

Optoelectronică

Curs 4

2025/2026

Disciplina 2025/2026

- ▶ 2C/1L Optoelectronică **OPTO**
- ▶ **Minim 7 prezente curs + laborator**
- ▶ Curs – conf. **Radu Damian**
 - an IV μ E
 - Marti 14:00–16:00, P7 $\rightarrow$ **P6**
 - E – 70% din nota (50%+20%)
 - **20% test (VP) la curs**, saptamana **5–7?**
 - probleme + (2p prez. curs)
 - toate materialele permise
- ▶ Laborator – sl. **Catalin Iov**
 - an IV μ E
 - Marti 16–18, I.08
 - Max. 7 prezente
 - L – 30% din nota (+Caiet de laborator +Probleme)

Cuprins

- ▶ **Lumina ca undă electromagnetică*** (ecuațiile lui Maxwell, ecuația undelor, parametri de propagare)
- ▶ **Elemente de fotometrie și radiometrie*** (mărimi energetice/luminoase)
- ▶ **Fibra optică** (realizare, principiu de funcționare, atenuare, dispersie, banda de frecvență)
- ▶ **Cabluri optice** (tehnologie, conectori, lipire – splice)
- ▶ **Proiectare sistemică a legăturii pe fibra optică** (bandă de frecvență, balanța puterilor)
- ▶ **Emitătoare optice** (LED și dioda laser – realizare fizică și funcționare)
- ▶ **Receptoare optice** (dioda PIN, dioda cu avalanșă – realizare fizică și funcționare)
- ▶ **Amplificatoare transimpedanță** (parametri, scheme tipice, TIA în buclă deschisă, cu reacție, diferențiale, control automat al câștigului)
- ▶ **Realizarea circuitelor pentru controlul emițătoarelor optice** (parametri, scheme tipice, controlul puterii, multiplexoare)
- ▶ **Dispozitive de captare a energiei solare** (principiu de funcționare, utilizare, proiectare)

* – VP

Acces

- ▶ Personalizat (parola), Generic (email)



Student profile page showing a photo of a student, a table with personal data, and a table of grades. A red circle highlights the link "Acceseaza ca acest student" and a red arrow points from it to the login page.

Date:

Grupa	5304 (2015/2016)
Specializarea	Tehnologii si sisteme de telecomunicatii
Marca	5184

[Acceseaza ca acest student](#)

Note obtinute

Disciplina	Tip	Data	Descriere	Nota	Puncte	Obs.
TW			Tehnologii Web			
N		17/01/2014	Nota finala	10	-	
A		17/01/2014	Colocviu Tehnologii Web 2013/2014	10	7.55	
B		17/01/2014	Laborator Tehnologii Web 2013/2014	9	-	
D		17/01/2014	Tema Tehnologii Web 2013/2014	9	-	

Login

Use the Registration no. and your

Registration no.

Email/Password

Write the code below

5dd64f9

Introducere

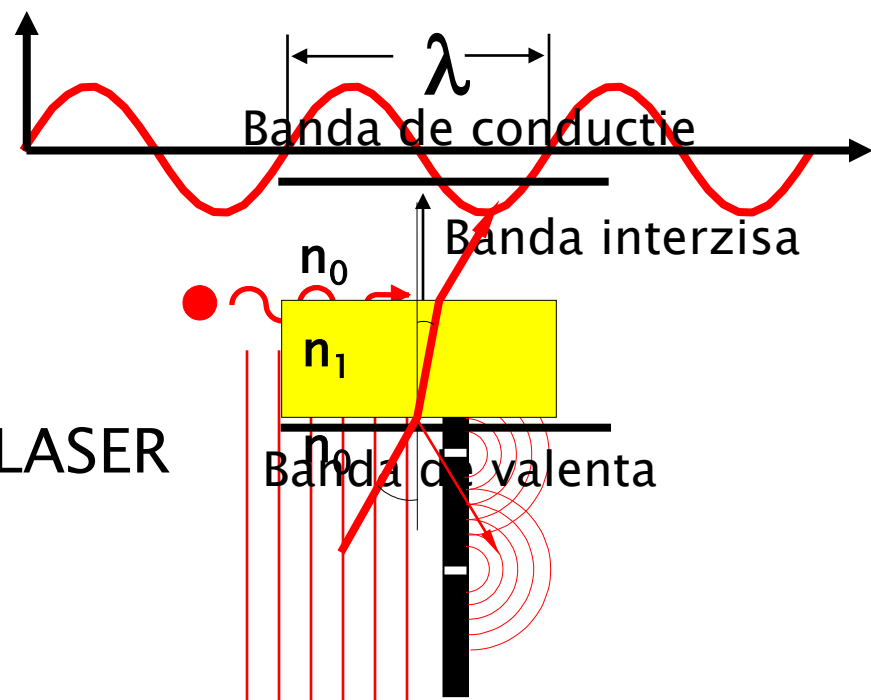
Capitolul 1

Aplicatii majore

- ▶ Comunicatii
 - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
 - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
 - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)
- ▶ Energie solara
 - Efect fotovoltaic (Si)

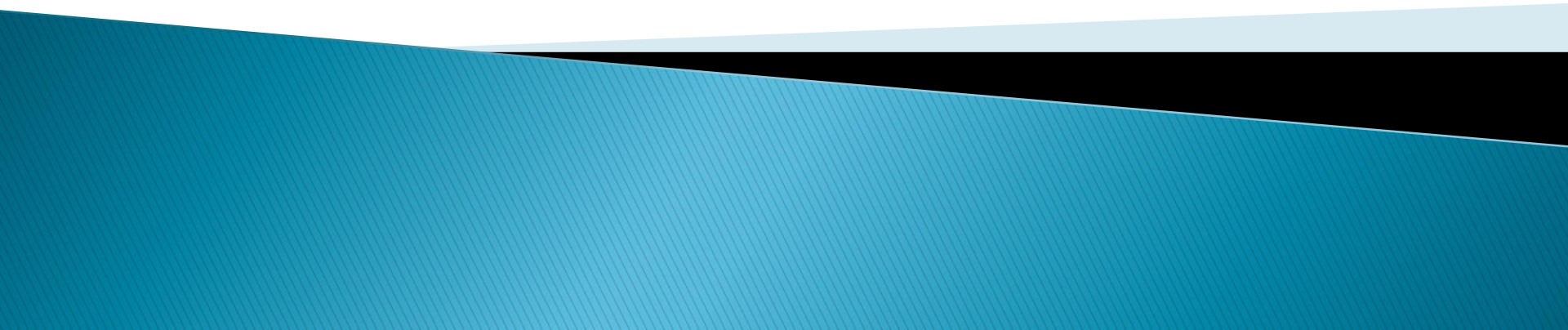
Modelarea luminii

- ▶ Undă electromagnetică
 - Ecuațiile lui Maxwell
 - λ , ε , ω , f
- ▶ Teoria cuantică
 - Benzi energetice $E = h \nu$
 - fotoni, emisie stimulată, LASER
- ▶ Optică geometrică
 - n , θ
 - raze de lumină
 - intuitivă



Lumina ca undă electromagnetică

Capitolul 2



Cuprins

- ▶ **Lumina ca undă electromagnetică** (ecuațiile lui Maxwell, ecuația undelor, parametri de propagare)
- ▶ **Elemente de fotometrie și radiometrie** (mărimi energetice/luminoase)
- ▶ **Fibra optică** (realizare, principiu de funcționare, atenuare, dispersie, banda de frecvență)
- ▶ **Cabluri optice** (tehnologie, conectori, lipire – splice)
- ▶ **Proiectare sistemică a legăturii pe fibra optică** (bandă de frecvență, balanța puterilor)
- ▶ **Emitătoare optice** (LED și dioda laser – realizare fizică și funcționare)
- ▶ **Receptoare optice** (dioda PIN, dioda cu avalanșă – realizare fizică și funcționare)
- ▶ **Amplificatoare transimpedanță** (parametri, scheme tipice, TIA în buclă deschisă, cu reacție, diferențiale, control automat al câștigului)
- ▶ **Realizarea circuitelor pentru controlul emițătoarelor optice** (parametri, scheme tipice, controlul puterii, multiplexoare)
- ▶ **Dispozitive de captare a energiei solare** (principiu de funcționare, utilizare, proiectare)

Ecuatiile lui Maxwell

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J$$

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

► Ecuatii constitutive

$$D = \varepsilon \cdot E$$

$$B = \mu \cdot H$$

$$J = \sigma \cdot E$$

► In vid

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

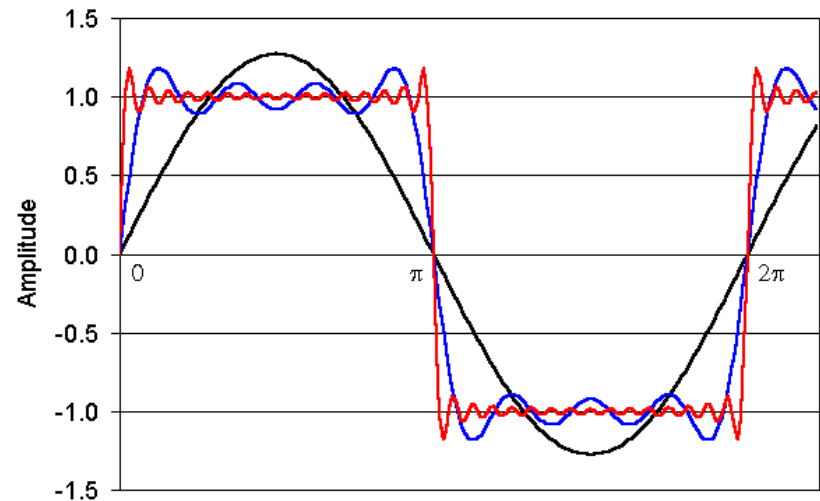
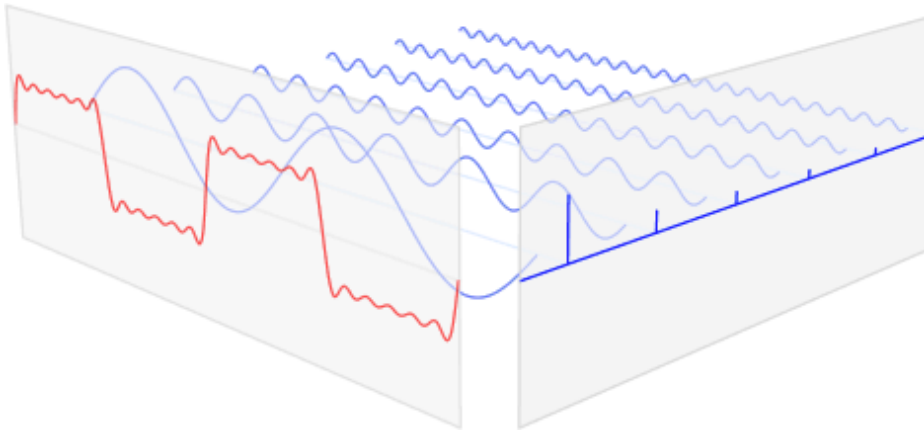
$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99790 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

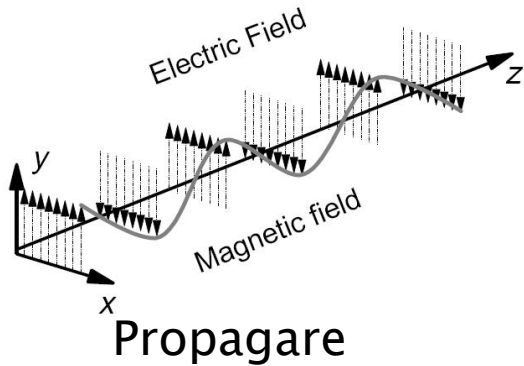
Modele matematice

- ▶ cazuri particulare in care exista rezolvare analitica
 - semnale cu variație armonică în timp, transformata Fourier, spectru

$$X = X_0 e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad \frac{\partial X}{\partial t} = j \cdot \omega \cdot X \quad g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j \omega t} dt \quad f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \cdot e^{j \omega t} d\omega$$



Solutia ecuatiilor de propagare



Camp electric dupa directia Oy, ← prin alegerea judicioasa
propagare dupa directia Oz ← a sistemului de referinta

$$E_y = E_+ e^{-\gamma \cdot z} + E_- e^{\gamma \cdot z}$$

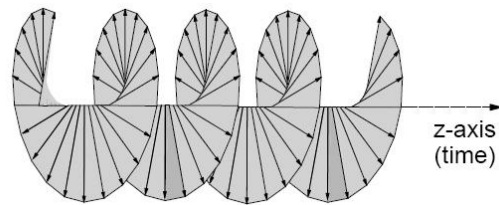
$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 \epsilon \mu + j \omega \mu \sigma} = \alpha + j \cdot \beta$$

Exista **numai** unda progresiva $E_+ \Rightarrow A$

$$E_y = A e^{-(\alpha + j \cdot \beta) \cdot z}$$

Camp armonic

$$E_y = A \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{j(\omega \cdot t - \beta \cdot z)}$$

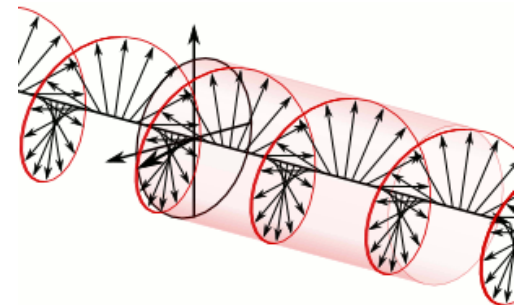


Polarizare circulara

Amplitudine

Atenuare

Propagare
(variatie in timp si spatiu)



Atenuare

$$E_y(z_1) = Ct \cdot e^{-\alpha \cdot z_1} \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z_1)}$$

$$E_y(z_2) = Ct \cdot e^{-\alpha \cdot z_2} \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z_2)}$$

$$W, P \sim \int E^2$$

$$A = \frac{P_2}{P_1} = \frac{Ct^2 \cdot e^{-2\alpha \cdot z_2}}{Ct^2 \cdot e^{-2\alpha \cdot z_1}} = e^{-2\alpha \cdot (z_2 - z_1)}$$

$$A[dB] = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \left[e^{-2\alpha \cdot (z_2 - z_1)} \right]$$

$$A[dB] = -20 \cdot \alpha \cdot (z_2 - z_1) \log_{10} e = -8.686 \cdot \alpha \cdot (z_2 - z_1)$$

$$A / L [dB / km] = -8.686 \cdot \alpha < 0$$

- ▶ Atenuarea se exprima de obicei in **dB/km**
 - ▶ de obicei valori pozitive
 - ▶ semnul = **implicit**

Reprezentare logaritmică

$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} (P_2 / P_1)$$

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10} (P / 1 \text{ mW})$$

$$0 \text{ dB} = 1$$

$$+ 0.1 \text{ dB} = 1.023 (+2.3\%)$$

$$+ 3 \text{ dB} = 2$$

$$+ 5 \text{ dB} = 3$$

$$+ 10 \text{ dB} = 10$$

$$-3 \text{ dB} = 0.5$$

$$-10 \text{ dB} = 0.1$$

$$-20 \text{ dB} = 0.01$$

$$-30 \text{ dB} = 0.001$$

$$0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$$

$$3 \text{ dBm} = 2 \text{ mW}$$

$$5 \text{ dBm} = 3 \text{ mW}$$

$$10 \text{ dBm} = 10 \text{ mW}$$

$$20 \text{ dBm} = 100 \text{ mW}$$

$$-3 \text{ dBm} = 0.5 \text{ mW}$$

$$-10 \text{ dBm} = 100 \mu\text{W}$$

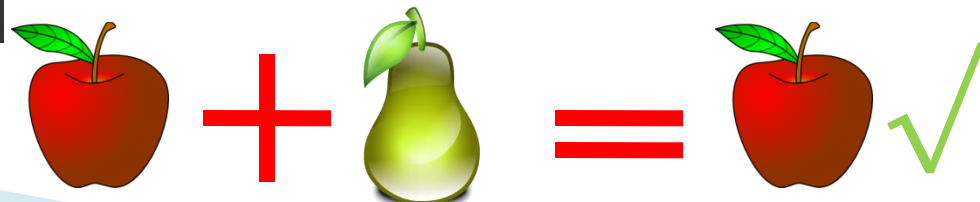
$$-30 \text{ dBm} = 1 \mu\text{W}$$

$$-60 \text{ dBm} = 1 \text{ nW}$$

$$[\text{dBm}] + [\text{dB}] = [\text{dBm}]$$

$$[\text{dBm/Hz}] + [\text{dB}] = [\text{dBm/Hz}]$$

$$[x] + [\text{dB}] = [x]$$



Parametri, dependenta de mediu

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99790 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$n = 1$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c_0}{f}$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{n}$$

$$c = \frac{c_0}{n}$$

$n = \sqrt{\varepsilon_r}$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{n \cdot f} = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$\lambda = \lambda(n)$$

$$f = \text{indep.}$$

ITU G.692

"the allowed channel frequencies are based on a 50 GHz grid with the reference frequency at 193.10 THz"

SI

"a source that emits monochromatic radiation of frequency $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ "

Dispersia

► $n = n(\omega)$ $\tau = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right)$

$$\frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{L}{c} \left(\frac{dn}{d\lambda} - \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} - \frac{dn}{d\lambda} \right) = -\frac{L}{c} \cdot \lambda \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \qquad D \stackrel{not}{=} -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (s/m^2)$$

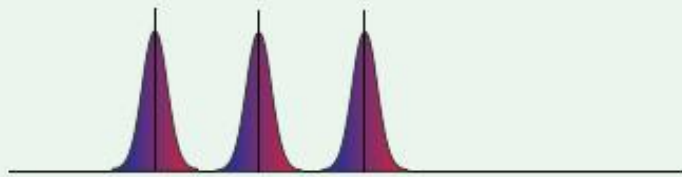
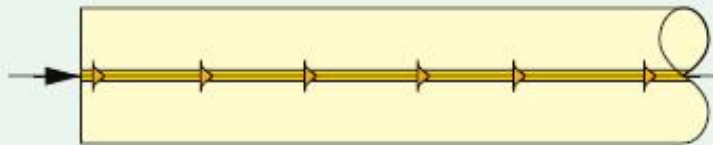
- Dispersia **D** se exprima de obicei in **ps/nm/km** si permite aflarea intarzierilor aparute intre "moduri" (latirea impulsurilor) pentru o anumita latime spectrala $\Delta\lambda$ si o anumita distanta parcursa L

$$\Delta\tau = D \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

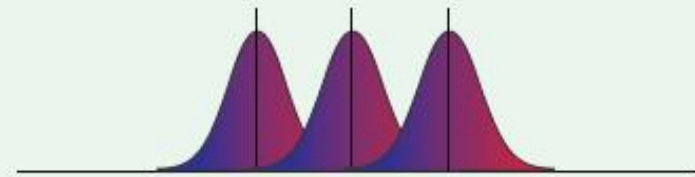
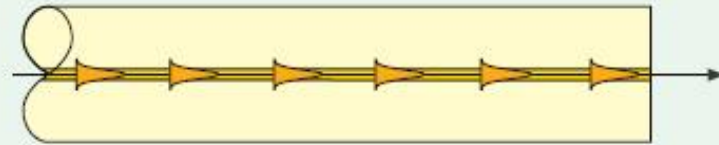
Dispersie

← →

> 50 km	Single-mode step index
< 10 km	Multimode graded index
< 1 km	Multimode step index



Transmission:
Well-defined pulses but not absolutely monochromatic.
Typical spectral width < 0.8 nm



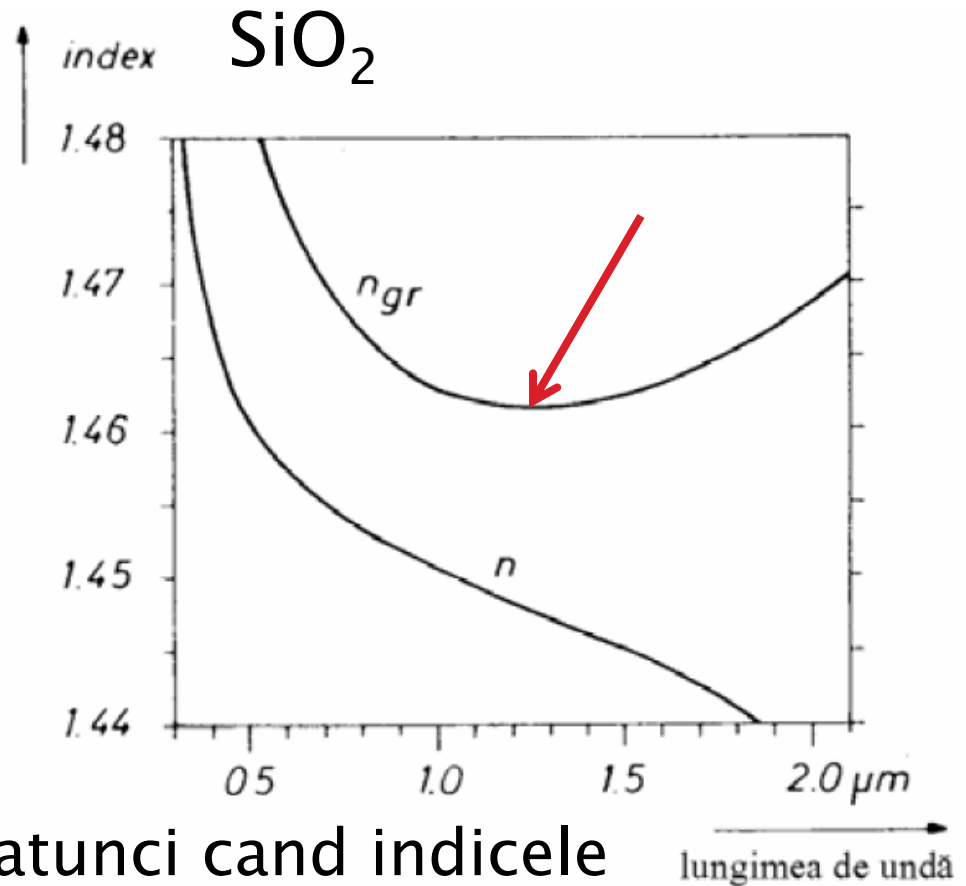
Reception:
Pulse broadening caused by the laser's spectral width and the difference between the refractive indices of the red and blue ends of the light pulse.

Dispersie normala

$$\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

$$v_g = \frac{c}{n_{gr}} \quad n_{gr} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

$$D = \frac{1}{L} \cdot \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{1}{c} \cdot \frac{dn_{gr}}{d\lambda}$$

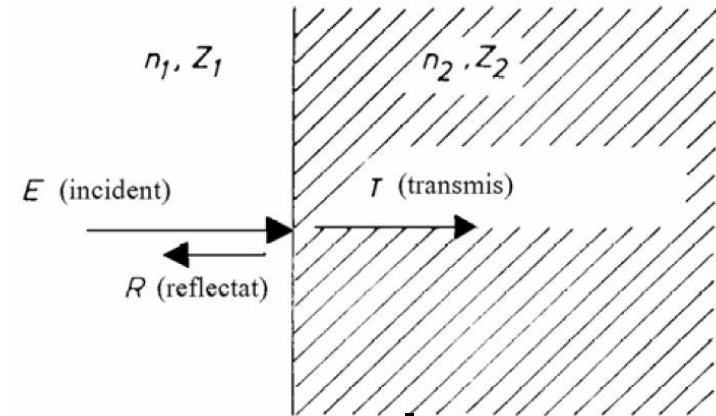


- ▶ Dispersia este **0** atunci cand indicele de refractie de grup este minim
- ▶ Pentru sticla $\lambda_0 \sim 1310 \text{ nm}$

Transmisia puterii între medii

- ▶ incidenta normala
- ▶ reflexia in amplitudine

$$Z = \frac{Z_0}{n} \quad \Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$



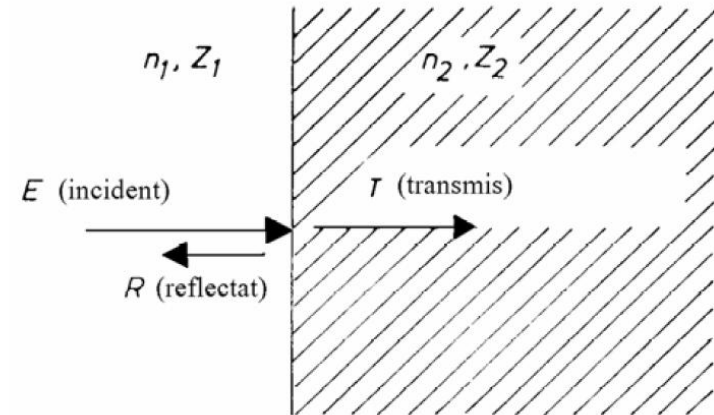
- ▶ densitatea de putere proportionala cu patraturul amplitudinii câmpului

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

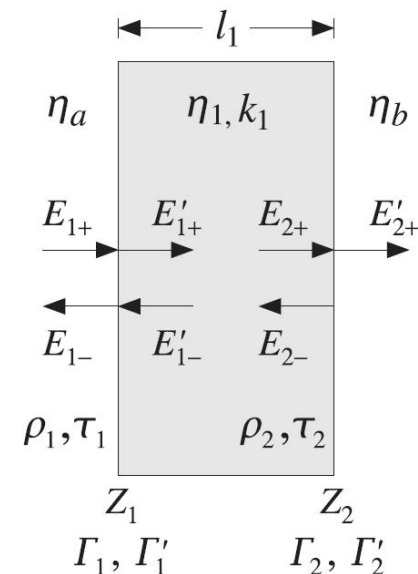
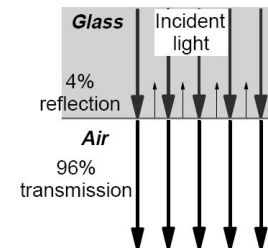
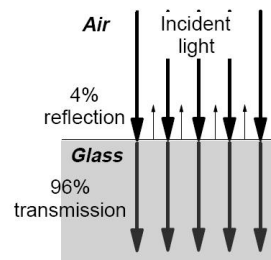
Transmisia puterii intre medii

- ▶ interfata aer–sticla
- ▶ ($n_1 = 1$, $n_2 = 1.5$)

$$\Gamma = \frac{1.5-1}{1.5+1} = 0.2; \quad r = \Gamma^2 = 0.04 = 4\%$$

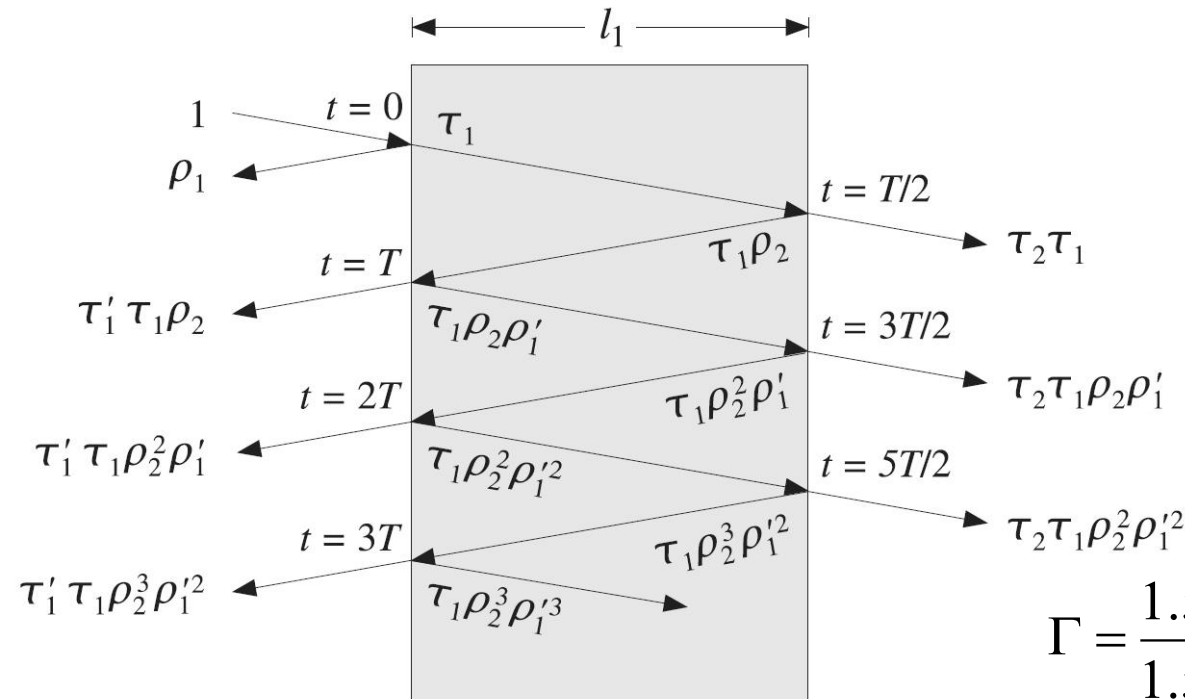


- ▶ reflexia de putere 4%, transmisia de putere 96%
- ▶ lamela dielectrica
- ▶ trecere intr–un mediu diferit, urmat de intoarcerea in mediul initial



Transmisia printr-o lamela

- ▶ apare interferenta intre multiplele unde reflectate/transmise

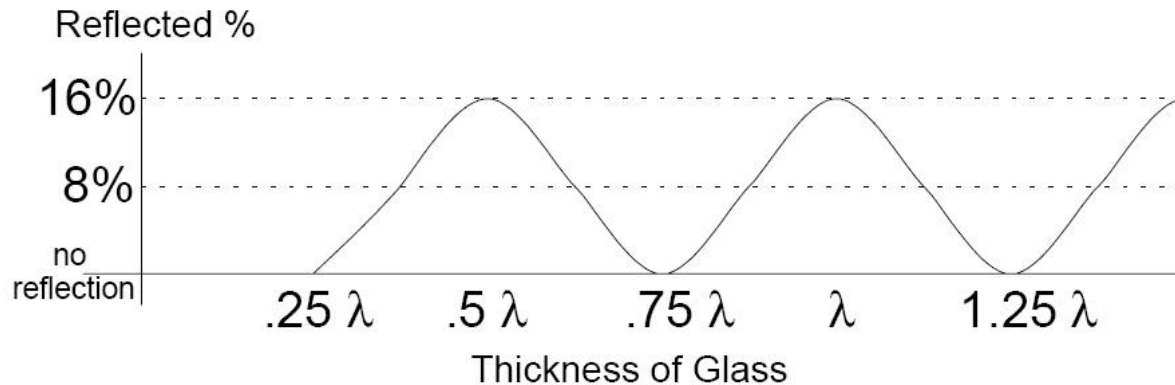


- ▶ se aduna câmpurile nu puterile

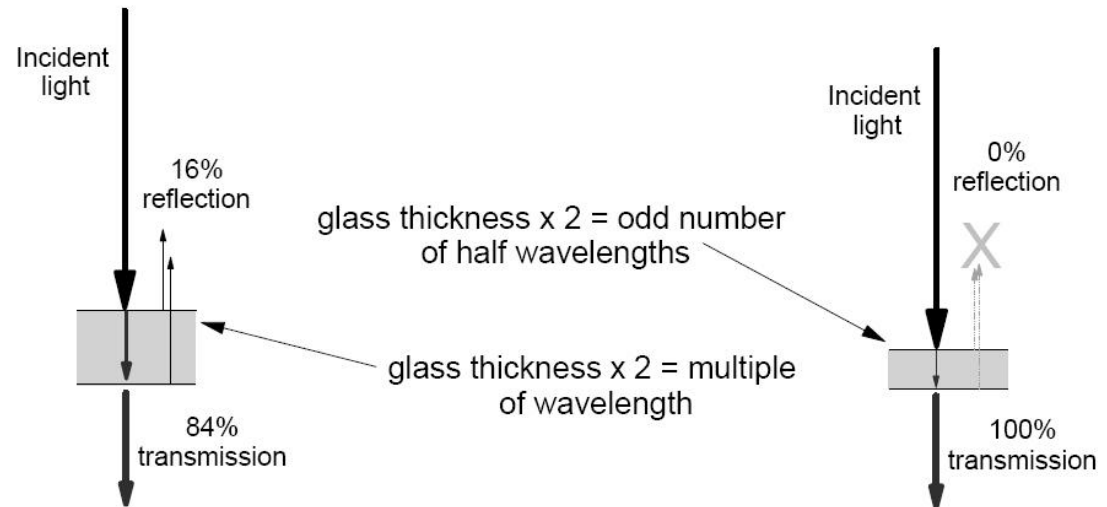
$$\Gamma = \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} = 0.2; \quad r = \Gamma^2 = 0.04 = 4\%$$

$$\Gamma_{\max} = 0.2 + 0.2; \quad r_{\max} = \Gamma_{\max}^2 = 0.16 = 16\%$$

Transmisia printr-o lamela



- ▶ lamele antireflexive



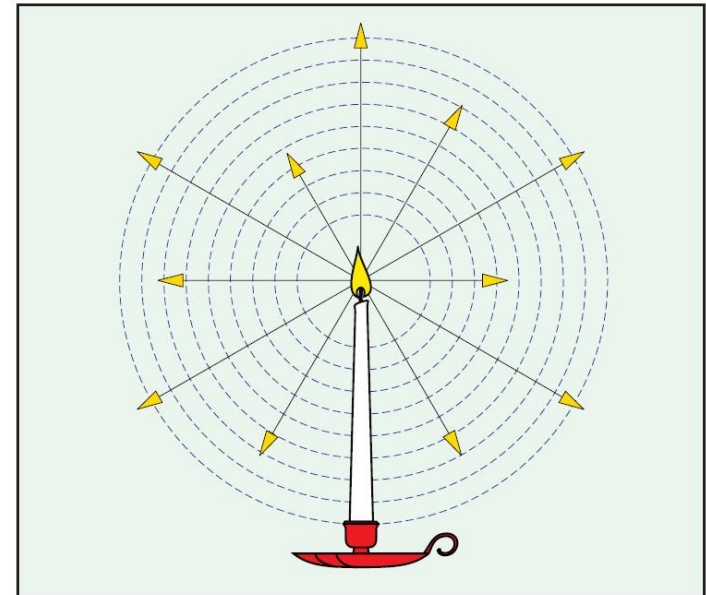
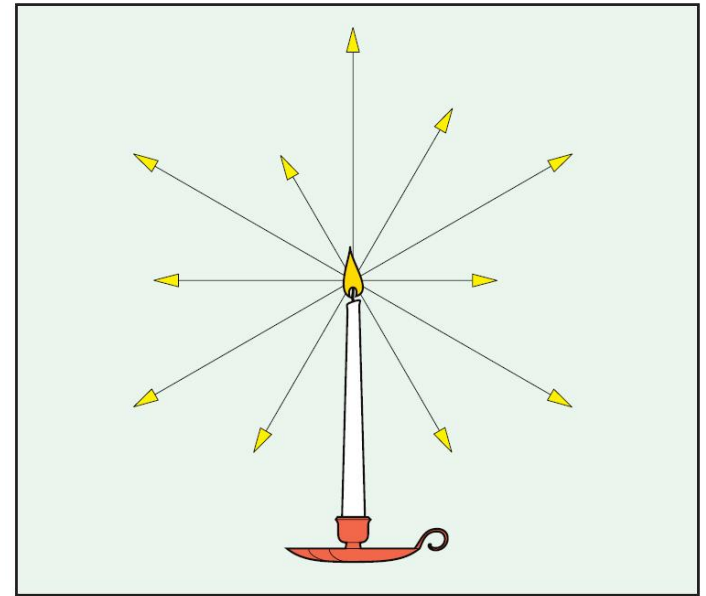
Optică geometrică

(tot) Capitolul 2

Raze de lumina

- ▶ Lumina este constituita din raze care se propaga in linie dreapta in medii omogene
- ▶ Sursa omnidirecțională: emite similar in toate direcțiile
- ▶ Densitatea de energie luminoasa descrește invers proporțional cu pătratul distantei fata de sursa (energia se împarte uniform pe suprafața întregii sfere)

$$S = 4\pi \cdot R^2 \quad P_d(R) = \frac{P_0}{4\pi \cdot R^2} \sim \frac{1}{R^2}$$

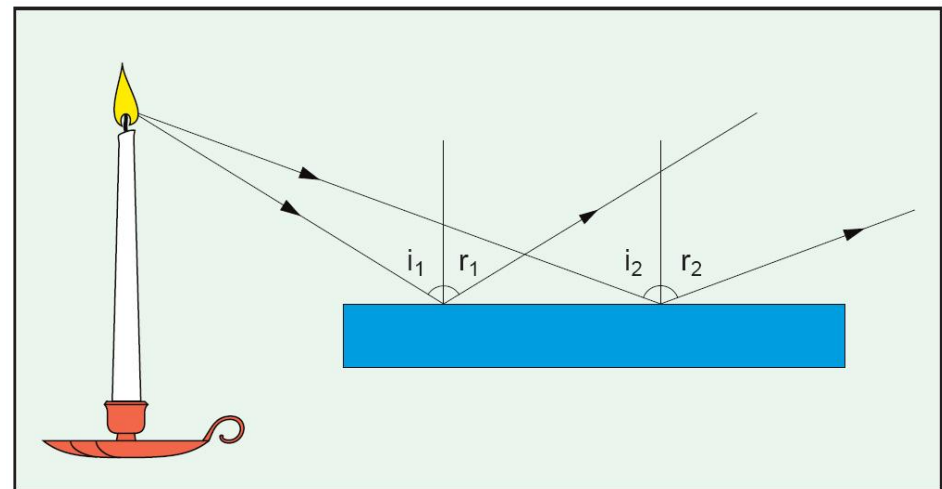


Reflexia luminii

- ▶ la suprafata de separatie dintre doua medii, (o parte din) lumina se intoarce in mediul de incidenta
- ▶ unghiul dintre raza incidenta si normala (ϕ_i) este egal cu unghiul dintre raza reflectata si normala (ϕ_r)

- ▶ **Legea reflexiei**

$$\phi_i = \phi_r$$



Refractia luminii

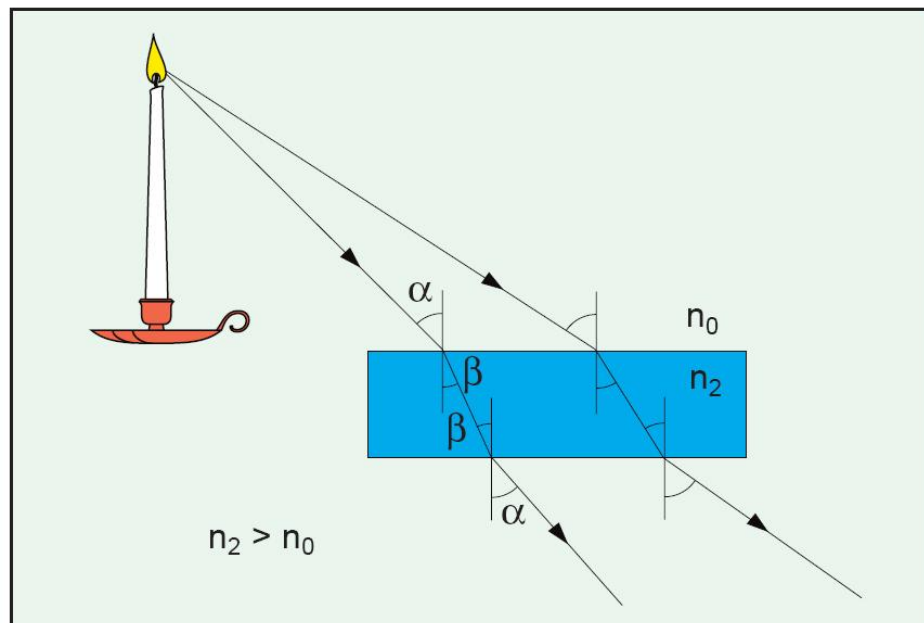
- ▶ la suprafața de separație dintre doua medii, (o parte din) lumina se (poate) propaga in mediul de transmisie sub un unghi diferit de unghiul incident
- ▶ la trecerea in medii mai “dense” (optic) lumina se apropie de normala
- ▶ la trecerea in medii mai “puțin dense” (optic) lumina se depărtează de normala

▶ Legea lui Snell (a refracției)

$$n_1 \cdot \sin \phi_i = n_2 \cdot \sin \phi_R$$

ϕ_i – unghi incident (in n_1)

ϕ_R – unghi de refracție (in n_2)



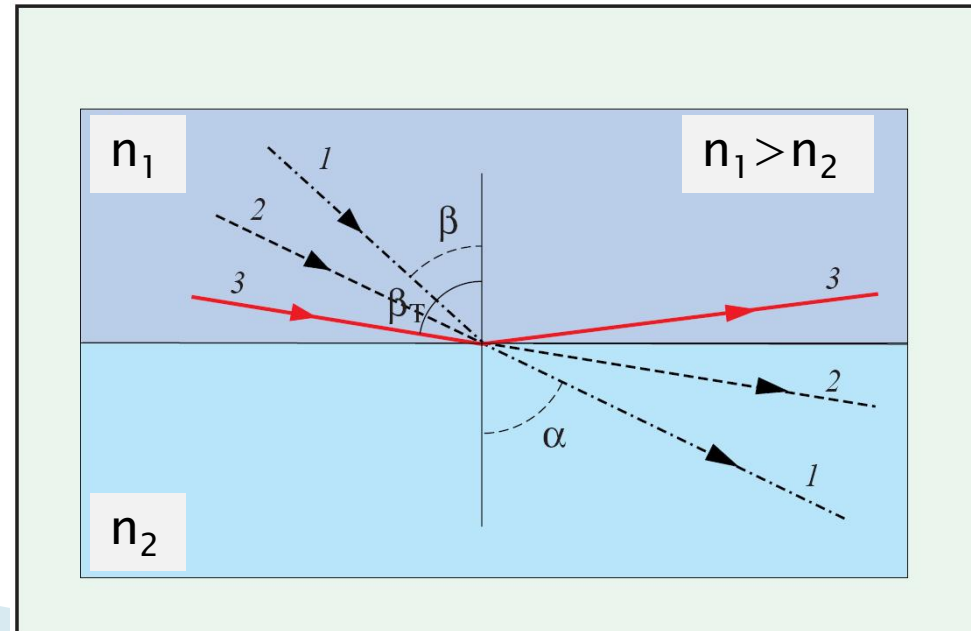
Reflexia totala

- ▶ Apare **numai când** lumina se propaga dintr-un **mediu mai dens** optic într-un **mediu mai puțin dens**
- ▶ La intersecția luminii cu suprafața de separație a doua medii se întâlnesc în general raze reflectate **și** raze refractate
- ▶ Pentru un unghi de incidență numit **unghi critic**, raza refractată se obține în lungul suprafeței de separație
- ▶ Pentru orice unghi mai mare decât unghiul critic există numai raza reflectată

$$n_1 > n_2; \quad \phi_R = 90^\circ$$

$$n_1 \cdot \sin \phi_C = n_2$$

$$\phi_C = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

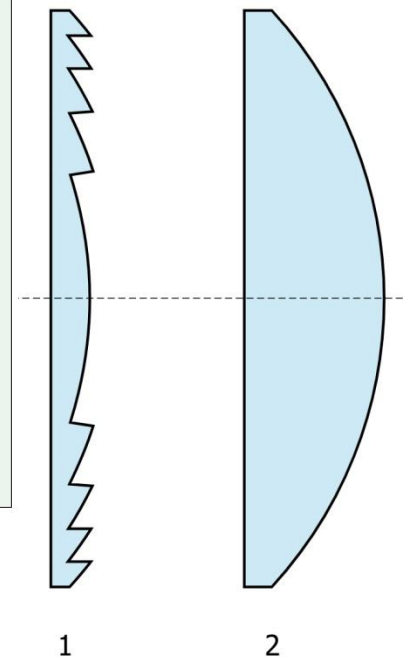
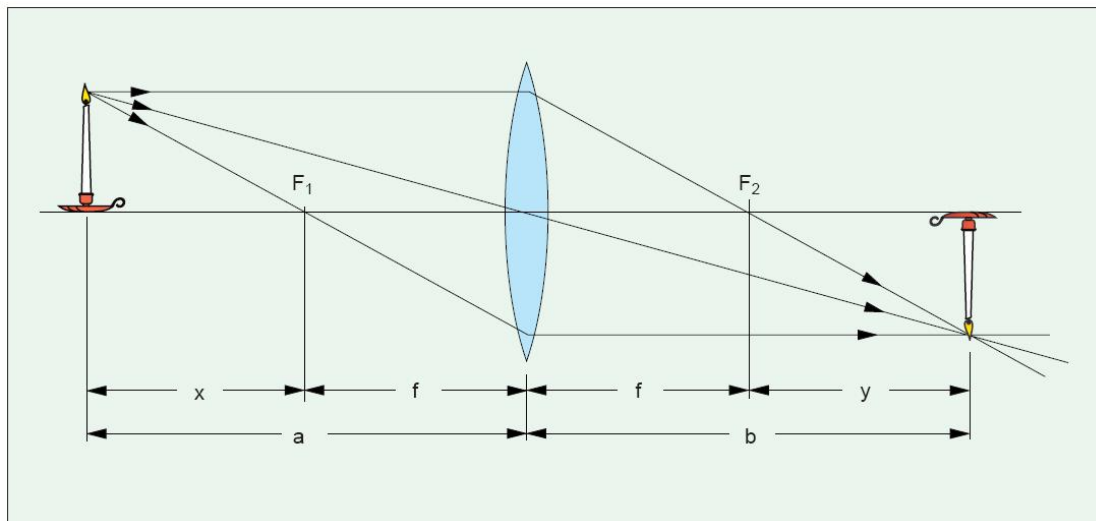


Lentile

- ▶ Razele de lumina paralele sunt concentrate într-un punct numit focar, aflat la **distanța focală** de planul lentilei
- ▶ O sursă omnidirectională poziționată în focar va permite obținerea unui fascicul paralel

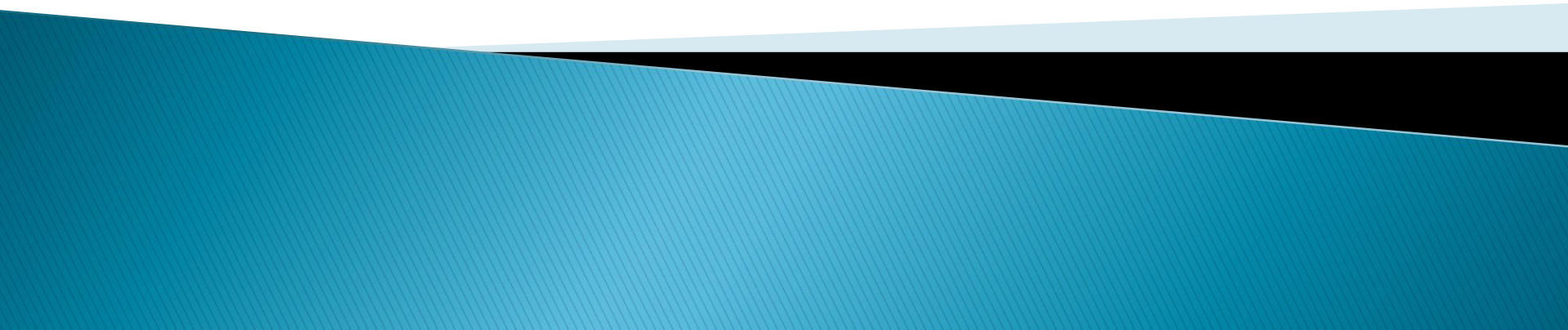
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$x \cdot y = f^2$$

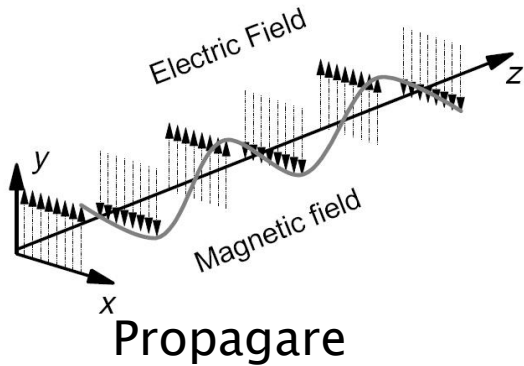


Lumina ca undă electromagnetică

Capitolul 2



Solutia ecuatiilor de propagare



Camp electric dupa directia Oy, ← prin alegerea judicioasa
propagare dupa directia Oz ← a sistemului de referinta

$$E_y = E_+ e^{-\gamma \cdot z} + E_- e^{\gamma \cdot z}$$

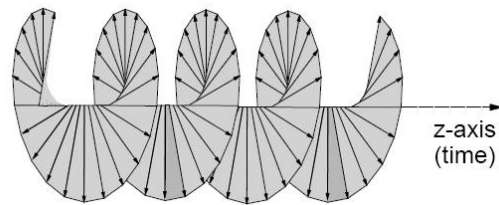
$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 \epsilon \mu + j \omega \mu \sigma} = \alpha + j \cdot \beta$$

Exista **numai unda progresiva** $E_+ = > A$

$$E_y = A e^{-(\alpha + j \cdot \beta) \cdot z}$$

Camp armonic

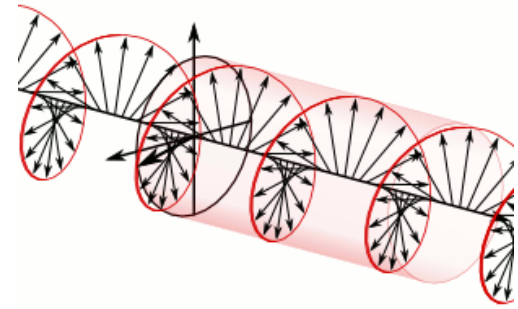
$$E_y = A \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{j(\omega \cdot t - \beta \cdot z)}$$



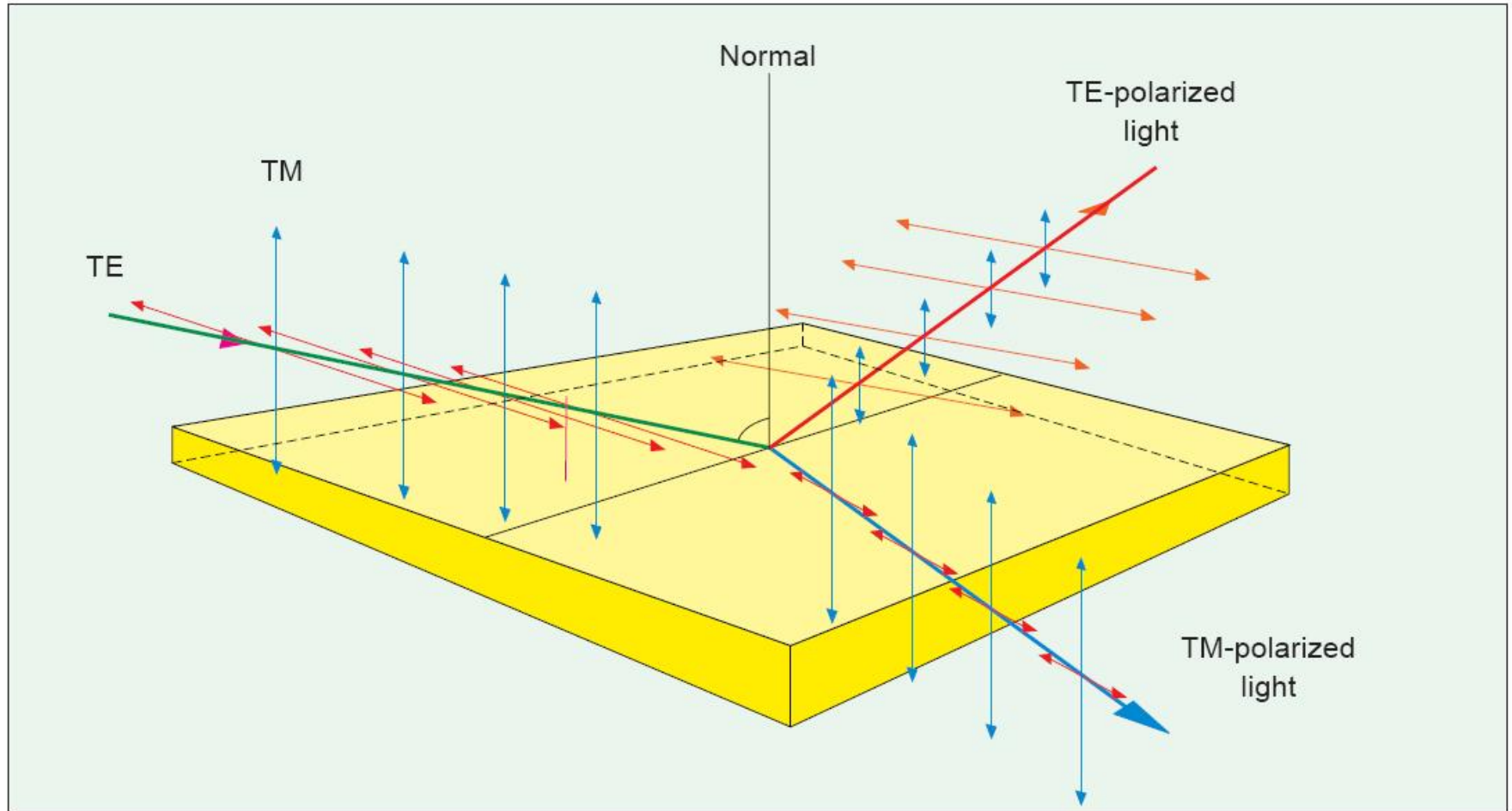
Amplitudine

Atenuare

Propagare
(variatie in timp si spatiu)



Polarizarea luminii



Polarizarea luminii

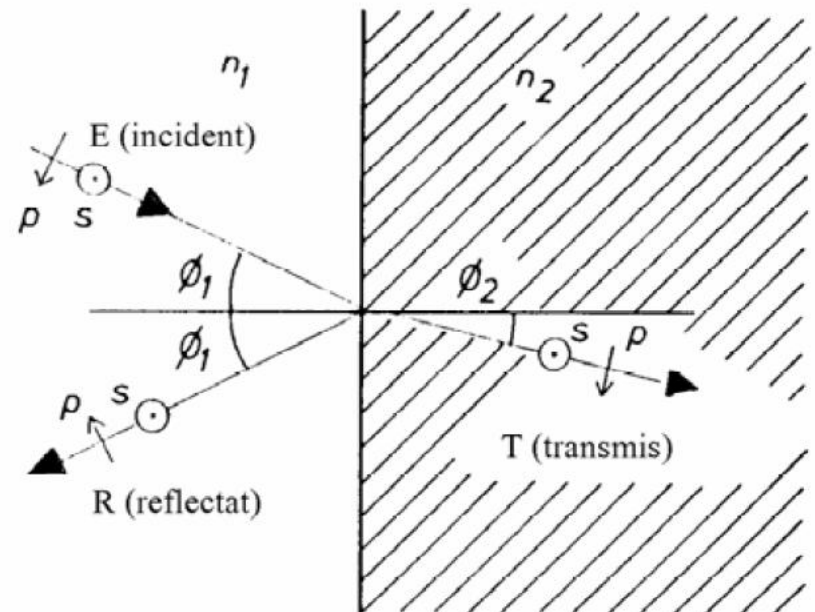
- ▶ incidenta oblica
- ▶ reflexiile in amplitudine a campului:

$$r_s = -\frac{\sin(\phi_1 - \phi_2)}{\sin(\phi_1 + \phi_2)}$$

$$r_p = \frac{\tan(\phi_1 - \phi_2)}{\tan(\phi_1 + \phi_2)}$$

$$t_s = \frac{2 \sin \phi_2 \cos \phi_1}{\sin(\phi_1 + \phi_2)}$$

$$t_p = \frac{2 \sin \phi_2 \cos \phi_1}{\sin(\phi_1 + \phi_2) \cos(\phi_1 - \phi_2)}$$



Unghi Brewster

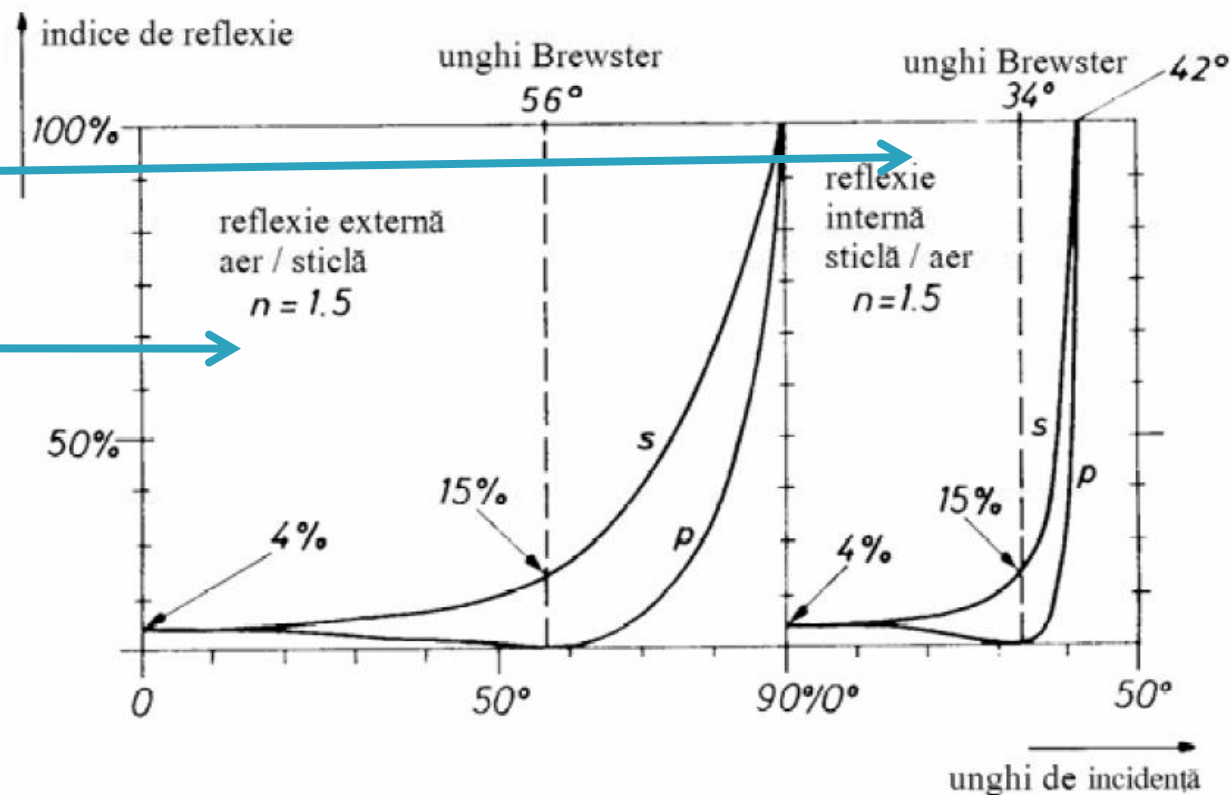
$$r_p = 0 \Rightarrow \tan(\phi_1 + \phi_2) \rightarrow \infty \Rightarrow \phi_1 + \phi_2 = \frac{\pi}{2}$$

$$n_1 \cdot \sin \phi_1 = n_2 \cdot \sin \phi_2 = n_2 \cdot \cos \phi_1$$

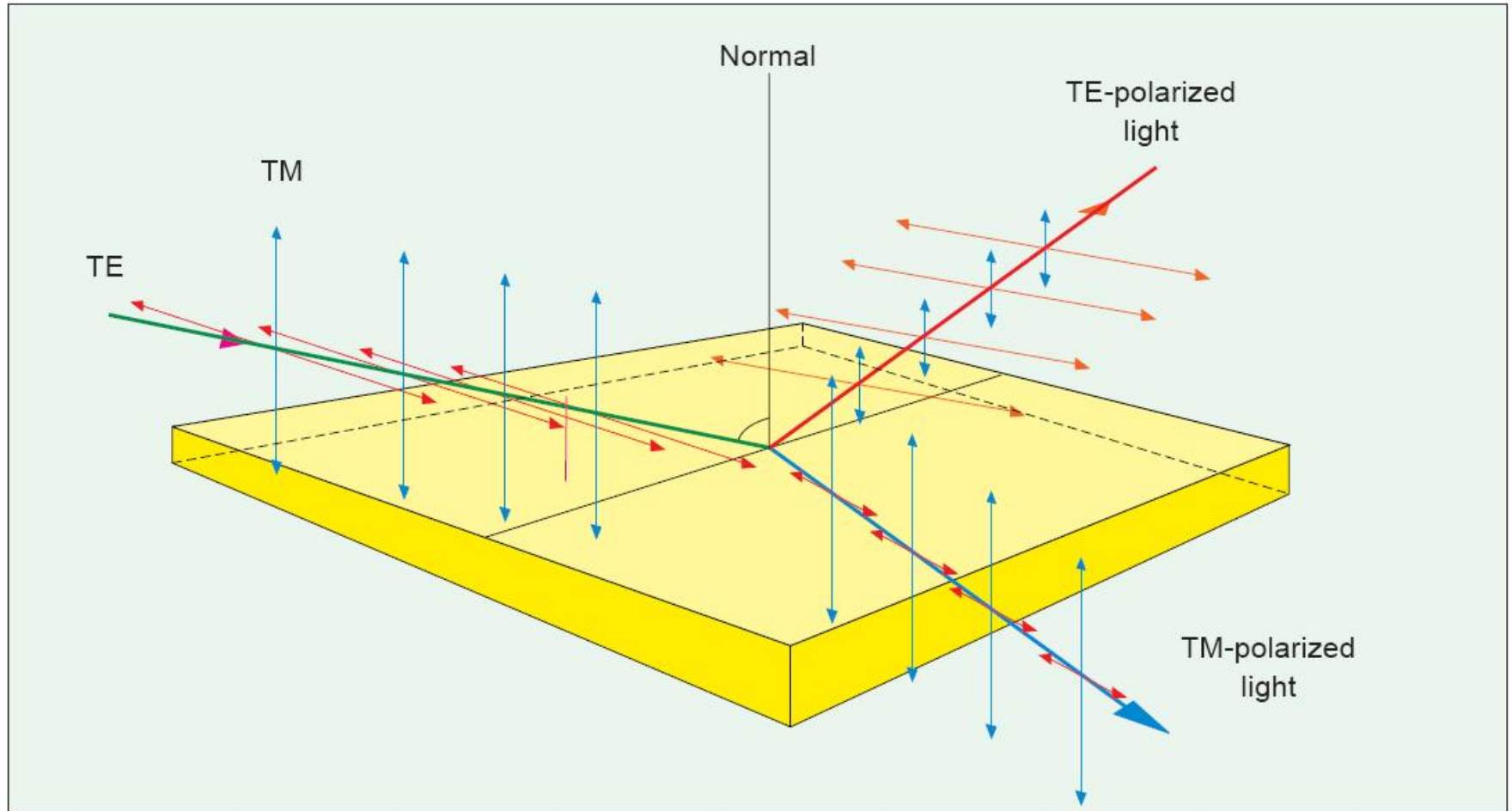
$$\phi_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\phi_B = 34^\circ$$

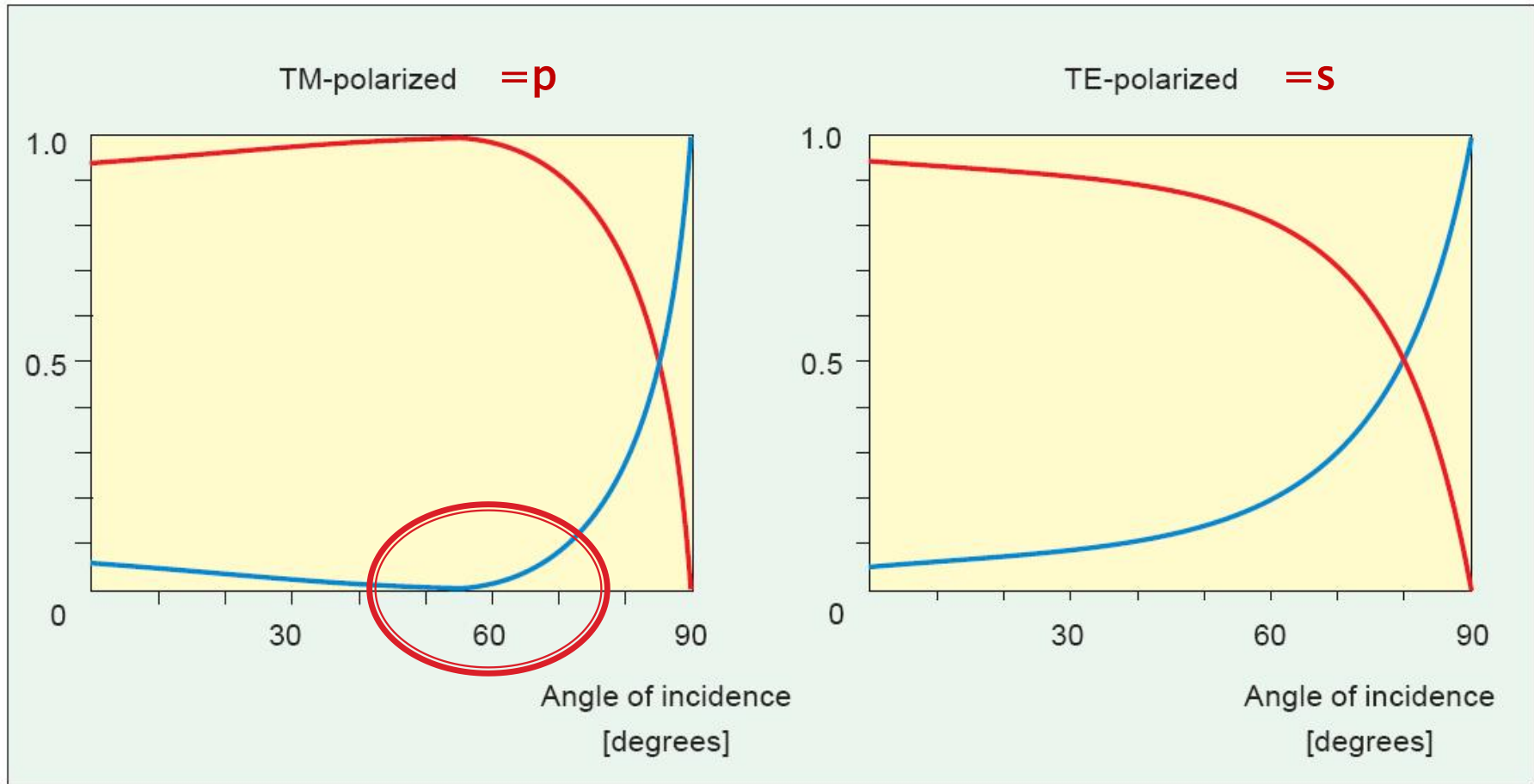
$$\phi_B = 56^\circ$$



Polarizarea luminii



Polarizarea luminii



Probleme

- ▶ Într-un LASER Fabry-Perrot, coerența luminii este obținută prin reflexii succesive ale luminii între două oglinzi paralele, separate de o distanță egală cu un multiplu a jumătate de lungime de undă ce se dorește emisă. Interferența constructivă și coerența dintre lumina incidentă și reflectată asigură amplificarea numai a luminii care îndeplinește această condiție. Se dorește realizarea unei diode LASER cu lungimea de undă $\lambda_0 = 1305\text{nm}$ utilizând un material cu $\epsilon_{r1} = 10.80$.

$$\lambda = \lambda(n)$$

Probleme

- ▶ Care trebuie să fie distanța între oglinzi dacă se alege în așa fel încât să corespundă la 380 jumătăți de lungime de undă? (1 p)
- ▶ Dacă oglinda este realizată prin inserarea în material a unei lamele dintr-un dielectric cu $n_2 = 2.23$, ce procent din lumină incidentă părăsește zonă activă dintre cele două oglinzi la fiecare reflexie? (1 p)
- ▶ Dacă în total se emit 3 linii spectrale corespunzătoare selectării luminii la care distanța dintre oglinzi calculată la a) este egală cu $(380 - 1)$, (380) , $(380 + 1)$ jumătăți de lungime de undă, care este lățimea spectrală în domeniul frecvență a diodei? Valoarea trebuie exprimată în GHz. (2 p)
- ▶ Care este unghiul Brewster de obținere a luminii liniar polarizate pentru trecerea din materialul cu $\epsilon_{r1} = 10.80$ în aer. (1 p)
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

$$\lambda = \lambda(n)$$

unghi Brewster

lamela dielectrica

Probleme

- ▶ Într-un material cu indicele de refracție $n_1 = 3.75$ se interpune un strat de material (2) cu $\epsilon_{r2} = 5.20$ pentru a realiza o oglindă parțial reflectantă la realizarea unui LASER cu $\lambda_0 = 950\text{nm}$. Înălțimea stratului (2) este aleasă pentru reflectivitate maximă la incidență normală.
 - Care este înălțimea cea mai mică a stratului (2) pentru a obține acest efect? (2p)
 - Ce procent din puterea incidentă este întoarsă în materialul (1)? (1p)
 - O radiație care sosește cu înclinarea de 41.2° față de normală la suprafața de separație, va trece din mediul (1) în mediul (2)? (1p)
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

lamela dielectrica

unghi critic

Fotometrie și radiometrie

Capitolul 3

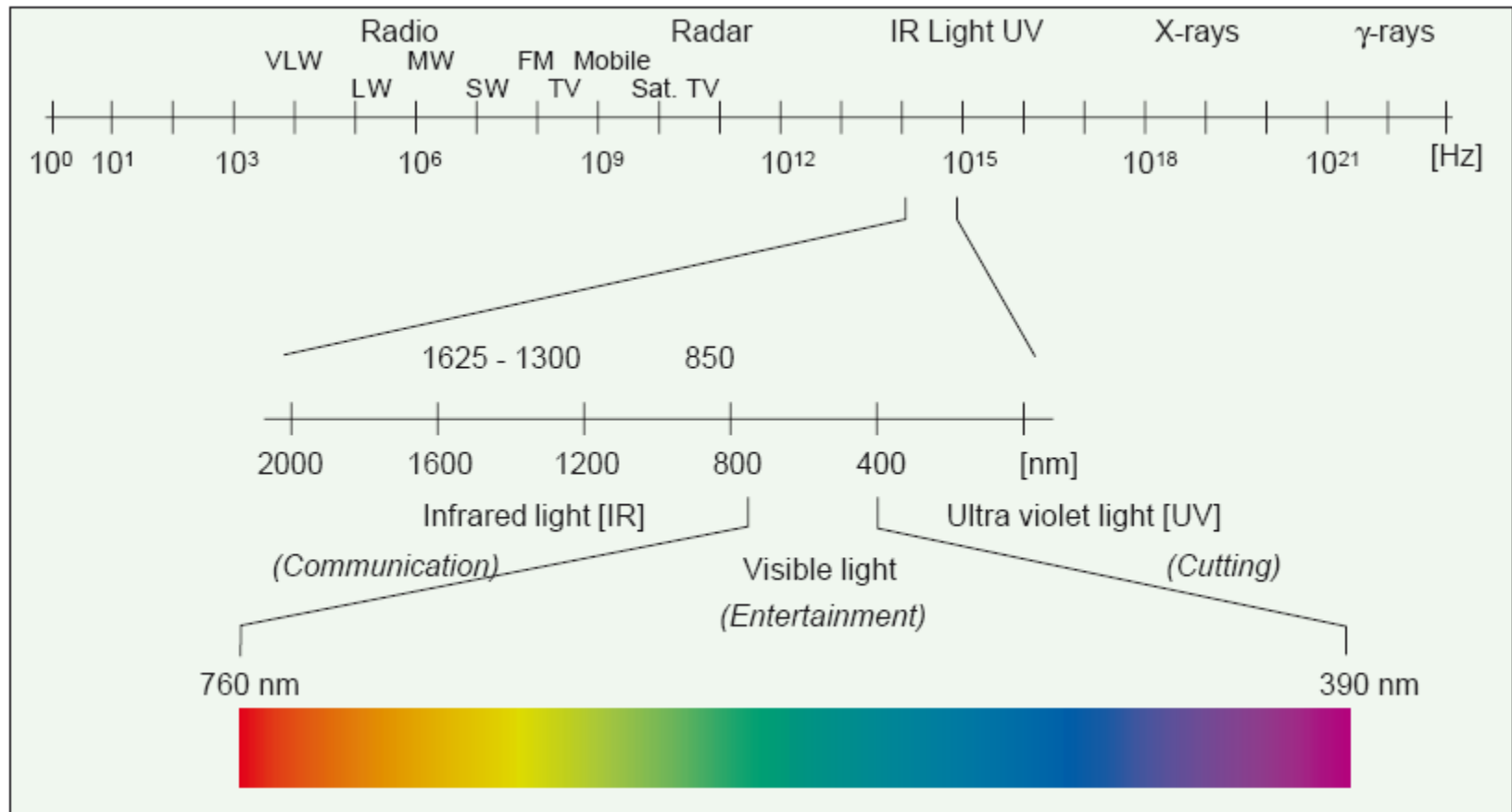
Cuprins

- ▶ **Lumina ca undă electromagnetică** (ecuațiile lui Maxwell, ecuația undelor, parametri de propagare)
- ▶ **Elemente de fotometrie și radiometrie** (mărimi energetice/luminoase)
- ▶ **Fibra optică** (realizare, principiu de funcționare, atenuare, dispersie, banda de frecvență)
- ▶ **Cabluri optice** (tehnologie, conectori, lipire – splice)
- ▶ **Proiectare sistemică a legăturii pe fibra optică** (bandă de frecvență, balanța puterilor)
- ▶ **Emitătoare optice** (LED și dioda laser – realizare fizică și funcționare)
- ▶ **Receptoare optice** (dioda PIN, dioda cu avalanșă – realizare fizică și funcționare)
- ▶ **Amplificatoare transimpedanță** (parametri, scheme tipice, TIA în buclă deschisă, cu reacție, diferențiale, control automat al câștigului)
- ▶ **Realizarea circuitelor pentru controlul emițătoarelor optice** (parametri, scheme tipice, controlul puterii, multiplexoare)
- ▶ **Dispozitive de captare a energiei solare** (principiu de funcționare, utilizare, proiectare)

Aplicatii majore

- ▶ Comunicatii
 - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
 - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
 - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)
- ▶ Energie solara
 - Efect fotovoltaic (Si)

Spectrul electromagnetic



O alta dualitate

- ▶ In optoelectronica, lumina poate fi privita din doua puncte de vedere
 - energetic (efect asupra dispozitivului)
 - uman (efect asupra ochiului)
- ▶ Dualitatea mărimilor implicate
 - energetice
 - luminoase
- ▶ Candela (cd) este una din cele 7 mărimi fundamentale ale SI
 - Cd = intensitatea luminoasa a unei surse ce emite o radiație monocromatica cu frecventa $540 \cdot 10^{12}$ Hz ($\lambda = 555\text{nm}$ in vid) si are o intensitate radianta de $1/683$ W/sr

Flux energetic

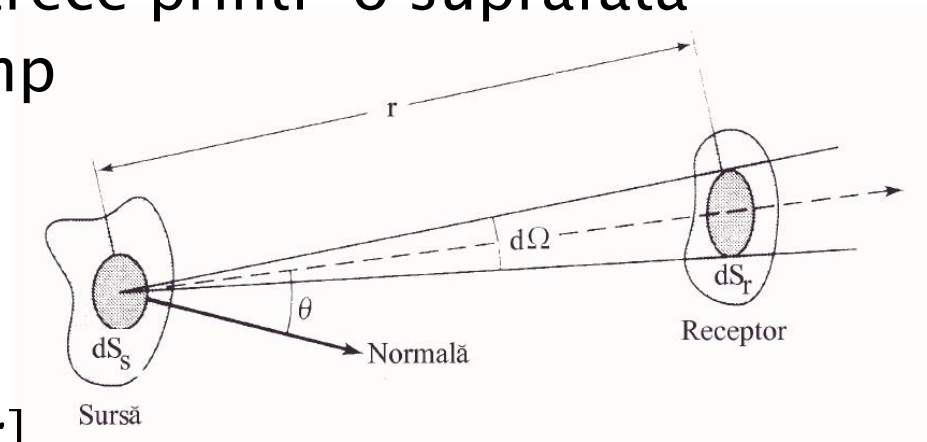
► Flux energetic al luminii

- viteza cu care energia trece printr-o suprafata
- energie/unitatea de timp
- unitatea SI – W

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt} \quad [W]$$

► Unghi solid

- definitie $\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [sr]$
- valoarea maxima, sfera: $\Omega = 4\pi \text{ sr}$
- pentru con cu deschiderea la varf 2ϕ : $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \phi)$
- pentru unghiuri mici: $\Omega = \pi \cdot \phi^2$



$$P_d = \frac{P_0}{\Omega \cdot R^2} \sim \frac{1}{R^2}$$

Marimi globale vs. locale

- ▶ Flux energetic al luminii
 - viteza cu care energia trece printr-o suprafata
 - energie/unitatea de timp
 - unitatea SI – W

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt} \quad [W]$$

- ▶ Putere electrica/optica

$$P = \frac{dE}{dt} \quad [W]$$

Marimi globale vs. locale

- ▶ Flux energetic al luminii
 - marime locala
 - este asociat unei anumite suprafete
- ▶ Putere electrica/optica
 - marime globala
 - “suma fluxurilor pentru toate suprafetele disponibile”

$$P = \frac{dE}{dt} = \iint_S \frac{\partial^2 E}{\partial t \partial A} dA = \iint_S \frac{\partial \Phi_e}{\partial A} dA \quad [W]$$

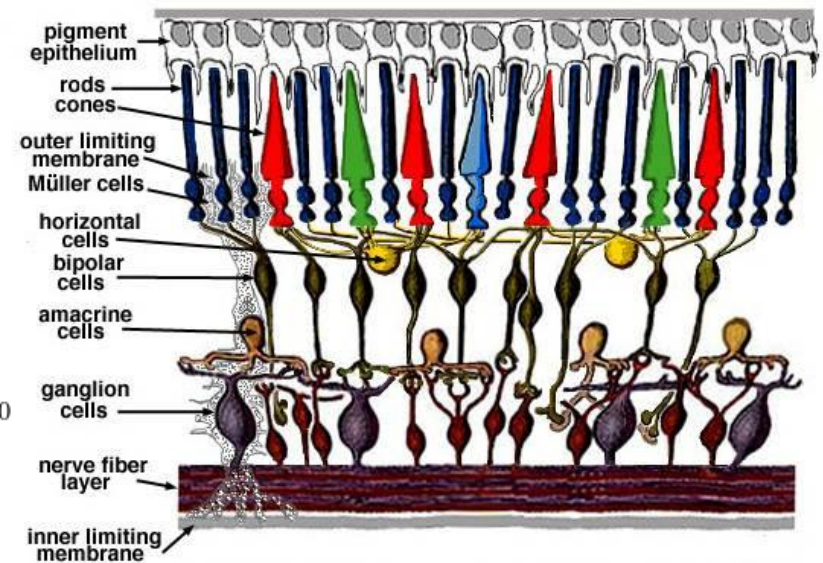
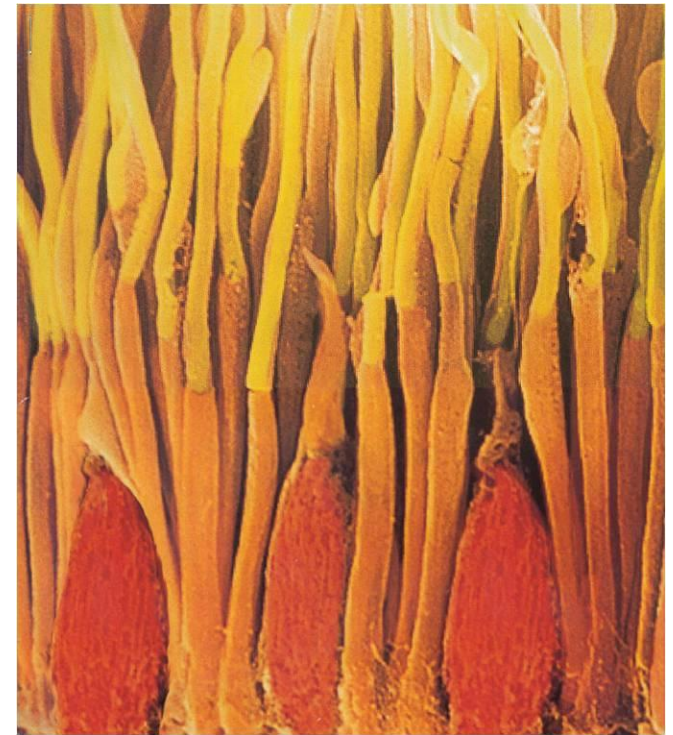
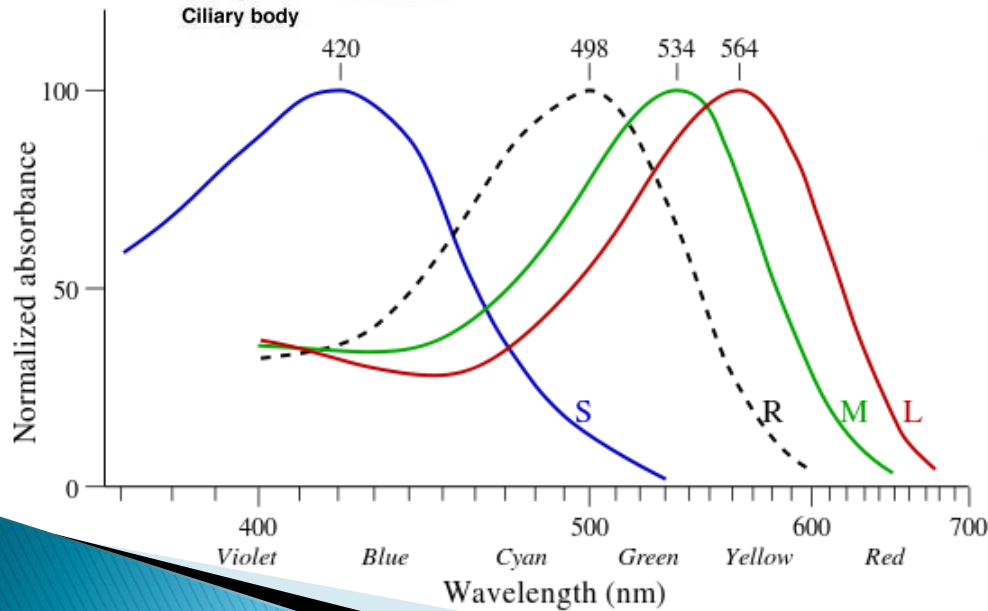
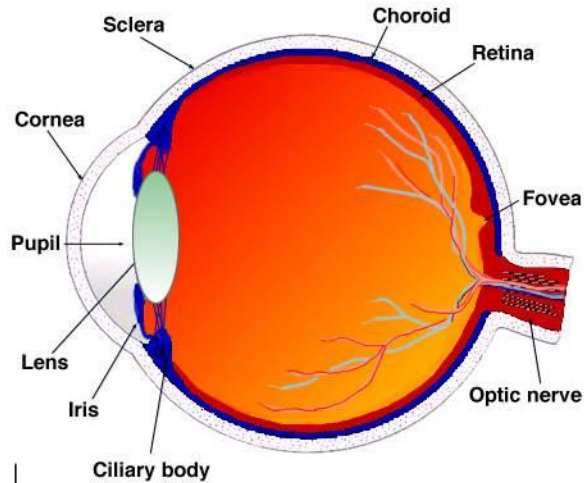
- ▶ Daca se poate considera emisie uniforma

$$\Phi_e \approx ct. \rightarrow P = \Phi_e \quad [W]$$

Flux luminos

- ▶ Flux luminos, definitie
 - o masura a puterii luminoase **percepute de om**
- ▶ Unitate de masura – $\text{lm} = \text{lumen}$
 - In SI de unitati **lumenul** este definit ca fluxul luminos al unei surse luminoase punctiforme cu intensitatea luminoasa de 1 cd intr-un unghi solid egal cu 1 sr.
 - la $\lambda = 555\text{nm}$ $\Phi_e = 1\text{W} \Leftrightarrow \Phi_v = 683\text{lm}$
- ▶ Dualitate pentru toate marimile implicate
 - radiometrie – indice “e”
 - fotometrie – indice “v”
- ▶ La alte lungimi de unda se tine cont de sensibilitatea relativa medie a ochiului uman

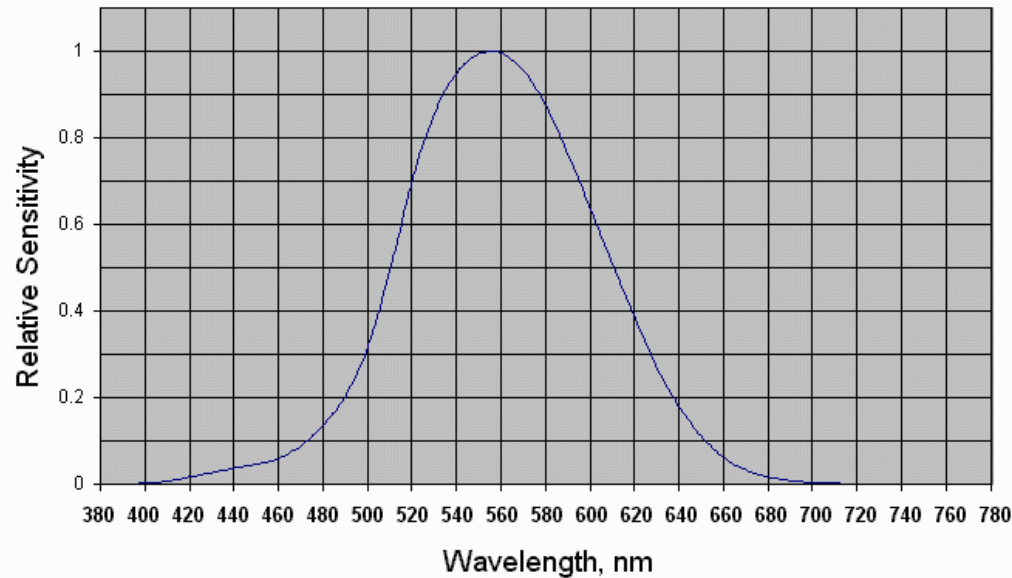
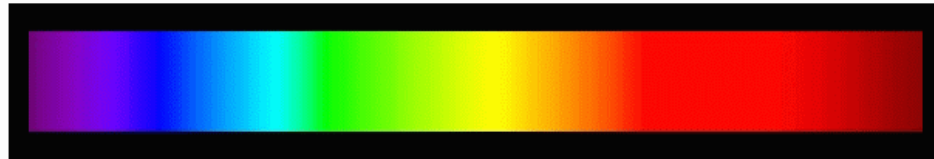
Ochiul uman



Standarde

- ▶ Se incearca definirea omului “standard”
- ▶ CIE – Commission Internationale de l'Éclairage
 - 1924 – luminozitatea relativa standard $V(\lambda)$ – **fotopic**
 - 1951 – luminozitatea relativa standard $V(\lambda)$ – **scotopic**
 - 1978 – Vos
 - 2005 – Sharpe, Stockman, Jagla, Jägle
 - 2008 – CIE $V(\lambda)$ – fotopic (~Sharpe)
- ▶ Sensibilitatea maxima a ochiului uman
 - vedere diurna (**fotopic**), $\lambda=555$ nm, $\eta_v = 683$ lm/W
 - vedere nocturna (**scotopic**), $\lambda=507$ nm, $\eta_v = 1700$ lm/W

CIE $V(\lambda)$



Response of Human Eye Versus Wavelength
(Data from the 1988 C.I.E. Photopic Luminous Efficiency Function)

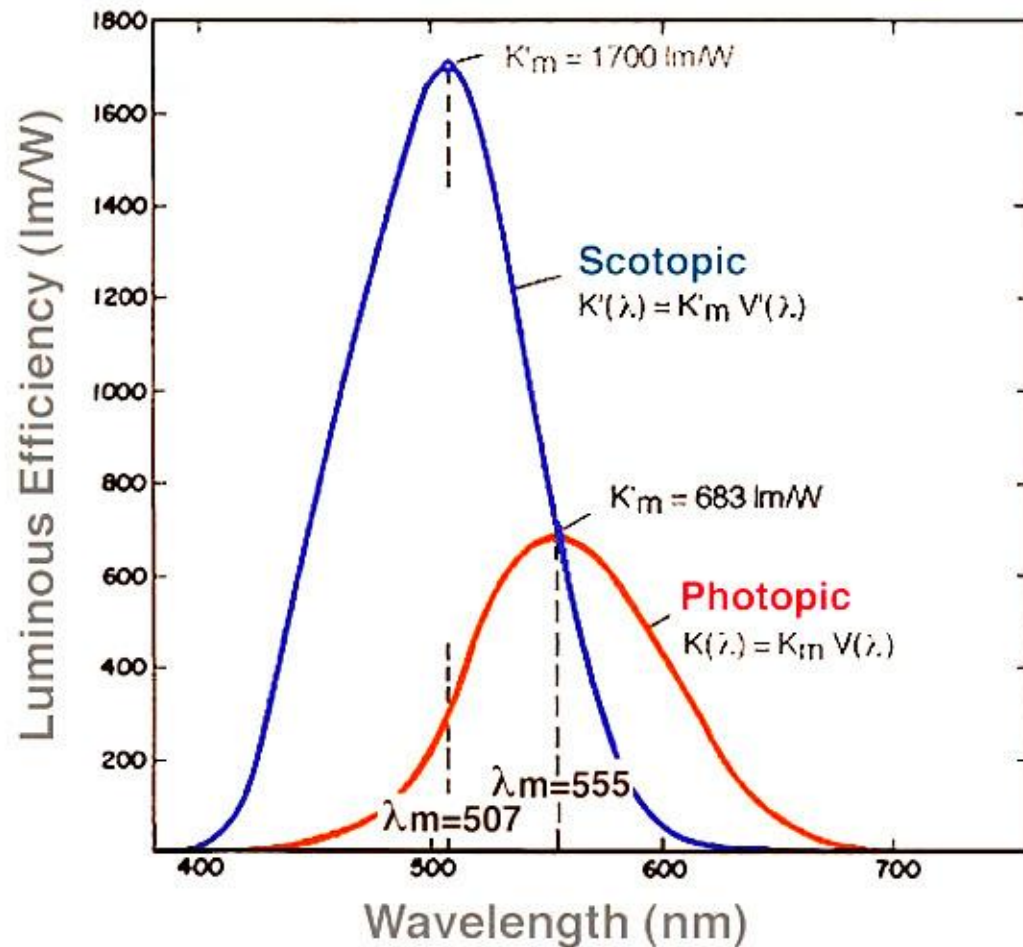


Figure 9. The scotopic and the photopic curves of spectral luminous efficacy (non-normalised values).

effect Purkinje



Curbe normalize CIE

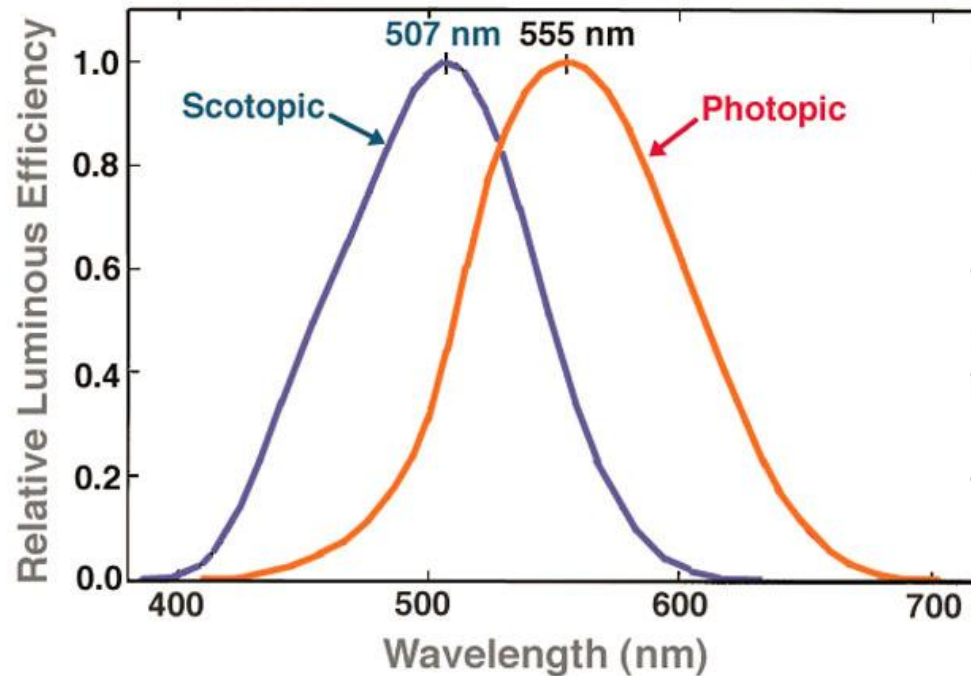


Figure 10. The scotopic and the photopic curves of relative spectral luminous efficiency as specified by the CIE (normalised values).

CIE $V(\lambda)$

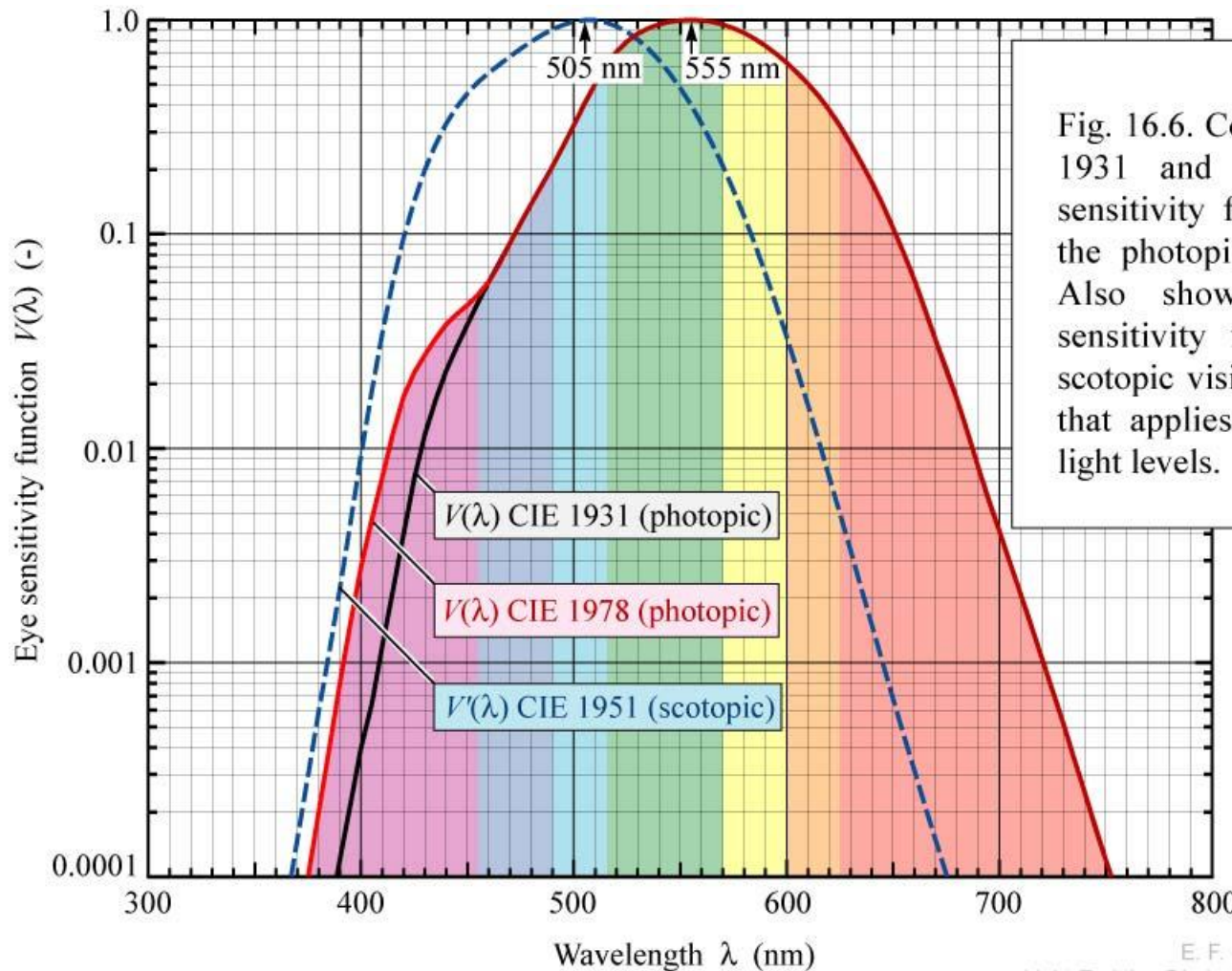
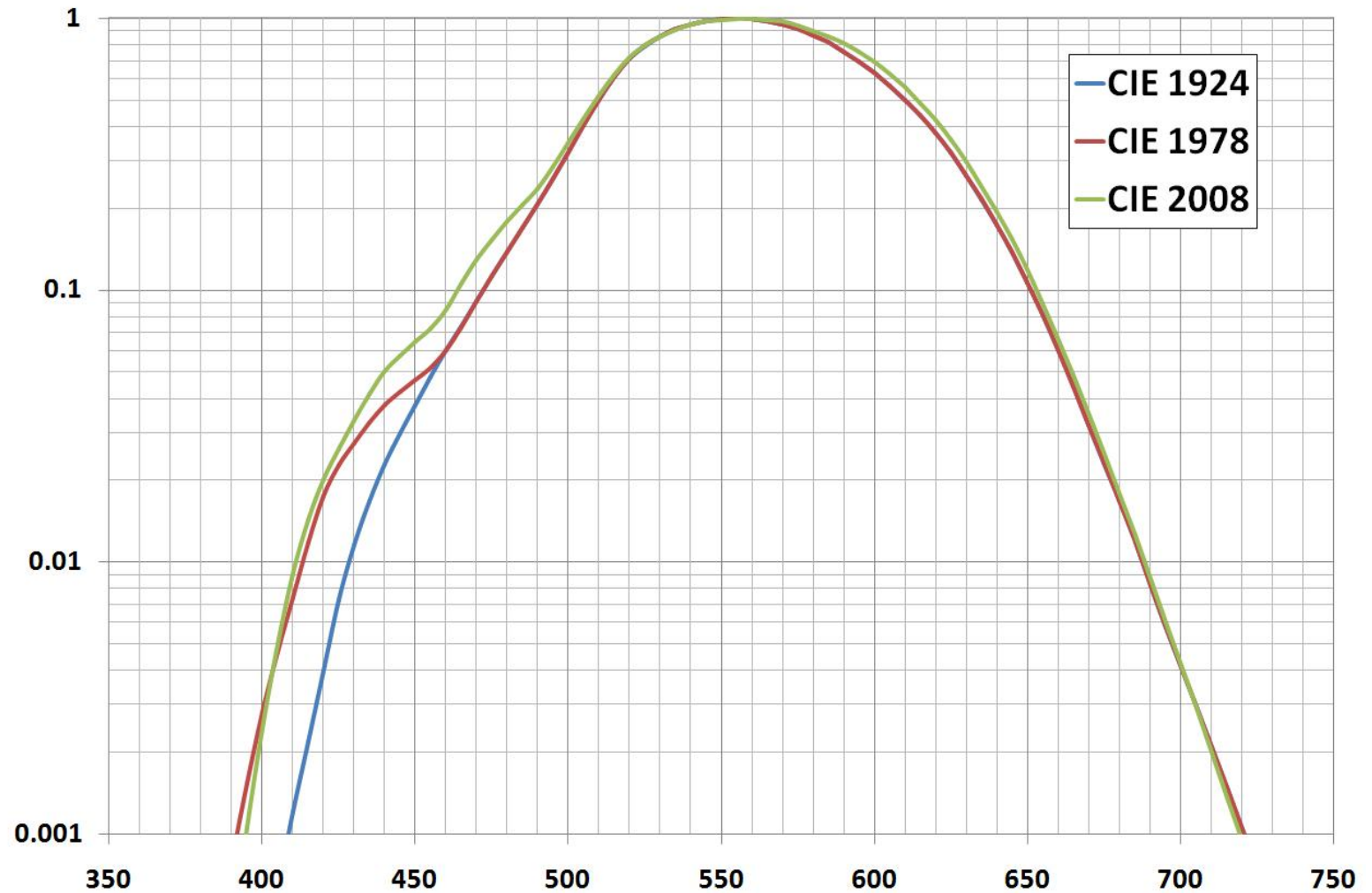
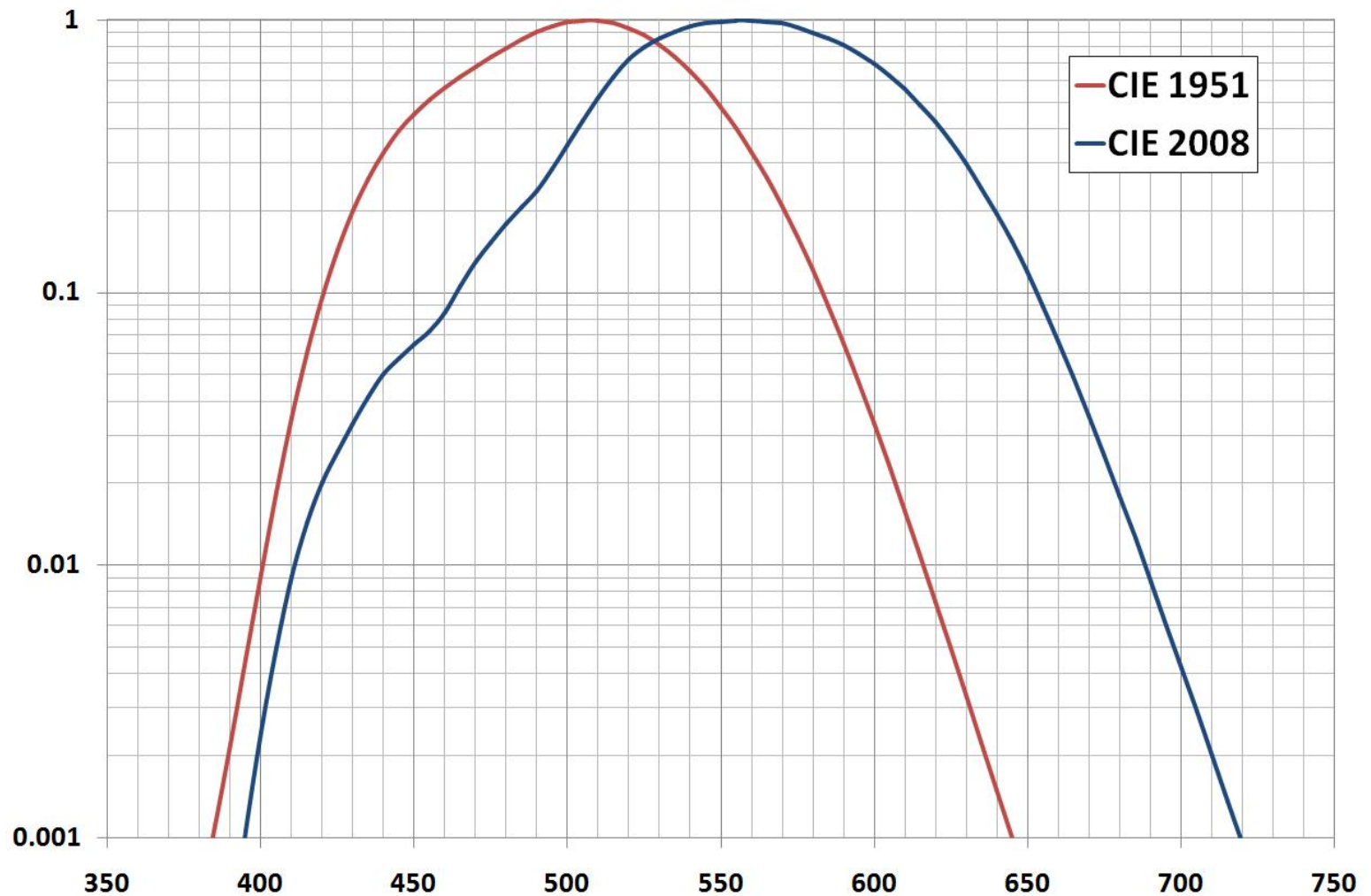


Fig. 16.6. Comparison of CIE 1931 and CIE 1978 eye sensitivity function $V(\lambda)$ for the photopic vision regime. Also shown is the eye sensitivity function for the scotopic vision regime, $V'(\lambda)$, that applies to low ambient light levels.

CIE $V(\lambda)$ fotopic



CIE $V(\lambda)$ fotopic / scotopic



Sensibilitate luminoasa $V(\lambda)$

	λ	fotopic CIE 1924	fotopic CIE 2008	scotopic CIE 1951
Violet	400	0.000396	0.00245219	0.00929
Indigo	445	0.0298	0.0574339	0.3931
Albastru	475	0.1126	0.153507	0.734
Verde	510	0.503	0.520497	0.997
Galben	570	0.952	0.973261	0.2076
Portocaliu	590	0.757	0.811587	0.0655
Rosu	650	0.107	0.119312	0.000677

CIE V(λ) 1931

La Commission internationale de l'Éclairage recommande, pour l'usage général, les valeurs suivantes, comme valeurs provisoires pour le facteur de visibilité.

Longueur d'onde (m μ)	Facteur de Visibilité relative(m μ)	Longueur d'onde	Facteur de Visibilité relative	Longueur d'onde (m μ)	Facteur de Visibilité relative
400	0.0004	530	0.862	650	0.107
10	0012	40	954	60	061
20	0040	550	995	70	032
30	0116	60	995	80	017
40	023	70	952	90	0082
450	038	80	870	700	0041
60	060	90	757	10	0021
70	091	600	631	20	00105
80	139	10	503	30	00052
90	208	20	381	40	00025
500	323	30	265	750	00012
10	503	40	175	60	00006
20	710				

Relatie radiometrie/fotometrie

- ▶ Pentru radiatii monocromatice

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \cdot \Phi_e[W] \cdot V(\lambda) \quad [lm] \quad \Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \cdot \Phi_e[W] \cdot V'(\lambda) \quad [lm]$$

- ▶ Pentru radiatii complexe:

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda = 683 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad [lm]$$

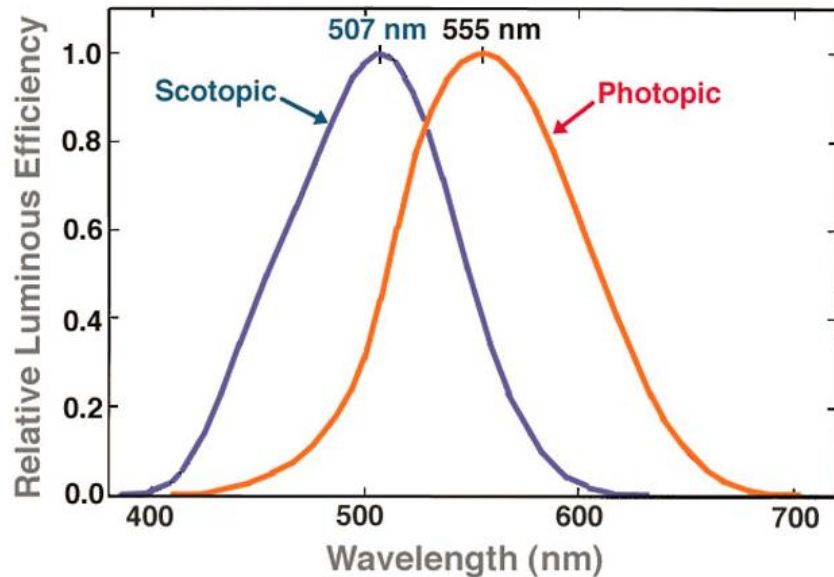
$$\Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V'(\lambda) d\lambda = 1700 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V'(\lambda) d\lambda \quad [lm]$$

- ▶ De cele mai multe ori, sursele sunt discrete, λ_i

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad [lm]$$

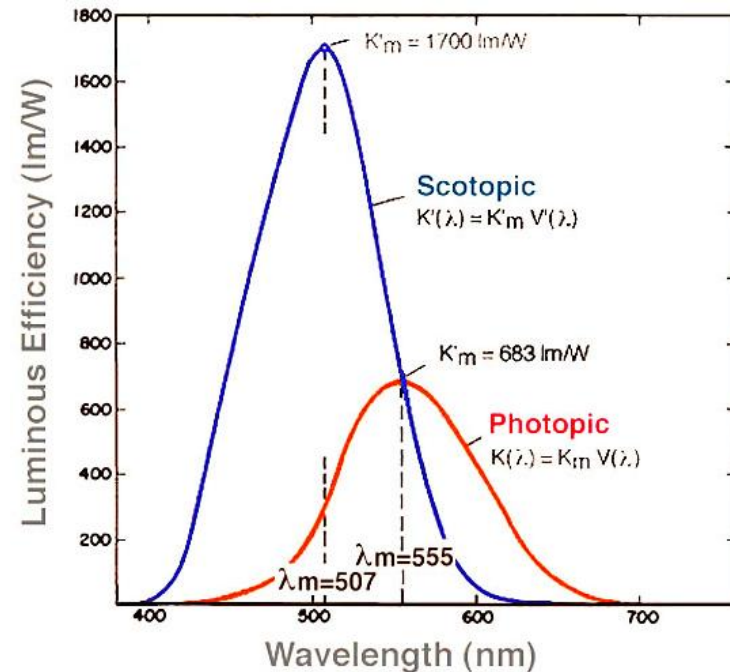
$$\Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V'(\lambda_i) \quad [lm]$$

Relatie radiometrie/fotometrie



$$0 \leq V(\lambda) \leq 1$$

$$0 \leq V'(\lambda) \leq 1$$



$$0 \leq \eta_v \leq K_m = 683 \text{ lm} / \text{W}$$

$$0 \leq \eta'_v \leq K'_m = 1700 \text{ lm} / \text{W}$$

Relatie radiometrie/fotometrie

▶ Eficienta luminoasa maxima

- scotopic: $K_m' = 1700 \text{ lm/W @ } 505 \text{ nm}$
- fotopic: $K_m = 683 \text{ lm/W @ } 555 \text{ nm}$
 - **683.002** lm/W; $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ($\lambda = 555.016 \text{ nm}$)

▶ Eficienta luminoasa

$$\eta_v = \frac{\Phi_v [\text{lm}]}{\Phi_e [\text{W}]} = K_m \cdot V(\lambda) = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(\lambda)$$

$$\eta_v' = \frac{\Phi_v' [\text{lm}]}{\Phi_e [\text{W}]} = K_m' \cdot V'(\lambda) = 1700 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V'(\lambda)$$

- ## ▶ Functiile de sensibilitate luminoasa $V(\lambda)$, $V'(\lambda)$ sunt **normalize** (valoarea 1 pentru sensibilitate maxima)
- Sensibilitate luminoasa = Eficienta luminoasa normalizata

Eficiența luminoasă, η_v [lm/W]

	λ	fotopic CIE 1924	Sharpe 2005	scotopic CIE 1951
Violet	400	0	2	16
Indigo	445	20	40	668
Albastru	475	77	108	1248
Verde	510	344	361	1695
Galben	570	650	659	353
Portocaliu	590	517	541	111
Rosu	650	73	77	1

Radiometrie/fotometrie – fotopic

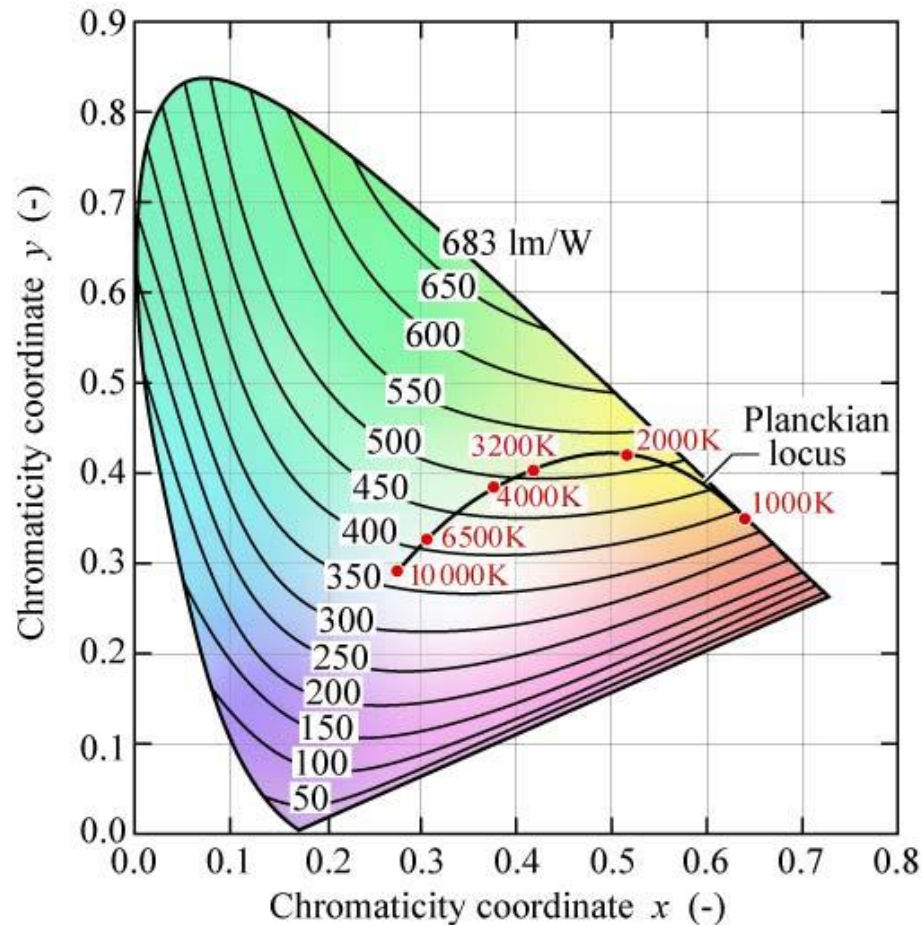
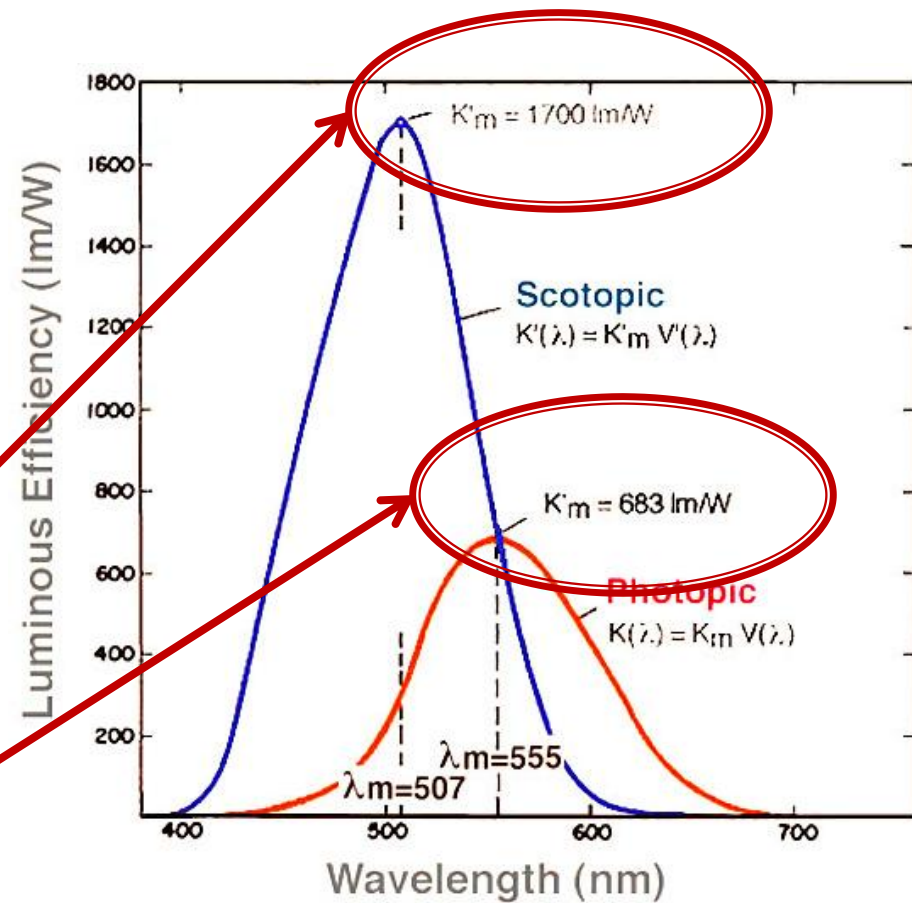
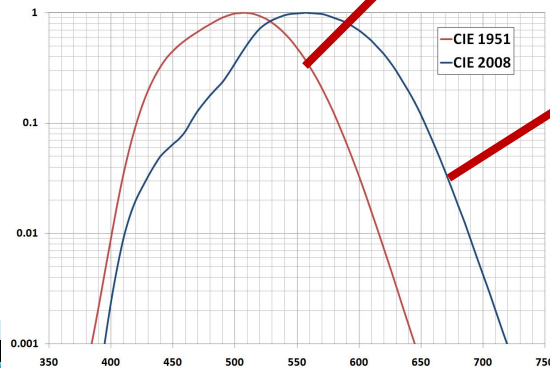
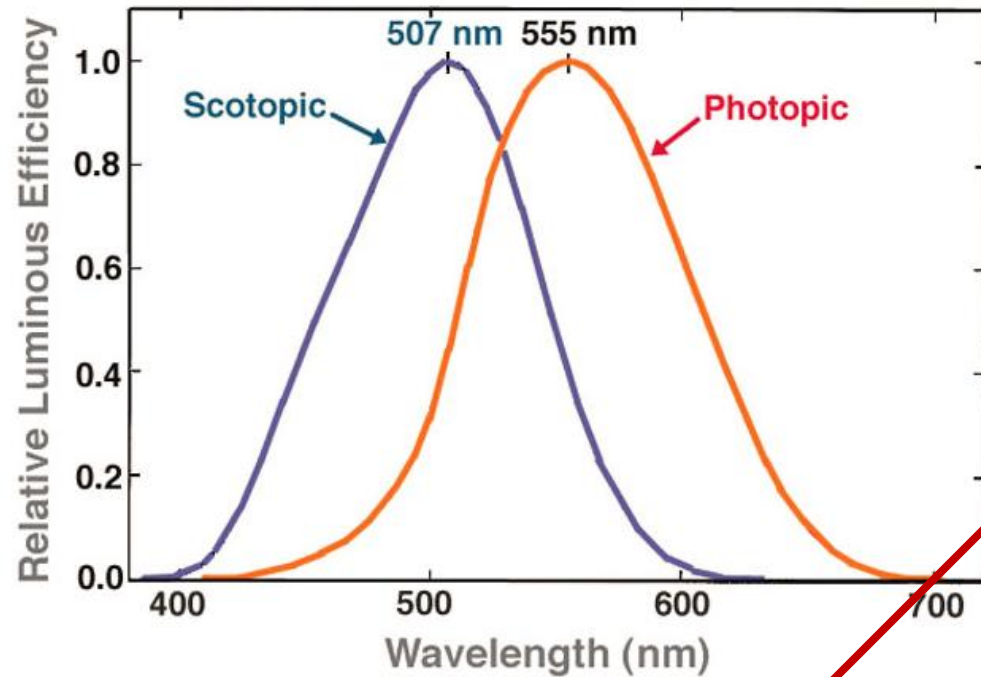


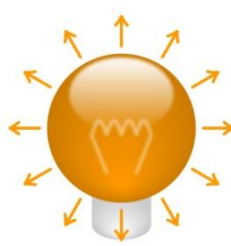
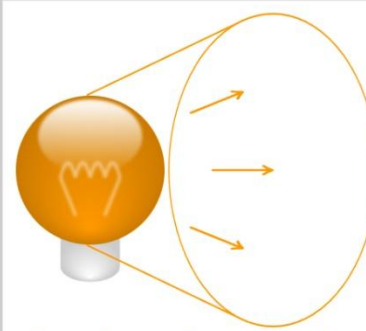
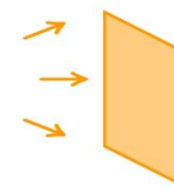
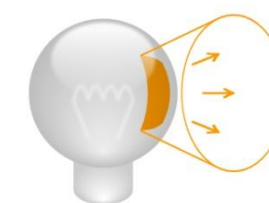
Fig. 16.8. Relation of maximum possible luminous efficacy (lumens per optical Watt) and chromaticity in the CIE 1931 x, y chromaticity diagram (adopted from MacAdam, 1950).

$$\eta_v(\lambda) \quad [\text{lm/W}]$$

Relatie radiometrie/fotometrie



Relatie radiometrie/fotometrie

	$\frac{\partial}{\partial \Omega} \rightarrow$	
	Non-directional	Directional
Over-all	 Luminous efficacy K (lm/W) Photometry [Luminous flux Φ_V (lumen, lm = cd · sr) Radiometry [Radiant flux Φ_e (watt, W)	 Luminous intensity I_V (candela, cd = lm/sr) Radiant intensity $I_{e,\Omega}$ (W/sr)
$\frac{\partial}{\partial A} \downarrow$		
Per unit area	 Exiting: Luminous exitance M_V (lm/m²) Radiant exitance M_e (W/m²)  Incoming: Illuminance E_V (lux, lx = lm/m²) Irradiance E_e (W/m²)	 Luminance L_V (nit, nt = cd/m²) Radiance $L_{e,\Omega}$ (W/sr/m²)

Marimi luminoase/energetice

► Intensitatea

- raportul dintre fluxul care părăsește sursa și se propagă într-un element de unghi solid ce conține direcția de propagare și elementul de unghi solid.
- o masura a puterii emise de o sursa într-un element de unghi solid

Intensitatea			
Fotometrie		Radiometrie	
$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	SI: cd	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	SI: W/sr

Marimi luminoase/energetice

► Iluminarea

- raportul dintre fluxul primit de un element de suprafață conținând punctul și aria acestui element (definita într-un punct al unei suprafețe la **receptie**):
- o masura a intensitatii luminii incidente pe o suprafata

Iluminarea			
Fotometrie		Radiometrie	
$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	SI: lx	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	SI: W/m ²

Marimi luminoase/energetice

► Excitanța

- raportul dintre fluxul care părăsește un element de suprafață conținând punctul și aria elementului de suprafață (definita într-un punct al unei suprafețe la emisie):
- o masura a intensitatii luminii emise de o suprafata

Excitanța			
Fotometrie		Radiometrie	
$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	SI: lm/m ²	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	SI: W/m ²

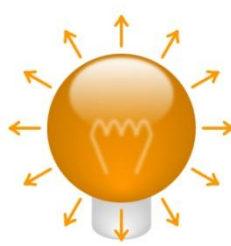
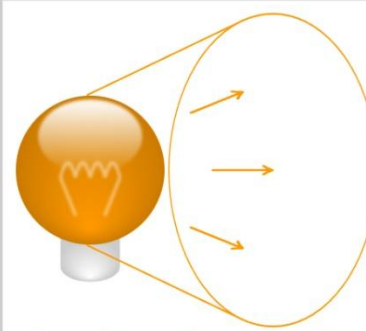
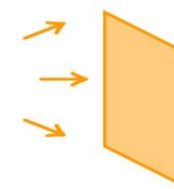
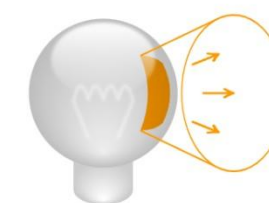
Marimi luminoase/energetice

► Luminanța

- raportul dintre fluxul care părăsește, atinge sau traversează un element de suprafață și care se propagă în direcții conținute într-un con elementar, $d\Omega$, conținând direcția dată, și produsul dintre unghiul solid al conului și aria proiecției ortogonale a elementului de suprafață pe un plan perpendicular pe direcția dată, dS (definita într-o direcție, într-un punct de pe suprafața unei surse sau unui receptor, sau într-un punct pe traiectul unui fascicol):
- o masura a densitatii de intensitate luminoasa într-o anumita directie

Luminanța			
Fotometrie		Radiometrie	
$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega \cdot dS}$	SI: cd/m ²	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dS}$	SI: W/m ² /sr

Relatie radiometrie/fotometrie

	$\frac{\partial}{\partial \Omega} \rightarrow$	
	Non-directional	Directional
Over-all	 Luminous efficacy K (lm/W) Photometry [Luminous flux Φ_V (lumen, lm = cd · sr) Radiometry [Radiant flux Φ_e (watt, W)	 Luminous intensity I_V (candela, cd = lm/sr) Radiant intensity $I_{e,\Omega}$ (W/sr)
$\frac{\partial}{\partial A} \downarrow$		
Per unit area	 Exiting: Luminous exitance M_V (lm/m²) Radiant exitance M_e (W/m²)  Incoming: Illuminance E_V (lux, lx = lm/m²) Irradiance E_e (W/m²)	 Luminance L_V (nit, nt = cd/m²) Radiance $L_{e,\Omega}$ (W/sr/m²)

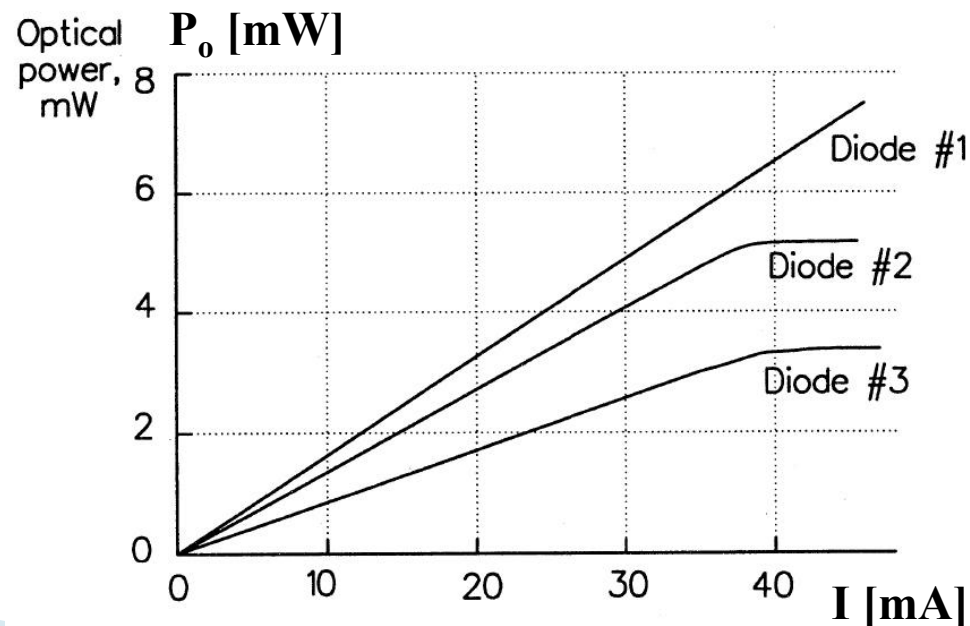
Caracteristica de raspuns LED

- ▶ Caracteristica putere optica emisa functie de curentul direct prin LED este liniara la nivele mici ale curentului.
- ▶ Nu exista curent de prag
- ▶ La nivele foarte mari puterea optica se satureaza

- ▶ Responzivitatea

$$r = \frac{P_o}{I} \left[\frac{W}{A} \right]$$

- ▶ Tipic $r = 50 \mu W / mA$



Caracteristica de raspuns LD

- ▶ Amorsarea emisiei stimulate necesita pomparea unei anumite cantitati de energie – curent de prag

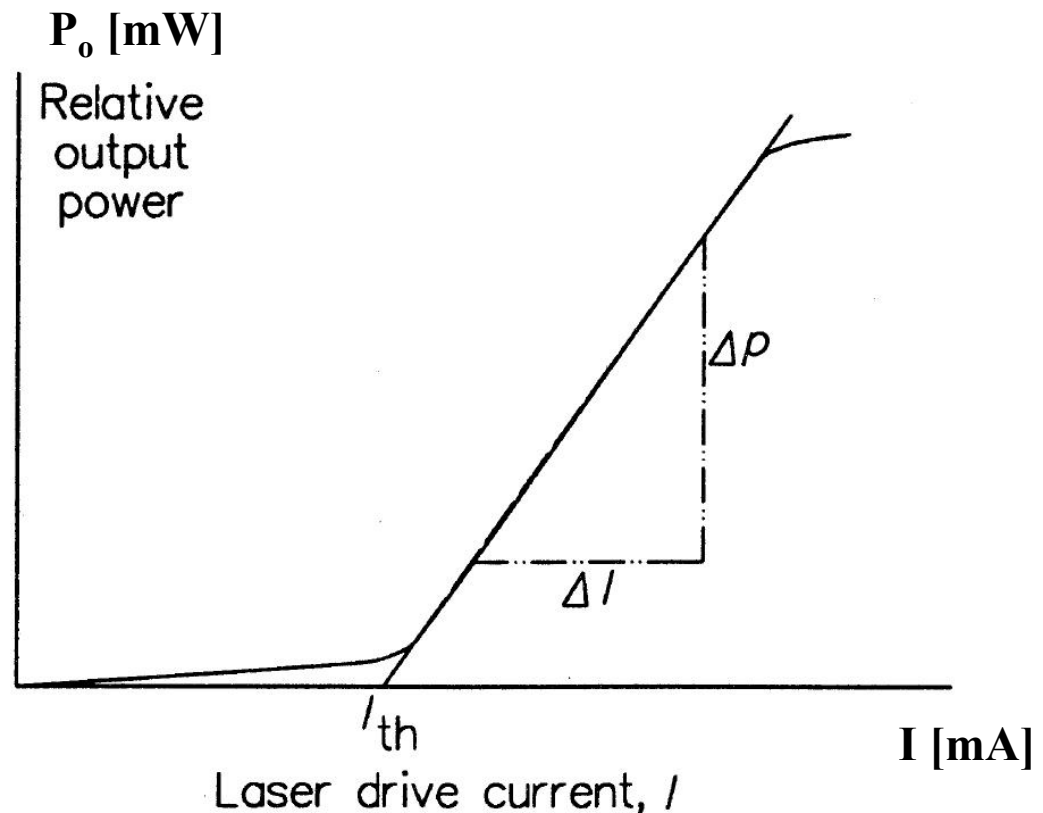
$I < I_{th}$ regim LED
ineficient!, $P_o \cong 0$

$I > I_{th}$ regim LASER

$$r = \frac{\Delta P_o}{\Delta I} \left[\frac{W}{A} \right]$$

$$P_o = r \cdot (I - I_{th})$$

Apare saturare la nivele mari de curent



Directivitatea radiatiei exterioare

► SLED

- radiatia este emisa cu simetrie circulara, in interiorul unui con cu unghi la varf tipic de 60°
- Viewing Half Angle $\sim 10^\circ \div 15^\circ$

► ELED

- radiatia emisa nesimetric in forma de con eliptic
 - perpendicular pe jonctiune $\sim 60^\circ$
 - paralel cu jonctiunea $\sim 30^\circ$

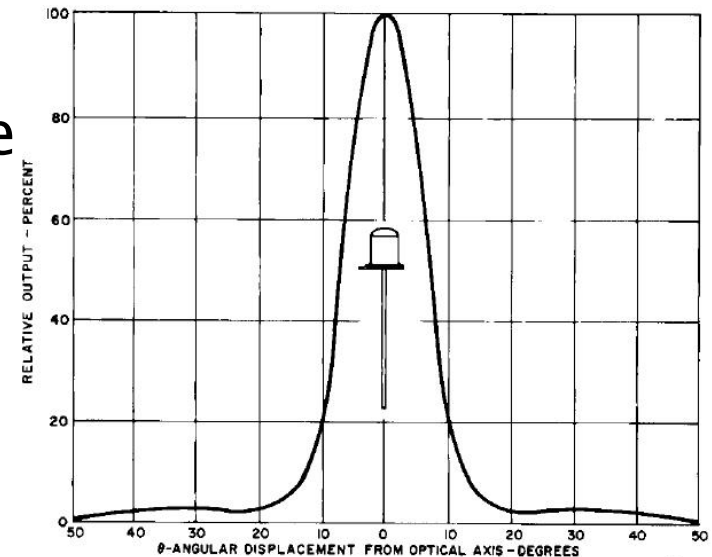
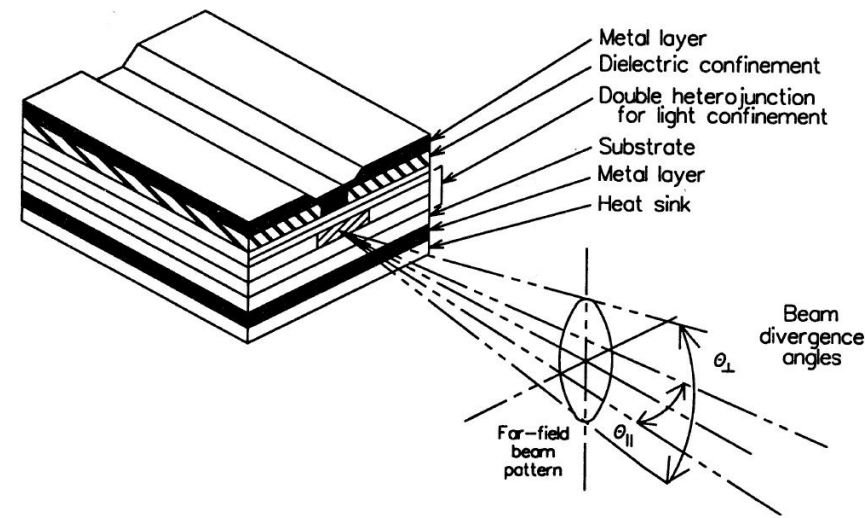


Fig. 5. Typical Radiation Pattern

ST1054



Directivitatea radiatiei exterioare

- ▶ Sursa lambertiana

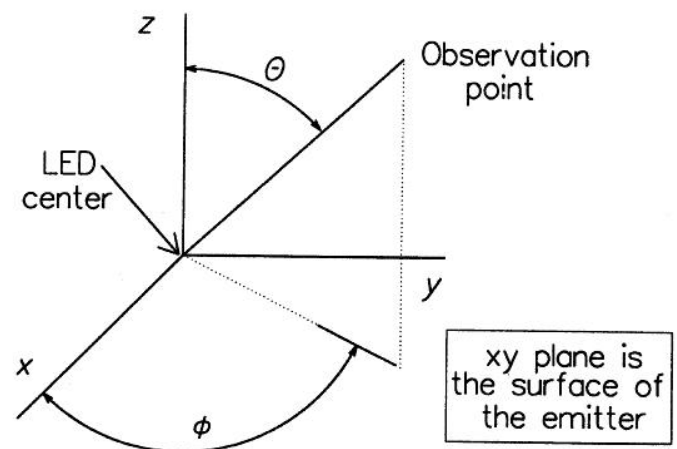
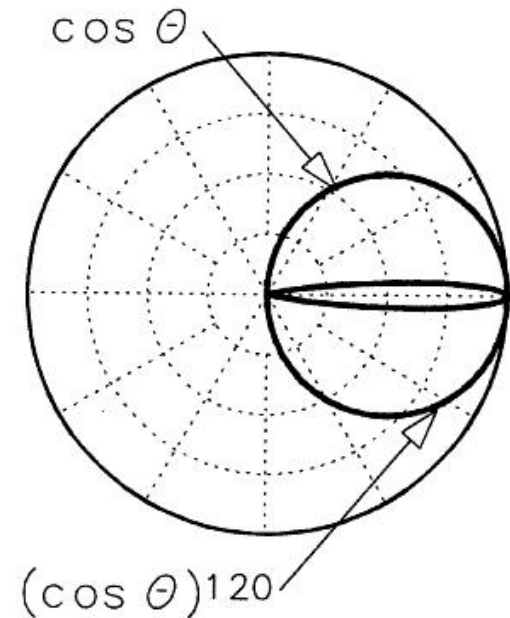
$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos \theta$$

- ▶ Aproximatie Lambertiana pentru surse cu directivitate crescuta

$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos^n \theta$$

- ▶ Surse cu emisie asimetrica

$$P(\theta) = \frac{P_0}{\frac{\sin^2 \phi}{\cos^T \theta} + \frac{\cos^2 \phi}{\cos^L \theta}}$$



Marimi globale vs. locale

- ▶ Flux energetic al luminii
 - marime locala
 - este asociat unei anumite suprafete
- ▶ Putere electrica/optica
 - marime globala
 - “suma fluxurilor pentru toate suprafetele disponibile”

$$P = \frac{dE}{dt} = \iint_S \frac{\partial^2 E}{\partial t \partial A} dA = \iint_S \frac{\partial \Phi_e}{\partial A} dA \quad [W]$$

- ▶ Daca se poate considera emisie uniforma

$$\Phi_e \approx ct. \rightarrow P = \Phi_e \quad [W]$$

Marimi luminoase

- ▶ Standardele pentru surse luminoase (de ex. semne de circulatie), iluminarea spatiilor de lucru/odihna
 - sunt concepute cu marimi luminoase
 - lm, cd, lx, cd/m² etc.
- ▶ de multe ori se adapteaza relatiile pentru surse mai simple:

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \rightarrow I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \Big|_{I_v \approx ct. \text{ in } \Omega}$$

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \rightarrow E_v = \frac{\Phi_v}{S} \Big|_{\Phi_v \approx ct. \text{ pe } S}$$

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \rightarrow \Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)$$

Contact

- ▶ Laboratorul de microunde si optoelectronica
- ▶ <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>
- ▶ rdamian@etti.tuiasi.ro