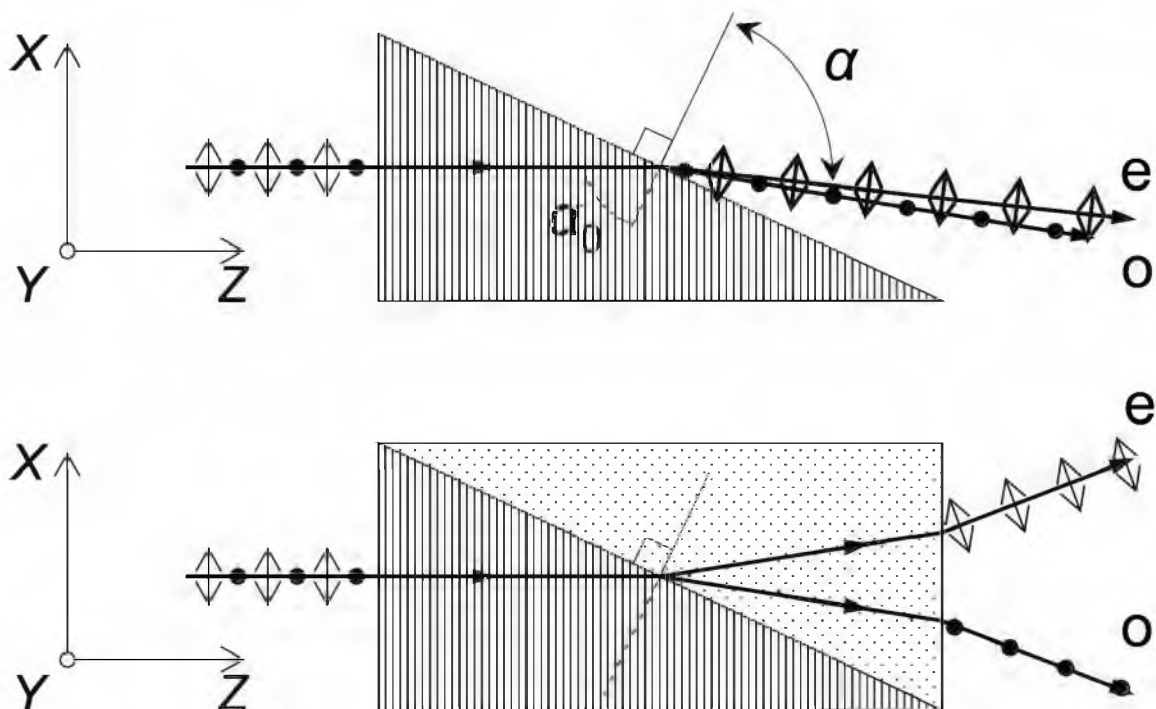


А.К.Дорош, Р.М.Мельник

ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

Зміна поляризації світла зумовлена анізотропією швидкості світла у оптичному середовищі, подвійне променезаломлення



1.2 Подвійне променезаломлення

Предмети у полі зору світла, що пройшло через кристал ісландського шпату (різновид кальциту) можуть розкладатися на два зображення, Рис. 1.7. Це зумовлено *подвійним заломленням* променів світла в кристалі. Слово "подвійне" означає два відмінні показники заломлення для хвиль світла на межі кристалу. Подвійний означає не два заломлення однієї хвилі, а два типи хвиль з різним показником в матеріалі кристалу. Кристал "виокремлює" два типи світлових хвиль з одного світлового потоку.

Кожному кристалу властива певна анізотропія — не однакові властивості у різних напрямках всередині кристалу. *Анізотропія* — не однаковий напрям, не однаковий в просторі; слово "анізотропія" походить від грец. *ἀνισος* — нерівний, неоднаковий та грец. *τροπή* — напрям. Світло у ісландському шпаті має різну швидкість поширення вздовж осі названої *оптичною віссю кристала* відносно всіх інших напрямків. Як оптична анізотропія кристалу проявляється в різному ході променів розглянемо на прикладах.

Розділення природного світла на звичайну і незвичайну хвилі у трикутній призмі одновісного кристала

Кожну хвилю природно поляризованого світла можна розглядати як дві лінійно поляризовані хвилі: з коливаннями амплітуди вздовж осі Ox , що співпадають з віссю кристала, схематичні стрілки амплітуди коливань Рис. 1.8; інша компонента має коливання у напрямку Oy , жирні точки на Рис. 1.8, це напрямок поперек осі кристала.

Хвилю з коливаннями перпендикулярними до осі кристала (вздовж осі Oy) називають *звичайною хвилею*, позначають звичайну хвилю індексом "о", скорочено від слова "ordinary". Така хвиля в кристалі має швидкість рівну швидкості хвилі вздовж осі кристала $v_o = c/n_o$, c — швидкість світла у вакуумі, n_o — показник заломлення звичайної хвилі. Будь-яка лінійно поля-



Рис. 1.7. Подвійне заломлення світла в кристалі кальциту.

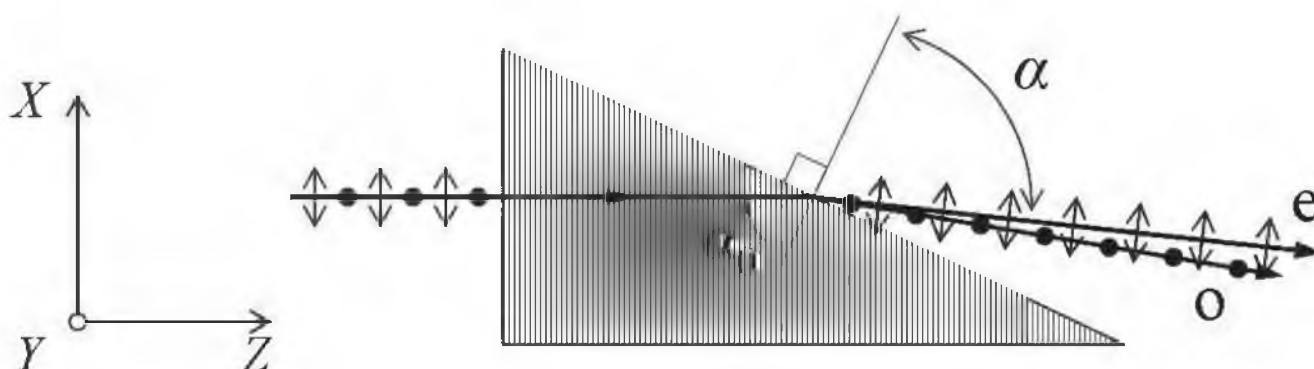


Рис. 1.8. Хід променів хвилі в трикутній призмі анізотропного матеріалу (кристалу). Оптична вісь матеріалу призми знаходиться в площині рисунка вздовж осі Ox , схематично вісь кристала зображена штрихуванням призми в площині рисунка. Точка O знаходиться на перетині осей Ox , Oy , Oz , координатна вісь Oy перпендикулярна площині рисунка. Світловий пучок з напрямком руху вздовж Oz падає нормально на передню грань призми. Світло природно поляризоване, має хвилі довільної поляризації. Кожну хвилю можна розділити на хвилю з коливаннями вздовж осі Ox , співпадає з віссю кристала, і хвилі з коливаннями у напрямку Oy . В кристалі ці дві хвилі мають однаковий напрямок поширення, але не однакову швидкість руху. Тому на задній грані показник заломлення для них різний, різні кути відхилення променів. Хвилю з коливаннями вздовж осі кристалу позначають індексом "o", з коливаннями поперек осі кристалу — індексом "e".

ризована хвиля, що рухається в напрямку Ox осі кристала, незалежно від напрямку поперечних коливань до осі, буде мати однакову швидкість v_o . Хвилі з поширенням в напрямку Oz і коливаннями (лінійною поляризацією) вздовж напрямку Oy також будуть мати швидкість v_o .

Інакше з хвилями, що рухаються в напрямку Oz і мають коливання вздовж осі Ox . Вони мають іншу швидкість поширення $v_e = c/n_e$, $v_e \neq v_o$, інший показник заломлення $n_e \neq n_o$. Позначають індексом "e" скорочено від слова "extraordinary". Таку хвилю називають *незвичайною*.

На задній грані призми відбувається заломлення по закону Снела $n_e \sin(\alpha_e) = n_o \sin(\alpha_o) = \sin(\alpha_0)$, значення заломлених кутів $\alpha_e \neq \alpha_o$ різні. Показник заломлення повітря $n_0 = 1$.

Якщо у кристалі швидкість звичайної хвилі більша за швидкість незвичайної $v_o > v_e$, то кристал називають *додатним*, у протилежному випадку $v_e > v_o$ — *від'ємним*.

Поляризація світла на призмі Волластона

Розходження звичайного і незвичайного промені у більшості кристалів невелике. Суттєве розведення поляризованих пучків дає склейка призм. На Рис. 1.9, 1.10 зображена прямокутна призма, яка є склейкою двох кристалів трикутних призм взаємно-перпендикулярних напрямків кристалічних осей. Нижня призма має напрямок осі кристала вздовж осі Ox , схематично зображена точками; нижня призма, вісь вздовж осі Oy , має вертикальне штрихування на рисунку.

Хвиля, яка у першій призмі була звичайною, у другій призмі стає незвичайною. Така хвиля у нижній призмі має коливання поперек осі кристала, у верхню призмі — вздовж осі кристала. І навпаки, хвиля незвичайна в нижній призмі стає звичайною у верхній. Ця хвиля мала коливання вздовж осі кристала нижньої призми і поперечні коливання осі кристала верхньої призми.

На границі призм показник заломлення для однієї хвилі зменшиться, для іншої — збільшиться, хвилі розійдуться в різні сторони. Додатково розходження посилиться на задній грані

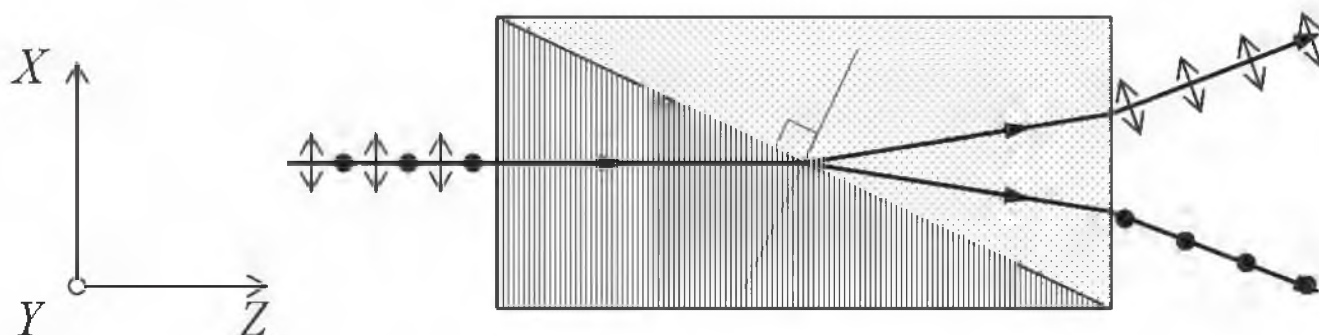


Рис. 1.9. Хід променя хвилі в призмі Волластона.

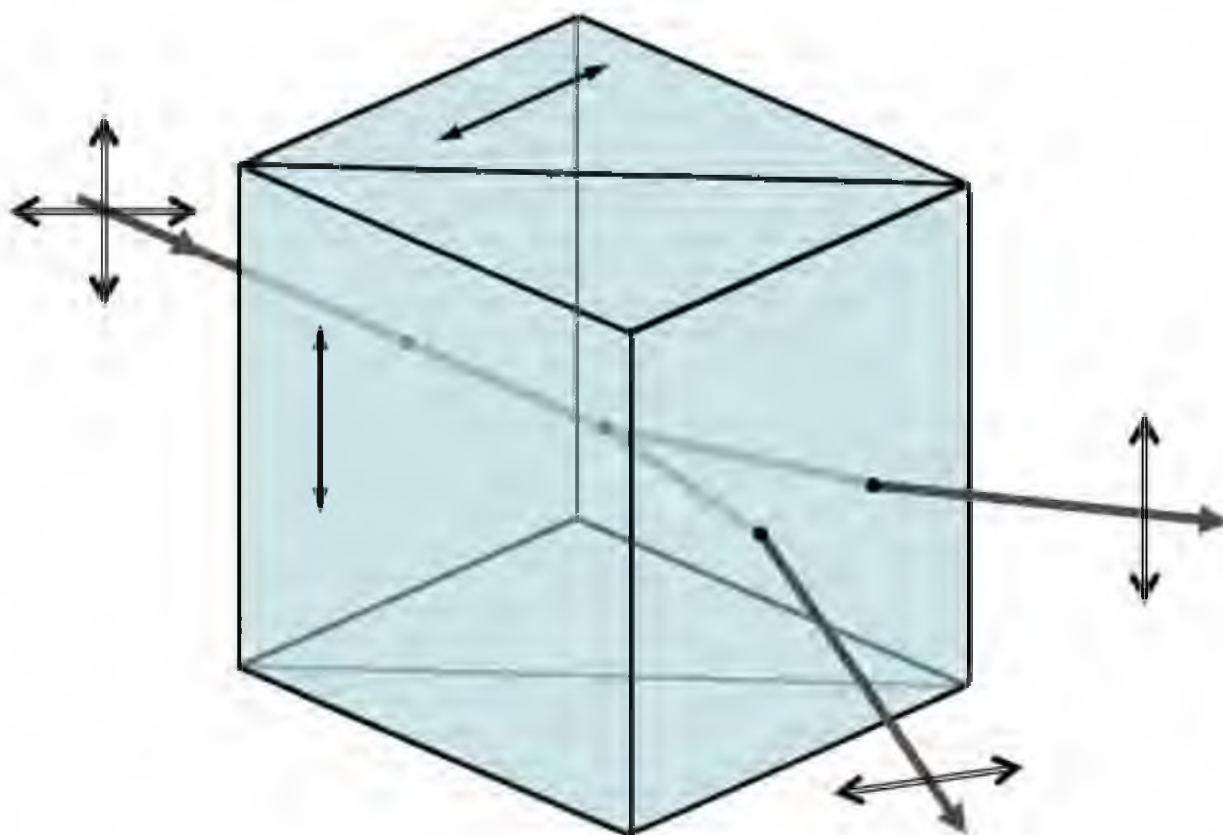


Рис. 1.10. Просторове зображення ходу хвилі в призмі Волластона. Подвійні стрілки на призмі — напрямки кристалічних осей; подвійні стрілки на променях — напрямки поляризації світлових хвиль.

призми. Отримуються два пучки лінійно поляризованого світла. Виготовляють призми в залежності від потреб з однакового матеріалу чи різних кристалів. Досягають розведення лінійно поляризованих пучків в одиниці і десятки градусів.

Поляризація світла на одновісних кристалах при довільному напрямку кристалічної осі

У випадку нормального падіння світла на кристал ісландського шпату з віссю кристала розташованою під довільним не прямим кутом, спостерігається подвійне променезаломлення на передній грані призми, Рис. 1.11.

Відхилення незвичайного променя здебільшого мале. Потрібен зразок достатньої товщини і вузький пучок випромінювання для помітного візуального спостереження розділення пучків світла.

Кристали використовують для створення поляризаційних матеріалів, засобів зміни поляризації світла. І навпаки, різна поведінка звичайної і незвичайної хвиль дозволяють використати поляризацію світла для вивчення кристалів, їх анізотропних властивостей, дослідження матеріалів.

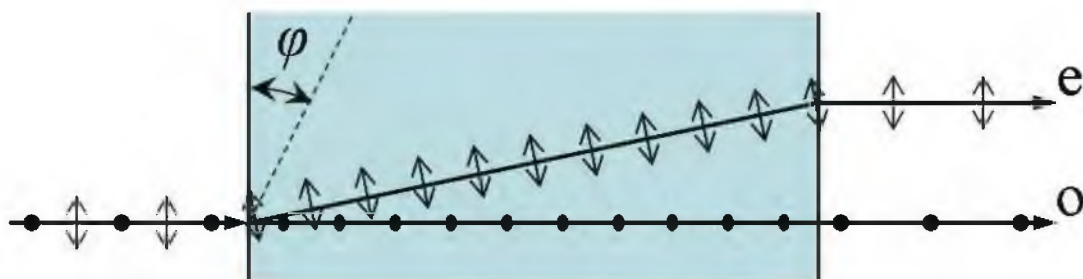


Рис. 1.11. Нормальне падіння хвилі на кристал з оптичною віссю, пунктирна лінія, не співпадаючим з передньою гранню призми $\varphi \neq 0$. Жирні точки падаючої хвилі позначають компоненту з горизонтальними коливаннями перпендикулярними площині рисунка, подвійними стрілками — вертикальні коливання в площині рисунка. Навіть при нормальному падінні світла на призму незвичайна "e"-компонента відхиляється від нормалі.

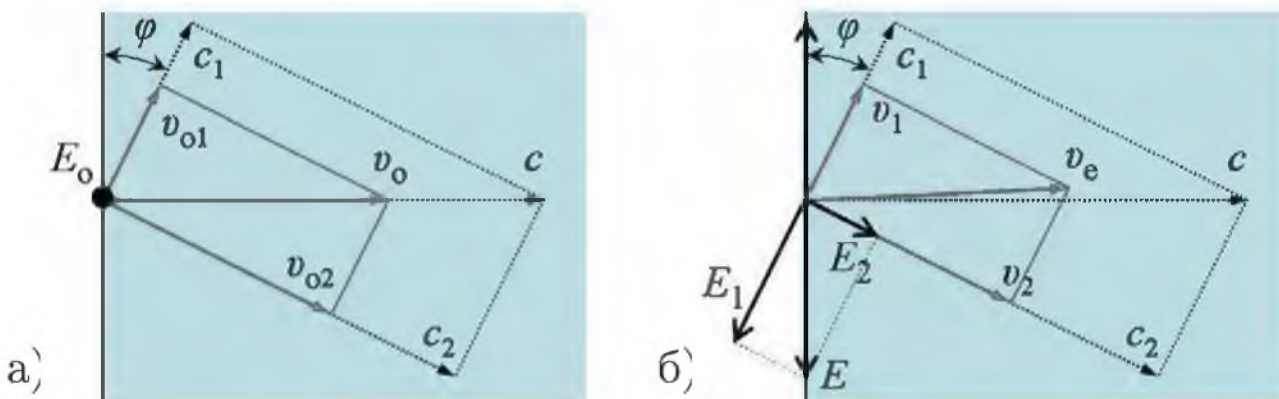


Рис. 1.12. Пояснення розходження променів звичайної і незвичайної хвиль на передній грані кристала.

а) Падіння "o"-компоненти хвилі з поляризацією перпендикулярною оптичній осі кристала. Швидкість хвилі до падіння на кристал c . Незалежно від кута φ між гранню і віссю кристала, коливання звичайної хвилі перпендикулярні осі, як і при русі вздовж осі. Якщо швидкість c розкласти на дві складові $c_1 = c \sin\varphi$ і $c_2 = c \cos\varphi$, то $v_{o1} = c_1/n_o$ і $v_{o2} = c_2/n_o$. У кристалі швидкість хвилі зменшується в n_o , $v_o = c/n_o$, без зміни напрямку руху.

б) Падіння "e"-компоненти з поляризацією вздовж грані і під кутом φ до осі кристала. Хвиля амплітуди E має дві компоненти E_1 з коливаннями вздовж і E_2 поперек осі. Відповідно компоненти швидкості $v_1 = c_1/n_o$, $v_2 = c_2/n_e \neq c_2/n_o$ не пропорційні між собою $v_1/v_2 \neq c_1/c_2$, напрямок швидкості незвичайної хвилі відхилиться від нормалі.

1.2.1 *Дослід*: Розділення світлового пучка на два лінійно поляризовані пучки кристалічною призмою

На протилежних краях лави встановлюють лазерний модуль і екран. Модуль має на кінці насадку з кристалічною призмою. Насадка фіксується непорушно на корпусі модуля гвинтом.

1. Включають живлення лазера. На екрані будуть дві світні плями звичайного і незвичайного променя.
2. Відпускають гвинт насадки з призмою. При поворотах насадки спостерігають обертання світних пучків навколо спільної осі повороту. Фіксують положення призми.
3. Між призмою і екраном встановлюють поляроїд. Повертають оправу з призмою, спостерігають чергування освітленості світних плям звичайного і незвичайного пучків поворотами поляризатора на 360° .
4. Здійснюють поворот поляроїда до зникнення одного світлового пучка і максимальної яскравості другого. Нотують положення лімба поляроїда α_1 . Повертають поляроїд вліво чи вправо, знов встановлюють зникнення першого пучка світла, нотують значення α_1 . Повторюють визначення положення α_1 декілька разів. Знаходять $\langle \alpha_1 \rangle \pm \Delta \alpha_1$ і випадкову похибку.
5. Здійснюють поворот поляроїда до зміни світності пучків на протилежну, перша пляма світла з'явиться і буде у максимумі освітленості, друга щезне. Записують показання положення поляроїда α_2 . Аналогічно повторюють вимірювання із знаходженням $\langle \alpha_2 \rangle \pm \Delta \alpha_2$.
6. Знаходять всі положення зникнення одного чи другого пучка $\langle \alpha_i \rangle \pm \Delta \alpha_i$, кути між сусідніми положеннями $\alpha_{i+1} - \alpha_i$.
7. Записують висновки по поляризації світла, взаємні площини поляризації звичайної і незвичайної світлових хвиль.

1.2.2 Дослід: просвітлення поляризаційної установки лінійним поляризатором

Типовим є використання поляризаторів, поляроїдів у оптичному поляризаційному обладнанні. Принципова схема наведена на Рис. 1.13: джерело світла S , лінійний поляризатор P_1 , досліджуваний зразок M , лінійний поляризатор-аналізатор P_2 , фотоприймач D . Встановлюють зразок M між поляризаторами. Центровані на спільній оптичній осі джерело світла, два поляризатори, досліджуваний зразок, фотоприймач. Найчастіше поляризатори P_1 і P_2 однакові і лінійні. У спеціальних установках використовують інколи інші типи поляризаторів з частковою чи специфічною поляризацією.

У роботі будуть використовуватися поляроїди P_1 і P_2 . Досліджуваним зразком M буде також поляроїд. Поляризатор P_1 пропускає лінійно поляризоване світло деякої амплітуди E_1 . Поляроїд M вносить зміни у поляризацію світла, міняє площину поляризації, пропускає у своїй площині поляризації $E_M = E_1 \sin \beta$ зумовлену кутом β між поляроїдами P_1 і M . Аналізатор "вирізає" проекцію $E_2 = E_M \cos \beta$. Відбувається просвітлення установки, Рис. 1.13, б. Інтенсивність світла за елементом P_2 , на фотоприймачі, пропорційна $I = \text{const} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta = \text{const} \cdot \sin(2\beta)$, фотострум

$$i(\beta) = \text{const} \cdot \sin^2(2\beta). \quad (1.4)$$

Кут β між площинами поляризації лінійного елемента M та одного з поляризаторів P_1 або P_2 .

1. За відсутності зразка M , виставляють перпендикулярну орієнтацію поляризаційних площин елементів P_1 і P_2 так, що світло не проходить. Виставляються перпендикулярно площини поляризатора P_1 і аналізатора P_2 — мінімум показань фотоструму.
2. Встановлюють зразок M між поляризаторами з максимальними показаннями фотоструму, встановлюють відповідну шкалу показань фотоприймача, щоб не виникало перегрузки.

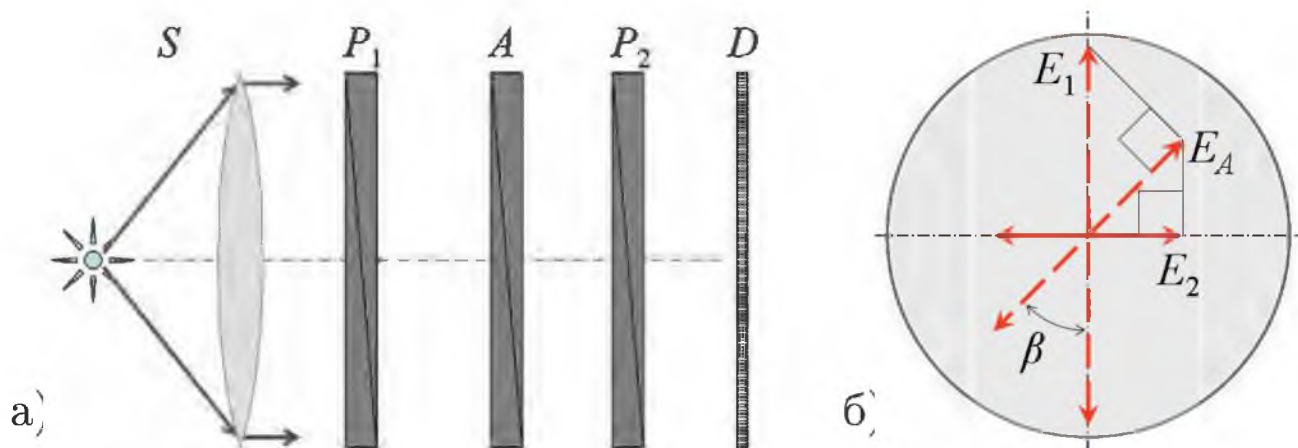


Рис. 1.13.

а) Поляризаційна установка. Між джерелом світла S і фотореєстратором D знаходяться поляризатор P_1 , об'єкт дослідження поляризаційних властивостей M , аналізатор P_2 з площиною поляризації перпендикулярною площині поляризатора P_1 . Без анізотропного об'єкта M , світло б не поступало на фотоприймач відповідно закону Малюса для нормально схрещених поляризаторів.

б) Зміна амплітуди і напрямку лінійно поляризованого світла у випадку лінійної поляризації світла елементом M при куті β між площинами поляризації елементів M , P_1 , P_2 . Поляроїд P_1 пропускає лінійно поляризоване світло амплітуди E_1 . Проекція на площину поляризації елемента M становить $E_M = E_1 \sin \beta$. Проекція E_M на площину поляризації P_2 — $E_2 = E_M \cos \beta = E_1 \sin \beta \cos \beta = E_1/2 \sin(2\beta)$. Проходить світло інтенсивності $I = \text{const} \cdot I_0 \sin^2 2\beta$. Оптично активний елемент M , вносить зміни в поляризацію світла, зумовлює просвітлення установки. Інтенсивність просвітлення залежить від кута β .

3. Встановлюється співпадання поляризаційної площини M з одним із елементів P_1 або P_2 поворотом елемента M навколо оптичної осі до мінімуму показань фотоструму $i = i_{\min}$. Нотують положення B_0 по лімбу елемента M . Заносять значення в Табл. 1.4.
4. Повертають елемент M навколо оптичної осі на кут $\beta = B - B_0$ від 0 до 90° з кроком 5° , кожен раз вимірюють фотострум i , заносять значення в Табл. 1.4.
5. Переводять значення кута β у радіани. Обчислюються

дані параметра x залежності інтенсивності від кута β , Табл. 1.4. Серед отриманих даних фотоструму знаходять мінімальне і максимальне значення фотоструму i_{min} та i_{max} , обчислюють відносні значення інтенсивності світла $y = \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}$, Табл. 1.4.

Табл. 1.4.

$B, ^\circ$	$\beta, \text{рад}$	$i, \text{мкА}$	$x = \sin^2(2\beta)$	$y = \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}$
0				
5				
...				
90				

Табл. 1.5.

$\beta, \text{рад}$	$\xi_1 = x \cos \beta$	$\eta_1 = x \sin \beta$	$\xi_2 = y \cos \beta$	$\eta_2 = y \sin \beta$

6. Проводять обчислення параметрів Табл. 1.5, будують на одній координатній площині суцільною лінією залежність $\eta_1(\xi_1)$ і точковий графік $\eta_2(\xi_2)$. Роблять висновки про теоретичні і експериментальні показники пропускання світла від положення β лінійного поляризатора у поляризаційній установці.

1.2.3 Дослід: подвійне променезаломлення у матеріалах штучно наведеної анізотропії

Кожна плівка при виготовленні має анізотропію напрямку макромолекул вздовж напрямку витягування плівки. Виникає не однакова оптична густина вздовж витягування плівки і в поперечному напрямках. У плівках, прозорих тілах під зовнішньою силовою навантажкою виникає певна анізотропія матеріалу з подвійним променезаломленням світла однотипним явищу в кристалах.

Наведена анізотропія матеріалу спостерігається практично у всіх плівкових матеріалах: прозорий файл для друкованих ма-

теріалів, плівка з обгортки зошита чи книги, пакувальні плівки сувенірів, цигарок, посуду тощо. Всі ці матеріали виготовляються витягуванням або прокаткою з орієнтованим розташуванням макромолекул, тому впливають на поляризацію світла, що проходить через цей матеріал.

На оптичній лаві поляризаційна установка: джерело світла під'єднане до джерела напруги ИП-1, поляризатор, аналізатор, екран. Площина поляризації поляризатора взаємноперпендикулярна площині поляризації аналізатору, не проходить світло через схрещені поляроїди.

1. Між поляризатором та аналізатором встановлюють довільну прозору плівку поперек світлового пучка, паралельну площинам поляроїдів. Це може бути файл опису роботи, плівка, якою накривають прилади в лабораторії чи довільна плівка з набору поряд з установкою.
2. Спостерігають зміни освітленості екрана при поворотах у площині плівки навколо оптичної осі, максимальні просвітлення установки чи відсутність просвітлення при співпаданні осі анізотропії матеріалу плівки з площиною одного з поляроїдів. Оцінюють кути між положеннями плівки максимальної просвітленості і кути між положеннями відсутності просвітлювання. Нотують висновки про поляризаційні властивості плівки.

1.2.4 Застосування подвійного променезаломлення

Виготовленням призм різної конструкції, їх склейки, добиваються ефективного розділення світла різних поляризацій, зміни типу поляризації. По зміні інтенсивності світла чи його забарвленню аналізують оптичні, фізичні, мінералогічні, матеріаловмісні властивості матеріалів. По нівеляції поляризаційного ефекту різного типу поляризаційними компенсаторами можна визначати поляризаційні характеристики матеріалу.

Поляризація електромагнітних хвиль і, зокрема, світла, широко використовується в сучасних технологіях. У багатьох на-

прямок біологічних, хімічних досліджень, у петрології вивчення магматичних і метаморфічних зразків породи на їх мінералогічний склад і походження використовуються поляризаційні мікроскопи. Застосування поляризації і поляризаційних установок частково показано на Рис. 1.14-1.16.

Рідкокристалічні (РК) дисплеї в свій час повністю витіснили електронно-променеві трубки в техніці і в побутових приладах. Піксель РК-дисплею складається з шарів різних поляризаційних властивостей. Перший шар пропускає лінійно поляризоване світло. Наступний рідкокристалічний шар може змінювати площину поляризації світла під дією прикладеної зовнішньої електричної напруги або перетворювати світло у циркулярно поляризоване. Ще один шар лінійної поляризації поперечної до першого шару. Без напруги така структура одного пікселя рідкокристалічної матриці прозора для світла. Прикладання невеликого електричного поля до комірки-пікселя з рідким кристалом призводить до того, що кут обертання поляризації збивається, і світло вже не проходить крізь поляризаційні фільтри крайніх шарів лінійної поляризації. В такому випадку піксель темніє. Прикладанням напруги регулюють коефіцієнт пропускання світла пікселем. Регулюванням потенціалів на матриці пікселів формують відповідне зображення РК дисплею.

Один із способів стереоскопічного кіно створюється поляризаційним ефектом об'ємності зображення. Об'ємність зору людини зумовлена бінокулярністю — наші два ока бачать дещо різні зображення. На екран проєктуються ці два зображення з різною поляризацією. Глядач дивиться на екран через окуляри, у яких одне скельце пропускає вертикального напрямку поляризації світло, а інше — горизонтально поляризоване. В результаті глядач бачить стерео-зображення. Різниця в зображенні, сприйнятому очима дозволяє нашому мозку відтворити об'ємний ефект.

Поляризаційні фільтри застосовують для гасіння дзеркально відбитих відблисків, наприклад при фотографуванні картин, скляних і фарфорових виробів, поверхні води. Якщо помістити

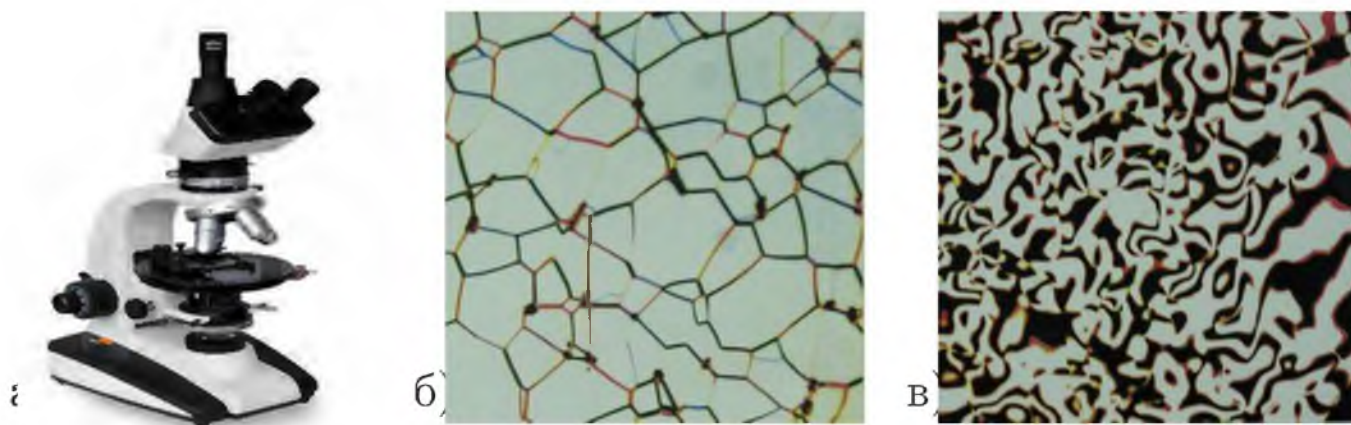


Рис. 1.14.

а) Мікроскоп серії ХР, використовується у лабораторії для спостереження об'єктів у видимому світла. Серед них спостереження фазових переходів рідких кристалів при стабілізації температури зразків на термостоліку. Використовуються поляризаційні насадками на джерелі світла і перед об'єктивом фотокамери чи перед окуляром візуального спостереження.

б)-в) Рідкі кристали "холестерика" і "нематика" між схрещеними поляризаторами у мікроскопі із кратністю збільшення $\times 200$ при температурі $\approx 20^\circ\text{C}$ (світлини отримані у навчальній оптичній лабораторії фізики). Рідкі кристали в деякому інтервалі температур мають властивості рідини (текучість), одночасно мають певну впорядкованість молекул дископодібної, тороподібної чи інших форми. Різні типи рідких кристалів виявляють дихроїчні, двопроменезаломні властивості, поворот площини поляризації світлової хвилі. Широкий клас задач дослідження рідкокристалічних комплексів ставляться на поляризаційних установках.

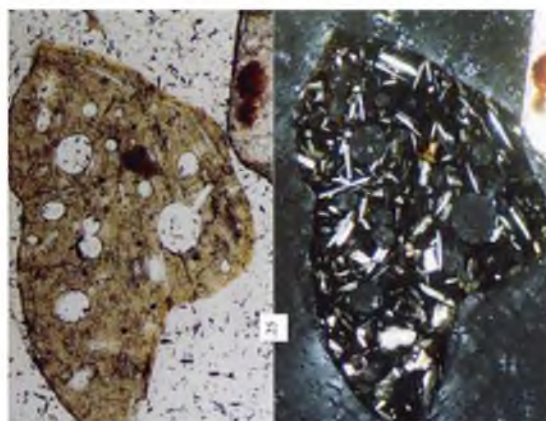


Рис. 1.15. Вигляд фрагмента вулканічної породи (зображення з рекламного сайту) у лінійно поляризованому світлі (фрагмент зліва) без аналізатора і через аналізатор (фрагмент справа). Малопомітні у звичайному світла кристали набули візуалізації, фонова частина стала затемненою.

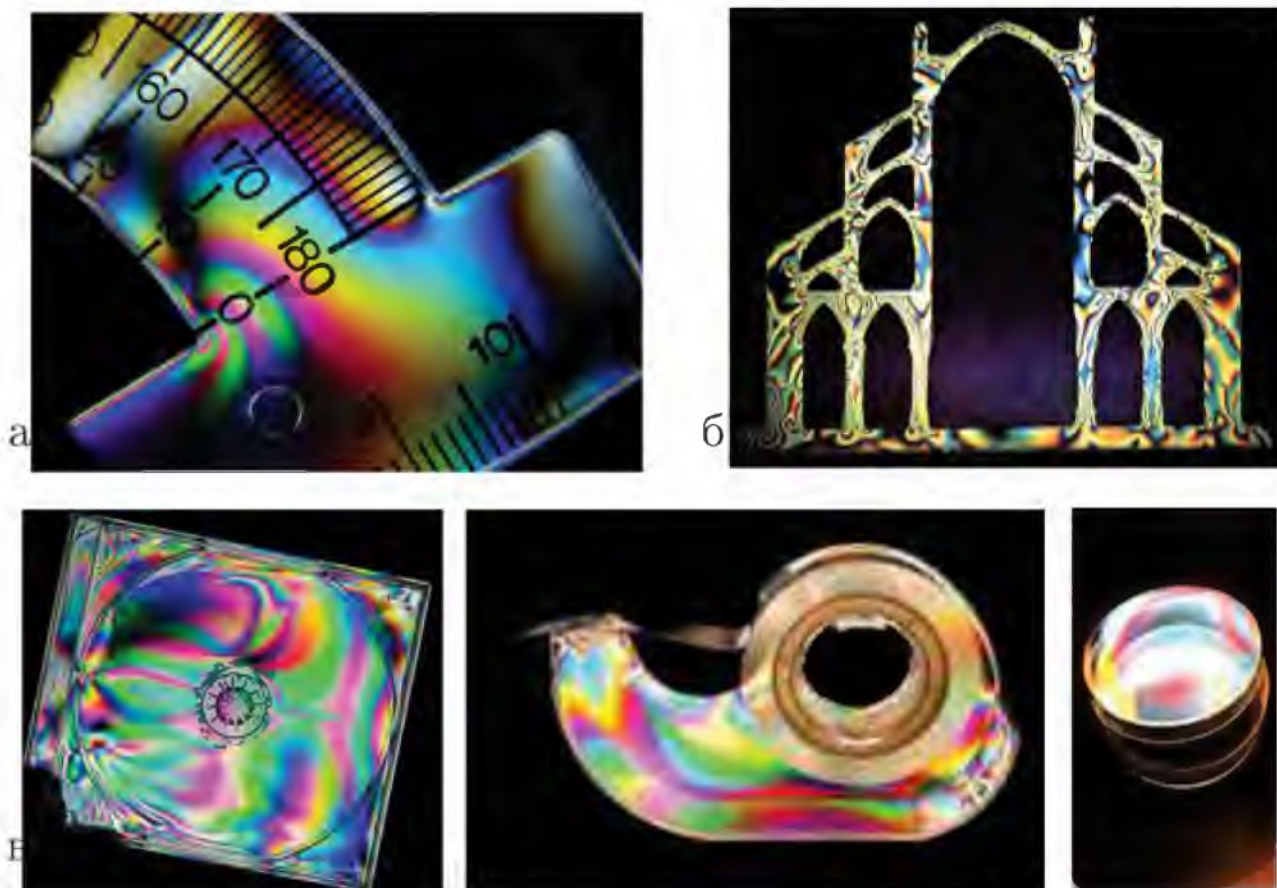


Рис. 1.16. *Фотопружність або п'єзооптичний ефект* (зображення з офіційних веб-сайтів). У предметах встановлених в поляризаційній установці під дією зовнішніх навантажень виникають анізотропні напрямки перепадів напруги, густини. Виникають анізотропні властивості матеріалів аналогічні кристалам. Для світла різних довжин хвилі поляризаційні ефекти різняться, зумовлюють кольорові переливи вздовж ліній механічної напруженості. Смуги направлені перпендикулярно до механічних напруг всередині матеріалу. Максимальні напруження там, де більша густина смуг.

а) У кутику транспортера більша густина кольорових смуг навіть без навантажень, свідчить про те, що при виготовленні виникли локальні внутрішні напруги оргскла. Саме в цьому місці найімовірніше руйнування транспортера при його падінні на тверду поверхню.

б) Собор Нотр-Дам де Парі (будівництво почали в XII ст.) має висоту стель 33м. Собор значно перебудовувався в різні віки. Для сучасного відновлення і реставрації храму потрібно було вивчити основні навантаження будівлі, бажано без руйнування чи розбирання частин архітектурної пам'ятки. Для дослідження були створені макетні перетини собору з прозорих матеріалів, оргскла. При різних способах навантаження вивчалися зміни смуг і встановлювалися де відбуваються критичні для будівлі перепади (це місця згущення фотопружних смуг), отримували цінну інформацію по виконанню робіт для укріплення споруди.

в) Фотопружні властивості між схрещеними поляризаторами можна виявити практично в довільних оптично прозорих предметах.

поляроїд між джерелом світла і дзеркальної поверхні, то відблиски можна погасити. Відблиски здебільшого бувають при великих кутах відбивання від поверхонь, мають високий ступінь поляризації поблизу кута Брюстера (наступна робота вивчення поляризації відбитого світла). Ефектом поляризаційного фільтра є посилення контрасту і насиченості кольорів на фотографії, зроблених при яскравому сонці.

Циркулярний поляризаційний фільтр (створює світловий пучок з поляризацією світла, що циркулює навколо осі руху світлового променя) використовується для камер з автоматичним фокусуванням. Коштує він дорожче лінійного. З його зовнішнього боку знаходиться звичайний лінійний фільтр, з внутрішньої прилаштовується "четвертьхвильова" пластинка, яка перетворює лінійну поляризацію в кругову. Циркулярні фільтри відмінно працюють на будь-яких камерах.

У будівельній і машинобудівній техніці використовується фотопружність матеріалів Рис. 1.16 для вивчення напружень, що виникають в окремих вузлах споруд і машин. Це явище використовується і в декоративних цілях, наприклад, в облаштуванні вітрин чи під час театральних постановок.

Існують паперові засоби, драпіровки, костюмні тканини з заданими поляризаційними ефектами на основі штучної анізотропії матеріалів чи вкраплень мікрокристалів.

У широкому розумінні поляризація світла — це здатність оптичних середовищ впливати на напрямок коливань світлових хвиль, змінювати його, змінювати вид поляризації (частково, лінійно, циркулярно, еліптично поляризоване світло), ступінь поляризованості, а також вплив світла на середовища зумовлений його поляризацією. Оптична анізотропія середовищ може бути зумовлена особливостями кристалічної, молекулярної чи дисперсної будови речовини, особливостями поглинання світла, заломлення на межі середовищ.