

# Optoelectronică

Curs 3

2023/2024

# Disciplina 2023/2024

- ▶ 2C/1L Optoelectronică **OPTO**
- ▶ **Minim 7 prezente curs + laborator**
- ▶ Curs – conf. **Radu Damian**
  - an IV  $\mu$ E
  - Marti 14(:10)–16:00, P8
  - E – 70% din nota (50%+20%)
    - **20% test (VP) la curs**, saptamana 4–6?
  - probleme + (2p prez. curs)
  - toate materialele permise
- ▶ Laborator – **drd. Stefan Stoica**
  - an IV  $\mu$ E
    - Marti 16–20 par
    - Max. 7 prezente
  - L – 30% din nota (+Caiet de laborator)

# 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

# Documentatie



English | Romana |

[Main](#) [Courses](#) [Master](#) [Staff](#) [Research](#) [Students](#)

## Microwave and Optoelectronics Laboratory

We are enlisted in the Telecommunications Department of the Electronics, Telecommunication and Information Technology Faculty (ETTI) from the "Gh. Asachi" Technical University (TUIASI) in Iasi, Romania

We currently cover inside ETTI the fields related to:

- Microwave Circuits and Devices
- Optoelectronics
- Information Technology

### Courses

Nr.	Course	Shortcut	Code	Type	Semester	Credits	Weekly	Examination	Link
1	Microwave Devices and Circuits for Radiocommunications	DCMR	DOS412T	DOS	7	4	0P,1L,0S,2C	Exam	
2	Monolithic Microwave Integrated Circuits	CIMM	RD.IA.207	DOMS	11	6	1.5L,0S,2C,0P	Exam	
3	Advanced Techniques in the Design of the Radio-communications Systems	TAPSR	RD.IA.103	DIMS	9	6	1.5P,0L,0S,2C	Exam	
4	Optical Communications	CO	DOS409T	DOS	7	5	0P,1L,0S,3C	Colloquiu	
5	Optical Communications	OC	EDOS409T	DOS	7	5	0P,1L,0S,3C	Exam	
6	Satellite Communications	CS	RC.IA.104	DIMS	9	6	0L,0S,2C,1.5P	Exam	
7	Applied Informatics 1	IA1	DOF135	DOF	1	4	0P,1L,0S,2C	Verificati	
8	Applied Informatics 1	AI1	EDOF135	DOF	1	4	0P,1L,0S,2C	Verificati	
9	Databases, Web Programming and Interfacing	DWPI	ITT.IA.601	DIS	11	5	1P,1L,0.25S,1C	Verificati	
10	Web Applications Design	PAW	RC.IA.108	DIMS	10	5	1L,0S,1.5C,1P	Exam	
11	Optoelectronics	OPTO	DID405M	DID	8	4	0P,1L,0S,2C	Colloquiu	
12	Microwave Devices and Circuits for Radiocommunications (English)	MDCR	EDOS412T	DOS	8	4	0P,1L,0S,2C	Exam	



# Documentatie

- ▶ RF-OPTO
  - <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>
- ▶ Fotografie
  - “examen” online
  - necesara la laborator/curs

# Bonus (~0.5–4.15)

**Disciplina:** Optoelectronica, structuri, tehnologii, circuite  
**An:** 2015/2016

Bonus-uri care se aplica la nota de la teza obtinute prin:

- prezenta la curs (0.5p / 3pr)
- 3 miniteste aplicate la curs (max. 3 X 1.5p)
- contributie la site rf-opto (foto <C5=1p, >C5=0.5p)

Nr.	Student	Grupa	Prezente curs	Bonus prezenta	Bonus foto	Bonus T1	Bonus T2	Bonus T3	Total Bonus	Obs.
1	<a href="#">CIOLPAN OCTAVIAN</a>	5306	3	0.5					0.5	-
2	<a href="#">NITA COSTEL-CATALIN</a>	5307	4	0.5	1				1.5	-
3	<a href="#">BARON BOGDAN-IONUT</a>	5405	12	2	1	0.5		0.75	4.25	-

## Prezenta

[Curs](#)  
[Laborator](#)

## Liste

[Studenti care nu pot intra in examen](#)  
[Bonus-uri acumulate](#)

- ▶ **Minim** 7 prezente
- ▶ 0.5p/3prez
- ▶ 3 teste
- ▶ foto <C**5** / <C**7**

# Introducere

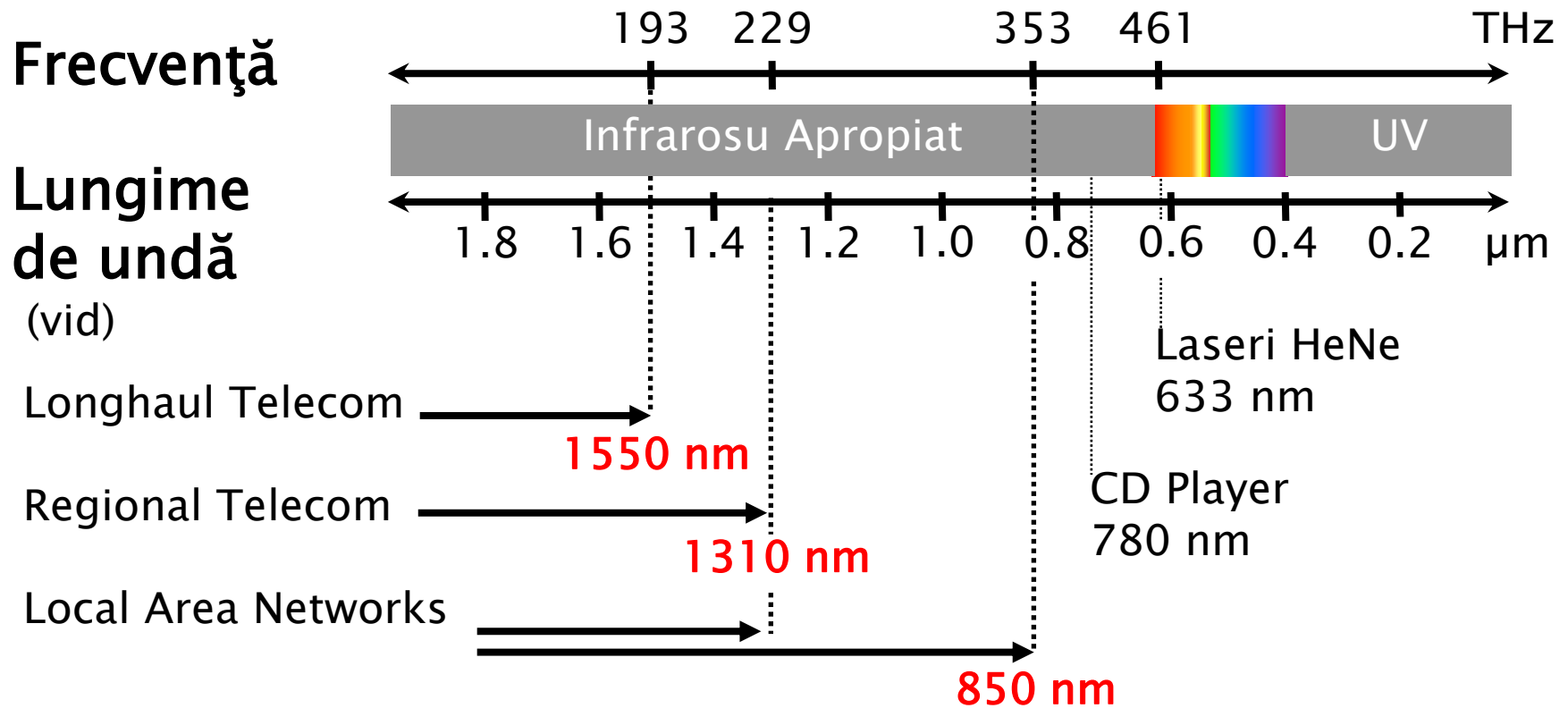
Capitolul 1

# Aplicatii majore

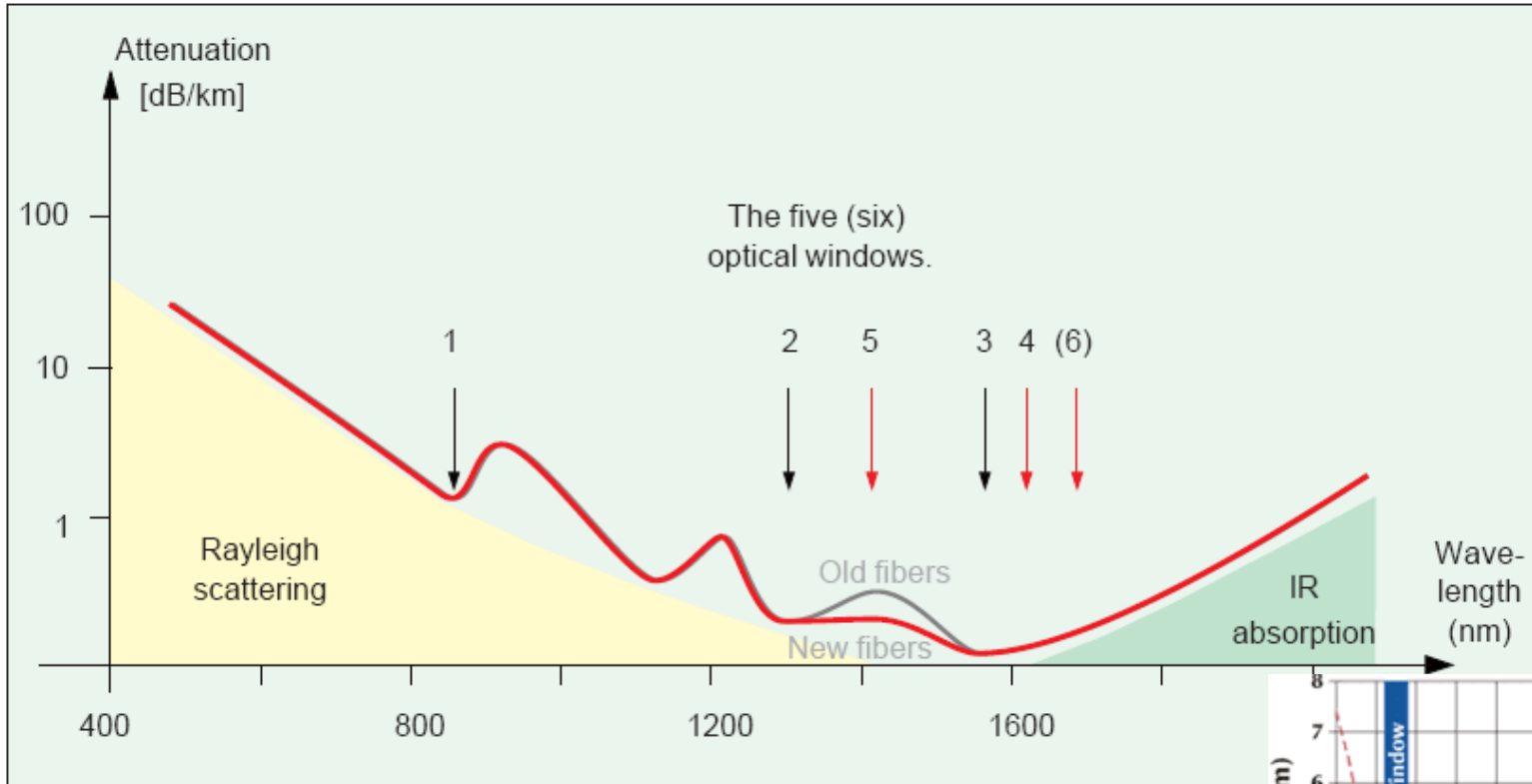
- ▶ Comunicatii
  - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
  - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
  - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)
- ▶ Energie solara
  - Efect fotovoltaic (Si)



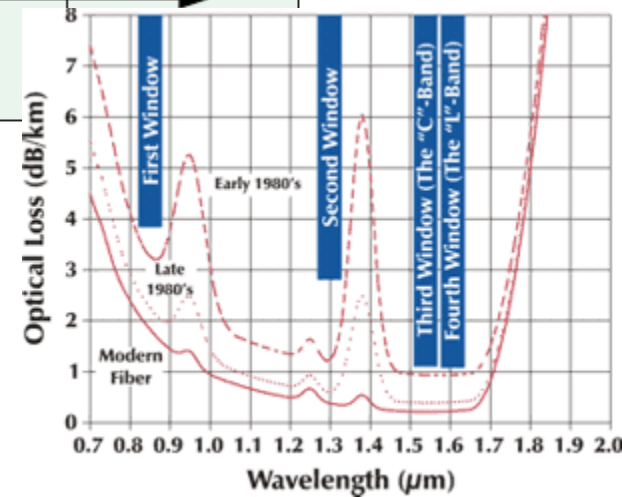
# Benzi de lucru in comunicațiile optice



# Atenuarea în fibra optică (SiO<sub>2</sub>)



850nm, 1310nm, 1550nm



# Premiul Nobel, Fizica, 2014

Physics



The Nobel Prize in Physics 2014

Summary



The Nobel Prize in Physics 2014

Isamu Akasaki  
Hiroshi Amano  
Shuji Nakamura

Share this



## The Nobel Prize in Physics 2014



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

**Isamu Akasaki**

Prize share: 1/3



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

**Hiroshi Amano**

Prize share: 1/3



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

**Shuji Nakamura**

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2014 was awarded jointly to Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura "for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources."

To cite this section

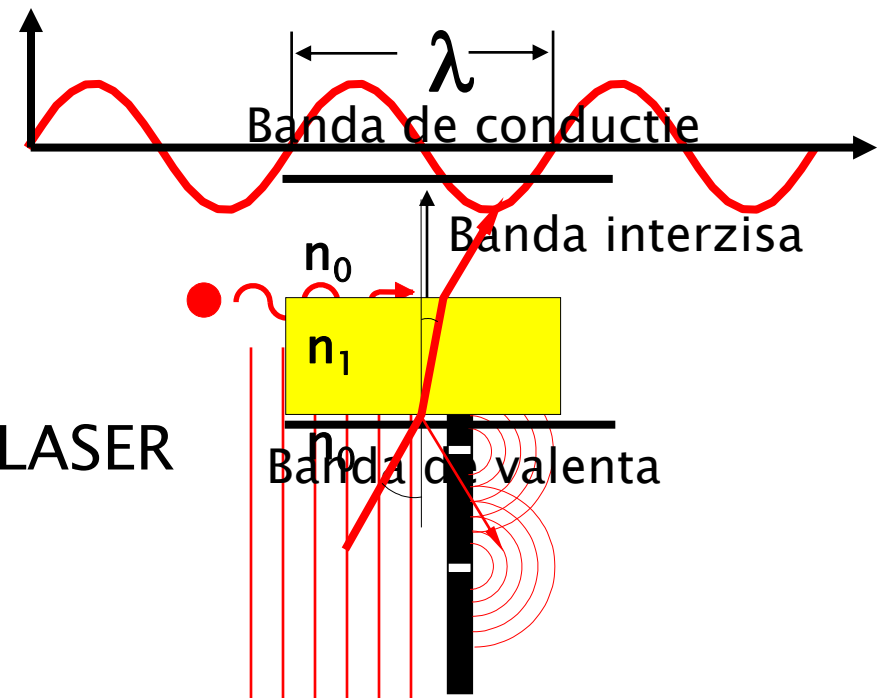
MLA style: The Nobel Prize in Physics 2014, NobelPrize.org, Nobel Media AB 2021. Tue, 2 Mar 2021.

# Modelarea luminii

(tot) Capitolul 1

# Modelarea luminii

- ▶ Undă electromagnetică
  - Ecuațiile lui Maxwell
  - $\lambda$ ,  $\epsilon$ ,  $\omega$ ,  $f$
- ▶ Teoria cuantică
  - Benzi energetice  $E = h \nu$
  - fotoni, emisie stimulată, LASER
- ▶ Optică geometrică
  - $n$ ,  $\theta$
  - 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)
- ▶ **Emițătoare 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

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

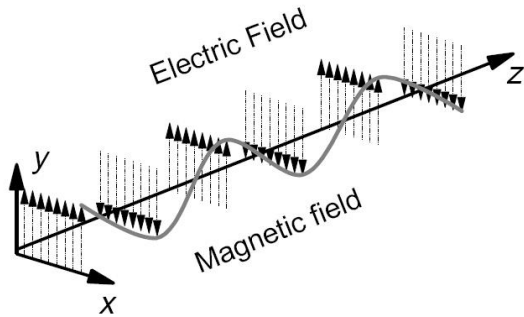
$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

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



# Solutia ecuatiilor de propagare

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



Propagare

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

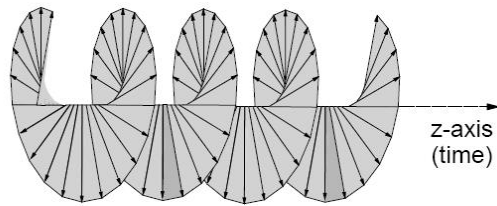
$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 \epsilon \mu + j \omega \mu \sigma} = \alpha + j \cdot \beta$$

Exista numai unda progresiva  $E_+ \Rightarrow A$

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

Camp armonic

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



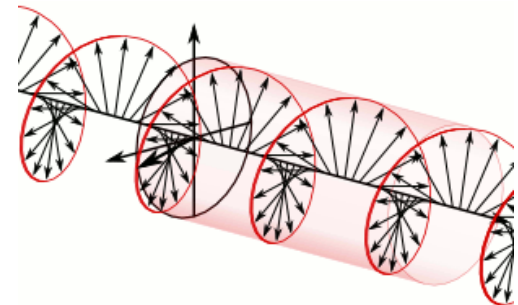
Polarizare circulara

Amplitudine

Atenuare

Propagare

(variatie in timp si spatiu)



# Atenuare

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

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

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

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

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

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

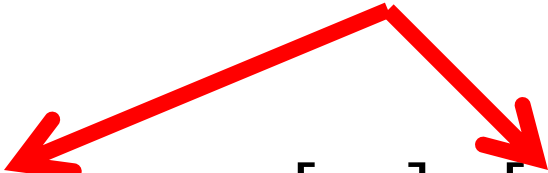
$$A / L [dB / km] = -8.686 \cdot \alpha < 0$$

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

# Calculul atenuarii

$$\text{Pierderi} = \frac{P_{out}}{P_{in}} < 1$$

$$\text{Pierderi[dB]} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) < 0$$


$$\text{Pierderi/Atenuare[dB]} = [-] 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

$$\text{Castig} = \frac{P_{out}}{P_{in}} > 1$$

$$\text{Castig[dB]} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) > 0$$

$$\text{Atenuare[dB/km]} = \frac{\text{Pierderi[dB]}}{\text{lungime[km]}}$$

# Calculul atenuarii

Pierderi/Atenuare  $\rightarrow P_{out} < P_{in} \rightarrow P_{out} [\text{dBm}] < P_{in} [\text{dBm}]$

$$P_{out} [\text{dBm}] = P_{in} [\text{dBm}] - \text{Pierderi/Atenuare} [\text{dB}]$$



Castig/Amplificare  $\rightarrow P_{out} > P_{in} \rightarrow P_{out} [\text{dBm}] > P_{in} [\text{dBm}]$

$$P_{out} [\text{dBm}] = P_{in} [\text{dBm}] + \text{Castig/Amplificare} [\text{dB}]$$



# Reprezentare logaritmică

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

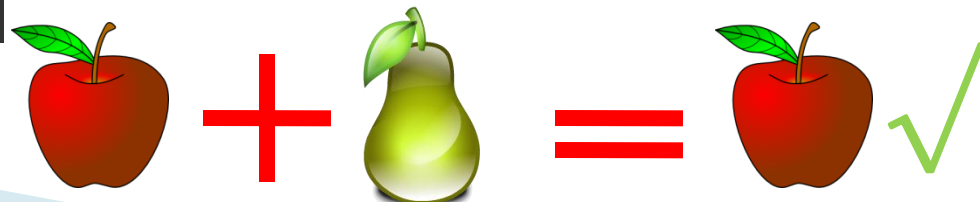
$$-30 \text{ dBm} = 1 \mu\text{W}$$

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

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

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

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



# Parametri de propagare

## ▶ In vid

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega \quad v = v_g = c_0 \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c_0}{f} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

Periodicitate in spatiu

Periodicitate in timp


## ▶ In mediu nedispersiv $\epsilon_r$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot \mu_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad v = v_g = c$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad \text{Indice de refractie al mediului} \quad c = \frac{c_0}{n}$$

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

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f}$$

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


# Parametri, dependenta de mediu

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

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

$n = 1$

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

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

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

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

$n = \sqrt{\varepsilon_r}$

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

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

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

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

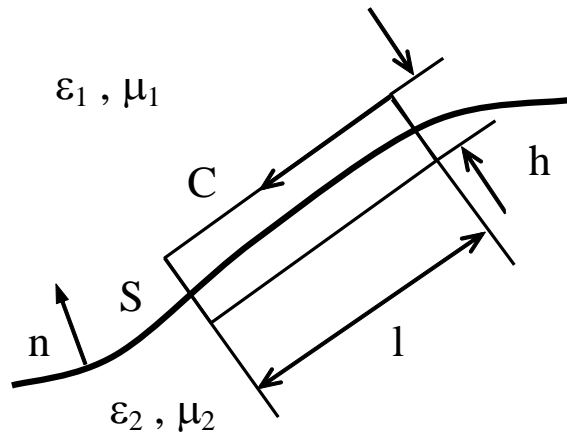
## ITU G.692

"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"

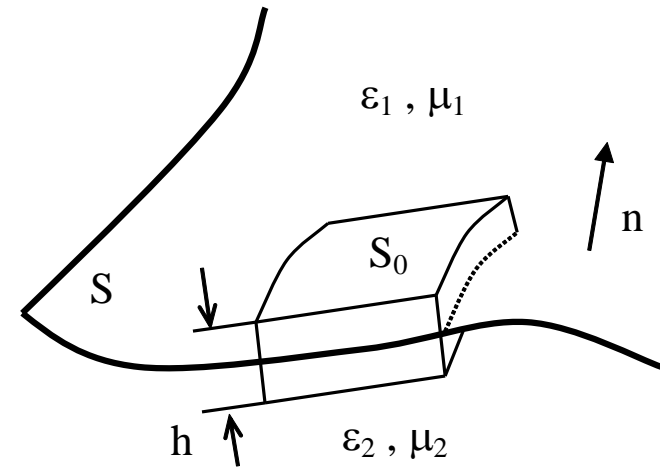
# Condiții la limita de separație între două medii



a)

$$n \times (E_1 - E_2) = 0$$

$$n \times (H_1 - H_2) = J_S$$



b)

$$n \cdot (D_1 - D_2) = \rho_S$$

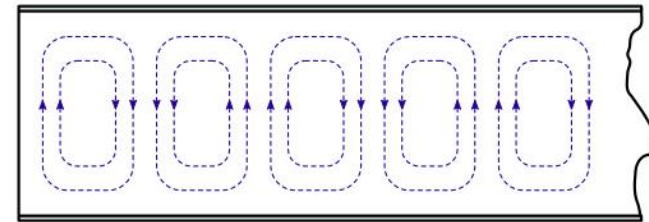
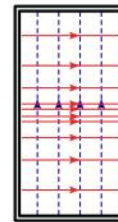
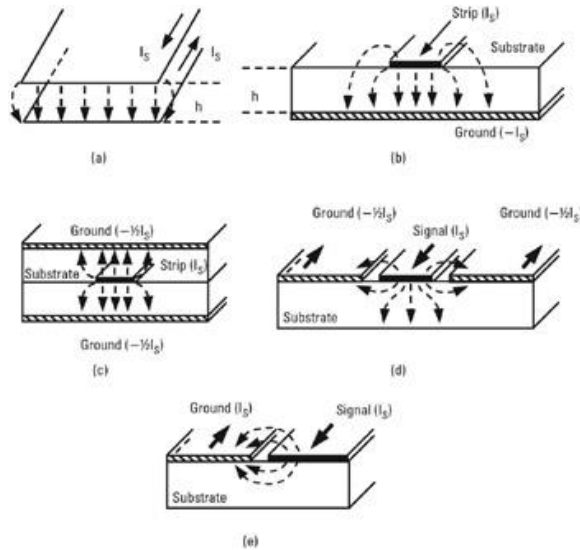
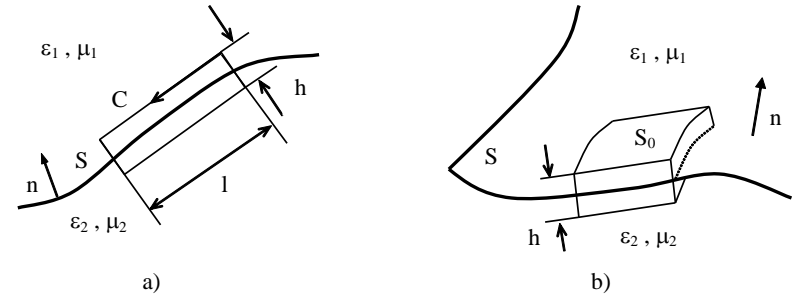
$$n \cdot (B_1 - B_2) = 0$$

- ▶ Dacă un mediu este metal ideal toate campurile se anuleaza in interior

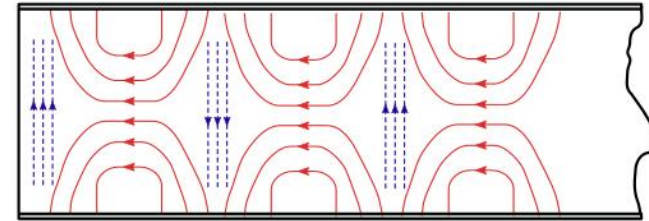
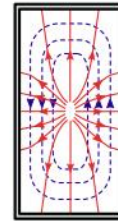


# Moduri in medii delimitate

- ▶ Campul electric **trebuie** sa fie perpendicular pe un perete metalic sau nul
- ▶ Campul magnetic **trebuie** sa fie tangent la un perete metalic sau nul



TE<sub>10</sub>



TM<sub>11</sub>

# Moduri in medii delimitate

- ▶ Câmpuri electromagnetice cu variație armonică în timp
  - simplificarea ecuatiilor lui Maxwell

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

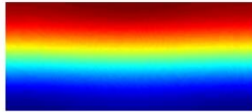
- ▶ In medii delimitate solutiile ecuatiilor lui Maxwell trebuie sa verifice conditiile la limita
  - solutiile trebuie sa respecte anumite conditii suplimentare

# Moduri in medii delimitate

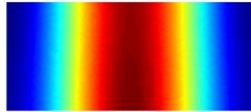
TE10



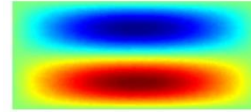
TE01



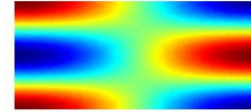
TE20



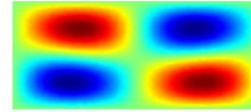
TM12



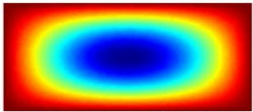
TE12



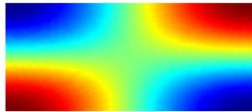
TM22



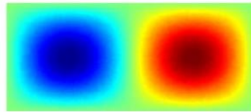
TM11



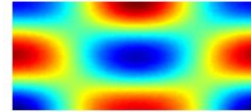
TE11



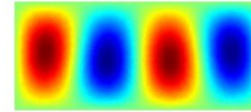
TM21



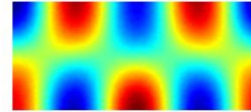
TE22



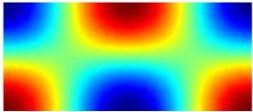
TM41



TE41



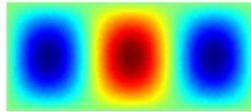
TE21



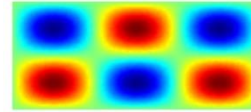
TE30



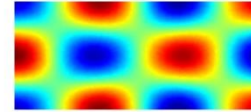
TM31



TM32



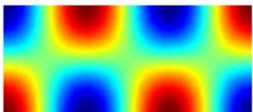
TE32



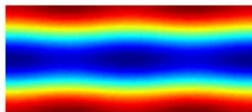
TE50



TE31



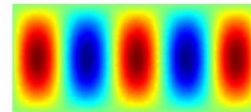
TE02



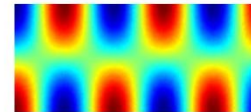
TE40



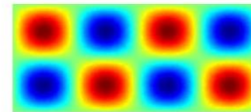
TM51



TE51



TM42



- ▶ Similar cu transformata Fourier

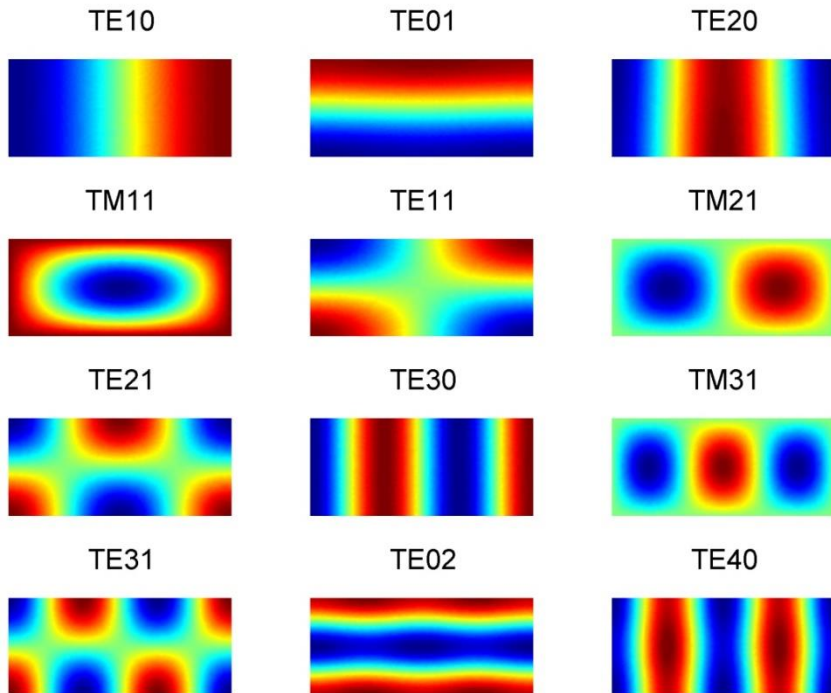
$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

$$E^+, E^- = \sum_1^{\infty} A_i \cdot Mod_i$$

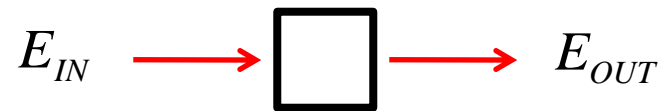
$$A_i = \langle E, Mod_i \rangle$$

# Modele matematice

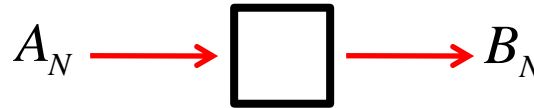
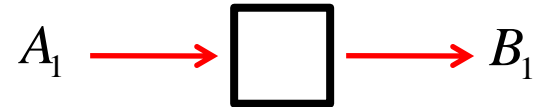
- ▶ cazuri particulare in care exista rezolvare analitica
  - moduri in medii delimitate



$$E = \sum_1^{\infty} A_i \cdot Mod_i \quad A_i = \langle E, Mod_i \rangle$$



$$A_i = \langle E_{IN}, Mod_i \rangle$$



$$E_{OUT} = \sum_1^N B_i \cdot Mod_i$$

# Ghid cilindric dielectric

- ▶ Ecuațiile 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)

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

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

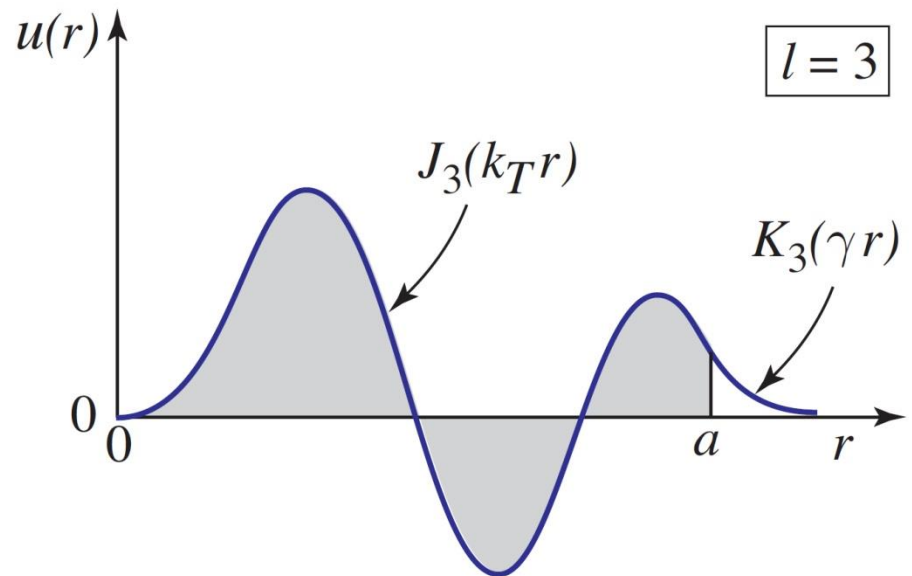
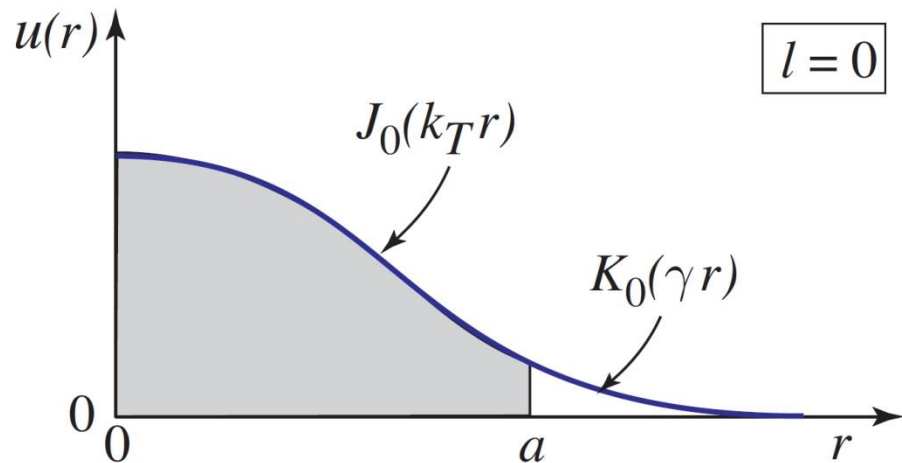
$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left( k_T^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) u = 0, \quad r < a$$

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

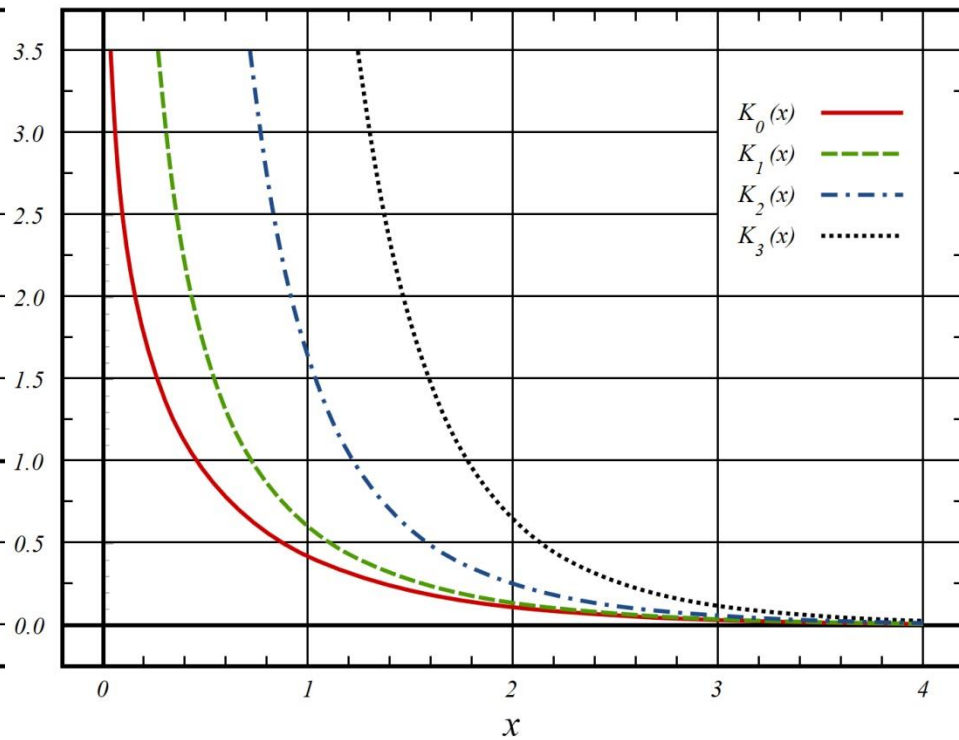
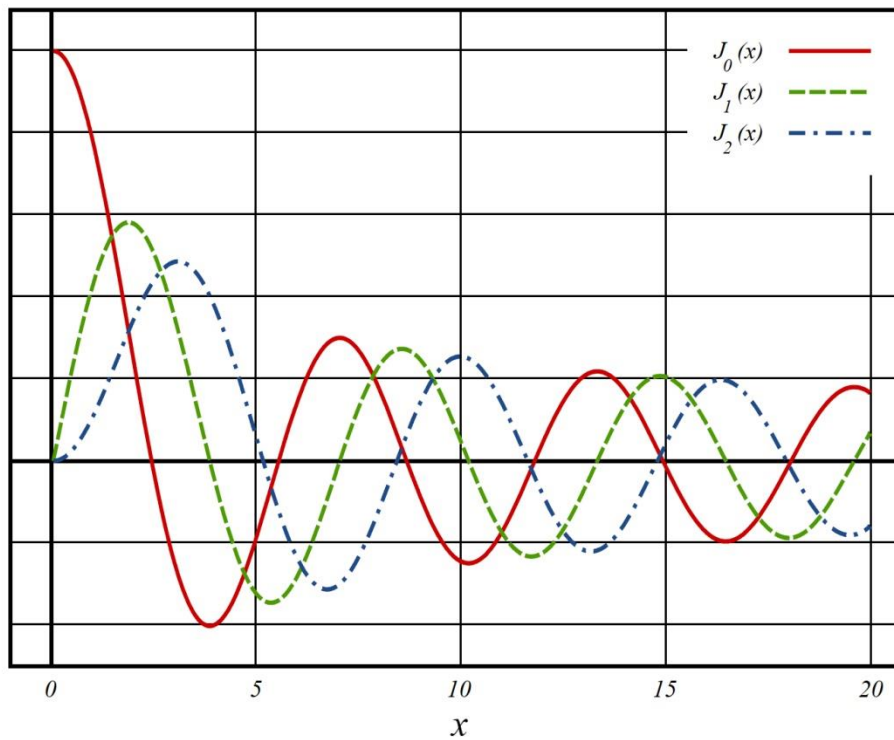
# Ghid cilindric dielectric

- ▶ soluții proporționale cu funcții Bessel

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

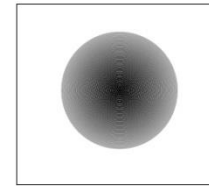


# Funcții Bessel

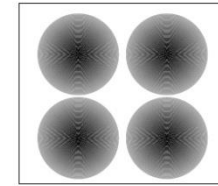


# Moduri in fibra

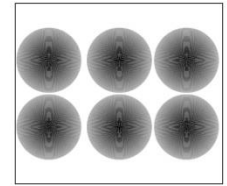
- ▶ Moduri in ghid rectangular



TEM<sub>00</sub>

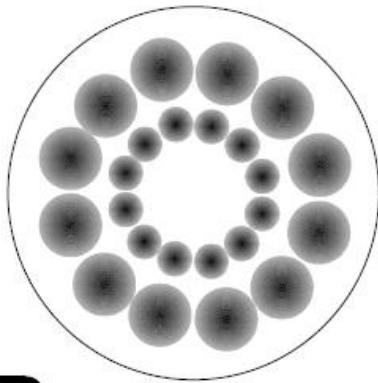


TEM<sub>11</sub>

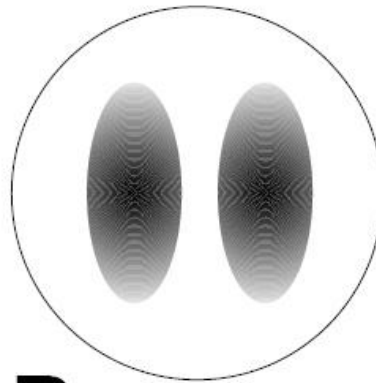


TEM<sub>21</sub>

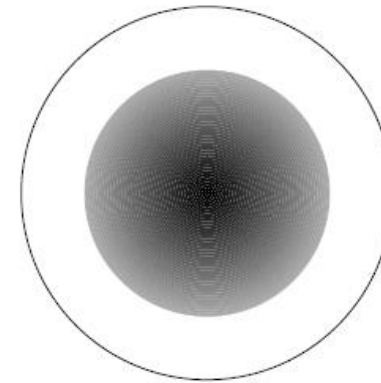
- ▶ Moduri linear polarizate in fibra



LP<sub>62</sub>

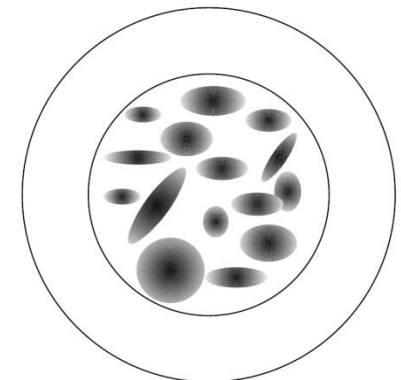


LP<sub>11</sub>



LP<sub>01</sub>

“Sparkle” pattern





# Dispersia

- ▶ In medii dispersive  $\beta = \beta(\omega)$ ,  $n = n(\omega)$ ,  $v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{1}{\left(\frac{d\beta}{d\omega}\right)}$
- ▶ Timpul in care o radiatie ajunge la distanta L

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L \cdot \frac{d\beta}{d\omega} = L \cdot \frac{d}{d\omega} \left( \frac{\omega \cdot n}{c} \right) = \frac{L}{c} \left( n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right)$$

- ▶ Se prefera exprimarea in functie de lungimea de unda

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi \cdot c}{\omega} \rightarrow \frac{d\lambda}{d\omega} = -\frac{2\pi \cdot c}{\omega^2} = -\frac{\lambda}{\omega} \rightarrow d\omega = -\frac{\omega}{\lambda} \cdot d\lambda$$
$$\tau = \frac{L}{c} \left( n + \omega \frac{dn}{-\frac{\omega}{\lambda} \cdot d\lambda} \right) = \frac{L}{c} \left( n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

# Dispersia

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

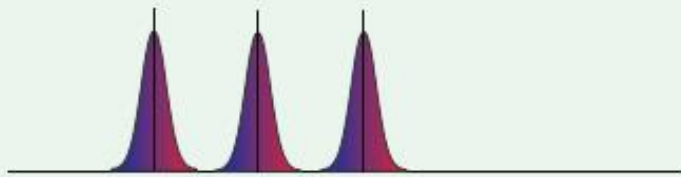
$$\frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{L}{c} \left( \frac{dn}{d\lambda} - \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} - \frac{dn}{d\lambda} \right) = -\frac{L}{c} \cdot \lambda \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad D = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (s/m^2)$$

- ▶ 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  $L$

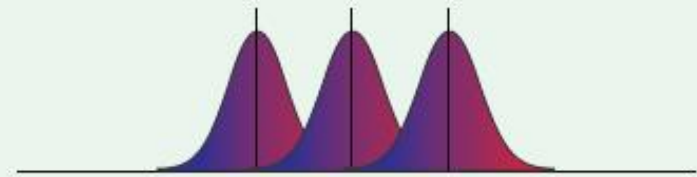
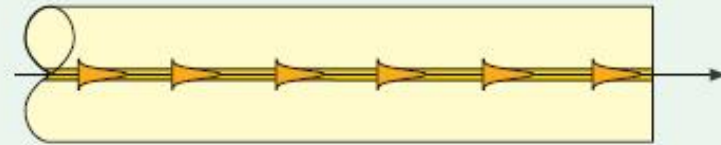
$$\Delta\tau = D \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

# 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



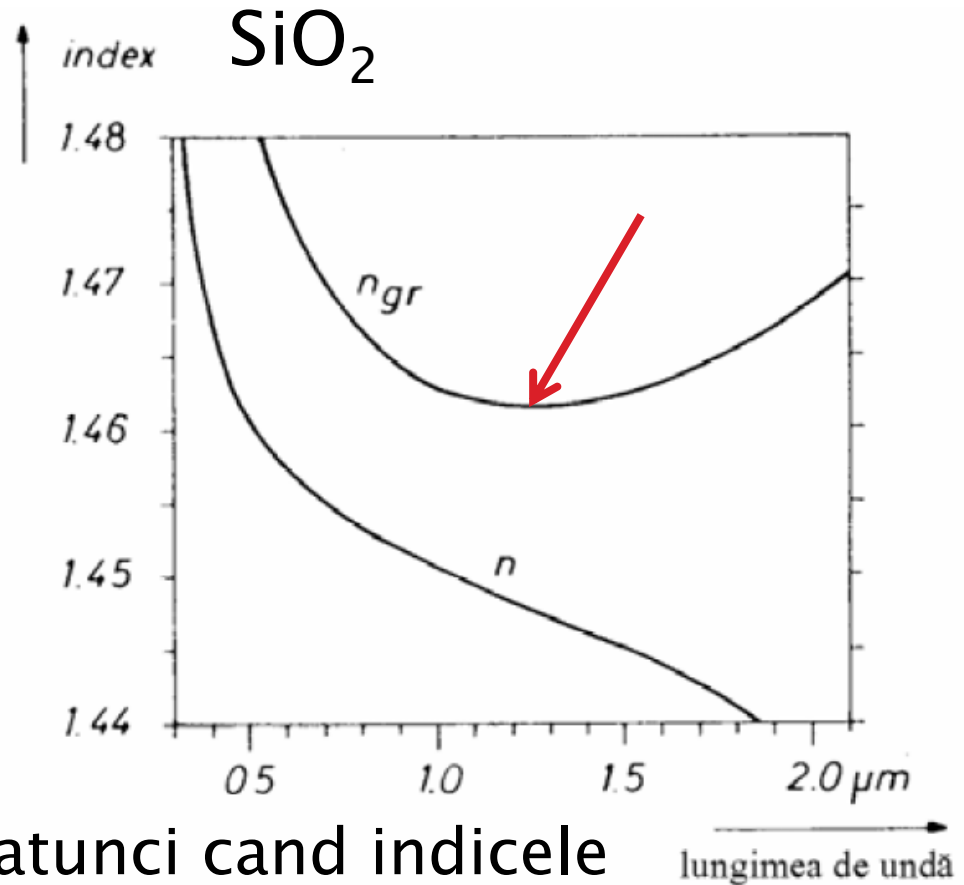
Reception:  
Pulse broadening caused by the laser's spectral width and the difference between the refractive indices of the red and blue ends of the light pulse.

# Dispersie normala

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

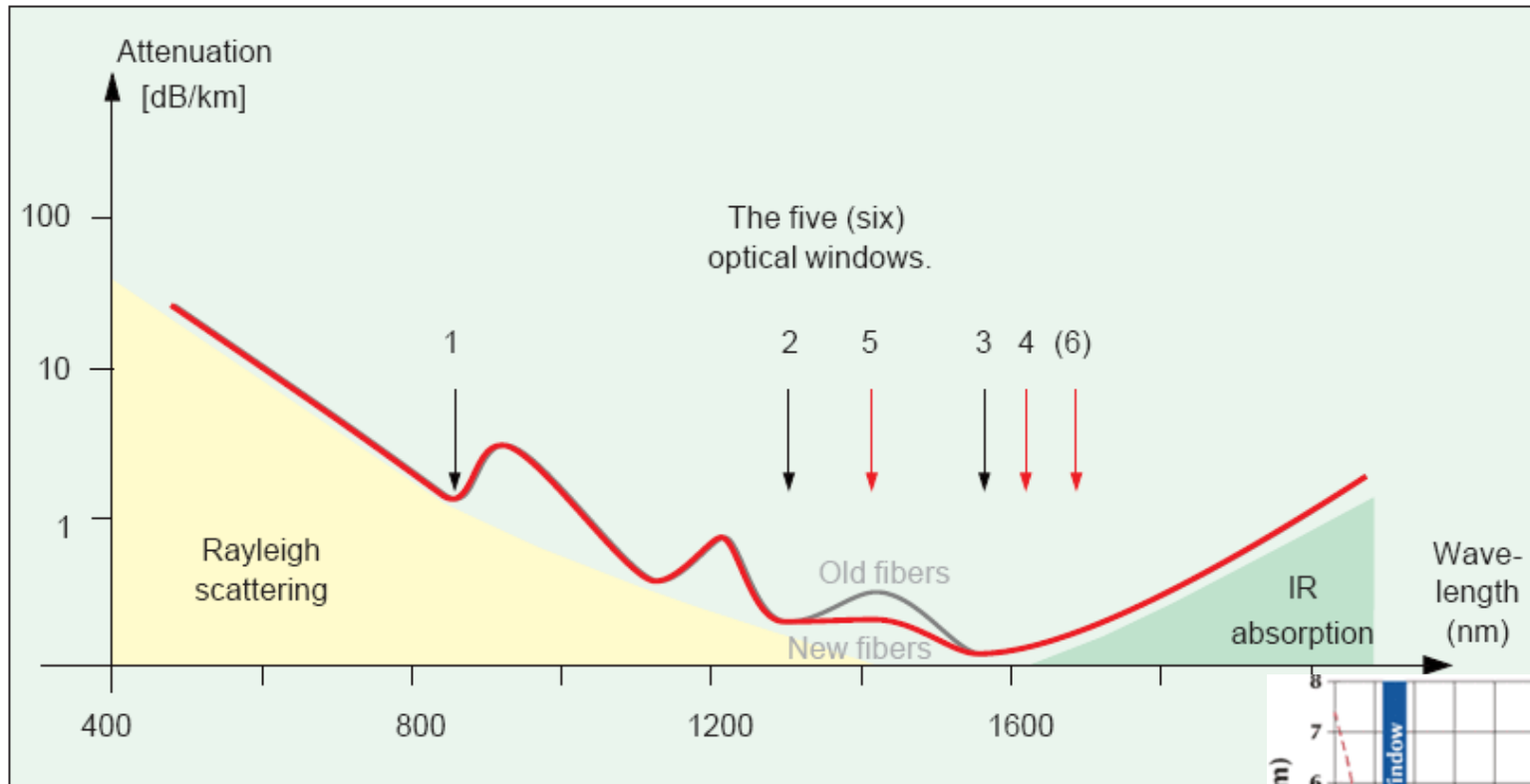
$$v_g = \frac{c}{n_{gr}} \quad n_{gr} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

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

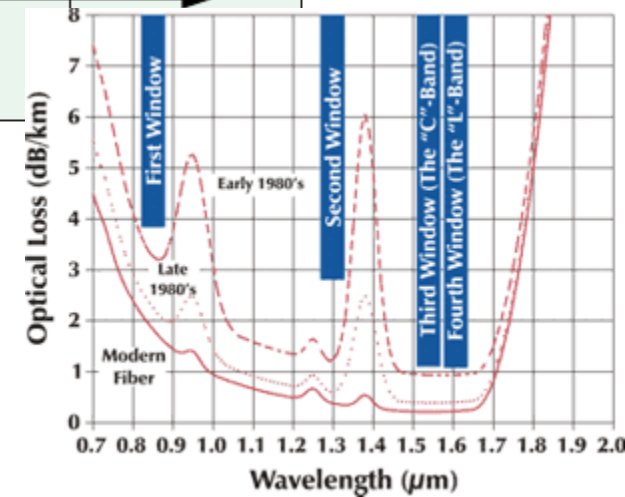


- ▶ Dispersia este **0** atunci cand indicele de refractie de grup este minim
- ▶ Pentru sticla  $\lambda_0 \sim 1310 \text{ nm}$

# Atenuarea în fibra optică (SiO<sub>2</sub>)



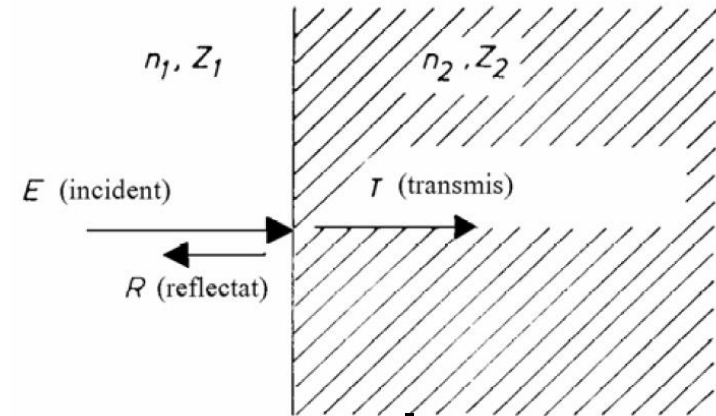
850nm, 1310nm, 1550nm



# Transmisia puterii între medii

- ▶ incidenta normala
- ▶ reflexia in amplitudine

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



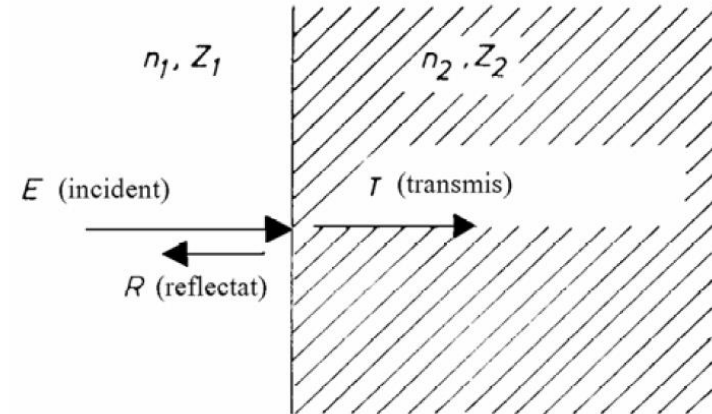
- ▶ densitatea de putere proportionala cu patratul amplitudinii câmpului

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

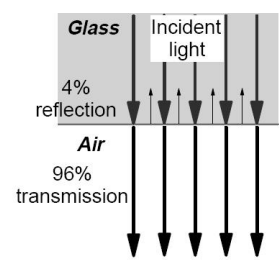
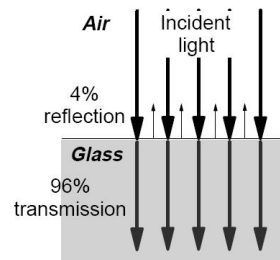
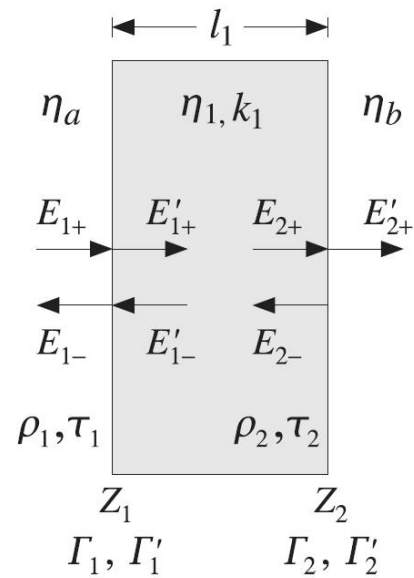
# Transmisia puterii intre medii

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

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

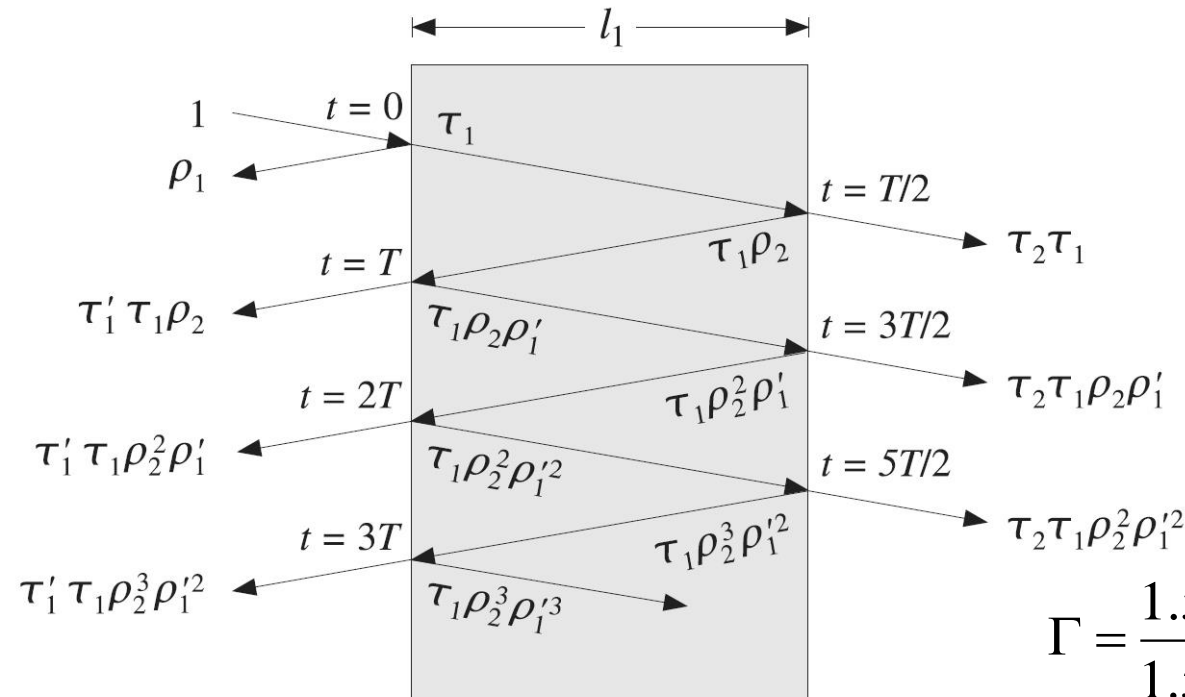


- ▶ reflexia de putere 4%, transmisia de putere 96%
- ▶ lamela dielectrica
- ▶ trecere intr–un mediu diferit, urmat de intoarcerea in mediul initial



# Transmisia printr-o lamela

- ▶ apare interferenta intre multiplele unde reflectate/transmise



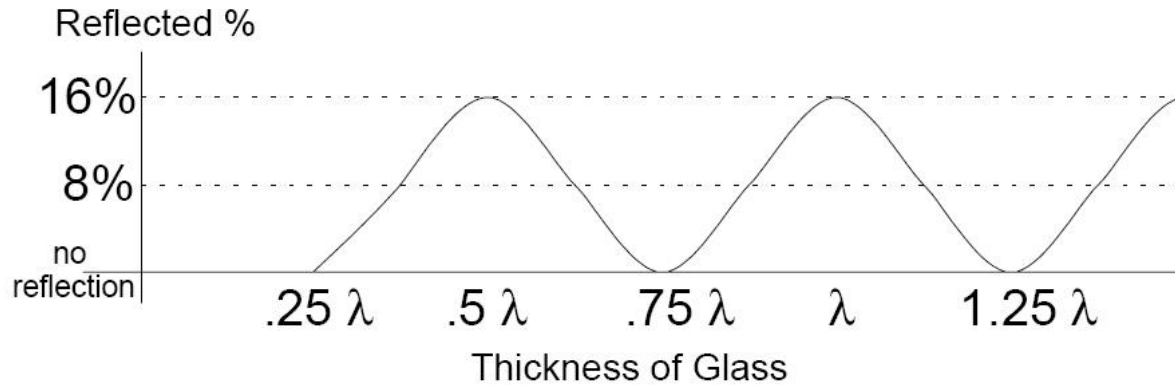
- ▶ se aduna câmpurile nu puterile

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

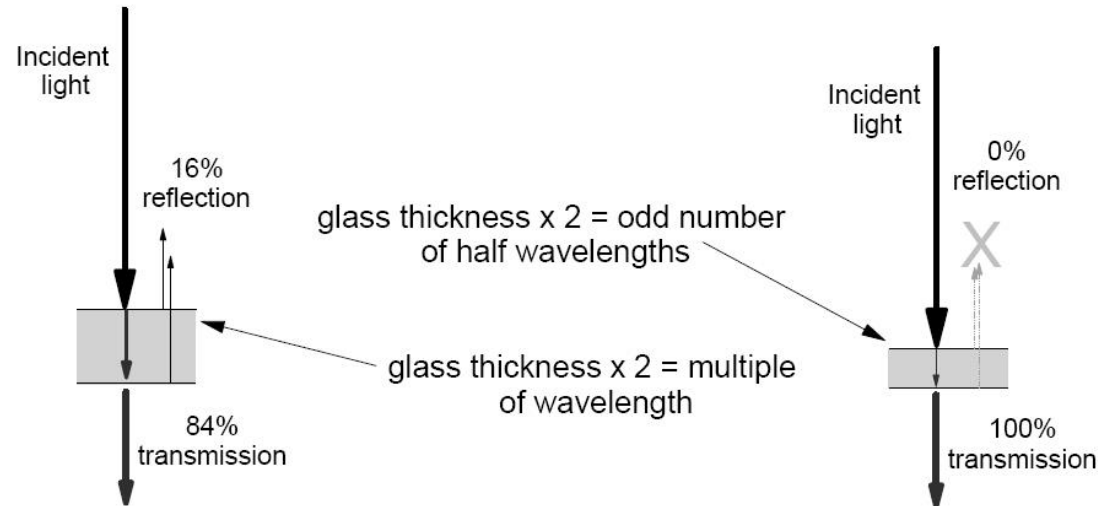
$$\Gamma_{\max} = 0.2 + 0.2; \quad r_{\max} = \Gamma_{\max}^2 = 0.16 = 16\%$$



# Transmisia printr-o lamela



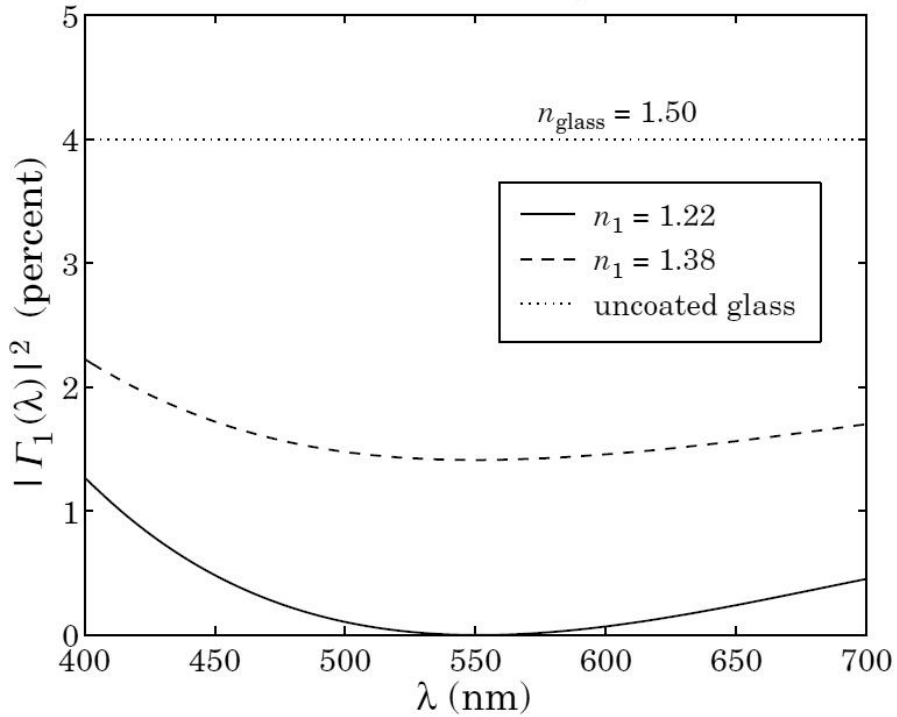
- ▶ lamele antireflexive



# Transmisia printr-o lamela

## ▶ lamele antireflexive

Antireflection Coating on Glass



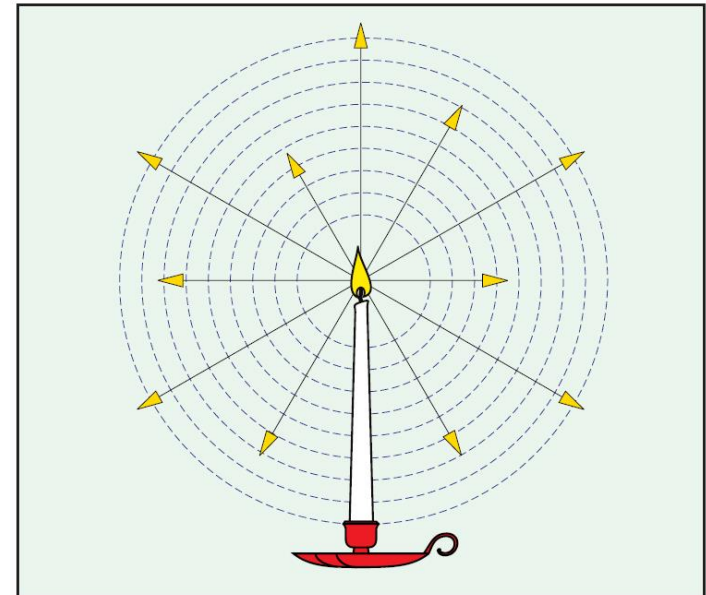
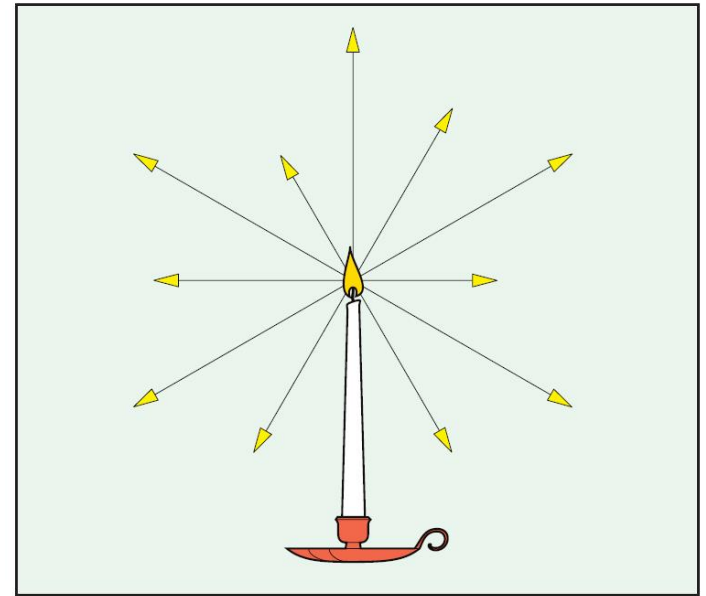
# Optică geometrică

(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)

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

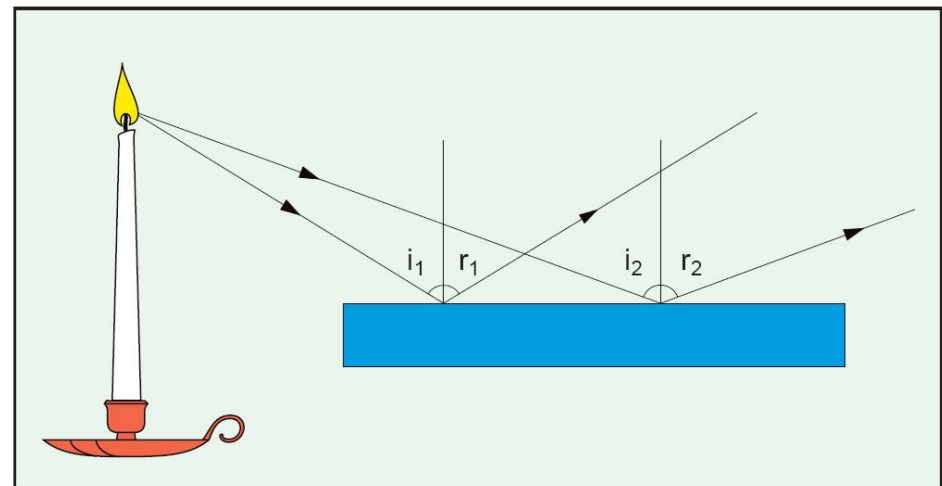


# Reflexia luminii

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

## ▶ Legea reflexiei

$$\phi_i = \phi_r$$



# Refractia luminii

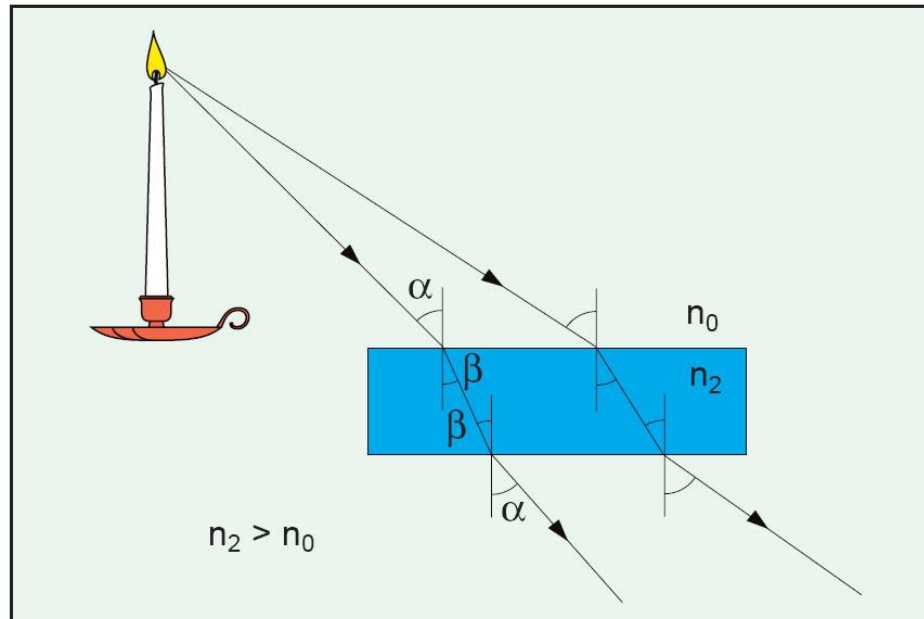
- ▶ la suprafața de separație dintre doua medii, (o parte din) lumina se (poate) propaga in mediul de transmisie sub un unghi diferit de unghiul incident
- ▶ la trecerea in medii mai “dense” (optic) lumina se apropie de normala
- ▶ la trecerea in medii mai “puțin dense” (optic) lumina se depărtează de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

## ▶ Legea lui Snell (a refracției)

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

$\phi_i$  - unghi incident (in  $n_1$ )

$\phi_R$  - unghi de refracție (in  $n_2$ )



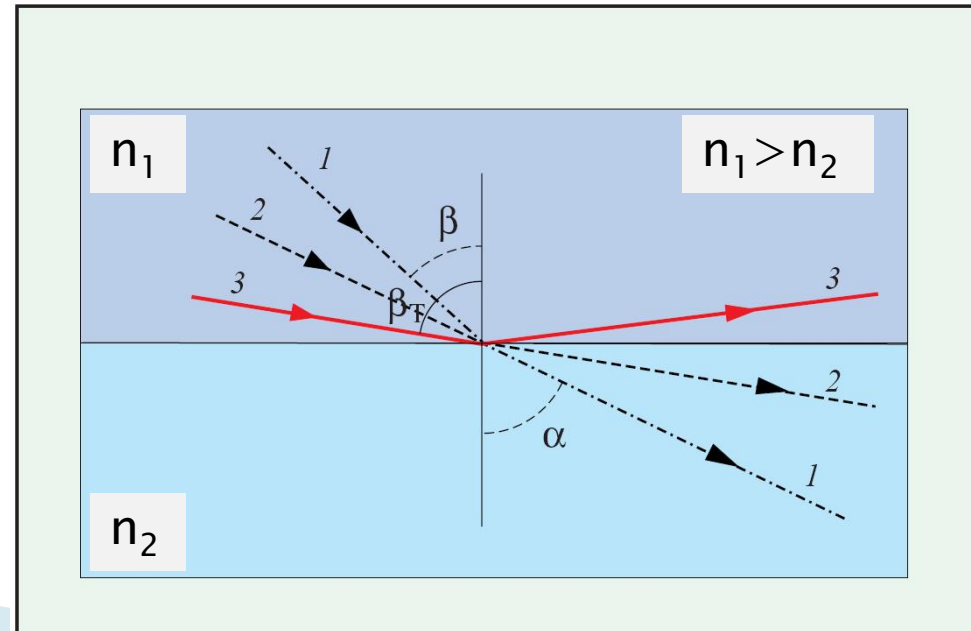
# Reflexia totala

- ▶ 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

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

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

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

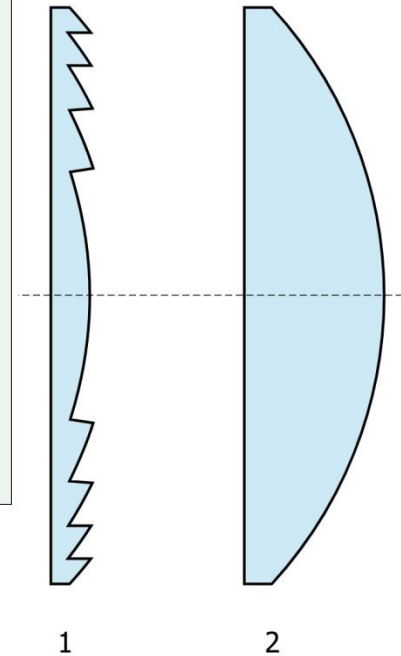
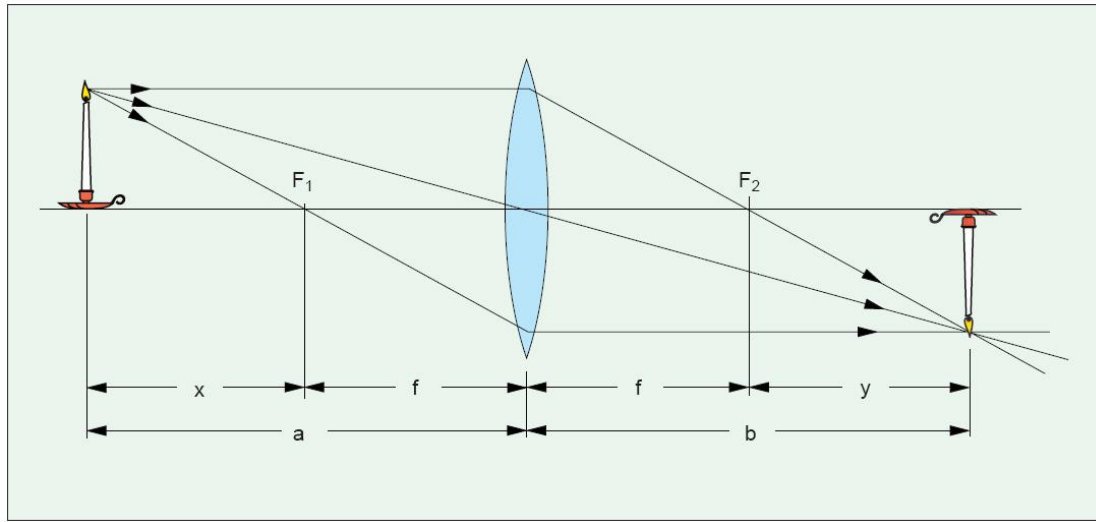


# Lentile

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

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

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



1

2

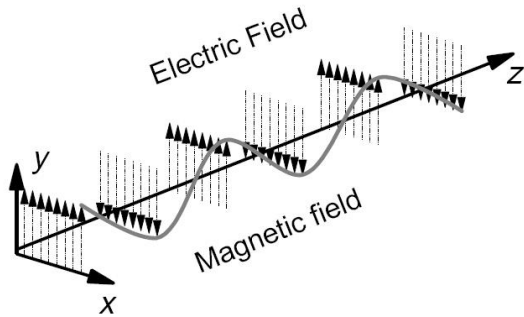


# Lumina ca undă electromagnetică

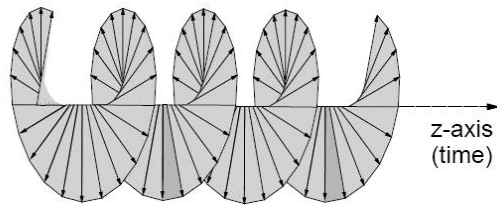
Capitolul 2

# Solutia ecuatiilor de propagare

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



Propagare



Polarizare circulara

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

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

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

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

Camp armonic

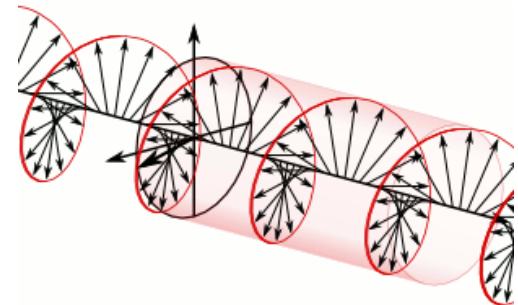
$$E_y = A \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z)}$$

Amplitudine

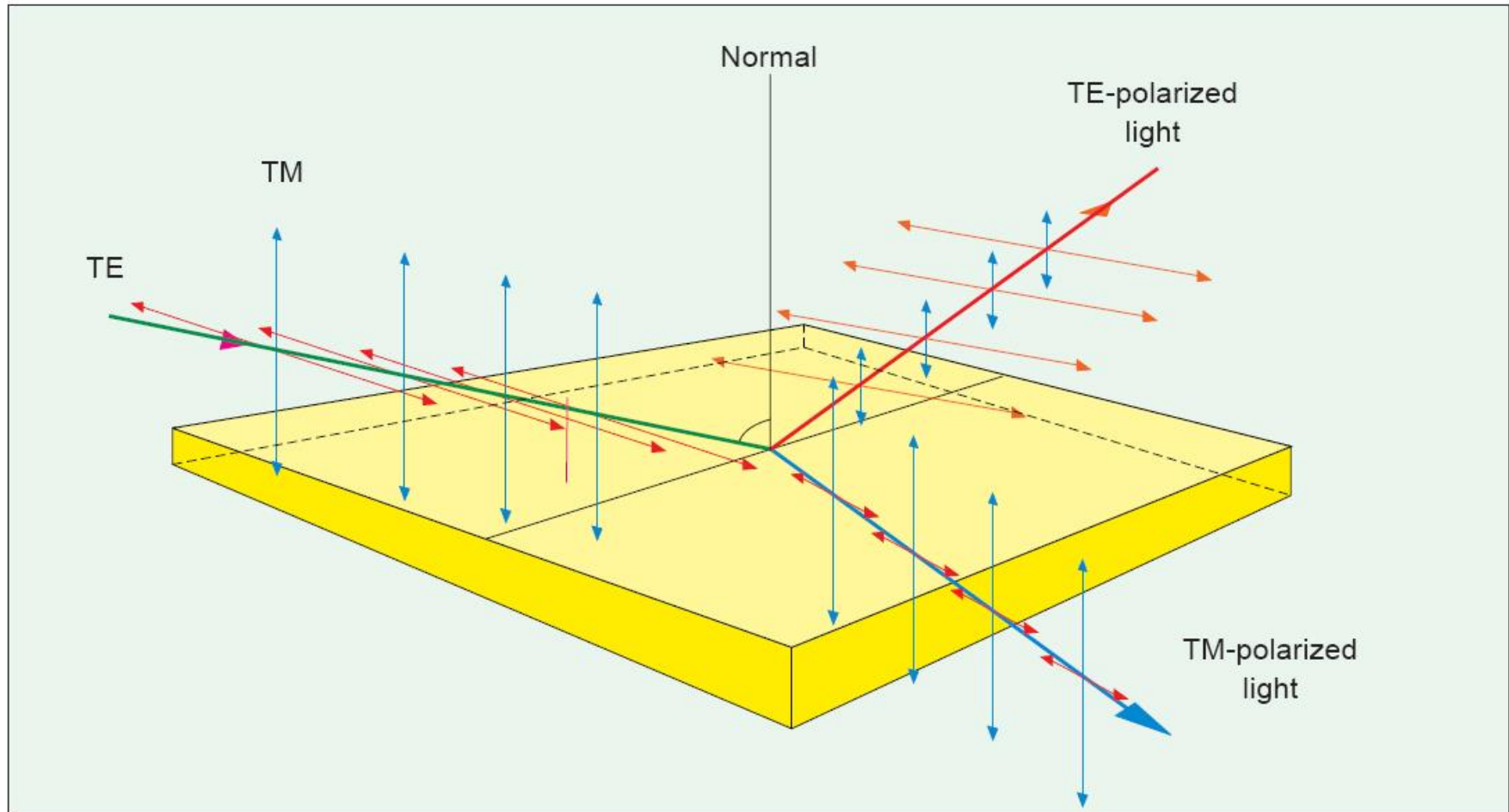
Atenuare

Propagare

(variatie in timp si spatiu)



# Polarizarea luminii



# Polarizarea luminii

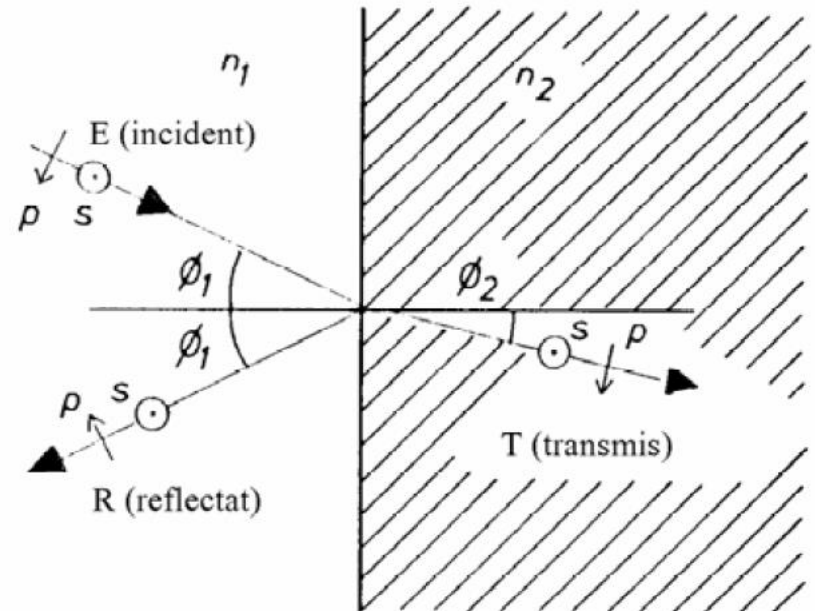
- ▶ incidenta oblica
- ▶ reflexiile in amplitudine a campului:

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

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

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

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



# Unghi Brewster

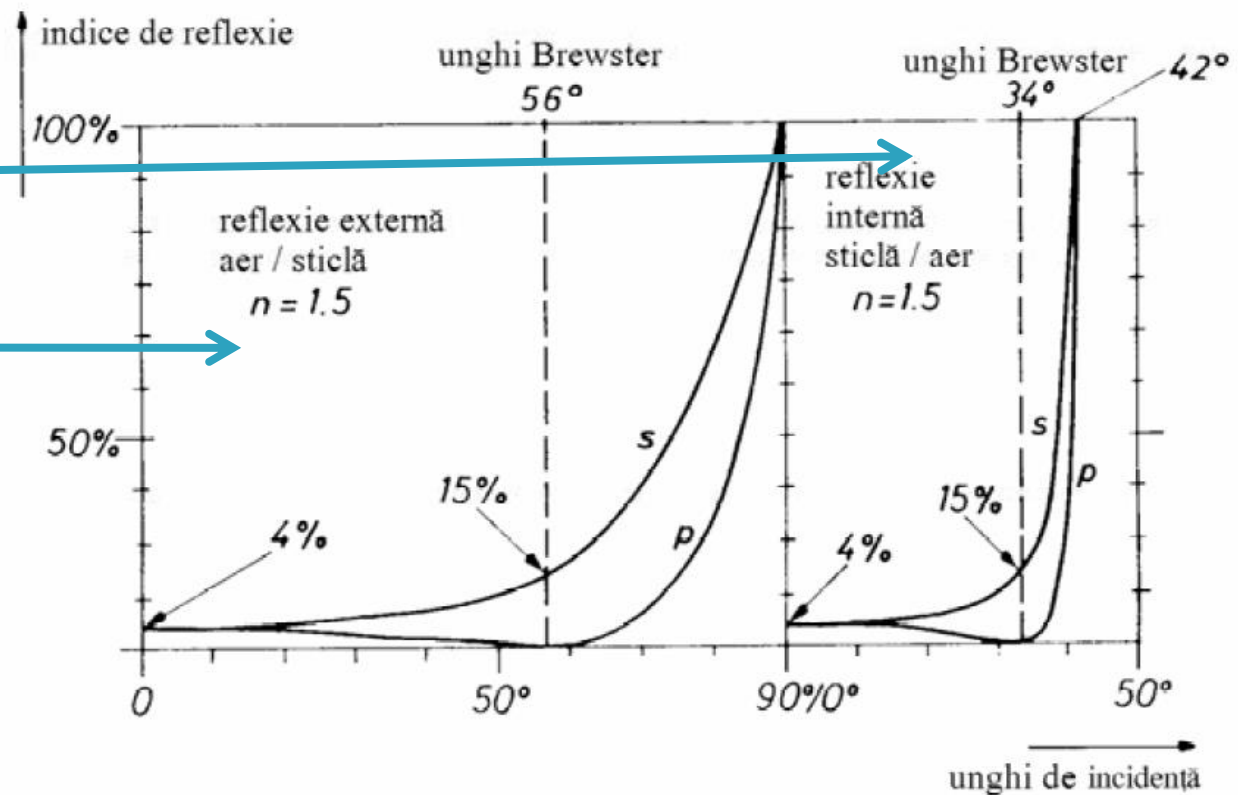
$$r_p = 0 \Rightarrow \tan(\phi_1 + \phi_2) \rightarrow \infty \Rightarrow \phi_1 + \phi_2 = \frac{\pi}{2}$$

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

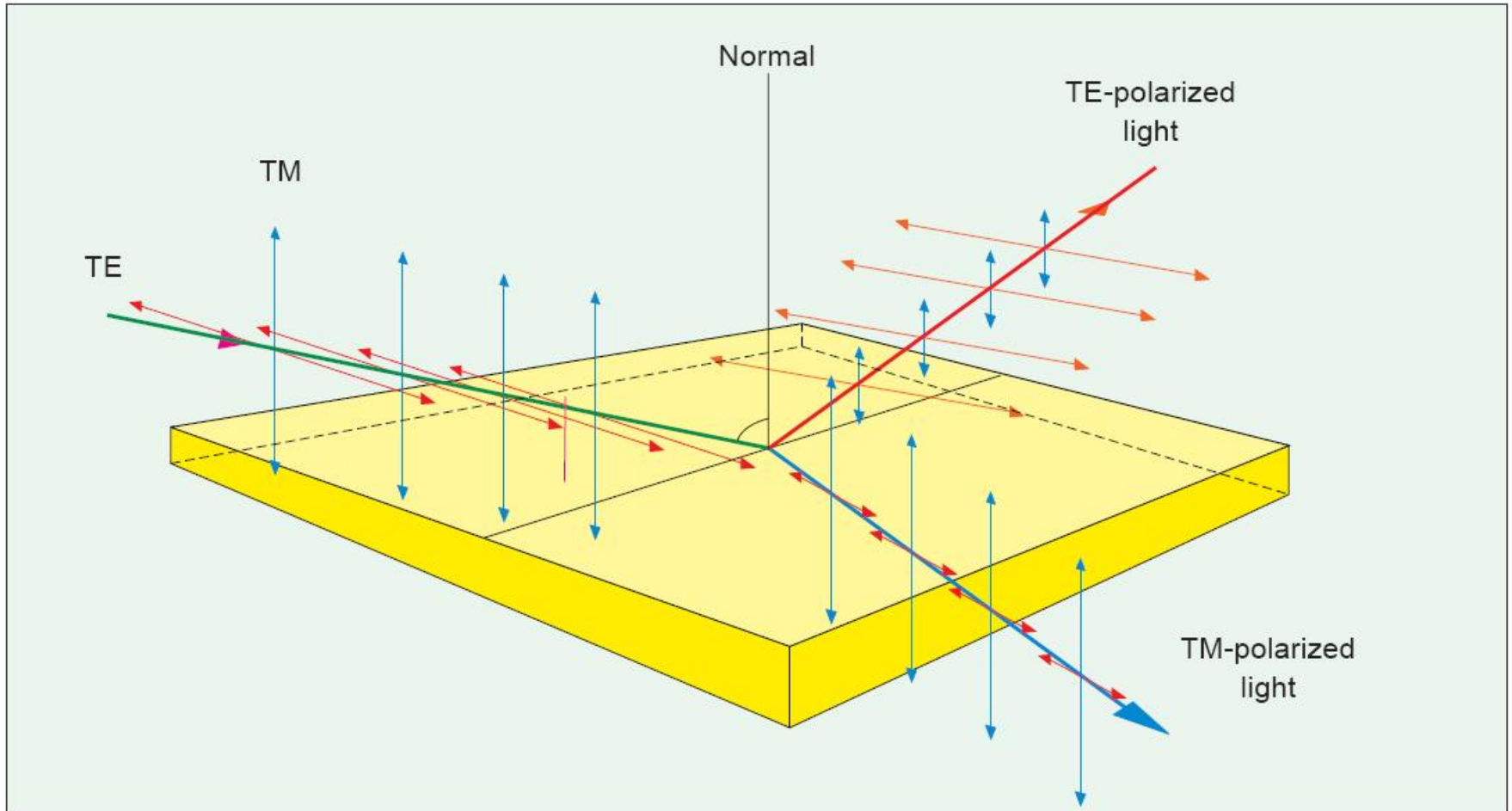
$$\phi_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\phi_B = 34^\circ$$

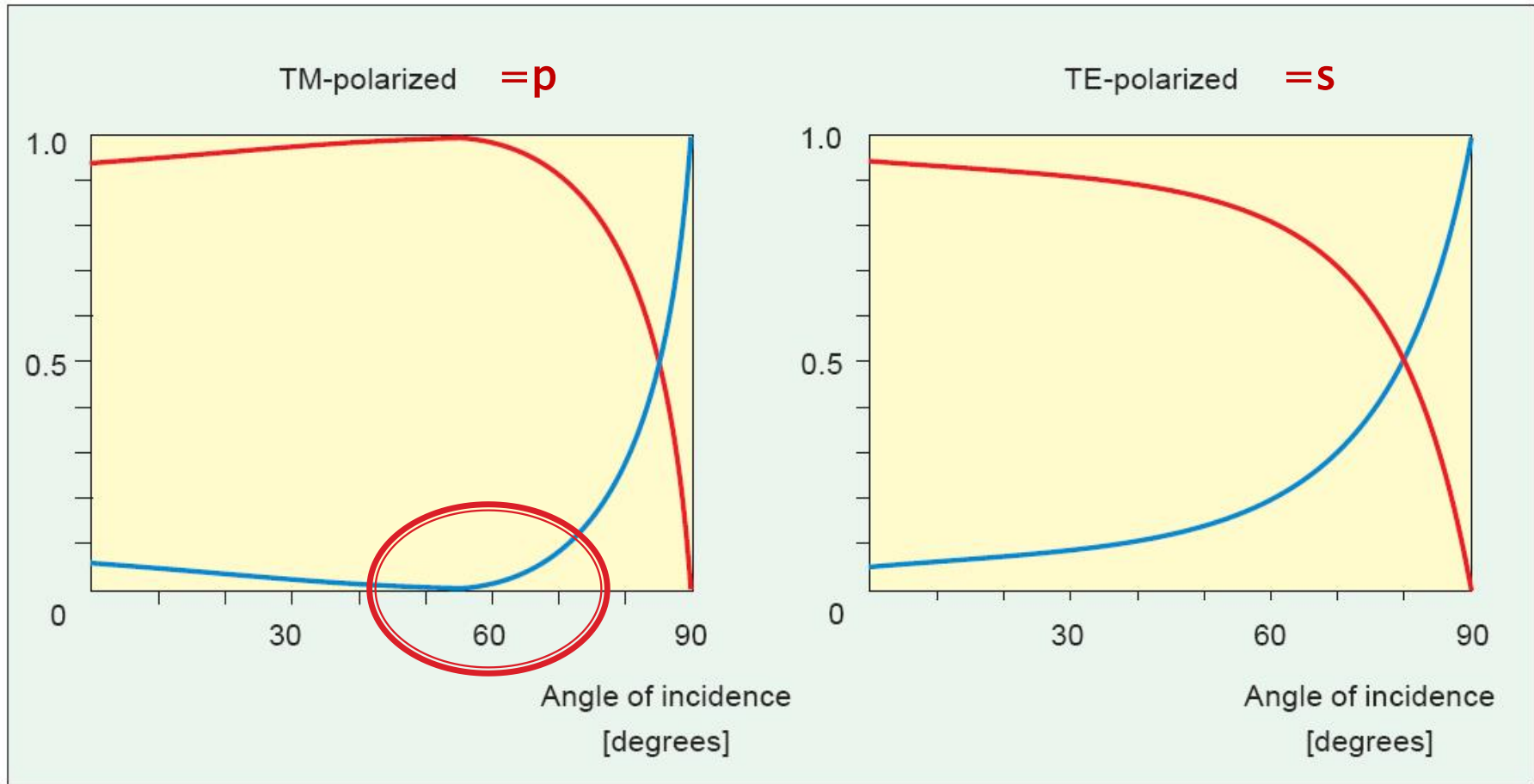
$$\phi_B = 56^\circ$$



# 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)
- ▶ Rezolvări: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

unghi Brewster

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

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 înclinația de  $41.2^\circ$  față de normala 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

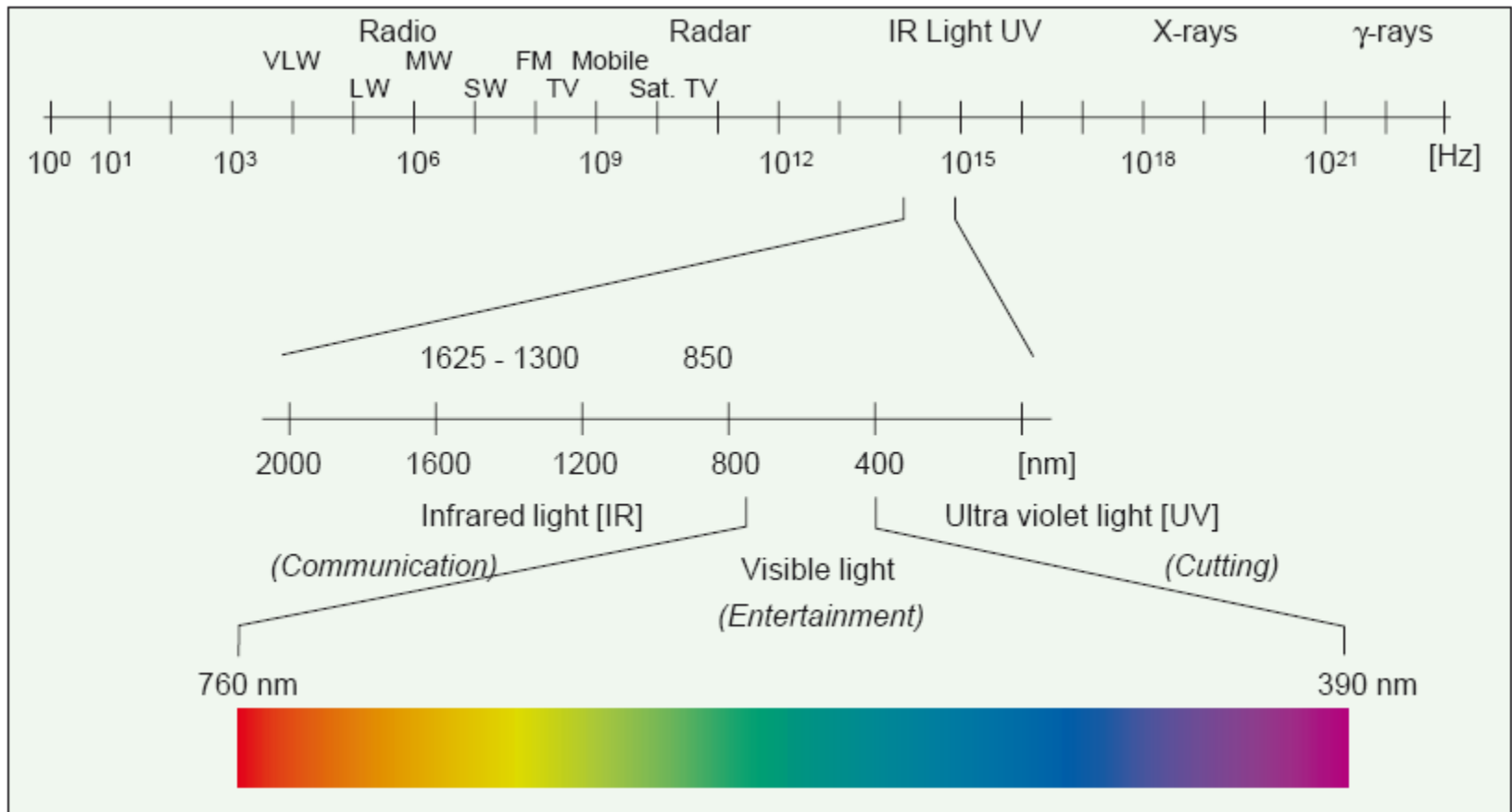
# Cuprins

- ▶ **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

# Contact

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