

# Поларизоване світло: отримання, властивості, аналіз, використання

Поларизатори - пристрої для перетворення природного або частково поларизованого світла в лінійно поларизоване.

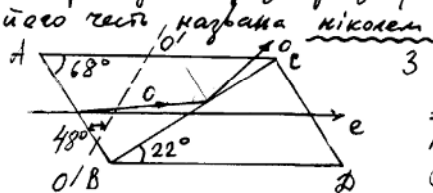
Поларизатори і аналізатори.

За принципом дії: 1) відбивання під кутом Брюстера; 2) заломлене світло - частково поларизоване  $\Rightarrow$  Стопа Столетова; 3) явище дихроїзму в деяких анізотропних середовищах (квітках) - коляріди; 4) поларизаційні призми, основані на явищі двопроменевого заломлення.

## Поларизаційні призми

### а) однопроменеві:

Першу полариз. призму винайшов Ніколь (1828р.). На його честь названа нікелем



З ісландського шпату:  $\text{CaCO}_3$

$$\frac{AB}{AC} = 3.65$$

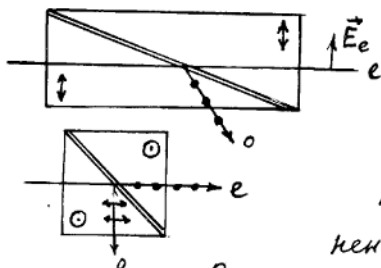
Склеїтка по ВС ізотропним канадським бальзамом  $n = 1.550$

Для "o" променя виконуються умови повного відбиття ( $n_o > n$ )

Для "e" променя ( $n_e < n$ ) - ПВВ немає.

для  $\lambda = 589\text{nm}$

### Призма Глана (Глана-Фуко)



$$n_e < n_{\text{склейки}} < n_o$$

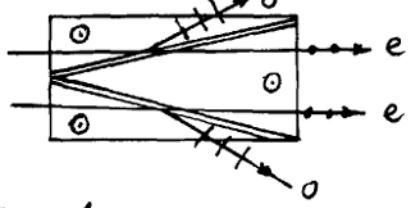
В якості склейки - гліцерин (4ф), Канадський бальзам (видиме світло), Масло, повітря.

Кут нахилу на поверхню розділу повинен бути більшим за граничний кут ПВВ.

Різниця кутів нахилу між крайніми променями падаючого пучка, які задовольняють такі умови, визначає апертуру повної поларизації призми.

Для призми Фуко умови ПВВ виконуються для "o" і для "e" променів:  $n_{\text{гг}} < n_e < n_o$ . Тому призму Фуко роблять катодною для того, щоб кут нахилу "e" променя на поверхню розділу був меншим від граничного кута ПВВ, а для "o" променя - більшим за нього. При цьому апертура повної поларизації становить всього  $8^\circ$ .

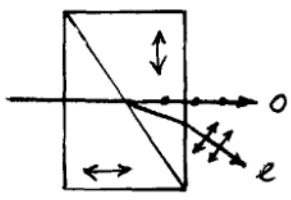
### Тризма Аренса



Використовується для підсвітки в поляризу. мікроскопах: дає широкій промінь.

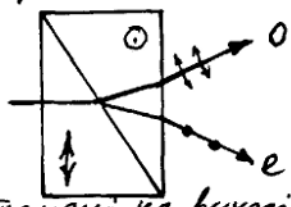
### б) двопробнені поляризаційні призми:

#### Тризма Томсона



"o" промінь - ахроматичний  
Кут відхилення "e" променя залежить від кольору світла.

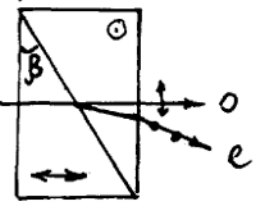
#### Тризма Волластока



Через те, що  $OO'$  в різних половинах призми перпендикулярні, промінь збігаючий в I половині стає незбігаючим в II половині призми.

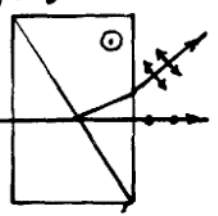
Промені на виході симетричні

#### Тризма Ромона



"e" промінь виходить під кутом  
 $\theta = (n_o - n_e) \cdot \text{tg } \beta$

### Тризма, яка виготовлена із скла та ісландськ. шпату



Близкість показників заломлення скла (1.49) та  $n_e = 1.486 \Rightarrow$  промінь проходить через призму практично не заломлюючись;  $n_{\text{склей}} \approx n_e$

### Матеріали для поляризаційних кризм:

ісландський шпат, кварц, турмалін

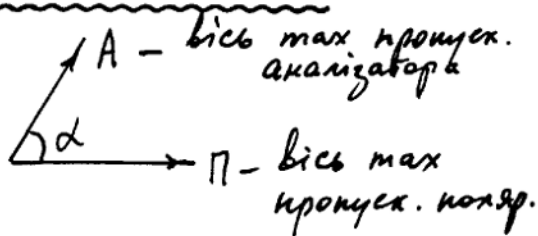
Турмалін: - від'ємний кристал, одновісний;

- має сильне селективне поглинання одного з променів (звичайного). Для  $d \sim 1$  мм з кристалу виходить практично один (незвичайний) промінь - дихроїзм:

### Характеристики поляризаційних кризм

- 1) з якого матеріалу зроблена (це визначає спектр. область);
- 2) коеф. пропускання ( $T \sim 40\%$ ;  $T_{\max} = 50\%$ );
- 3) ступінь поляризації ( $\rho \sim 98\%$ );
- 4) апертура - max кут розходження падаючого променя, коли кризма дає 100% теоретичну ступінь поляризації.

### Закон Малюса



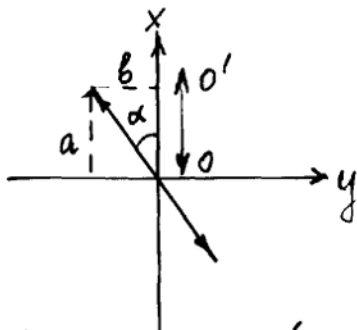
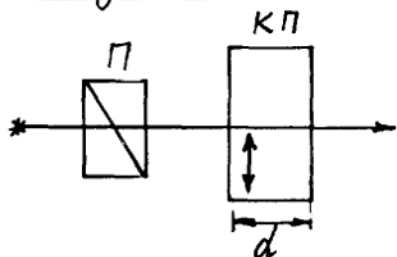
$I_0$  - інтенс. лін. полар. світла, що виходить з поляризатора;

$I_{pr}$  - інтенс. світла, що виходить з аналіз.

$$\underline{I_{pr} = I_0 \cos^2 \alpha}$$

Якщо на поляризатор падає природне світло з інтенс.  $I_{вх}$ , то після аналізатора  $\underline{I_{pr} = \frac{1}{2} I_{вх} \cos^2 \alpha}$

Взаємодія ортогонально поляризованих променів.  
Фазові платівки



В КП "о" і "е" промені проходять в одному напрямку, але з різними швидкостями.

Після П площина коливань  $\vec{E}$  утворює кут  $\alpha$  з  $OO'$ .  
 Ампл. збиг. хвилі  $a = A \cdot \cos \alpha$  де  $A$  - ампл. коливань хвилі, що падає на КП  
 Ампл. незбиг. хвилі  $b = A \cdot \sin \alpha$

$$\Delta = (n_o - n_e) \cdot d$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) \cdot d$$

На виході з КП:  $x = a \cdot \cos \omega t$ ;  $y = b \cdot \cos(\omega t - \varphi)$

$$y = b(\cos \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cdot \sin \varphi) \quad \text{та} \quad \cos \omega t = \frac{x}{a} \quad (1)$$

$$y = b\left(\frac{x}{a} \cos \varphi + \sin \omega t \cdot \sin \varphi\right)$$

$$\sin \omega t \cdot \sin \varphi = \frac{y}{b} - \frac{x}{a} \cos \varphi \quad (2)$$

Підносимо до квадрата (1) та (2) та додаємо їх:

$$\cos^2 \omega t \cdot \sin^2 \varphi = \frac{x^2}{a^2} \cdot \sin^2 \varphi$$

$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cdot \cos \varphi = \sin^2 \varphi$	Результуюче коливання після КП буде еліптичним.
--	---

Форма і орієнтація еліпсу залежить від  $\alpha$  і  $\varphi$ .

Світло після КП - еліптично поляризоване.

$\lambda/4$  - фазова плівка

Якщо товщина  $d$  плівки задовольняє умові  
 $(n_o - n_e) \cdot d = \lambda/4$  або  $(n_o - n_e) d = (m + \frac{1}{4}) \lambda$

де  $m$  - ціле число, то  $\varphi = \frac{\pi}{2} + 2m \cdot \pi$

Тоді рівняння еліпсу набуває вигляду  
 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  табо воно зведене.

Якщо при цьому  $\alpha = 45^\circ$ , то  $a = b$  і  $x^2 + y^2 = a^2$ .

В цьому випадку світло поляризоване по колу (колу).

Потрібно, щоб розходились дві когерентні хвилі з однаковими амплітудами, поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах з різницею фаз, що дорівнює  $\frac{\pi}{2}$ .

В залежності від того, компонента вздовж  $Ox$  випереджає компоненту вздовж  $Oy$  або відстає від неї на  $\frac{\pi}{2}$  за фазою, кажуть про обернення результуючого вектора проти годинникової стрілки або за нею. Розрізняють ліву і праву кругову (еліптичну) поляризацію.

 $\lambda/2$  - фазова плівка

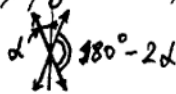
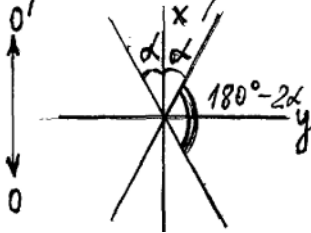
Товщину  $d$  підбирають так, що  $(n_o - n_e) \cdot d = \frac{\lambda}{2}$  або  
 $(n_o - n_e) \cdot d = (m + \frac{1}{2}) \lambda \Rightarrow \varphi = \pi$ .

При умові, що  $\varphi = \pi$  еліпс вироджується в дві

прямі, що збігаються:  $(\frac{x}{a} + \frac{y}{b})^2 = 0$

$$y = -\frac{b}{a} \cdot x$$

Світло залишається лінійно поляризованим, але орієнтація площини коливань  $\vec{E}$  змінюється від такої, яка визначається кутом  $\alpha$ , до такої, що визначається кутом  $180^\circ - 2\alpha$



Фазова плівка у цілу довжину хвилі задовольняє умову  $(n_o - n_e)d = \lambda$  або  $(n_o - n_e)d = m\lambda$ , що дає  $\varphi = 2\pi$ . При цьому елікс вироджується у пряму

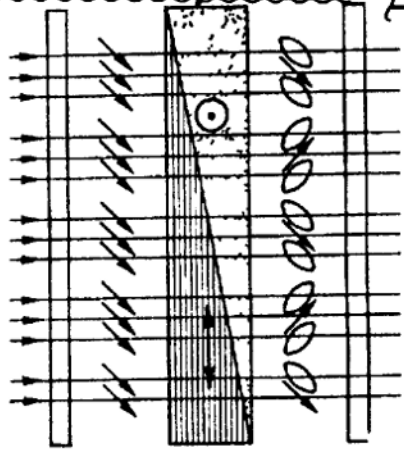
$$\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)^2 = 0 \Rightarrow y = \frac{b}{a} \cdot x$$

Світло залишається лінійно поляризованим без зміни площини поляризації.

Аналіз стану поляризації

Треба вміти розрізнити і виміряти параметри: лінійно поляризованого світла, циркулярно- та еліптично поляризованого, світла природного та циркулярно поляр.

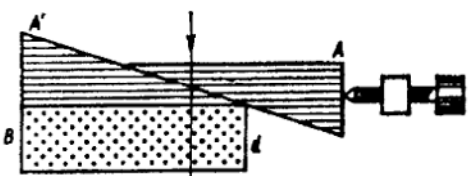
Компенсація Бабіне



еліптично- та частково-поляриз.

2 клина, виготовлені із кварцу із взаємно перпендикул. осі!

Промінь світла проходить в клинах різні шляхи:  $d_1$  та  $d_2$ . Звизгає промінь в I клину стає незвизгає променем в II клину і навпаки. Додаткова різниця ходу  $\Delta = (n_o - n_e)d_1 + (n_e - n_o)d_2 = (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$



Компенсація Солейля

$(d_1 - d_2)$  - вимірюємо;

$$\Delta = (n_o - n_e)d_1 + (n_e - n_o)d_2 = (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$$

$(n_o - n_e)$  - табульовано;

$\Delta\varphi$  - знаходимо

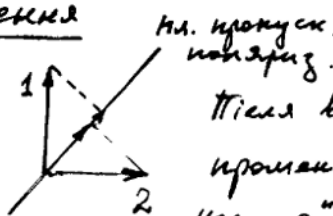
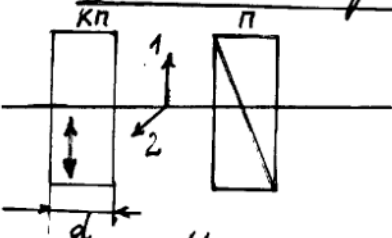
## Інтерференція лінійно поляризованих хвиль

Якщо хвилі поляризовані ортогонально, то вони ніколи не можуть утворити інтерференційну картину.

Тобто: "e" та "o" промені, між якими виникає різниця фаз, не можуть інтерферувати між собою через те, що  $\vec{E}_o \perp \vec{E}_e$ , хожа  $\Delta\varphi = \text{const}$ .

Але набіг фаз між "e" та "o" променями в анізотр. кристалі, не змінюючи інтенсивності, впливає на поляризацію променя на виході. Зміну поляризації за допомогою аналізатора можна трансформувати в зміну інтенсивності.

### Схема спостереження



Після виходу із КП промені втратили право наз. "e" та "o": стали 1 та 2

Напрямок коливань в двох променях, спочатку поляризованих у взаємно перпендикулярних напрямках, можна звести в одну площину за допомогою поляризатора, площина пропускання якого не співпадає з площиною коливань ні одного із променів.

Дослід показав, що: 1) якщо на КП падає циркулярне світло, то вони на виході КП дають не когерентні промені (інтерферувати вони не можуть); 2) якщо на КП падає лінійно поляризоване світло, то промені 1 та 2 - когерентні.

Пояснення: ... див. Савельєв... § 31 (с. 172)

Після КП світло буде еліптично-поляризованим.  
 Форма і орієнтація еліпса залежить від товщини ( $d$ ).  
 Якщо КП в різних місцях має різну товщину, то для кожної з цих товщин ( $d_i$ ) буде своя форма еліпсу.  
 При збому інтенсивність світла, що пройшло через КП в різних її місцях, — однакова. Але такий розподіл різко зміниться після проходження світлом поляризатора П. Цей поляризатор пропускає тільки ті екладові промені 1 та 2, які співпадають з напрямком пропускання П.

Якщо світло, яке падає на КП, монохроматичне, то інтерф. картина після П складається із світлих і темних плям, які відновлюють різним товщинам КП.

При обертанні П на  $90^\circ$  місце мінімумів займають максимуми, і навпаки.

У білому світлі інтерф. картина буде кольоровою ( $n(\lambda)$ ).  
 При обертанні П на  $90^\circ$  кольори картини переходять у додаткові: черв.  $\rightarrow$  голубе; зелен.  $\rightarrow$  фіол.; синь  $\rightarrow$  жовте.

Інтерференції не буде, якщо поляризації одного з променів (1 або 2) співпадає з площиною пропускання поляризатора П.

Якщо на КП направити неполяризоване світло або зворотн. поляризатор (аналізатор), то інтерф. картина зникає.

Якщо у якійсь частині екрана використати не амплітудно чутливу фотоплівку, а середовище, чутливе до поляризації (ще краще до фази) хвилі, то інтерф. — без П!



## Оптична активність

О.а. - природка (не штучка).

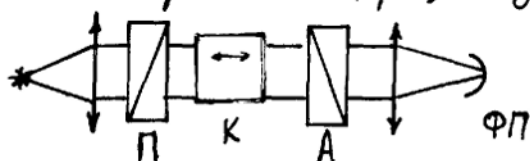
О.а.  $\equiv$  гіротропія.

О.а.  $\equiv$  обертання площини поляризації світла при проходженні світла крізь певні речовини.

Такі речовини наз. гіротропними, або природно активними. Їх гіротропічні властивості пов'язані (визначаються) із структурою молекул або кристалічною структурою.

О. активними н.в. рідинки, розчини і кристали.

Водний розчин цукру та кварц. Кварц - кристалічний (не плавлений). Кварц - анізотропний одновісний кристал і, разом з тим, оптично акт. кристал.



К - кварцева плівка

$\text{П} \perp \text{А}$

Без К на ФП - нуль.

Якщо в схему вставити К, то на ФП з'явиться сигнал, який можна скомпенсувати (виміряти) аналізатором А.

$$\Delta\varphi = \alpha_0 \cdot d \quad \alpha_0 - \text{обертальна здатність.}$$

Для кварцу  $\alpha_0 = 21,7^\circ/\text{мм}$  для  $\lambda = 560 \text{ нм}$

$$\alpha_0 \sim \frac{1}{\lambda^2} - \text{сила залежність: } \Delta\varphi_{\text{кв}} = 20^\circ$$

Кварц має дві модифікації:  $\Delta\varphi_{\text{кв.ол.}} = 50^\circ$

"правий кварц" та "лівий кварц"

О.а. рідини. Біо встановив, що  $\varphi = [\alpha] \cdot d \cdot c$

$[\alpha]$  - стала обертання;  $c$  - концентрація розчину.

Для водних розчинів цукру при  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $\lambda = 5893 \text{ \AA}$

$$[\alpha] = 66.46^\circ$$

Оптична активність як особливий випадок 18.

двопроменезаломлення. (Теорія Френеля)

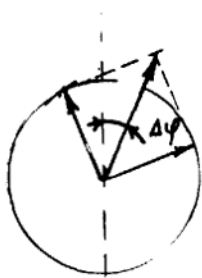
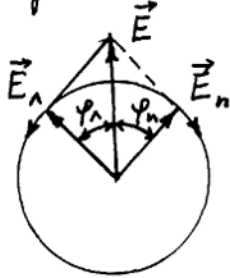
За Френелем існує  $n_o$  та  $n_e$  ( $n_a$  та  $n_n$ )

$\Delta n = n_n - n_a$  - різниця пок. заломлення для кругового (циркулярного) двопроменезаломлення.

Будь-яке лін. коливання можна представити у вигляді суми 2-х кругових коливань:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_0 \cos \omega t \\ E_y &= E_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_a = E_x + i E_y \quad \text{ліве обертання}$$

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_0 \cos \omega t \\ E_y &= -E_0 \sin \omega t \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_n = E_x - i E_y \quad \text{праве обертання}$$



$|\vec{E}| = \text{const}$  - середовище не поглинає

$$\begin{cases} E_a = E_0 e^{i\omega t} \\ E_n = E_0 e^{-i(\omega t - \Delta\varphi)} \end{cases}$$

$n_a = n_n$

$v_a = v_n$

$\varphi_a = \varphi_n$

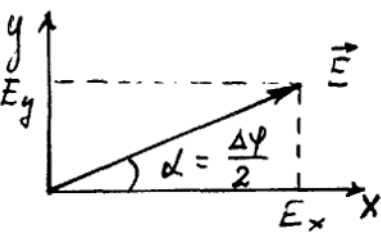
$n_a \neq n_n$  ( $n_n < n_a$ )

$v_n > v_a$

$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_a$

$$E_a + E_n = E_0 e^{i\omega t} + E_0 e^{-i(\omega t - \Delta\varphi)} = e^{i\frac{\Delta\varphi}{2}} \cdot E_0 \left[ e^{i(\omega t - \Delta\varphi/2)} + e^{-i(\omega t - \Delta\varphi/2)} \right] =$$

$$= 2E_0 e^{i\frac{\Delta\varphi}{2}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$



$$\begin{cases} E_x = 2E_0 \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \cos\left(\omega t - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ E_y = 2E_0 \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \cos\left(\omega t - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{cases}$$

Кут повороту ( $\alpha$ ) залежить від різниці фаз ( $\Delta\varphi$ )

Фаза "правій" хвилі  $\varphi_n = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_n \cdot d$

Фаза "лівої" хвилі  $\varphi_\lambda = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n_\lambda \cdot d$

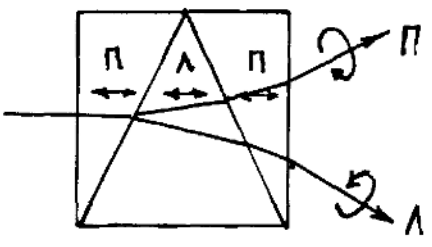
$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_\lambda - n_n) d = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot c \left( \frac{1}{v_\lambda} - \frac{1}{v_n} \right) \cdot d$$

$$\alpha = \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{\pi}{\lambda_0} (n_\lambda - n_n) \cdot d$$

Якщо  $n_\lambda > n_n \Rightarrow v_\lambda < v_n$  - правий кристал

Якщо  $n_\lambda < n_n \Rightarrow v_\lambda > v_n$  - лівий кристал

Френель перевіряв своє припущення за допомогою досліду з призмою Френеля:



Складна призма із 3-х кусків кварцу (п-л-п).

Об'єднати всіх 3-х кусків || осеві призми, щоб не було природк. дифракцій.

На границі I і II призи промінь розділяється через те, що  $n_\lambda \neq n_n$ . Те ж саме на границі II і III призм.

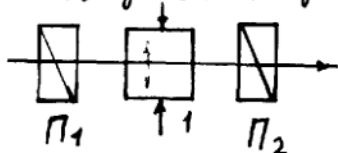
На виході - 2 променя з лівою та правою циркуляризациєю.

поляризаціїєю.

# Штудія оптична анізотронія

12.

## Анізотронія при механічній нарузі (фотопружність)



1 - зразок (куб) з кльовеного кварцу, оргскла, ...

$$n_o - n_e = k \cdot P$$

$k$  - стала Брюстера (константа ретровини)

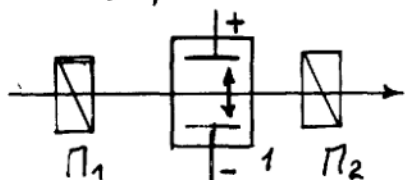
$$P = F/S \text{ - тиск}$$

Тиск (стискання або розтяг) м.б. фотостарожним  $\Rightarrow$  зразок стає оптично двовісним

Використовується для виявлення залишкових мех. напруг в прозорих тілах (кінескопи, лампи тощо).

Для непрозорих конструкцій - моделювання з певним коефіцієнтом подібності.

## Анізотронія в електричному полі (ефект Керра)



1 - Кювета з рідиною та ел. конденс.

Вкл. ел. поля призводить до появи сигналу в системі

$$P_1 \perp P_2$$

Оптична вісь направлена вздовж силових ліній ел. поля.

$\epsilon$  рідини з  $n_e > n_o$ ;  $n_e < n_o$ ;  $n_e = n_o$  (ефекту Керра немає) - експеримент.

$$\Delta n = V \cdot \lambda \cdot E^2 \Rightarrow \Delta = v \cdot \Delta n \Rightarrow \Delta \varphi = k \cdot \Delta$$

Через те, що  $\Delta n \sim E^2$ , знак різниці фаз не залежить від напрямку ел. поля.

а) Для неполярних рідин (теорія Ланжевена)

вельшка коэф. Керра  $V > 0$ . - додатній «квазі-кристал».

б) Для полярних рідик (теорія Борка, 1915 р.):

Диполі орієнтуються по полю:  $\vec{P} = \alpha \vec{E}$

Для нітробензолу  $\epsilon = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ CGSE}$  ( $\epsilon > 0$ )

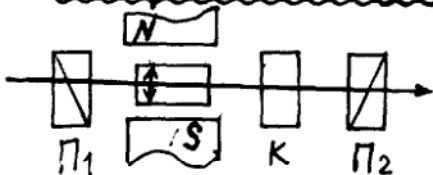
Для квіти з  $l = 5 \text{ см}$ ,  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $U = 1500 \text{ В} \Rightarrow$

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} ! \left( \frac{1}{4} \text{ півлітка!} \right)$$

Час переміщення для нітробензолу  $\zeta \approx 0.5 \cdot 10^{-11} \text{ с}$

Анізотропія в магнітному полі (ефект Коттона -

Мютона)



К - компенсатор (для розлічення зсуву фаз)

$$\Delta n = D \cdot B^2$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot l = 2\pi C'_0 \cdot l \cdot B^2$$

$B$  - м. індукція;  $C'_0$  - стала Коттона -

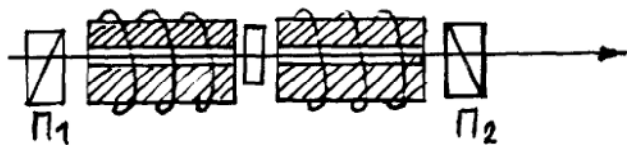
Мютона, яка залежить від природи речовини.

Для нітробензолу  $C'_0 = 2.25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-2}$ .

Для  $B = 1 \text{ Тл}$  та  $l = 1 \text{ м} \Rightarrow \Delta\varphi = 0.14 \text{ рад}$ .

Ефект Фарадея (1846 р.)

В попередніх ефектах був індукований зсув фаз (ефект Френеля-незломлення). В ЕФ - обертання площини поляризації  $\Delta\theta = V \cdot l \cdot B$



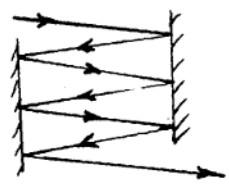
$V$  - стала Верде;  
 $l$  - довжина зразка;  
 $B$  - індукція магнітного поля.

Е речовини з  $V > 0$  (правообертанні, додатні), або позитивні). Речовини з  $V < 0$  - лівообертанні (негативні, від'ємні)

Напряги обертання площини поляризації в ЕФ для кожної ребовини визначається лише напрямом магнітного поля і не залежить від напрямку світла.

Час запізнення (інерція ЕФ) -  $\sim 10^{-9}$  с.

Підсилення ЕФ шляхом багаторазового проходження світлом робочого зразку:  
Стала Верде  $V \sim \frac{1}{\lambda^2}$



Для спец. сорту скла - важкого флінту  $V = 0.08 \text{ см}^{-1} \cdot \text{Ерст}$

Схема аналізу стану поляризації світлового променя

