

ŠVIESOS ATSPINDŽIO TYRIMAS

Užduotys

1. Išmatuoti į dielektrikų sandūrą krintančios ir atsispindėjusios šviesos lygiagrečiosios ir statmenosios dedamosios intensyvumą įvairiems kritimo kampams.
2. Nustatyti nuo dielektriko atsispindėjusios šviesos atspindžio faktorių ir poliarizacijos laipsnį įvairiems kritimo kampams iš bandymo duomenų bei pagal Frenelio formules.

Teorija

Šviesos atspindys yra reiškiny, kai krintant šviesos bangai į dviejų terpių sandūrą atsiranda banga, sklindanti nuo terpių skiriamosios ribos į pirmąją terpę. Šviesos atspindys priklauso nuo sandūros pobūdžio. Jei skiriamosios paviršiaus nelygumai gerokai mažesni už bangos ilgį, vyksta *veidrodinis* šviesos atspindys; jei nelygumų matmenys artimi bangos ilgiui – *difuzinis* atspindys. Paprasčiausias yra šviesos atspindys nuo begalinės plokščios dviejų vienalyčių terpių sandūros (*Frenelio atspindys*). Atsispindėjusios šviesos sklidimo kryptis nepriklauso nuo terpių savybių. Atsispindėjęs spindulys yra kritimo plokštumoje. Kritimo kampas lygus atspindžio kampui. Atsispindėjusios bangos amplitudė ir fazė priklauso nuo terpių savybių, bangos poliarizacijos ir kritimo kampo.

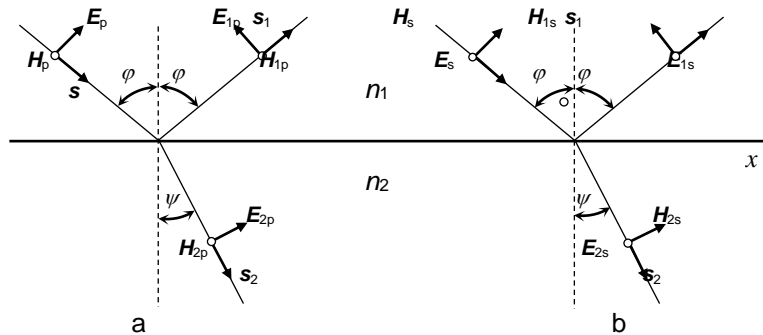
Panagrinėsime dvi nelaidžias skirtingos dielektrinės skvarbos ϵ_1 ir ϵ_2 terpes (magnetinė skvarba $\mu_1 = \mu_2 = 1$). Į plokščią dviejų terpių sandūrą iš pirmosios terpės kampu φ krinta banga \mathbf{EH} (17.1 pav.), kuri iš dalies atsispindi ($\mathbf{E}_1\mathbf{H}_1$) tuo pačiu kampu φ , kita dalis pereina į antrąją terpę ($\mathbf{E}_2\mathbf{H}_2$) lūždamą kampu ψ . Vektoriai \mathbf{S} , \mathbf{S}_1 ir \mathbf{S}_2 nusako atitinkamų bangų energijos sklidimo kryptis. Jie statmeni bangos frontui bei vektoriams \mathbf{E} ir \mathbf{H} . Pirmojoje terpėje yra dvi bangos – krintančioji ir atsispindėjusioji,

jos sklinda tuo pačiu faziniu greičiu $v_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}}$, o antrojoje – viena lūžusioji, sklindanti

faziniu greičiu $v_2 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_2}}$.

Dviejų terpių sandūroje elektromagnetinio lauko lygtims, t. y. Maksvelo (*Maxwell*) lygtims galioja kraštinės sąlygos. Viena jų nusako tangentinių \mathbf{E} ir \mathbf{H} dedamųjų lygybę abiejose sandūros pusėse bet kuriuo laiko momentu:

$$(\mathbf{E}_t)_1 = (\mathbf{E}_t)_2 ; \quad (\mathbf{H}_t)_1 = (\mathbf{H}_t)_2.$$



17.1 pav. Šviesos atspindys ir lūžis dielektrikų sandūroje

Tarkime, kad natūraliąją (nepoliarizuotąją) šviesą galima išreikšti dviejų plokščiųjų bangų, tiesiai poliarizuotų tarpusavyje statmenose plokštumose ir sklindančių viena kryptimi tuo pačiu faziniu greičiu, suma.

Bet kurį vektorių galima išskaidyti į dvi dedamąsias: vieną elektrinio vektoriaus dedamąją bangos kritimo plokštumoje (17.1 a pav.), ją žymėsime indeksu p, o kitą – jai statmenoje plokštumoje (17.1 b pav.), žymėsime indeksu s. Magnetinis vektorius \mathbf{H} yra statmenas \mathbf{E} ir \mathbf{S} (paveiksle \mathbf{H} statmenas brėžinio plokštumai).

Atsižvelgdami į pradinę virpesių fazę užrašome kraštines sąlygas atitinkamoms vektorių \mathbf{E} ir \mathbf{H} amplitudžių projekcijoms į x ašį:

$$\left. \begin{aligned} E_p \cos \varphi - E_{1p} \cos \varphi &= E_{2p} \cos \psi, \\ H_p + H_{1p} &= H_{2p}. \end{aligned} \right\}$$

$$\text{Kadangi } H_p = \sqrt{\varepsilon_1} E_p = n_1 E_p; \quad H_{1p} = n_1 E_{1p}; \quad H_{2p} = n_2 E_{2p} \quad \text{ir} \quad n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \psi,$$

tai

$$\left. \begin{aligned} E_p - E_{1p} &= E_{2p} \frac{\cos \psi}{\cos \varphi}, \\ E_p + E_{1p} &= E_{2p} \frac{\sin \psi}{\sin \varphi}. \end{aligned} \right\}$$

Iš šios lygčių sistemos galima išreikšti atsispindėjusios šviesos elektrinio vektoriaus lygiagrečiąją dedamąją

$$E_{1p} = E_p \frac{\tan(\varphi - \psi)}{\tan(\varphi + \psi)} \quad (17.1)$$

ir lūžusios šviesos elektrinio vektoriaus lygiagrečiąją dedamąją:

$$E_{2p} = E_p \frac{2 \sin \psi \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)}. \quad (17.2)$$

Statmenųjų dedamųjų amplitudžių projekcijoms kraštinės sąlygos užrašomos taip:

$$\left. \begin{aligned} E_s + E_{1s} &= E_{2s}, \\ H_s \cos \varphi - H_{1s} \cos \varphi &= H_{2s} \cos \psi. \end{aligned} \right\}$$

Atlikus reikiamus matematinius veiksmus gaunamos atsispindėjusios ir lūžusios šviesos elektrinio vektoriaus dedamųjų išraiškos:

$$E_{1s} = -E_s \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (17.3)$$

$$E_{2s} = E_s \frac{2 \sin \psi \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (17.4)$$

(17.1), (17.2), (17.3) ir (17.4) išraiškos yra *Frenelio formulės*. Jos nusako atsispindėjusios ir lūžusios plokščiosios bangos amplitudes ir fazes, kai į nejudamą plokščią dviejų vienalyčių terpių sandūrą krinta monochromatinė plokščioji banga.

Atsispindėjusios šviesos intensyvumą apibūdina *atspindžio faktorius* $r = I_1/I = (E_1/E)^2$, t. y. atsispindėjusios šviesos intensyvumo, kuris proporcingas bangos amplitudės kvadratui, ir krintančiosios šviesos intensyvumo dalmuo. Naudojant Frenelio formules gaunamos tokios atspindžio faktorių išraiškos:

$$r_p = \frac{E_{1p}^2}{E_p^2} = \frac{\tan^2(\varphi - \psi)}{\tan^2(\varphi + \psi)} \quad \text{ir} \quad r_s = \frac{E_{1s}^2}{E_s^2} = \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)}. \quad (17.5)$$

Kadangi $E = E_p + E_s$ ir $I = E_p^2 + E_s^2 = I_p + I_s$, krintant natūraliajai šviesai suminis atspindžio faktorius

$$r = \frac{I_1}{I} = \frac{I_{1p} + I_{1s}}{I_p + I_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{1p}^2}{E_p^2} + \frac{E_{1s}^2}{E_s^2} \right) = \frac{r_p + r_s}{2} =$$

$$\frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{2 \sin^2(\varphi + \psi)} \left[1 + \frac{\cos^2(\varphi + \psi)}{\cos^2(\varphi - \psi)} \right]. \quad (17.6)$$

$$r = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2.$$

Nesunkiai įrodoma, kad kai $\varphi \rightarrow \pi/2$ (šliaužiamasis kritimas), atspindžio faktoriai (r_p , ir r_s) artėja prie vieneto. Pvz., vandenyje labai gerai atsispindi priešingas krantas arba gerokai nutolę daiktai, o žiūrint į vandenį statmenai dugnas matosi gerai, veidas – silpnai.

Bangos poliarizacija įvertinama parametru, kuris vadinamas *poliarizacijos laipsniu*:

$$P = \frac{I_{1s} - I_{1p}}{I_{1s} + I_{1p}}; \quad (17.8)$$

čia I_{1s} ir I_{1p} yra atsispindėjusiosios šviesos statmenosios ir lygiagrečiosios dedamųjų intensyvumai, kurie proporcingi elektrinio lauko stiprio amplitudės kvadratui. Poliarizacijos laipsnis priklauso nuo kritimo kampo. Naudojant Frenelio formules atsispindėjusios šviesos poliarizacijos laipsnį galima išreikšti taip:

$$P = \frac{\cos^2(\varphi - \psi) - \cos^2(\varphi + \psi)}{\cos^2(\varphi - \psi) + \cos^2(\varphi + \psi)}. \quad (17.9)$$

Kintant kritimo kampui kinta ne tik atsispindėjusios bangos intensyvumas ir poliarizacija, bet ir bangos fazė. Šviesa atspindi ir fazė nepakinta, arba pakinta dydžiu π . Pasirinktomis 17.1 pav. elektrinio vektoriaus dedamųjų virpesių kryptimis E_{1s} ir E_s yra vienodų fazių, jei jos vienodo ženklo, o E_{1p} ir E_p vienodų fazių, jei jų ženklai skirtingi.

Elektromagnetinei bangai atsispindint nuo optiškai tankesnės terpės *prarandama pusė bangos ilgio* (atsispindėjusiosios bangos vektoriaus \mathbf{E} fazė pakinta dydžiu π kritusiosios bangos atžvilgiu).

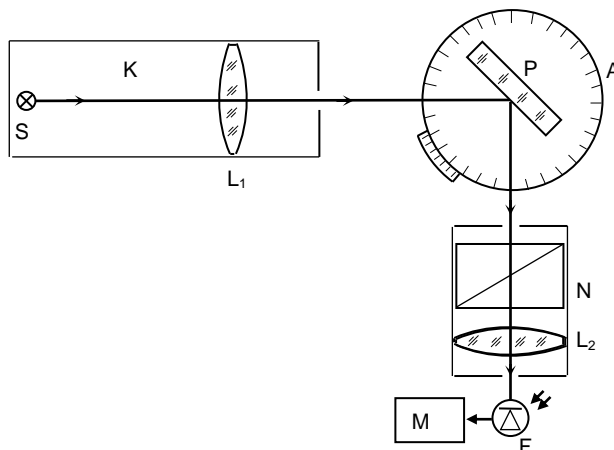
Kai $\varphi = \varphi_{\text{rib}}$, lūžio kampas $\psi = \pi/2$ ir lūžęs spindulys šliaužia sandūros paviršiumi. Kai $\varphi > \varphi_{\text{rib}}$, visa bangos energija atsispindi. Toks reiškinys vadinamas *visiškoju vidaus atspindžiu*, o kampas φ_{rib} – *ribiniu visiškojo vidaus atspindžio kampu*. Nagrinėjant visiškąjį vidaus atspindį naudojami kompleksiniai parametrai ir Frenelio formulių pavidalas išlieka panašus. Dėl p ir s dedamųjų fazių skirtumo pakinta bangos poliarizacijos pobūdis. Bendruoju atveju tiesiai poliarizuota banga tampa elipsiškai poliarizuota.

Tyrimas

Darbo įrangos schema pavaizduota 17.3 pav. Ją sudaro šviesos pluoštelio kolimatorius K, kuriame yra spinduoelis (kaitrinė lemputė) S lęšio L_1 židinyje. Išėjęs diafragmuotas lygiagrečių spindulių šviesos pluoštelis krinta į dielektriko plokštelę P, padėtą ant stalelio A. Plokštelė gali sukis apie vertikaliąją ašį. Atsispindėjęs šviesos pluoštelis pereina pro poliarizacijos prizmą (nikolį) N, kurią galima sukis apie optinę sistemos ašį ir nukreipiama lęšiu L_2 į fotoimtuvą F. Atsiradusi jame elektros srovė matuojama prietaisu M, kurio rodmenys proporcingi į jį patekusios šviesos intensyvumui.

Darbo metu reikia išmatuoti krintančios ir atsispindėjusios šviesos intensyvumą įvairiems kritimo kampams.

Matuojant atsispindėjusios šviesos dedamųjų intensyvumą, plokštelė pasukama maždaug 50° kampu ir šviesos imtuvas statomas į vietą, kurią atitinka didžiausias matuoklio rodmuo. Po to nikolis sukamas iki matuoklis rodo didžiausią vertę, kuri proporcinga statmenosios dedamosios intensyvumui I_{1s} . Nikolio orientacija nekeičiama ir matuojamas atsispindėjusios šviesos intensyvumas įvairiems kritimo kampams $10^\circ \div 85^\circ$ ruože.



17.3 pav. Tyrimo įrangos schema

Kai norima išmatuoti lygiagrečiosios dedamosios intensyvumą I_{1p} , nikolis pasukamas 90° kampu ir vėl matuojamas atsispindėjusios šviesos intensyvumas įvairiems kritimo kampams (nikolio orientacija nekeičiama). Nikolio orientaciją galima patikslinti pagal mažiausius matuoklio rodmenis.

Kritimo kampo vertė nustatoma pagal limbo ir nonijaus rodmenis. Iš pradžių plokštelė pasukama taip, kad atitiktų statmenam šviesos pluoštelio kritimui. Tokia

plokštelės vieta parenkama stebint atsispindėjusį šviesos pluoštelį – jis turi atsispindėti į kolimatoriaus angą. Atskaitoma limbo rodmenų vertė a_0 . Pasukus vamzdelį su nikoliu ir imtuvu norimu kampu $\varphi_i = a_0 + a_i$, atitinkamai sukama ir plokštelė, kurios orientacija patikslinama pagal didžiausius matuoklio rodmenis.

Matuojant krintančios šviesos intensyvumus I_s ir I_p , plokštelė su laikikliu nuimama nuo stalelio ir vamzdelis su nikoliu ir imtuvu nukreipiamas į kolimatorių. Tiksliai jo vieta koreguojama pagal didžiausius matuoklio rodmenis.

Matavimai atliekami kelis kartus ir skaičiavimams naudojamos vidutinės intensyvumų vertės.

Išmatavus I_{1s} , I_{1p} , I_s ir I_p vertes įvairiems šviesos kritimo kampams, pagal (17.5), (17.6), (17.8) ir (17.9) formules skaičiuojami atspindžio faktoriai r_s , r_p ir r ir poliarizacijos laipsnis P . Eksperimentiniai rezultatai gaunami įrašius išmatuotas intensyvumų vertes, o teorinių rezultatų skaičiavimui reikia žinoti dar ir lūžio kampus ψ . Jie skaičiuojami pagal (17.7) išraišką. Briusterio kampo φ_B vertė nustatoma iš eksperimentinės poliarizacijos laipsnio P priklausomybės nuo šviesos kritimo kampo. Didžiausią P vertę atitinkantis kampas yra Briusterio kampas.

Brėžiami atspindžio faktorių ir poliarizacijos laipsnio priklausomybės nuo šviesos kritimo į dielektriko paviršių kampo eksperimentiniai ir teoriniai grafikai.