

# predavanje 7 (2. Dio): Energija elektromagnetskog vala. Interakcija elektromagnetskog zračenja i tvari

## 1. Što je disperzija svjetlosti? Što je polarizacija? (obavezno)

Pojava da se sunčeva svjetlost pri prolazu kroz prozirnu prizmu razlaže na zrake različitih boja (najmanje se lomi crvena, a najviše ljubičasta) zove se **disperzija ili rasap svjetlosti**.

Uzrok pojavi disperzije ili rasapa je ovisnost indeksa loma, odnosno brzine širenja svjetlosti, o valnoj duljini, odnosno frekvenciji svjetlosti  **$n=f(\omega)$** .

Empirijski utvrđena vrijednost za vidljivi dio spektra može se opisati Cauchyevom formulom:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}; \text{ A i B konstante karakteristne za pojedini materijal}$$

Elektromagnetski valovi su polarizirani ako svi vektori električnog (magnetskog) polja titraju u istoj ravnini. Većina izvora svjetlosti daje nepolariziranu svjetlost.

- Polarizacija je svojstvo svih transverzalnih valova pa tako i elektromagnetskog vala.
- U načelu val može biti polariziran i nepolariziran.
- Stanje polarizacije definira se pravcem duž kojeg titra vektor električnog polja.

## 2. Što je normalna, a što anomalna disperzija?

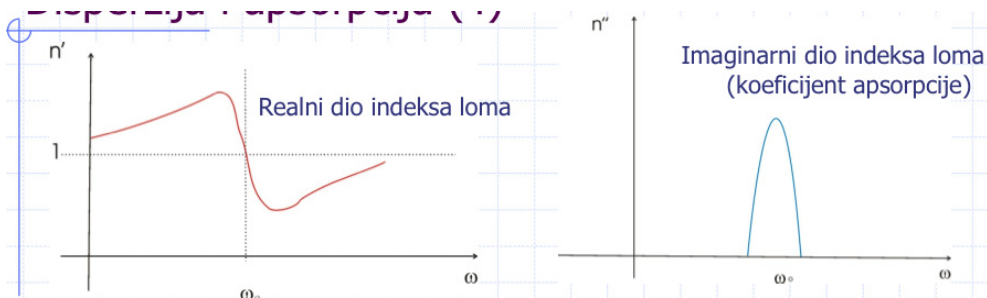
**indeks loma:**

$$n' = 1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m} \frac{\omega_o^2 - \omega^2}{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

**koeficijent apsorpcije:**

$$n'' = \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m} \frac{\gamma \omega}{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

nasao na internetu:



- Općenito indeks loma se povećava porastom frekvencije (osim u uskom području oko vlastite frekvencije elektrona), to je pojava disperzije.
- Odstupanje od ovog pravila u području oko vlastite frekvencije elektrona  $\omega_o$ , kad indeks loma opada s porastom frekvencije, zove se **anomalna disperzija**.
- Koeficijent apsorpcije  $n''(\omega)$  ima izraziti maksimum oko frekvencije  $\omega_o$ , dok se za sve ostale frekvencije može zanemariti.
- U području anomalne disperzije kad je frekvencija elektromagnetskog vala  $\omega$  vrlo blizu vlastitoj frekvenciji elektrona  $\omega_o$ , indeks loma je  $n' \sim 1$ , a  $n''$  koeficijent apsorpcije je velik.

- **normalna disperzija:**
  - postupan porast indeksa loma s porastom frekvencije
- **anomalna disperzija:**
  - oštra promjena indeksa loma pri određenim frekvencijama
  - te frekvencije odgovaraju prirodnim harmoničkim frekvencijama, povezanim s dijelom molekule, atoma ili iona tvari
  - pri tome dolazi do trajnog prijenosa energije iz zračenja u tvar ⇒ **apsorpcija**

### 3. Objasnite što su Fresnelove jednadžbe. Izvedite izraz Brewsterov kut.

Intezitet reflektiranog vala ovisi o kutu upada i o smjeru polarizacije upadnog vala, tj. titra li upadni el. vektor u ravnini upadanja ili okomito na nju. Francuski fizičar Fresnel je pronašao factor refleksije i factor transmisije. Ako val upada okomito računanje je znatno jednostavnije.

Kada električni i magnetski vektor dolaze na granicu između dva sredstva, oni prelaze iz jednog u drugo sredstvo tako da zadovoljavaju određene uvjete: pri prijelazu uvijek su normalne komponente magnetske i električne indukcije (vektori B i D) i tangencijalne komponente jakosti električnog i magnetskog polja (vektori E i H) kontinuirane na graničnoj površini

Ako val upada okomito na plohu, granični su uvjeti:

$$E_u + E_r = E_t \quad H_u + H_r = H_t$$

pri čemu indeksi u, r i t označavaju upadni, reflektirani i transmitirani val.

Intezitet elektromagnetskog vala jednaka je izosu Poyntingova vektora:  $I = EH$

Na graničnoj se plohi upadna energija elektromagnetskog vala dijeli na reflektiranu i transmitiranu:  $E_u H_u = E_r H_r + E_t H_t$

Predpostavimo da se val širi iz vakuuma u neko prozirno sredstvo indeksa loma n. Iz povezanosti magnetskog i električnog polja u elektromagnetskom valu i izrazu  $n = \sqrt{\epsilon_r}$ , proizlazi:

$$H_u = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_u \quad H_r = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_r \quad H_t = n \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_t$$

Uvrštavanjem zadnje u predzadnju relaciju, dobivamo:

$$E_u^2 = E_r^2 + n E_t^2$$

Koristeći ovu relaciju i uvjet da je  $E_u + E_r = E_t$  izračunamo reflektiranu i transmitiranu komponentu električnog polja, dobit ćemo reflektirani i propušteni dio električnog polja:

$$E_r = -E_u \frac{n-1}{n+1} \quad E_t = E_u \frac{2}{n+1}$$

Koeficijent refleksije, tj. udio reflektirane energije prema ukupnoj energiji elektromagnetskog vala definira se kao:  $R = I_r / I_u = (EH)_r / (EH)_u$

Slično se računa i koeficijent transmisije, tj. udio propuštene energije elektromagnetskog vala u drugo sredstvo:  $T = I_t / I_u = (EH)_t / (EH)_u$

I naravno vrijedi:  **$R + T = 1$** .

Uvrštavanjem dobivamo:

$$R = \frac{(EH)_r}{(EH)_u} = \left( \frac{E_r}{E_u} \right)^2 = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad T = \frac{(EH)_t}{(EH)_u} = \frac{4n}{(n+1)^2}$$

Kad elektromagnetsko val upada na granicu sredstava pod nekim kosim kutom, tada imamo:

□ Električno polje titra okomito na upadnu ravninu (u-kut upada, r-kut refleksije, l-kut loma):

$$R_{\perp} = \frac{I_r}{I_u} = \frac{\sin^2(u-l)}{\sin^2(u+l)}$$

Koeficijent refleksije

$$T_{\perp} = \frac{I_t}{I_u} = \frac{4 \sin^2 l \cos^2 l}{\sin^2(u+l)}$$

Koeficijent transmisije

□ Električno polje titra paralelno s upadnom ravninom (u-kut upada, r-kut refleksije, l-kut loma):

$$R_{\parallel} = \frac{I_r}{I_u} = \frac{\tan^2(u-l)}{\tan^2(u+l)}$$

Koeficijent refleksije

$$T_{\parallel} = \frac{I_t}{I_u} = \frac{4 \sin^2 l \cos^2 u}{\sin^2(u+l) \cos^2(u-l)}$$

Koeficijent transmisije

□ Kad se val širi iz optički rjeđeg u optički gušće ( $n_2 > n_1$ ) sredstvo, na granici dvaju sredstava reflektirani val ima skok u fazi za  $\pi$  u odnosu na upadni val.

Kad se nepolarizirano svjetlo reflektira na granici dvaju sredstava, reflektirano svjetlo može biti potpuno ili djelomično polarizirano ovisno o kutu upada.

Ako elektromagnetski val upadne na granicu između dva sredstva pod tzv. Brewsterovim kutem reflektirani val će biti potpuno polariziran. Tada vrijedi da je:  $u + \ell = 90^\circ$

Iz zakona loma 
$$\frac{\sin u}{\sin \ell} = \frac{n_2}{n_1}$$

slijedi da je 
$$\frac{\sin u}{\sin(90^\circ - u)} = \operatorname{tg} u = \frac{n_2}{n_1}$$

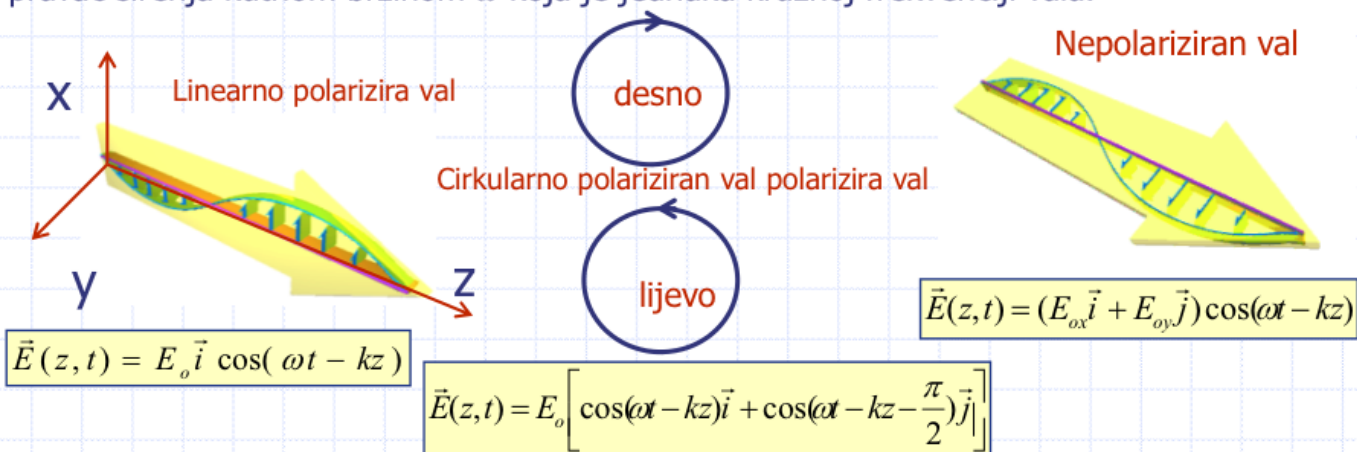
pa je Brewsterov kut:

$$u = u_B = \arctan(n_2 / n_1).$$

Polarizacijom odbijena zraka ima svojstvo da vektor električnog polja titra okomito na ravninu refleksije.

#### 4. Koja su sva moguća stanja polarizacije elektromagnetskog vala? Kako se sve može dobiti polarizirani val?

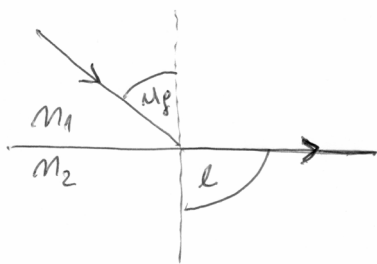
- Ako vektor električnog polja titra uvijek duž istog pravca (koji je naravno okomit na smjer širenja vala), val je linearno polariziran.
- Ako se smjer pravca duž kojeg titra vektor električnog polja mijenja od trenutka do trenutka, onda se kaže da je val nepolariziran, nema istaknutog pravca duž kojeg titra vektor električnog polja.
- Kod cirkularno polariziranog vala vektor električnog polja rotira u ravnini okomitoj na pravac širenja kutnom brzinom  $\omega$  koja je jednaka kružnoj frekvenciji vala.



□ Polarizirano svjetlo se može dobiti na više načina:

- **polarizatori – polarizacija selektivnom apsorpcijom**
- **polarizacija refleksijom (Brewsterov kut)**
- **polarizacija raspršenjem**
- **polarizacija prolazom svjetlosti kroz kristale dvolomce (dvoosne)**

## 5. Što je totalna refleksija i kad se javlja?



**Totalna refleksija** – Kada svjetlost prolazi iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo kut loma veći je od kuta upada. Postoji kut  $u_g$  koji zovemo granični kut, za koji je kut loma  $90^\circ$ , što znači da lomljena zraka ide točno granicom sredstva. Za kuteve veće od graničnog kuta ( $u > u_g$ ) svjetlost se reflektira u isto sredstvo i tu pojavu zovemo totalna refleksija.

Za granični kut vrijedi da je:

$$\sin u_g = \frac{n_2}{n_1}$$

Najčešća primjena totalne refleksije je u optičkim instrumentima i u svjetlovodima.

## 6. Objasnite Malusov zakon. Objasnite polarizaciju raspršenjem.

**Polarizator** je uređaj pomoću kojega dobivamo linearno polarizirani svjetlost. Staklena ploča može poslužiti kao polarizator ako se na njoj svjetlost odbija pod kutom određenim Brewsterovim kutom. Savršeno polariziranu svjetlost daju dvolomni kristali. Oni prirodnu svjetlost rascijepu u dva snopa polarizirane svjetlosti na taj način da su ravnine polarizacije međusobno okomite.

Pri prolasku svjetlosti kroz polarizator proći će samo komponenta električnog polja paralelna optičkoj osi polarizatora; okomita komponenta bit će apsorbirana. Ako je upadna svjetlost, s intenzitetom  $I_0$ , nepolarizirana, nakon izlaska iz polarizatora intenzitet svjetlosti bit će  $I_0/2$ . Ako je upadna svjetlost već polarizirana intenzitet transmitirane svjetlosti ovisit će o kutu između vektora električnog polja i optičke osi polarizatora ( $\theta$ ), prema **Malusovom zakonu**:

$$I = I_0 \cos^2 \theta.$$

Malusov zakon kaže da je intenzitet polarizirane svjetlosti  $I$  pri prolasku kroz polarizator je jednak proizvodu intenziteta polarizirane svjetlosti  $I_0$  prije nailaska na polarizator i kvadrata kosinusa kuta  $\theta$  koji os polarizatora zatvara sa ravinom osciliranja električnog vektora upadne polarizirane svjetlosti.

## Polarizacija raspršenjem

- ❑ Kad elektromagnetski val (svjetlo) uđe u sredstvo, pod djelovanjem električnog polja u načelu svaki atom postaje električni dipol koji titra.
- ❑ Zbog titranja elektrona uslijed električnog polja svaki atom zrači (apsorbira energiju vala i ponovo je re-emitira u svim smjerovima (atomi su slučajno orijentirani), ova pojava je odgovorna za raspršenje svjetla.
- ❑ Intenzitet raspršenja je  $I_s \sim 1/\lambda^4$ , što je valna duljina manja to se svjetlo više raspršuje.
- ❑ Intenzitet raspršenog plavog svjetla je  $(700\text{nm}/400\text{nm})^4 = 9,4$  puta veći od intenziteta raspršenog crvenog svjetla, pa je zato nebo plavo.
- ❑ Kad se gleda prema Suncu, tj. pri izlasku i zalasku Sunca, svjetlo duže putuje kroz atmosferu, pa kad stigne do površine Zemlje veći dio plave svjetlosti se raspršio, te u snopu Sunčeve svjetlosti blizu površine Zemlje prevladava crvena boja.