

ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА В НЕМАТИЧНОМУ РІДКОМУ КРИСТАЛІ В УМОВАХ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Описана лабораторна робота по дослідженню інтерференції поляризованих променів у розділі оптики курсу загальної фізики вищої школи. При виконанні цієї роботи студенти спостерігають інтерференцію поляризованих променів у паралельних пучках та знайомляться з поширенням світла в анізотропному середовищі (рідкому кристалі).

The paper describes the labwork of interference of polarized waves study in courses of optics for pedagogical university. Doing this labwork the students observe the interference of polarized waves in parallel beams and acquaintance with propagation of light in anisotropic media (liquid crystals).

Перспективи технічного прогресу зумовлюються досягненнями фізичної науки. В зв'язку з цим випускники вищих учбових закладів повинні оволодіти необхідними фізико-математичними знаннями. Лабораторні роботи допомагають студентам глибше осягнути основні фізичні закономірності та набутти елементарних навичок експериментування.

Серед найважливіших оптичних явищ, у яких проявляються хвильові властивості світла є інтерференція та дифракція. Явище поляризації світла є типовим для поперечних коливань. У запропонованій лабораторній роботі студенти мають можливість вивчити два з них – саме інтерференцію та поляризацію світла.

В лабораторних практикумах [1, 2] та інших немає лабораторної роботи по вивченню інтерференції поляризованого світла. Хоч така робота є складнішою, ніж стандартні роботи по вивченню явища поляризації світла ("Перевірка закону Малюса", "Дослідження поляризації при відбиванні від діелектриків", тощо), але у той же час вона є більш повчальною. У стандартних схемах для спостереження інтерференції поляризованих променів в якості зразка беруть кварцову пластинку, вирізану паралельно до оптичної осі кристала. Процес виготовлення такої пластинки дуже складний і трудомісткий. Виготовити комірку з рідким кристалом набагато простіше. До того ж завдяки унікальним властивостям рідких кристалів (таким, як кероване електричним полем подвійне променезаломлення; порівняно велика оптична анізотропія, що в декілька десятків разів перевищує анізотропію в звичайних кристалах), студенти можуть більш глибоко зрозуміти явище інтерференції поляризованих променів у паралельних пучках. У даній роботі досліджуються комірки різної товщини, що дає можливість зрозуміти перебіг інтерференційних кольорів при зміні напруги на комірках. До того ж запропонована лабораторна робота не потребує складного обладнання, нескладна у виконанні, з пізнавальної точки зору є цікавою. Її також можна використовувати в курсі фізики рідких кристалів.

МЕТА РОБОТИ

Вивчення явища інтерференції поляризованих променів у керованих електричним полем комірках з нематичним рідким кристалом.

ОБЛАДНАННЯ

Поляризаційний мікроскоп, різної товщини комірки з рідким кристалом, генератор ГЗ-112, вольтметр Щ-4300.

ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ

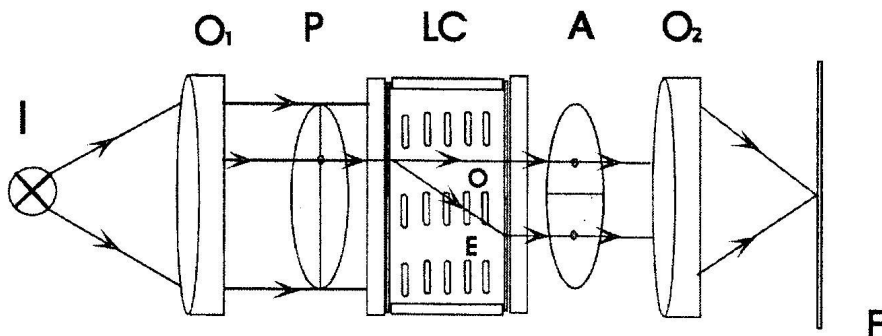
Нематичні РК мають високий рівень дальнього орієнтаційного порядку в одному переважному напрямку n (директор), але не мають дальнього трансляційного порядку. Якщо виміряти діелектричну проникливість паралельно і перпендикулярно до директора, то діелектрична анізотропія $\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{пар}} - \epsilon_{\text{перп}}$. Дипольні моменти молекул рідкого кристалу спрямовані вздовж їх довгих осей, або складають з ними невеликий кут то $\Delta\epsilon > 0$, а якщо вони перпендикулярні, то $\Delta\epsilon < 0$. На відміну від діелектричної анізотропії – оптична анізотропія у нематіку $\Delta n = n_e - n_o = n_{\text{пар}} - n_{\text{перп}}$ завжди додатна отже він буде додатним одновісним кристалом.

Для вивчення рідкокристалічного стану інформативним методом є метод поляризаційної мікроскопії. У схрещених поляроїдах досліджуються оптичні комірки з рідким кристалом. Оптична комірочка являє собою дві скляні пластини, між якими розміщено рідкий кристал. Між скельцями розташована фторопластова плівка (спейсер), яка задає товщину рідкокристалічного шару, що дає можливість вивчати об'ємні властивості рідких кристалів. На скельця нанесено прозорі електроди.

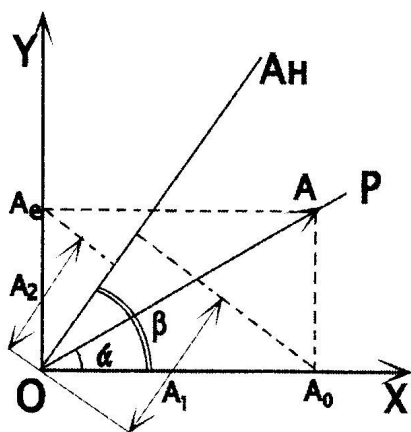
Інтерференційні явища, які можна спостерігати за допомогою кристалічної пластинки, поляризатора й аналізатора, прийнято називати явищем інтерференції поляризованих променів. Відомо, що промені, поляризовані в двох взаємно перпендикулярних площинах, не інтерферують. Але, якщо звести ці ортогональні коливання в одну площину і створити деяку різницю фаз між ними, то можна спостерігати особливі властивості інтерференційних смуг.

Розглянемо принципову оптичну схему, яку можна використовувати для одержання інтерференційної картини поляризованих променів (мал. 1.). З малюнка ясно, що паралельний пучок природного світла від джерела І після об'єктива O_1 падає на комірку з рідким кристалом РК, яка веде себе, як додатний одновісний кристал. Природне світло при виході з поляризатора Р стає лінійно поляризованим.

Аналізатор А, розташований за коміркою LC, зведе коливання незвичайного і звичайного променів в одну площину. Об'єктив O_2 проектує результуючу картину у фокальну площину F. Площина коливань, що падає на комірку, може бути довільно орієнтована щодо головного напрямку рідкого кристалу в залежності від кута повороту поляризатора.



Мал. 1 Оптична схема установки для спостереження інтерференції поляризованих променів



Мал. 2 Графічне зображення коливань

OP – площина коливань поляризатора; OAN – площина коливань аналізатора; A – амплітуда коливань падаючого світла; α – кут між головним напрямком кристала та площиною пропускання поляризатора; β – кут між головним напрямком кристала та площиною пропускання аналізатора; A_0 та A_e – амплітуди звичайного та незвичайного променів відповідно, що утворюються в рідкому кристалі після поляризатора; A_1 та A_2 – результуючі амплітуди звичайного та незвичайного променів після аналізатора.

Виникає питання про роль поляризатора Р (мал. 2). Поляризатор Р необхідний для визначення напрямку коливань лінійно поляризованого світла, яке входить в рідкий кристал.

З рідкого кристалу в одному напрямку вийдуть два промені e та o, поляризовані в двох взаємно перпендикулярних напрямках, які матимуть деяку різницю фаз δ , що виникає через різні коефіцієнти заломлення n_e та n_o :

$$\delta = (2\pi/\lambda)d(n_e - n_o). \quad (1)$$

Тут $d(n_e - n_o) = \Delta$ — різниця ходу; d — товщина шару рідкого кристалу; $n_e - n_o$ — оптична анізотропія рідкого кристалу. На мал. 2 показана дія оптичної системи. Вісь X співпадає з головним напрямком кристалу а вісь Y перпендикулярна до нього.

Після поляризатора в рідкому кристалі (площина коливання OP) утворяться два промені, що мають амплітуди:

$$A_0 = A \cos \alpha; A_e = A \sin \alpha, \quad (2)$$

де A – амплітуда падаючого світла. Після аналізатора промені o і e будуть мати загальну площину коливань і результуючі амплітуди:

$$A_1 = A \cos \alpha \cos \beta; A_2 = A \sin \alpha \sin \beta. \quad (3)$$

Таким чином, ми одержали всі умови, необхідні для інтерференції двох коливань. Утворення двох променів при проходженні через рідкий кристал забезпечує когерентність; рідкий кристал дає необхідну сталу різницю ходу, а аналізатор – загальну площину коливань обох променів.

При відсутності поляризатора, кут α безперервно і безладно змінювався б і неможливо було б одержати стабільну результуючу інтерференційну картину.

Зробимо заміну $\cos \delta = 1 - \sin^2(\delta/2)$, отримаємо

$$A^2 = (A_1 + A_2)^2 - 4A_1 A_2 \sin^2(\delta/2). \quad (4)$$

Підставивши A_1 і A_2 з (3) в (4) і врахувавши, що $I \doteq A^2$, одержимо

$$I = (A \cos \alpha \cos \beta + A \sin \alpha \sin \beta)^2 - 4A^2 \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \sin^2(\delta/2), \quad (5)$$

де I – інтенсивність світла, що пройшло через систему. Уведемо поняття про пропускну здатність системи і позначимо її буквою

$$J = I / I_0, \quad (6)$$

де I_0 – інтенсивність світла, що падає на комірку з рідким кристалом, пропорційна A^2 .

Тоді з (5) і (6) будемо мати формулу для пропускну здатності системи

$$J = \cos^2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2(\delta/2). \quad (7)$$

Тут $(\beta - \alpha)$ — кут між напрямками коливань, що пропускаються поляризатором і аналізатором; $\delta = \pi d (n_e - n_o)/\lambda$.

По (7) пропускну здатність залежить від ряду параметрів: є функцією кутів α , β ; їхньої різниці $(\beta - \alpha)$; оптичних характеристик комірки з рідким кристалом (d , $n_e - n_o$); довжини хвилі λ .

Звернемо увагу на структуру формули (7). Вона має два доданки. Перший доданок не залежить від довжини хвилі λ — біла компонента, а другий — кольорова компонента — залежить від довжини хвилі, тому що $\delta = f(\lambda)$.

Варто мати на увазі, що спостереження інтерференційних картин найчастіше ведеться в білому світлі. За рахунок першої компоненти послабляється пропускання нерозкладеного білого світла. Біла компонента завжди додатна,

Друга компонента відповідає частці світлового потоку, що має визначене забарвлення. Кольорова компонента може бути як позитивною, так і негативною. У випадку позитивного знака вона позначає частку пропущеного системою забарвленого світлового потоку, у випадку негативного знака вона позначає частку непропущеного системою світлового потоку. При $\sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2(\delta/2) = 0$ пропускається біле світло; якщо $\cos^2(\beta - \alpha) = 0$, світло, що пройшло через систему матиме найбільш густе забарвлення.

Якщо на електроди подати напругу і поступово збільшувати її, то при досягненні порогового значення U_{Π} , почнеться переорієнтація директора. Нематичний рідкий кристал переходить від планарної до гомеотропної орієнтації, і із зростанням напруги ($U > U_{\Pi}$) різниця фаз між звичайним та незвичайним променями зменшується. Тобто спочатку різниця фаз мала певне значення δ_{\max} . Потім різниця фаз змінюється від δ_{\max} до нуля, а напруга від порогової до максимальної U_{\max} , яка відповідає гомеотропному стану нематика.

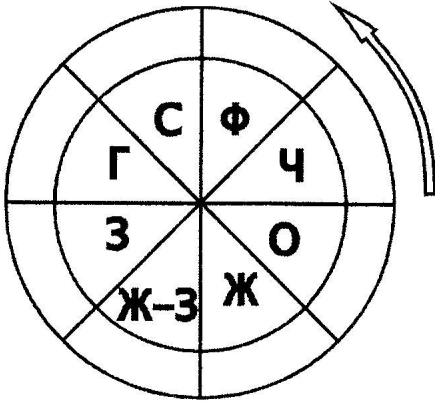
ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати електричну схему для проведення дослідів.
2. У схрещених поляризаторах розташувати зразок рідкого кристалу на столику мікроскопа під кутом $\pi/4$ до площини пропускання поляризатора, включити освітлення мікроскопа та отримати різке зображення нематичного рідкого кристалу при схрещених поляризаторах.
3. На генераторі встановити частоту 1000 Гц.
4. Плавно збільшувати напругу на генераторі від 0 до 10 В, а потім зменшувати її від 10 В до 0, спостерігаючи при цьому кольорову інтерференційну картину, та замалювати кольоровими олівцями зміну інтерференційних кольорів.
5. Повторити дослідження згідно пунктів 2,4 з усіма зразками.
6. Для тонких зразків побудувати у Microsoft Excel або Origin залежність пропускну здатності від довжини хвилі та порівняти її максимум з початковим інтерференційним забарвленням зразків. Використовуючи формули (1) та (7) та врахувавши довжину хвилі, що припадає на максимум пропускну здатності, обчислити оптичну анізотропію рідкого кристалу та порівняти її з табличним значенням для даного РК.
7. Зафіксувати аналізатор у діагональному положенні ($\beta = \pi/4$). Обертаючи поляризатор на 360° фіксувати інтерференційні кольори через кожні 10° , а потім кольоровими олівцями замалювати розетку кольорів. У Microsoft Excel або Origin побудувати залежність пропускну здатності від кута повороту поляризатора.

8. У схрещених поляризаторах, обертаючи комірку з РК на 360° фіксувати інтерференційні кольори через кожні 10° , а потім кольоровими олівцями замалювати розетку кольорів. У пакеті програм Microsoft Excel або Origin побудувати залежність пропускнуої здатності від кута повороту комірки з РК.
9. Проаналізувати одержані результати, порівняти експериментальні дані з літературними, проаналізувати причини, які приводять до розбіжності між експериментальними та теоретичними даними.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Два спектри, що у сумі дають біле світло, називаються додатковими. Зміна знаку кольорової компоненти означає перехід до додаткового спектра і до відповідного йому забарвлення кристала. Потік білого світла умовно можна розбити на вісім інтервалів, кожному з яких приписують відповідний колір. Ця розетка кольорів показана на мал. 3.



Мал.3. Розетка кольорів

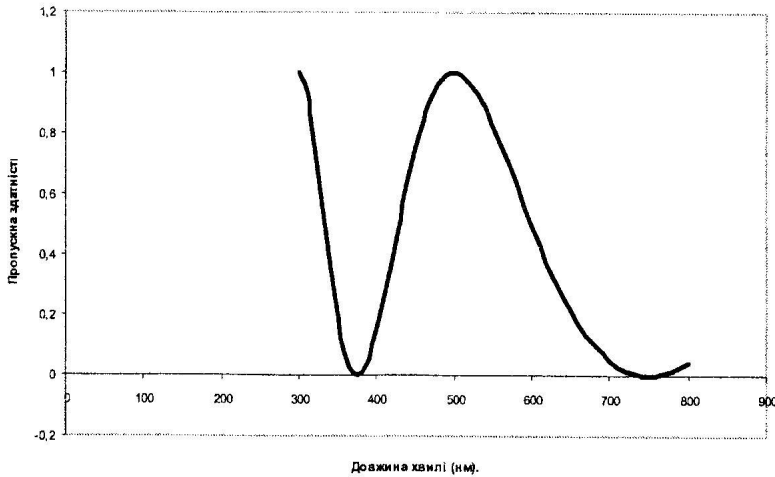
Порядок чергування кольорів від червоного до фіолетового називається підвищенням кольору. Кольори, розташовані в протилежних секторах, є додатковими. Цих даних достатньо для аналізу формули (7).

Залежність пропускнуої здатності від довжини хвилі. Покладемо, що поляризатор і аналізатор схрещені, тобто $\alpha - \beta = \pi/2$; поляризатор знаходиться в діагональному положенні: $\alpha = \pi/4$ (випадок, що зустрічається найбільш часто). Для визначеності припустимо, що товщина шару рідкого кристалу в комірці $d = 5$ мкм, а Δn для відомих нематичних рідких кристалів складає від 0,15 до 0,4 [4] (у нашому випадку візьмемо $\Delta n = 0,15$). Підставивши ці

дані у формулу пропускнуої здатності (7), одержимо

$$J = \sin^2(2356/\lambda) \quad (8)$$

Тут λ — довжина хвилі, нм. По (8) можна побудувати графік залежності $J=f(\lambda)$, що і виконано на мал. 4.

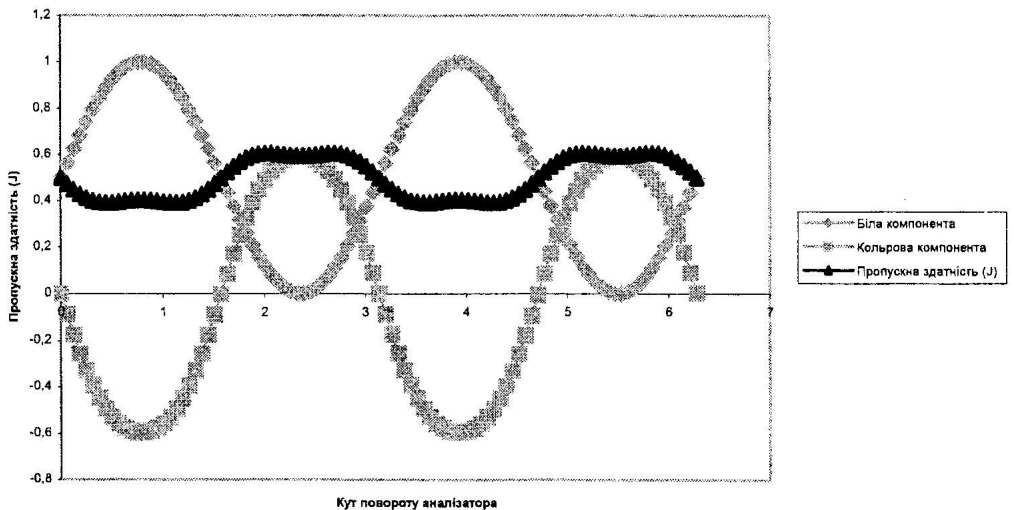


Мал. 4 Залежність пропускнуої здатності від довжини хвилі

При даних конкретних умовах виявляється, що максимум кривої пропускнуої здатності приходить на $\lambda=510$ нм, а мінімум на $\lambda=360$ нм. Біла компонента при цьому відсутня. При спостереженні поверхня комірки забарвлена в густо-зелений колір. При іншій товщині комірки чи іншій силі подвійного променезаломлення крива залежності $J(\lambda)$ зміститься по осі довжин хвиль і комірка придбає інше забарвлення. Таким чином, забарвлення комірки характеризує її кількісні дані – товщину і силу подвійного променезаломлення.

Залежність пропускної здатності від кута повороту аналізатора. При повороті аналізатора буде змінюватися кут β . За формулою (7) можна простежити, як буде змінюватися поляризаційне забарвлення комірки.

Розглянемо окремий випадок, коли $\alpha = \pi/4$, тобто при діагональному положенні поляризатора. При повороті аналізатора на 360° біла компонента буде перетворюватись в нуль для тих кутів β , для яких $\cos(\beta - \alpha) = 0$. Це відбудеться при $\beta = 3\pi/4$ і $\beta = 7\pi/4$. Біла компонента буде мати максимум при таких β , коли $\cos(\beta - \alpha) = 1$. Це відповідає паралельному розташуванню поляризатора й аналізатора, тобто при $\alpha = \pi/4$, $\beta = \pi/4$ і $\beta = 5\pi/4$ (мал. 5).



Мал.5 Залежність пропускної здатності від кута повороту аналізатора

Кольорова компонента буде змінюватися в такий спосіб: у тих положеннях аналізатора, коли напрямки коливань, що пропускаються, збігається з одним із напрямків коливань у комірці, кольорова компонента зникає. Це буде мати місце при кутах β , рівних $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Комірка в цих положеннях стає білою. При $\beta = \pi/4$ і $\beta = 5\pi/4$ спостерігається максимальне значення для кольорової компоненти і при цьому вона негативна. При $\beta = 3\pi/4$ і $\beta = 7\pi/4$ кольорова компонента також набуває максимального значення, але в цьому випадку вона виявляється позитивною. Загальна пропускна здатність визначиться сумарною дією обох компонентів. Взагалі пропускна здатність набуває максимальних та мінімальних значень при тих кутах β , при яких комірка виявляється густо забарвленою — крива $B + C$. Таким чином, при повному повороті аналізатора пластинка буде проходити чотири рази через насичене забарвлення. Отримані результати справедливі також при повороті поляризатора, тобто коли змінюється кут α .

Легко показати, що поворот аналізатора на кут 90° приведе до зміни забарвлення рідкого кристала на додаткове. Позначимо пропускну здатність при деякому фіксованому положенні аналізатора через J_β . За формулою (7) при $\alpha = \pi/4$ одержимо

$$J_\beta = \cos^2(\alpha - \beta) - A \sin 2\beta. \quad (9)$$

Тут A — постійна, що залежить від параметрів комірки. Якщо аналізатор повернемо на кут 90° , то будемо мати

$$J_{\beta + \pi/2} = \sin^2(\alpha - \beta) + A \sin 2\beta \quad (10)$$

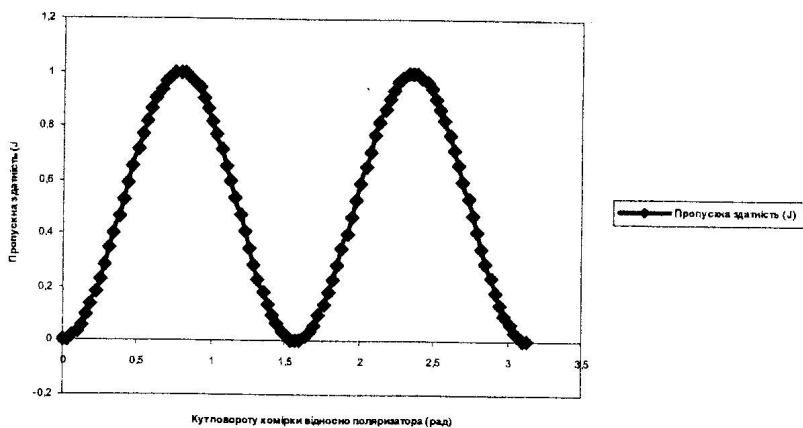
Склавши почленно (10) і (11), одержимо

$$J_\beta + J_{\beta + \pi/2} = 1 \quad (11)$$

Виходячи з визначення додаткового спектра, можна стверджувати, що спектр, який буде пропущено оптичною системою в першій позиції, виявиться додатковим до спектра, що відповідає другій позиції аналізатора.

В тому випадку, коли товщина комірки велика і різниця ходу променів більша за довжину оптичної когерентності, ми не зможемо спостерігати інтерференцію, а спостерігатимемо лише рівномірно освітлене поле. **Залежність пропускної здатності від кута повороту комірки.** Обертання комірки навколо осі системи означає одночасну зміну кутів α і β (див. мал. 2) при сталості їхньої різниці: $\alpha - \beta = \text{const}$. Внаслідок цього біла компонента постійна і дорівнює $\cos^2(\beta - \alpha) = \text{const}$. Тоді кольорову складову можна представити в такий спосіб:

$$C = -\sin^2(\delta/2) \sin 2\alpha \sin 2\beta \quad (12)$$



Мал. 6. Залежність пропускної здатності від кута повороту комірки з рідким кристалом в схрещених поляризаторах

Розглянемо зміну пропускної здатності для двох практично важливих випадків: $\alpha - \beta = \pi/2$ і $\alpha - \beta = 0$, тобто при схрещених і паралельних поляризаторах. Якщо поляризатори схрещені, то співвідношення (12) може бути записане інакше:

$$J_{\pm} = \sin^2(\delta/2) \sin^2 2\alpha \quad (13)$$

На мал. 6 показана залежність пропускної здатності від кута повороту комірки, побудована на підставі (13). Для схрещених поляризаторів пропускна здатність при повороті пластинки на 360° буде чотири рази дорівнювати нулю при α , рівному $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ і 2π , і чотири рази проходить через максимальне значення кольорової компоненти при α , рівному $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$ і $7\pi/4$. При цих положеннях комірка буде густо забарвлена завжди в той самий відтінок, тому що знак кольорової компоненти не змінюється. При паралельних поляризаторах все відбувається так само, тільки забарвлення комірки виявиться додатковим.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке поляризація світла?
2. Пояснити явище подвійного променезаломлення у рідких кристалах.
3. Пояснити інтерференцію поляризованих променів на схемі експерименту та графічному зображенні коливальних.
4. Вивести формулу пропускної здатності експериментальної системи.
5. Пояснити залежність пропускної здатності від довжини хвилі.
6. Пояснити залежність пропускної здатності від кута повороту поляризатора.
7. Пояснити залежність пропускної здатності від товщини комірки та від сили подвійного променезаломлення.

ВИСНОВКИ

Представлена робота пройшла апробацію в лабораторному практикумі "Фізика рідких кристалів" у Чернігівському державному педагогічному університеті ім. Т.Г. Шевченка. Студенти виявили зацікавленість до роботи. Робота дає можливість більш глибоко зрозуміти такі явища як інтерференція та поляризація світла, та засвоїти поняття подвійного променезаломлення, оптичної анізотропії, пропускної здатності, довжини оптичної когерентності.

Література

1. Фізичний практикум: ч.2./ Під заг. ред. Дущенко В.П. – К.: Вища школа. 1984.
2. Практикум по физике. / Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. – М.: Высшая школа., 1961.
3. Жидкие кристаллы / Под ред. С.И. Жданова. – М.: Химия, 1979. – 178 с.
4. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Сивухин Д.В. Оптика: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1985. – С.480-486.
6. Сугаков В.Й. Фізика рідкокристалічного стану. – К.: Вища шк., 1992. – 58 с.

Надійшла до редакції 21.04.2005.