

# Optoelectronică, structuri și tehnologii

Curs 4  
2015/2016

# Disciplina 2015/2016

- ▶ 2C/1L Optoelectronică, structuri și tehnologii, **OSTC**
- ▶ **Minim 7 prezente (C+L)**
- ▶ Curs – **sl. Radu Damian**
  - an IV  $\mu$ E
  - Luni 18–20, P5
  - E – 66% din nota
  - probleme + (**? 1 subiect teorie**) + (2p prez. curs)
  - toate materialele permise
- ▶ Laborator – **sl. Daniel Matasaru**
  - an IV  $\mu$ E, an IV Tc
    - Luni 16-18 impar
    - Marti 18-20
    - Joi 8-12 impar
  - L – 17% din nota
  - T – 17% din nota

# Recapitulare

Curs 3

# Reprezentare logaritmică!!!

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# Lumina ca undă electromagnetică

Capitolul 2

# 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  $540 \cdot 10^{12}$  Hz"

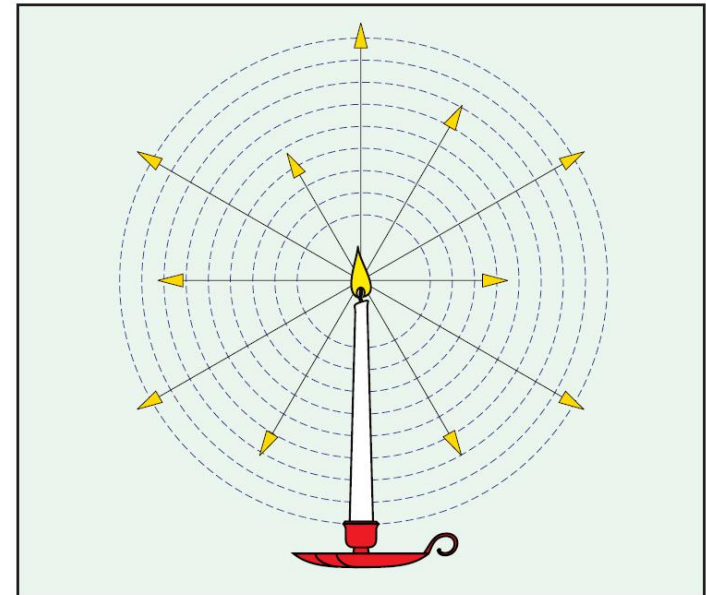
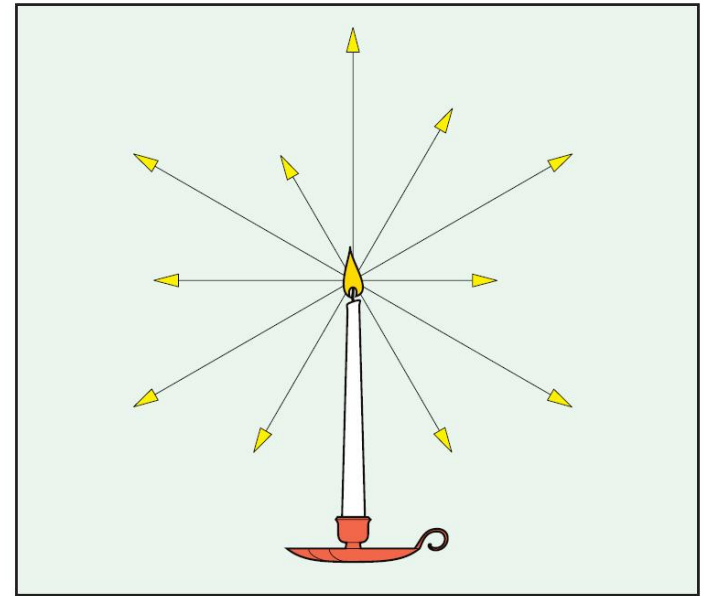


# Optică geometrică

## Capitolul 3

# Raze de lumina

- ▶ Lumina este constituita din raze care se propaga in linie dreapta in medii omogene
- ▶ Sursa omnidirectionala: emite similar in toate directiile
  
- ▶ Energia luminoasa descreste invers proportional cu patratul distantei fata de sursa (energia se imparte uniform pe suprafata intregii sfere)



$$P = \frac{P_0}{r^2}$$



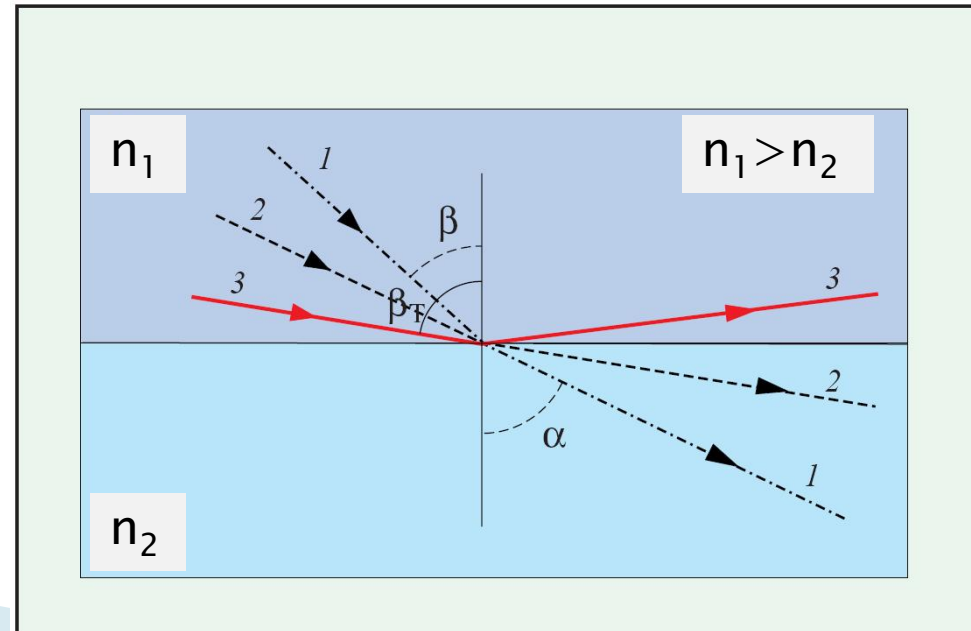
# Reflexia totala

- ▶ 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

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

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

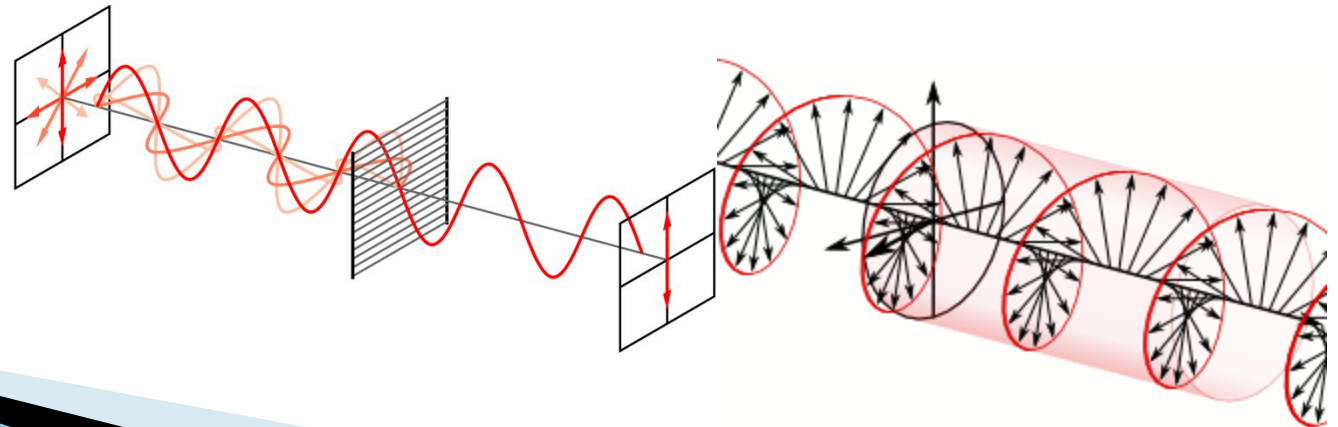
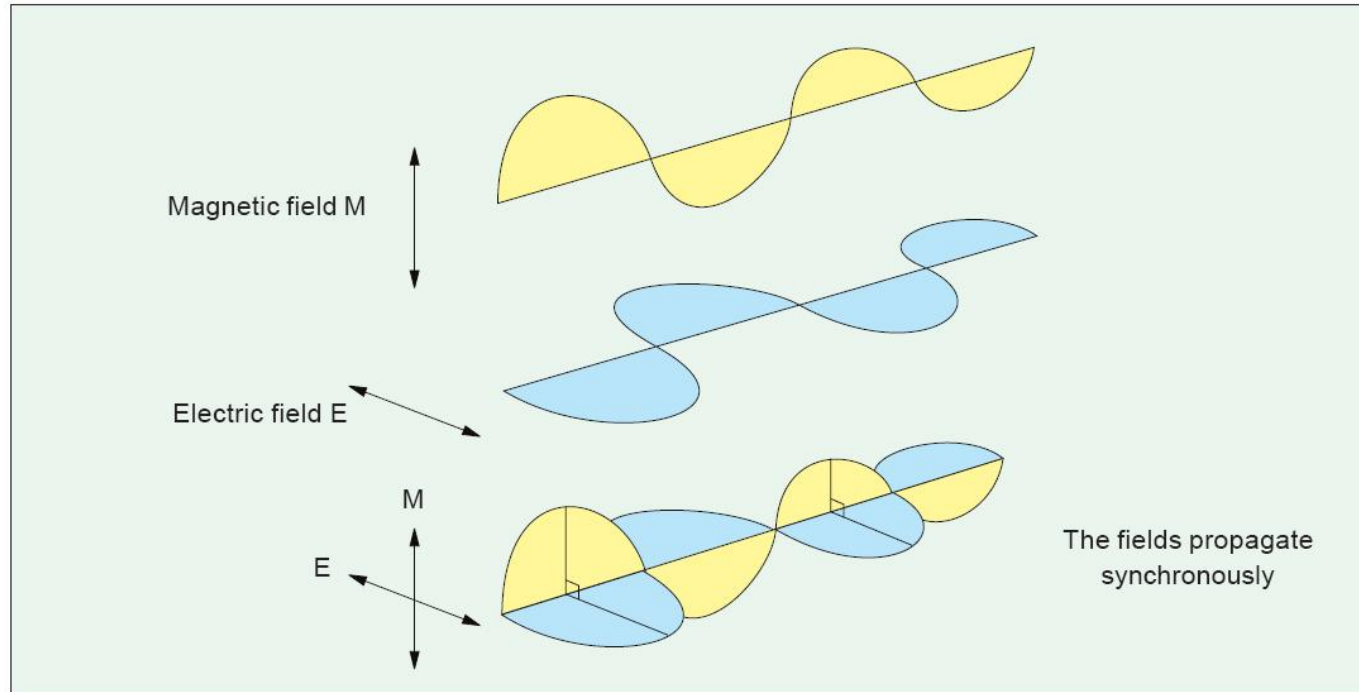
$$\phi_C = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$



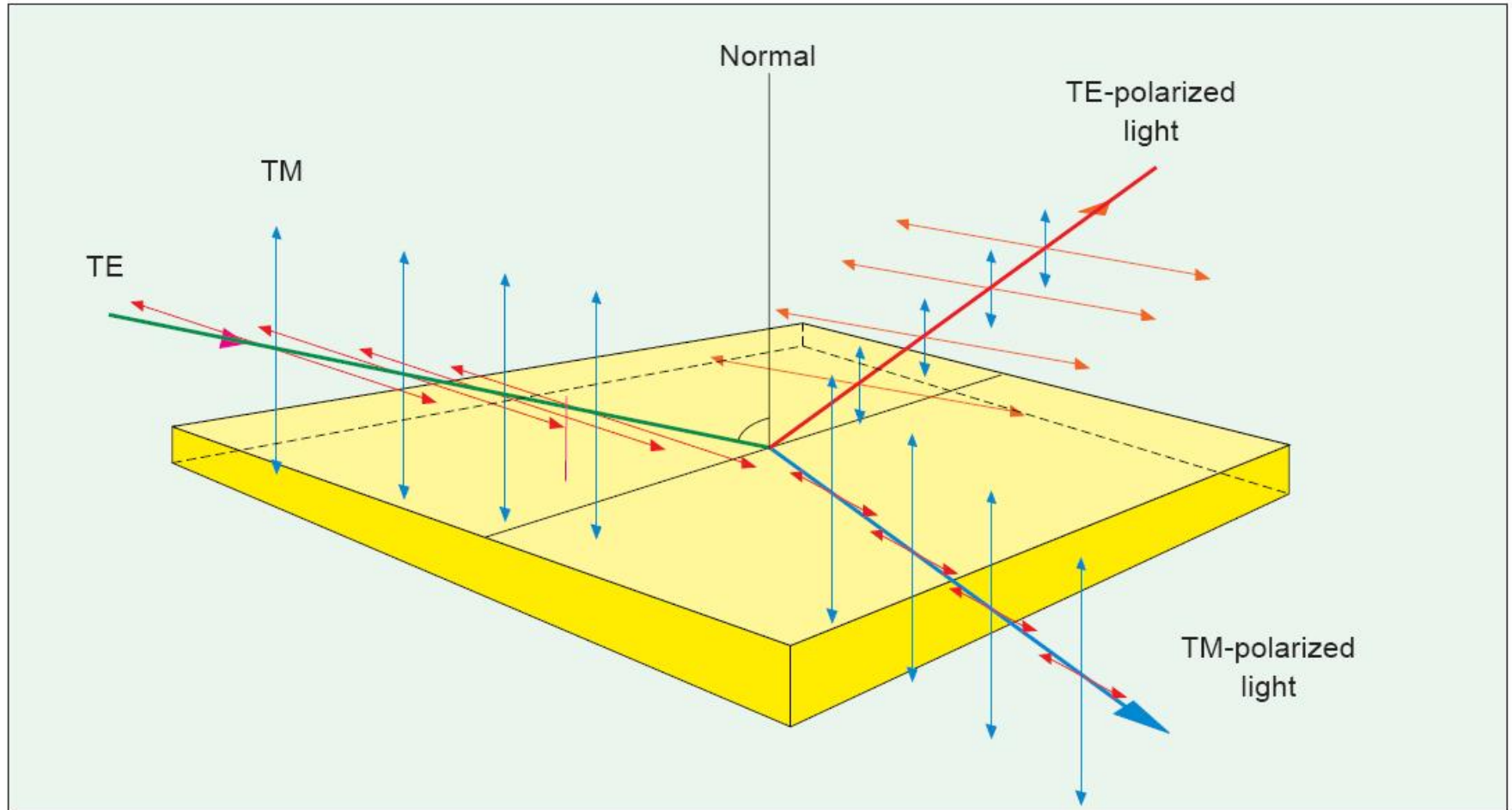
# Lumina ca undă electromagnetică

(tot) Capitolul 2

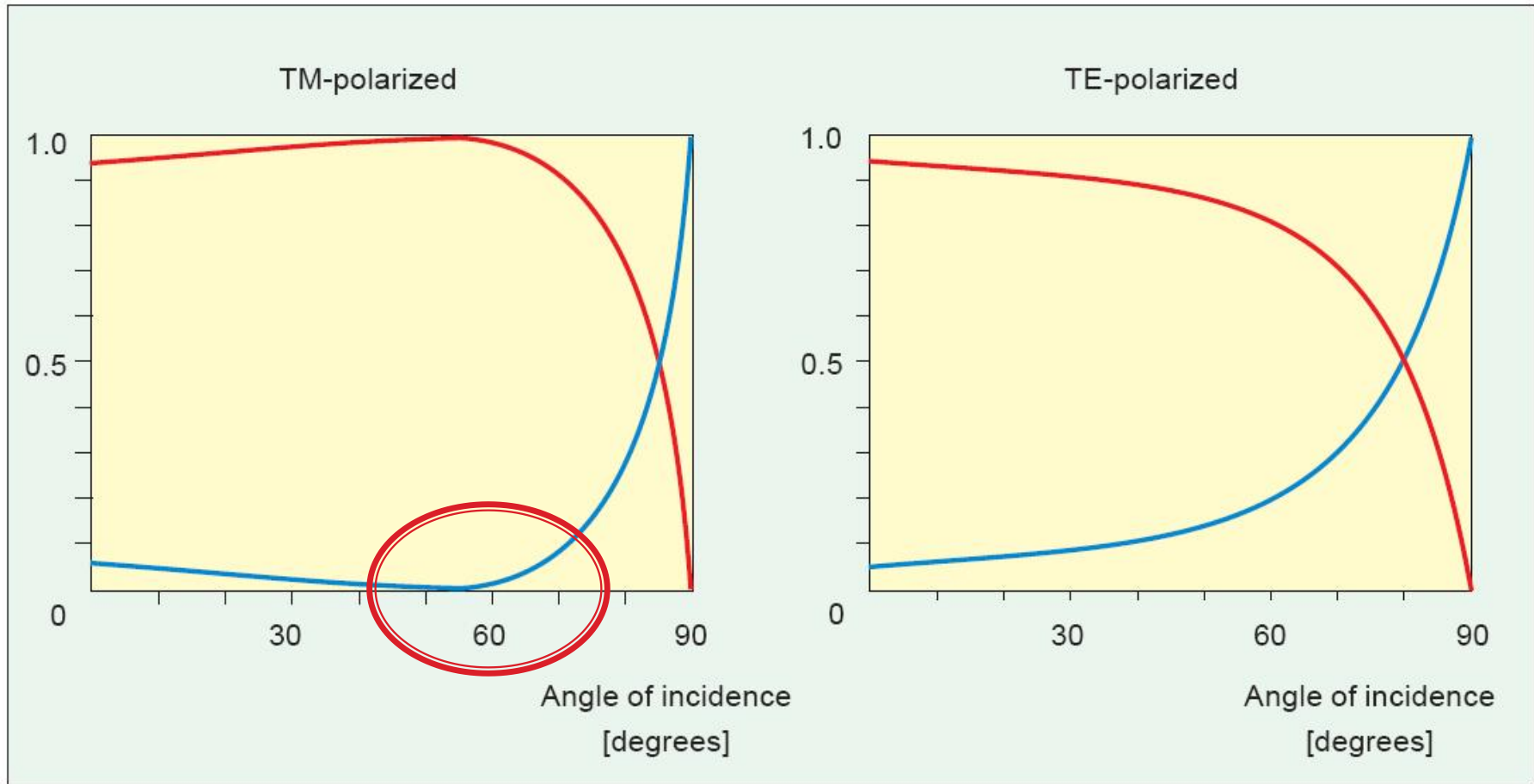
# Polarizarea luminii



# Polarizarea luminii



# Polarizarea luminii



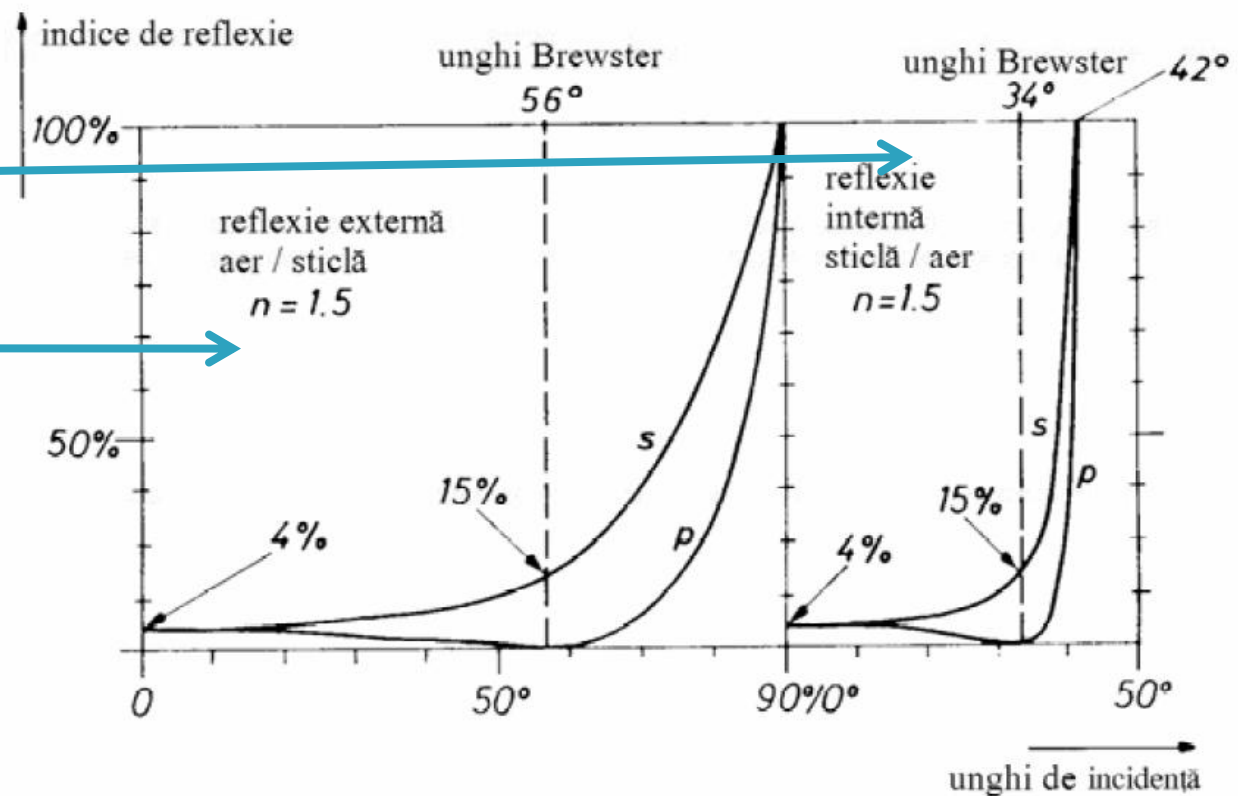
# Unghi Brewster

- ▶ transmisia totala a polarizarii p
- ▶ lumina reflectata este total polarizata (s)

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

$$\phi_B = 34^\circ$$

$$\phi_B = 56^\circ$$





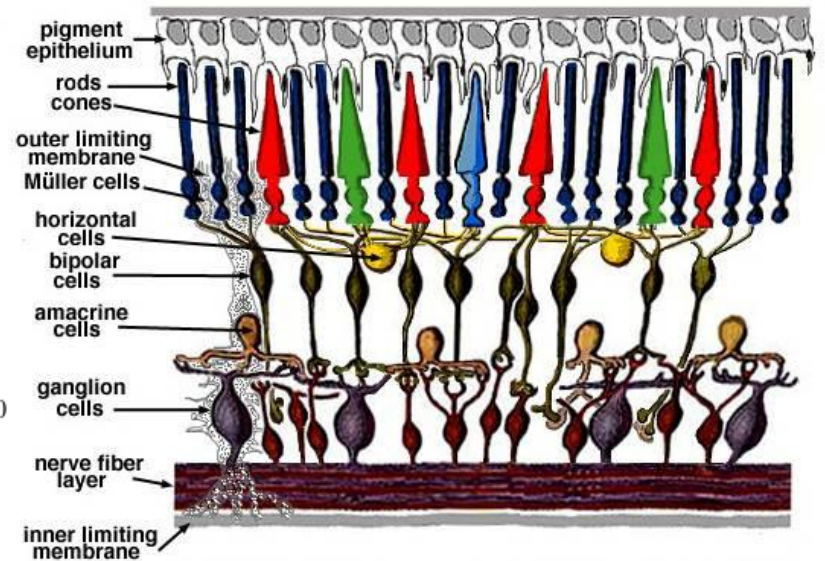
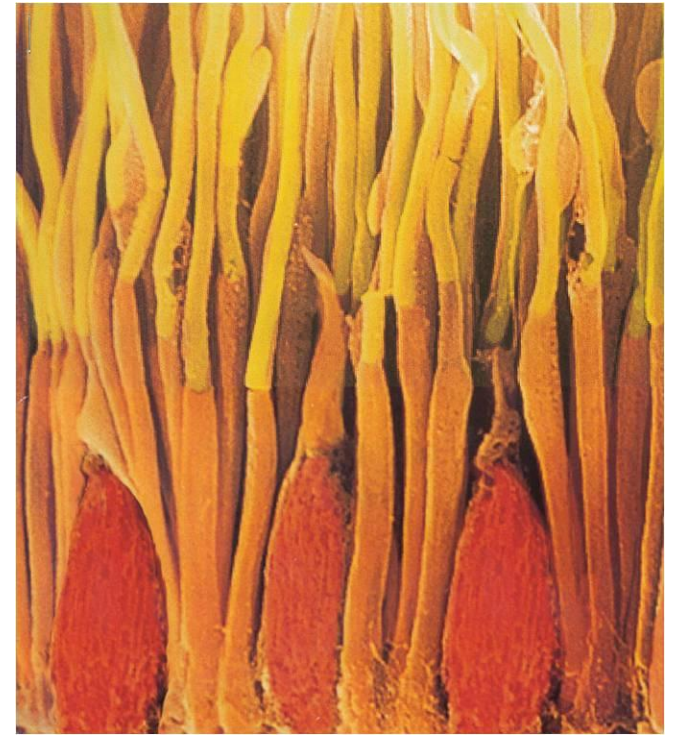
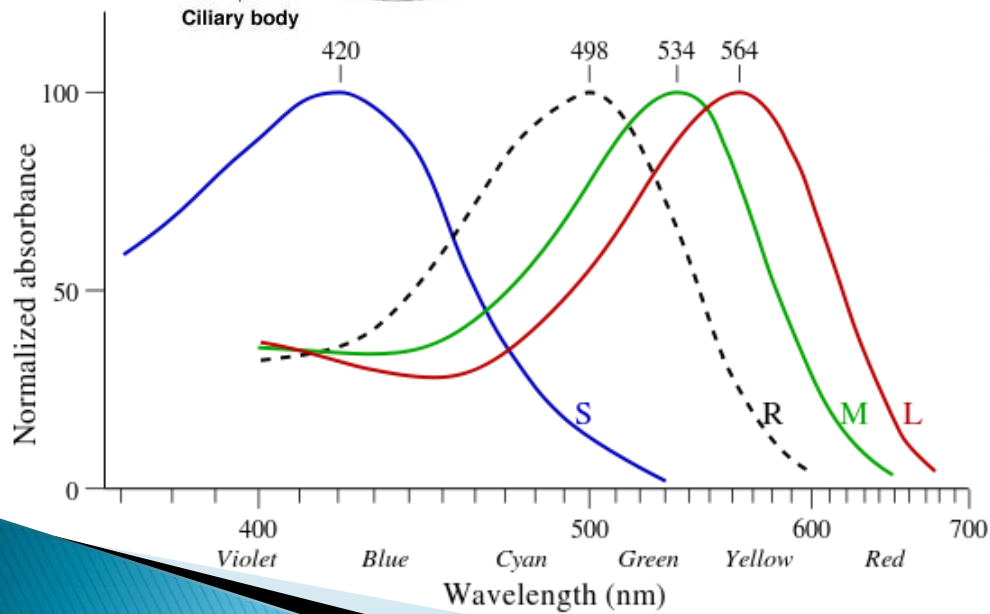
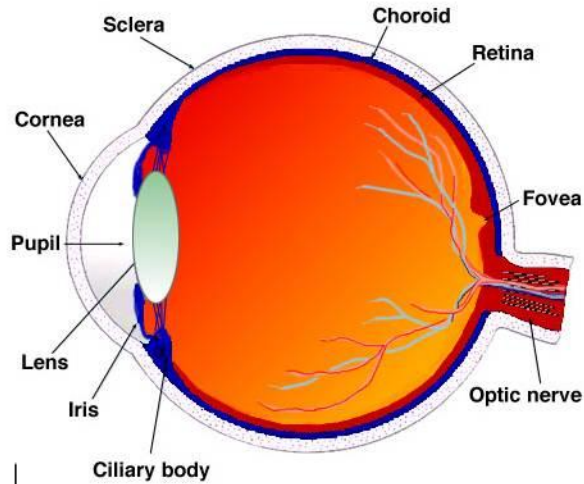
# Fotometrie și radiometrie

Capitolul 4

# O alta dualitate

- ▶ In optoelectronica lumina poate fi privita din doua puncte de vedere
  - energetic (efect asupra dispozitivului)
  - uman (efect asupra ochiului uman)
- ▶ 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

# Ochiul uman



# Standarde

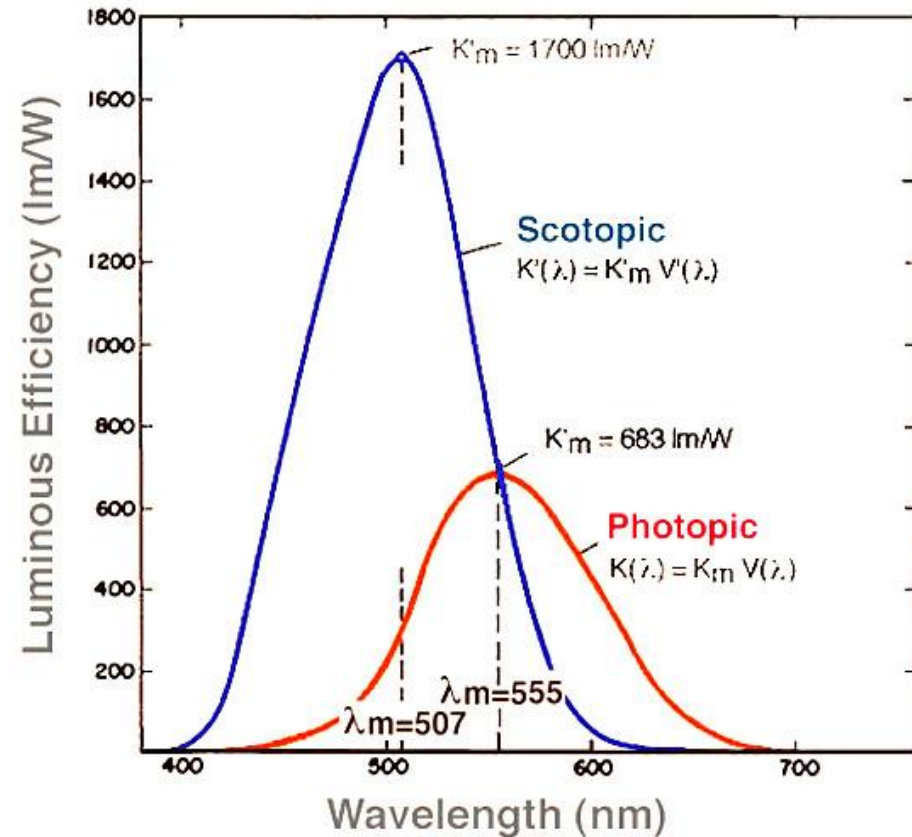
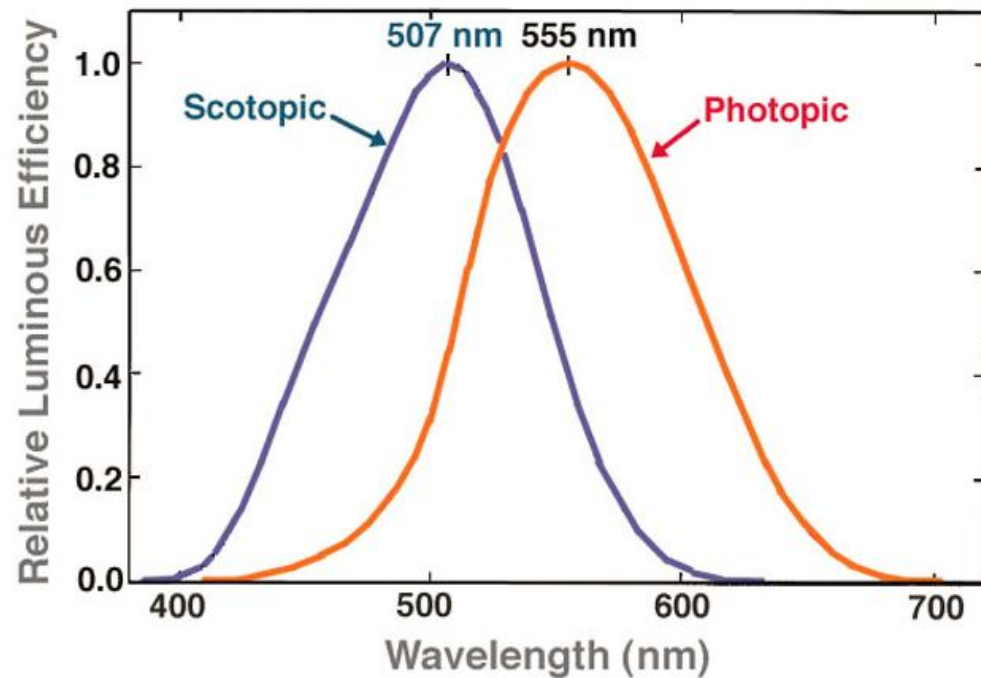
- ▶ Se inchearca definirea omului “standard”
- ▶ CIE – Commission Internationale de l'Éclairage
  - 1931 – luminozitatea relativa standard  $V(\lambda)$  – ftopic
  - 1951 – luminozitatea relativa standard  $V(\lambda)$  – scotopic
  - 1978 – Vos
  - 2005 – Sharpe, Stockman, Jagla, Jägle
  - 2008 – CIE  $V(\lambda)$  – ftopic (~Sharpe)
- ▶ Sensibilitatea maxima a ochiului uman
  - vedere diurna (ftopic),  $\lambda=555$  nm,  $\eta_v = 683$  lm/W
  - vedere nocturna (scotopic),  $\lambda=507$  nm,  $\eta_v = 1700$  lm/W

# Continuare

Curs 4



# Relatie radiometrie/fotometrie





# Flux energetic

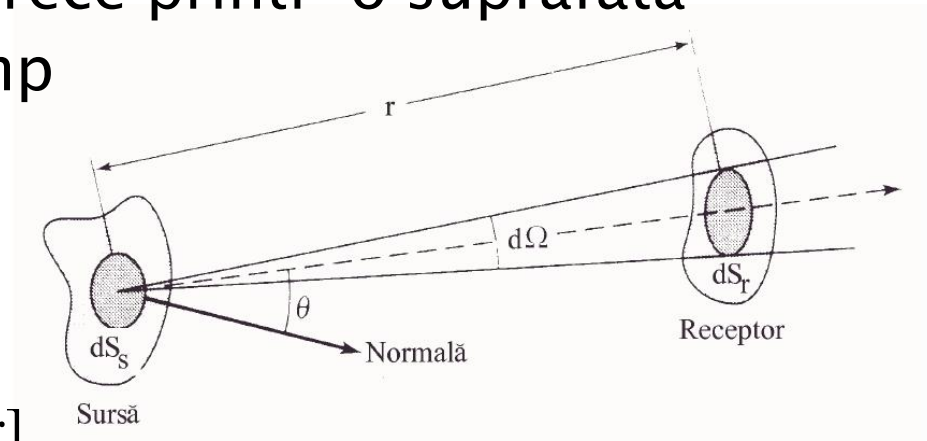
## ► Flux energetic al luminii

- 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  $2\phi$ :  $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \phi)$
- pentru unghiuri mici:  $\Omega = \pi \cdot \phi^2$



# Flux luminos

- ▶ Flux luminos, definitie
  - o masura a puterii luminoase percepute de om
- ▶ Unitate de masura –  $lm = \text{lumen}$ 
  - In SI de unitati **lumenul** este definit ca fluxul luminos al unei surse luminoase punctiforme cu intensitatea luminoasa de o candela 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”
  - fotometri – indice “v”
- ▶ La alte lungimi de unda se tine cont de sensibilitatea relativa medie a ochiului uman

# Relatie radiometrie/fotometrie

- ▶ Pentru radiatii monocromatice

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

- ▶ Pentru radiatii complexe:

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

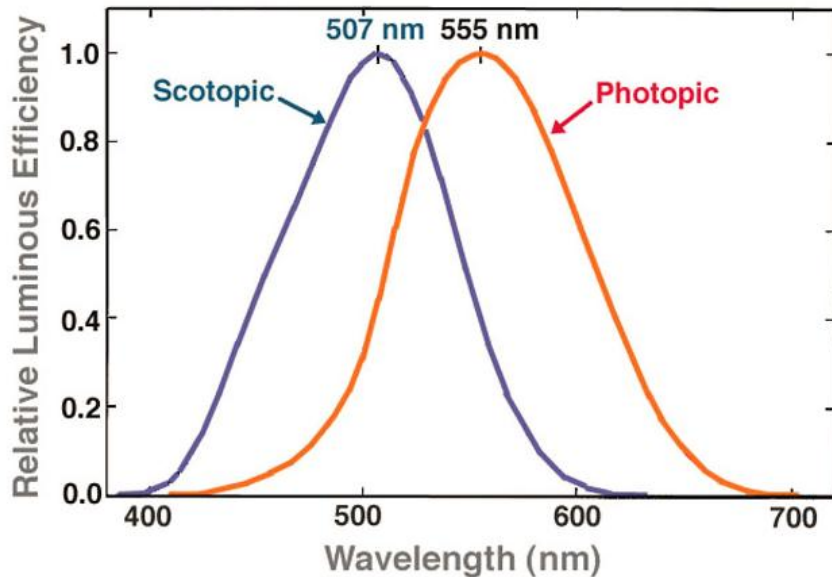
$$\Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V'(\lambda) d\lambda = 1700 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V'(\lambda) d\lambda \quad [lm]$$

- ▶ De cele mai multe ori, sursele sunt discrete,  $\lambda_i$

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

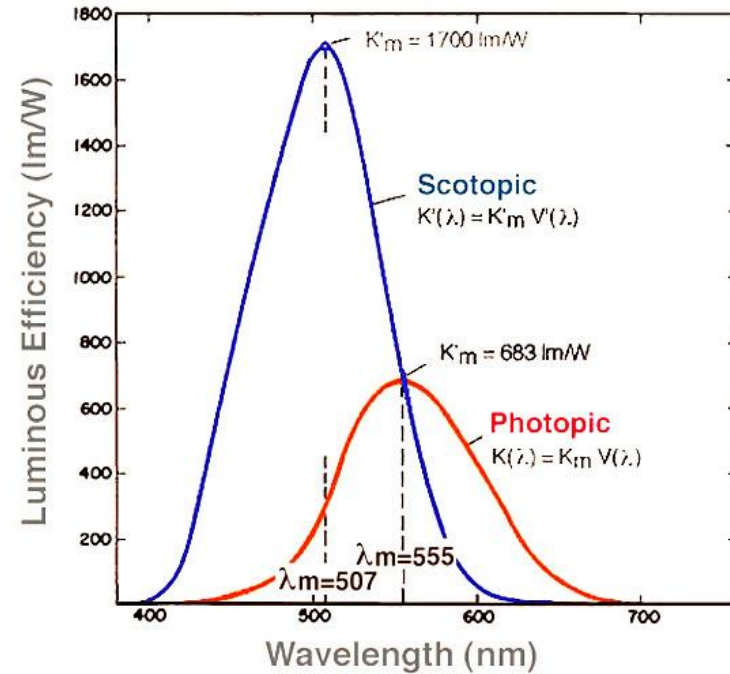
$$\Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V'(\lambda_i) \quad [lm]$$

# Relatie radiometrie/fotometrie



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

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



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

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

# 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 **normalizate** (valoarea 1 pentru sensibilitate maxima)

# Radiometrie / fotometrie

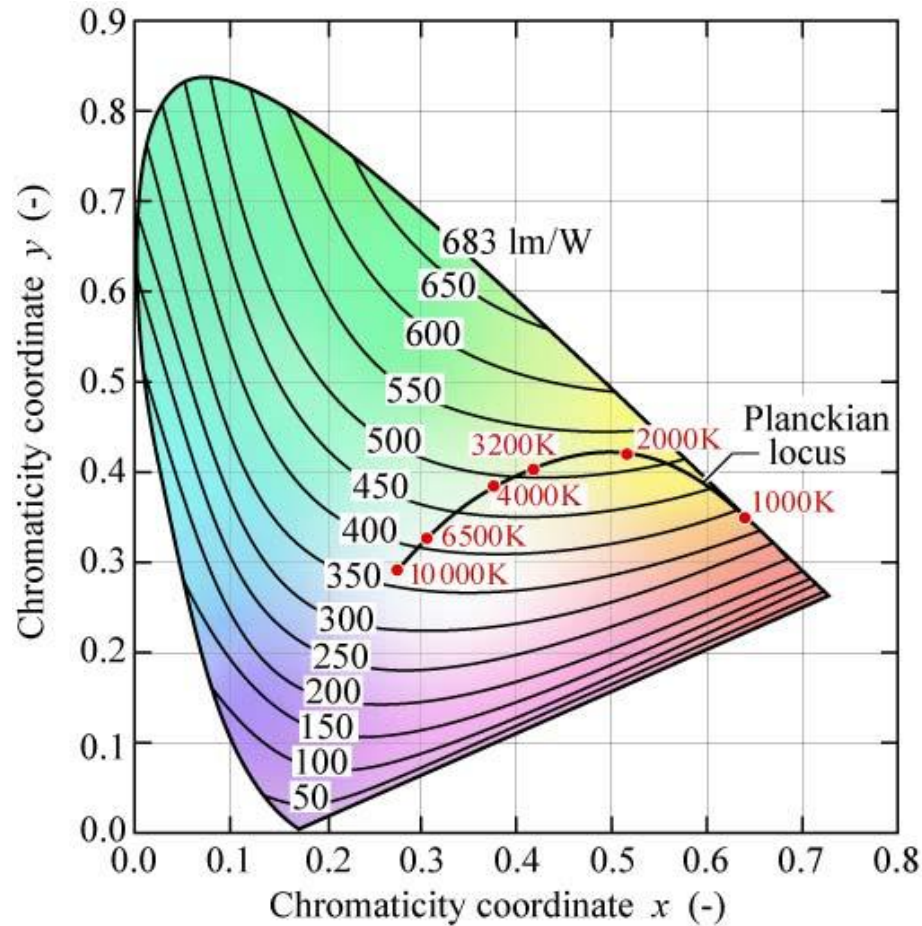


Fig. 16.8. Relation of maximum possible luminous efficacy (lumens per optical Watt) and chromaticity in the CIE 1931  $x, y$  chromaticity diagram (adopted from MacAdam, 1950).

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



# Eficiența luminoasă

	$\lambda$	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

# Marimi luminoase

## ► 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

## ► 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 <sup>2</sup>

# Marimi luminoase

## ► 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 <sup>2</sup>	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	SI: W/m <sup>2</sup>

# Marimi luminoase

## ▶ 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 <sup>2</sup>	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dS}$	SI: W/m <sup>2</sup> /sr

# 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/m<sup>2</sup> etc.
- ▶ de multe ori se adapteaza relatiile pentru surse mai simple:

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

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



# Probleme

- ▶ Panoul unui dispozitiv conține două LED-uri de semnalizare, unul de culoare verde și unul roșu standard. Doriți ca ambele să ofere aceeași luminozitate relativă și cât mai mare posibilă. Dacă ambele LED-uri acceptă un curent maxim de 50 mA, calculați curentul prin cele două LED-uri.
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

# Probleme

- ▶ Trebuie să proiectați un semafor cu LED-uri. LED-urile care intră în componența sa sunt caracterizate de eficiență cuantică egală (aceeași tehnologie), iar parametrii de catalog pentru LED-ul roșu sunt ...
- ▶ Proiectați semaforul, pentru a obține o iluminare la 5m, pe direcție normală, de 50 lx pe timp de zi și 2 lx pe timp de noapte.
- ▶ Cerințe: luminozitate egală pentru cele 3 culori, alegerea numărului de LED-uri (considerente electronice/practice), necesitățile de curent ale fiecărui LED, parametrii pentru sursa de alimentare, parametrii unui sistem de control a intensității luminoase pentru reglare zi/noapte.
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

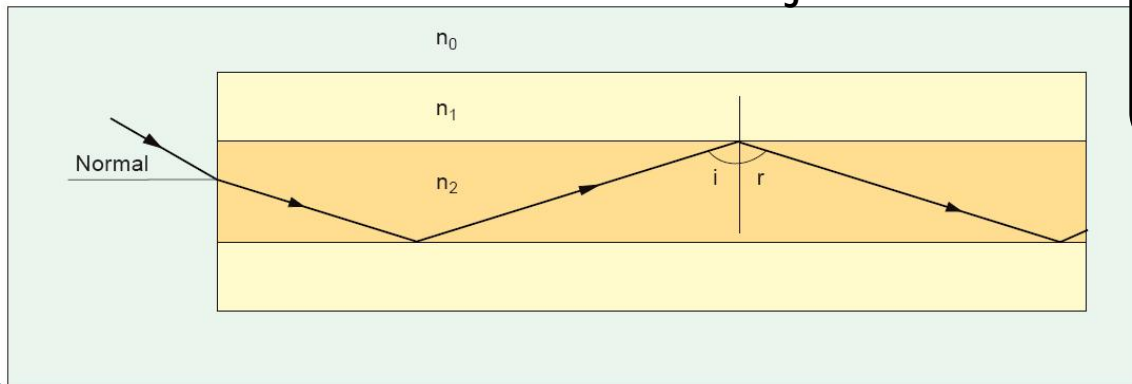
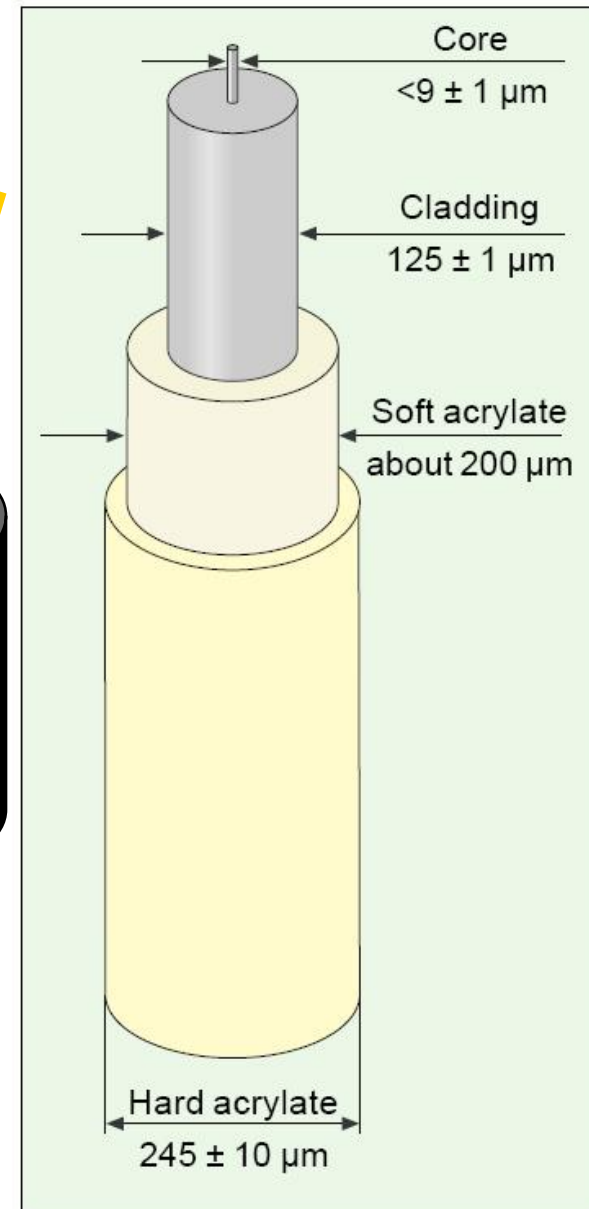
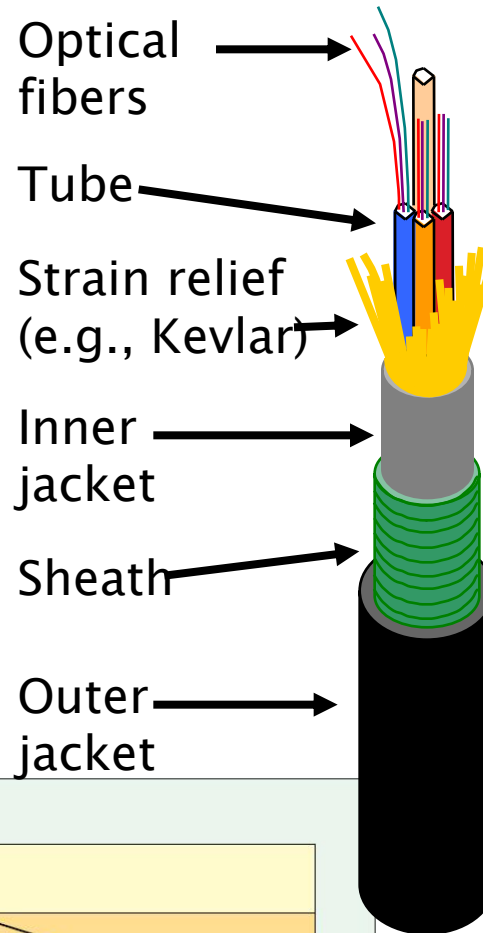
# Fibra optică

## Capitolul 5

# Fibra optica

► un ghid de unda dielectric

- miez
- teaca



# Unghi de acceptanta, apertura numerica

- ▶ Unghi de acceptanta

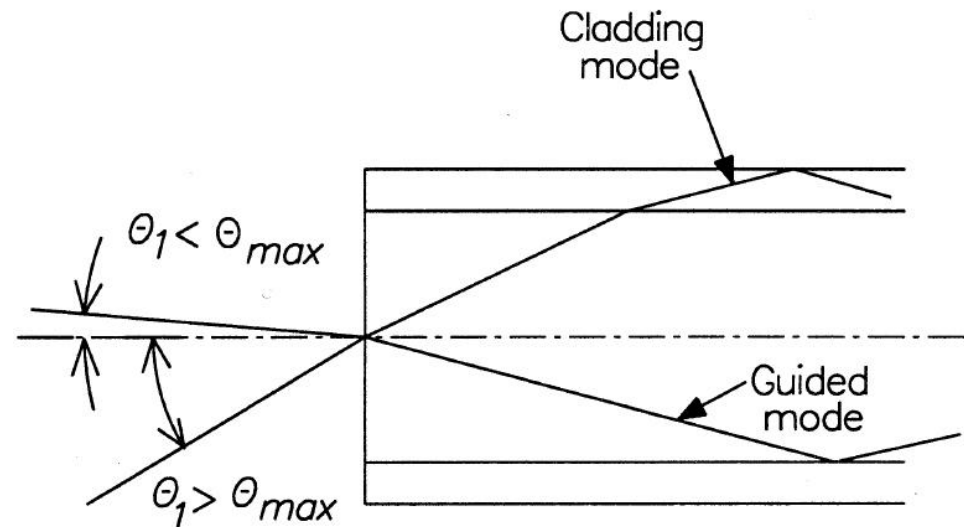
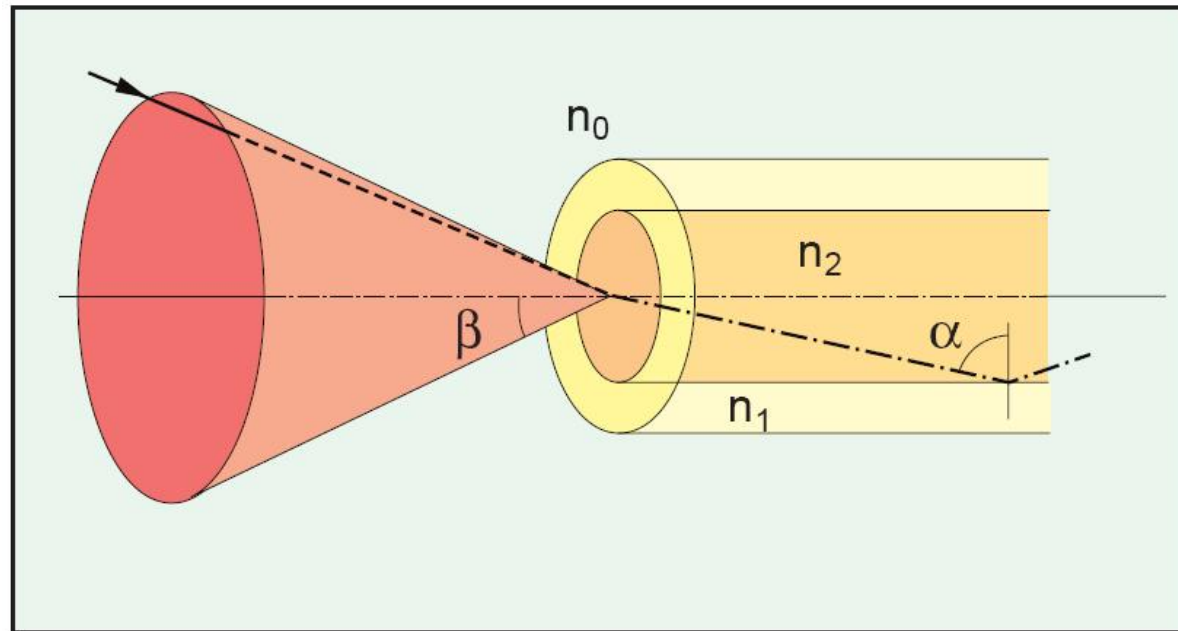
$$n_0 \cdot \sin \theta_{ACC} = n_2 \cdot \sin \phi_c$$

- ▶ Apertura numerica

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{ACC}$$

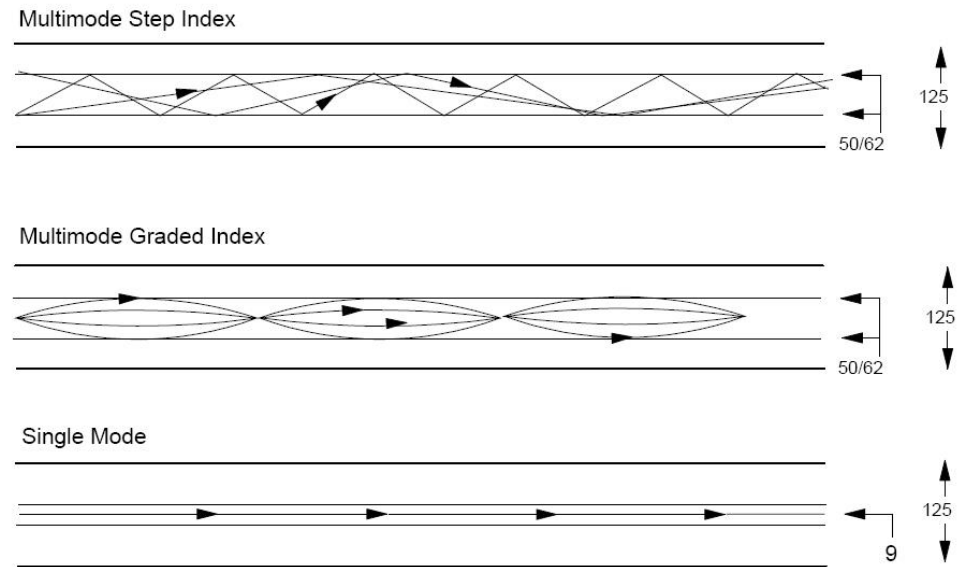
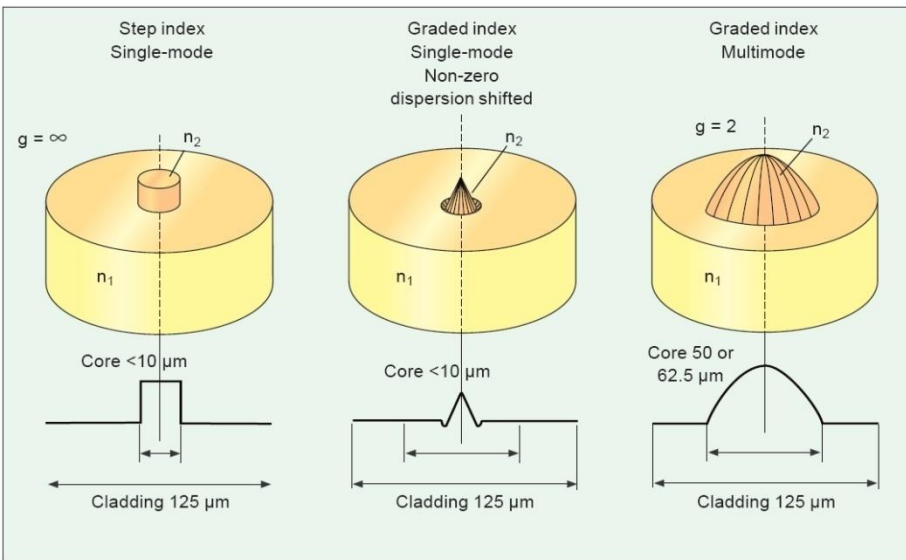
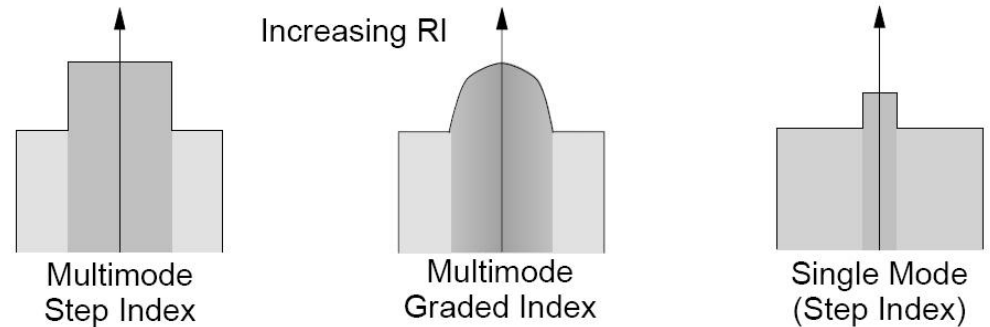
$$NA = n_2 \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2}} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

$n_2$  - miez  
 $n_1$  - teaca  
 **$n_2 > n_1$  !!**



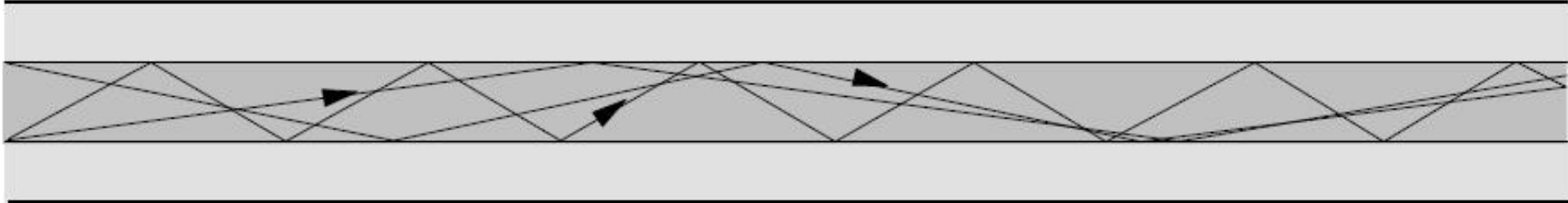
# Tipuri de fibra

- ▶ Monomod
- ▶ Multimod
  - cu salt de indice
  - cu indice gradat

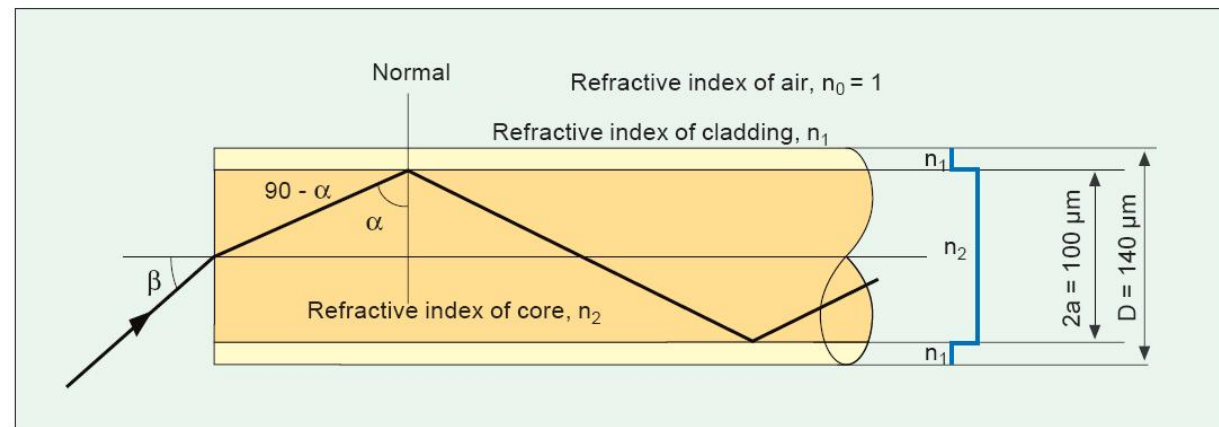




# Fibre multimod cu salt de indice



- ▶ 50/125 sau 62.5/125 ( $\mu\text{m}$ )
- ▶ 15–50 MHz · km

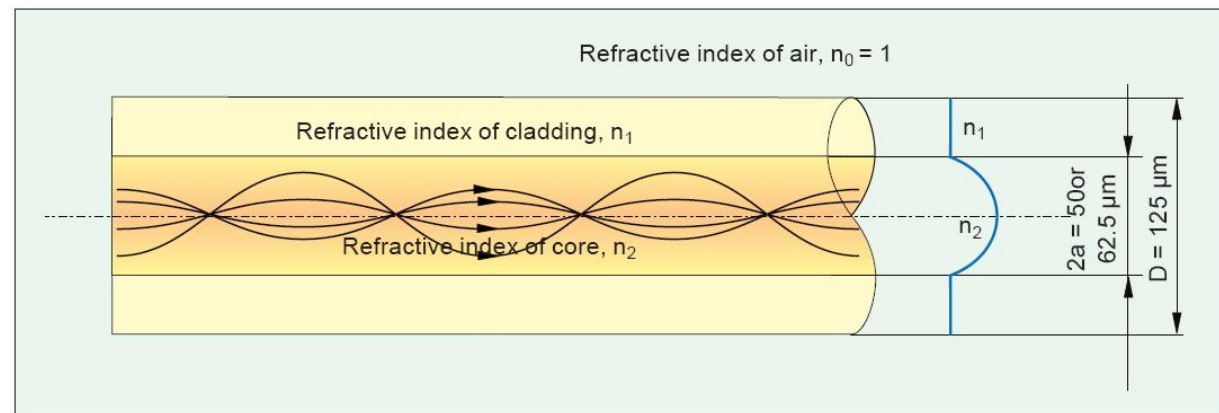


	glass	plastic
core diameter $2a$	100 $\mu\text{m}$	980 $\mu\text{m}$
cladding diameter $D$	140 $\mu\text{m}$	1000 $\mu\text{m}$
core refractive index $n_2$	1.48	
cladding refractive index $n_1$	1.45	

# Fibre multimod cu indice gradat



- ▶ 50/125 sau 62.5/125 ( $\mu\text{m}$ )
- ▶ 700–1200 MHz · km



Core diameter $2a$	50 or 62.5 $\mu\text{m}$
Cladding diameter $D$	125 $\mu\text{m}$
Maximum refractive index, core	1.46
Relative differential refractive index	0.010

# Fibre multimod cu indice gradat

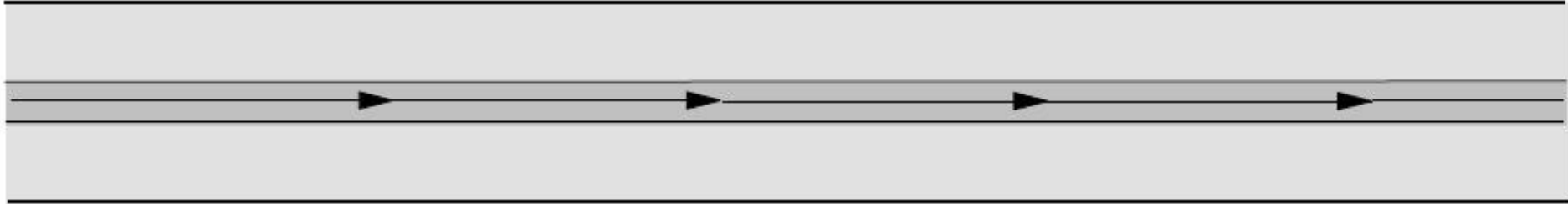


$$n(r) = n_2 \left[ 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right]$$

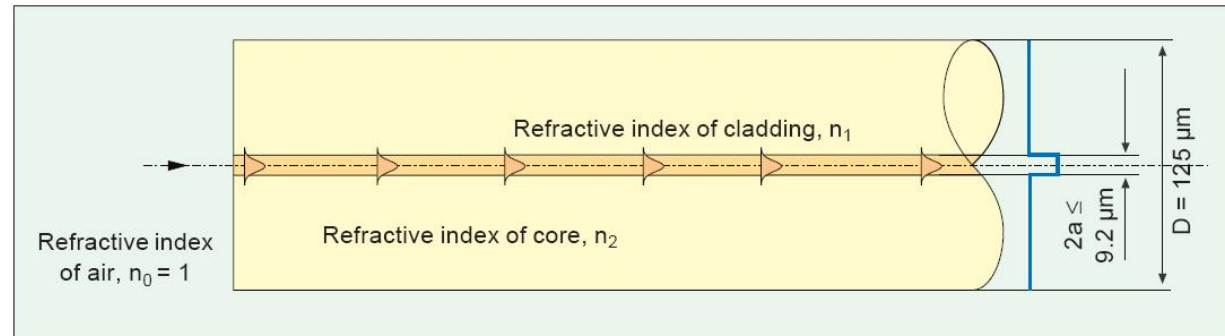
$$\Delta = \frac{NA^2}{2n_2^2} = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_2 - n_1}{n_2} \approx \frac{\Delta n}{n} \quad \text{for } \Delta \ll 1$$

- ▶  $g = 1$  - indice gradat triunghiular
- ▶  $g = 2$  - indice gradat parabolic
- ▶  $g = \infty$  - salt de indice

# Fibre monomod



- ▶ 6–8/125 ( $\mu\text{m}$ )
- ▶ MHz · km  
nerelevant
- ▶ MFD – Mode  
Field Diameter



Cladding diameter D	125 $\mu\text{m}$
Core refractive index $n_2$	1.4485
Cladding refractive index $n_1$	1.4440
Refractive index differential	0.003 = 0.3%

# Ghid cilindric dielectric

## ► Ecuatiile lui Maxwell in coordonate cilindrice

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_o^2 U = 0$$

a – raza miezului  
U – E(r) sau H(r)

$$U(r, \phi, z) = u(r) e^{-jl\phi} e^{-j\beta z}, \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left( n^2(r) k_o^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) u = 0$$

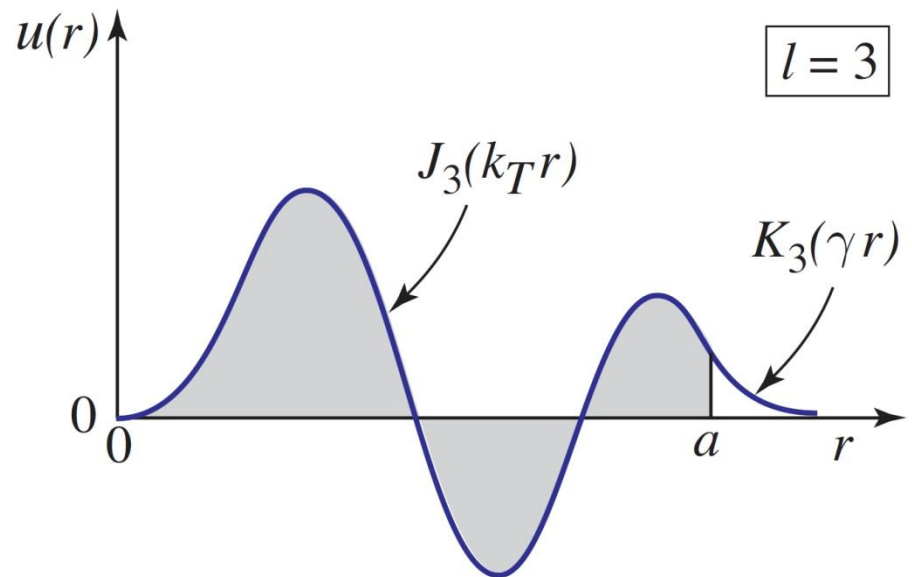
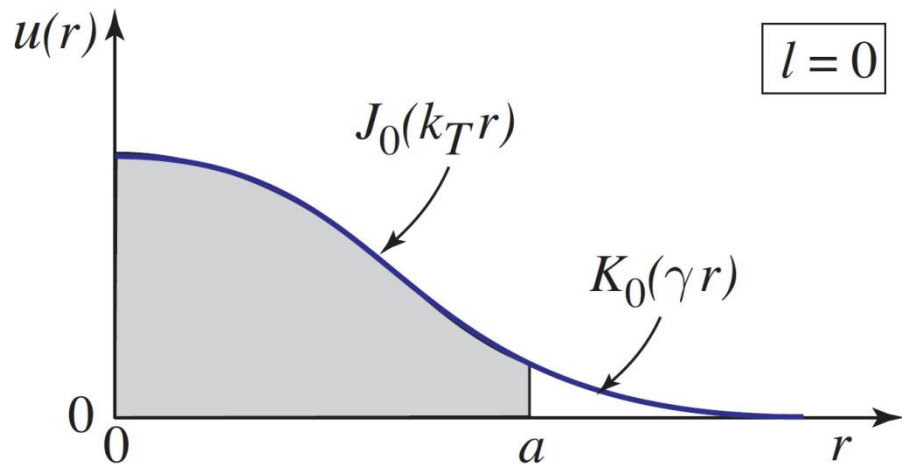
$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left( k_T^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) u = 0, \quad r < a$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \left( \gamma^2 + \frac{l^2}{r^2} \right) u = 0, \quad r > a$$

# Ghid cilindric dielectric

- ▶ solutii proportionale cu functii Bessel

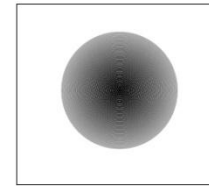
$$u(r) \propto \begin{cases} J_l(k_T r), & r < a \quad (\text{core}) \\ K_l(\gamma r), & r > a \quad (\text{cladding}) \end{cases}$$



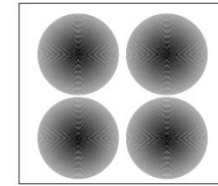


# Moduri in fibra

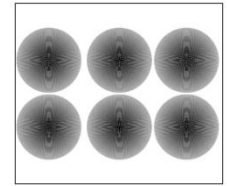
- ▶ Moduri in ghid rectangular



TEM<sub>00</sub>

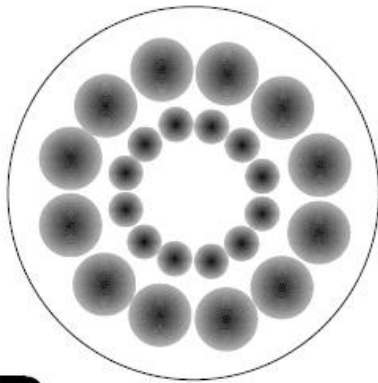


TEM<sub>11</sub>

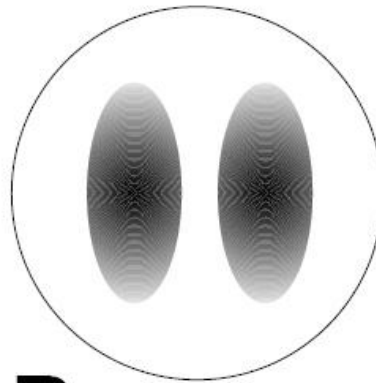


TEM<sub>21</sub>

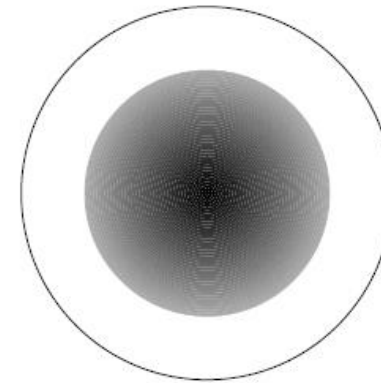
- ▶ Moduri linear polarizate in fibra



LP<sub>62</sub>

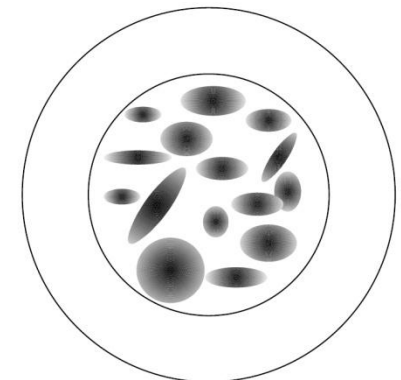


LP<sub>11</sub>



LP<sub>01</sub>

“Sparkle” pattern



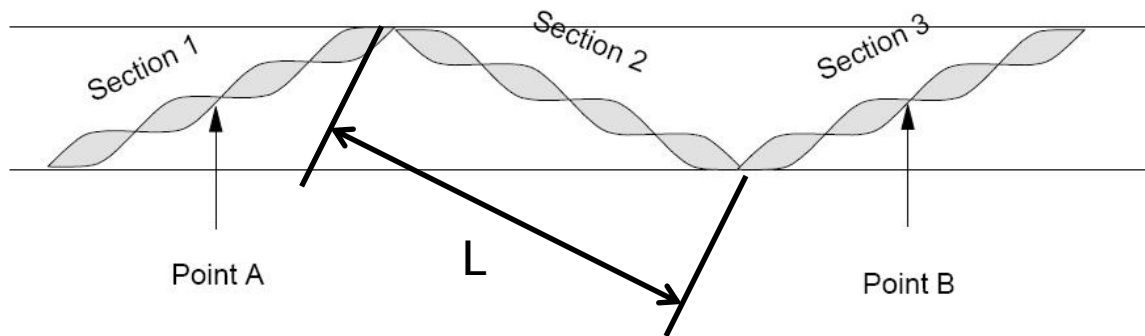
# Frecventa normalizata

## ► Frecventa normalizata

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} NA = k \cdot a \cdot NA \quad a - \text{raza miezului}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

## ► Numar de moduri

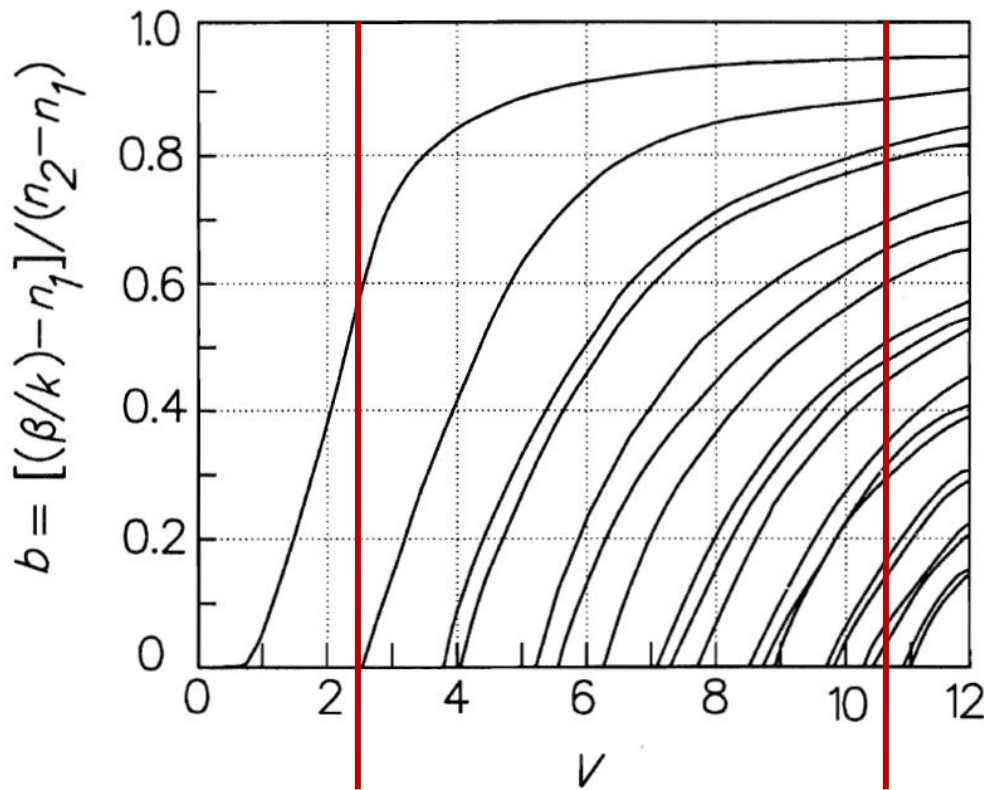


$$L = m \cdot \lambda$$

$$N \approx \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2}$$

# Frecventa normalizata – monomod

## ► Fibre monomod



$b$  – coeficient de propagare modal relativ

$$V \leq V_c = 2.405$$

exista un singur mod (solutii fc. Bessel)

$$\lambda \geq \lambda_c = \pi \frac{2a}{V_c} NA = \pi \frac{2a}{2.405} NA$$

Exemplu:

$$2a = 8.5 \mu\text{m}$$

$$NA = 0.11$$

$$\lambda_c = \pi \frac{8.5}{2.405} 0.11 = 1210 \text{nm}$$

# Frecventa normalizata

- ▶ Numar de moduri
  - Multimod cu salt de indice

$$g = \infty \Rightarrow N \approx \frac{V^2}{2}$$

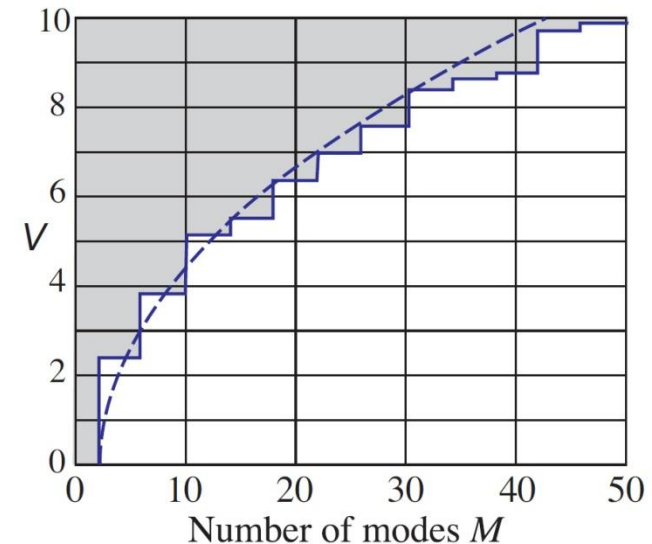
- Multimod cu indice gradat

$$g = 2 \Rightarrow N \approx \frac{V^2}{4}$$

- Monomod

$V \leq V_c = 2.405$       exista un singur mod (solutii fc. Bessel)

$$N \approx \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2}$$



# Exemplu

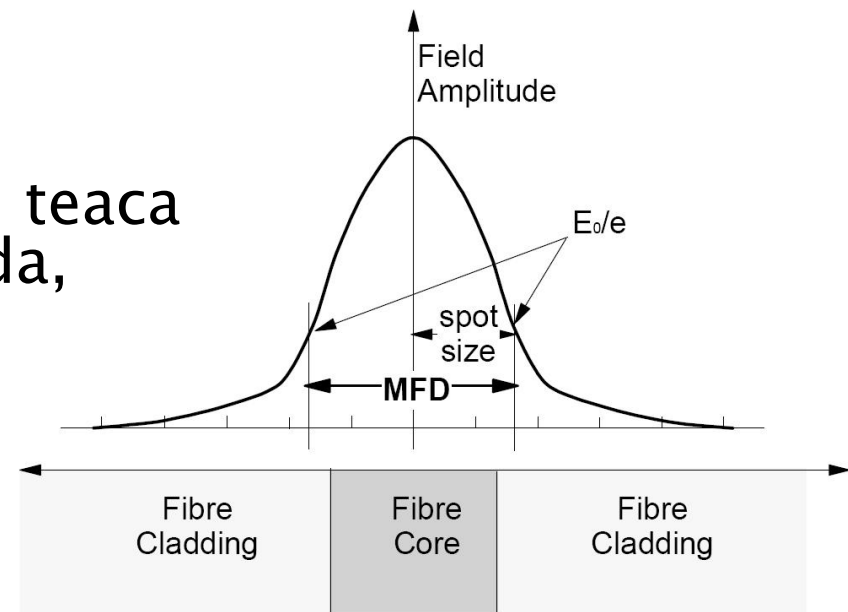
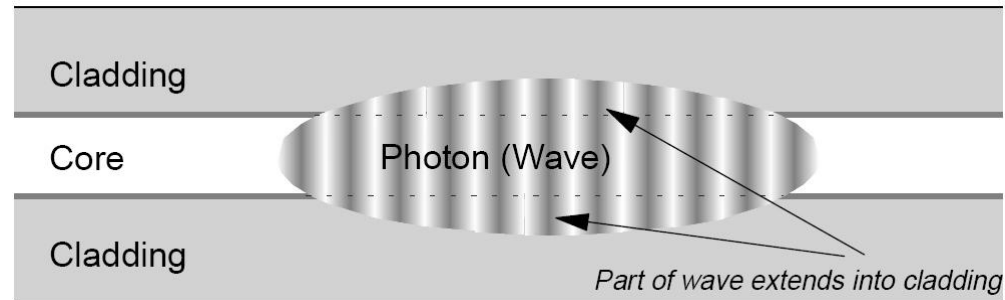
- ▶ fibra tipica multimod
  - $g=2$
  - $2a = 50\mu\text{m} \rightarrow a = 25\mu\text{m}$
  - $NA = 0.2$  la  $\lambda = 1\mu\text{m}$

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} NA = 2\pi \frac{25}{1} 0.2 = 2 \cdot \pi \cdot 5 \approx 31.4$$

$$g = 2 \Rightarrow N = \frac{V^2}{4} = \frac{31.4^2}{4} = 247$$

# Propagarea in fibra monomod

- ▶ Propagarea luminii poate fi explicata doar prin teoria electromagnetica
- ▶ Energia campului se extinde in teaca (diametrul efectiv al spotului luminos – MFD, Mode Field Diameter)
- ▶  $MFD > 2a$
- ▶ Adancimea de patrundere in teaca depinde de lungimea de unda, generand dispersia de ghid





# Contact

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