

6. Energetické poměry při odrazu optického záření na dielektriku (ověření Fresnelových vzorců pro odraz).

Teorie.

Chování elektromagnetické světelné vlny při odrazu, (resp. při lomu) na rozhraní dvou neabsorbujících homogenních a izotropních dielektrik lze zjistit z Maxwellových rovnic.

Řešením daného problému lze dospět k Fresnelovým vzorcům, což jsou základní vztahy vystihující amplitudy lomené a odražené rovinné harmonické elektromagnetické vlny pomocí amplitudy příslušného dopadajícího vlnění a pomocí odpovídajících úhlů dopadu a lomu vlny.

Pro amplitudy odražené vlny dostáváme

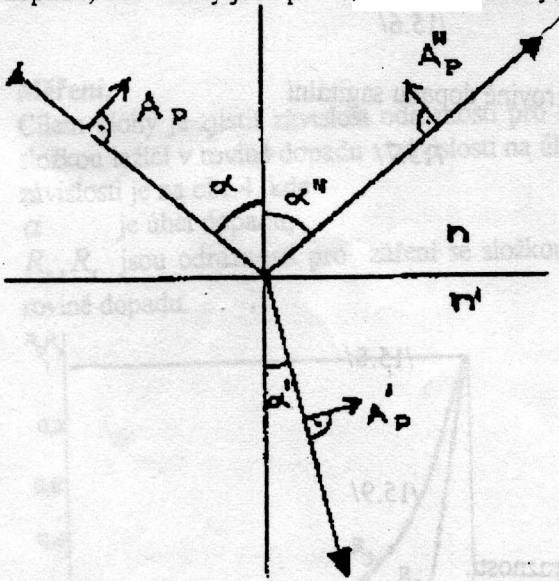
$$A_s'' = -A_s \frac{\sin(\alpha - \alpha')}{\sin(\alpha' + \alpha)}$$

$$A_p'' = -A_p \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \alpha')}{\operatorname{tg}(\alpha + \alpha')}$$

Komplexní amplitudu A vlny (A si můžeme představit jako vektor, který má velikost amplitudy a je kolmý na směr šíření vlny) je výhodné si rozložit na 2 složky - složku v rovině dopadu, tj. rovině **poledníkové** (p složka amplitudy), a složku v rovině k ní kolmé, tj. rovině **sagitální** (s složka amplitudy).

/15.1/

kde indexy p , (resp. s), označují složku amplitudy odražené vlny v rovině dopadu (poledníkové), resp. kolmou na rovinu dopadu (sagitální), $\alpha, \alpha', \alpha''$ označuje postupně úhel dopadu, úhel lomu a úhel odrazu - viz. obr. 1. Tento obrázek znázorňuje situaci v rovině dopadu, zakresleny jsou proto poledníkové složky, sagitální složky jsou k této rovině kolmé.



Obr. 1

Pro popis energetických poměrů při odrazu optického záření na povrchu dielektrika je základní veličinou postupného vlnění jeho intenzita, která je dána vztahem

$$I = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} A^2, \quad /15.2/$$

kde n, ε, μ charakterizují prostředí.

Pomocí Fresnelových rovnic odvodit vzorce pro odraznost, (resp. propustnost), dielektrika.

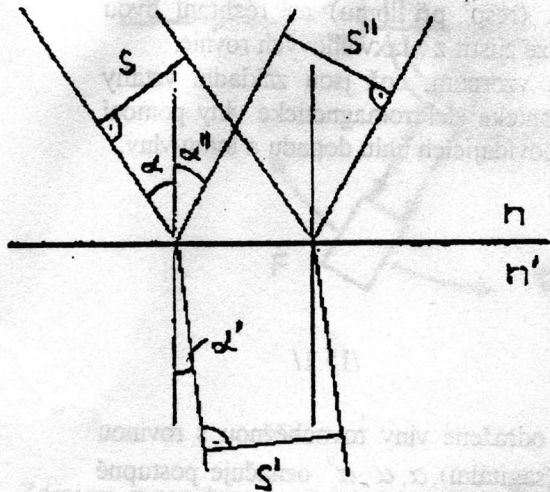
Je-li I intenzita dopadajícího záření na rozhraní, I' intenzita lomeného záření, I'' intenzita odraženého záření, je odraznost rozhraní dána vztahem

$$R = \frac{\phi_e''}{\phi_e} = \frac{I'' S''}{I S}, \quad /15.3/$$

kde S je řez dopadajícím homogenním optickým svazkem paprsků, S'' je řez odraženým svazkem paprsků, ϕ_e je dopadající zářivý tok a ϕ_e'' je odražený zářivý tok.

Protože podle obr.2 platí $S = S''$ /15.4/

je $R = \frac{I''}{I} = \left(\frac{A''}{A}\right)^2$ /15.5/



Obr.2

Označíme-li pro vlnění se složkou s kmitosměrem v rovině dopadu poledníkové

$$\frac{A''_p}{A_p} = r_p, \quad /15.6/$$

pro vlnění se složkou s kmitosměrem v rovině kolmé k rovině dopadu sagitální

$$\frac{A''_s}{A_s} = r_s, \quad /15.7/$$

je podle /15.1/

$$r_p = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \alpha')}{\operatorname{tg}(\alpha + \alpha')}, r_s = -\frac{\sin(\alpha - \alpha')}{\sin(\alpha + \alpha')} \quad /15.8/$$

a tudíž

$$R_p = r_p^2, \quad /15.9/$$

$$R_s = r_s^2,$$

kde r_p a r_s jsou relativní (Fresnelovy, amplitudové) odraznosti.

Dopadá-li nepolarizované nebo polarizované elektromagnetické vlnění na rozhraní dvou dielektrik, dochází při jeho odrazu a lomu k ovlivnění jeho polarizačního stavu.

Ze vztahu /15.8/ pro složku p je vidět, že blíží-li se jmenovatel nekonečnu, klesá hodnota odraznosti k nule.

Platí tedy

$$\operatorname{tg}(\alpha + \alpha') \rightarrow \infty \quad /15.10/$$

To pak podle vztahu /15.9/ znamená, že intenzita odraženého záření polarizovaného v rovině dopadu je rovna nule a v odražené části záření je obsažena pouze část polarizovaná v rovině kolmé k rovině dopadu. Tudiž je odražené záření lineárně polarizované -viz obr.3..

Pro úhel dopadu a odrazu pak musí podle /15.10/ platit

$$\alpha + \alpha' = \frac{\pi}{2}, \quad /15.11/$$

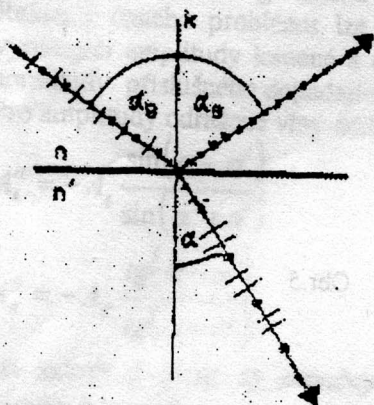
$$\alpha' = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Dosažením posledního vztahu do Snellova zákona dostáváme vztah pro úhel dopadu, při kterém je v odraženém světle obsažena jen složka s kmitoměrem kolmým k rovině dopadu - viz obr.3. Jde o tzv. Brewsterův úhel,

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n'}{n}$$

/15.12/

Záření šíří z prostředí o indexu lomu n do prostředí o indexu lomu n'



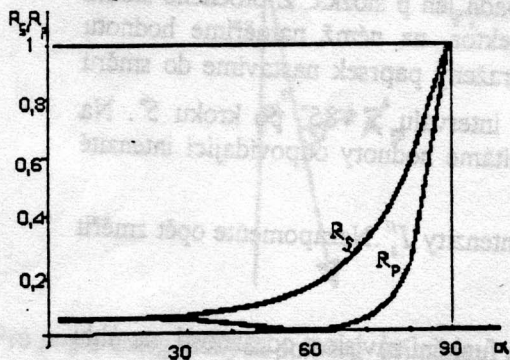
Obr.3

Měření.

Cílem úlohy je zjistit závislost odraznosti pro záření se složkou kolmou k rovině dopadu a se složkou ležící v rovině dopadu v závislosti na úhlu dopadu záření. Předpokládaný průběh závislosti je na obr.4, kde

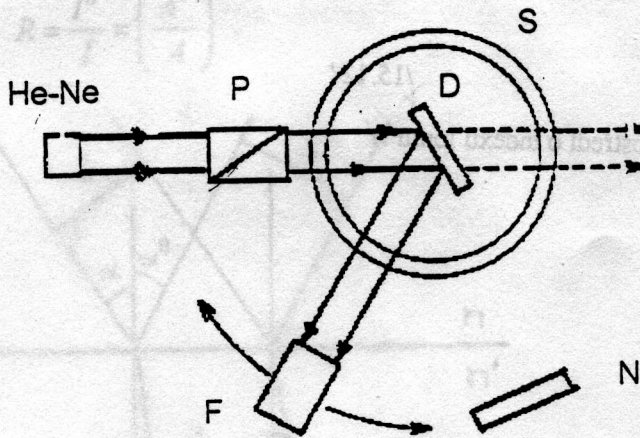
α je úhel dopadu,

R_p, R_s jsou odraznosti pro záření se složkou kolmou k rovině dopadu a se složkou ležící v rovině dopadu.



Obr.4

Schema experimentu je uvedeno na obr.5.



Obr.5

Zdrojem monochromatického úzce směrového záření je He-Ne laser zářící na vlnové délce 632,8 nm. Po průchodu polarizátorem P dopadá paprsek na skleněnou destičku D upevněnou na stolku S s rytou úhlovou stupnicí. Po odrazu dopadá na fotodiodu F, která slouží jako detektor. Změnu intenzity indikujeme pomocí změny napětí na detektoru pomocí voltmetru.

Na začátku experimentu nejprve určíme rovinu, ve které polarizátor propouští světelné vlnění. Skleněnou destičku pootočíme tak, aby odražený paprsek směřoval do směru paprsku dopadajícího. Pak je destička kolmá k paprsku. Pro materiál destičky $n = 1,5$ spočítáme Brewsterův úhel a destičkou pootočíme o hodnotu tohoto úhlu. Do nosiče N upevníme polarizátor a otáčením polarizátoru dosáhneme toho, že polarizátorem záření neprochází. Pak je rovina, ve které polarizátor propouští, nastavena do p orientace - v rovině dopadu. Polarizátor s držákem upevníme před laser, čímž na dielektrikum dopadá jen p složka. Z otočného stolku odstraníme destičku a do dráhy paprsku nastavíme detektor, na němž naměříme hodnotu odpovídající I_p . Do stolku opět upevníme destičku a odražený paprsek nastavíme do směru paprsku dopadajícího. Poté postupně otáčíme stoltem v intervalu $5^\circ - 85^\circ$ po kroku 5° . Na detektoru nastaveném do cesty odraženého paprsku odcítáme hodnoty odpovídající intenzitě I'' .

Polarizátor otočíme v držáku o 90° a provedeme měření intenzity I_s'' . Nezapomeňte opět změřit hodnotu I_p při vyjmuté destičce.

Spočítejte hodnoty $R_p = \frac{I_p''}{I_p}$, $R_s = \frac{I_s''}{I_s}$ a vynesete do grafu funkční závislost odraznosti na úhlu dopadu.

Proveďte diskusi výsledku.

To pak podle vztahu /15.9/ znamená, že intenzita odraženého záření polarizovaného v rovině dopadu je rovna nule a v odražené části záření je obsažena pouze část polarizovaná v rovině kolmé k rovině dopadu. Tedy je odražené záření lineárně polarizované - viz obr. 3. Pro úhel dopadu a odrazu pak musí podle /15.10/ platit

$$\alpha + \alpha' = \frac{\pi}{2}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \alpha'$$