

# Optoelectronică

Curs 10

2025/2026

# Disciplina 2025/2026

- ▶ 2C/1L Optoelectronică **OPTO**
- ▶ **Minim 7 prezente curs + laborator**
- ▶ Curs – conf. **Radu Damian**
  - an IV  $\mu$ 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  $\mu$ 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)



## 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



Send

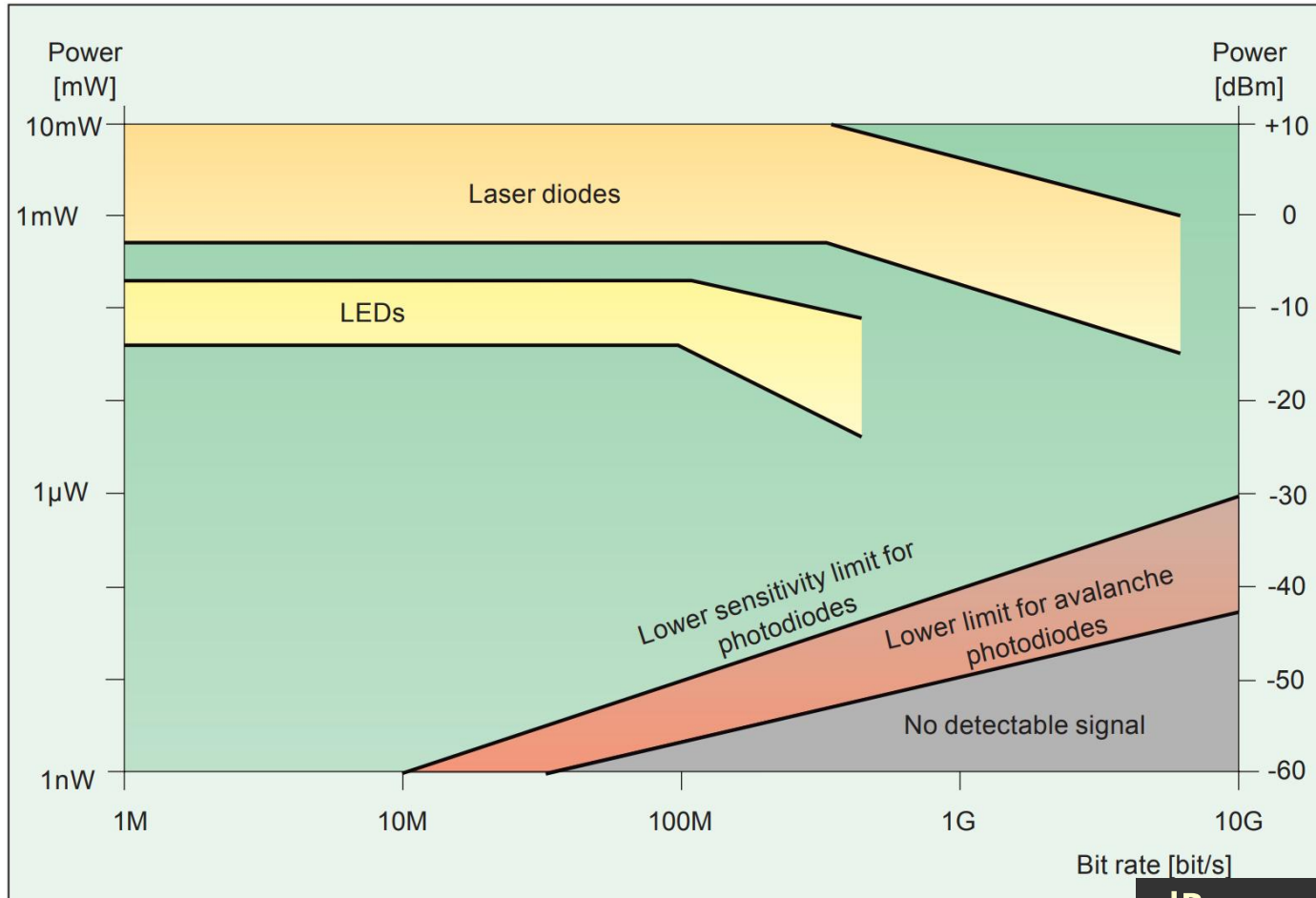
# Dimensionarea unei legături pe fibra optică

Capitolul 6

# 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 )

# Limite putere/bandă a dispozitivelor optoelectronice

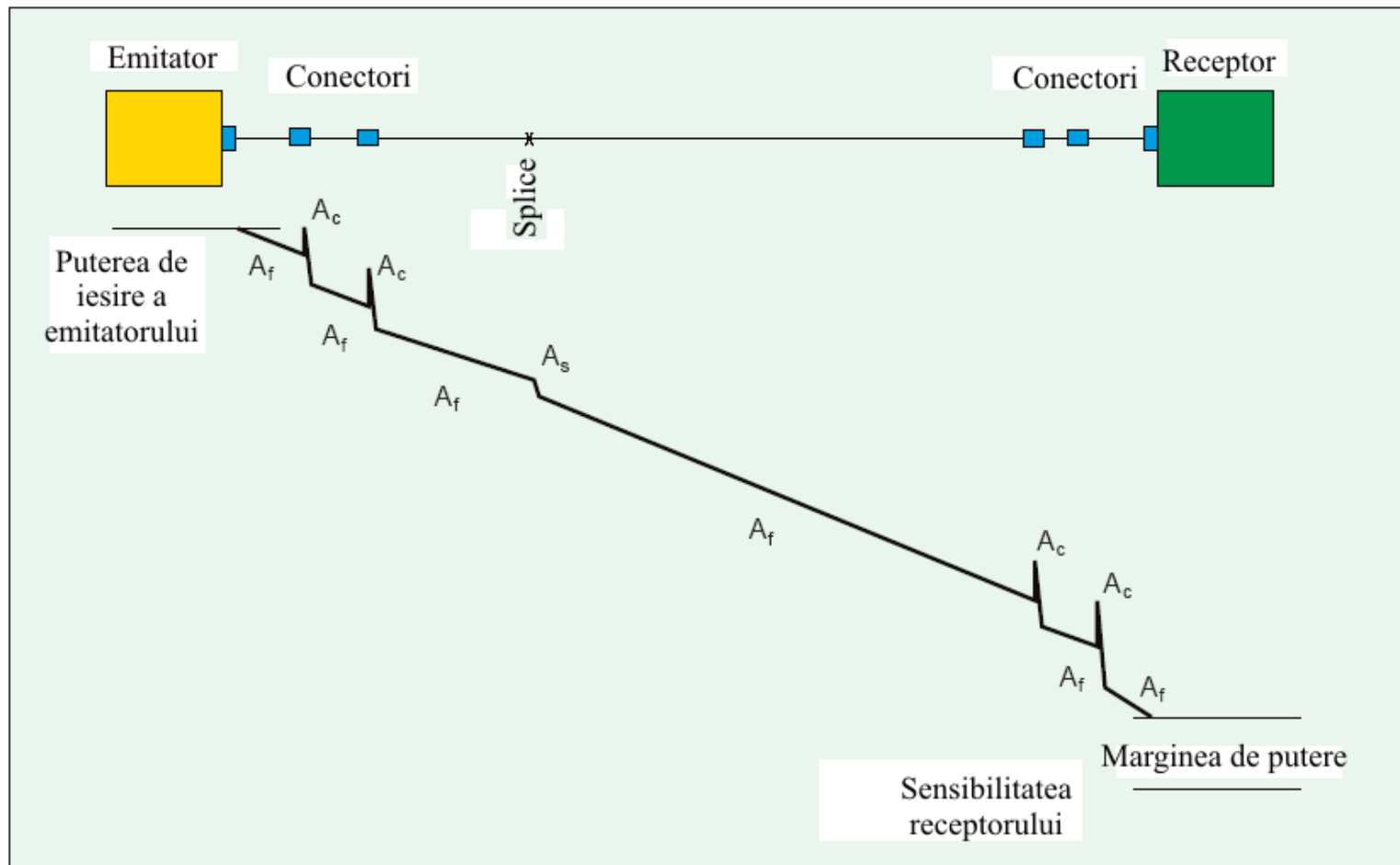


$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} (P_2 / P_1)$$

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

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

# Legatura pe fibra optica



# Atenuare

## ▶ Distribuita

- microcurburi
- imprastiere
- absorbtie

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

## ▶ Localizata

- macrocurburi
- conectori
- splice
- tranzitii

$$\text{Atenuare}_L [\text{dB}] = \text{Pierderi}[\text{dB}]$$

$$A_{\text{TOT}} [\text{dB}] = A_L [\text{dB}] + A_D [\text{dB/km}] \cdot L [\text{km}]$$

# Pierderi

- ▶ Atenuare in fibra
- ▶ Atenuare datorata conectorilor
- ▶ Atenuare datorata splice-urilor
- ▶ Atenuare datorata diferentelor de apertura numerica
  - apare **numai** la trecerea de la un dispozitiv cu NA mai mare la un dispozitiv cu NA mai mic
  - **neglijabil** intre 2 fibre monomod sudate
- ▶ Atenuare datorata diferentelor de diametru
  - apare **numai** la trecerea de la un dispozitiv cu diametru mai mare la un dispozitiv cu diametru mai mic
  - **bidirectional** la fibre monomod sudate

# Dispersie

$$\Delta\tau_{\text{mod}} \cong \frac{L \cdot n_2 \cdot \Delta}{2\sqrt{3} \cdot c} \approx \frac{L \cdot NA^2}{4\sqrt{3} \cdot c \cdot n_2}$$

$$\Delta\tau_{\text{mod}} \cong \frac{L \cdot n_2 \cdot \Delta^2}{4\sqrt{3} \cdot c} \cong \frac{L \cdot NA^4}{16\sqrt{3} \cdot c \cdot n_2^3}$$

$$\Delta\tau_{cr} = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \cdot \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right)$$

$$\Delta\tau_{tip} = \sum_i \Delta\tau_i$$

$$\Delta\tau_{tot} = \sqrt{\Delta\tau_{cr}^2 + \Delta\tau_{mod}^2}$$

$$B_{opt} = \frac{0.44}{\Delta\tau_{tot} [ns]} [GHz] \quad B_{opt} = \sqrt{2} B_{el}$$

$$V [Gb/s] \cong 2 \cdot B_{el}$$

$$B_{3dB,electric} (GHz) = \frac{0.35}{T(ns)}$$

$$NRZ_{viteza\ date} (Gbit/s) = \frac{1}{T_{impuls} (ns)} \leq \frac{0.67}{T(ns)}$$

# Lungime maxima

- ▶ **limitata de atenuare**  $L_{\max}^a$  [km]
- ▶ **limitata de viteza**  $L_{\max}^v$  [km]

- ▶ lungimea cea mai mare la care pot face transmisia este obtinuta in cazul cel mai **defavorabil** (din cele doua limitari)

$$L_{\max} [\text{km}] = \min(L_{\max}^a [\text{km}], L_{\max}^v [\text{km}])$$

- ▶ **de obicei**
  - monomod: limita impusa de atenuare
    - cu exceptia cazurilor in care nu se functioneaza la  $\lambda$  optim dpdv al dispersiei
  - multimod: limita impusa de viteza

# LED

Dioda electroluminescenta

Capitolul 7

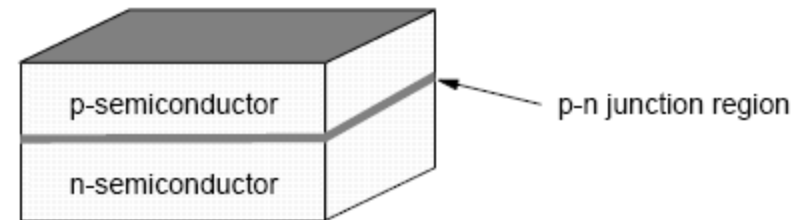
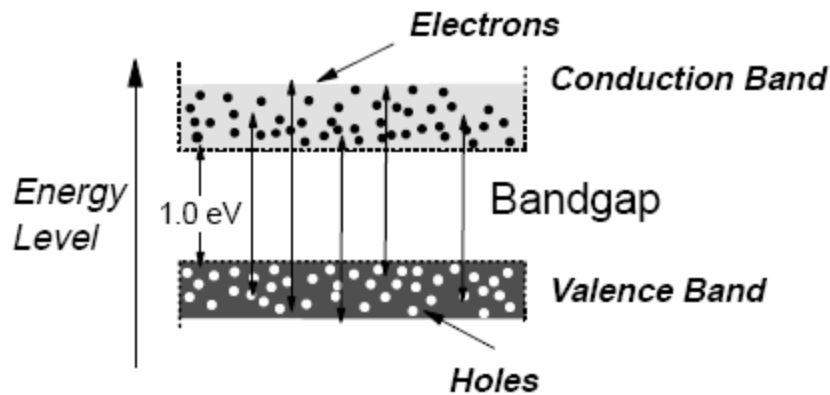
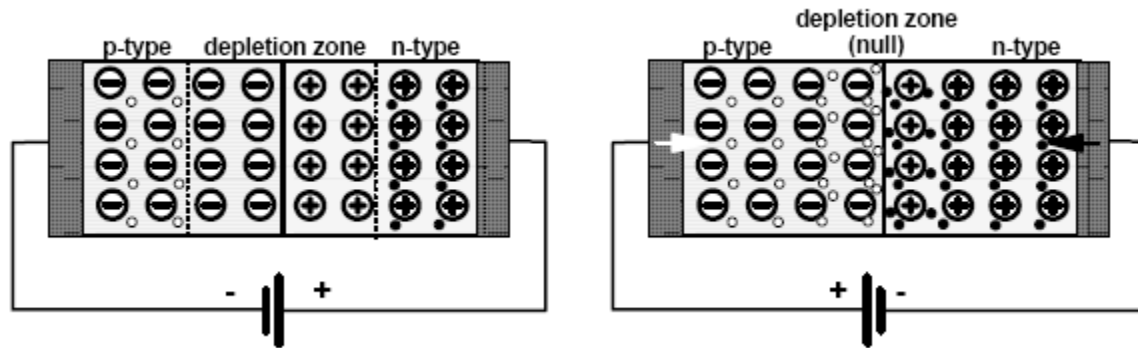
# Cuprins

- ▶ **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 )

# Aplicatii majore LED

- ▶ Comunicatii
  - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
  - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
  - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)

# LED – Principiul de operare



# LED – Principiul de operare

- ▶ Lumina este generata de o recombinare **radiativa** dintre un electron si un gol
- ▶ Recombinarea **neradiativa** transforma energia in **caldura**
- ▶ Eficienta cuantica  $\eta = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}}$
- ▶ La recombinarea radiativa  $E_g = h\nu; \lambda = \frac{hc}{E_g}$
- ▶ Recombinare eficienta:
  - alegerea judicioasa a materialului
  - concentrarea purtatorilor in zona jonctiunii
- ▶ Lungimea de unda depinde de temperatura de functionare a dispozitivului:  $0.6\text{nm}/^\circ\text{C}$

# Lățimea benzii interzise/lungime de undă pentru materialele uzuale

Material	Formula	Wavelength Range $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Bandgap Energy $W_g$ (eV)
Indium Phosphide	InP	0.92	1.35
Indium Arsenide	InAs	3.6	0.34
Gallium Phosphide	GaP	0.55	2.24
Gallium Arsenide	GaAs	0.87	1.42
Aluminium Arsenide	AlAs	0.59	2.09
Gallium Indium Phosphide	GaInP	0.64-0.68	1.82-1.94
Aluminium Gallium Arsenide	AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
Indium Gallium Arsenide	InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
Indium Gallium Arsenide Phosphide	InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

$$E_g = h\nu; \quad \lambda = \frac{hc}{E_g}; \quad \lambda[\mu\text{m}] = \frac{1.240}{E_g[\text{eV}]}$$

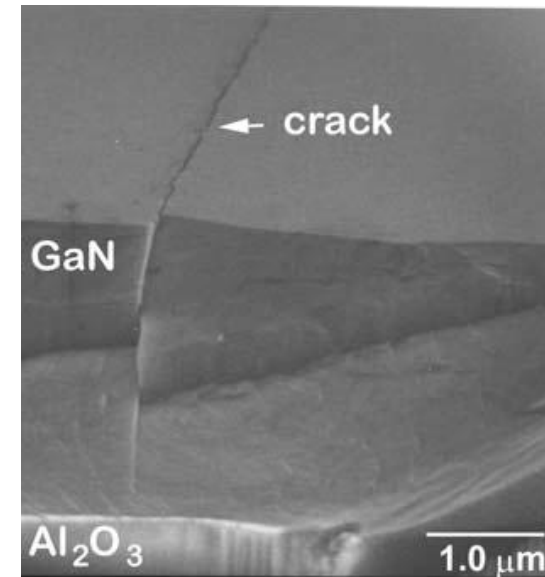
- ▶  $h$  constanta lui Plank  
 $6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$
- ▶  $c$  viteza luminii **in vid**  
 $2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- ▶  $e$  sarcina electronului  
 $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ▶ benzi energetice:  $\lambda_0$ ,  $\Delta\lambda$

# Detalii constructive – 1

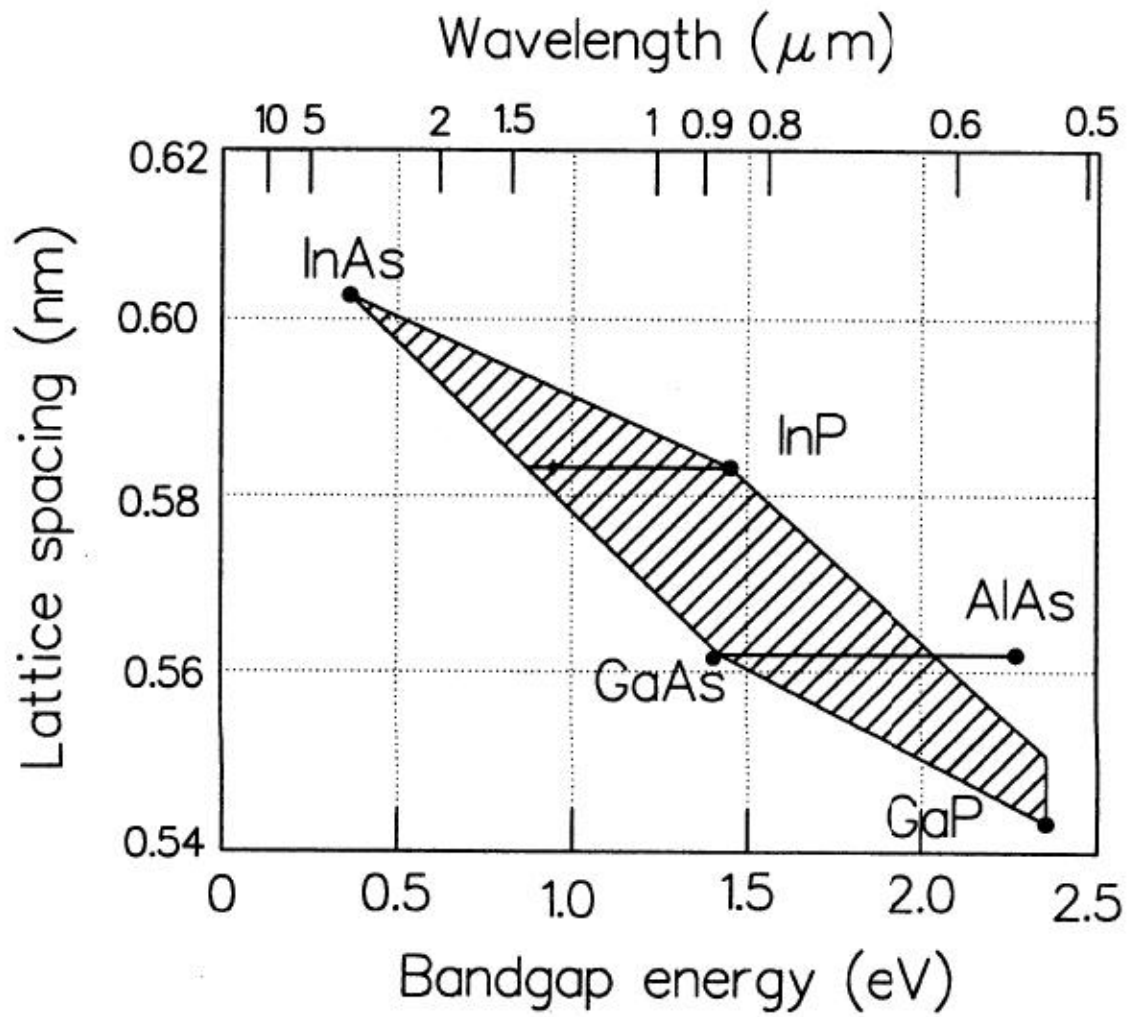
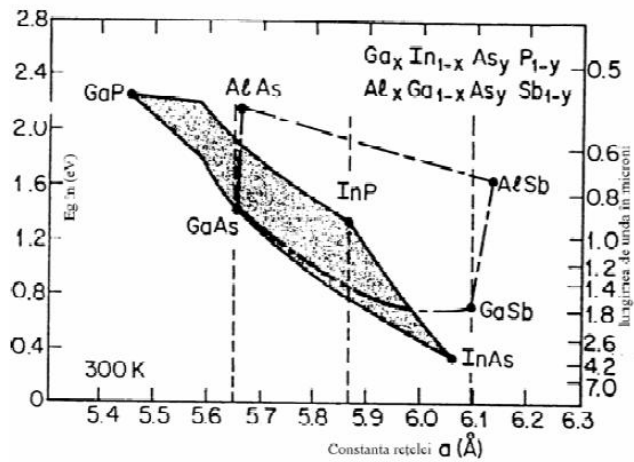
- ▶ Recombinarea unei perechi electron–gol necesita conservarea "impulsului rețelei" (cvasiimpuls)
  - ▶ In Si si Ge aceasta conditie presupune aparitia unui fonon intermediar (tranzitie indirecta) a carui energie se transforma in caldura
  - ▶ Majoritatea aliajelor de aluminiu Al de asemenea au tranzitie indirecta
- ▶ Se utilizeaza aliaje de Ga Al As sau In Ga As P
- ▶ Materialele utilizate trebuie sa fie "transparente" la lungimile de unda emise

# Detalii constructive – 2

- ▶ Spatierea atomilor in diferitele straturi trebuie sa fie **egala** (toleranta 0.1%) pentru a nu se introduce defecte mecanice la jonctiune
  - limitare a aliajelor utilizabile
  - aparitia defectelor
    - creste ineficienta (recombinari neradiative)
    - scade durata de viata a dispozitivului



# Dependența benzii interzise de constanta rețelei



# Materiale

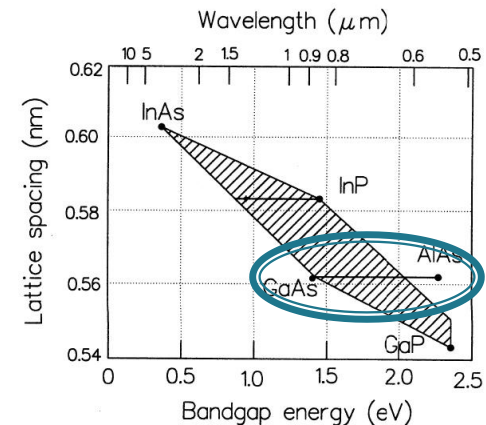
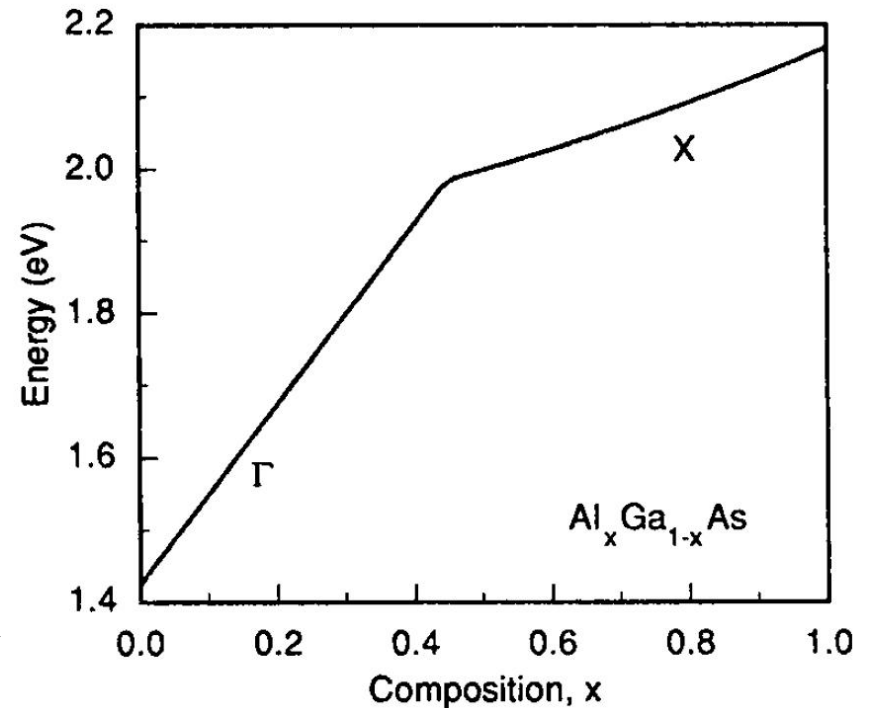
- ▶ Lungimi de unda mici (spectru vizibil – 1 000nm)
  - GaP (665nm),  $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$
  - **GaAs** (900nm),  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  (AlAs – 550nm)
- ▶ Lungimi de unda mari (1 000÷1 700nm)
  - **InP** (920nm),  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
  - x,y concentratii relative in aliaj a materialelor corespunzatoare
  - x,y alese din considerente privind
    - lungimea de unda
    - spatierea atomilor
- ▶ Ultraviolet – Albastru: **GaN**, GaInN

# Materiale

- ▶ Lungimi de unda mici
  - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$
  - substrat GaAs
  - limitare pentru tranzitie directa,  $x < 0.45$
  - $E_g$  (in **eV**)

$$E_g = 1.424 + 1.247 \cdot x, \quad x < 0.45$$

$$E_g = 1.9 + 0.125 \cdot x + 0.143 \cdot x^2, \quad x > 0.45$$



# Materiale

- ▶ Lungimi de unda mari
  - $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
  - Tipic substratul este InP
    - Spatierea atomilor (lattice spacing) corespunzatoare InP

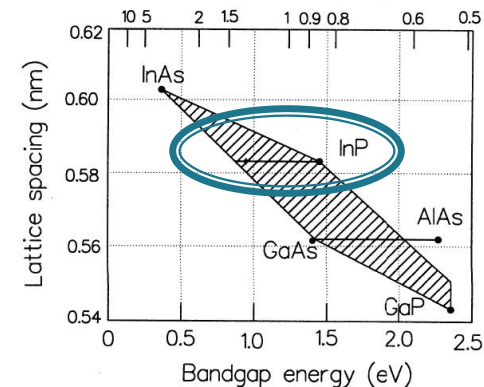
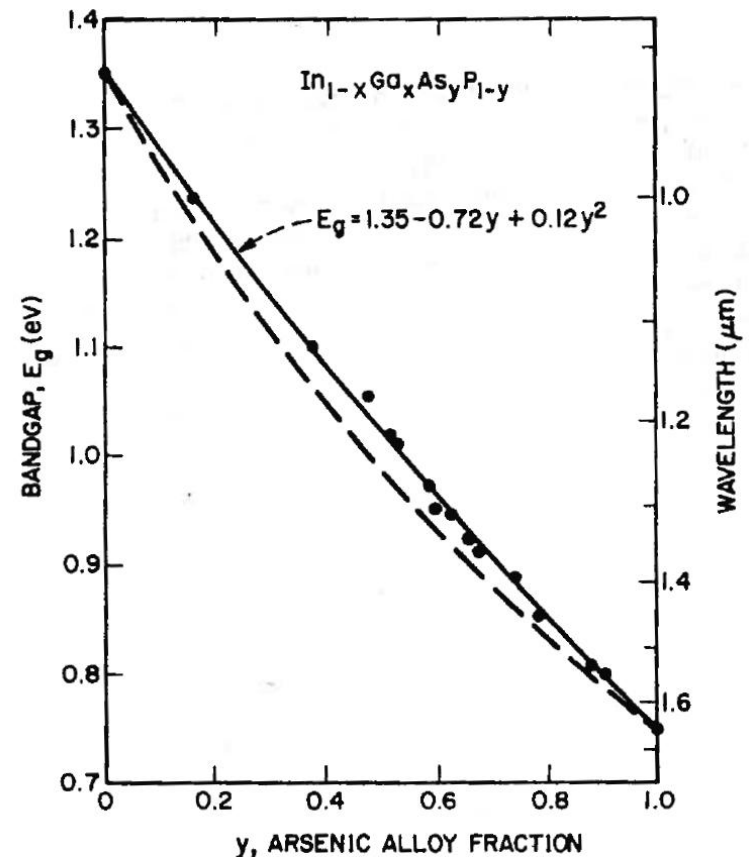
$$x = \frac{0.4526 \cdot y}{1 - 0.031 \cdot y}$$

- $E_g$  (in **eV**)

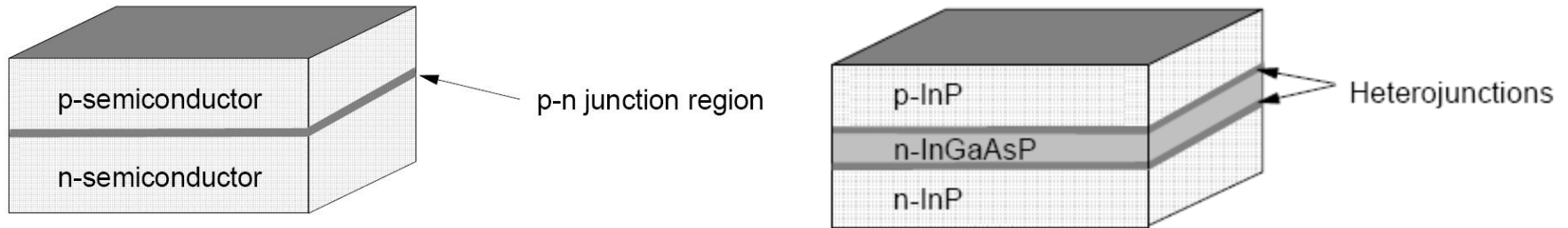
$$E_g = 1.35 - 0.72 \cdot y + 0.12 \cdot y^2$$

- Exemplu: 1300nm se obtine cu  $y=0.611$  si  $x=0.282$ ,

- $\text{In}_{0.282}\text{Ga}_{0.718}\text{As}_{0.611}\text{P}_{0.389}$

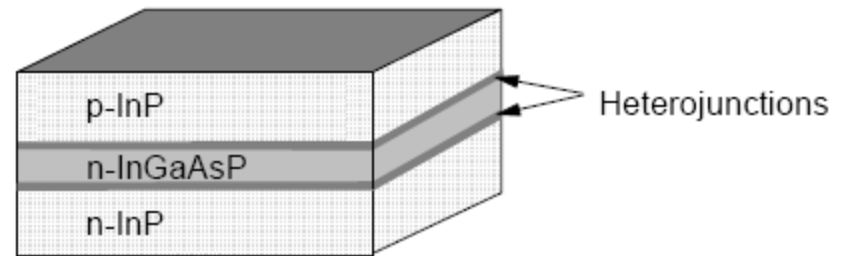
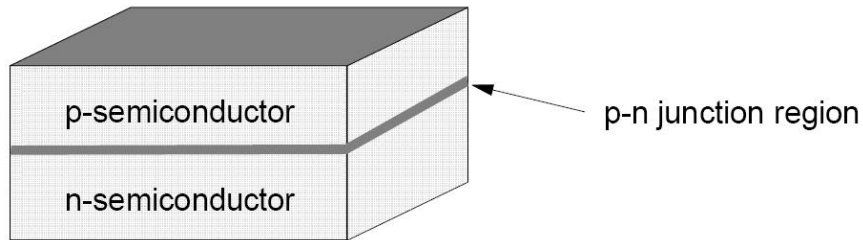


# LED cu heterojunțiuni – principiu

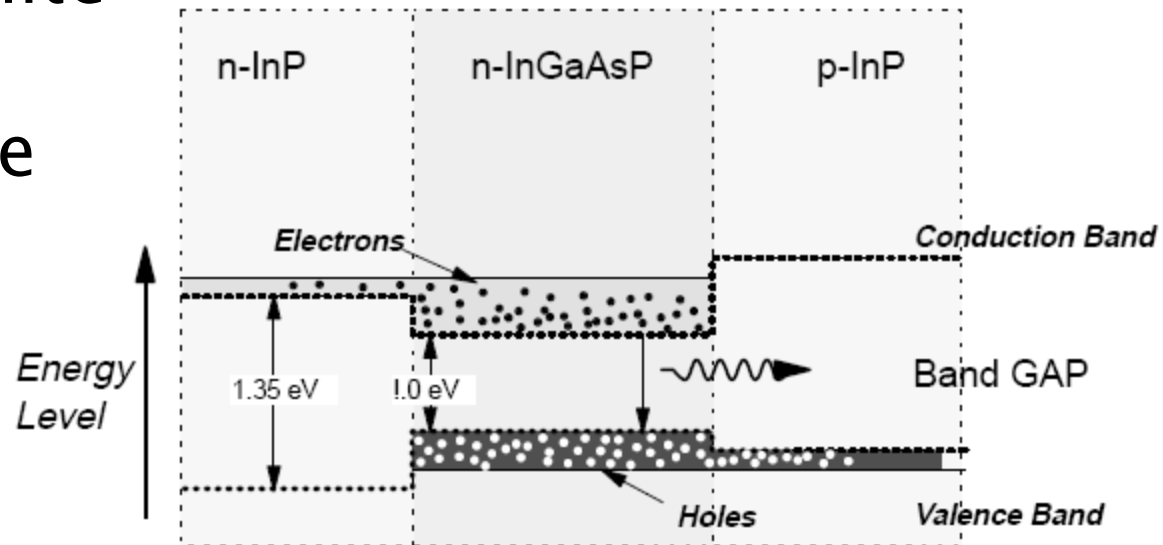


- ▶ **Orice** jonctiune p–n emite lumina
- ▶ O jonctiune p–n obisnuita este foarte subtire
  - volumul in care apar recombinari este foarte mic
  - eficienta luminoasa, redusa
- ▶ lumina este emisa in toate directiile
  - cantitatea de lumina utilizabila (intr–o anumita directie) este redusa

# LED cu heterojunțiuni – principiu



- ▶ Structura de nivele energetice permite capturarea purtătorilor între cele două heterojunțiuni



# Emisia luminii spre exterior

- ▶ Indici de refractie ridicati
  - InP  $n=3.4$
  - GaAs  $n=3.6$
- ▶ Doua probleme generate
  - pierderi prin reflexie ridicate
  - unghi critic de numai  $\sim 15^\circ$

# Emisia luminii spre exterior

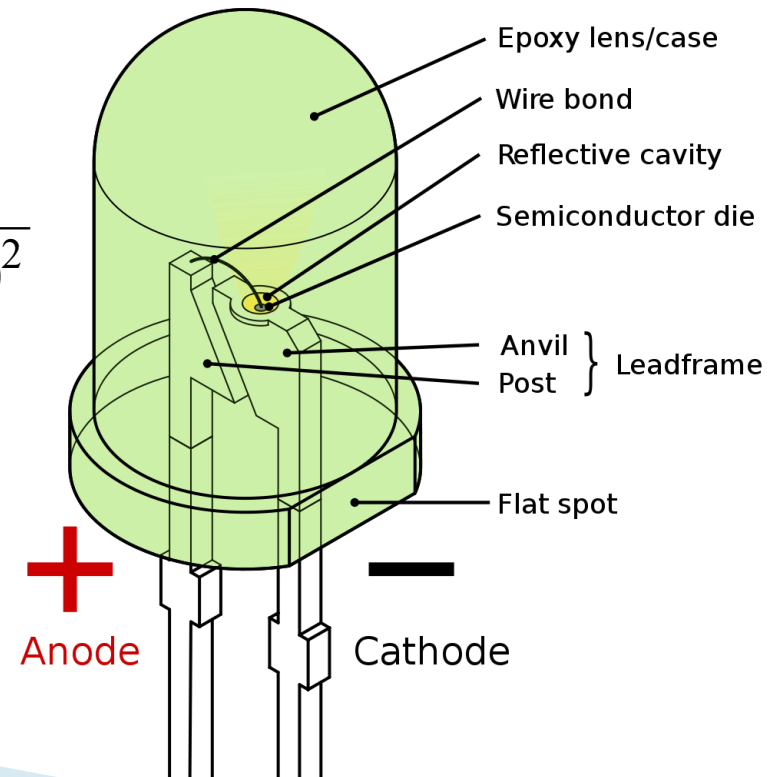
## ▶ Solutii

- utilizarea unui material intermediar pentru adaptarea indicelui de refractie (rasina epoxidica)
- adaptarea formei de iesire din dispozitiv – forma de dom

- eficienta de cuplaj :

interfata plana  
semiconductor  
aer  $\frac{1}{n \cdot (n+1)^2}$

dom  $\frac{2n}{(n+1)^2}$



# Directivitatea radiatiei exterioare

- ▶ Sursa lambertiana

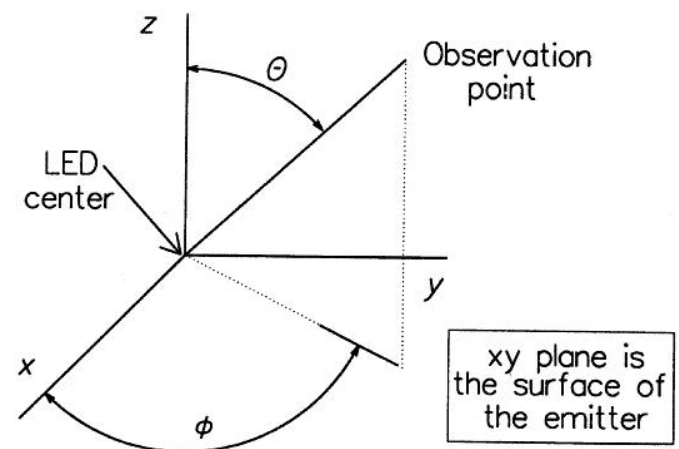
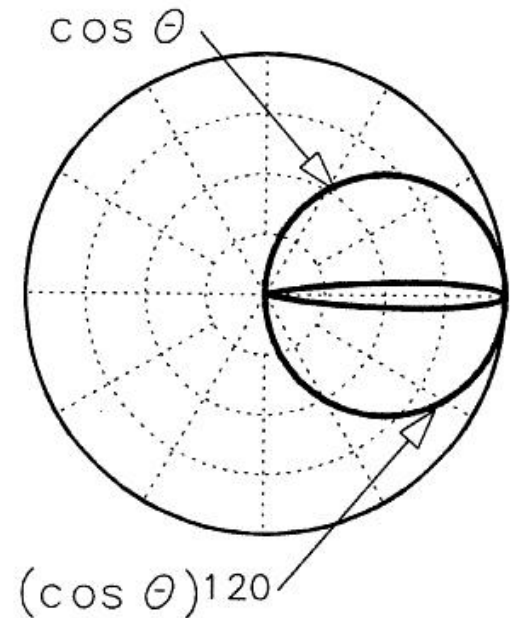
$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos \theta$$

- ▶ Aproximatie Lambertiana pentru surse cu directivitate crescuta

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

- ▶ Surse cu emisie asimetrica

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



# Directivitatea radiatiei exterioare

## ▶ SLED

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

## ▶ ELED

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

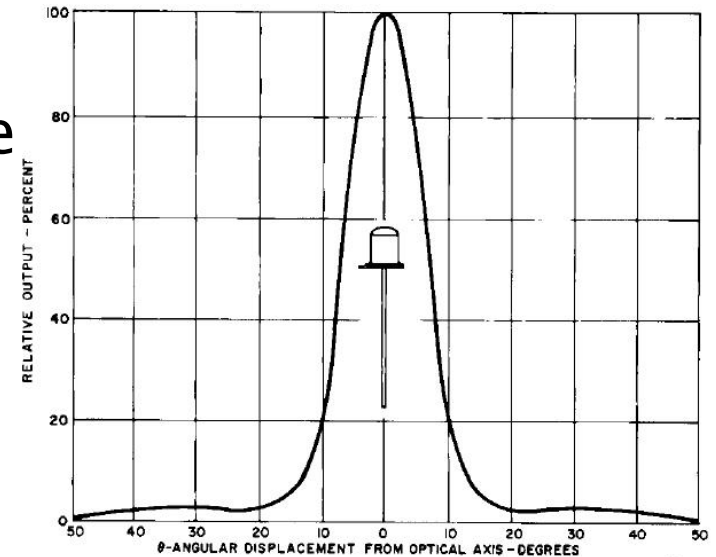
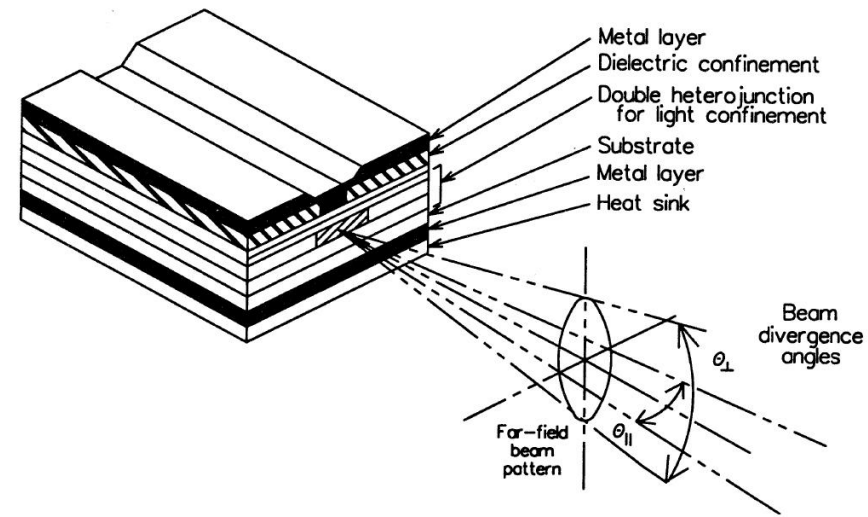


Fig. 5. Typical Radiation Pattern

ST1054



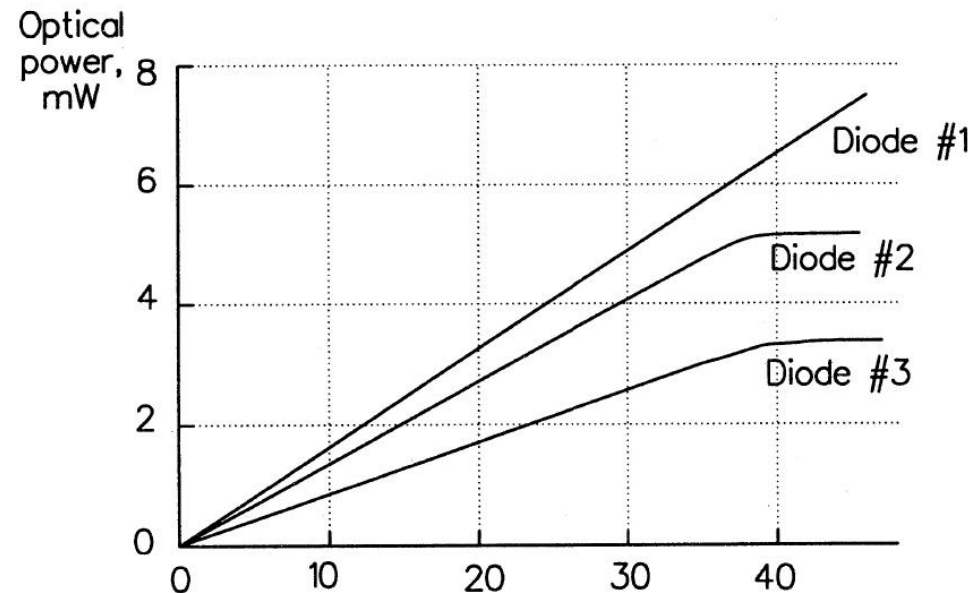
# Caracteristica de raspuns a LED-urilor

- ▶ 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  $r = 50 \mu\text{W}/\text{mA}$



**Continuare**



# Aplicatii majore LED

## ▶ Comunicatii

- Infrarosu (InGaAsP)

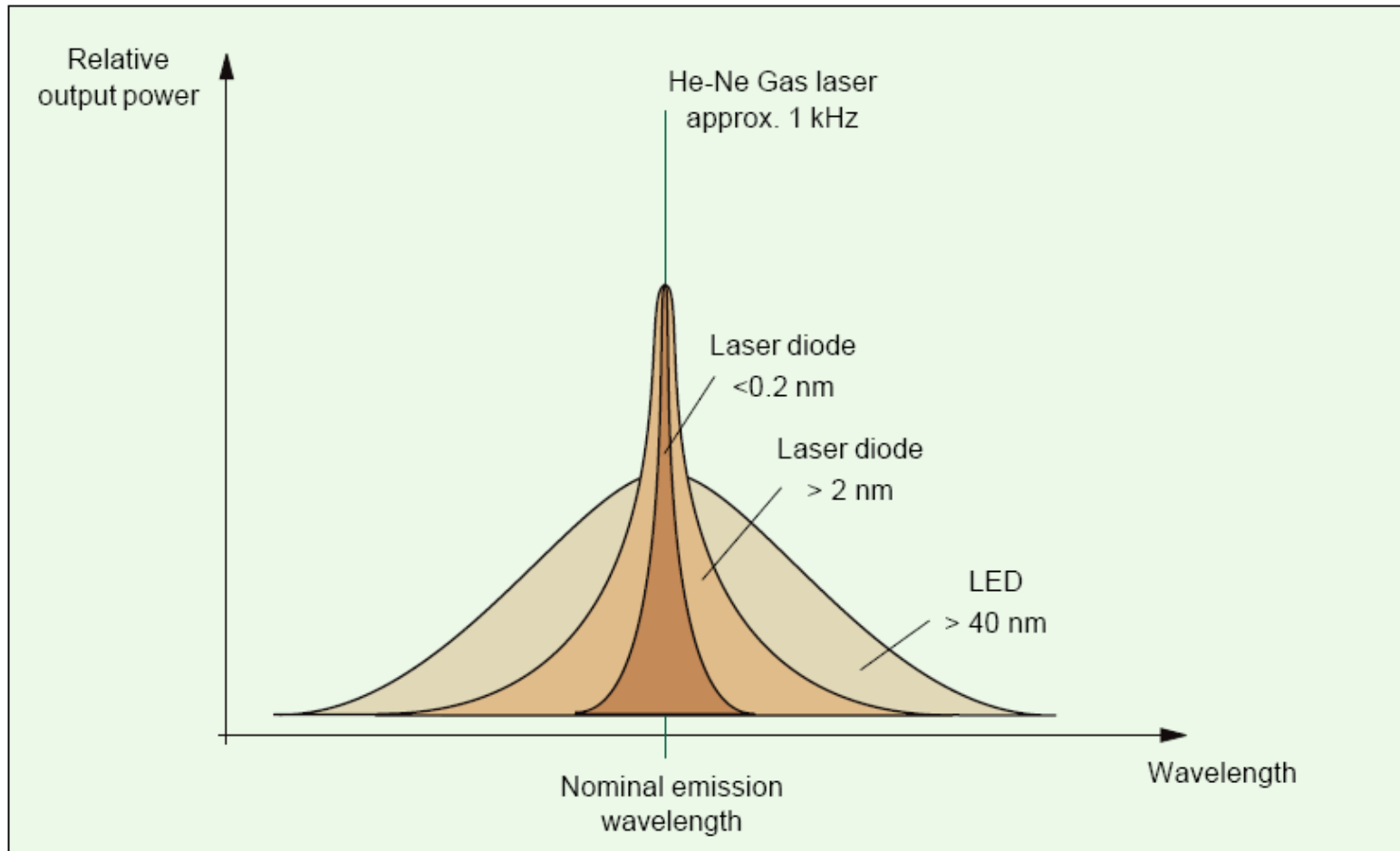
## ▶ Vizibil

- Spectru vizibil (GaAlAs)

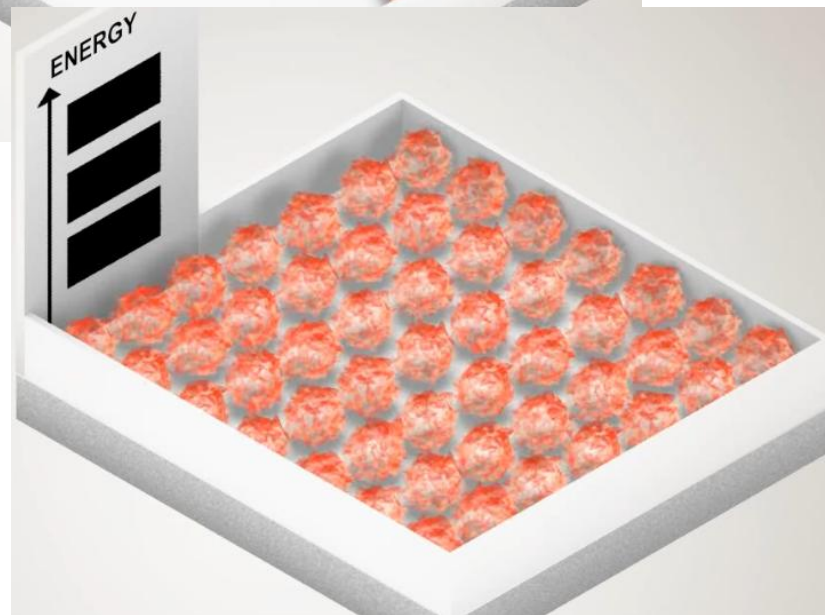
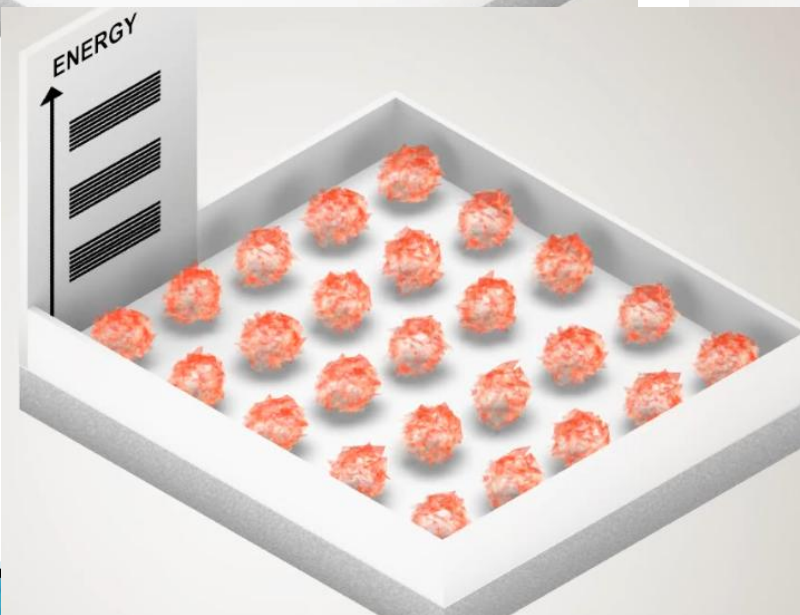
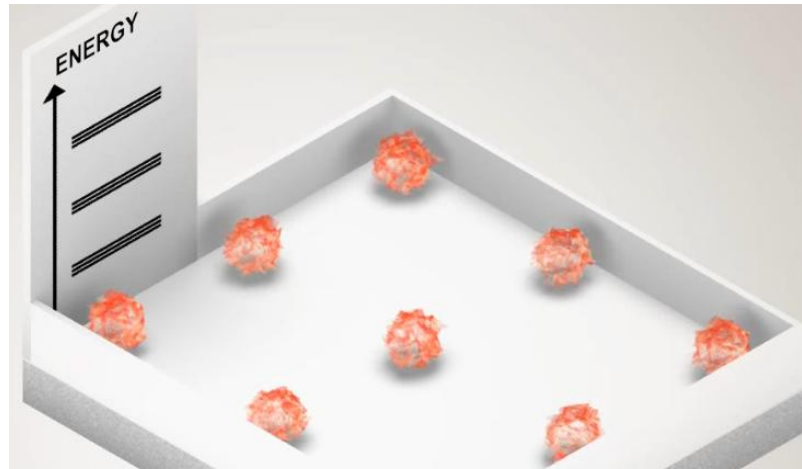
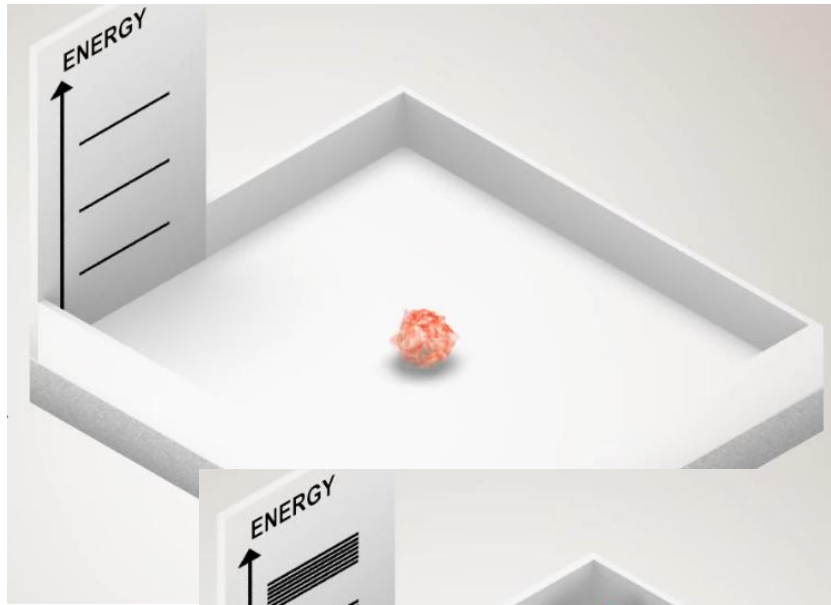
## ▶ Iluminare

- Putere ridicata, lumina alba (GaInN)

# Calitatea spectrală a emițătorilor optici

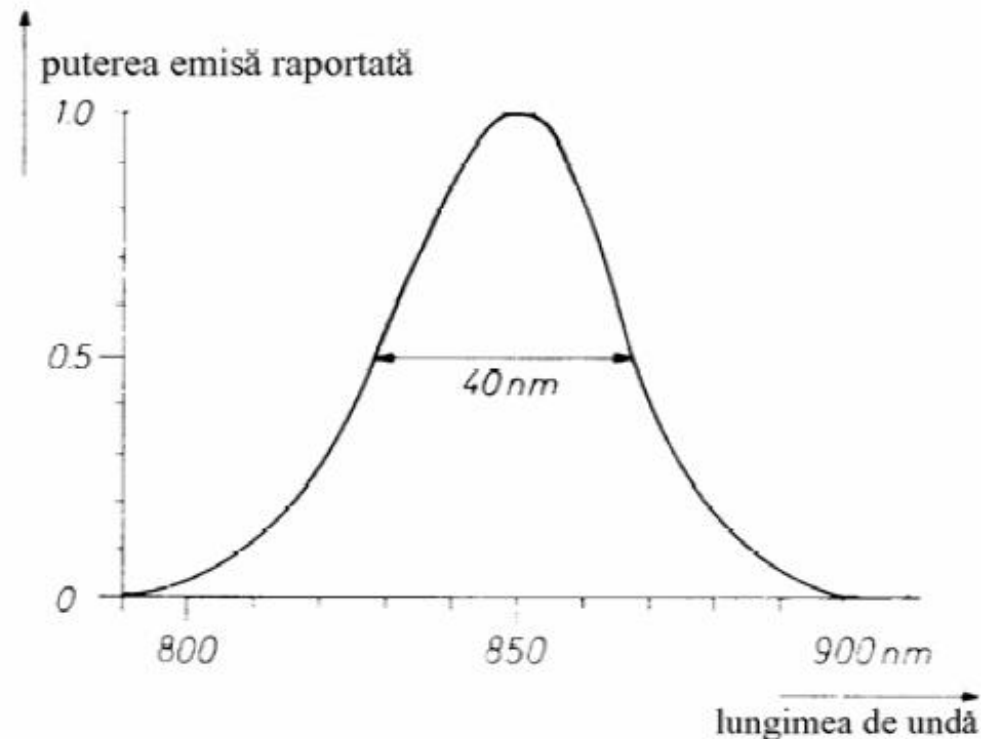


# Benzi energetice



# Latimea spectrala a LED-urilor

- ▶ Aproximativ  $\Delta\lambda \approx 0.05\lambda$
- ▶ Relatie empirica  $\Delta\lambda[\mu m] \approx 1.45\lambda^2[\mu m] \cdot (kT)[eV]$
- ▶ Tipic
  - GaAlAs – 20–40 nm
  - InGaAsP
    - SLED – 100 nm
    - ELED – 60–80 nm
  - GaInN – 30–40 nm (10%)



# Comportare dinamica a LED

- ▶ Puterea de iesire la modulatia cu un semnal sinusoidal cu  $\omega$

$$P_{out} = \frac{P_o}{1 + \omega^2 \tau_{lf}^2}$$

- Puterea electrica variaza proportional cu patratul curentului
- Puterea optica variaza proportional cu curentul
- ▶ Banda la 3 dB electrica

$$\frac{P_{out}^2}{P_o^2} = \frac{1}{2}$$

$$f_{3dB-el} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_{lf}}$$

- Banda la 3 dB optic

$$\frac{P_{out}}{P_o} = \frac{1}{2}$$

# Comportare dinamica a LED

- ▶ Cand curentul care trece prin dispozitiv e mic timpul de viata al purtatorilor e independent de curent si este dependent liniar de nivelul de dopare in regiunea activa
- ▶ Cand curentul este mare timpul de viata al purtatorilor este proportional cu  $\sqrt{d}$  si invers proportional cu  $\sqrt{J}$
- ▶ **Banda poate fi crescuta**
  - Crescand nivelul de dopare
  - Reducand inaltimea zonei active
  - Crescand densitatea de curent

# Comportare dinamica a LED

- ▶ In domeniul timp
- ▶ Timpul de crestere (rise time)

$$t_r = 2.20 \cdot \left( \frac{2 \cdot k \cdot T \cdot C_s}{e \cdot I_p} + \tau_{lf} \right)$$

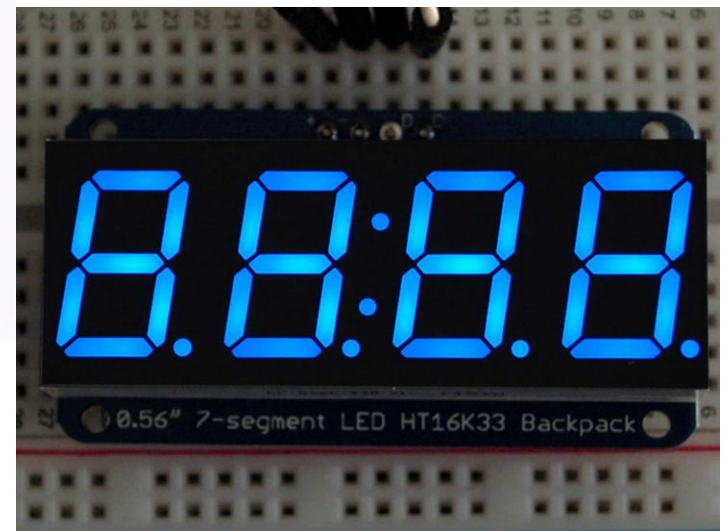
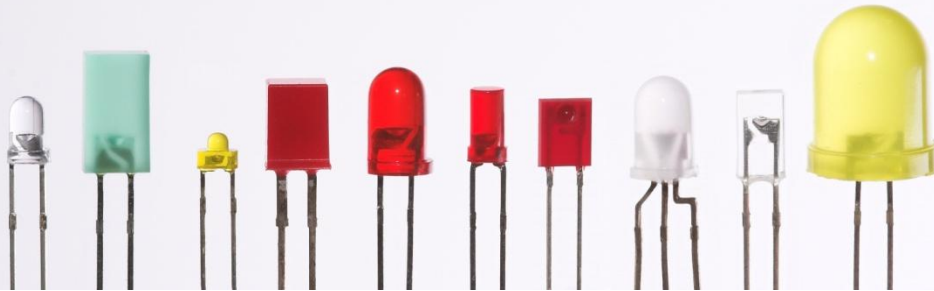
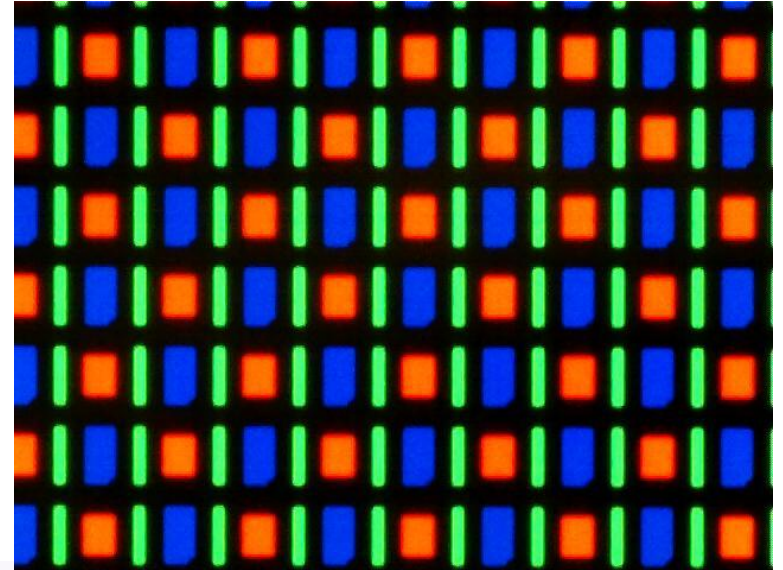
- ▶ Capacitatea asociata sarcinilor in regiunea activa: 350 ÷ 1000pF
- ▶ Produs Putere × Banda

$$P \times \Delta f = \frac{h \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot e \cdot \lambda} \cdot \frac{J}{\tau_{lf}}$$

# Aplicatii majore LED

- ▶ Comunicatii
  - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
  - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
  - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)

# Aplicatii in spectru vizibil



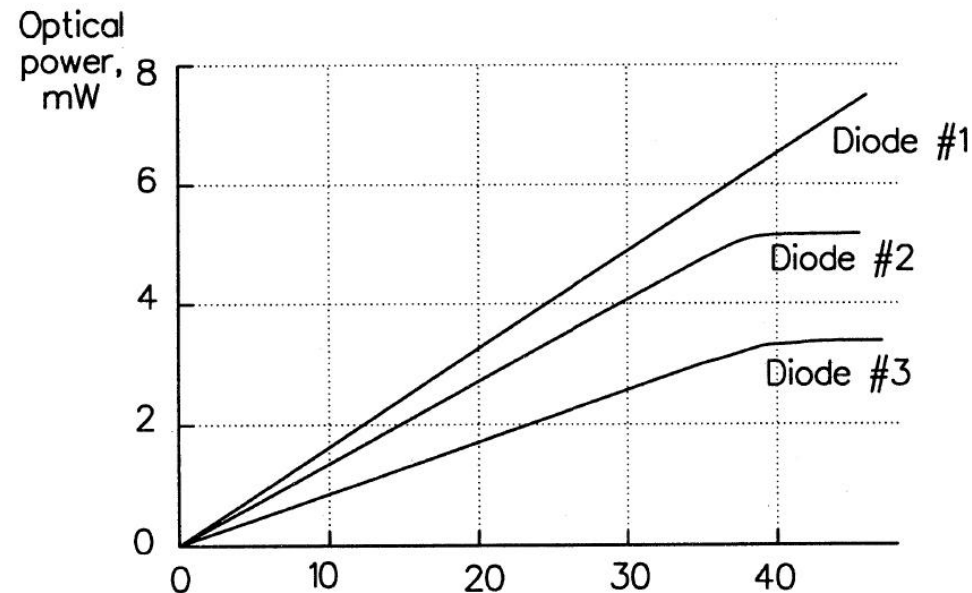
# Caracteristica de raspuns a LED-urilor

- ▶ 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

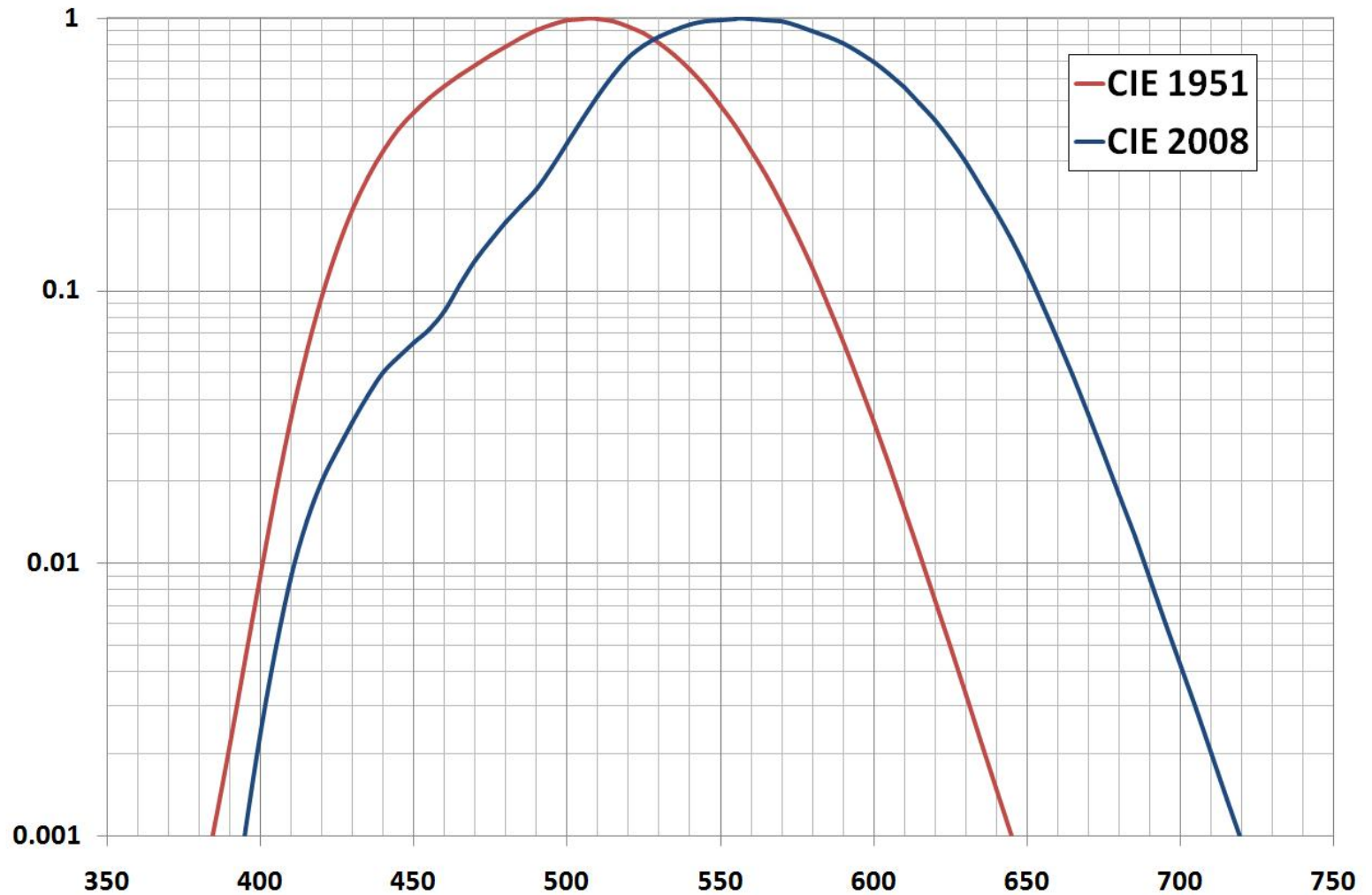
- ▶ Responzivitatea

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

- ▶ Tipic  $r = 50 \mu\text{W}/\text{mA}$

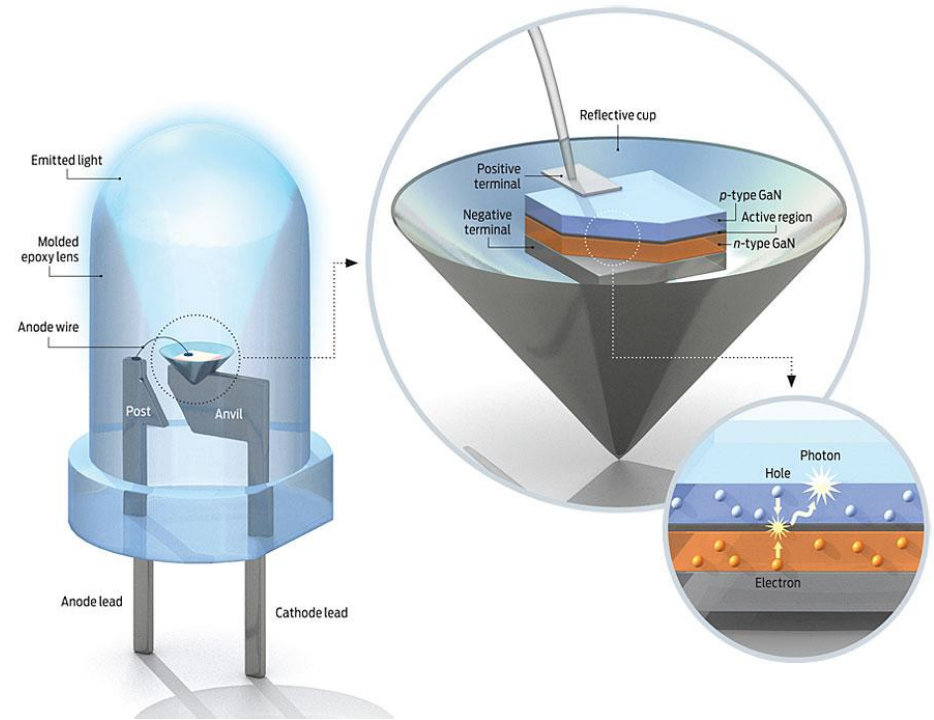
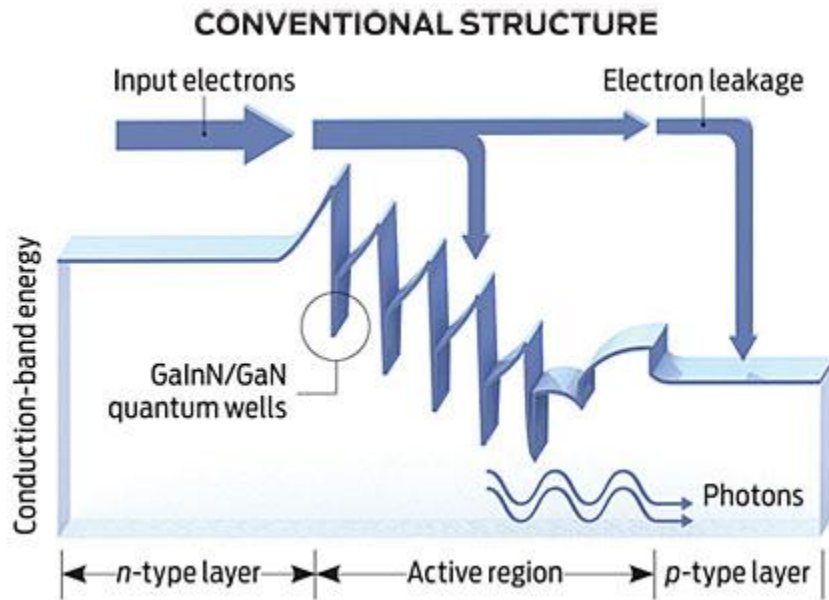


# CIE $V(\lambda)$ fotopic / scotopic



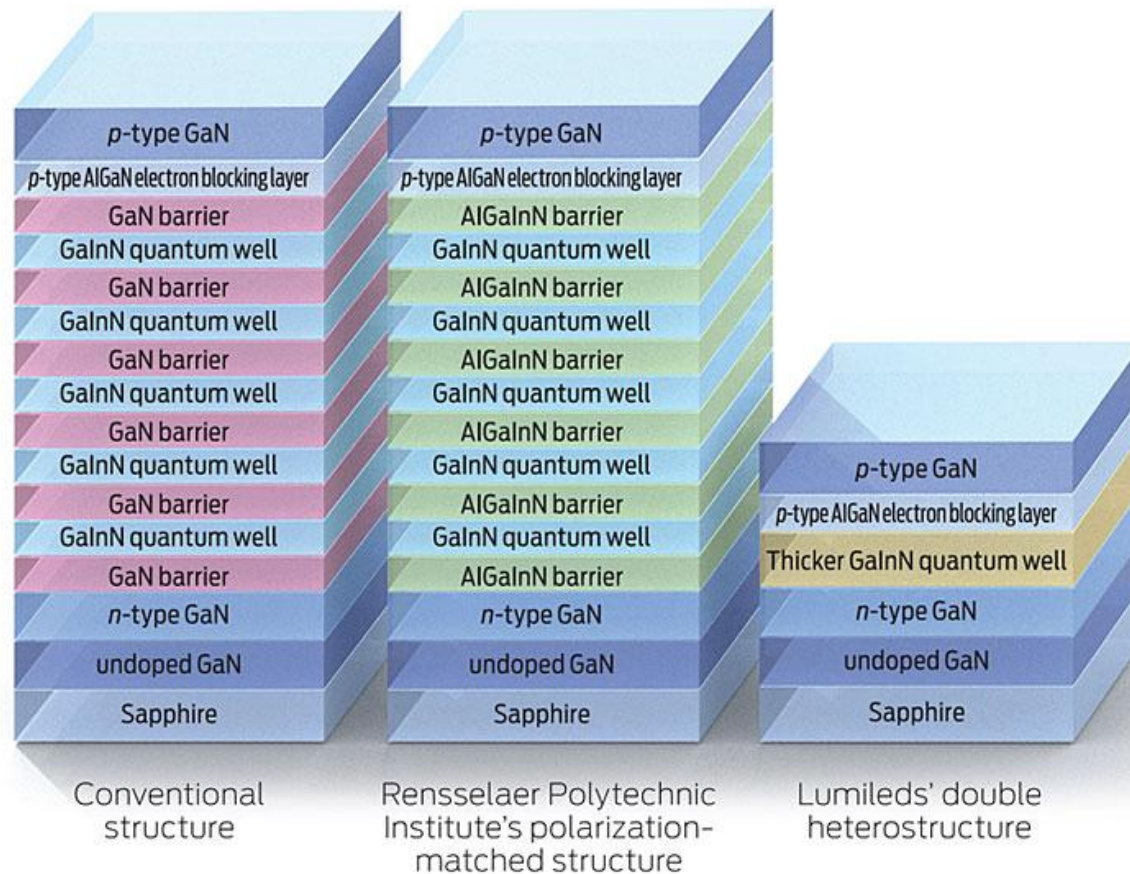
# LED albastru

- ▶ bazat pe GaInN
- ▶ dezvoltare tardiva (GaN)



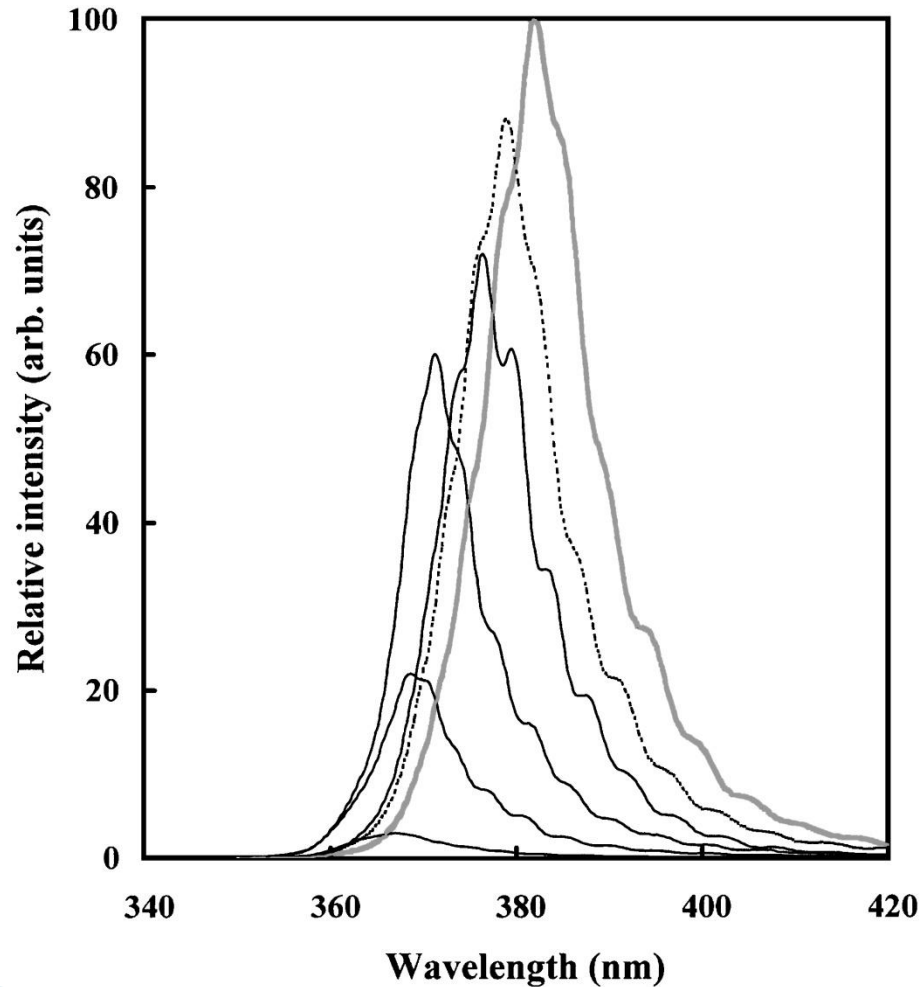
# LED albastru

- ▶ realizare: GaInN Quantum Well/GaN

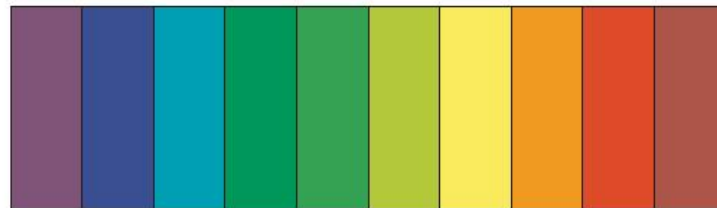
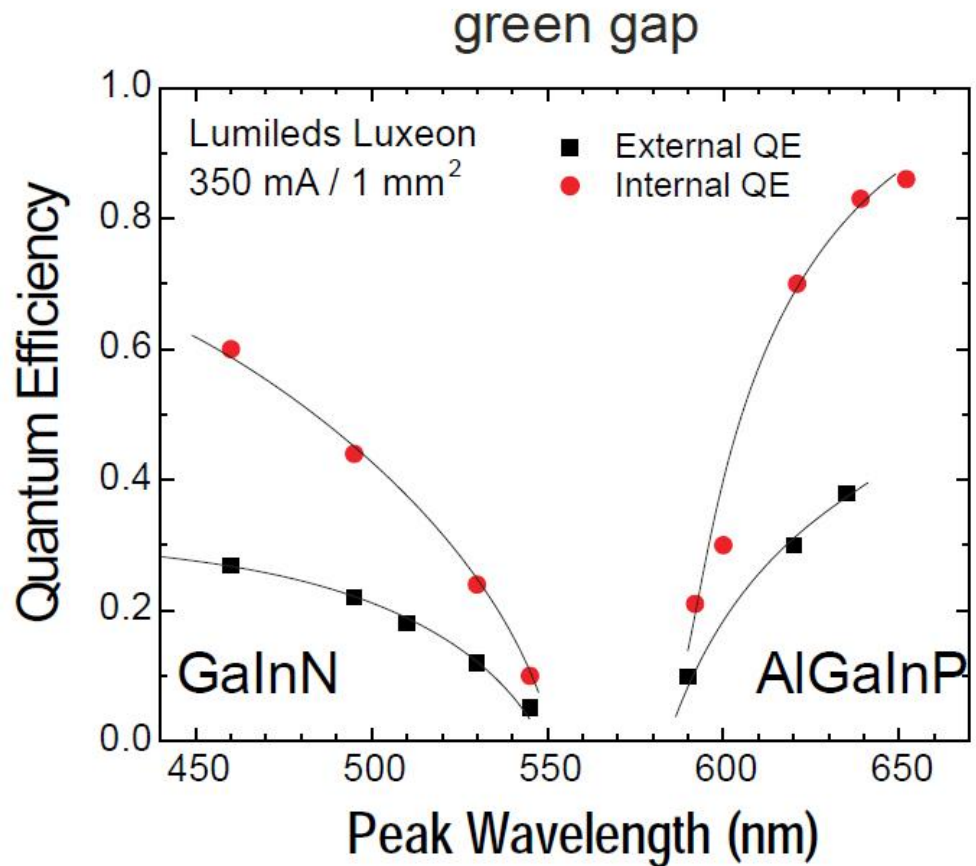


# Spectru LED albastru

- ▶  $\Delta\lambda$  relativ la  $\lambda$  mai mare



# Eficiencia cuantica




# Culori/materiale - 1

Color	Wavelength (nm)	Voltage (V)	Semiconductor Material
Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)

# Culori/materialiale – 2

Color	Wavelength (nm)	Voltage (V)	Semiconductor Material
Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate — (under development)
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
Purple	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) Boron nitride (215 nm) Aluminium nitride (AlN) (210 nm) Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN) — (down to 210 nm)
White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

# Denumiri tipice – LED



Wavelength (nm)	Color Name
940	Infrared
880	Infrared
850	Infrared
660	Ultra Red
635	High Eff. Red
633	Super Red
620	Super Orange
612	Super Orange
605	Orange
595	Super Yellow
592	Super Pure Yellow
585	Yellow
4500K	"Incandescent" White
6500K	Pale White
8000K	Cool White
574	Super Lime Yellow
570	Super Lime Green
565	High Efficiency Green
560	Super Pure Green
555	Pure Green
525	Aqua Green
505	Blue Green
470	Super Blue
430	Ultra Blue

# Aplicatii majore LED

- ▶ Comunicatii
  - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
  - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Illuminare
  - Putere ridicata, lumina alba (GaN)

# 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."

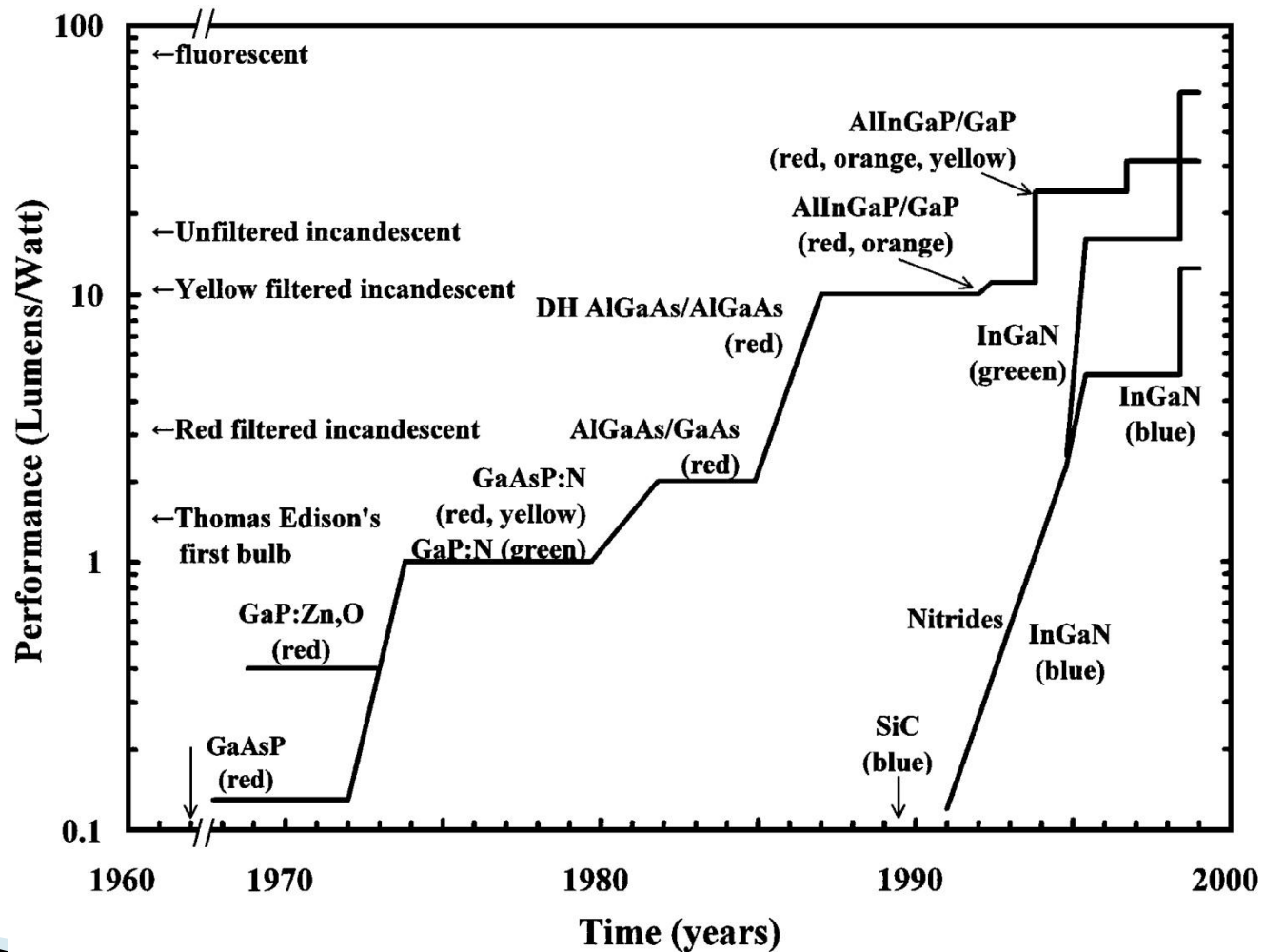
To cite this section

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

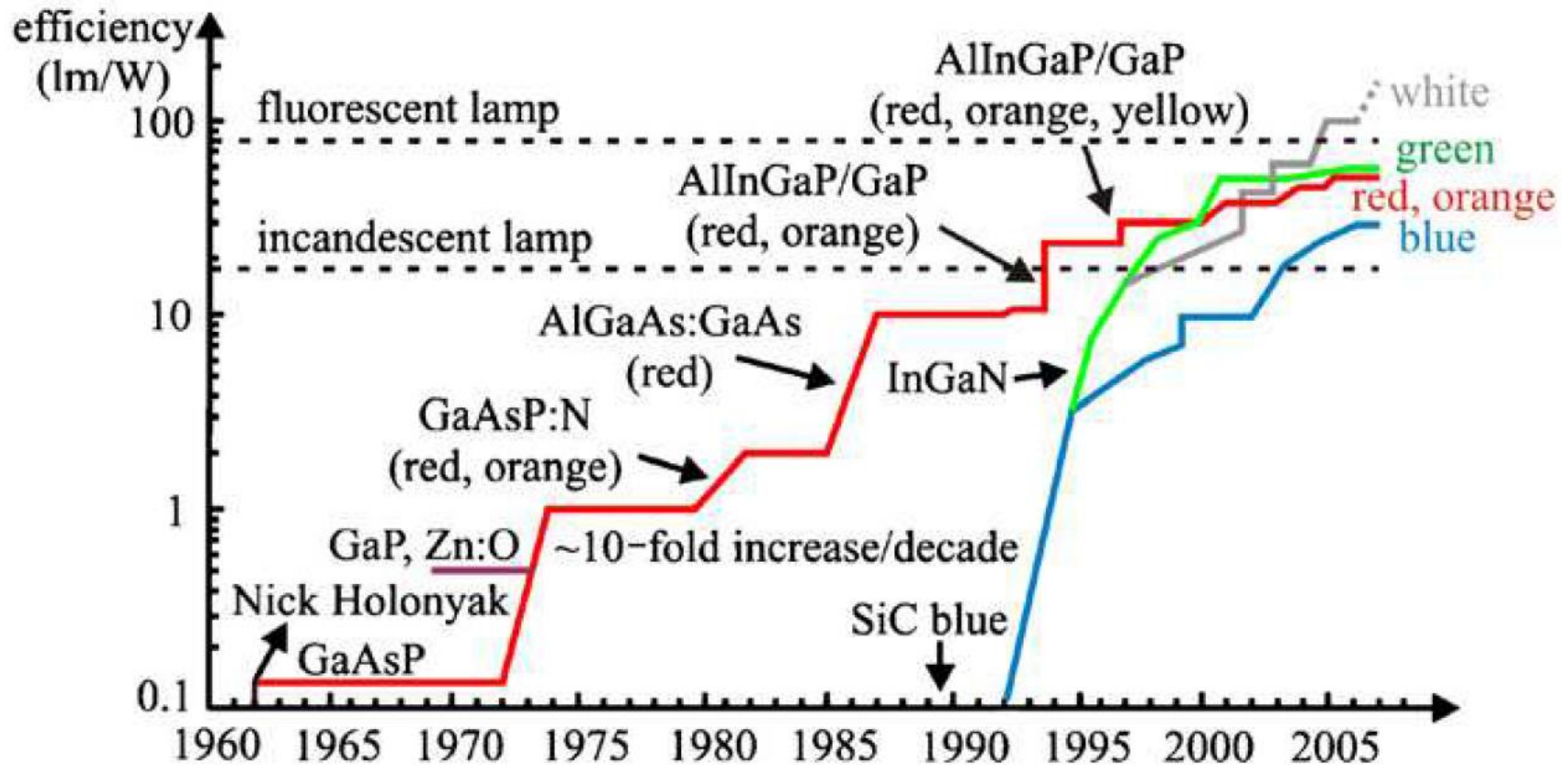
# Eficiența

- ▶ Bec cu incandescenta
  - 16 lm/W
- ▶ Tub fluorescent
  - 100 lm/W
- ▶ LED
  - curent: 250 lm/W
  - curand: 300 lm/W

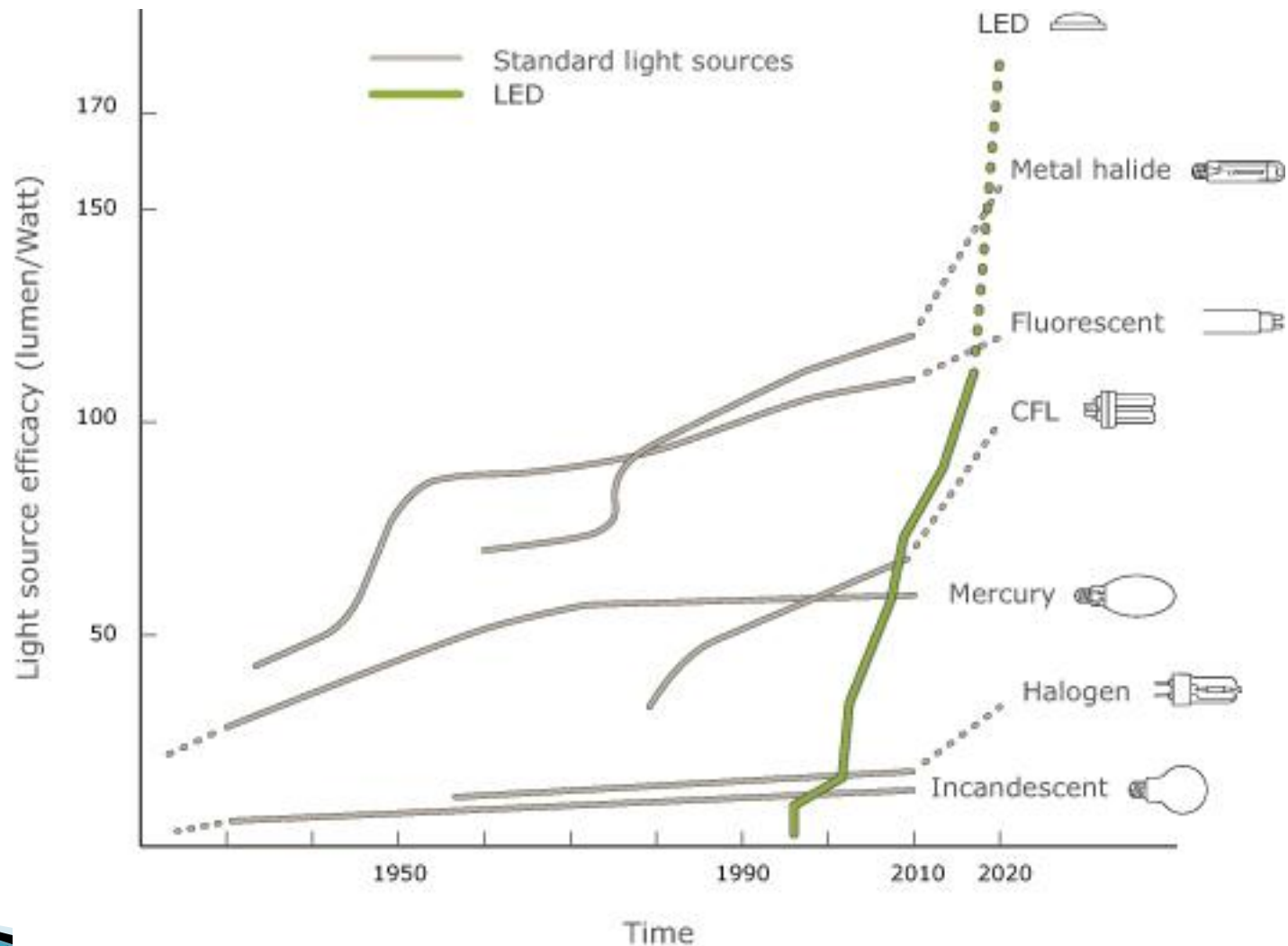
# Eficienta in timp



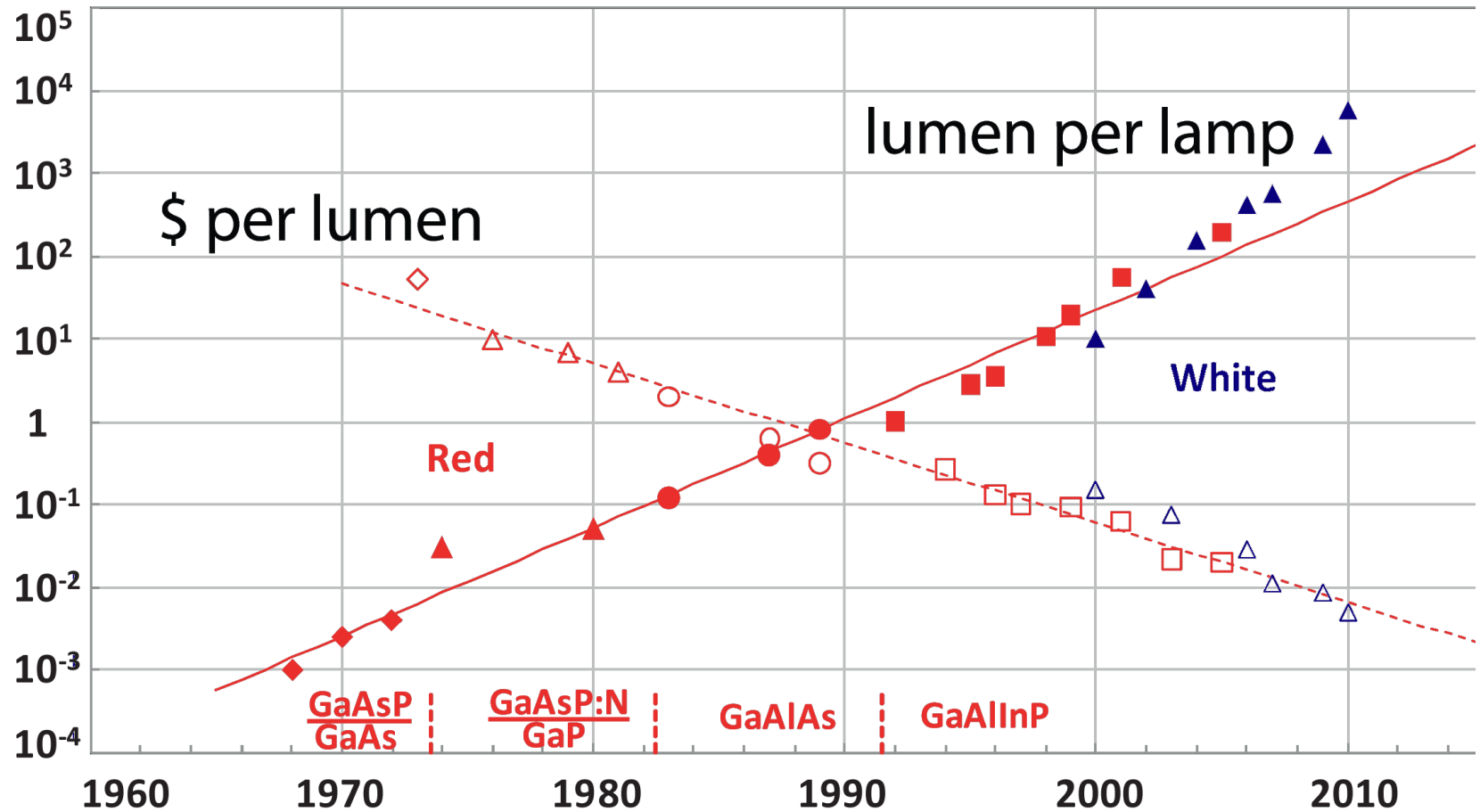
# Eficienta in timp



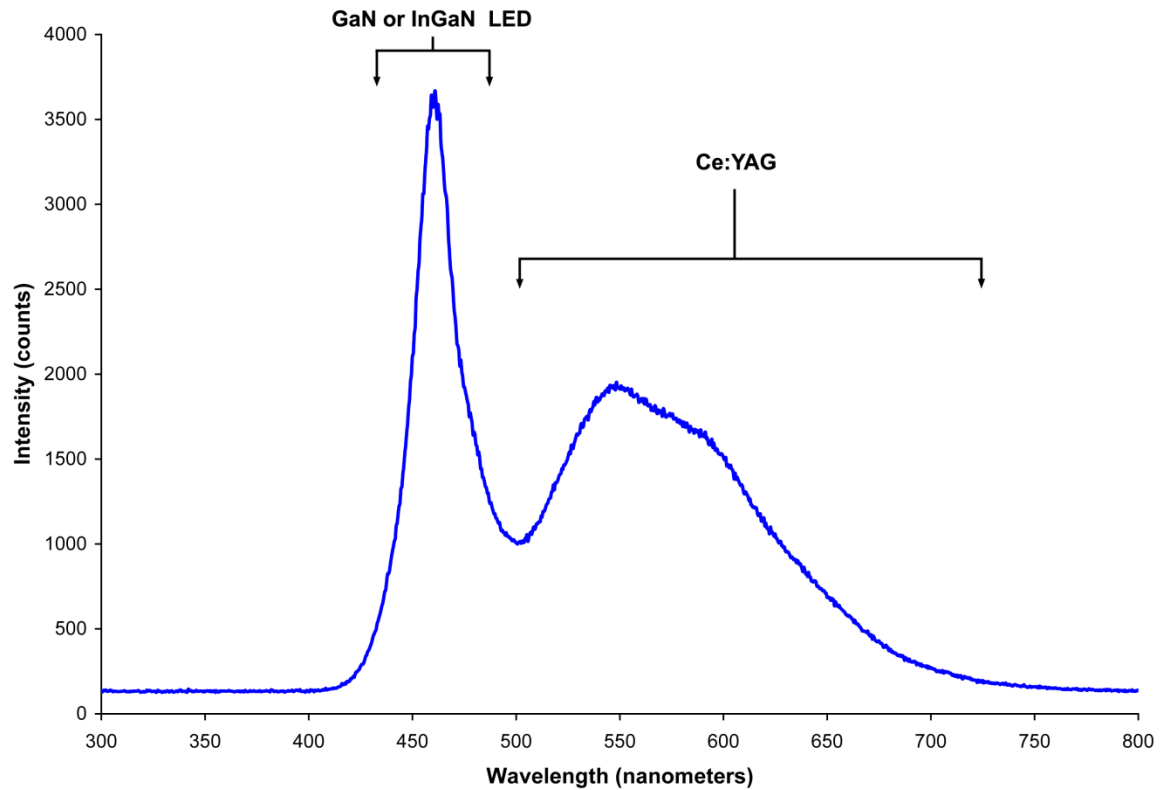
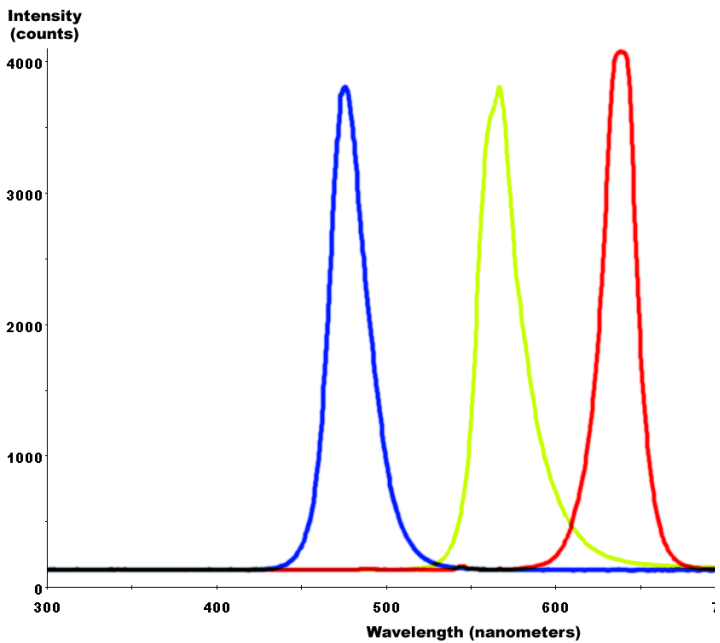
# Eficiența în timp



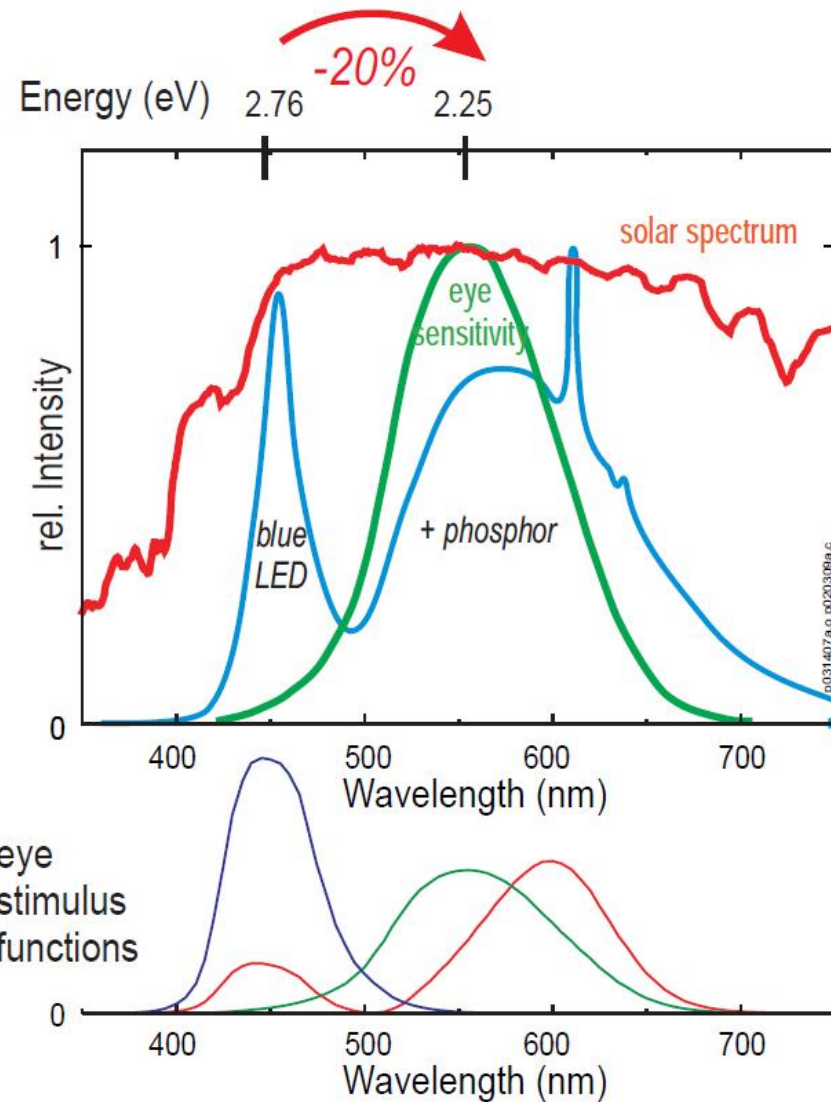
# Eficienta in timp



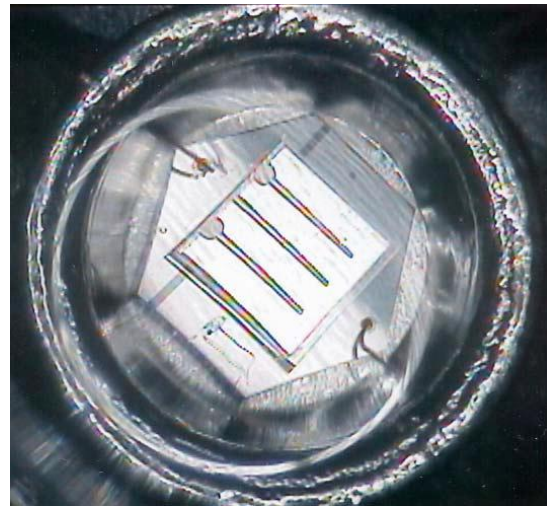
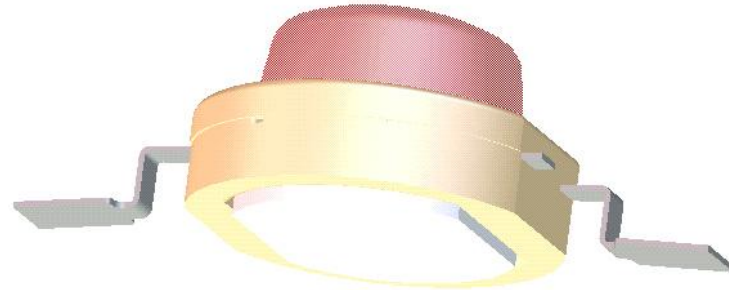
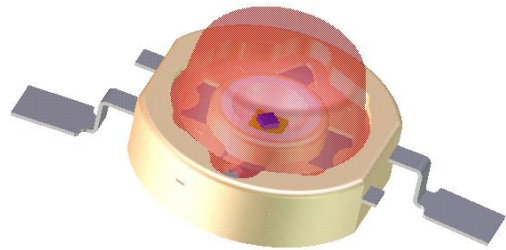
# Culoare alba



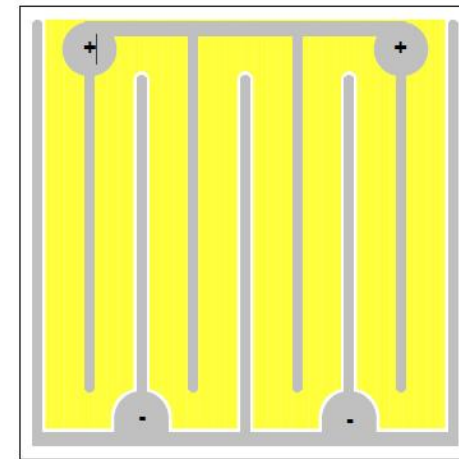
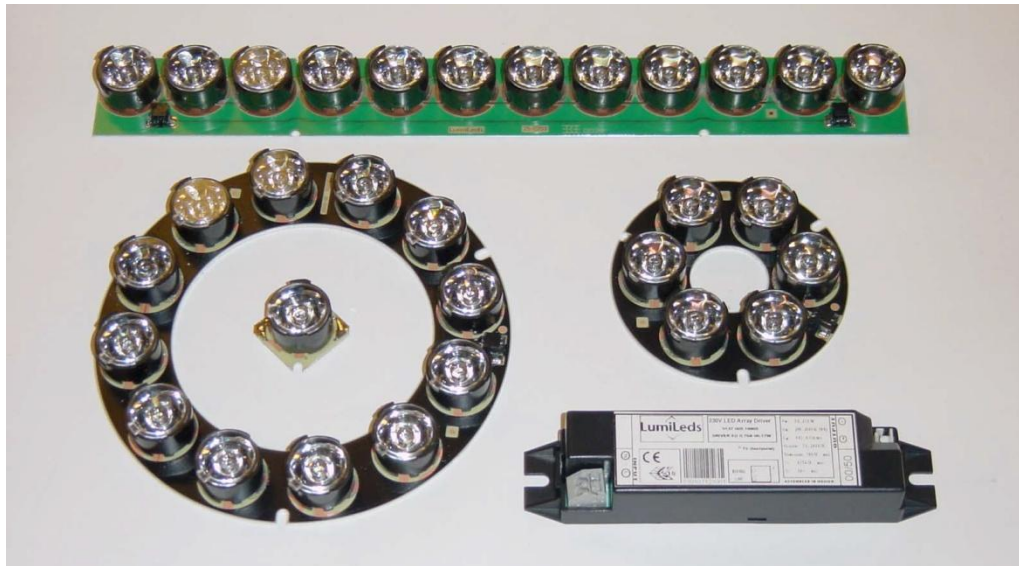
# Fosfor activat de LED albastru/UV



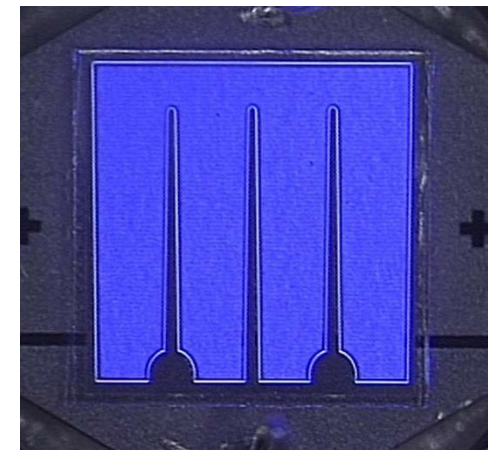
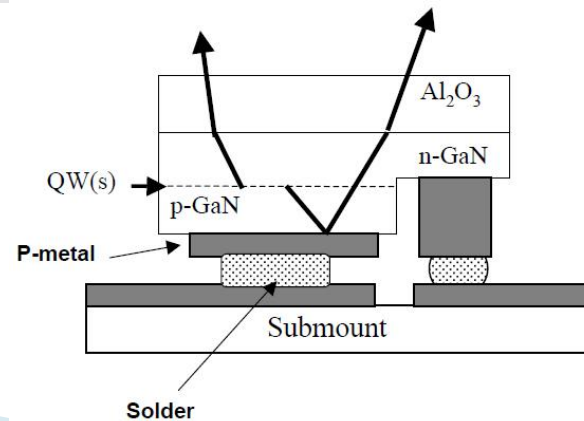
# Realizare LED de putere



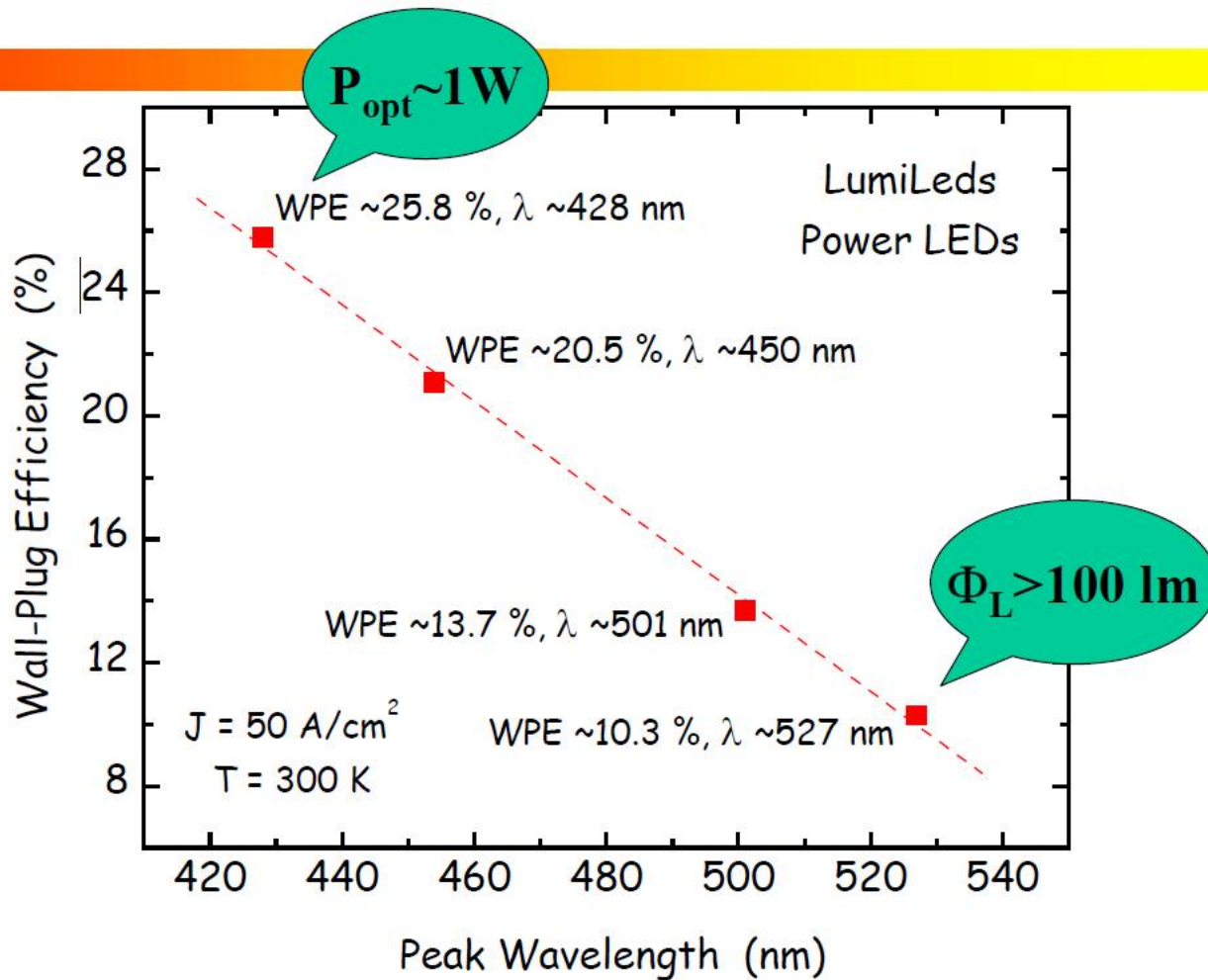
# Realizare LED de putere



$A_{\text{chip}} \sim 1 \times 1 \text{ mm}^2$ ;  $N = 4$



# Performanta



# Aplicatii

## ▶ auto



# Aplicatii

- ▶ casnic

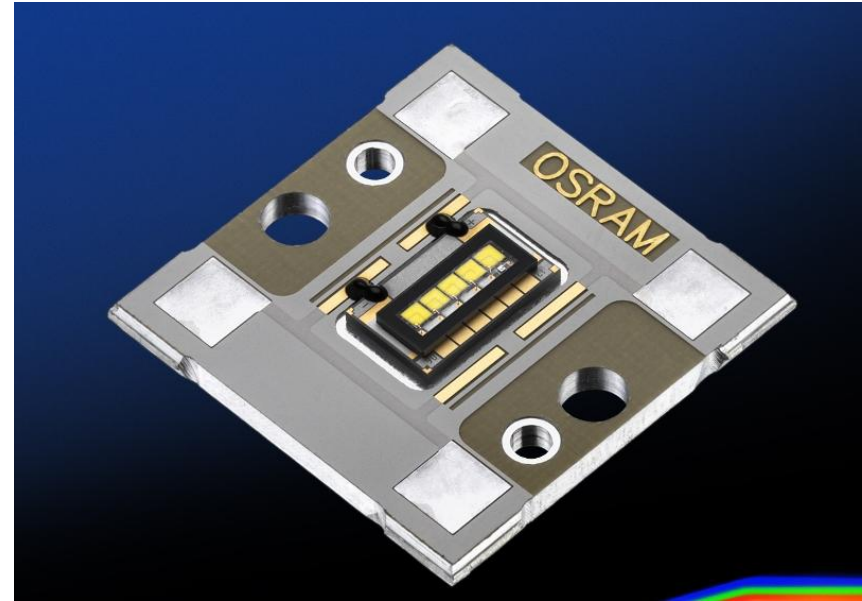


# Aplicatii

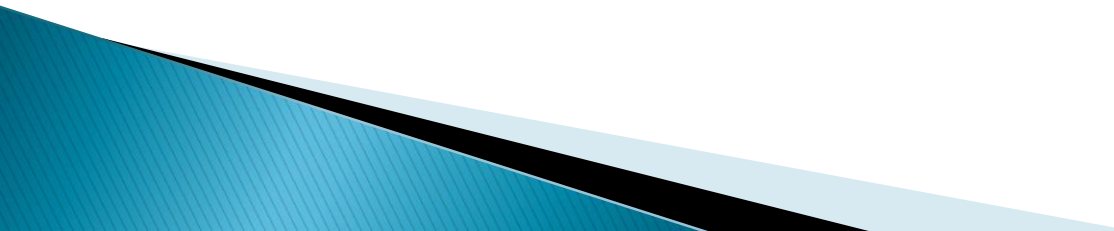
- ▶ iluminat public



# Aplicatii

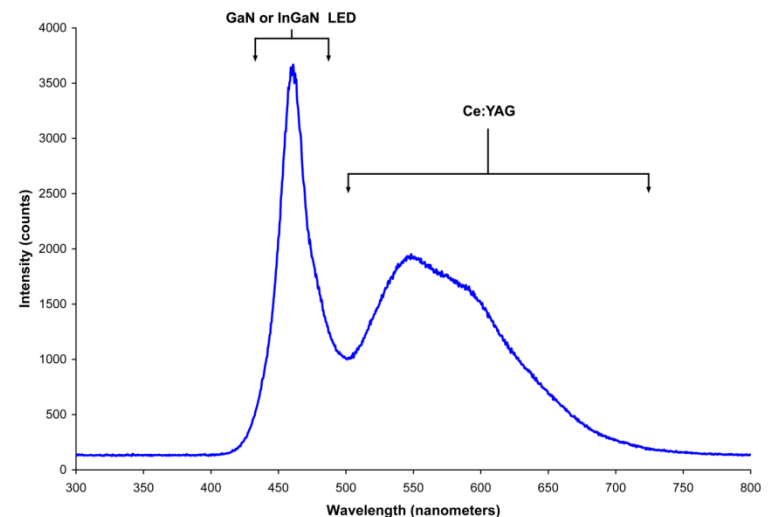
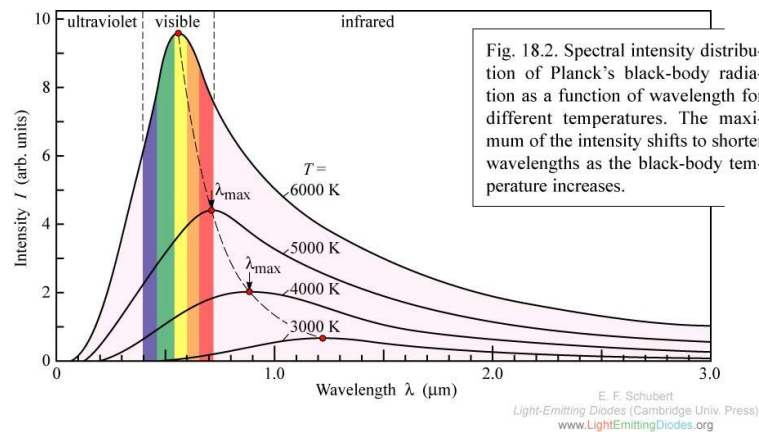


# Avantaje

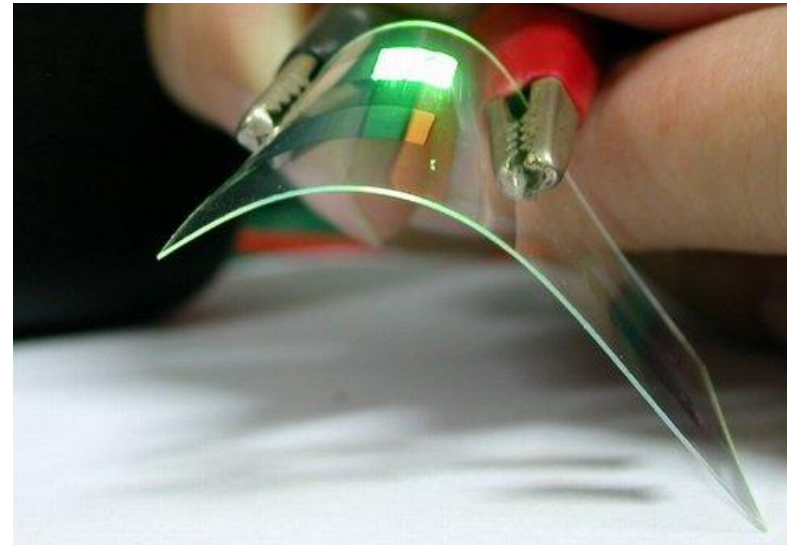
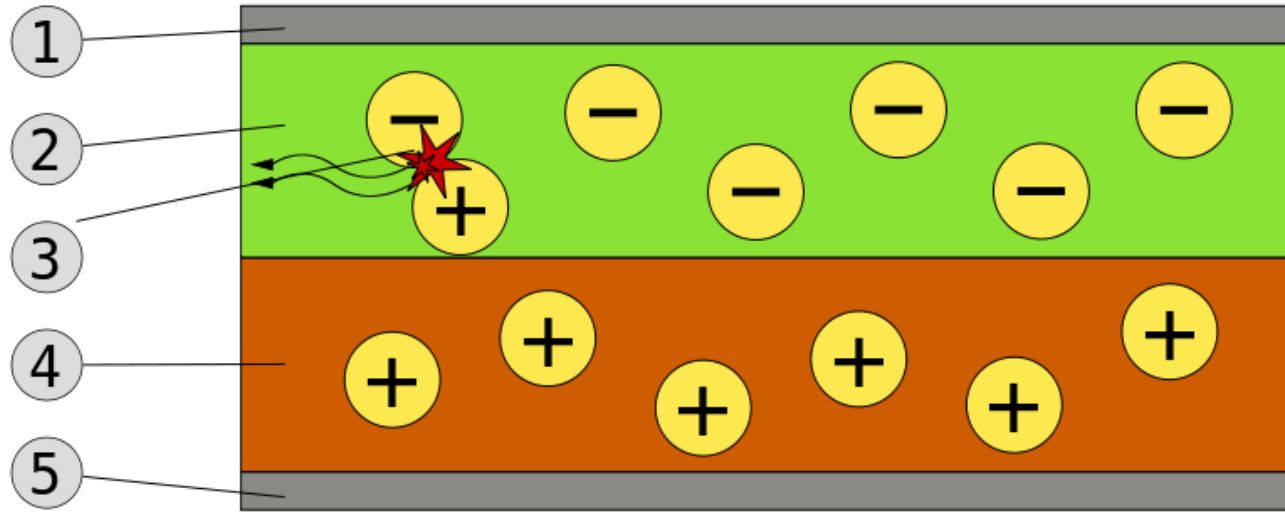
- ▶ Eficienta
  - ▶ Culoare usor de implementat (nativ)
  - ▶ Dimensiune
  - ▶ Timp de raspuns
  - ▶ Reglaj al intensitatii luminoase
  - ▶ Radiatie de caldura (IR) redusa
  - ▶ Timp de viata
  - ▶ Rezistenta la socuri
  - ▶ Directivitatea luminii (nativ)
- 

# Dezavantaje

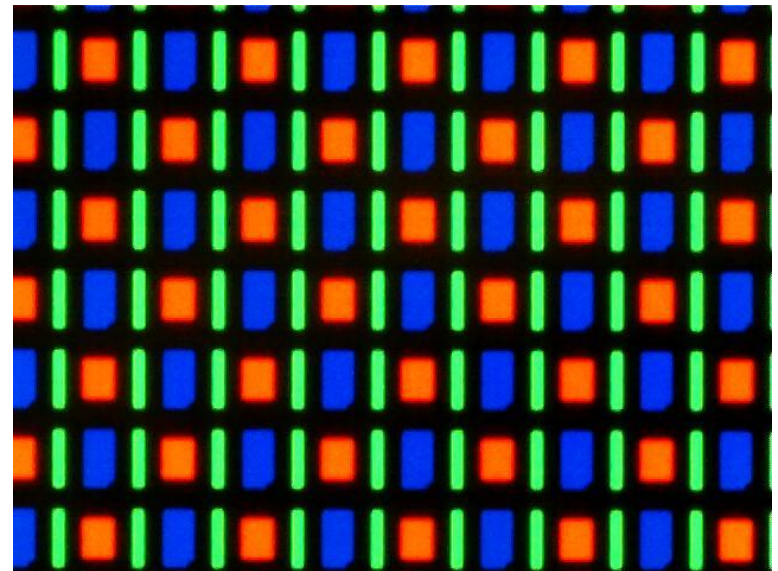
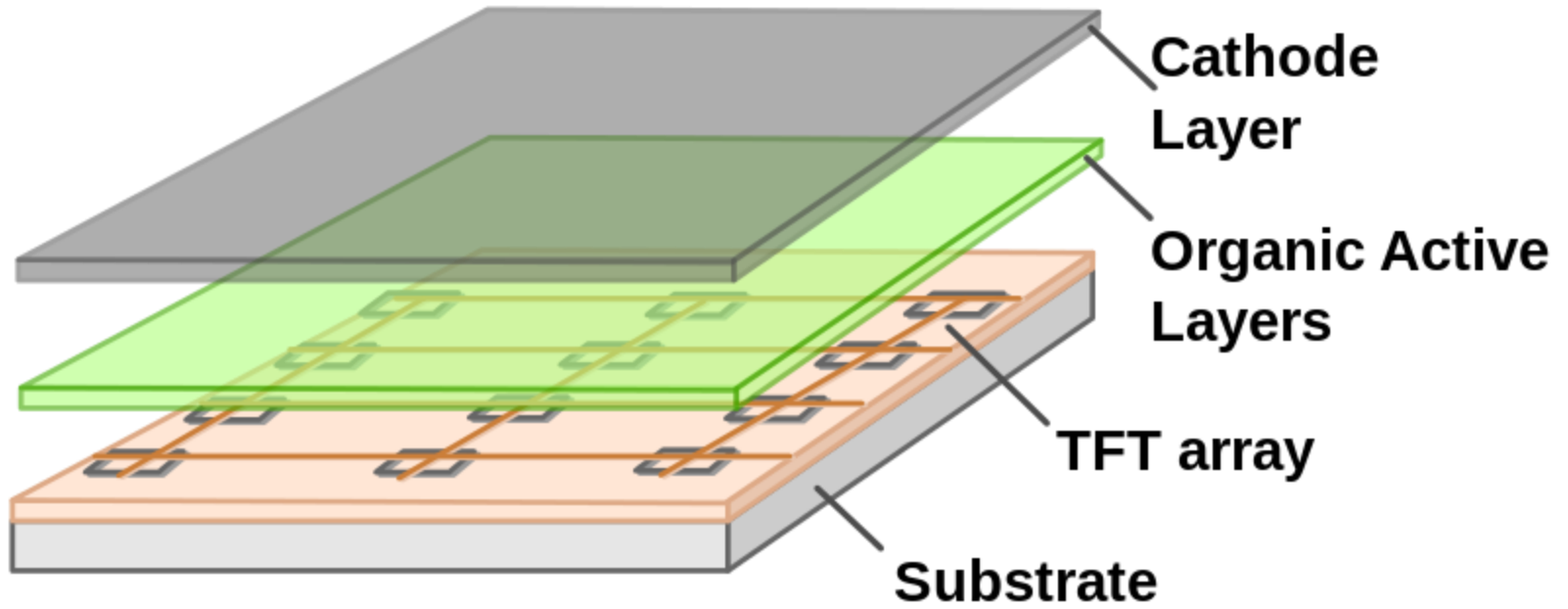
- ▶ Pret
- ▶ Dependenta de temperatura
- ▶ Sensibilitate la tensiune (prag)
- ▶ Calitatea luminii (corp negru)
- ▶ Directivitate (sursa de suprafata/punctuala)



# OLED



# AMOLED



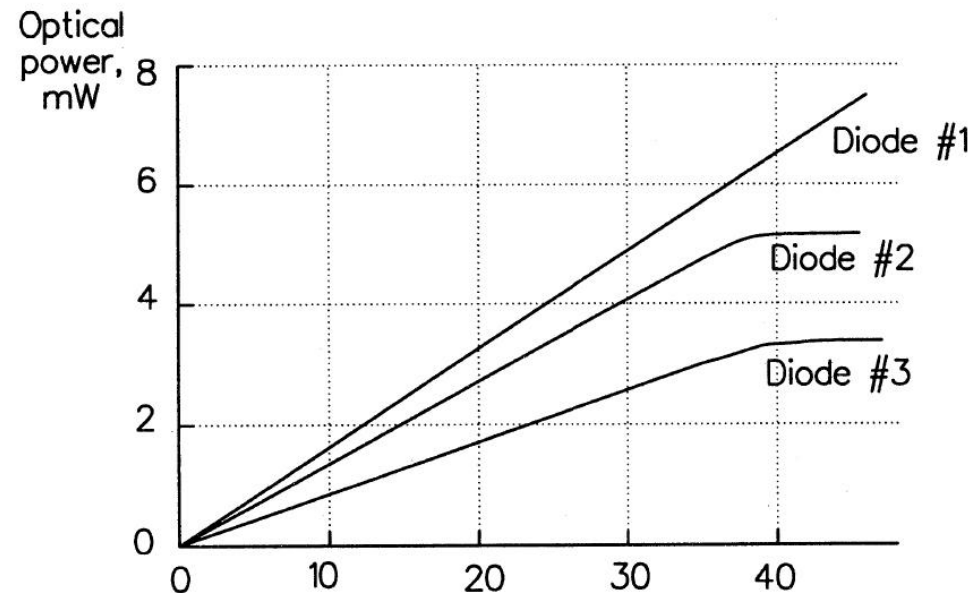
# Caracteristica de raspuns a LED-urilor

- ▶ 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  $r = 50 \mu\text{W}/\text{mA}$



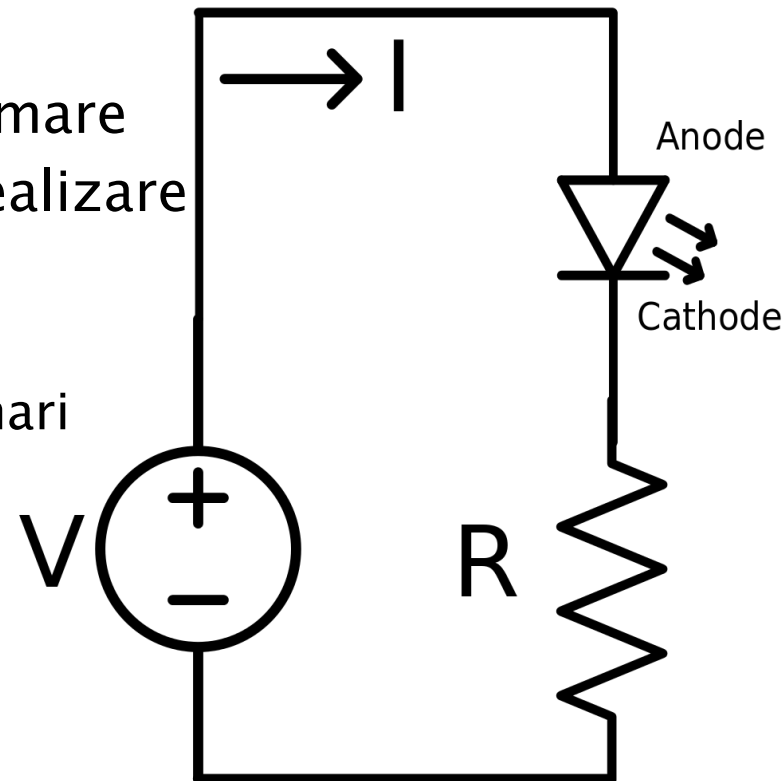
# Control static LED

## ▶ Cea mai simpla schema de control: un rezistor in serie cu LED

- **Atentie!** Tensiunea directa poate varia semnificativ ( $\gg 0.7V$ ) si trebuie preluata din catalog
  - mai ales la intensitate luminoasa mare
  - datorita materialelor diferite de realizare a LED-urilor
  - dependenta de lungimea de unda
    - mai mica la lungimi de unda mai mari

$$I_v = f(I_F[\text{mA}], \lambda) \quad [\text{cd/mcd}]$$

$$I_F = \frac{V_{cc} - V_F}{R}$$



# Control static LED



## Ultra Bright LED Lamps Round Types

Package	Part No.	Chip			Absolute Maximum Ratings				Electro-optical Data(At 20mA)			Viewing Angle 2θ 1/2 (deg)	Drawing No.
		Material Emitted Color	Peak Wave Length p(nm)	Dominant Wave Length λd(nm)	Δλ (nm)	Pd (mw)	If (mA)	Peak (mA)	Vf (V)	Iv (mcd)	Typ.		
T-1 Standard 1.0" Lead 3φ Water Clear	BL-BF43V1	GaAlAs/ DDH Super Red	660	643 ± 5	20	80	30	150	2.0	2.6	700	25	L-001
	BL-BG33V1	InGaAlP/ Yellow Green	573	571 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	700	25	
	BL-BG43V1	InGaN/SiC/ Bluish Green	505	505 ± 5	30	120	30	150	3.5	4.0	3500	24	
	BL-BG63V1	InGaN/SiC/ Green	525	525 ± 5	35	120	30	150	3.5	4.0	4000	24	
	BL-BJ23V1	InGaAlP/ Super Orange	620	615 ± 5	17	100	30	150	2.2	2.6	1700	25	
	BL-BJ33V1	InGaAlP/ Super Orange	630	625 ± 5	17	100	30	150	2.2	2.6	1100	25	
	BL-BJ63V1	InGaAlP/ Super Orange	610	605 ± 5	17	100	30	150	2.2	2.6	1500	25	
	BL-BJ73V1	InGaAlP/ Super Orange	630	625 ± 5	17	100	30	150	2.2	2.6	1500	25	
	BL-BJH3V1	InGaAlP/ Super Orange	630	625 ± 5	17	100	30	150	2.2	2.6	2500	25	
	BL-BJG3V1	InGaAlP/ Super Orange	630	625 ± 5	17	100	30	150	2.2	2.6	3000	25	
	BL-BK43V1	InGaAlP/ Super Yellow	590	587 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	1600	25	
	BL-BK53V1	InGaAlP/ Super Yellow	595	594 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	1500	25	
	BL-BK73V1	InGaAlP/ Super Yellow	595	594 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	2000	25	
	BL-BK83V1	InGaAlP/ Super Yellow	590	587 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	2000	25	
	BL-BKH3V1	InGaAlP/ Super Yellow	590	587 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	2500	25	
	BL-BKG3V1	InGaAlP/ Super Yellow	590	587 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	3000	25	
BL-BF43V4V	GaAlAs/ DDH Super Red	660	643 ± 5	20	80	30	150	2.0	2.6	1200	15		
BL-BG33V4V	InGaAlP/ Yellow Green	573	571 ± 5	15	100	30	150	2.2	2.6	1100	15		
BL-BG43V4V	InGaN/SiC/ Bluish Green	505	505 ± 5	30	120	30	150	3.5	4.0	6000	24		
BL-BG63V4V	InGaN/SiC/ Green	525	525 ± 5	35	120	30	150	3.5	4.0	5600	24		

3.5	4.0	3500
3.5	4.0	4000
2.2	2.6	1700
2.2	2.6	1100

### ◆ Electro-Optical Characteristics

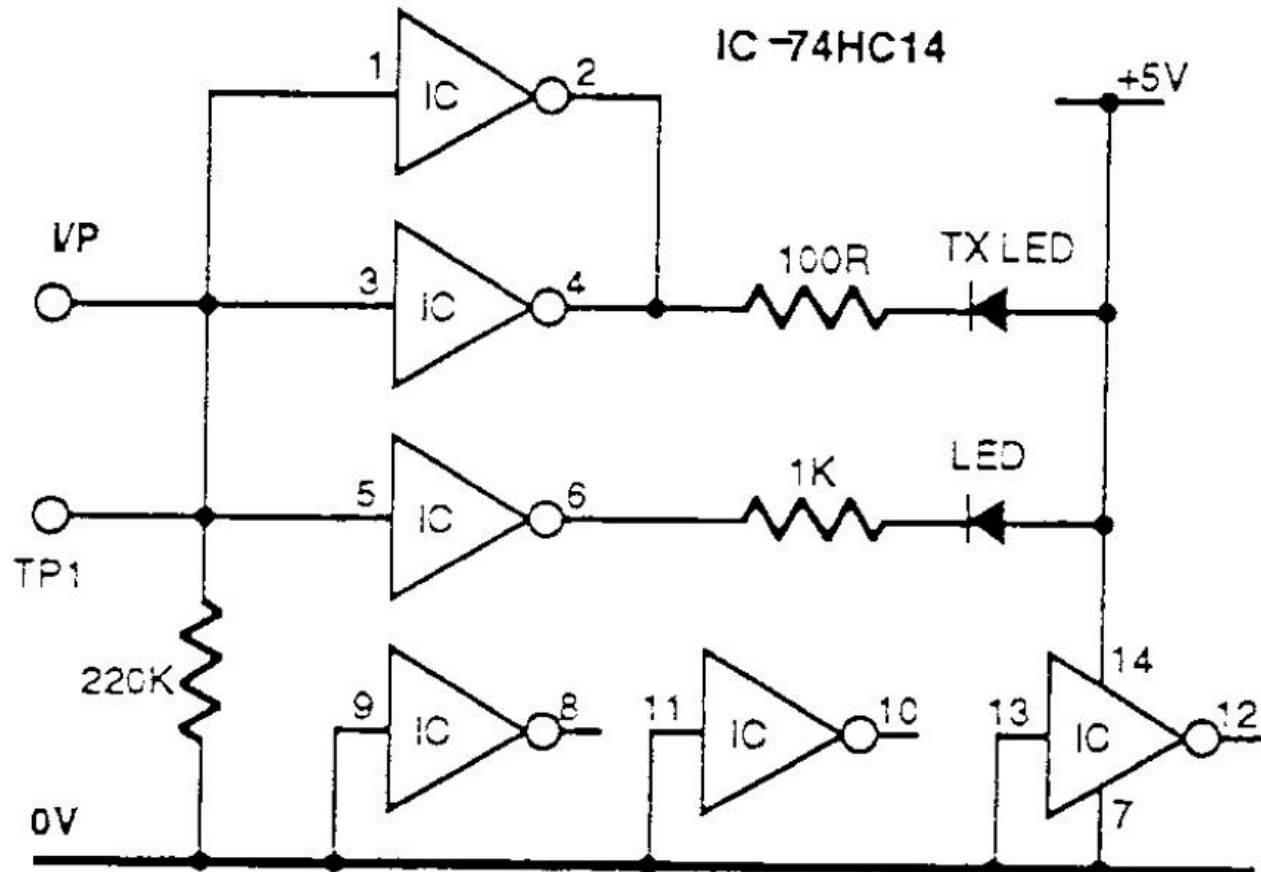
Item	Symbol	Condition	Minimum	Typical	Maximum	Unit
Forward Voltage	V <sub>F</sub>	I <sub>F</sub> = 240 mA		19.0		V
Brightness	I <sub>v</sub>	I <sub>F</sub> = 240 mA		13		cd
Total Radiated Power	P <sub>o</sub>	I <sub>F</sub> = 240 mA		60		mW

# Control dinamic LED

- ▶ Variatii mici ale tensiunii (mai ales in jurul tensiunii de deschidere) pot duce la varii mari ale curentului
- ▶ Se prefera de multe ori controlul in curent al LED-ului

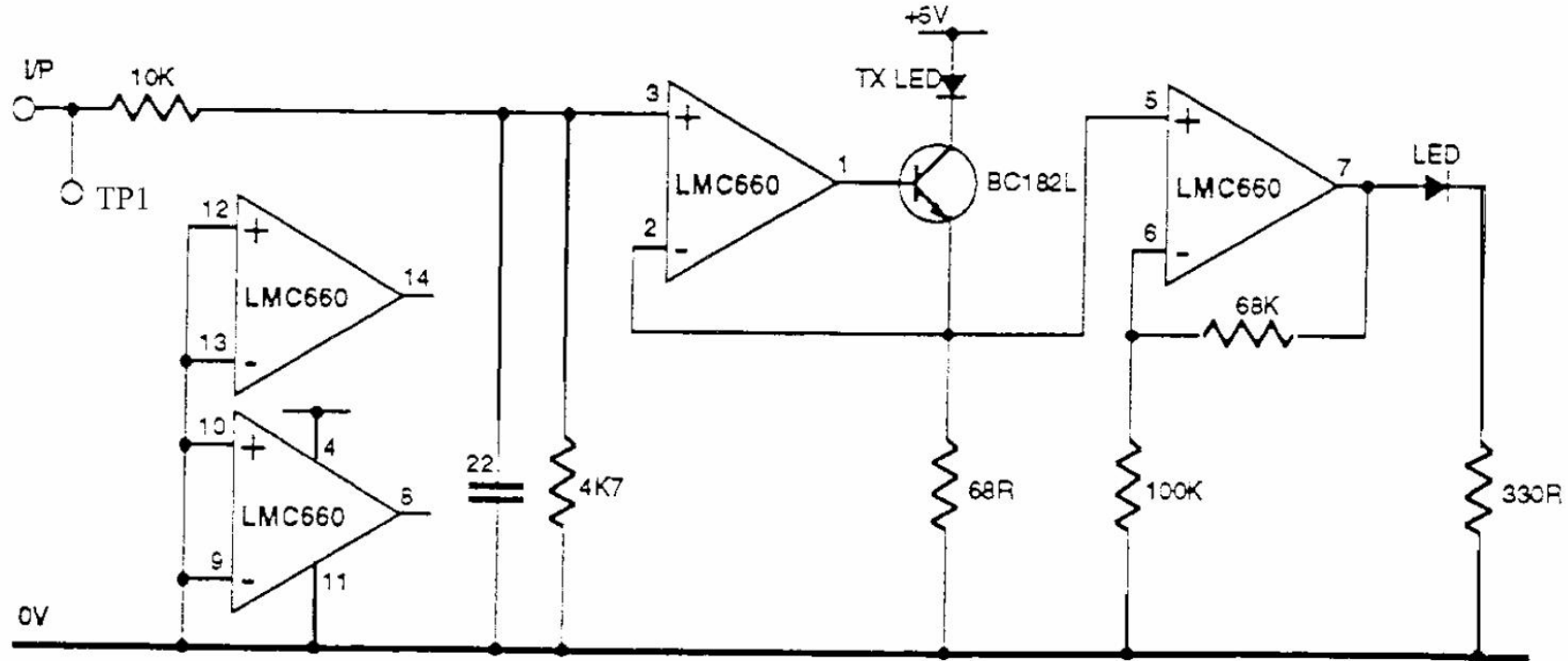
# Control dinamic LED, Lab 1 ant

- ▶ Control in tensiune
  - Schema electrică a emițătorului în impuls



# Control dinamic LED, Lab 1 ant

- ▶ Control in curent
  - Schema electrică a emițătorului optic analogic



# Dioda Laser

Capitolul 8

# 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 )

# Caracteristici dioda laser

## ▶ Avantaje

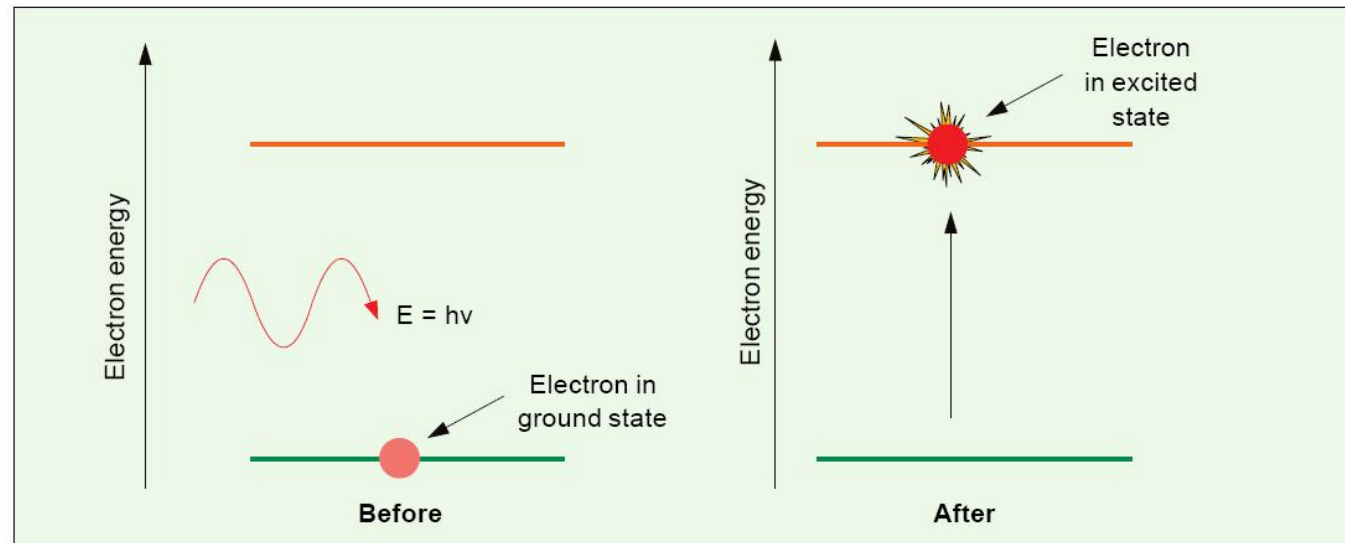
- Putere optica ridicata (50mW functionare continua, 4W functionare in impulsuri)
- Precizie ridicata a controlului (impulsuri cu latimea de ordinul fs – femptosecunde) – viteza mare de lucru
- Spectru ingust, teoretic LASER ofera o singura linie spectrala
- Lumina coerenta si directiva (~80% poate fi cuplata in fibra)

## ▶ Dezavantaje

- Cost (dispozitiv si circuit de comanda: controlul puterii si al temperaturii)
- Durata de viata
- Sensitivitate crescuta cu temperatura
- Modulatie analogica dificila (de obicei cu dispozitive externe)
- Lungime de unda fixa

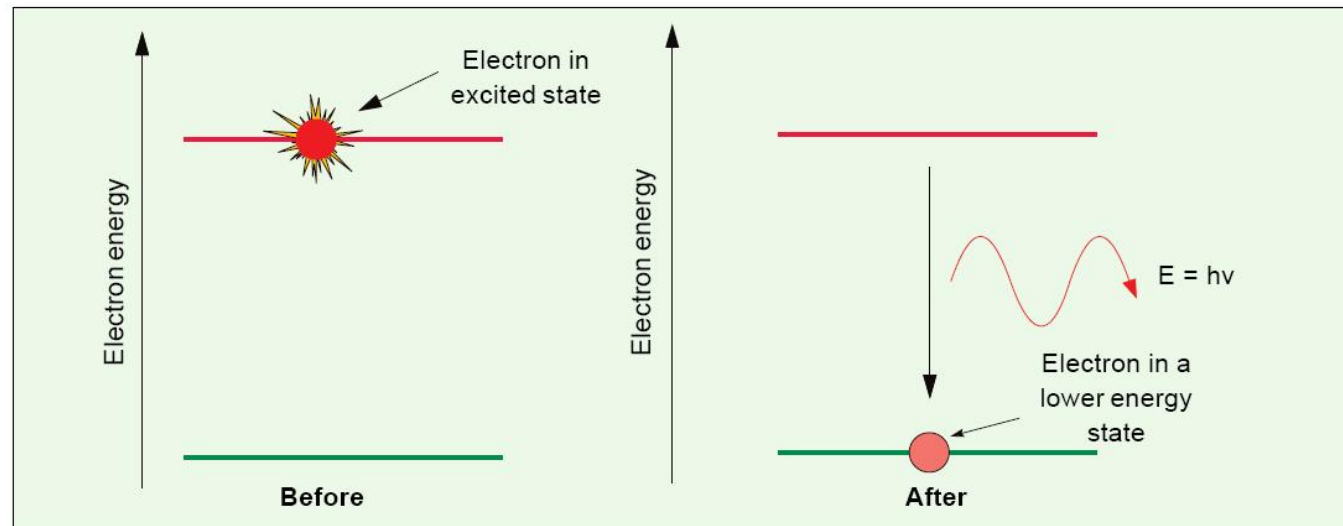
# Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ LASER = Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation = Amplificarea Luminiilor prin Emisie Stimulată
- ▶ Un foton incident poate cauza prin absorbție tranziția unui electron pe un nivel energetic superior



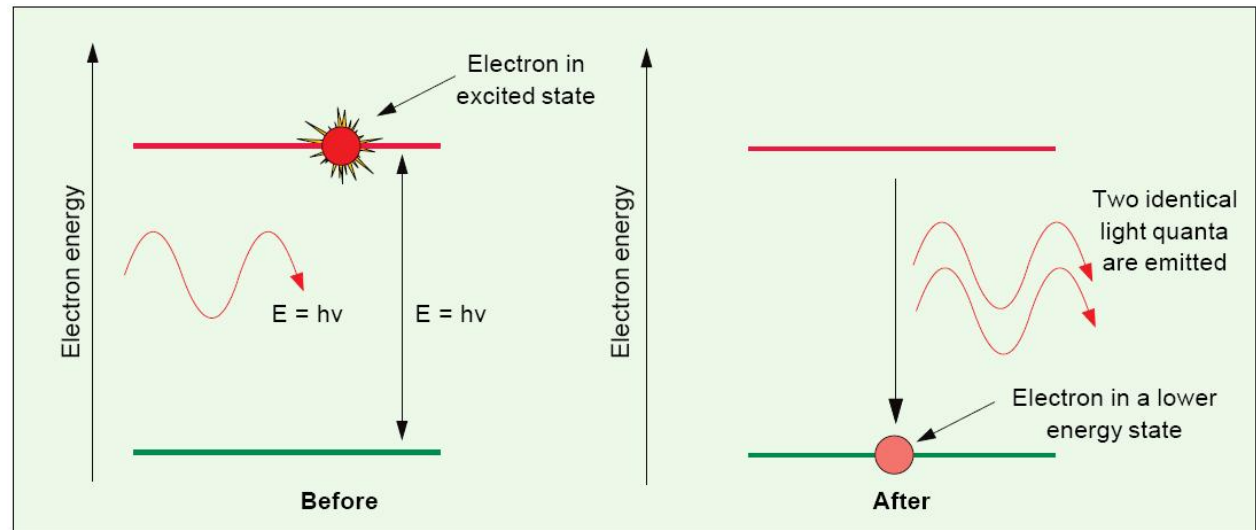
# Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ Emisia spontana – electronul trece in starea energetica de echilibru emitand un foton
- ▶ Trecerea se realizeaza prin recombinarea unei perechi electron–gol
- ▶ Directia si faza radiatiei emise sunt aleatoare



# Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ Emisia stimulata – un foton incident cu energie corespunzatoare poate stimula emisia unui al doilea foton **fara a fi absorbit**
- ▶ Noul foton are aceeasi directie si faza cu fotonul incident, Lumina rezultata e **coerenta**



# Lățimea benzii interzise/lungime de undă pentru materialele uzuale

Material	Formula	Wavelength Range $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Bandgap Energy $W_g$ (eV)
Indium Phosphide	InP	0.92	1.35
Indium Arsenide	InAs	3.6	0.34
Gallium Phosphide	GaP	0.55	2.24
Gallium Arsenide	GaAs	0.87	1.42
Aluminium Arsenide	AlAs	0.59	2.09
Gallium Indium Phosphide	GaInP	0.64-0.68	1.82-1.94
Aluminium Gallium Arsenide	AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
Indium Gallium Arsenide	InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
Indium Gallium Arsenide Phosphide	InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

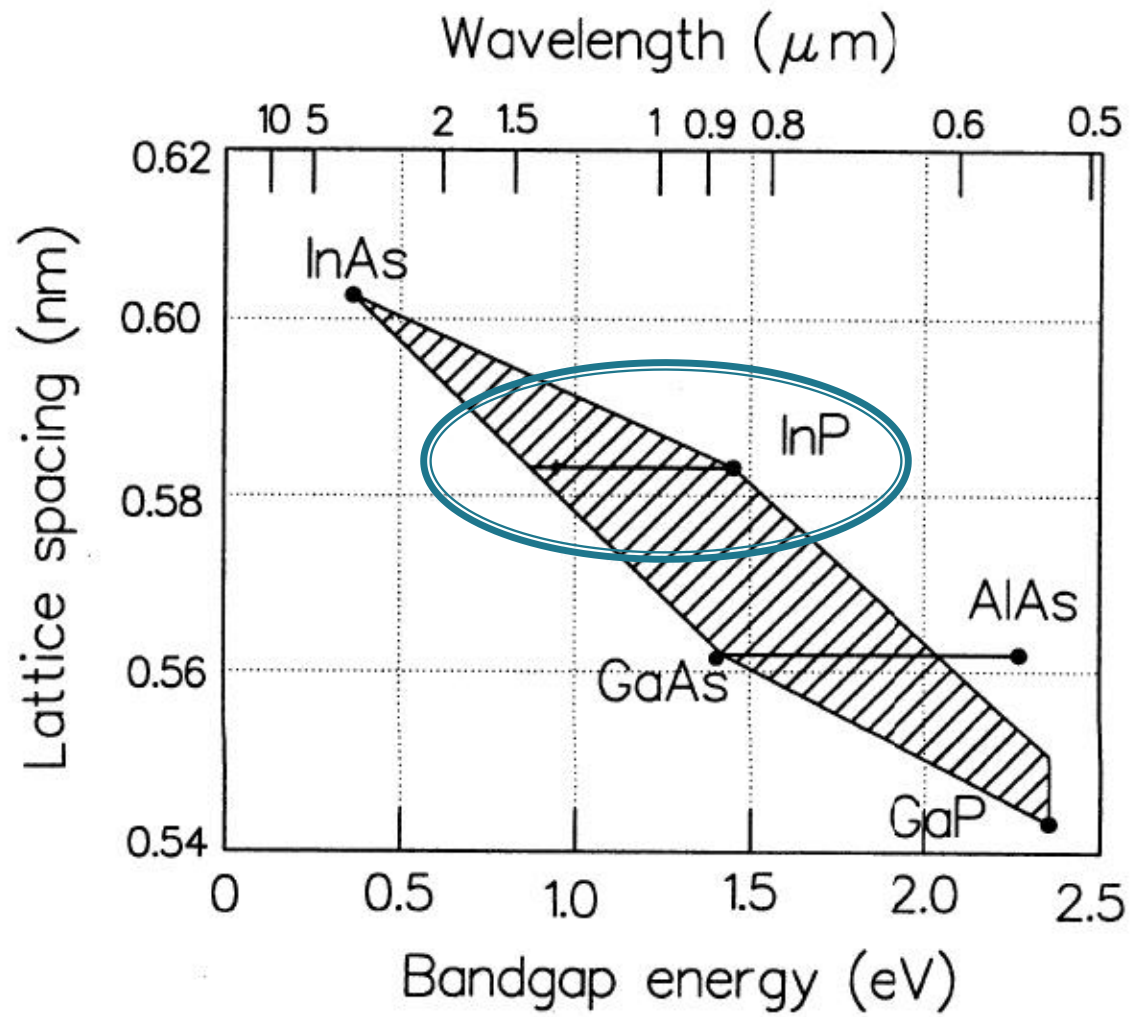
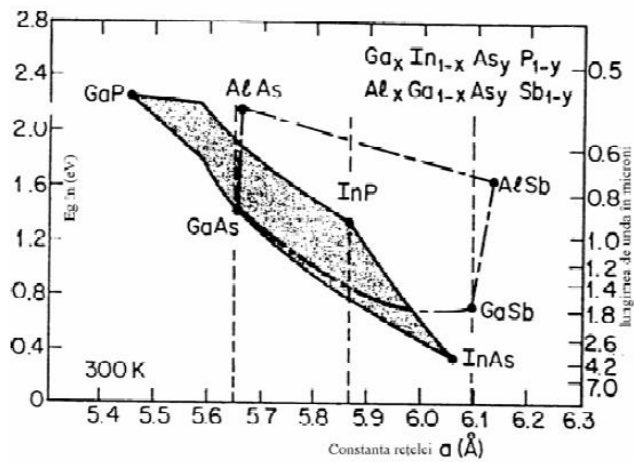
$$E_g = h\nu; \quad \lambda = \frac{hc}{E_g}; \quad \lambda[\mu\text{m}] = \frac{1.240}{E_g[\text{eV}]}$$

- ▶  $h$  constanta lui Plank  
 $6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$
- ▶  $c$  viteza luminii **in vid**  
 $2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- ▶  $e$  sarcina electronului  
 $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ▶ benzi energetice:  $\lambda_0$ ,  $\Delta\lambda$

# Detalii constructive

- ▶ Recombinarea unei perechi electron–gol necesita conservarea impulsului
- ▶ In Si si Ge aceasta conditie presupune aparitia unui foton intermediar (tranzitie indirecta) a carui energie se transforma in caldura
- ▶ Se utilizeaza aliaje de Ga Al As sau In Ga As P
- ▶ Spatierea atomilor in diferitele straturi trebuie sa fie egala (toleranta 0.1%) pentru a nu se introduce defecte mecanice la jonctiune
  - limitare a aliajelor utilizabile
  - aparitia defectelor
    - creste ineficienta (recombinari neradiative)
    - scade durata de viata a dispozitivului

# Dependența benzii interzise de constanta rețelei



# Materiale

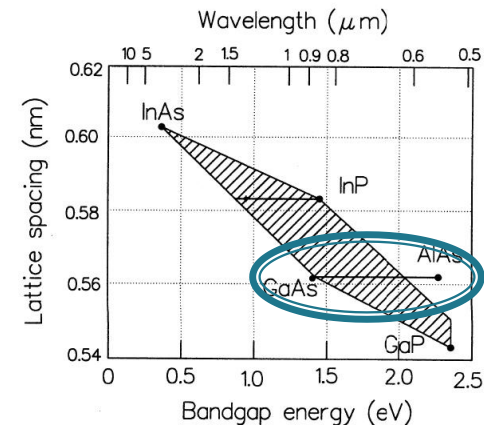
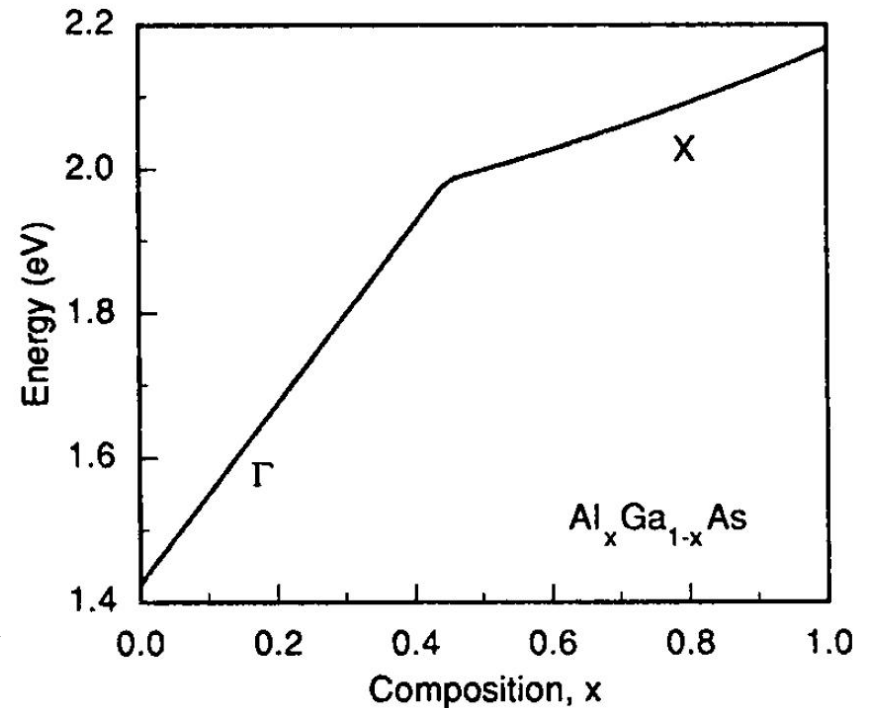
- ▶ Lungimi de unda mici (spectru vizibil – 1 000nm)
  - GaP (665nm),  $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$
  - **GaAs** (900nm),  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  (AlAs – 550nm)
- ▶ Lungimi de unda mari (1 000÷1 700nm)
  - **InP** (920nm),  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
  - x,y concentratii relative in aliaj a materialelor corespunzatoare
  - x,y alese din considerente privind
    - lungimea de unda
    - spatierea atomilor
- ▶ Ultraviolet – Albastru: **GaN**, GaInN

# Materiale

- ▶ Lungimi de unda mici
  - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$
  - substrat GaAs
  - limitare pentru tranzitie directa,  $x < 0.45$
  - $E_g$  (in eV)

$$E_g = 1.424 + 1.247 \cdot x, \quad x < 0.45$$

$$E_g = 1.9 + 0.125 \cdot x + 0.143 \cdot x^2, \quad x > 0.45$$



# Materiale

- ▶ Lungimi de unda mari
  - $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
  - Tipic substratul este InP
    - Spatierea atomilor (lattice spacing) corespunzatoare InP

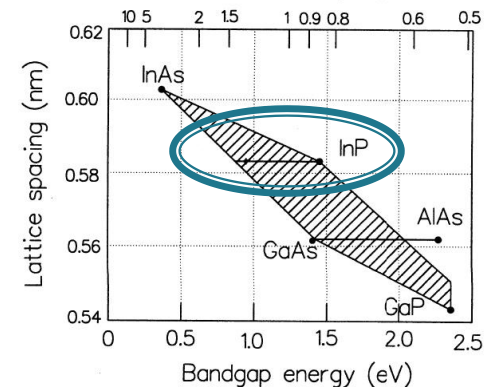
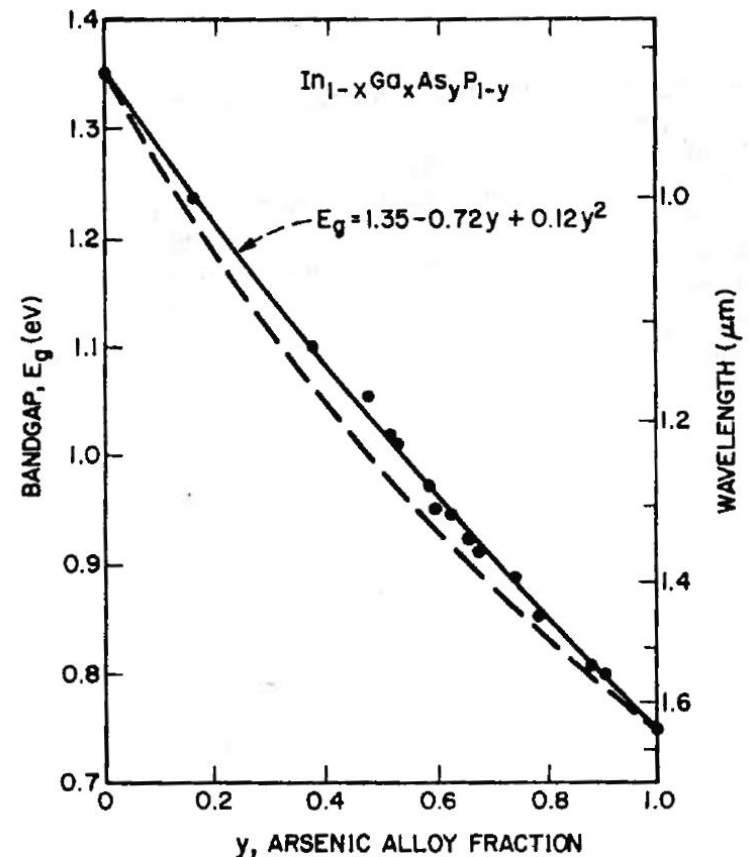
$$x = \frac{0.4526 \cdot y}{1 - 0.031 \cdot y}$$

- $E_g$  (in eV)

$$E_g = 1.35 - 0.72 \cdot y + 0.12 \cdot y^2$$

- Exemplu: 1300nm se obtine cu  $y=0.611$  si  $x=0.282$ ,

- $\text{In}_{0.282}\text{Ga}_{0.718}\text{As}_{0.611}\text{P}_{0.389}$



# Principii LASER

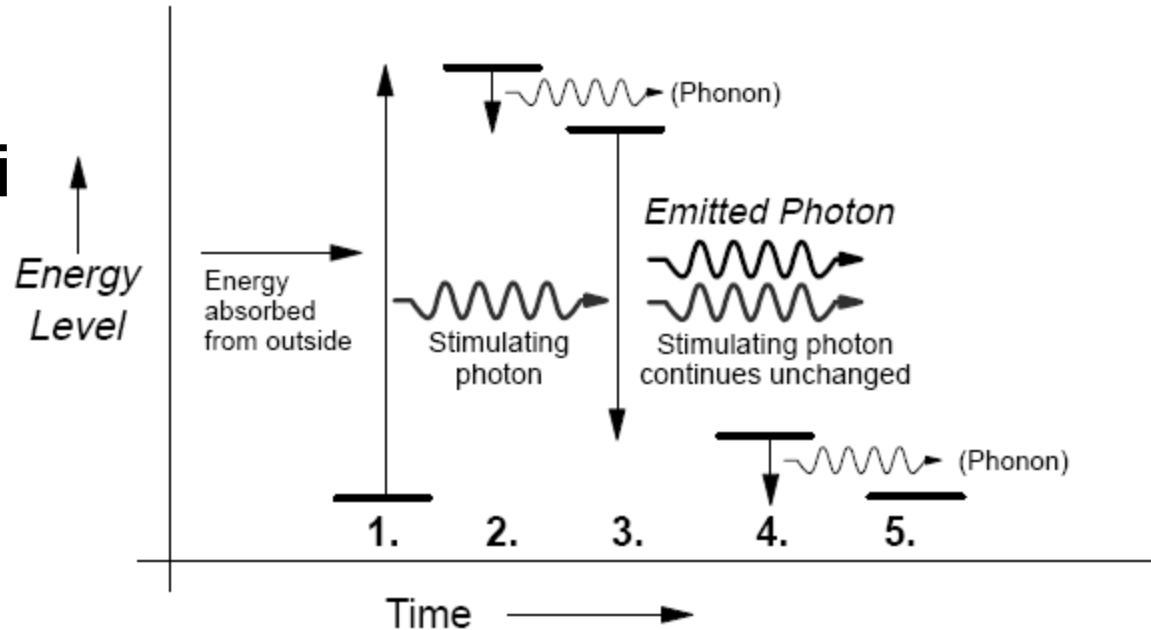
- ▶ Inversiune de populatie
  - necesara deoarece electronii au capabilitatea de a absorbi energie **la aceeasi frecventa** la care are loc emisia stimulata
  - se defineste probabilistic: probabilitatea de emisie stimulata sa fie mai mare decat probabilitatea de absorbtie

$$n_c \cdot p_e > n_v \cdot p_a$$

- ▶ Materialele capabile sa genereze inversiune de populatie au starea excitata metastabila

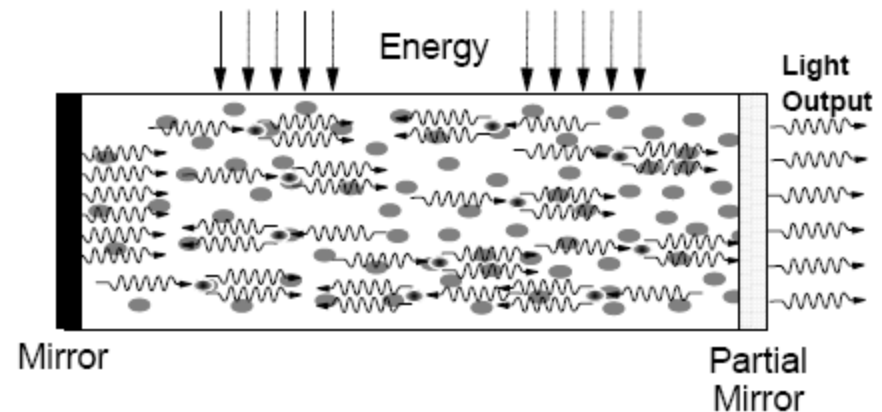
# Materialie cu 4 nivele energetice

- ▶ La un material cu 4 nivele energetice tranzitia radianta a electronului (3) se termina intr-o stare instabila, starea de echilibru obtinandu-se prin emisia unui fonon
- ▶ Inversiunea de populatie se obtine mult mai usor datorita electronilor din starea intermediara



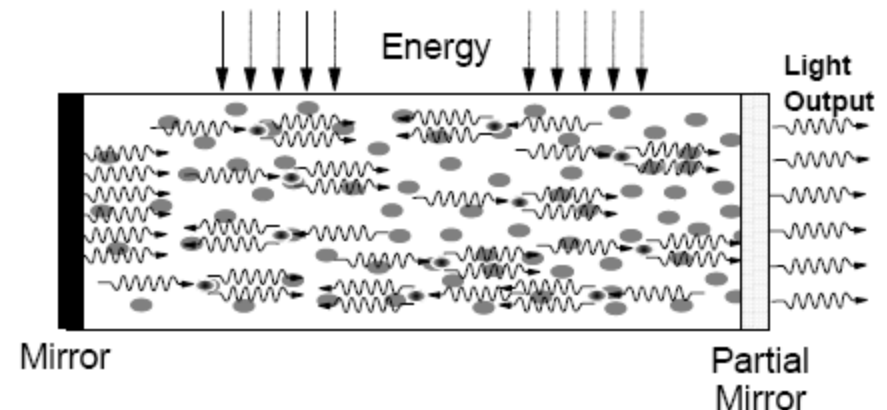
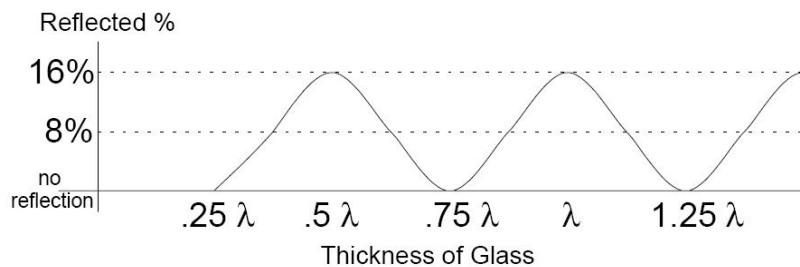
# Dioda LASER – Principiu de realizare

- ▶ Pentru ca emisia stimulata sa apara, fotonii emisi trebuie sa ramana in contact cu materialul o perioada mai mare de timp – 2 oglinzi necesare
- ▶ Pentru a permite extragerea radiatiei e necesar ca una din oglinzi sa fie partial reflectanta

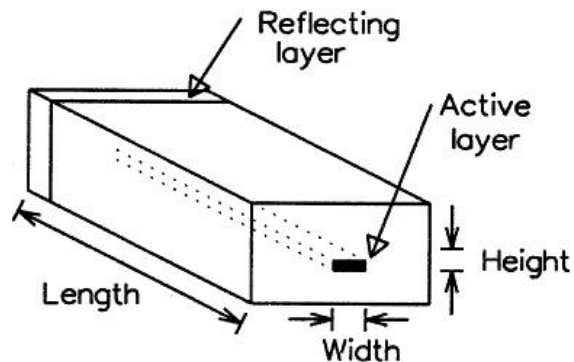
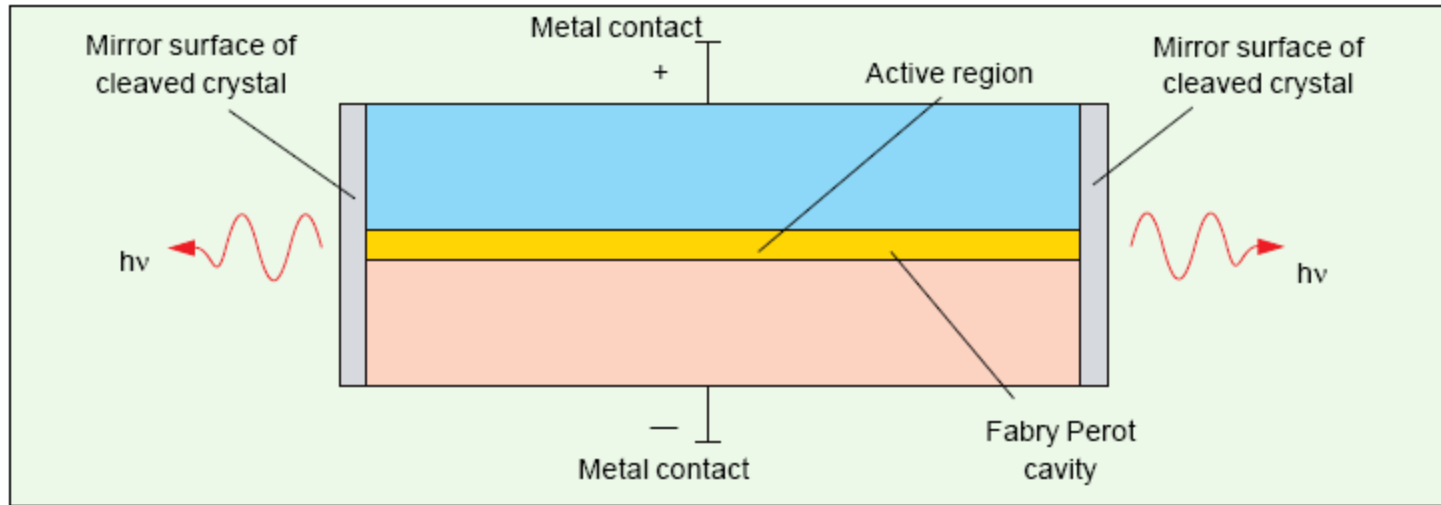


# Dioda LASER – Principiu de realizare

- ▶ Pentru diodele laser utilizate in comunicatii reflectivitatea oglinzilor nu trebuie sa fie foarte mare
- ▶ Interfata semiconductor aer ofera un coeficient de reflexie de  $\sim 6\%$  dar poate ajunge la  $36\%$  pentru lungimea de unda de operare (vezi lamela dielectrica)

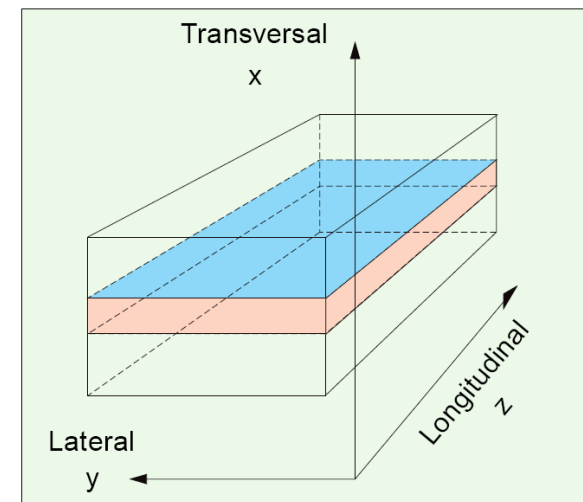


# Dioda LASER Fabry Perot



Height:  $0.1 - 0.2 \mu\text{m}$   
Length:  $250 - 500 \mu\text{m}$   
Width:  $5 - 15 \mu\text{m}$   
Sides: rough-cut  
Front: cleaved  
Back: 100% reflector

Definirea directiilor in  
dioda LASER



# Dioda LASER – Principiu de realizare

- ▶ Pentru a realiza
  - coerența radiației
  - interferența constructivă între radiațiile incidente și reflectate de oglinzi,
- ▶ distanța între oglinzi trebuie să fie un multiplu al jumătății din lungimea de undă

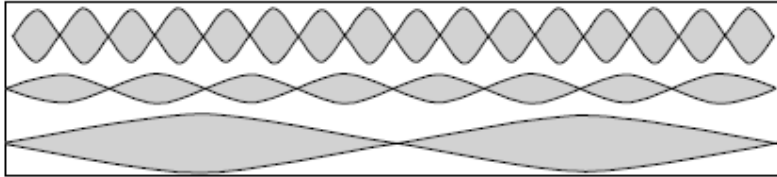
$$L = k \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{n}$$

$$L = k \cdot \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot f}$$

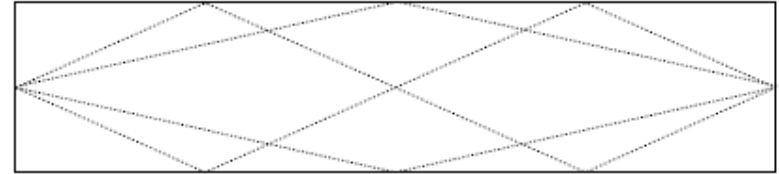
$$f = k \cdot \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot L}$$

- ▶ Pentru eficientizarea pomparii de energie din exterior  $L = 100 \div 200 \mu\text{m}$ ,  $k \cong 400$

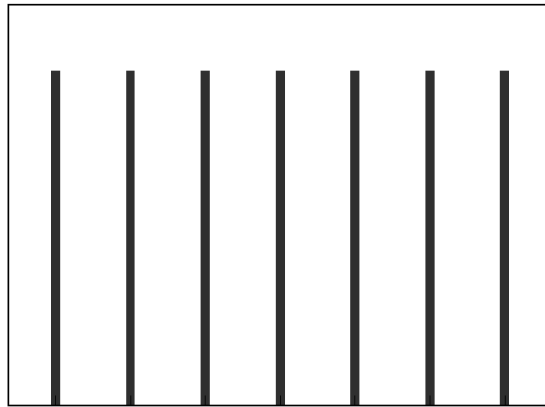
# Spectrul diodei LASER



Longitudinal Modes



Lateral Modes



1.490 1.494 1.497 1.5 1.503 1.507 1.510  
Wavelength (nm)

$$f_k = k \cdot \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot L} \quad \Delta f = \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot L}$$

$$\Delta \lambda \cong \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot n \cdot L}$$

# Contact

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