

ВИВЧЕННЯ ПОДВІЙНОГО ПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РІДКИХ КРИСТАЛІВ У НАВЧАЛЬНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ

Рідкі кристали є унікальними об'єктами при вивченні фізичних явищ в розділах загальної фізики "Молекулярна фізика та термодинаміка", "Електрика і магнетизм", "Оптика". Показано, що для вивчення подвійного променезаломлення в навчальному експерименті використовуються нематичні рідкі кристали із додатною анізотропією діелектричної проникності. Під впливом змінного електричного поля частотою понад 1000 герц змінюється різниця фаз всередині рідкокристалічного шару між звичайною та незвичайною когерентними світловими хвилями, що створює умови для спостереження їх інтерференції.

Ключові слова: подвійне променезаломлення, комірка з нематичним рідким кристалом, інтерференція поляризованих світлових хвиль.

Вступ. Рідкі кристали – це речовини, які одночасно мають властивості кристалічного твердого тіла і звичайної рідини. Подібно до рідин рідкі кристали течуть, приймають форму посудини, в якій знаходяться, утворюють краплини. Подібно до твердих кристалів вони мають анізотропію усіх фізичних властивостей. Причина анізотропії – певна упорядкованість молекул усередині зразка. Відомо, що проходження світла через анізотропне середовище супроводжується подвійним променезаломленням. Світлова електромагнітна хвиля, що проходить анізотропним зразком, утворює всередині рідкого кристала дві хвилі з різними властивостями. Показник заломлення n_o однієї хвилі не залежить від напрямку поширення. Така хвиля називається звичайною. Для іншої хвилі показник заломлення n_e залежить від напрямку поширення і таку хвилю називають незвичайною. Крім цього, обидві хвилі є плоско поляризованими у взаємно перпендикулярних площинах.

Аналіз публікацій та постановка задачі. Усі ми є користувачами плоских дисплеїв, які є електронними засобами візуального відображення інформації різноманітного призначення (калькулятори, прилади, мобільні телефони, телевізори, комп'ютери та інші пристрої). На сьогоднішній день сучасні технології виготовлення плоских дисплеїв поділяються на два принципово відмінних напрямки, один з яких використовує рідкі кристали (LCD), а другий – органічні світлодіоди (OLED).

У рідкокристалічних дисплеях активним елементом є піксель, що складається з трьох комірок. Кожна комірка являє собою сандвіч, в якому рідкокристалічний шар обмежений скляними пластинами. Крім цього кожна комірка має поляризатор, аналізатор та фільтр, що пропускає світло одного з трьох кольорів: синій, зелений та червоний. Під впливом електричного поля на молекули рідкого кристала відбувається зміна світлового потоку, що проходить окремою коміркою. Це дає можливість одержувати кожним окремим пікселем світло певного кольору.

У пікселі технології TFT, в комірках якого електричне поле створюється між обома скляними пластинами, подвійне променезаломлення відсутнє. У більш сучасному пікселі технології IPS, в комірках якого електричне поле створюється у площині однієї скляної пластини, подвійне променезаломлення, має вирішальне значення для створення кольорового світлового потоку [1].

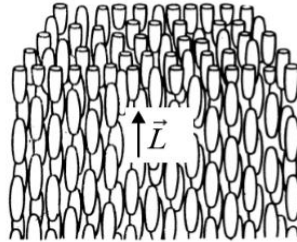
Виявляється, що змінюючи геометрію комірки, можна одержати зміну кольору світлового потоку без використання фільтрів за рахунок інтерференції звичайної та незвичайної хвиль всередині рідкокристалічного шару під час його освітлення білим світлом [2].

Рідкі кристали є унікальними модельними об'єктами в навчальному експерименті з фізики, за допомогою яких можна вивчати такі явища як дифракція, інтерференція, подвійне променезаломлення, оптична активність, термодинамічні фазові перетворення, різноманітні електро- та магнітооптичні ефекти [3, 4, 5]. Їх унікальність проявляється в універсальності застосування до різних фізичних явищ, як модельних об'єктів, завдяки природі цих речовин.

Метою даної статті є вивчення подвійного променезаломлення за допомогою рідких кристалів у навчальному експерименті.

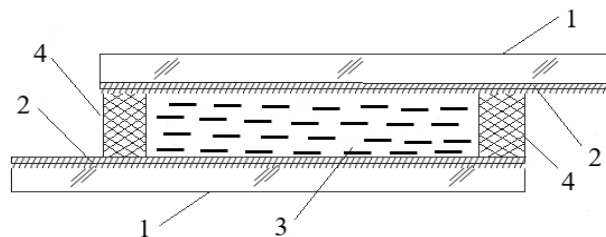
Викладення основного матеріалу. Поставлена задача розв'язується за рахунок змінного електричного поля частотою понад 1000 Гц, яке прикладене до шару нематичного рідкого кристала із додатною анізотропією діелектричної проникності.

Нематичним рідким кристалам притаманний далекий тривимірний орієнтаційний порядок, оскільки довгі осі видовжених молекул орієнтовані певним чином у просторі, а центри мас молекул переміщуються в цьому напрямку. Характеризують напрям переважної орієнтації довгих молекулярних осей вектором одиничної довжини \vec{L} , який називають директором (мал. 1).



Мал. 1. Модель молекулярної структури нематичного рідкого кристала

Комірка з рідким кристалом являє собою плоский конденсатор завтовшки 20 мкм (мал. 2). Електроди конденсатора (1) виготовлені з скляних пластин, на одну з поверхонь яких нанесено провідний шар S_nO_2 (2). Діелектриком конденсатора слугує нематичний рідкий кристал (3). Товщина рідкокристалічного шару фіксується стрічками з тефлону (4). Заповнюється комірка рідким кристалом при температурі, що перевищує температуру фазового переходу рідкий кристал – ізотропна рідина (T_{NI}) завдяки дії капілярних сил. Це дозволяє звільнитися від упорядкування директора L потоком рідини й не порушити граничних умов, що може мати місце при заповненні комірки при температурі $T < T_{NI}$.



Мал. 2. Комірка з нематичним рідким кристалом

Для одержання початкової орієнтації молекул рідкого кристала відносно поверхні скляних пластин комірка готується за певною методикою. Спочатку слід очистити поверхні скляних пластин від органічних домішок. Для цього вони втримуються 20-30 хвилин у розчині біхромату калію в концентрованій сірчаній кислоті, промиваються у дистильованій воді й висушуються у термошафі. На поверхню скляних пластин наноситься тонка плівка полімеру, яка натирається щіткою в однаковому напрямку для обох пластин. Так на поверхні електродів виникають борозни, які забезпечують однакову орієнтацію молекул рідкого кристала у приповерхневому шарі. Як тільки на поверхнях пластин виникає такий моношар, сили міжмолекулярної взаємодії індують набути орієнтацію молекул в глибину комірки завдяки пружним властивостям рідкого кристала. Потім збирається плоский конденсатор і заповнюється рідким кристалом.

Обладнання для експерименту включало джерело монохроматичного світла, поляризатор (P), комірку з рідким кристалом (K), аналізатор (A), екран (E) (мал. 3).

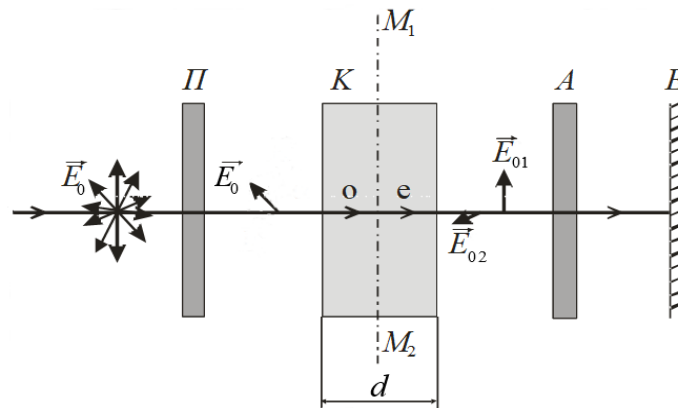
Для вивчення подвійного променезаломлення площину поляризатора необхідно зорієнтувати так, щоб площина поляризації світлової хвилі була розташована під деяким гострим кутом α до оптичної осі

M_1M_2 нематичного рідкого кристала, яка збігається з напрямком директора \vec{L} . За цієї умови звичайна та незвичайна хвилі, що утворюються всередині рідкого кристала під час падіння на нього плоско поляризованого світла, будуть когерентними, тому що вони виникли з однієї плоско поляризованої хвилі.

Згідно схеми експериментальної установки напрям поширення плоско поляризованої хвилі перпендикулярний до напрямку оптичної осі M_1M_2 нематичного рідкого кристала. Це означає, що всередині рідкого кристала звичайна (о) та незвичайна (е) хвилі не розділяються в просторі й поширюються в одному напрямі із різними швидкостями та різницею фаз:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(n_e - n_o)d}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n \quad (1)$$

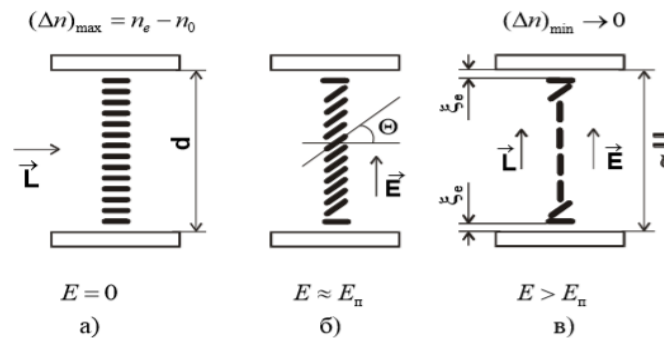
де $\Delta n = n_e - n_o$ – різниця між показниками заломлення незвичайної і звичайної хвилями або оптична анізотропія, λ – довжина монохроматичної хвилі, d – товщина рідкокристалічного шару.



Мал. 3. Схема експериментальної установки

Поза коміркою обидві хвилі є звичайними з амплітудами E_{01} і E_{02} . Аналізатор A зводить площини поляризації когерентних хвиль в одну площину, створюючи цим умови для здійснення інтерференції. На екрані E спостерігається інтерференційна картина, яка для взаємно перпендикулярних площин поляризатора і аналізатора залежить тільки від різниці фаз між когерентними хвилями.

Внаслідок чутливості рідких кристалів до дії зовнішніх сил оптичною анізотропією легко керувати. За допомогою зовнішнього змінного електричного поля між електродами комірки можна змінювати орієнтацію директора \vec{L} і тим самим впливати на різницю фаз між когерентними хвилями. Розглянемо проходження плоско поляризованого світла коміркою з нематичним рідким кристалом (мал. 4).



Мал. 4. Модель керованої зміни інтенсивності поляризованого світла, що проходить коміркою з нематичним рідким кристалом, електричним полем

При відсутності електричного поля завдяки подвійному променезаломленню комірка з нематичним рідким кристалом пропускає поляризоване світло й оптична анізотропія набуває максимального значення (мал. 4, а).

Дія електричного поля на молекули нематичного рідкого кристала, які є електричними диполями, має пороговий характер. Це означає, що переорієнтація директора \vec{L} починається при напруженостях електричного поля більших від деякого значення E_n (E_n – порогова напруженість електричного поля).

Сили електричного поля намагаються переорієнтувати директор \vec{L} вздовж ліній напруженості поля.

Проте на молекули рідкого кристала діють ще і пружні сили, які намагаються утримати директор \vec{L} паралельно площині електродів. Так виникає деформація рідкокристалічного шару, яку називають деформацією поперечного вигину. Переорієнтація директора \vec{L} (мал. 4, б) починається при напруженості $E = E_n$, коли настає рівність електричного і пружного моментів [6]:

$$M_E = M_{np}, \quad M_E \sim \epsilon_0 \Delta \epsilon E_n^2, \quad M_{np} \sim \frac{\pi^2 k_{11}}{d^2},$$

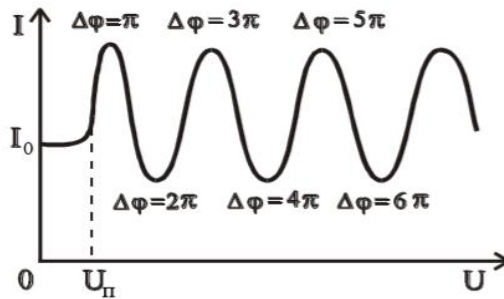
де ϵ_0 – електрична стала, $\Delta \epsilon$ – анізотропія діелектричної проникності, k_{11} – модуль пружності для деформації поперечного вигину. Враховуючи, що порогова напруга $U_n = E_n d$, з рівності $\epsilon_0 \Delta \epsilon E_n^2 = \frac{\pi^2 k_{11}}{d^2}$, одержимо:

$$U_n = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad (2)$$

Із зростанням напруги $U > U_n$ кут Θ між директором \vec{L} і площиною електродів починає збільшуватися, що в свою чергу викликає зменшення величини оптичної анізотропії $\Delta n = f(\Theta)$. Згідно формули (1) різниця фаз $\Delta\phi$ між звичайною і незвичайною хвилями також зменшуватиметься. В аналізаторі ці промені інтерферують і в залежності від різниці фаз спостерігається зміна інтенсивності світла, що пройшло через зразок:

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2},$$

де I_0 – інтенсивність падаючого світла, α – кут між початковим напрямом директора \vec{L} ($E = 0$) і площиною поляризатора. Цілком очевидно, що при $\Delta\phi = 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) буде мінімум інтенсивності, при $\Delta\phi = (2m + 1)\pi$ – максимум інтенсивності. Отже, при освітлюванні системи "поляризатор – комірка з нематичним рідким кристалом – аналізатор" монохроматичним світлом із зміною напруги на електродах комірки відбуваються осциляції інтенсивності поляризованого світла (мал. 5).



Мал. 5. Інтерференція звичайної та незвичайної хвиль під час зміни напруги на електродах комірки

Енергія зчеплення молекул з поверхнею електродів така велика, що навіть у досить сильному електричному полі приповерхневі молекули залишаються паралельними площині електродів.

Відстань від поверхні, ближче якої електричне поле перестає впливати на орієнтацію молекул, називають електричною когерентною довжиною ξ_E :

$$\xi_E = \frac{d}{U} \sqrt{\frac{k_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}}, \quad (3)$$

де U – напруга, при якій відбувається повна переорієнтація директора \vec{L} . При цьому директор \vec{L} паралельний оптичній осі M_1M_2 нематичного рідкого кристала, оптична анізотропія наближається до нуля, подвійне променезаломлення відсутнє й комірка не пропускає світла (мал. 4, в).

Якщо систему "поляризатор – комірка з нематичним рідким кристалом – аналізатор" освітлювати білим світлом, то замість осциляцій інтенсивності монохроматичного світла можна побачити зміну інтерференційних кольорів. При $\alpha = 45^\circ$ контраст між максимумами та мінімальними інтенсивностями монохроматичного світла буде найбільшим, а інтерференційні кольори будуть ще більш яскравими. Таким чином, подвійне променезаломлення в системі "поляризатор – комірка з нематичним рідким кристалом – аналізатор" проявляється осциляцією інтенсивності монохроматичного світла або зміною інтерференційних кольорів під час освітлювання комірки білим світлом.

Схему установки (мал. 3) можна застосувати в демонстраційному експерименті. Змінюючи напругу на електродах комірки, на екрані можна спостерігати динамічну інтерференційну картину, де світлі ділянки замінюються на темні і навпаки, що доводить наявність подвійного променезаломлення всередині рідкого кристала.

У лабораторній роботі по вивченню подвійного променезаломлення в анізотропних середовищах зручно використати бінокулярний поляризаційний мікроскоп, в якому один з окулярів замінити на фотоприймач. Одним із завдань такої роботи є експериментальне визначення порогової напруги (U_n) з вольт-контрастної характеристики комірки, одержаної за допомогою фотоприймача (мал. 5). Для цього

будується графік залежності $U = f(\Delta\phi)$, на якому треба вибрати напруги інтерференційних мінімумів й апроксимувати їх лінійною залежністю. Для цього бажано використати метод найменших квадратів. З одержаного рівняння залежності $U = f(\Delta\phi)$ визначається порогова напруга U_n , значення якої можна використати для розрахунку модуля пружності для деформації поперечного вигину нематичного рідкого кристала (формула 2) та електричної когерентної довжини (формула 3).

Висновки. 1. Нематичні рідкі кристали є модельними об'єктами для вивчення подвійного променезаломлення в анізотропних середовищах. 2. Запропоновано демонстраційний експеримент з вивчення подвійного променезаломлення в нематичних рідких кристалах у вигляді спостереження динамічної інтерференційної картини. 3. Запропоновано лабораторну роботу з вивчення подвійного променезаломлення в нематичних рідких кристалах, яка не тільки розкриває механізм явища, але й ознайомлює студентів із елементами наукового пошуку.

Використані джерела

1. Рідкокристалічний дисплей / Вікіпедія. <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
2. Ситников О. П. Вивчення інтерференції світла в тонких плівках рідких кристалів. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського державного університету: Серія педагогічна: Методологічні принципи формування фізичних знань учнів і професійних якостей майбутніх учителів фізики і астрономії.* Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський університет, 2003. Вип. 9. С. 154 – 156.
3. Ситников О. П. Рідкі кристали в фізичному навчальному експерименті. *Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: Збірник наукових праць.* Вип. 4: В 3-х томах. Кривий Ріг: Видав. відділ НметАУ, 2004. Т. 2: Теорія та методика навчання фізики. С. 400–408.
4. Ситников О. П. Використання рідких кристалів під час вивчення оптичної активності речовин. *Фізика та астрономія в школі*, 2005. №4. С. 34–41.
5. Ситников О. П. Керована електричним полем фазова дифракційна рідкокристалічна ґратка. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету імені Т.Г.Шевченка.* Вип. 151, Т.2. Чернігів : ЧНПУ, 2018. С. 64–68. (Серія: педагогічні науки).
6. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристалов. М.: Наука, 1978. 384 с.

Sitnikov A.

STUDY OF DUAL REMAINING BY LIQUID CRYSTALS IN EDUCATIONAL EXPERIMENT

Liquid crystals are unique model objects in a physical experiment in which one can study such phenomena as diffraction, interference, birefringence, optical activity, thermodynamic phase transformations, various electro- and magneto-optical effects. Their uniqueness manifests itself in the universality of application to various physical phenomena, as model objects, due to the nature of these substances. The purpose of this article is to study the birefringence of liquid crystals in a learning experiment. The given problem is solved by means of an alternating electric field with a frequency exceeding 1000 Hz, which is applied to a layer of a nematic liquid crystal with a positive anisotropy of dielectric constant.

To study the dual refraction, the plane of the polarizer must be oriented so that the plane of polarization of the light wave is located at some sharp angle to the optical axis of the nematic liquid crystal. Under this condition, ordinary and unusual waves formed inside a liquid crystal during the fall of flat-polarized light on it will be coherent, since they arose from a single plane-polarized wave. According to the scheme of the experimental installation, the direction of propagation of a plane-polarized wave is perpendicular to the direction of the optical axis of the nematic liquid crystal. This means that within the liquid crystal, ordinary (o) and unusual (e) waves are not separated in space and spread in one direction with different velocities and phase differences. The double refraction in the "polarizer-cell with a nematic liquid crystal-analyzer" is manifested by the oscillation of the intensity of the monochromatic light or the change in the interference colors during the illumination of the cell with white light. A demonstration experiment for the study of birefringence in nematic liquid crystals in the form of observation of a dynamic interference pattern is proposed. The laboratory work on the study of double refraction in nematic liquid crystals is proposed, which not only reveals the mechanism of the phenomenon, but also introduces students to the elements of scientific research.

Key words: birefringence, cell with nematic liquid crystal, interference of polarized light waves.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018