

УДК 531(0758)

Губанова А.О.

## СУЧАСНА МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА СТУДЕНТАМИ ПРИРОДНИЧИХ ФАКУЛЬТЕТІВ ВНЗ

У статті подана методична розробка для вивчення теми "Поляризація світла". Для демонстрації явища використаний поляризаційний мікроскоп. Поданий метод розрахунку різниці фаз, яка виникає при проходженні світла через анізотропний кристал кварцу, що володіє властивістю подвійного променезаломлення. Розглядаються типи поляризації та явище оптичної активності матеріалів. Описані умови виникнення інтерференції поляризованого світла. Наведені приклади демонстрацій інтерференції з використанням кварцової чверть хвильової пластинки та кварцового клина. Навчальний матеріал подано у порядку підвищення складності сприйняття теоретичного пояснення явищ. Використовується метод розкладання вектора напруженості електричного поля на проєкції, які пов'язані з площинами пропускання аналізатора та поляризатора. Методика подання теми ґрунтується на розвиваючому підході, апробована під час вивчення розділу "Оптика" в курсі фізики для студентів фізико-математичного та природничого факультетів університету.

**Ключові слова:** методика вивчення, розвиваючий підхід, спостереження, електромагнітна хвиля, фотон, анізотропні кристали, подвійне променезаломлення, інтерференція, поляризаційний мікроскоп.

**Вступ.** Оптичні методи дослідження фізичних, біологічних та ін. об'єктів і використання світлових явищ у техніці та медицині набувають нового, сучасного змісту при використанні як хвильових, так і квантових властивостей електромагнітних хвиль. Явище повного внутрішнього відбивання світла (його застосування для волоконної оптики) докорінно змінило як засоби передачі інформації, так і методи діагностики в медицині. Інформацію, яку можна отримати завдяки спостереженню повного внутрішнього відбивання поляризованого світла, пов'язують з виникненням поверхневих плазмонів на межі контакту надтонких шарів металу з досліджуванним розчином молекул різної природи в рідині або газі [1].

У підручнику для загальноосвітніх навчальних закладів [2] інформація про поляризацію світла викладена на чотирьох сторінках. У сучасних робочих програмах з фізики для ВНЗ, зокрема педагогічного профілю, вивчення поляризації електромагнітних хвиль, також, як правило, супроводжується виконанням двох лабораторних робіт: вивчення закону Малюса та визначення концентрації розчину цукру за допомогою сахариметра. У курсі фізики твердого тіла додатково виконується лабораторна робота по спостереженню інтерференції поляризованого світла за допомогою поляризаційного мікроскопа.

Для підвищення якості підготовки майбутнього педагога важливими є як теоретичні знання предмету, так і підбір фізичних явищ, які мають сучасне технічне застосування і викликають інтерес у студентів [3].

**Метою** статті є розробка методичних рекомендацій для розширення уявлень студентів про проходження світла в різних середовищах, що зумовлене анізотропією електричних властивостей твердих або симетрією молекул органічних сполук та ін. У статті розглядаються: хвильова теорія світла, методи отримання поляризованого світла, досліди для вивчення інтерференції поляризованого світла.

Матеріал, викладений у статті, складається з теоретичної частини, практичного спостереження, детального розгляду питання утворення інтерференційної картини при проходженні світла через шари з матеріалу, в якому відбувається подвійне променезаломлення. Для якісного засвоєння матеріалу необхідно витратити вісім навчальних годин (два, або три заняття проблемної групи і вісім годин самостійної роботи студентів).

### **Теоретична частина**

*Світло як електромагнітна хвиля. Основні характеристики.*

Електромагнітна теорія світла була створена в середині XIX століття Максвеллом (1831–1879). Відповідно до цієї теорії світлові хвилі мають електромагнітну природу, а світлове випромінювання можна розглядати як окремий випадок електромагнітних явищ. (Шкала електромагнітних хвиль)

Хвильові властивості світла проявляються в явищах дисперсії світла, інтерференції, дифракції та поляризації. Поляризація свідчить про поперечність світлових хвиль.

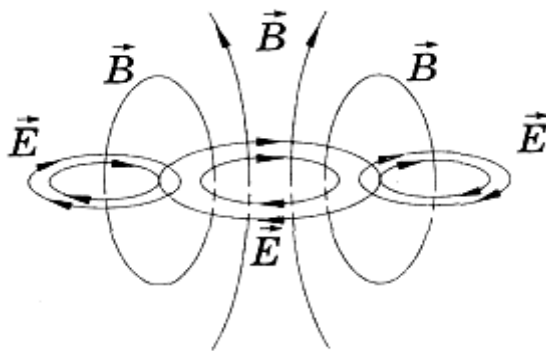
*Світло – матеріальне явище, яке в одних процесах проявляє властивості електромагнітних хвиль, а в інших – властивості частинок – квантів (фотонів) [4].* Фотон – частинка, яка є носієм енергії

електромагнітного поля, і існує самостійно як в деякому середовищі, так і у вакуумі. Фотон має такі характеристики: енергію,  $E = h\nu$ , імпульс  $|\vec{p}| = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ , масу  $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c^2 T} = \frac{h}{c\lambda}$ . У теорії відносності

$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ,  $m_0$  – маса частинки в системі відліку, відносно якої частинка знаходиться в стані спокою (для фотона  $m_0 = 0$ ).

У будь-якому середовищі, за рахунок взаємодії електромагнітної хвилі з елементами середовища, швидкість світла змінюється. Характеристикою оптичних властивостей середовища є показник заломлення. У загальному випадку цей показник залежить від діелектричної та магнітної проникності середовища  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  [5], у немагнітних середовищах  $\mu = 1$ , то  $n = \sqrt{\epsilon}$ . В однорідному ізотропному середовищі величина  $\epsilon$  скалярна величина, а для анізотропних твердих тіл – тензорна величина, тобто значення величини  $\epsilon_{ij}$  залежить від напрямку поширення світла відносно осей симетрії елементарної комірки. Така залежність визначає властивості кристалів та їх поділ на ізотропні, одновісні та двовісні. До одновісних кристалів відноситься ісландський шпат, з якого виготовляють поляризатор під назвою "Призма Ніколя" [5].

#### Поляризація світлових хвиль



Мал. 1. Взаємне породження електричного та магнітного полів

Дослід для спостереження поляризації світла описаний в [2] свідчить про поперечність світлових хвиль. На мал. 1 зображені "силові лінії" електричного та магнітного полів у електромагнітній хвилі та взаємне розташування векторів напруженості електричного та магнітного полів відносно напрямку поширення хвилі [5].

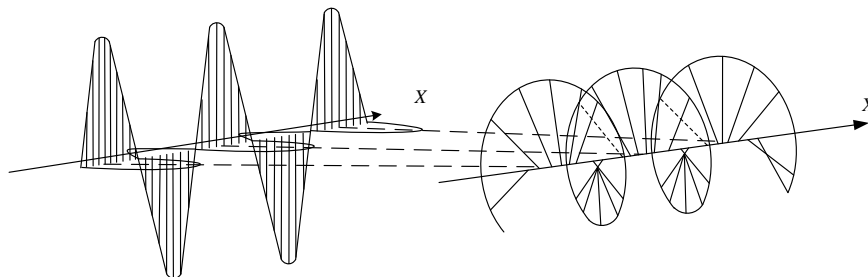
Вихрове магнітне поле "породжує" вихрове електричне поле. Першою експериментальною основою такого твердження є досліди Фарадея.

Процес взаємного породження магнітного і електричного полів повинен безперервно тривати і захоплювати все нові і нові області в навколишньому просторі

#### Види поляризації

Якщо, вектор напруженості  $\vec{E}$  електричного поля в електромагнітній хвилі лежить в одній площині, то хвиля *плоскополяризована*. Світлове випромінювання є сумарним електромагнітним випромінюванням величезної кількості атомів. Атоми випромінюють світлові хвилі незалежно один від одного, тому світлова хвиля, яка випромінюється сукупністю атомів характеризується різними напрямками коливання світлового вектора  $\vec{E}$ .

Дві плоско поляризовані хвилі, однакової довжини (якщо їх площини поляризації паралельні), при сталій у часі різниці фаз між ними, можуть утворювати інтерференційну картину. Якщо площини поляризації двох хвиль лежать у перпендикулярних площинах, то в залежності від різниці фаз, проекція кінця результуючого вектора напруженості електричного поля на площину, перпендикулярну до напрямку поширення світла може описувати коло (*кругова поляризація*) або еліпс (*еліптична поляризація*). На мал. 2, схематично показано еліптичну поляризацію.



Мал. 2. Еліптично поляризоване світло

*Оптично активна речовина*

При проходженні плоскополяризованого світла крізь оптично активні речовини, площина, в якій лежить вектор  $\vec{E}$  (площина поляризації) поступово повертається з деякою кутовою швидкістю навколо напрямку поширення променя. До оптично активних відносяться тверді речовини, які мають такий елемент симетрії як "зміщення з поворотом" а також рідини (скипидар, розчин цукру в воді та ін.).

Для розчинів кут обертання площини поляризації  $\phi$  пропорційний концентрації  $C$ , Така залежність дає можливість визначити концентрацію розчиненої речовини..

Скло і пластмаса набувають оптичної активності у деформованому стані. Обертання площини поляризації максимальне в місцях з найбільшою напруженістю. Для візуального спостереження точок найбільшої напруженості, можна використовувати моделі кісток, або деталей машин, які вироблені з прозорих матеріалів. Для дослідження явищ, пов'язаних з поляризацією розроблені спеціальні прилади, які називаються поляриметрами [6].

*Подвійне променезаломлення. Пластинки  $\lambda/4$*

В оптично анізотропних кристалах спостерігається явище *подвійного променезаломлення*, яке полягає в тому, що промінь світла, падаючи на поверхню кристала, розділяється на два промені, що далі поширюються з різними швидкостями.

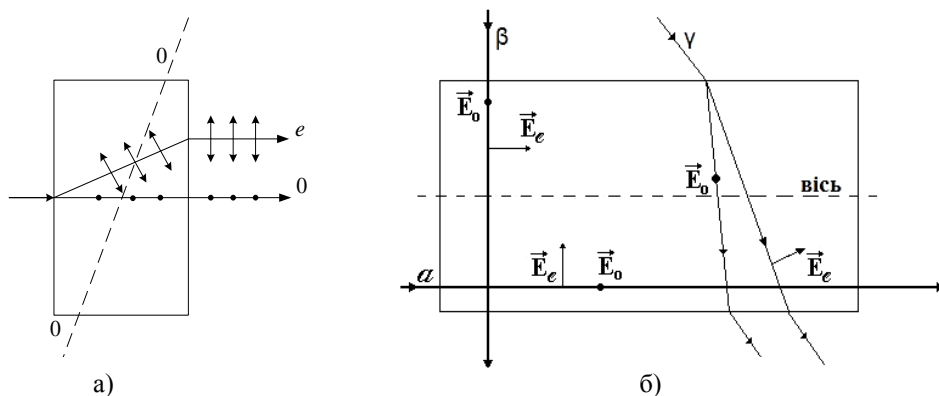
В одновісних кристалах для одного із променів виконується закон заломлення, зокрема заломлений промінь лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю до заломлюючої поверхні. Цей промінь називається *звичайним (o)*. Для другого променя, який називається *незвичайним (e)*, закон заломлення світла не виконується. Незвичайний промінь не лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю до поверхні кристала.

На мал. 3, а) показано явище подвійного променезаломлення в одновісному кристалі. При падінні променя світла на кристал перпендикулярно до поверхні кристала, звичайний промінь (o) є продовженням падаючого, а незвичайний (e) при проникненні в кристал відхиляється на деякий кут (мал. 3, а)) Одновісними кристалами є ісландський шпат, кварц, турмалін, а двовісними – слюда, гіпс. У двовісних кристалах обидва промені незвичайні. *Напрямок в кристалі, по якому поширюються звичайний і незвичайний промені не розділяються і з однаковою швидкістю, називається оптичною віссю кристала (напрямок, що визначається симетрією елементарної комірки кристала)* [7].

Роздвоєння світла в кристалі завжди відбувається в головній площині. Оскільки при обертанні кристала навколо падаючого променя головна площина повертається в просторі, то одночасно повертається і незвичайний промінь. На мал. 3 б) показані найбільш прості випадки поширення світла в кристалі.

1. Якщо промінь  $\alpha$  (мал. 3, б)) паралельний оптичній осі, площина малюнка є головною площиною, але такою же є, наприклад, і перпендикулярна до неї площина, то умови розповсюдження променів з будь-якою поляризацією однакові, і вони не роздвоюються.

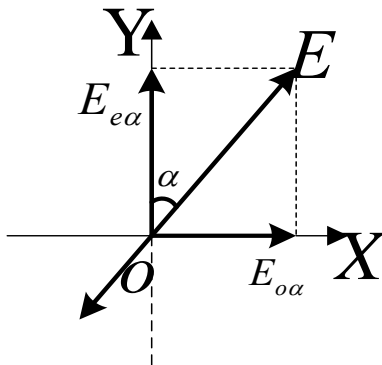
2. Якщо промінь  $\beta$  йде перпендикулярно оптичній осі, то електричний вектор, який лежить в головній площині, паралельний осі. Електричний вектор, перпендикулярний осі, лежить при цьому в площині, нормальній до головної, так що умови розповсюдження для цих складових електричного поля світлової хвилі неоднакові: промені не роздвоюються, але мають різну швидкість поширення.



**Мал. 3. Умови проходження світла через одновісний кристал при різних розташуваннях оптичної осі**

3. Якщо промінь  $\gamma$  йде під довільним кутом до оптичної осі, то умови розповсюдження вказаних (мал. 4) складових вектора  $\vec{E}$  неоднакові – промені розповсюджуються по різних напрямках і з різними швидкостями

Розглянемо випадок: на одновісний кристал падає лінійно поляризоване світло; площина поляризації променя утворює з оптичною віссю



Мал. 4. Визначення амплітуд звичайного та незвичайного променів

пластинки кут  $\alpha$ ; в пластинці поширюватимуться звичайний і незвичайний промені в напрямку падаючого променя. Нехай  $E_0$  – амплітудне значення електричного вектора променя, який падає на пластинку (мал. 4). Тоді амплітуди електричних векторів звичайного і незвичайного променів будуть дорівнювати:  $E_{o\alpha} = E_0 \sin \alpha$ ;  $E_{e\alpha} = E_0 \cos \alpha$  (мал. 4)

Після проходження пластинки завтовшки  $d$  між звичайним і незвичайним променями виникає різниця ходу  $\Delta = (n_o - n_e)d$  або різниця фаз  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d$ , де  $\lambda_0$  – довжина хвилі у вакуумі [5].

Коливання електричних векторів звичайного і незвичайного променів здійснюються за законами:

$$E_o = E_{o\alpha} \cos(\omega t - \delta) = E \sin \alpha \cos(\omega t - \delta) \text{ та } E_e = E_{e\alpha} \cos \omega t = E \cos \alpha \cos \omega t.$$

Якщо додаються взаємно перпендикулярні коливання, при  $\delta = \pi/2$ , і модулі цих коливань рівні  $E_{e\alpha} = E_{o\alpha}$  то отримується циркулярно поляризоване світло. При  $\Delta = (n_o - n_e)d = \pm(m+1/4)\lambda_0$  – пластинка називається чверть хвильова, ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ).

### Практична частина

#### Інтерференція поляризованого світла

Спостереження інтерференційної картини поляризованого світла з використанням поляризаційного мікроскопа та пластинки в чверть хвилі і кварцового клина [6], [8], [9].

Опис поляризаційного мікроскопа та методика проведення дослідження приведені в [6]. На мал. 5 показані чверть хвильова пластинка та кварцовий клин. Для пластинки умова максимуму інтерференції виконується для однієї довжини хвилі світла (при введенні пластинки між схрещеними поляризатором та аналізатором мікроскопа спостерігається забарвлення всього поля зору світлом однакового кольору – малинового). На жаль, умови друку не дозволяють використати кольорове зображення. При повороті поляризатора (повертання аналізатора не передбачене конструкцією мікроскопа) умова максимуму інтерференції виконується для іншої довжини хвилі світла (колір поля зору змінюється на "додатковий"). Виділення кольорового малюнка на екрані комп'ютера супроводжується аналогічною зміною кольорів. Переміщення кварцового клина вздовж предметного столика мікроскопа приводить до зміни кольорів. За рахунок зміни його товщини умови максимуму інтерференції виконується для різних довжин хвилі. Спостереження використані при сонячному світлі.



а)

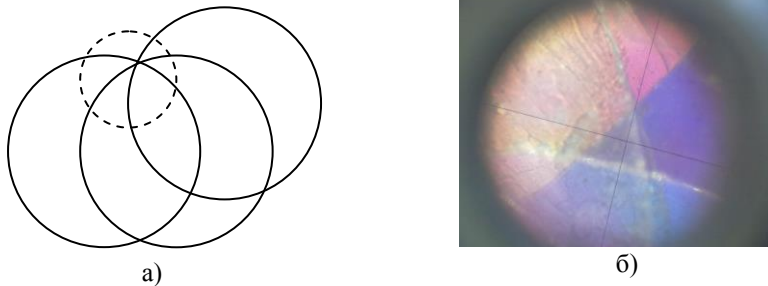


б)

Мал 5. а) Чверть хвильова пластинка; б) Кварцовий клин

Спостереження інтерференції поляризованого світла з використанням *трьох накладених слюдяних кругів*. Різні кольори відповідають різній сумарній товщині пластинок, що розташовані між поляризатором та аналізатором

Схема накладання пластинок з слюди та інтерференційна картина поляризованого світла, отримана при їх внесенні між схрещеними поляризатором та аналізатором приведені на мал. 6. На мал. 6, а показано коло, окреслене пунктирною лінією, яке обмежує область, що спостерігається в полі зору мікроскопа.



**Мал. 6: а) Схема розташування трьох слюдяних кругів (пунктиром відмічена область в якій отримана інтерференційна картина на мал. 6 б); б) Зображення інтерференційної картини поляризованого світла отримане за допомогою накладених слюдяних кругів**

Виконання описаних дослідів з поляризаційним мікроскопом вимагає чіткого дотримання порядку налаштування мікроскопа, тому що інтерференційну картину створюють тільки ті проекції напруженості електричного поля, які за напрямком співпадають з площиною пропускання аналізатора.

#### **Висновки**

1. Запропонована методика вивчення теми "Поляризація світла" включає теоретичну, практичну та демонстраційну складову. Комплекс підходів створює комфортні умови для розвитку фізичного мислення студентів.

2. Матеріал поданий у напрямку зростання складності як теорії, так і практики проведення спостережень. Розвиваючий підхід.

3. Під час вивчення поляризації світла повторюється фізична теорія, яка ґрунтується на застосуванні векторів для опису електромагнітної хвилі, принципу суперпозиції векторних полів. Для розуміння утворення циркулярно-поляризованого світла використовується розкладання вектора напруженості електричного поля на дві складові і теорія додавання взаємно перпендикулярних коливань.

4. Показано, що при схрещених напрямках площин поляризації поляризатора та аналізатора, в створенні інтерференційної картини приймають участь тільки проекції вектора напруженості електричного поля на напрямок площини пропускання аналізатора.

5. Продемонстроване явище подвійного променезаломлення в одноосних кристалах (кварцові пластинка та клин).

6. Впровадження описаної методики вивчення теми успішно застосоване при вивченні оптики на кафедрі фізики Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка.

#### **Використані джерела**

1. Дорожинський Г.В. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу / Г.В. Дорожинський, В.П. Мослов, Ю.В. Ушенин. – Київ : НТУУ "КПІ" Видавництво "Політехніка", 2016. – 264 с.
2. Коршак С.В. Фізика, 11 кл.: Підручник для загальноосвітніх навчальних закладів / С.В. Коршак, О.І. Ляшенко, В.Ф. Савченко. – К.; Ірпінь: ВТФ "Перун", 2005. – 288 с.: іл.

3. Атаманчук П.С. Управління якістю підготовки майбутнього вчителя фізико-технологічного профілю: позиція дослідників: зб. наукових праць "Науковий часопис Національного педагогічного університету ім. М.П. Драгоманова" / П.С. Атаманчук, Т.П. Поведа. – Вип. 50. – Серія 5: Педагогічні науки: реалії та перспективи. – Київ: вид. НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2014. – 306 с. – С. 3-7.
4. Кучерук І.М. Загальний курс фізики у 3-х т. – Т.3. Оптика. Квантова фізика / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук. – К.: Техніка, 1000. – 520 с.
5. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг – Москва: Наука, 1976. – 928 с.
6. Иверонова В. И. Физический практикум. Электричество и оптика / В. И. Иверонова. – Москва: Наука, 1968. – 816 с.
7. Шаскольская М. П. Кристаллография / М. П. Шаскольская. – М. : Высшая школа, 1976. – 391 с.
8. Поляризация света [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3001.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3001.html).
9. Вивчення інтерференції поляризованого світла за допомогою поляризаційного мікроскопу [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.fmf.npu.edu.ua/files/Kafedry/KZIPF/LabWorks\\_PDF/Optika/Cycle\\_02/453.pdf](http://www.fmf.npu.edu.ua/files/Kafedry/KZIPF/LabWorks_PDF/Optika/Cycle_02/453.pdf)

Gubanova A.

#### MODERN METHODS OF STUDYING POLARIZED LIGHT BY THE STUDENTS OF NATURAL FACULTIES

*The article presents the methodological development for the study of the "Polarization of light". Development includes information on wave and quantum properties of light, characteristics of light as waves and particles – photons. In the article are demonstrated a following types of polarization as a plane polarized light, elliptically polarized. In theoretical aspects of the methodology of the study included polarization methods of producing polarized light as it passes through the crystals with the property of birefringence. The dependence of a transition of light passes through an anisotropic crystal with different directions of incidence natural beam on the crystal surface and in different directions of the optical axis of the crystal is demonstrated. For demonstrate the phenomenon used polarizing microscope. The method of calculation of the phase difference which occurs when light passes through an anisotropic crystal quartz having the property of birefringence. The conditions of occurrence of interference of polarized light due to occurrence of the phase difference for ordinary and extraordinary rays are described. The examples of demonstrations of interference using a quartz quarter wave plates and quartz wedge was used. The material is presented in increasing order of complexity of perception and theoretical explanation of phenomena. Use the method of decomposition of electric field vector on the projection, which are associated with the planes of transmission of analyzer and polarizer. The methodology for the submission threads is based on a developmental approach, tested in the study of the "Optics" of physics course for students of physics-mathematical and natural Sciences faculties of the University*

**Key words:** *methodological development for the study, Polarization of light, phase difference, interference of polarized light.*

*Стаття надійшла до редакції 22.05.2016 р.*