

72. Природне і поляризоване світло. Закон Малюса

Наслідком теорії Максвелла є поперечність світлових хвиль: вектори напруженості електричного \vec{E} і магнітного \vec{H} полів хвилі взаємно перпендикулярні і коливаються перпендикулярно до вектора швидкості \vec{v} поширення хвилі. Тому для повного опису стану поляризації світлового пучка необхідно знати поведінку лише одного з векторів. Звичайно всі міркування ведуться відносно **світлового вектора** – вектора напруженості \vec{E} електричного поля (ця назва зумовлена тим, що при дії світла на речовину основне значення має електрична складова поля хвилі, що діє на електрони в атомах речовини).

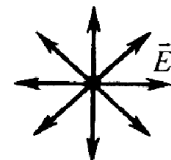


Рис.106

Світло є сумарним електромагнітним випромінюванням множини атомів. Атоми ж випромінюють світлові хвилі незалежно один від одного, тому світлова хвиля, що випромінюється тілом, характеризується різноманітними рівноймовірними коливаннями світлового вектора (рис. 24). В даному випадку рівномірний розподіл векторів \vec{E} пояснюється великою кількістю атомарних випромінювачів, а рівність амплітудних значень векторів \vec{E} – однаковою (в середньому) інтенсивністю випромінювання кожного з атомів.

Світло з усіма можливіми рівноймовірними орієнталями вектора \vec{E} (і, отже, \vec{H}) називається природним.

Світло, в якому напрями коливань вектора якимось чином упорядковані, називається поляризованим.

Якщо внаслідок яких-небудь зовнішніх впливів появляється переважаючий напрямок коливань вектора \vec{E} , то **світло частково поляризоване**.

Площина, в якій відбувається коливання вектора \vec{E} , називається **площиною оляризації**, а перпендикулярна до неї площина – **площиною коливань**.

За міру ступеня поляризації приймають вираз

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

де I_{\max} і I_{\min} – відповідно, максимальна і мінімальна інтенсивність світла, що відповідають двом перпендикулярним компонентам вектора \vec{E} . Для природного світла $I_{\max} = I_{\min}$ і $P = 0$. Для плоскополяризованого – $I_{\min} = 0$ і $P = 1$.

Плоскополяризоване світло можна отримати з природного за допомогою приладів, які називаються **поляризаторами**. Ці прилади вільно пропускають коливання, паралельні до площини поляризації, яка називається **головною площиною**, і повністю або частково затримують коливання, які перпендикулярні цій площині. В ролі поляризаторів можуть бути середовища, які анізотропні відносно коливань вектора \vec{E} , наприклад, кристали. Одним із природних кристалів, які

використовуються як поляризатори, може бути турмалін.

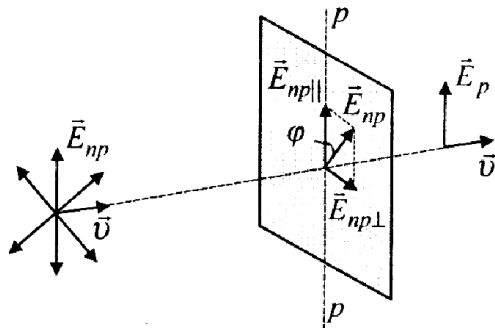


Рис.107

Прилади, за допомогою яких аналізують ступінь поляризації світла, називають **аналізаторами**. Роль аналізаторів виконують прилади, за допомогою яких одержують лінійно поляризоване світло. Будь-який поляризатор може бути аналізатором і навпаки.

Нехай на поляризатор падає природне світло (рис. 25). Виберемо хвилю, вектор напруженості електричного поля якої \vec{E}_{np} коливається у площині,

що утворює з головною площиною поляризатора $p-p$ кут φ .

При вході в поляризатор падаючу хвилю можна зобразити у вигляді двох коливань у взаємно перпендикулярних площинах:

$$E_{np||} = E_{np} \cos \varphi, \quad E_{np\perp} = E_{np} \sin \varphi.$$

Перше коливання пройде через поляризатор, друге – буде затримане. Інтенсивність хвилі, що пройшла, пропорційна до $E_{np}^2 = E_{np}^2 \cos^2 \varphi$, тобто дорівнює

$$I_p = I_{np} \cos^2 \varphi.$$

де I_{np} – інтенсивність коливань з амплітудою E_{np} .

В природному світлі всі значення φ рівномірні. Тому частка світла, що пройшло через поляризатор, буде дорівнювати середньому значенню $\cos^2 \varphi$, тобто $\frac{1}{2} I$

$$I_p = \frac{1}{2} I_{np}.$$

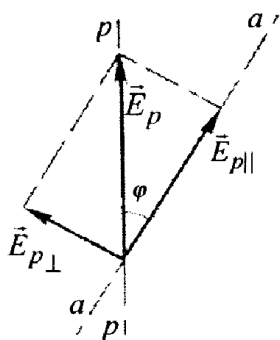


Рис. 108

Під час обертання поляризатора навколо напрямку природного світла Інтенсивність світла, що пройшло, залишається однією і тією самою, змінюється лише орієнтація площини поляризації світла, що вийшло з поляризатора.

Нехай на аналізатор падає лінійно поляризоване світло, отримане за допомогою поляризатора, головна площина якого $p-p$ утворює кут φ з головною площиною аналізатора $a-a$ (рис. 26). При вході в аналізатор лінійно поляризований промінь, амплітуда електричного вектора якого \vec{E}_p , поділиться на два лінійно поляризовані промені, площини поляризації яких взаємно перпендикулярні. Амплітуди вектора напруженості електричного поля цих променів будуть

$$E_{p\perp} = E_p \sin \varphi, \quad E_{p\parallel} = E_p \cos \varphi.$$

Оскільки аналізатор пропускає коливання електричного вектора, що відбуваються в площині $a-a$, а інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди $E_{p\perp}$, то

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi.$$

Якщо аналізатор не абсолютно прозорий, то $I_a = k_a I_p \cos^2 \varphi$.

Отримані співвідношення виражають закон Малюса.

Отже, інтенсивність світла, що пройшла через аналізатор, змінюється від мінімуму (повне погашення світла) при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ до максимуму при $\varphi = 0$.

73. Поляризація світла при відбиванні. Закон Брюстера

Якщо природне світло падає на границю поділу двох діелектриків (наприклад, повітря і скла), то частина його відбивається, а частина заломлюється і поширюється у другому середовищі. Якщо встановити на шляху відбитого і заломлюваного променів аналізатор, видно, що відбитий і заломлений промені частково поляризовані: під час повертання аналізатора навколо променів інтенсивність світла періодично посилюється і ослаблюється (повного гасіння не спостерігається).

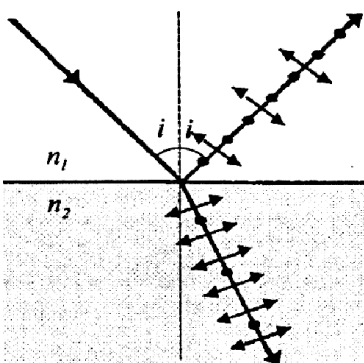


Рис. 109

Подальші дослідження показали, що у відбитому промені переважають коливання, перпендикулярні до площини падіння (\bullet), в заломленому – коливання, паралельні площині падіння (\updownarrow) (рис. 27). Ступінь поляризації – ступінь виділення світлових хвиль з певною орієнтацією електричного вектора – залежить від кута падіння променів і показника заломлення.

Шотландський фізик **Д. Брюстер** встановив закон, згідно з яким **при куті падіння (кут Брюстера), який задовольняє умову**

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21},$$

відбитий промінь є плоскополяризованим. Тут n_{21} – показник заломлення другого середовища відносно першого. Ступінь поляризації заломленого променя при куті падіння i_B досягає найбільшого значення, проте цей промінь залишається поляризованим лише частково.

Якщо світло падає на границю поділу під кутом Брюстера, то відбитий і заломлений промені взаємно перпендикулярні:

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = n_{21} = \frac{\sin i_B}{\cos i_B}.$$

Звідси $\cos i_B = \sin \beta$. Отже, $i_B = \beta = \frac{\pi}{2}$, але $i_B = i$, тому $i' + \beta = \frac{\pi}{2}$.

Відбивання під кутом Брюстера дає змогу отримати лінійно поляризоване світло, однак його Інтенсивність невелика і для скла ($n=1,5$) дорівнює близько 75%, тобто основна його частина поширюється у напрямку заломлення хвилі, яка поляризована не повністю. Для збільшення ступеня поляризації заломлених хвиль їх треба пропустити крізь стопу скляних пластинок. Так, для $i=i_B$ стопа з десяти скляних пластинок дає змогу отримати майже стопроцентну поляризацію заломлених хвиль.

74. Подвійне променезаломлення

Усі прозорі кристали (крім кристалів кубічної системи, які оптично ізотропні) є оптично анізотропні. Їх відносна діелектрична проникність і показник заломлення залежать від напрямку електричного вектора \vec{E} світлової хвилі.

В оптично анізотропних кристалах спостерігається явище *подвійного промене заломлення*, яке полягає в тому, що промінь світла, який падає на поверхню кристала, роздвоюється в ньому на два заломлені промені, що поширюються з різними швидкостями.

Кристали, що мають подвійне променезаломлення, діляться на одновісні і двовісні. В одновісних кристалів для одного із заломлених променів виконується закон заломлення, зокрема заломлений промінь лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю до заломлюючої поверхні. Цей промінь називається **звичайним** (o). Для другого променя, який називається **незвичайним** (e) відношення синусів кута падіння і кута заломлення не залишається постійним при зміні кута падіння. Незвичайний промінь не лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю до кристала поверхні.

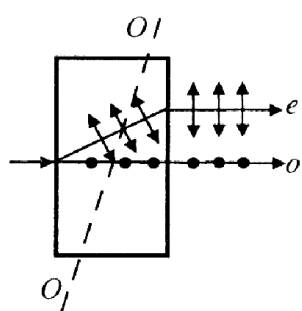


Рис. 110

На рис. 28 показано явище подвійного променезаломлення в одновісному кристалі, коли пучок світла падає на кристал нормально. Один з променів (o) є продовженням падаючого, а інший (e) при проникненні в кристал відхиляється на якийсь кут.

Одновісними кристалами є ісландський шпат, кварц, турмалін, а двовісними – слюда, гіпс. У двовісних кристалів обидва промені незвичайні.

В одновісних кристалах існує єдиний напрямок, вздовж якого подвійне променезаломлення не спостерігається.

Напрямок в кристалі, по якому поширюються звичайні і незвичайні промені не розділяючись і з однаковою швидкістю, називається оптичною віссю кристала.

Оптична вісь – це не пряма лінія, що проходить через якусь точку кристала, а певний напрямок в кристалі. Довільна пряма, паралельна до цього напрямку, є оптичною віссю кристала.

Площина, яка проходить через промінь і оптичну вісь кристала, що перетинає промінь, називається **головною площиною**, або головним перерізом кристала, що відповідає цьому променю. Через кристал можна провести нескінченну множину паралельних оптичних осей і нескінченну множину паралельних головних перерізів. Лінія перетину двох довільних головних перерізів завжди є оптичною віссю. На рис. 28 оптична вісь OO : промінь, що падає на кристал і поширюється в цьому напрямку, не роздвоюється.

Дослідження звичайного і незвичайного променів показує, що обидва промені повністю поляризовані у взаємно перпендикулярних напрямках. Електричний вектор у звичайному промені перпендикулярний до площини головного перерізу (\bullet), а в незвичайному промені лежить у площині головного перерізу (\updownarrow) (рис. 28), тобто площина поляризації звичайного променя перпендикулярна до площини головного перерізу, а незвичайного збігається з площиною головного перерізу.

Після виходу з кристала, якщо не брати до уваги поляризацію у двох взаємно перпендикулярних напрямках (площинах), ці два промені нічим один від одного не відрізняються.

Подвійне променезаломлення пояснюється анізотропією кристалів. У кристалах некубічної системи діелектрична проникність ϵ виявляється залежною від напрямку дій електричного поля \vec{E} . В одновісних кристалах ϵ в напрямку оптичної осі і в напрямку, який перпендикулярний до неї, має різні значення ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} , які називаються повздовжньою і поперечною діелектричними проникностями кристала. В інших напрямках ϵ має проміжне значення. А оскільки $n = \sqrt{\epsilon}$ і $v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$, то з анізотропії ϵ випливає, що світловим хвилям з різними напрямками коливання вектора \vec{E} відповідають різні значення показника заломлення і швидкості світлових хвиль.

Одновісні кристали характеризуються показником заломлення звичайного променя, який дорівнює $n_o = \frac{c}{v_o}$ і показником заломлення незвичайного променя

$$n_e = \frac{c}{v_e}.$$

Значення n_e найбільше відрізняється від n_o для напрямку, який перпендикулярний до оптичної осі.

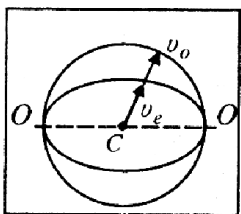


Рис. 111

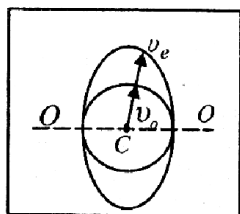


Рис. 112

Залежно від того, яка із швидкостей v_o чи v_e більша, розрізняють додатні і від'ємні одновісні кристали (рис.29, 30).

Якщо $v_o > v_e$ і, відповідно, $n_o > n_e$, то кристал називається оптично додатним і еліпсоїд вписаний у сферу (рис. 29). Для від'ємного кристала $v_o < v_e$

і $v_o < v_e$. У такому разі еліпсоїд описаний навколо сфери (рис.30).

Явище подвійного променезаломлення лежить в основі роботи поляризаційних пристроїв, які служать для отримання поляризованого світла. Найчастіше для цього застосовуються **призми і поляроїди**.

Призми ділять на два класи:

- 1) призми, що дають лише плоскополяризований промінь (поляризаційні призми);
- 2) призми, що дають два поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах промені (двозаломні призми).

Типовий представник поляризаційних призм – **призма Ніколя** (ніколь) – подвійна призма з ісландського шпату, які склеєні вздовж лінії AB канадським бальзамом з $n = 1,55$ (рис. 31).

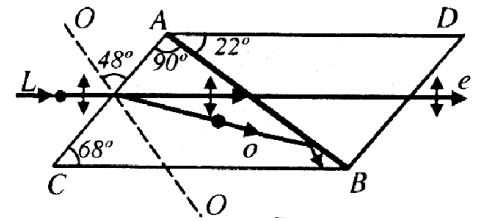


Рис. 113

Оптична вісь OO спрямована під кутом 48° до входної грані AC . Природний промінь L при падінні на грань AC внаслідок подвійного заломлення поділяється на звичайний o і незвичайний промінь e . При певному виборі кутів призми звичайний промінь падає на шар бальзаму під кутом 76° , який більший за граничний, зазнає повного внутрішнього відбивання, падає на зачорнену грань CB і нею поглинається. Незвичайний промінь виходить з призми паралельно до грані CB . Площина його поляризації збігається з площиною головного перерізу.

Прикладом двозаломної призми є **призма Волластона**, яка складається з двох прямокутних призм із ісландського шпату (рис. 32). У призмі ABC оптична вісь паралельна до катета AB , а в призмі ACD – ребра C , яке перпендикулярне до площини рисунка. Природне світло падає нормально на грань AB ; обидва промені, звичайний і незвичайний, що виникають в призмі ABC , ідуть по одному напрямку, відповідно з швидкостями v_o і v_e . У другій призмі

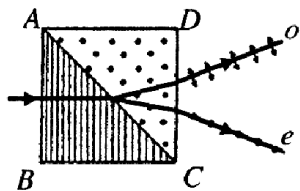


Рис. 114

вони також поширюються в напрямку, який перпендикулярний до оптичної осі, але, оскільки оптичні осі в обох призмах взаємно перпендикулярні, то звичайний промінь у першій призмі перетворюється у незвичайний в другій і навпаки. Тому звичайний промінь в першій призмі заломиться на межі обох призм з відносним показником заломлення n_e/n_o , а промінь незвичайний – з n_o/n_e . Для ісландського шпату $n_o > n_e$ і тому $n_e/n_o < 1$, а $n_o/n_e > 1$.

Перший промінь заломиться в бік ребра C призми ACO , а другий – в бік її основи AO . Цим досягається значне розходження променів. Обидва промені плоско поляризовані.

75. Штучна оптична анізотропія

Подвійне променезаломлення спостерігається в природних анізотропних середовищах. Існують різні способи отримання штучної оптичної анізотропії, тобто надання оптичної анізотропії природно-ізотропним речовинам.

Оптичне ізотропні речовини стають оптично анізотропними під дією:

- 1) **одностороннього тиску або розтягу** (кристали кубічної системи, скла та ін.) (Зеебек, Брюстер);

2) **електричного поля** (рідини, аморфні тіла, гази) (Керр);

3) **магнітного поля** (рідини, скло, колоїди) (Коттон, Мутон).

У згаданих випадках речовина набуває властивості одновісного кристала, оптична вісь якого збігається з напрямком, відповідно, деформації, електричного чи магнітного полів.

Мірою оптичної анізотропії, яка виникає, служить різниця показників заломлення звичайного і незвичайного променів в напрямку, перпендикулярному до оптичної осі.

1. Оптичну анізотропію, яка виникає під впливом деформації, можна виявити, якщо помістити досліджуване тіло A між поляризатором p і аналізатором a , які схрещені (рис. 33). Доки тіло не деформоване, така

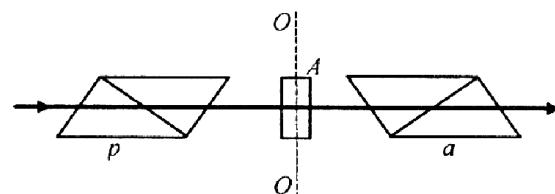


Рис. 115

система світла не пропускає. При односторонньому стиску або розтязі тіла вздовж напрямку OO в ньому виникає оптична анізотропія, яка еквівалентна анізотропії одновісного кристала з оптичною віссю OO . Звичайний і незвичайний промені будуть поширюватися в напрямку, який перпендикулярний до OO , із різними швидкостями v_o і v_e . Якщо головний переріз поляризатора не паралельний і не перпендикулярний до OO , то світло, яке пройшло через деформоване тіло, стане еліптично поляризованим і його не можна погасити аналізатором.

Різниця коефіцієнтів заломлення $n_o - n_e = \frac{v_o}{c} - \frac{v_e}{c}$ може служити мірою анізотропії, що виникла. Досвід показує, що різниця $n_o - n_e$ пропорційна напрузі σ в даній точці тіла:

$$n_o - n_e = k_1 \sigma,$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від властивостей речовини. Різниця фаз, яку матимуть звичайний і незвичайний промені, пройшовши тіло завтовшки l , дорівнює

$$\delta = \frac{2\pi \cdot l}{\lambda_0} (n_o - n_e) = 2\pi C \sigma l,$$

де λ_0 – довжина хвилі світла у вакуумі, а $C = \frac{k_1}{\lambda}$ – новий коефіцієнт. Залежно від роду речовини коефіцієнт C може бути позитивним або негативним.

Явище штучної оптичної анізотропії при деформаціях використовують для виявлення внутрішніх залишкових напруг, які можуть виникати у виробках зі скла та інших прозорих ізотропних матеріалів внаслідок порушення технології їх виготовлення. Оптичний метод вивчення на прозорих моделях розподілу внутрішніх напруг у різних напружених частинах машин і споруд широко застосовують у сучасній техніці. Для цього використовують моделі, виготовлені з целулоїду або іншої ізотропної речовини.

Оскільки величина оптичної анізотропії пропорційна напрузі σ , то за виглядом смуг однакового кольору (ізохром), що виникають при спостереженні моделі між схрещеними ніколями, можна зробити висновок про величину напруг.

2. У 1875 р. Д. Керр виявив, що рідкий або твердий ізотропний діелектрик, вміщений у дуже сильне однорідне електричне поле, стає оптично анізотропним. Це явище називають **ефектом Керра**. Принципову схему спостереження цього явища в рідинах зображено на рис. 34, де p і a – поляризатор і схрещений з ним аналізатор. Між ними розміщена кювета з конденсатором (“комірка Керра”), між пластинами якого знаходиться досліджувана рідина. За відсутності електричного поля світло через систему не проходить.

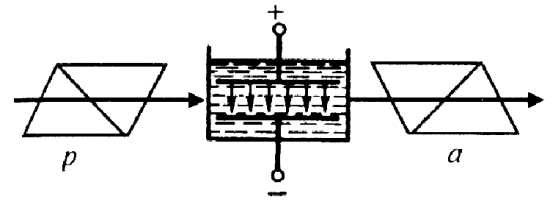


Рис. 116

Досліди показали, що під дією однорідного електричного поля в плоскому конденсаторі рідина набуває властивостей одновісного двозаломлюючого кристала, оптична вісь якого збігається з напрямком вектора \vec{E} напруженості поля конденсатора. Різниця показників заломлення рідини для звичайного і незвичайного променів монохроматичного світла в напрямку⁷, який перпендикулярний до вектора \vec{E} , пропорційна E^2 :

$$n_o - n_e = k_2 E^2.$$

де k_2 – коефіцієнт пропорційності.

Якщо довжина шляху променів між обкладками конденсатора l , то різниця фаз між звичайним і незвичайним променями дорівнює

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e) l = \frac{2\pi}{\lambda_0} l k_2 E^2.$$

де $B = \frac{k_2}{\lambda_0}$ – стала Керра, яка залежить від природи речовини, довжини хвилі λ_0 ,

температури і швидко зменшується з її збільшенням. Часто користуються іншою константою Керра K , яка пов'язана з B співвідношенням:

$$K = \frac{B\lambda}{n},$$

де n – абсолютний показник заломлення речовини за відсутності електричного поля.

У 1930 р. було виявлено існування ефекту Керра і в газах. Трудність спостереження цього явища пов'язана з тим, що значення B для газів на кілька порядків менше ніж для рідин.

Для більшості речовин $B > 0$, тобто ці речовини за своїми оптичними властивостями в однорідному електричному полі подібні до оптичне позитивних одновісних кристалів. Є речовини, для яких $B < 0$.

Ефект Керра пояснюється різною поляризацією молекул за різними напрямками. За відсутності поля молекули орієнтовані довільно, тому рідина загалом не виявляє анізотропії. Під дією поля молекули повертаються так, щоб в напрямі поля були орієнтовані або їх дипольні електричні моменти (у полярних молекул), або напрям найбільшої поляризації (у неполярних молекул). В результаті речовина стає оптично анізотропною.

Ефект Керра практично безінерційний, тобто перехід речовини з ізотропного стану в анізотропний (і назад) при вмиканні поля становить $\sim 10^{-10} \text{ с}$. Тому цей ефект може бути ідеальним світловим затвором і застосовується в швидкоплинних процесах (звукозапис, відтворення звуку, швидкісне фото- і кінознімання), в оптичній локації.

3. Штучну анізотропію можна створити теж дією магнітного поля, яка може спостерігатися в речовинах, молекули яких анізотропні, тобто в парамагнетиках. За відсутності зовнішнього магнітного поля молекули розміщуються хаотично, результатом чого є статистична анізотропія. Якщо таку речовину помістити в досить сильні магнітні поля, то відбудеться напрямлена орієнтація власних магнітних моментів молекул. Це зумовлює анізотропію речовини, що приводить до подвійного заломлення променів. Таке середовище поводить себе як одновісний кристал, оптична вісь якого паралельна вектору індукції поля B . Це явище називається **явищем Коттона-Мутона**. Різниця показників заломлення середовища при цьому

$$n_o - n_e = k_3 B^2,$$

де k_3 – коефіцієнт пропорційності, а різниця фаз між звичайним і незвичайним променями становитиме

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_o} (n_o - n_e) l = \frac{2\pi}{\lambda_o} k_3 l B^2 = 2\pi D B^2 l,$$

де D – стала, яка залежить від природи речовини, довжини хвилі світла λ_o і температури.