

3. Зачекати поки прогріється лампа – з'явиться анодний струм (5-10 хв.).
4. Зняти залежність анодного струму від запираючої напруги на сітці.
5. Порахувати для великої кількості значень енергії (eU_s) величини $\Delta I_a / \Delta U_s$.
6. Змінити струм розжарення катода і повторити п.4 і п.5.
7. Побудувати графіки залежностей п.5 для 3 температур на одних осях координат та проаналізувати отримані розподіли Максвелла.

Ілюстративний досвід можна використати для пояснення відповідних тем учням 11-х класів у школах з поглибленим вивчення фізико-математичних предметів в межах факультативних занять.

Список використаних джерел

1. *Загальний курс фізики: Навч. посібник для студентів вищих технічних і педагогічних закладів освіти.* /І.М.Кучерук, І.Т.Горбачук, П.П.Луцик; За ред. І.М.Кучерука. – К.:Техніка, 1999.
2. *Губанова А.О., Лисий І.В., Пастушенко М.Б.* Ілюстрація статистичного розподілу термоелектронів за енергіями //Всеукраїнська науково-практична конференція “Стратегічні проблеми формування змісту курсів фізики та астрономії в системі загальної середньої освіти”. – Львів. – 2002 (тези доповідей).
3. *Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н.* Практикум по фізице. – М.: Высшая школа. – 1965. – 568 с.

УДК 535.512

Губанова А.О., Пономаренко О.П.

(Кам'янець-Подільський державний педагогічний університет)

ВИВЧЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА

Розуміння процесу поляризації світла викликає певні труднощі як для учнів шкіл так і студентів педуніверситету. В роботі пропонується метод, який допомагає розуміти теорію процесу поляризації.

The process of a light polarization is the problem for pupils and students of pedagogical university. In this work we reproduced the method, which can help to understanding the theory of polarization.

Поляризоване світло поділяється на три основні типи: частково поляризоване, плоскополяризоване, еліптичнополяризоване. Методи отримання світла таких типів поляризації та дослідження оптичних властивостей подвійнозаломлюючих кристалів може бути проілюстроване за допомогою поляризаційного мікроскопа.

Поляризаційний мікроскоп має всі основні частини звичайного мікроскопа. Відмінність полягає лише в тому, що у тубусі є ніколь-аналізатор і лінза, яка застосовується для вивчення явищ поляризації в збіжному світловому пучку. Також в тубусі є проріз для компенсатора (в даній роботі це

Розділ III

кварцовий клин). Предметний столик може обертатися навколо своєї осі, причому кут повороту відраховується по лімбу на краю столика; точність вимірювання кута -1° .

До освітлювальної системи, яка знаходиться під столиком, входять поляризатор, діафрагма, конденсор, а також лінза, для створення збіжного пучка променів. Коли потрібно працювати з плоскопаралельним пучком, лінза може відводитись в сторону. Вся освітлювальна система може опускаться спеціальним боковим гвинтом і цим же гвинтом може бути відведена в сторону.

Плоскополяризоване світло характеризується тим, що у ньому коливання вектора E здійснюються в певному напрямі. Площину, яка містить цей напрямок і світловий промінь, називають площиною коливань. Природне світло складається з фононів, кожний з яких має свою площину коливань. Площина, що перпендикулярна до площини коливань (площина в якій коливається вектор H) називається **площиною поляризації** хвилі. Таким чином, площина коливань і площина поляризації взаємно перпендикулярні. Розглянемо проходження плоскополяризованого світла крізь кристалічні пластинки.

Промінь світла, який проходить через пластинку кварцу, зазнає подвійного променезаломлення, тобто ділиться на два промені, поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах. Ці промені поширюються у кристалі з різними швидкостями, тому між ними виникає оптична різниця ходу

$$\Delta = d(n_o - n_e) \quad (1)$$

і різниця фаз

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_o - n_e), \quad (2)$$

де d — товщина кристалічної пластинки, n_o і n_e — показники заломлення кожного з променів, λ — довжина падаючої світлової хвилі.

При виході з кристалу промені йдуть паралельно і можуть інтерферувати, якщо виконуються умови інтерференції: промені когерентні, мають однакові λ , поляризовані в одній площині, мають незмінну різницю ходу.

Нехай пластинка, вирізана паралельно оптичній осі. На вході у пластинку різниця фаз δ цих променів дорівнює нулю, а на виході з пластинки

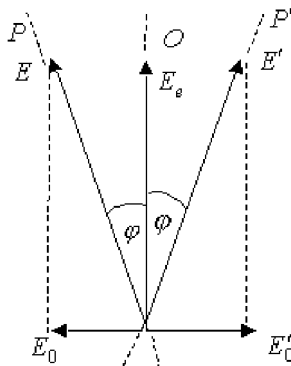
$$\delta = \frac{\Delta}{\lambda} 2\pi. \quad (3)$$

Світло падає на пластинку нормально. Якщо $(n_o - n_e)d = m\lambda + \lambda/4$ (m — довільне ціле число або нуль), то така пластинка називається пластинкою в чверть хвилі. Якщо при проходженні скрізь пластинку звичайний та незвичайний промені набувають різниці фаз, яка дорівнює $\pi/2$, пластинка, для якої

$$\Delta = (n_o - n_e)d = m\lambda + \lambda/2, \quad (4)$$

називається пластинкою в півхвилі.

Розглянемо проходження плоскополяризованого світла крізь пластинку товщиною в півхвилі. Коливання вектора E в падаючому промені, яке відбувається в площині P , збудить при вході в кристал коливання E_0 звичайного променя та коливання E_e незвичайного променя (мал. 1).



Мал. 1. Проходження плоскополяризованого світла крізь пластинку в півхвилі

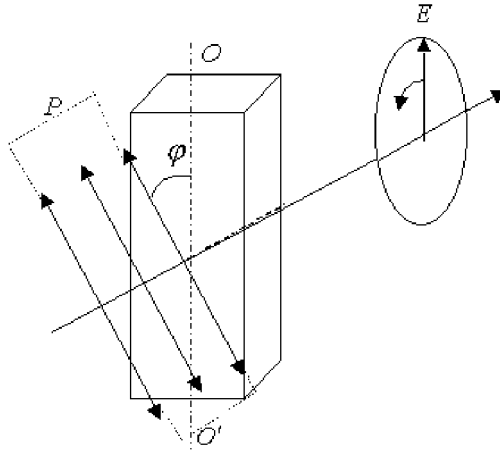
За час проходження крізь пластинку різниця фаз між коливаннями E_0 і E_e змінюється на π . Тому на виході з пластинки фазове співвідношення між звичайним та незвичайним променями буде відповідати взаємному розташуванню векторів E_e і E_0 (на вході в пластинку воно відповідало взаємному розташуванню векторів E_e і E_0). Отже, світло, яке вийшло з пластинки, буде поляризоване в площині P' . Площини P і P' розташовані симетрично відносно оптичної вісі пластинки OO' . Таким чином, пластинка в півхвилі повертає площину коливань на кут 2φ (φ – кут між площиною коливань в падаючому промені та віссю пластинки). Якщо пропускати плоскополяризоване світло крізь пластинку в чверть хвилі (мал. 2) і розташувати пластинку так, щоб кут φ між площиною коливань P в падаючому промені та віссю пластинки OO' дорівнював 45° , то амплітуди обох променів, які вийшли з пластинки будуть однакові. Зсув по фазі між коливаннями

в цих променях складе $\frac{\pi}{2}$. Отже, світло, яке вийшло з пластинки буде поляризоване по колу. При іншому значенні кута φ амплітуди коливань променів, які вийшли з пластинки, будуть неоднаковими. Тому при накладанні ці промені утворюють світло, поляризоване по еліпсу, одна з осей якого співпадає з віссю пластинки OO' .

При пропусканні плоскополяризованого світла скрізь пластинку, яка дає різницю ходу, що складає дробове число хвиль, відмінне від $\frac{\lambda}{4}$ та $\frac{\lambda}{2}$, з пластинки вийдуть дві когерентні, поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах світлові хвилі. В цьому випадку різниця фаз відрізняється від $\frac{\pi}{2}$ і від π . Отже, при довільному відношенні амплітуд цих хвиль,

Розділ III

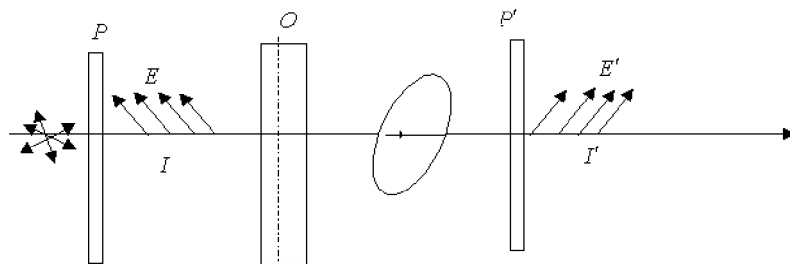
які залежать від кута φ (див. мал. 2), на виході з пластинки отримаємо еліптичнополяризоване світло, до того ж ні одна з осей еліпса не буде співпадати з віссю пластинки OO'' . Орієнтація осей еліпса відносно вісі OO'' визначається різницею фаз δ , а також відношенням амплітуд, тобто кутом φ між площиною коливань в падаючій хвилі та віссю пластинки OO'' . Відмітимо, що, незалежно від товщини пластинки, при $\varphi=0$; $\varphi = \pi/2$, в пластинці буде поширюватися тільки один промінь (в першому випадку незвичайний, в другому – звичайний), так що на виході з пластинки світло залишиться плоскополяризованим, з площиною коливань, яка збігається з P .



Мал. 2. Проходження плоскополяризованого світла крізь пластинку у чверть хвилі

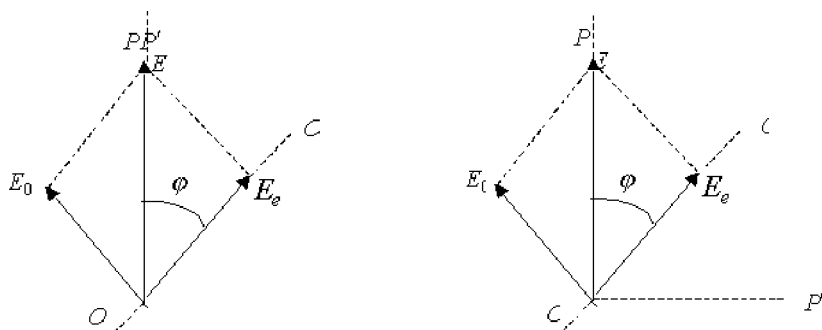
Залежність інтерференційного забарвлення від товщини d кристалічної пластинки краще всього спостерігається на кварцовому клині, за допомогою якого можна виміряти величину подвійного променезаломлення кристалів. Кварц – кристал тригональний, оптично одновісний, позитивний. Клин вирізають паралельно його оптичній вісі. Кут клина складає близько $0,5^\circ$, довжина його 4-5 см, товщина на товстому кінці не перевищує 0,2-0,3 мм та повільно зменшується до тонкого кінця.

Для перетворення плоскополяризованого світла в еліптичнополяризоване використовується пластинка з одновісного кристалу, яка вирізана паралельно оптичній вісі OO'' (мал. 3). Використаємо джерело природного світла S . З поляризатора P вийде плоскополяризоване світло інтенсивністю I . Пройшовши крізь пластинку, світло стане, в загальному випадку, еліптичнополяризованим. По виході з поляризатора P' світло знову буде плоскополяризованим. Його інтенсивність залежить від взаємної орієнтації площин пропускання поляризаторів P та P' і оптичної вісі пластинки, а також від різниці фаз δ .



Мал. 3. Проходження світла крізь два поляризатора

Припустимо, що кут φ між площиною поляризатора P та віссю пластинки дорівнює $\frac{\pi}{4}$. Розглянемо два часткових випадки: поляризатори паралельні (мал. 4, а) та схрещені (мал. 4, б).



а) поляризатори паралельні б) поляризатори схрещені

Мал. 4. Проходження світла крізь пластинку та поляризатори

Світлове коливання, яке вийшло з поляризатора P , зобразиться вектором E , що лежить в площині P . При вході у пластинку коливання E розіб'ється на два коливання – перпендикулярне до оптичної вісі коливання E_0 (звичайний промінь) і паралельне вісі коливання E_e (незвичайний промінь). Проходячи крізь пластинку, вони набудуть різницю фаз δ , яка визначається товщиною пластинки і різницею показників заломлення звичайного та незвичайного променів. Амплітуди цих коливань однакові і дорівнюють

$$E_0 = E_e = E \cos \frac{\pi}{4} = E/\sqrt{2}, \quad (5)$$

де E – амплітуда хвилі, яка вийшла з першого поляризатора.

Крізь другий поляризатор пройдуть складові коливань E_0 і E_e по напрямку площини P' . Амплітуди цих складових в обох випадках дорівнюють амплітудам (5), помноженим на $\cos\left(\frac{\pi}{4}\right)$, тобто

$$E_0' = E_e' = E/2. \quad (6)$$

У випадку паралельних поляризаторів (мал. 4, а) різниця фаз хвиль, які вийшли з поляризатора P' , дорівнює δ , тобто різниці фаз, набутою при проходженні крізь пластинку. У випадку схрещених поляризаторів (мал. 4, б) проєкції векторів E_0' і E_e' на напрямки P' мають різні знаки. Це означає, що до доповнення до різниці фаз δ виникає додаткова різниця фаз, яка дорівнює π . Хвилі, які вийшли з другого поляризатора, будуть інтерферувати. Амплітуда E_{\parallel} результуючої хвилі у випадку паралельних поляризаторів визначається співвідношенням

$$E_{\parallel}^2 = E_0'^2 + E_e'^2 + 2E_0'E_e' \cos \delta, \quad (7)$$

а у випадку схрещених поляризаторів – співвідношенням

$$E_{\perp}^2 = E_0'^2 + E_e'^2 + 2E_0'E_e' \cos(\delta + \pi). \quad (8)$$

Прийнявши до уваги (5), можна написати, що

$$\begin{aligned} E_{\parallel}^2 &= \frac{1}{4}E^2 + \frac{1}{4}E^2 + \frac{1}{2}E^2 \cos \delta = \frac{1}{2}E^2(1 + \cos \delta) = E^2 \cos^2 \frac{\delta}{2}, \\ E_{\perp}^2 &= \frac{1}{4}E^2 + \frac{1}{4}E^2 + \frac{1}{2}E^2 \cos(\delta + \pi) = \frac{1}{2}E^2(1 - \cos \delta) = E^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}. \end{aligned} \quad (9,10)$$

Інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди. Отже,

$$I_{\parallel} = I \cos^2 \frac{\delta}{2}, I_{\perp} = I \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (11)$$

де I_{\parallel} – інтенсивність світла, яке вийшло з другого поляризатора в випадку, коли поляризатори паралельні, I_{\perp} – така сама інтенсивність у випадку коли поляризатори схрещені, I – інтенсивність світла, яке пройшло крізь перший поляризатор.

З формул (11) випливає, що інтенсивності I_{\parallel} і I_{\perp} в сумі дають інтенсивність I . При $\delta = 2m\pi$ ($m = 1,2,\dots$) інтенсивність $I_{\parallel} = I$; $I_{\perp} = 0$. При $\delta = (2m + 1)\pi$ ($m = 1,2,\dots$) інтенсивність $I_{\parallel} = 0$; $I_{\perp} = I$.

Для визначення величини подвійного променезаломлення (або визначення товщини зразка при відомому променезаломленні) використовують метод компенсації, зміст якого є в тому, що в паралельному поляризованому світлі спостерігають додавання оптичної різниці ходу в досліджуваній пластинці Δ_1 і в компенсаторі, тобто пластинці або пристрої з відомою різницею ходу Δ_2 .

Досліджувана пластинка встановлюється в діагональному положенні між схрещеними ніколями, за нею розміщують компенсатор. Якщо пластинка

і компенсатор орієнтовані так, що більші осі їх еліпсів показників заломлення співпадають, то загальна різниця ходу Δ , що виникає в результаті проходження світла через кристал і компенсатор, дорівнює $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$. Якщо досліджувана пластинка розміщена під кутом 90° , то результуюча різниця ходу $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$. При $\Delta_1 = \Delta_2$ $\Delta = 0$ і досліджувана пластинка з накладеним на неї компенсатором не пропустить світла. Знаючи Δ_2 можна визначити Δ_1 і отже, товщину або двозаломлення пластинки.

Для експериментального дослідження поляризації світла необхідно провести такі дії:

1. Детально ознайомитися з будовою поляризаційного мікроскопа, використовуючи літературу [2].
2. Обергаючи поляризатор, домогтися максимального затемнення поля зору.
3. Вставити в тубус мікроскопа кварцовий клин та дослідити його при $A \parallel P$, $A \perp P$. Пояснити спостережувані явища.
4. Поставити на предметний столик мікроскопа кварцову пластину і встановити A перпендикулярно P . Потрібно: прослідкувати як буде змінюватися колір пластинки та інтенсивність освітлення у білому світлі при обертанні її на 360° .
5. Виконати завдання по знаходженню величини двозаломлення кристалічної пластинки відомої товщини.

Визначення величини $(n_g - n_p)$ виконується так:

- 1) знаходять смугу, яка відповідає по забарвленню кольору кристалічної пластинки, вміщеної між схрещеним аналізатором та поляризатором;
- 2) знаходять точку перетину цієї смуги з лінією, яка відповідає товщині пластинки (кольорова вкладинка [2]);
- 3) по похилій прямій, яка йде з точки перетину цих двох ліній, на верхньому правому обрізах таблиці знаходять величину двозаломлення. За величиною різниці ходу та відомим двозаломленням можна також розв'язати зворотню задачу, тобто знайти товщину пластинки.
6. Спостерігати інтерференцію при проходженні поляризованого світла крізь інший двозаломлюючий кристал (слюда).

Список використаних джерел

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. — Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 496 с., ил.
2. *Физический практикум, Электричество и оптика* / Под ред. В.И.Ивероновой, М. — 1968. — С. 556-567.
3. *Шаскольская М.П.* Кристаллография: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1984. — 376 с.