Proseminář z Optiky

ODRAZ a LOM

21.10.2021



Informace

Harmonogram přednášek:

- 30.9.2021 1.přednáška: Úvod a představení semináře (Jakub Zázvorka) Rozdělení skupin pro prezentace témat
- 7.10.2021 2.přednáška: Zdroje záření a vyzařování Hertzova dipólu (Jakub Zázvorka)
- 14.10.2021 3.přednáška: Kruhová polarizace (Jakub Zázvorka)
- 21.10.2021 4.přednáška: Totální odraz a evanescentní vlna (Jakub Zázvorka)
- 4.11.2021 5. přednáška: Optické jevy v atmosféře (Jan Franc)
- 11.11.2021 6. přednáška: Barvy (Lukáš Nádvorník)
- 18.11.2021 7. přednáška: Interference a difrakce I Fresnelův integrál (Jakub Zázvorka)
- 25.11.2021 8. přednáška: Interference a difrakce II Babinetův princip (Jakub Zázvorka)
- 2.12.2021 9.přednáška: Interference a difrakce III Interefence, antireflexní vrstvy (Jakub Zázvorka)
- 9.12.2021 10. přednáška: Prezentace studentských témat
- 16.12.2021 11. přednáška: Optické experimenty historického významu pro fyziku (Jan Franc)

6.1.2021 - 12. přednáška: týden předtermínů - dohoda se studenty zda přednášku zrušit nebo se dá využít na dohánění restů nebo na experimenty: scintilátory, holografie, Pockelsův jev a další.

Fresnelovy koeficienty

Augustin Jean Fresnel – podpořil vlnovou teorii světla. Dokázal, že se jedná o příčné vlnění a odvodil rovnice pro amplitudové koeficienty na rozhraní dvou dielektrik, vypočetl difrakční obrazy apertur



$$r_{s} = \frac{n_{1} \cos \theta_{i} - n_{2} \cos \theta_{t}}{n_{1} \cos \theta_{i} + n_{2} \cos \theta_{t}}, \qquad t_{s} = 1 + r_{s} = \frac{2n_{1} \cos \theta_{i}}{n_{1} \cos \theta_{i} + n_{2} \cos \theta_{t}}.$$

$$Dynamický model oscilací éteru.$$
Pro platnost není nutné elektromagnetické vlnění, ale příčné vlnění a podmínka spojitosti tečných složek výchylky.

Fresnelovy koeficienty

Augustin Jean Fresnel – podpořil vlnovou teorii světla. Dokázal, že se jedná o příčné vlnění a odvodil rovnice pro amplitudové koeficienty na rozhraní dvou dielektrik, vypočetl difrakční obrazy apertur





Dynamický model oscilací éteru. Pro platnost není nutné elektromagnetické vlnění, ale příčné vlnění a podmínka spojitosti tečných složek výchylky.

Energetická bilance

Změna amplitudy vlny při odrazu má za následek i změnu intenzity světla. Uvažujme prostorově omezený svazek aproximovaný jako část rovinné vlny. Předpokládejme vlny postupné, příčné a netlumené, jejichž výkonový tok je popsán reálným Poyntingovým vektorem rovnoběžným s vlnovým vektorem.



$$\langle |S_i| \rangle = \langle |S_r| \rangle + \langle |S_t| \rangle \Rightarrow \frac{1}{2} \varepsilon_0 n_1 c_0 E_i^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 n_1 c_0 |r|^2 E_i^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_0 n_2 c_0 |t|^2 E_i^2$$

 $\langle |S_i|\rangle \cdot A_i = \langle |S_r|\rangle \cdot A_r + \langle |S_t|\rangle \cdot A_t$

Energetická bilance

Změna amplitudy vlny při odrazu má za následek i změnu intenzity světla. Uvažujme prostorově omezený svazek aproximovaný jako část rovinné vlny. Předpokládejme vlny postupné, příčné a netlumené, jejichž výkonový tok je popsán reálným Poyntingovým vektorem rovnoběžným s vlnovým vektorem.



$$\frac{1}{2}\varepsilon_0 n_1 c_0 E_i^2 \cdot A \cdot \cos \Theta_i = \frac{1}{2}\varepsilon_0 n_1 c_0 |r|^2 E_i^2 \cdot A \cdot \cos \Theta_r + \frac{1}{2}\varepsilon_0 n_2 c_0 |t|^2 E_i^2 \cdot \cos \Theta_t$$
$$1 = |r|^2 \cdot \frac{\cos \Theta_r}{\cos \Theta_i} + \frac{n_2}{n_1} |t|^2 \cdot \frac{\cos \Theta_t}{\cos \Theta_i} \Rightarrow \qquad R = |r|^2 \qquad T = \frac{n_2}{n_1} \frac{\cos \Theta_t}{\cos \Theta_i} |t|^2$$

Výkonové koeficienty odrazu a lomu



Při určitém úhlu je koeficient odrazu paralelní polarizace nulový – **Brewsterův úhel**. Atomy jako Hertzovy dipóly nevyzařují do tohoto směru. Odražená vlna je polarizovaná a celý výkon paralelní polarizace je propuštěn přes rozhraní

Navazování vlnoploch na rozhraní

Kolmý dopad

Na rozhraní dopadá kolmo lineárně polarizovaná vlna s vektorem E kmitajícím ve směru osy x.

 $E_x(z,t) = E_0 e^{i(k_1 z - \omega t)}$

$$E_{rx}(z,t) = rE_0 e^{i(-k_1 z - \omega t)}$$

 $E_{1x}(z,t) = E_0(e^{ik_1z} + re^{-ik_1z}) e^{-i\omega t}$

 $E_{1x}(z,t) = E_0[(1+r)\cos(k_1 z)\cos(\omega t) + (1-r)\sin(k_1 z)\sin(\omega t)]$



Navazování vlnoploch na rozhraní

Kolmý dopad

Na rozhraní dopadá kolmo lineárně polarizovaná vlna s vektorem E kmitajícím ve směru osy x.

 $E_x(z,t) = E_0 e^{i(k_1 z - \omega t)}$

$$E_{rx}(z,t) = rE_0 e^{i(-k_1 z - \omega t)}$$

 $E_{1x}(z,t) = E_0(e^{ik_1z} + re^{-ik_1z}) e^{-i\omega t}$

 $E_{1x}(z,t) = E_0[(1+r)\cos(k_1 z)\cos(\omega t) + (1-r)\sin(k_1 z)\sin(\omega t)]$





Bilance toku výkonu na rozhraní – kolmý dopad

Střední hodnota Poyntingova vektoru vyjadřující plošnou hustotu toku celkové energie splňuje součtové pravidlo pro vlnu běžící zleva doprava a pro vlnu běžící zprava do leva

 $\langle S_{z<0} \rangle_T = \langle S_{z<0}^+ \rangle_T + \langle S_{z<0}^- \rangle_T = \langle S_{z>0} \rangle_T$ Což je důsledkem spojitosti tečných složek polí E a H $\langle S_z \rangle_T = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 (1 - r^2) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 r^2$ $= \langle S_{z<0}^+ \rangle_T - \langle S_{z<0}^- \rangle_T$ rozhraní $(S_{z>0})_T = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 (1 - r^2) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 r^2$

Bilance toku výkonu na rozhraní – kolmý dopad

Střední hodnota Poyntingova vektoru vyjadřující plošnou hustotu toku celkové energie splňuje součtové pravidlo pro vlnu běžící zleva doprava a pro vlnu běžící zprava do leva

 $\langle S_{z<0} \rangle_T = \langle S_{z<0}^+ \rangle_T + \langle S_{z<0}^- \rangle_T = \langle S_{z>0} \rangle_T$ Což je důsledkem spojitosti tečných složek polí E a H

$$\langle S_z \rangle_T = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 (1 - r^2) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_1 E_0^2 r^2 = \langle S_{z<0}^+ \rangle_T - \langle S_{z<0}^- \rangle_T$$



Šikmý dopad

V případě šikmého dopadu prostorově omezeného svazku aproximovaného modelem rovinné vlny dochází ke vzniku částečně stojatého vlnění v oblasti před rozhraním, kde se dopadající a odražený svazek kříží. V ostatních částech prostoru před i za rozhraním má vlnění charakter postupných vln.





Šikmý dopad

V případě šikmého dopadu prostorově omezeného svazku aproximovaného modelem rovinné vlny dochází ke vzniku částečně stojatého vlnění v oblasti před rozhraním, kde se dopadající a odražený svazek kříží. V ostatních částech prostoru před i za rozhraním má vlnění charakter postupných vln.



Navazování vlnoploch na rozhraní



Šikmý dopad

V případě šikmého dopadu prostorově omezeného svazku aproximovaného modelem rovinné vlny dochází ke vzniku částečně stojatého vlnění v oblasti před rozhraním, kde se dopadající a odražený svazek kříží. V ostatních částech prostoru před i za rozhraním má vlnění charakter postupných vln.



Odraz na opticky řidším prostředí. Ve Snellově zákoně přesáhne úhel lomu obor funkce sinu. Při takové případě se úhlu dopadu říká **kritický úhel**.





Odraz na opticky řidším prostředí. Ve Snellově zákoně přesáhne úhel lomu obor funkce sinu. Při takové případě se úhlu dopadu říká **kritický úhel**.



Odraz na opticky řidším prostředí. Ve Snellově zákoně přesáhne úhel lomu obor funkce sinu. Při takové případě se úhlu dopadu říká **kritický úhel**.





Při pohledu pod úhlem větším než kritický vidíme totální odraz podvodní scény

Odraz na opticky řidším prostředí. Ve Snellově zákoně přesáhne úhel lomu obor funkce sinu. Při takové případě se úhlu dopadu říká **kritický úhel**.



Odraz na opticky řidším prostředí. Ve Snellově zákoně přesáhne úhel lomu obor funkce sinu. Při takové případě se úhlu dopadu říká **kritický úhel**.



Tvar výbrusu diamantů

Kritický úhel $\Theta_{\mathcal{C}}=24.2^\circ$









IDEAL CUT - maximum fire and brilliance





TOO DEEP light escapes from the side

SHALLOW CUT light escapes from the crown's side TOO SHALLOW light escapes from the bottom

Optická vlákna Totální odraz na okraji vlákna – prostorové vymezení optické cesty paprsku









Výpočet vektorů elektrického pole na rozhraní při případu kritického úhlu

Výpočet vektorů elektrického pole na rozhraní při případu kritického úhlu

$$\cos \theta_{t} = \sqrt{1 - \sin^{2} \theta_{i}} = \sqrt{1 - \frac{n_{1}^{2}}{n_{2}^{2}} \sin \theta_{i}} \quad <1 \text{ pro } \theta_{i} > \theta_{c}$$

$$E_{t} = t \cdot E_{0} \cdot e^{-i\omega t} \cdot e^{ik_{1} \cdot x \cdot \sin \theta_{i}} \cdot e^{-\frac{\omega}{c_{0}}n_{2}z \cdot \sqrt{\frac{n_{1}^{2}}{n_{2}^{2}} \sin^{2} \theta_{i} - 1}}$$
Harmonická vlna ve směru x
Tlumená vlna ve směru z

Výpočet vektorů elektrického pole na rozhraní při případu kritického úhlu



Intenzita pole ve směru z $I(z > 0) \sim e^{-2bz}$. Zadefinujeme, že $I \sim e^{-\frac{z}{d}}$, kde $d = \frac{1}{2b}$. d je hloubka průniku evanescentní vlny a značí vzdálenost od rozhraní na níž intenzita záření klesne na hodnotu 1/e.

Intenzitou záření myslíme jedinou nenulovou složku střední hodnoty Poyntingova vektoru v prostředí 2, která je rovnoběžná s rozhraním.

$$d = \frac{1}{2 \cdot k_2 \cdot \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}} = \frac{\lambda_0}{4\pi \cdot \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}}$$

! Hloubka průniku nezávisí na polarizaci! Velikost polí závisí na polarizaci

Evanecentní vlna

Úhel lomu je komplexní číslo Po dosazení do Fresnelových vzorců:

$$\widetilde{r}_{s} = \frac{n_{1}\cos\theta_{i} + in_{2}\cos\widetilde{\theta}_{t}}{n_{1}\cos\theta_{i} - in_{2}\cos\widetilde{\theta}_{t}}$$



Evanescentní vlna

Z toho plyne, že všechny koeficienty jsou komplexní čísla



Evanescentní vlna

Z toho plyne, že všechny koeficienty jsou komplexní čísla



Při totálním odrazu získává s- a p- polarizovaná vlna různou fázi Využití při přípravě elipticky polarizovaného světla



Fresnelův hranol

Vytvoření kruhově polarizovaného světla z lineárně polarizovaného



Optický analog kvantově mechanického tunelovacího jevu



no reflection



Při zanedbatelné vzduchové mezeře světelný svazek projde bez totálního odrazu Při vzduchové mezeře srovnatelné s hloubkou vniku se část vlny naváže do dalšího prostředí – není to totální odraz

FTIR







Obrázek z konvenčního fluorescenčního mikroskopu

Obrázek FTIR



TIRFM – total internal reflection fluorescence microscope



Výkonové koeficienty odrazu a lomu