УДК 53 (076)

Гриценко М.І., Кучеєв С.І., Пустовий О.М.

ДЕМОНСТРАЦІЯ РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРООПТИЧНОГО ЕФЕКТУ ДИНАМІЧНОГО РОЗСІЮВАННЯ В НЕМАТИЧНОМУ РІДКОМУ КРИСТАЛІ В КУРСІ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ

Описана демонстрація розсіювання світла в оптично мутному середовищі з використанням електрооптичного ефекту динамічного розсіювання світла в нематичному рідкому кристалі. Вона може використовуватись як у вузі, так і в середній школі.

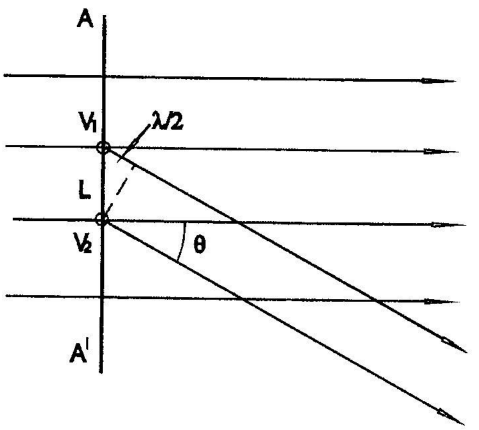
In this article demonstration of dispersion of light in the muddy environment with the help of electrooptical effect of dynamic scattering in nematic a liquid crystal is described. Demonstration can be used both in high school and at pedagogical university.

Ключові слова: *розсіювання світла, явище Тиндаля, ефект Мі, індикатриса розсіювання, нематичний рідкий кристал, домени Капустіна-Вільямса, динамічне розсіювання світла (ДРС).*

Явище розсіювання світла вивчається в розділі "Оптика" курсу загальної фізики і носить доволі складний характер. До того ж воно взаємопов'язане з деякими іншими явищами оптики та молекулярної фізики.

Традиційно в загальному курсі фізики при вивченні розсіювання світла використовують демонстрації розсіювання світла у дистильованій воді, в яку введено краплю одеколону, або молока. Така демонстрація має ряд недоліків: потрібно готувати розчини і підбирати їх концентрацію, невідомі характерні розміри неоднорідностей в розчинах і т. ін. Тому, для кращого розкриття фізичної суті цього явища автори пропонують ефективну демонстрацію, в якій використовується електрооптичний ефект динамічного розсіювання світла (ДРС) в нематичному рідкому кристалі.

Процес розсіювання світла полягає в тому, що світло, яке проходить через речовину, збуджує коливання електронів у атомах. Електрони, що коливаються, стають джерелами вторинних хвиль, які поширюються в усіх напрямках. Це явище, здавалося б, повинно при всіх умовах приводити до розсіювання світла. Однак, вторинні хвилі є когерентними, тому необхідно врахувати їх інтерференцію.



МАЛ. 1. РОЛЬ ОПТИЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ СЕРЕДОВИЩА ПРИ РОЗСІЮВАННІ СВІТЛА

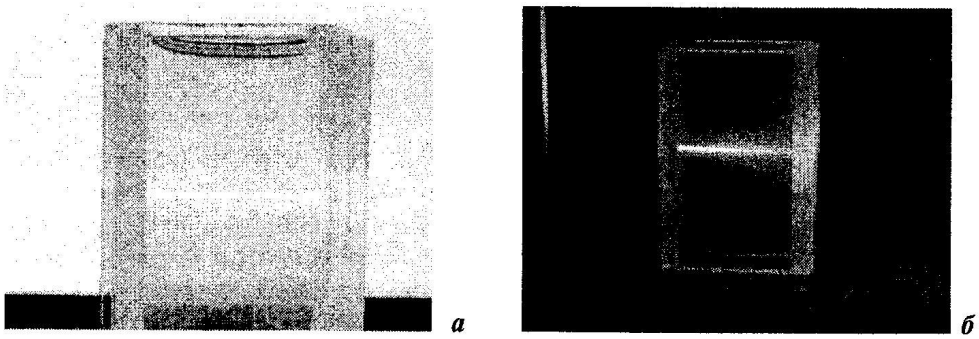
Дійсно, якщо середовище оптично однорідне чи, іншими словами, якщо його показник заломлення не змінюється, то в однакових малих об'ємах світлова хвиля індукує однакові електричні моменти, зміна яких у часі і приводить до випромінювання когерентних вторинних хвиль однакової амплітуди. На мал.1 представлено випадок поширення плоскої монохроматичної хвилі в однорідному середовищі. На хвильовому фронті *A A'* виділимо об'єм V_1 з лінійними розмірами, малими в порівнянні з довжиною хвилі λ падаючого світла, але який містить досить велику кількість молекул, щоб середовище можна було розглядати як суцільне. У напрямку, що характеризується кутом θ, об'єм V_1 випромінює вторинну хвилю певної амплітуди і фази. На хвильовому фронті *A A'* завжди можна виділити інший об'єм V_2, який у тому ж напрямку випромінює вторинну хвилю тієї ж амплітуди, яка приходить у точку спостереження в протифазі з хвилею від V_1 внаслідок різниці ходу. Такі хвилі повністю погасять одна одну. З мал. 1 видно, що відстань L між виділеними об'ємами повинна дорівнювати $L=\lambda/(2\sin\theta)$.

Якщо середовище цілком *однорідне,* взаємне погашення буде мати місце для вторинних хвиль, що випромінюються будь-якою парою рівновеликих об'ємів, розташованих на хвильовому фронті і віддалених один від одного на відстань L. Отже, в однорідному середовищі світло буде

© Гриценко М.І., Кучеєв С.І., Пустовий О.М., 2006

поширюватися тільки в первісному напрямку і розсіювання світла буде відсутнє. Повне погашення вторинних хвиль відбувається для будь-якого кута θ крім θ = 0, тому що в цьому напрямку поширення падаючої хвилі усі вторинні хвилі складаються синфазно.

Якщо пучок рівнобіжних променів від джерела проходить через кювету з водою, яка дуже ретельно очищена (дистильована), то його майже не видно при спостереженні збоку (мал. 2а), тобто під кутом від первісного пучка світло практично не розсіюється; але якщо ввести в кювету краплю одеколону, то виникає інтенсивне розсіювання (мал 2б): пучок світла виразно видно з усіх боків і при деякій товщині кювети практично усе світло розсіюється в сторони і за кюветою вже не буде ясно окресленого первинного пучка, а лише дифузне поле розсіяного світла. Звичайно, уведення краплі одеколону не змінює істотно властивостей величезної маси молекул води, що знаходиться в кюветі, але в одеколоні в розчиненому вигляді є речовини, які випадають у водяному розчині, утворюючи емульсію – дрібні крапельки, завислі у воді. Наявність таких неоднорідностей створює зовсім інші умови для інтерференції вторинних хвиль.

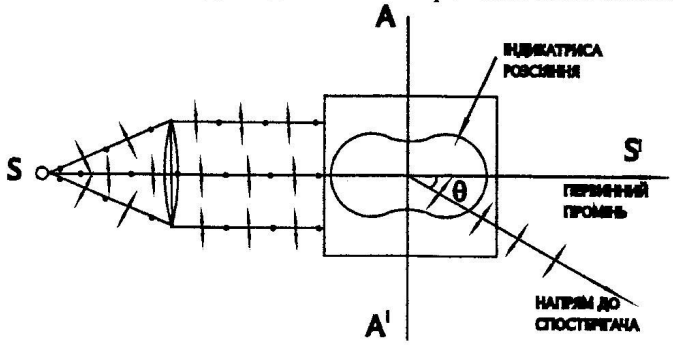


МАЛ. 2. РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА НЕ-NE ЛАЗЕРА В:
а) дистильованій воді,
б) дистильованій воді з краплею одеколону.

У результаті первинний пучок дифрагує на цих неоднорідностях і дає картину розсіювання, характерну для мутного середовища.

Середовища з явно вираженою оптичною неоднорідністю звуться мутними середовищами. Мутні середовища – це дим (тверді частинки у газі), туман (крапельки рідини, наприклад, води у повітрі), суспензії (сукупність твердих часточок, що плавають у рідині), емульсії (краплі однієї рідини нерозчинної в іншій), тверді тіла, наприклад, перламутр, опали або молочне скло і т.ін. В усіх подібних випадках спостерігається більш-менш сильне розсіювання світла мутним середовищем, що носить звичайно назву *явища Тиндаля.*

Вивчення розсіювання в мутних середовищах, де розміри частинок малі в порівнянні з довжиною хвилі, привело до встановлення деяких загальних закономірностей, експериментально відкритих Тиндалем та іншими дослідниками і теоретично пояснених Релеєм.



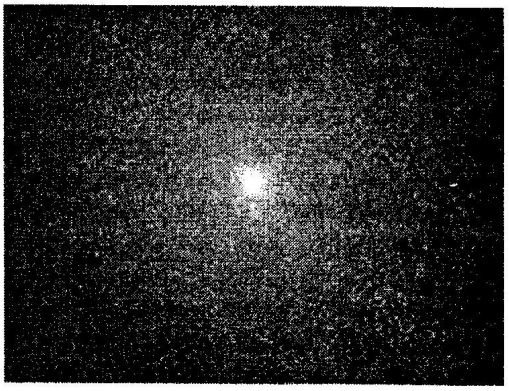
МАЛ. 3. СХЕМА СПОСТЕРЕЖЕННЯ РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА В ОПТИЧНО МУТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ТА ІНДИКАТРИСА РОЗСІЮВАННЯ

Якщо оцінити інтенсивність світла, розсіяного в різних напрямках, то вона виявиться симетричною щодо осі первинного пучка і щодо лінії, до неї перпендикулярної (мал. 3). Крива, що графічно показує розподіл інтенсивності розсіяного світла по різним напрямкам, зветься

індикатрисою розсіювання. При природному падаючому світлі індикатриса розсіювання має вигляд, показаний на мал. 3, і виражається формулою $I \sim 1+\cos^2\theta$.

Просторову індикатрису можна одержати обертанням кривої відносно осі SS'. При збільшенні розмірів неоднорідностей в мутному середовищі закономірності розсіювання світла поступово спотворюються. При $r > \lambda$ інтенсивність розсіювання вперед буде більше ніж назад. Таке явище називається ефектом Мі.

Якщо на шляху пучка світла помістити кювету з дистильованою водою, в яку введено краплю молока чи одеколону, то на екрані отримаємо картину розсіяного світла, зображену на мал. 4.



МАЛ. 4. КАРТИНА РОЗСІЯНОГО СВІТЛА НА ЕКРАНІ

Релей зробив розрахунок інтенсивності світла, розсіяного на сферичних частках, розміри яких малі в порівнянні з довжиною хвилі падаючого світла (1899 р.), і знайшов, що для природного світла інтенсивність розсіяного світла дорівнює

$$I=I_0(9\pi^2\varepsilon_1^2NV^2)/(2\lambda^4L^2)*((\varepsilon-\varepsilon_1)/(\varepsilon+\varepsilon_1))^2*(1+\cos^2\theta).$$

Тут N – число частинок в об'ємі, що розсіює, V і ε – об'єм і діелектрична проникність завислої частинки, ε_1 – діелектрична проникність середовища, у якому завислі частинки, θ – кут розсіювання, I_0 – інтенсивність падаючого світла, L – відстань від об'єму, що розсіює, до точки спостереження.

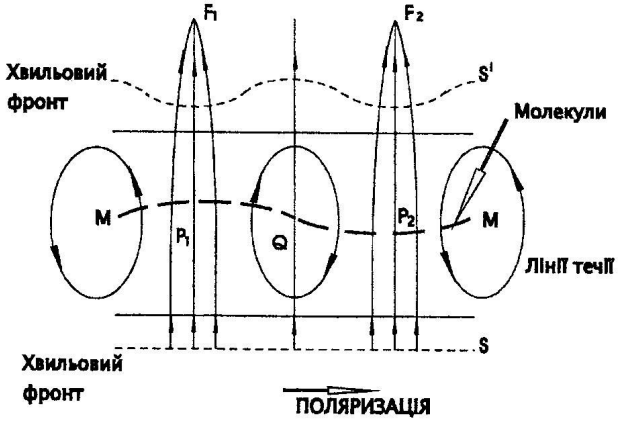
З формули випливає також, що інтенсивність розсіяного світла пропорційна квадрату об'єму частинки, що розсіює, чи шостого ступеня радіуса сферичної частинки.

Формула Рэлея містить множник $((\varepsilon-\varepsilon_1)/(\varepsilon+\varepsilon_1))^2$, що може служити мірою оптичної неоднорідності. Якщо $\varepsilon=\varepsilon_1$, то оптична неоднорідність зникає, а разом з нею зникає і розсіяне світло ($I=0$). Така міра оптичної неоднорідності відноситься не обов'язково до малих частинок, а може служити характеристикою оптичної неоднорідності і в інших випадках.

Розсіювання світла на неоднорідностях ефективно можна спостерігати при дослідженні деяких електрооптичних ефектів в рідких кристалах. У нематичних рідких кристалах поряд з польовими електрооптичними ефектами, спостерігаються цікаві з точки зору оптики електрогідродинамічні ефекти – домени Капустіна-Вільямса та динамічне розсіювання світла (ДРС). Уперше ці домени спостерігав Цвєтков у 1937 р.

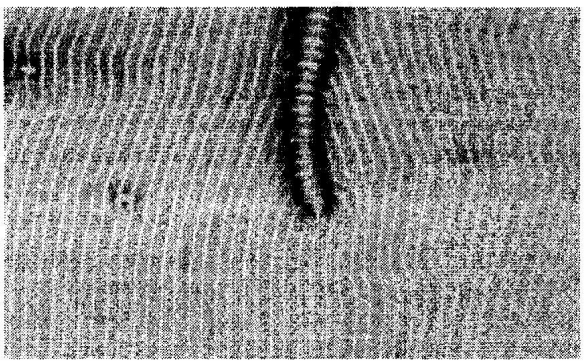
У 60-і роки Капустін у СРСР і Вільямс у США докладно дослідили цей ефект. Якщо прикласти до планарного шару нематика з $\Delta\varepsilon < 0$, (наприклад ПАА чи МББА), постійне чи низькочастотне змінне електричне поле, то вище деякої граничної напруги утвориться текстура, що являє собою систему почергових темних і світлих смуг (мал. 5). Ці смуги одержали назву доменів Капустіна-Вільямса. Вони виникають у напрямку, перпендикулярному вихідній орієнтації директора, і добре видимі в поляризованому світлі, площина поляризації якого збігається з напрямком директора.

При іншій орієнтації площини поляризації світла доменів не видно. Ці факти говорять про те, що в площині, яка збігається з вихідною орієнтацією директора і перпендикулярної опорним поверхням, має місце модуляція показника заломлення світла, пов'язана з модуляцією орієнтації директора, у цій же площині. Ширина доменів Капустіна-Вільямса практично не залежить від зовнішньої напруги і близька до товщини шару нематика.



МАЛ. 5. ДОМЕНИ КАПУСТІНА-ВІЛЬЯМСА В МББА. ЧАСТОТА 1000ГЦ. НАПРУГА 5,8 В

Спостереження за порошинами, введеними в препарат, переконує в тому, що домени не є статичними утвореннями – в них відбувається вихровий рух, характер якого схематично зображено на мал. 6. Молекули нематика до утворення вихорів розташовані по лінії ММ. Плоскополяризоване світло проходить через нижнє скло: початковий хвильовий фронт S плоский. Всередині зразка в областях P_1 і P_2 показник заломлення більший, ніж в області Q. Таким чином, швидкість світла більше в області Q, тому вихідний хвильовий фронт спотворюється, що відповідатиме фокусації променів (нормальних до S') в точках F_1, F_2 і т. д. Швидкість потоку у вихорі має порядок величини десятків мікрометрів у секунду і залежить від напруги. Вона максимальна на краях вихрів, де градієнт швидкості максимально спотворює планарну орієнтацію.



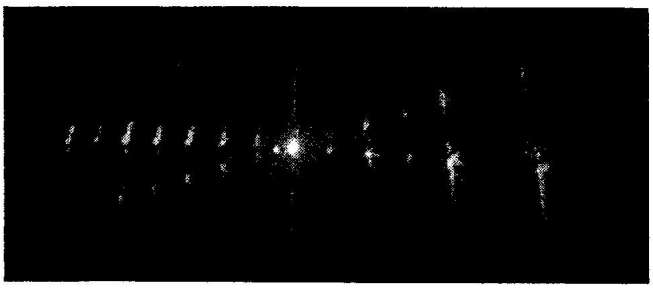
МАЛ. 6. ФОКУСУВАННЯ СВІТЛА СПОТВОРЕНОЮ СТРУКТУРОЮ НЕМАТИКА ТА КАРТИНА ТЕЧІЇ ЙОГО МОЛЕКУЛ

У центрах вихрів показник заломлення для світла, поляризованого вздовж вихідного напрямку директора n_e, мінімальний, а на краях – максимальний. Тому домени фактично є циліндричними лінзами і світло від джерела мікроскопа вони фокусують вище або нижче препарату у світлі лінії. У цьому легко переконатися, сфокусувавши об'єктив мікроскопа спочатку на верхню, а потім на нижню опорні скляні пластинки. При цьому система ліній зміститься на половину періоду. Критична напруга виникнення доменів Капустіна-Вільямса практично не залежить від товщини комірки і має типові значення 5–10 В для комірок товщиною 10–100 мкм. Але вона сильно залежить від частоти. З ростом частоти критична напруга збільшується. Критична частота сильно залежить від провідності зразка. Для досить чистих кристалів МББА критична частота дорівнює 9 Гц. Для кристалів з більшою провідністю вона складає сотні герц і навіть кілогерци. Уже тому ясно, що у виникненні доменів Капустіна-Вільямса визначальну роль відіграють процеси провідності.

На доменах Капустіна-Вільямса, які фактично є дифракційною граткою з постійною порядку довжини хвилі лазерного випромінювання, можна спостерігати характерну дифракційну картину.

На мал. 7 приведено типову дифракційну картину, отриману від лазерного випромінювання на доменній структурі МББА при напрузі 5,8 В. Розподіл інтенсивностей таких дифракційних картин, за виключенням центрального максимума, добре описується функціями Бесселя.

У нематиках з $\Delta\varepsilon < 0$ слідом за доменами у при більших напругах виникає інтенсивна турбулентність, що супроводжується сильним розсіюванням світла – так зване *динамічне розсіювання світла*. Цей електрооптичний ефект знайшов широке застосування в системах відображення інформації.



МАЛ. 7. ДИФРАКЦІЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ДОМЕНАХ КАПУСТІНА - ВІЛЬЯМСА

В оптичному відношенні при переході до турбулентності періодична дифракційна картина замінюється суцільним конусом розсіювання. При цьому інтегральне розсіювання $R = 100 - J$, де J – пропускання у відсотках, значно збільшується.

З різних експериментів були визначені характерні розміри оптичних неоднорідностей, на яких відбувається розсіювання. Вони лежать у межах 0,4 ÷ 10 мкм, в залежності від напруги, прикладеної до комірки. Зі збільшенням напруги розміри неоднорідностей зменшуються. Якщо на зразку нематика, який знаходиться в режимі динамічного розсіювання світла провести розсіювання лазерного випромінювання і спроектувати на екран, то отримаємо картину, зображену на мал. 8. Добре видно, що отримане зображення нічим не відрізняється від розсіювання світла у дистильованій воді, з введеною краплею молока або одеколону. А саме такий дослід ілюструють у багатьох підручниках з фізики як приклад при вивченні розсіювання світла. З малюнка видно, що інтенсивність світла, яке проходить через комірку зменшується із збільшенням напруги на ній. Це відбувається внаслідок того, що із збільшенням напруги, зменшу-