

### *Література*

1. Бугайов О.І. Методика викладання фізики в середній школі: Теоретичні основи: Навч. посібник для студентів пед. ін-тів по фіз.-мат. спец. – М: Просвещение, 1981. – 288 с.

2. Фізика. Практикум / Ред. Є.С.Клос, Я.Я.Болюбаш, Ю.В.Караван, Н.В.Пастернак. – Львів: Вища шк. Вид-во при Львів. ун-ті, 1989. – 192 с.: іл.-Бібліогр.: С.174.

*Гриценко М.І., Ситников О.П.  
Чернігівський державний педагогічний університет  
імені Т.Г.Шевченка*

### **ВИВЧЕННЯ РІДКИХ КРИСТАЛІВ У КУРСІ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ**

Фізика рідких кристалів відноситься до нових розділів сучасної фізики. Свій розвиток вона одержала переважно протягом останніх десятиліть ХХ століття, хоча відкриті рідкі кристали були в кінці попереднього століття. Вперше рідкокристалічний стан речовини описав професор Львівського університету Планар у 1861 р., але його роботи не привернули до себе наукову громадськість. Відкриття рідких кристалів пов'язують з іменами австрійського ботаніка Рейнітцера та німецького кристалографа Лемана. Бурхливий розвиток фізики рідких кристалів в останній період був стимульований багаточисельними застосуваннями їх у сучасній електронній техніці, а також можливостями успішного використання уявлень про рідкокристалічний стан при дослідженні біологічних структур.

Рідкі кристали зайняли важливе місце як унікальні функціональні матеріали – перетворювачі цілого ряду фізичних властивостей. У рідкокристалічній, як проміжній фазі, приховані ключі до більш глибокого розуміння твердого і рідкого станів речовини. Рідкі кристали дозволяють поглиблено вивчати тонкі фізичні процеси при фазових переходах, які тісно пов'язані з природою самої мезофази. В такій ситуації підготовка викладачів фізики та інженерів без глибокого вивчення фізики рідких кристалів не може вважатись закінченою.

Рідкокристалічний стан (мезофаза) – це окремий фазовий стан речовини, проміжний між твердим і рідким станом, який поєднує в собі властивості як твердого кристалу, так і звичайної рідини. Рідкі кристали текучі як рідини і мають анізотропію фізичних властивостей, як тверді кристали. Поєднання таких властивостей приводить до появи в рідких кристалах цілого ряду специфічних ефектів, яким немає відповідних аналогів ні у твердій кристалічній, ні в ізотропній рідкій фазах.

Рідкокристалічну фазу можуть утворювати лише органічні речовини, молекули яких мають сильно видовжену, або сильно плоску форму і плоский жорсткий скелет. Ця геометрична анізотропія є першопричиною анізотропії всіх інших фізичних властивостей.

За ступенем упорядкованості рідкі кристали поділяються на нематичні, холестеричні та смектичні. В нематичних рідких кристалах (НРК) має місце близький трансляційний і далекий орієнтаційний порядок у розташуванні молекул. У НРК сили взаємодії між молекулами рівномірно розподілені вздовж молекули, причому ця взаємодія залежить від кута між молекулами, але не залежить від їх паралельного переміщення. Тому енергетично вигідне паралельне розташування молекул у рідкокристалічному стані. Напрямок переважної орієнтації молекул описується одиничним вектором  $\vec{L}$ , який називають директором. Холестеричні рідкі кристали (ХРК) вважають різновидністю НРК і відрізняються вони від останніх закрученістю структури навколо осі, перпендикулярної директору  $\vec{L}$ . У кожній площині, перпендикулярній осі закручування, молекули розташовуються паралельно певному напрямку, як і в НРК. Але кожний наступний шар повернутий відносно молекул попереднього шару на деякий невеликий кут. Тому в цілому холестерична структура в просторі утворює спіраль з певним кроком. Закрученість ХРК дозволяє вважати їх періодичною структурою з періодом, який порівняний з довжиною хвилі видимого світла. Смектичні рідкі кристали (СРК) є найбільш впорядкованими серед рідких кристалів і мають найбільшу в'язкість. У них видовжені молекули орієнтовані в певному напрямку і розташовуються шарами. В залежності від способу упаковки молекул у шарах розрізняють декілька модифікацій СРК.

У мезофазі речовина існує в певному інтервалі температур, який для різних речовин змінюється від долей градуса до декількох десятків градусів. Процес плавлення рідкого кристалу відбувається в декілька стадій: спочатку руйнується трансляційний порядок (координаційне плавлення), а при вищій температурі руйнується орієнтаційний порядок (орієнтаційне плавлення). При вивченні рідких кристалів можна більш глибоко зрозуміти фізику фазових переходів, коли поступово “розморозжуються” ті чи інші ступені вільності: спочатку трансляційні потім орієнтаційні ступені вільності. Може відбуватися також “проміжне плавлення” між різними рідкокристалічними модифікаціями. Отже, фазовий перехід у рідких кристалах розтягується на певний температурний інтервал і відбувається поетапно. Дослідження рідких кристалів показали, що переходи твердий кристал – рідкий кристал та рідкий кристал – ізотропна рідина є фазовими переходами I роду, а рідкокристалічний стан є самостійним термодинамічним станом речовини.

Рідкі кристали доцільно вивчати в двох розділах загальної фізики. Молекулярну і надмолекулярну структуру рідких кристалів, їх класифікацію, в'язкопружні властивості та фазові переходи пропонується вивчати в розділі “Молекулярна фізика”. В розділі “Оптика” доцільно вивчати оптичні та електрооптичні властивості, а також застосування рідких кристалів. При цьому рідкі кристали можна розглядати як унікальні модельні об'єкти при вивченні ряду оптичних явищ: дифракції, інтерференції, подвійного променезаломлення, оптичної активності. Вивчення оптичних явищ може супроводжуватись ефективними фізичними демонстраціями з рідкими кристалами, які є оптично анізотропними. Найбільш виразно оптична анізотропія проявляється з подвійного променезаломлення в НРК.

НРК з точки зору оптики є одновісними додатними кристалами, головна оптична вісь яких співпадає з напрямком директора  $\vec{L}$ . Показники заломлення звичайного променя  $n_o$  і незвичайного променя  $n_e$  відповідають випадком, коли напрям коливань електричного вектора плоскополяризованого світла в промені, відповідно, перпендикулярний чи паралельний оптичній осі. Позначивши індексами  $\parallel$  і  $\perp$  напрямки, які паралельні та перпендикулярні вектору  $\vec{L}$ , одержимо:  $n_o = n_{\perp}$  і  $n_e = n_{\parallel}$ . Тоді величина оптичної ані-

зотропії  $\Delta n = n_e - n_o = n_{\parallel} - n_{\perp} > 0$  і для різних НРК може змінюватися у межах  $0,01 < \Delta n < 0,4$ , що на порядок перевищує  $\Delta n$  для найкращих двопророменезаломлюючих твердих кристалів.

Внаслідок чутливості рідких кристалів до дії зовнішніх сил оптичною анізотропією легко управляти. Так, за допомогою зовнішнього електричного поля можна змінювати орієнтацію молекул і тим самим впливати на умови поширення світла крізь рідкий кристал. Використовуючи цю особливість рідких кристалів, у даній роботі пропонуються деякі демонстрації явища інтерференції і дифракції. Розглянемо це докладніше.

Дослід проводиться з НРК, молекул якого мають дипольний момент, що співпадає з напрямком довгої осі молекули ( $\Delta \varepsilon > 0$ ). Рідкий кристал знаходиться у комірці, на прозорих електродах якої створені умови для пленарної орієнтації молекул. Товщина шару рідкого кристалу  $d = 10 \div 20$  мкм.

У відсутності електричного поля зразок пропускає падаюче поляризоване світло завдяки інтерференції при подвійному променезаломленню. При збільшенні змінної ( $\nu = 1000$  Гц) напруги ( $U > U_{\text{п}}$ , де  $U_{\text{п}}$  – порогова напруга) початкова планарна орієнтація молекул порушується і вони відхиляються на деякий кут  $\Theta$ . При цьому різниця фаз  $\Delta \varphi$  між звичайним і незвичайним променями змінюється за законом:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n,$$

де  $d$  – товщина зразка,  $\lambda$  – довжина хвилі падаючого монохроматичного світла,  $\Delta n = f(\Theta)$  – величина оптичної анізотропії, яка залежить від кута  $\Theta$  між вектором  $\vec{L}$  і площиною електродів. Після аналізатора спостерігається інтерференція і в залежності від різниці фаз відбувається зміна інтенсивності світла, що пройшло через зразок:

$$I \sim I_o \sin^2 \frac{\Delta \varphi}{2},$$

де  $I_o$  – інтенсивність падаючого поляризованого світла. Отже, при освітлюванні системи “поляризатор – зразок нематичного рідкого кристалу – аналізатор” монохроматичним світлом спостерігаються осциляції інтенсив-

ності світла. Якщо цю систему освітлювати білим світлом, то бачимо зміну інтерференційних кольорів. Таким чином, на екрані спостерігається зміна інтерференційних кольорів внаслідок подвійного променезаломлення, що управляється електричним полем.

Цікаві дифракційні ефекти спостерігаються при використанні НРК, молекули яких мають дипольний момент, перпендикулярний довгій осі ( $\Delta \varepsilon < 0$ ). Початкову орієнтацію молекул рідкого кристалу в комірці також задають планарною. У низькочастотному електричному полі ( $\nu < 1000$  Гц), яке прикладене до зразка вздовж осі OZ, із-за додатньої анізотропії електропровідності ( $\Delta \sigma > 0$ ) вздовж напрямку електродів відбудеться деякий перерозподіл електричних зарядів і вздовж осі OX утвориться періодична картина об'ємних зарядів протилежних знаків. Взаємодія зовнішнього поля з просторовими зарядами приводить до виникнення обертового моменту  $M$ , який намагається збільшити початкову флуктуаційну деформацію кристала. Діелектричний момент, навпаки, буде зменшувати деформацію кристала. Протидіє деформації також момент пружних сил. У результаті протидії моментів встановлюється вихрове обертання молекул всередині циліндричних областей, які розташовуються перпендикулярно напрямку вектора  $\vec{L}$  початкової орієнтації молекул. У центрі вихору показник заломлення для незвичайного променя  $n_{\parallel}$  є мінімальним, на краю вихора – максимальним. Це означає, що циліндричні області відіграють роль лінз, які фокусують падаюче на комірку світло в тонкі світлові лінії. Так, при певному значенні напруги виникає смугаста картина, яку називають доменами Вільямса. При освітленні її монохроматичним світлом на екрані одержується дифракційна картина такого ж вигляду, як й від одновимірної дифракційної ґратки.

У певному діапазоні частот, який залежить від абсолютного значення та анізотропії питомої електропровідності рідкого кристалу домени Вільямса починають дробитись і одновимірною деформацією планарного шару перетворюється у двовимірну деформацію, з якою пов'язана двовимірною періодичністю в розподілі показника заломлення. При освітленні комірки монохроматичним світлом на екрані утворюється дифракційна картина такого ж вигляду, як і від двовимірної дифракційної ґратки.

При подальшому підвищенні напруги течія рідини стає більш турбулентною, а рух молекул хаотичним. Циліндричні області руйнуються. Величина показника заломлення також змінюється хаотично. Це викликає інтенсивне розсіювання падаючого на комірку світла, яке нагадує “кипіння” рідини. Такий електрооптичний ефект називають динамічним розсіюванням світла. Демонстрація цього ефекту дає можливість бачити, як комірка з рідким кристалом відіграє роль модулятора світла. Таким чином, змінюючи частоту і напругу, на одному зразку можна одержати дифракційні картини двох типів і інтенсивне розсіювання світла.

Не менш ефективно для лекційних демонстрацій можна використати ХРК. Як уже відмічалось, характерною ознакою ХРК є спіральна структура. Відстань між найближчими точками рідкого кристалу, в яких директор  $\vec{L}$  має однакову орієнтацію, називають кроком холестеричної спіралі  $P$ .

Значення кроку спіралі можна змінювати дією зовнішнього електричного поля. Початкова плоска текстура (ПТ) є прозорою. Вісь спіралі перпендикулярна до площини скляних пластин комірки і рідкий кристал є оптично активним. При подальшому збільшенні напруженості електричного поля  $E$  спіральна структура починає деформуватись. Спочатку в полі зору з'являється сітка. Це двовимірний просторовий періодичний деформація плоскої текстури. Інтенсивність світла  $I$  починає зменшуватись.

З подальшим збільшенням напруженості електричного поля сітка зникає і з'являється наступна текстура, яку називають текстурою “відбитків пальців” (ТВП). Ця одновимірний деформація відповідає повороту осі спіралі на кут  $90^\circ$  відносно орієнтуючих поверхонь. При електричних полях з напруженістю більшою за критичну  $E_{\text{хнп}}$ , всі молекули орієнтуються вздовж силових ліній поля і спіральна структура зникає. Так відбувається розкрутка спіралі – холестерико-нематичний перехід (ХНП).

При освітленні текстури “відбитків пальців” монохроматичним світлом на екрані спостерігається дифракційна картина у вигляді кілець. Визначити крок холестеричної спіралі можна за формулою:

$$P = 2b,$$

де,  $b$  – період текстури “відбитки пальців”. Період  $b$  знаходиться з умови дифракції:

$$b \sin \alpha = m \lambda,$$

де  $\alpha$  – кут дифракції,  $m = 0, 1, 2, \dots$  – порядок максимуму,  $\lambda$  – довжина хвилі падаючого на комірку світла,  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{h}$  (для малих кутів). Тоді

$$P = \frac{2 m \lambda h}{r}.$$

Текстуру “відбитків пальців” можна застосувати у демонстраційному експерименті для спостереження явища дифракції. При певному значення кроку спіралі зразок з холестериком при освітленні гелій-неоновим лазером дає стійку дифракційну картину з достатньою кількістю дифракційних максимумів.

Планарна текстура ХРК має незвичайні оптичні властивості. Вона має надзвичайно високу оптичну активність: повертання площини поляризації досягає значень  $10^4 \div 10^5$  град/мм, що на порядки перевищує оптичну активність відомих оптично активних речовин. Така текстура є періодичною структурою з періодом, що дорівнює половині кроку спіралі:  $R = \frac{P}{2}$ . На цій періодичній структурі відбувається дифракція видимого світла. Для довжин хвиль, які задовольняють умові Вульфа-Брегга:  $m \lambda = 2 R \bar{n} \sin \varphi$  спостерігається відбиття видимого світла. В цій формулі  $m$  – номер порядку дифракційного максимуму,  $\lambda$  – довжина відбитої хвилі,  $R$  – період просторової структури,  $\bar{n}$  – середній показник заломлення рідкого кристалу,  $\varphi$  – кут між напрямком падіння світлового пучка і площиною холестеричного моношару.

На відміну від звичайних гіротропних речовин, де рентгенівські промені при нормальному падінні світла дають декілька порядків дифракції, для холестериків при нормальному падінні світла спостерігається лише перший порядок дифракції. Отже, при  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ,  $\sin \varphi = 1$ ,  $m = 1$  і  $\lambda_0 = 2 R \bar{n} = P \bar{n}$ , тобто, коли довжина електромагнітної хвилі збігається із кроком спіралі, спостерігається максимум у відбиванні світла від холесте-

ричних площин. Властивість холестерика відбивати світло з вибраною довжиною хвилі називається селективним відбиванням світла, яке обумовлює відповідний колір зразка.

Шар холестеричної речовини, освітлений білим світлом, у відбитому світлі буде здаватись забарвленим. Крок спіралі дуже чутливий до зміни температури: з підвищенням температури крок монотонно зменшується, при цьому колір рідкокристалічного шару змінюється від червоного до фіолетового. Це дозволяє використовувати ХРК для вимірювання температур. Рідкокристалічні термоіндикатори, виготовленні у вигляді плівок, можна ефективно використовувати в фізичних дослідах, які потребують вимірювань температурних полів: при візуалізації теплових (інфрачервоних) променів, при порівнянні поглинальної і випромінювальної здатності чорної і білої поверхонь, ілюструючи нагрівання масивних провідників вихровими струмами і т.д.

Більш розширено, ніж в курсі загальної фізики, рідкі кристали рекомендується вивчати на старших курсах окремим лекційним курсом з лабораторним практикумом. Тривалий досвід упровадження фізики рідких кристалів у навчальний процес для студентів фізичних спеціальностей ЧДПУ ім.Т.Г.Шевченка дав позитивний результат.

### *Література*

1. Сугаков В.Й. Фізика рідкокристалічного стану. – К.: Вища шк., 1992. – 58 с.
2. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. – М.: Наука. Глав. редакция физ.-мат. литературы, 1983. – 320 с.
3. Кучерук І.М., Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика.: Навч. посібник. – К.: Вища шк., 1991. – 463 с.
4. Гриценко М.І., Ситников О.П. Лабораторний практикум “Фізика рідких кристалів” для фізичних спеціальностей педагогічних вузів / Матеріали IV Всеукраїнської конференції “Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики. – Миколаїв: МДПУ, 1999. – С.22-26.