

## Тема 16. Поляризація електромагнітних хвиль

### Питання лекції:

1. Явище поляризації. Плоска поляризація.
2. Закон Малюса.
3. Еліптично і циркулярно поляризоване світло.
4. Поляризація при відбиванні і заломленні. Закон Брюстера.

### 1. Явище поляризації.

Ми вивчали явища інтерференції і дифракції електромагнітних хвиль. При цьому не звертали уваги на те, що електромагнітні хвилі – поперечні, що як ми вже знаємо, впливає із рівнянь Максвелла. Тепер розглянемо явища, які пов'язані з поперечністю електромагнітних хвиль. До таких належить явище поляризації електромагнітних хвиль.

У поперечних хвилях коливання відбуваються в напрямках, перпендикулярних до напрямку поширення хвиль. Зокрема, в електромагнітній хвилі коливання вектора  $\vec{E}$  (а також  $\vec{H}$ ) можуть відбуватися у горизонтальній, вертикальній чи інших площинах (рис. 16.1).

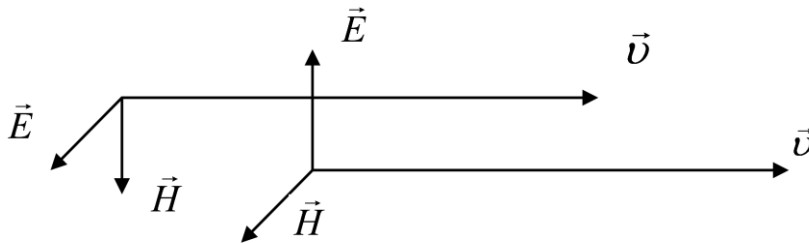


Рис. 16.1



У природному світлі коливання відбуваються в будь-яких площинах, тому що різні атоми випромінюють по різному, хаотично, безладно. Однак природне світло можна **поляризувати** – виділити коливання вектора  $\vec{E}$ , які відбуваються в якійсь одній площині – площині коливань. Це можна здійснити за допомогою **анізотропних кристалів**. Анізотропних – це таких, фізичні властивості яких залежать від напрямку, тобто, орієнтації в кристалі. Властивість поляризувати світло мають кристали тур-

маліну, ісландського шпату ( $CaCO_3$ ), кварцу. Ці кристали мають один напрям, який відзначається високою симетрією стосовно оптичних характеристик і називається **оптичною віссю**. В напрямках, перпендикулярних до оптичної осі, кристали анізотропні, наприклад, мають різні значення показника заломлення. Такі кристали називаються **поляризаторами**.

Якщо природне світло пропустити через поляризатор перпендикулярно до оптичної осі (рис. 16.2), то пройде тільки світло з коливанням вектора  $\vec{E}$  в площині, яка паралельна до оптичної осі  $OO$  (така площина називається **площиною поляризатора**). Коливання ж вектора  $\vec{E}$ , які перпендикулярні до площини поляризатора, будуть затримані цілком або частково.

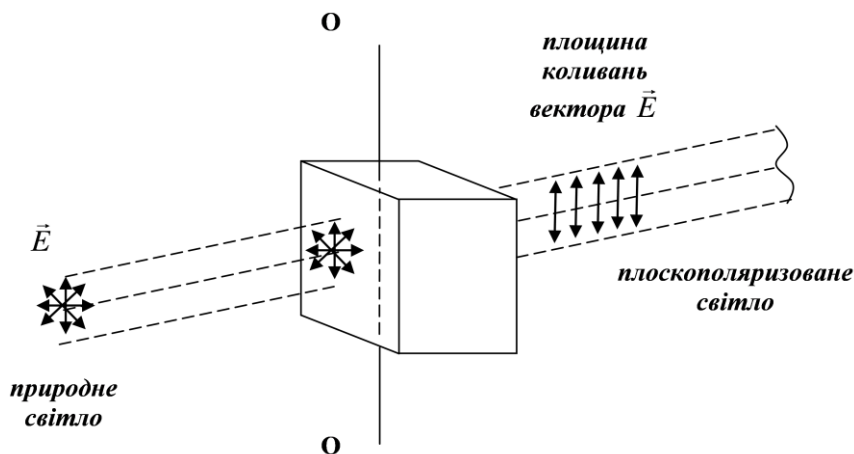


Рис. 16.2

Якщо проходять тільки коливання паралельні до площини поляризатора, то таке світло називається **плоско поляризованим** (або **лінійно** поляризованим). При наявності перпендикулярної складової світло буде **частково поляризованим**, тобто таким, у якому коливання одного напрямку переважають над коливаннями інших напрямків.

На рис. 16.3 зображено коливання вектора  $\vec{E}$  в природному, частково поляризованому і плоско поляризованому світлі.



природне світло

$\vec{E}$



max



min

частково  
поляризоване

$\vec{E}$



лінійно поляризоване

Рис. 16.3

Якщо частково поляризоване світло пропустити через поляризатор, який обертається (рис. 16.4), то інтенсивність світла, що проходить, буде змінюватись у межах від  $I_{\max}$  до  $I_{\min}$ .

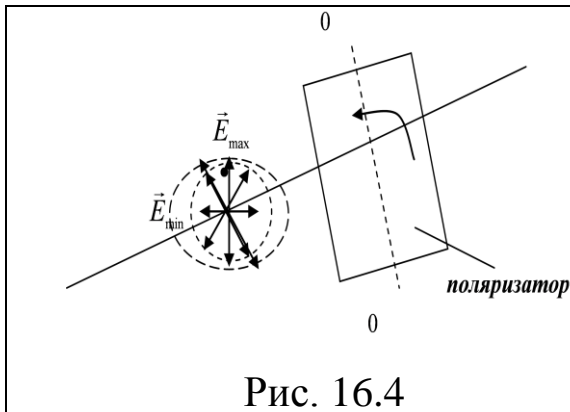


Рис. 16.4

Величину

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

називають **ступенем поляризації**.



Для лінійно поляризованого світла  $P=1$ , а для природного світла  $P=0$ .

Треба зазначити, що хвилі стають поляризованими не тільки внаслідок проходження їх через поляризатор.



антена

Рис. 16.5

Наприклад, короткі електромагнітні хвилі передавача УКХ чи телевізійного центра сильно поляризовані, що визначається властивістю випромінювача – антени (рис. 16.5). Приймальні антени теж необхідно встановлювати так, щоб коливання електричного вектора співпали з напрямком випромінювача.

Поляризовані хвилі, електричний вектор яких коли-

вається у вертикальній площині, менше поглинаються поверхнею Землі і тим самим збільшується дальність радіопередач.

## 2. Закон Малюса

Закон Малюса визначає проходження через поляризатор плоско поляризованого світла. Розглянемо випадок, коли коливання здійснюються у площині, яка утворює кут  $\varphi$  з площиною поляризатора (з оптичною віссю). Наприклад (рис. 16.6), нехай природне світло проходить через поляризатор  $\Pi_1$ , поляризується ним і падає на поляризатор  $\Pi_2$ .

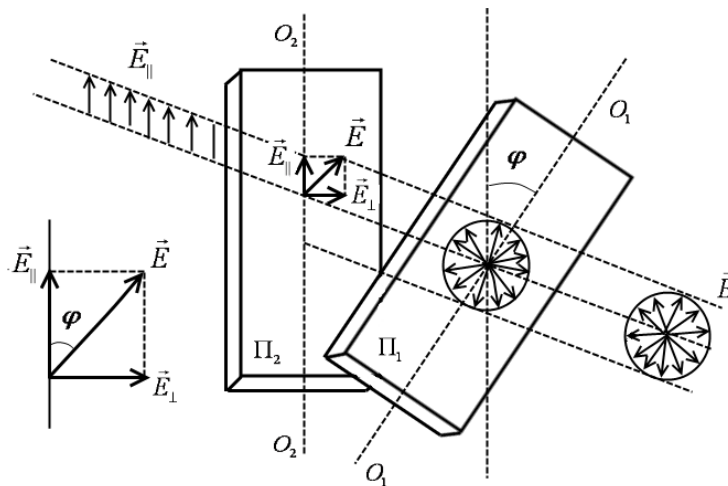


Рис. 16.6

Через поляризатор  $\Pi_2$  пройде складова  $\vec{E}_{//}$ , тобто та складова, що співпадає з оптичною віссю поляризатора  $\Pi_2$ . Згідно з рисунком

$$E_{//} = E_{o//} \cos \varphi. \quad (2)$$

Квадрат вектора  $\vec{E}$  пропорційний інтенсивності:

$$E_{//}^2 = E_{o//}^2 \cos^2 \varphi, \quad (3)$$

$$I_{//} = I_{o//} \cos^2 \varphi. \quad (4)$$

Це закон Малюса, який формулюється так: **інтенсивність поляризованої хвилі, яка проходить через поляризатор, пропорційна квадрату косинуса кута між площиною поляризатора (оптичною віссю) і вектором  $\vec{E}$ .**

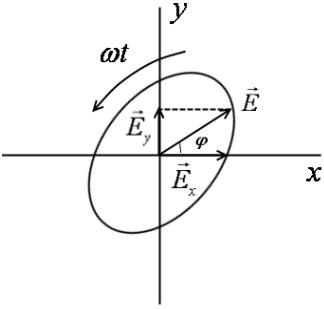
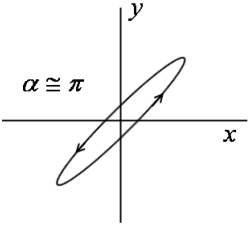
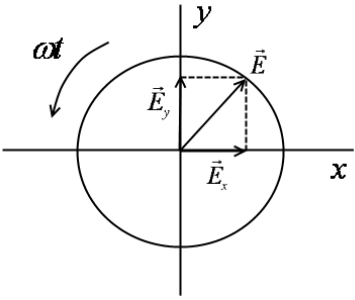
### 3. Еліптично і циркулярно поляризоване світло

Поляризоване світло – це не тільки плоско поляризоване. Поляризованим називається світло, у якому вектор  $\vec{E}$  змінюється за певним законом. Коли кінець вектора  $\vec{E}$  описує еліпс – світло називається еліптично поляризованим, а коли коло – циркулярно поляризованим або поляризованим по колу. Розглянемо детальніше, як виникають ці поляризації.

Нехай поширюються дві когерентні хвилі, в яких коливання відбуваються у двох взаємно перпендикулярних напрямках :

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0} \cos(\omega t) \\ E_y &= E_{y0} \cos(\omega t + \alpha). \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\alpha$  – різниця фаз цих коливань.

	<p>При додаванні двох взаємно перпендикулярних коливань вектор <math>\vec{E}</math> у загальному випадку описує еліпс (рис. 16.7а).</p>
	<p>Якщо <math>\alpha = \pi</math> – еліпс вироджений і тоді коливання вектора <math>\vec{E}</math> відбуваються вздовж однієї лінії, тобто світло – <b>лінійно поляризоване</b> (рис. 16.7б).</p>
 <p>Рис. 16.7</p>	<p>При <math>\alpha = \pi/2</math> відбувається поляризація по колу (циркулярно поляризоване світло ( рис. 16.7в). Якщо дивитися на промінь і вектор <math>\vec{E}</math> повертається за годинниковою стрілкою, маємо праву поляризацію, а коли проти – ліву.</p>

Зазначимо, що при коловій поляризації вектор  $\vec{E}$  займає різні положення. В природному світлі вектор  $\vec{E}$  теж займає будь-яке положення, однак відмінність у тому, що у природному світлі це відбувається хаотично, а в циркулярно-поляризованому – за певним законом.

#### 4. Поляризація при відбиванні і заломленні. Закон Брюстера

Як уже зазначалось (рис. 16.2), у природному світлі коливання векторів  $\vec{E}$  відбуваються хаотично і мають всі можливі орієнтації. Однак будь-який вектор можна представити через компоненти  $E_{//}$  і  $E_{\perp}$ :

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= (\vec{E}_1)_{//} + (\vec{E}_1)_{\perp}, \\ \vec{E}_2 &= (\vec{E}_2)_{//} + (\vec{E}_2)_{\perp}, \\ &\dots\dots\dots \\ \vec{E}_n &= (\vec{E}_n)_{//} + (\vec{E}_n)_{\perp}.\end{aligned}\tag{6}$$

Додавши ліві і праві сторони рівнянь (6), отримаємо:

$$\vec{E} = \vec{E}_{//} + \vec{E}_{\perp},\tag{7}$$

де

$$\begin{aligned}\vec{E}_{//} &= (\vec{E}_1)_{//} + (\vec{E}_2)_{//} + \dots + (\vec{E}_n)_{//}, \\ \vec{E}_{\perp} &= (\vec{E}_1)_{\perp} + (\vec{E}_2)_{\perp} + \dots + (\vec{E}_n)_{\perp}.\end{aligned}$$

Таким чином, модуль вектора  $\vec{E}$  (тобто величина  $E$ ) може бути представлений через компоненти  $E_{//}$  і  $E_{\perp}$ :

$$E = \sqrt{E_{//}^2 + E_{\perp}^2}.\tag{8}$$

На рис. 16.8 компонент  $E_{//}$  падаючого світла представлений стрілочкою в площині рисунка, а компонент  $E_{\perp}$  – точкою, що символізує його перпендикулярність до площини рисунка.

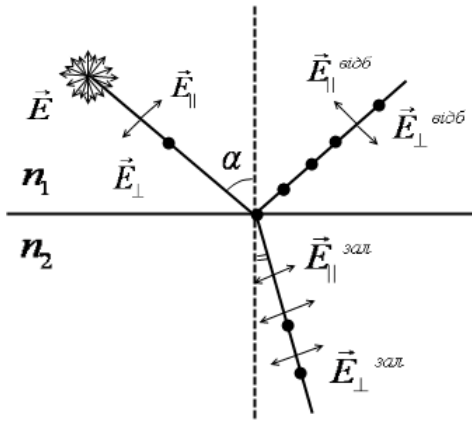


Рис. 16.8

Отже, якщо природне світло падає на границю двох діелектриків (наприклад повітря-скло), то у відбитому промені переважають коливання, перпендикулярні до площини падіння (рис. 16.8). Позначимо ці коливання через  $E_{\perp}^{відб}$ .

У заломленому промені переважають коливання, паралельні до площини падіння. Позначимо їх  $E_{\parallel}^{зал}$ . Однак, у відбитому промені частково є коливання паралельні площині падіння ( $E_{\parallel}^{відб}$ ), а в заломленому – перпендикулярні ( $E_{\perp}^{зал}$ ). Ступінь поляризації відбитого і заломленого променів при різних кутах падіння впливає із розв'язку рівнянь Максвелла при врахуванні умов на границі діелектрика, а саме, що  $E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$ ,  $D_{n1} = D_{n2}$ ,  $H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$ ,  $B_{n1} = B_{n2}$ .

В результаті отримують так звані формули Френеля. Наведемо ці формули без доведення:

$$E_{\perp}^{відб} = -E_{\perp} \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad E_{\perp}^{зал} = E_{\perp} \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)},$$

$$E_{\parallel}^{відб} = E_{\parallel} \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}, \quad E_{\parallel}^{зал} = E_{\parallel} \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)}. \quad (6)$$

Існує такий кут падіння  $\alpha = \alpha_B$  (кут Брюстера), при якому

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{12}, \quad (7)$$

де  $n_{12}$  – відносний показник заломлення двох середовищ. Формула (7) має назву закону Брюстера. Кут  $\alpha_B$  – кут Брюстера. При куті Брюстера відбитий промінь і заломлений – взаємно перпендикулярні. Дійсно,

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = n_{12}. \quad (8)$$

Але ми знаємо, що  $n_{12} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ .

Тому

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (9)$$

або (оскільки  $\alpha = \alpha_B$ )

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta}. \quad (10)$$

Звідси виходить, що

$$\cos \alpha_B = \sin \beta. \quad (11)$$

Так як  $\cos \alpha_B = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right)$ , то (11) запишемо:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_B\right) = \sin \beta, \text{ звідки } \frac{\pi}{2} - \alpha_B = \beta,$$

тобто 
$$\alpha_B + \beta = \frac{\pi}{2}. \quad (12)$$

З рис. 16.9 видно, що відбитий і заломлений промені дійсно взаємно перпендикулярні. Це дає можливість показати, що при куті Брюстера відбитий промінь повністю поляризований.

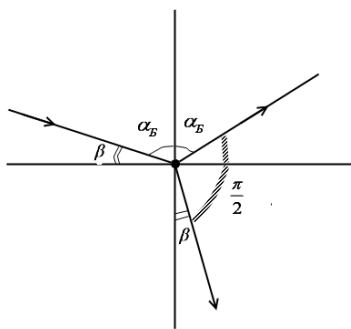


Рис. 16.9

З формули Френеля випливає, що у відбитій хвилі амплітуда складової  $E_{//}^{eio\delta}$  дорівнює нулеві:

$$\begin{aligned} E_{//}^{eio\delta} &= E_{//} \frac{\operatorname{tg}(\alpha_B - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha_B + \beta)} = \\ &= E_{//} \frac{\operatorname{tg}(\alpha_B - \beta)}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{2}} = E_{//} \frac{\operatorname{tg}(\alpha_B - \beta)}{\infty} = 0. \end{aligned}$$

Залишаються лише коливання, які перпендикулярні до площини падіння. Тобто, відбитий промінь при куті Брюстера повністю поляризований.

Можна показати, що заломлений промінь при куті Брюстера також поляризований (хоча не повністю) у площині падіння ( $E_{//}^{zal}$ ).



### Питання для контролю

1. В чому полягає явище поляризації світла ?
2. Які кристали називаються анізотропними ?
3. Яке світло називається лінійно поляризованим ?
4. Як визначається ступінь поляризації ?
5. Що таке еліптично та циркулярно поляризоване світло ?
6. Запишіть та поясніть закон Малюса.
7. Пояснити поляризацію світла при відбиванні і заломленні ?
8. Пояснити закон Брюстера.

### Допоміжна література

1. *Малинко В.Н., Сусь Б.А.* Курс фізики, т. 2, ч. 2. – Київ: КВВІУС, 1987.  
– § 71, 73, 74.
2. *Савельєв І.В.* Курс общей фізики, т. 2. – М.: Наука, 1978.  
– § 110, 134, 135.

