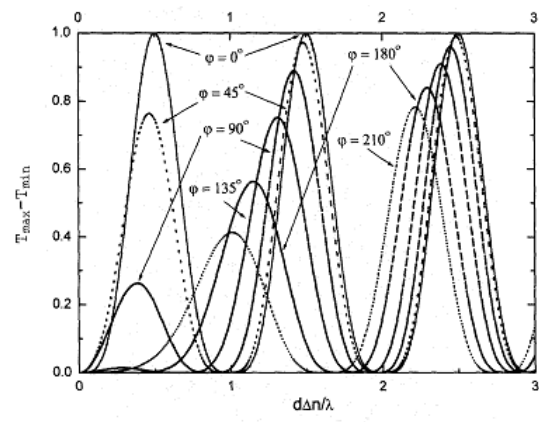
Зрозуміло, що цей винахід не обмежується наведеними прикладами його втілення, використання і апаратної реалізації і може бути модифікований у межах загальної концепції винаходу, викладений у формулі винаходу.



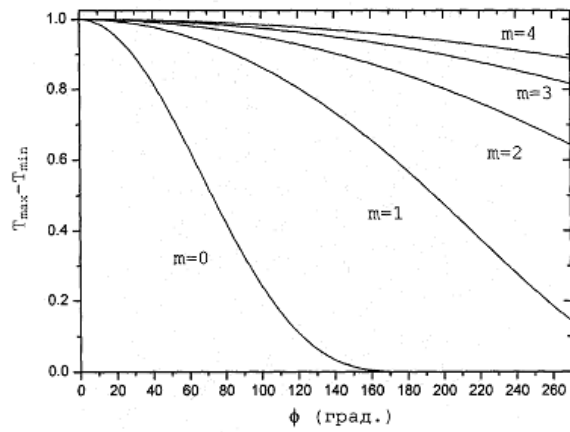
Фиг. 1



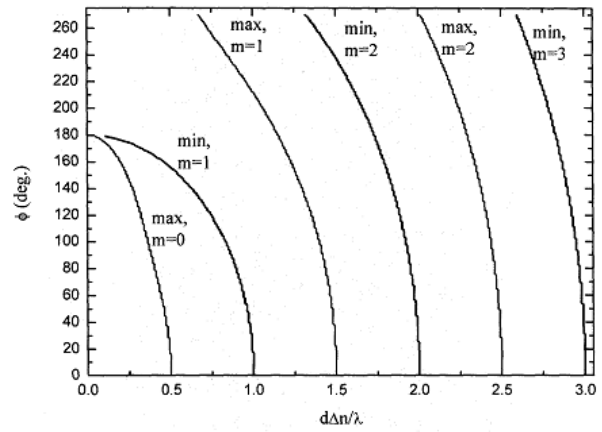
Фиг. 2



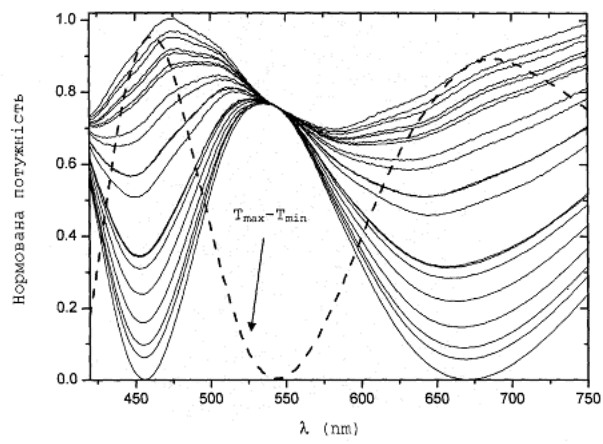
Фиг. 3



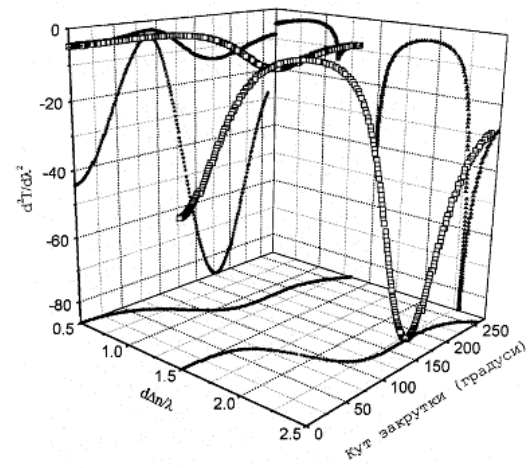
Фиг. 4



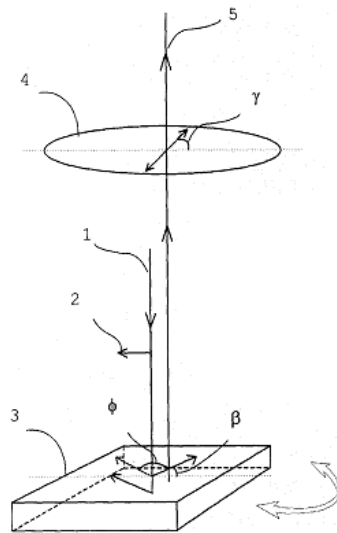
Фиг. 5



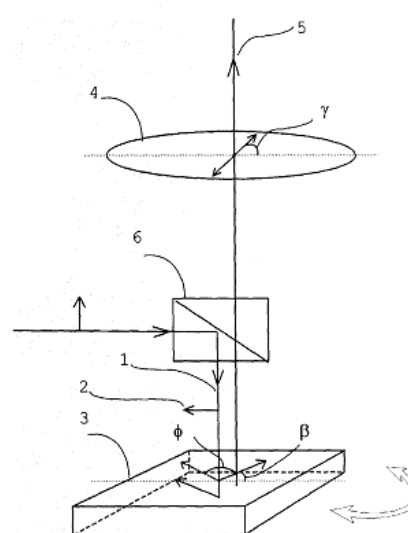
Фиг. 6



Фиг. 7

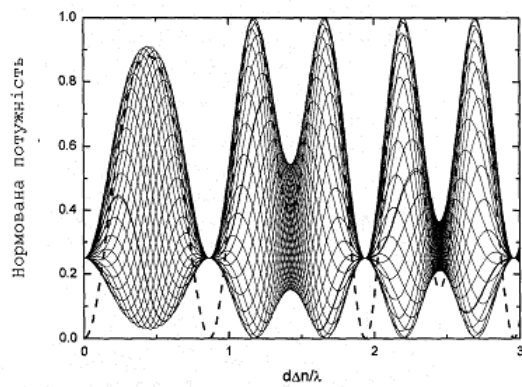


a)

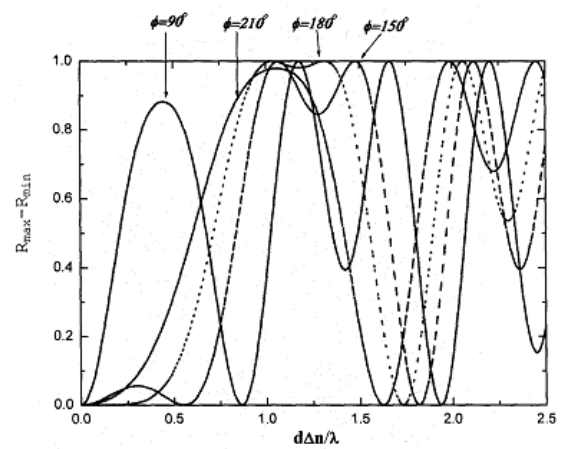


b)

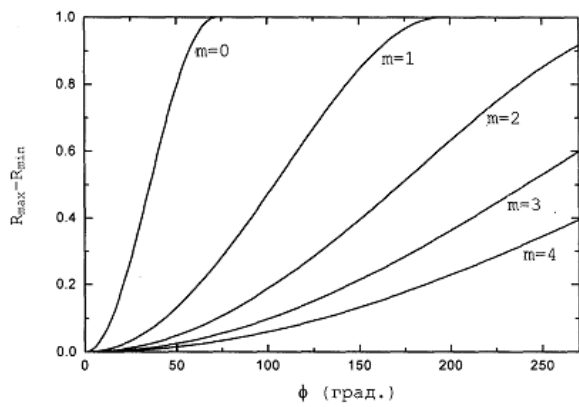
Фиг. 8



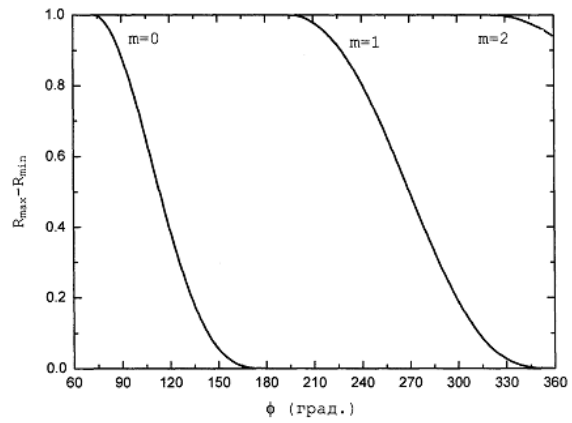
Фиг. 9



Фиг. 10



Фіг. 11



Фіг. 12