

# Optoelectronică, structuri și tehnologii

Curs 7  
2013/2014

# Dioda Laser

Capitolul 9

Partea I

# Caracteristici dioda laser

## ▶ Avantaje

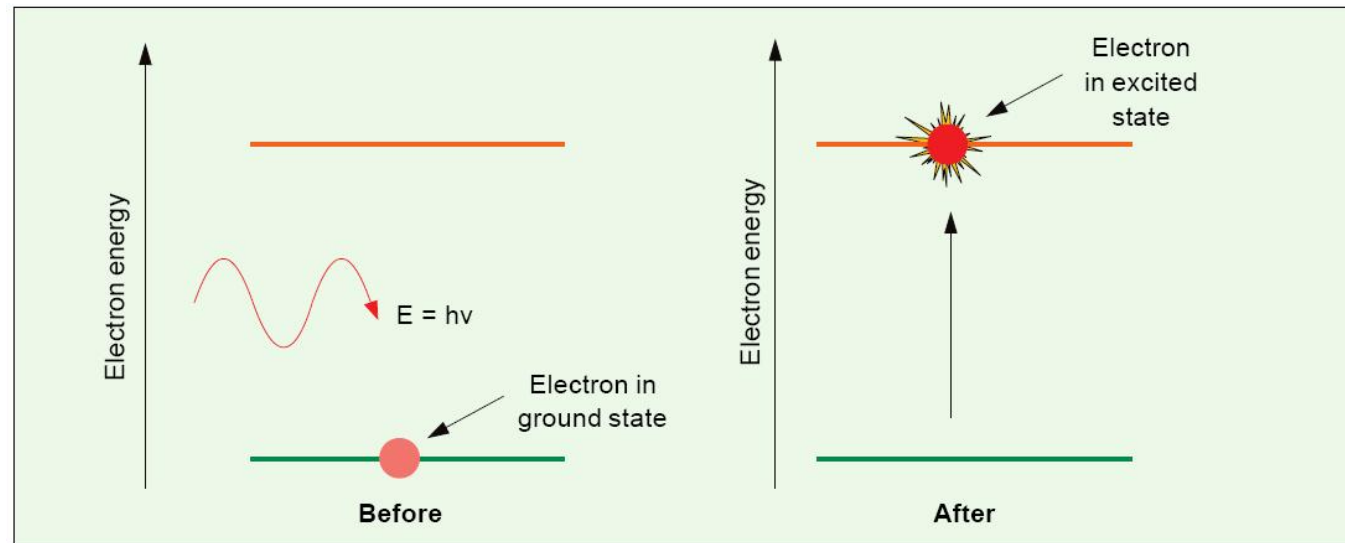
- Putere optica ridicata (50mW functionare continua, 4W functionare in impulsuri)
- Precizie ridicata a controlului (impulsuri cu latimea de ordinul fs – femptosecunde) – viteza mare de lucru
- Spectru ingust, teoretic LASER ofera o singura linie spectrala
- Lumina coerenta si directiva (~80% poate fi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

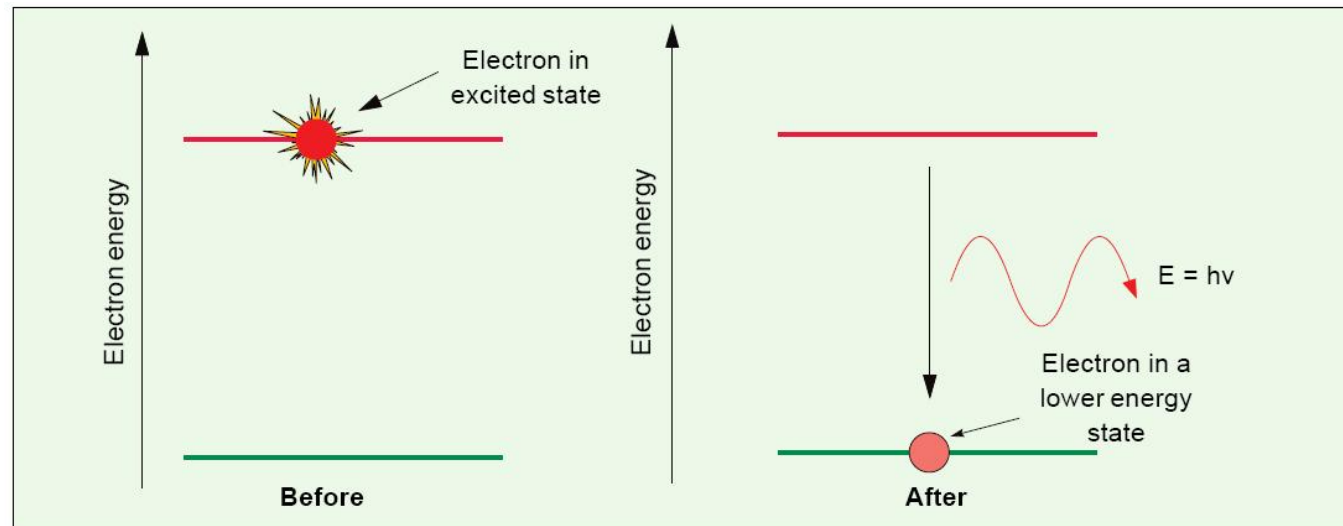
# Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ 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



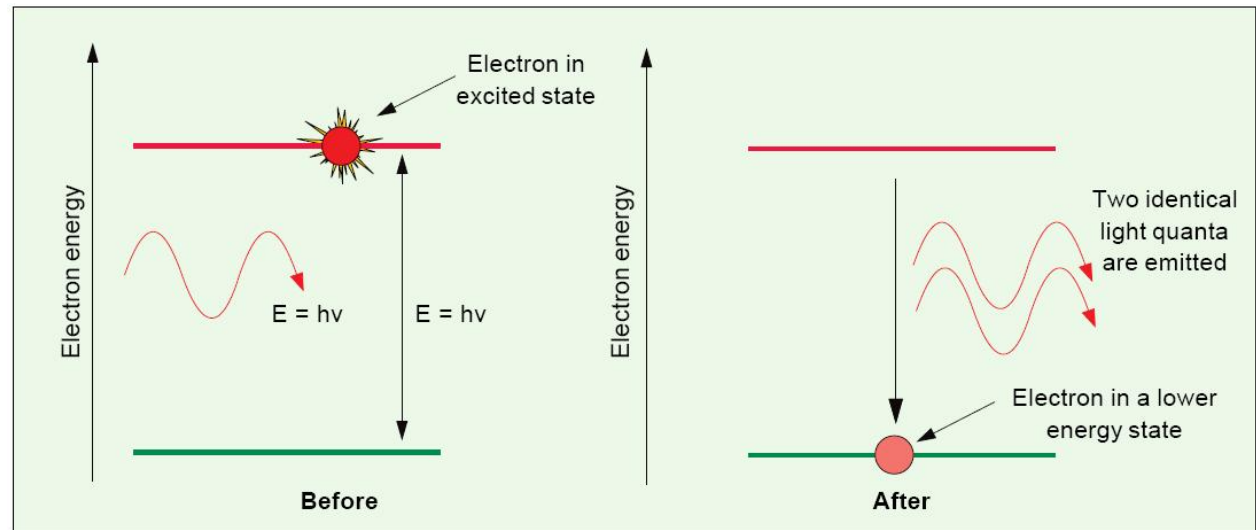
# Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ 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



# 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



# Lățimea benzii interzise/lungime de undă pentru materialele uzuale

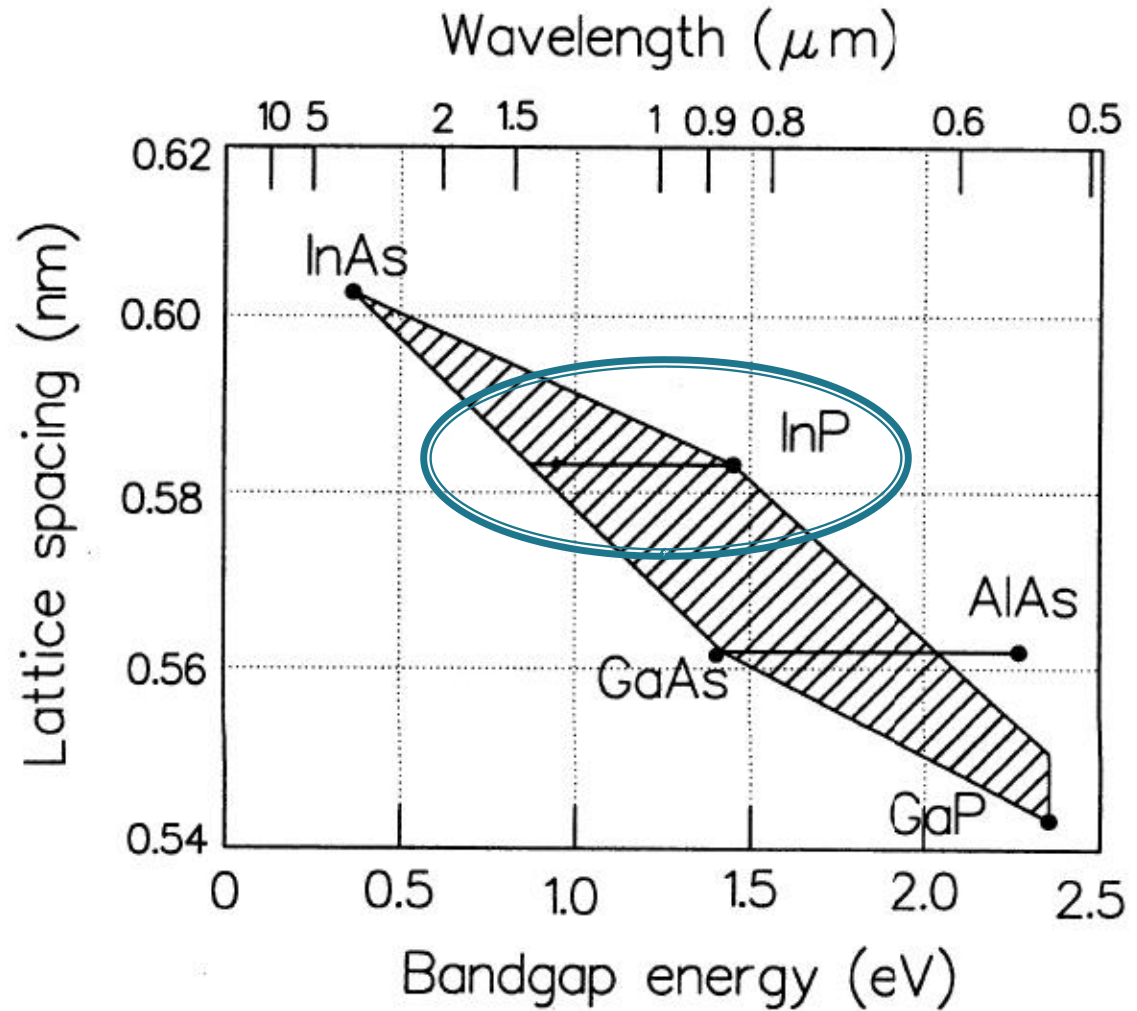
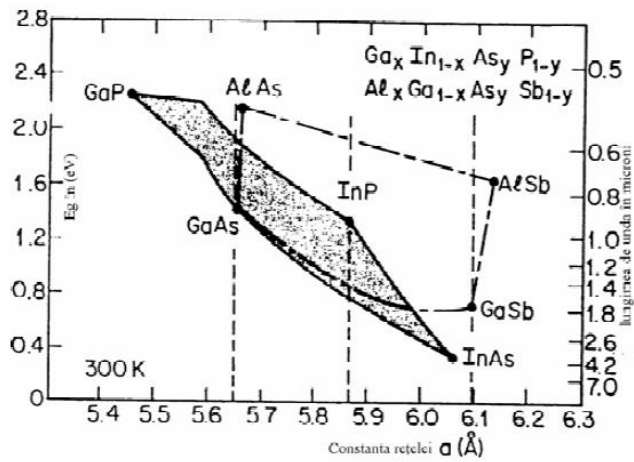
Material	Formula	Wavelength Range $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Bandgap Energy $W_g$ (eV)
Indium Phosphide	InP	0.92	1.35
Indium Arsenide	InAs	3.6	0.34
Gallium Phosphide	GaP	0.55	2.24
Gallium Arsenide	GaAs	0.87	1.42
Aluminium Arsenide	AlAs	0.59	2.09
Gallium Indium Phosphide	GaInP	0.64-0.68	1.82-1.94
Aluminium 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

$$E_g = h\nu; \quad \lambda = \frac{hc}{E_g}$$

- ▶  $h$  constanta lui Plank  
 $6.62 \cdot 10^{-32} \text{ Ws}^2$
- ▶  $c$  viteza luminii **in vid**  
 $2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



# Dependența benzii interzise de constanta rețelei



# Principii LASER

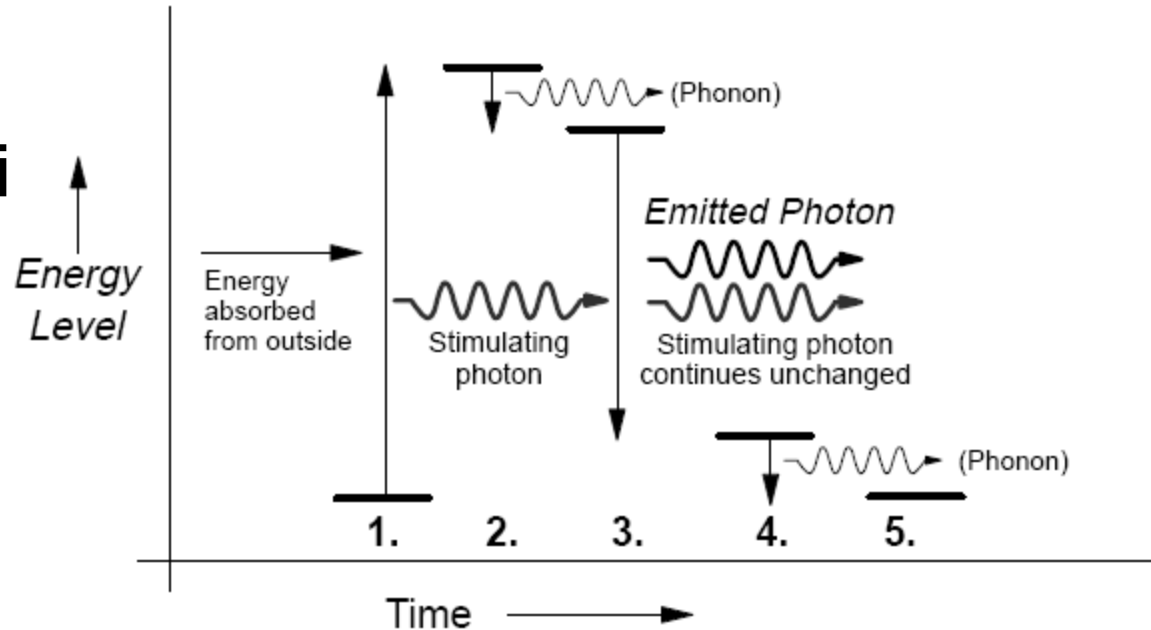
- ▶ Inversiune de populatie
  - necesara deoarece electronii au capabilitatea de a absorbi energie **la aceeasi frecventa** la care are loc emisia stimulata
  - se defineste probabilistic: probabilitatea de emisie stimulata sa fie mai mare decat probabilitatea de absorbtie

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

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

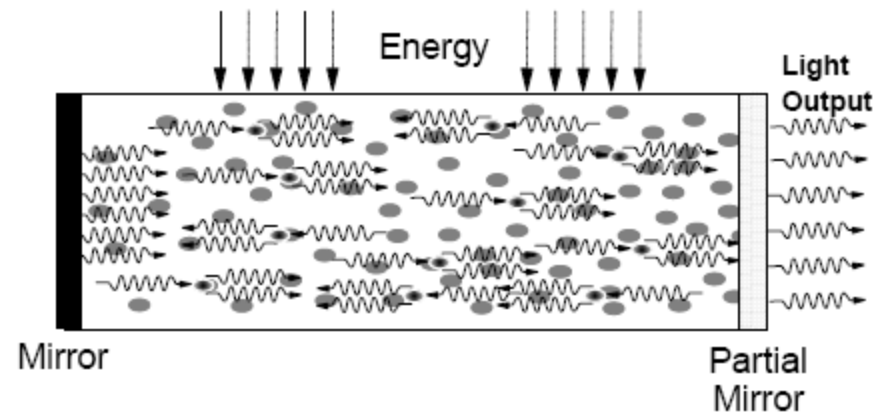
# Materialie cu 4 nivele energetice

- ▶ 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



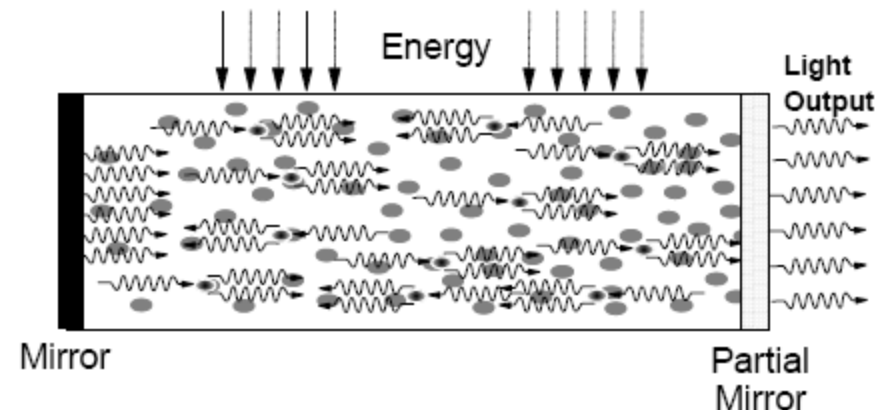
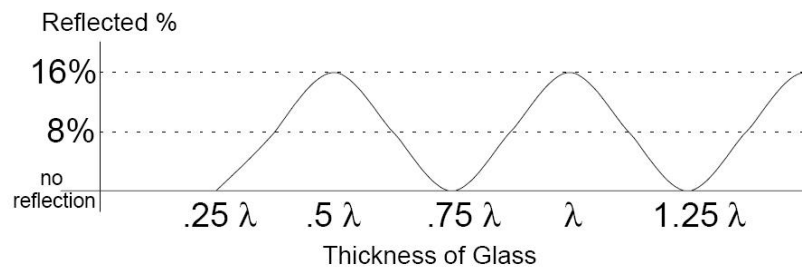
# Dioda LASER – Principiu de realizare

- ▶ 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)



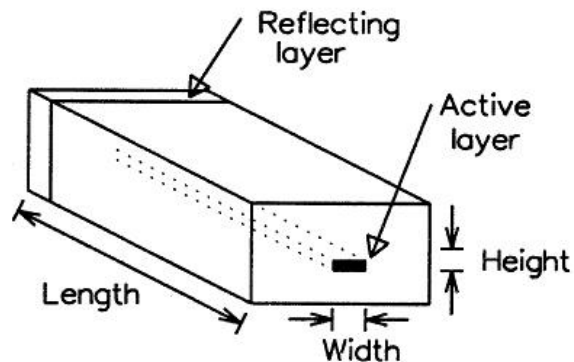
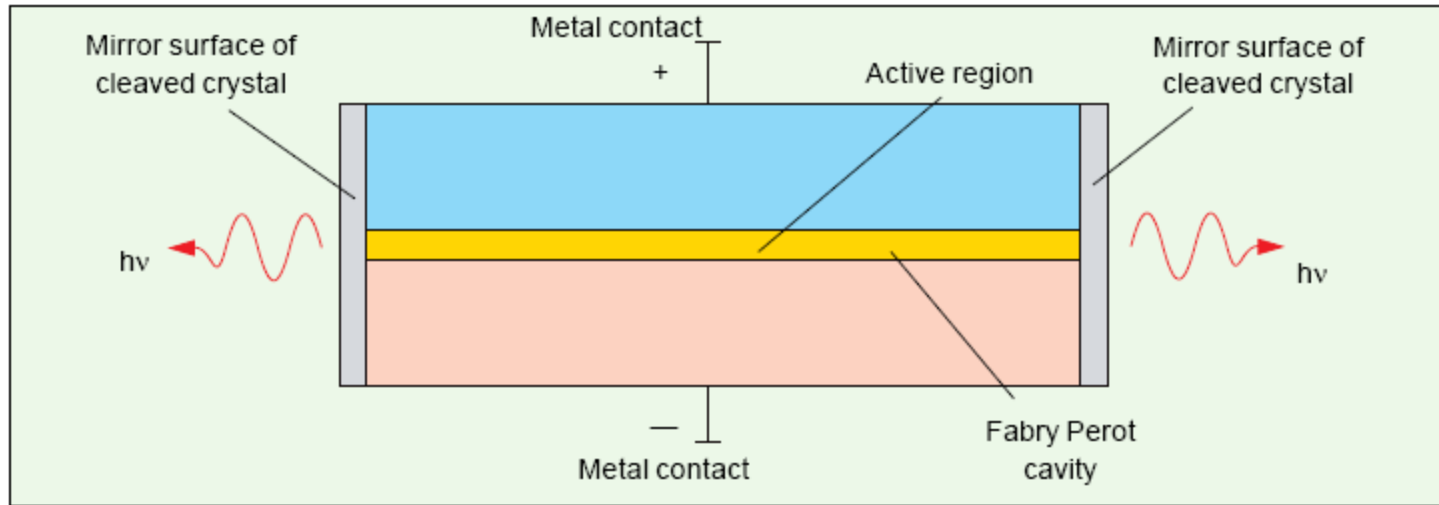
# Dioda LASER – Principiu de realizare

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

$$L = k \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{n} \qquad L = k \cdot \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot f}$$

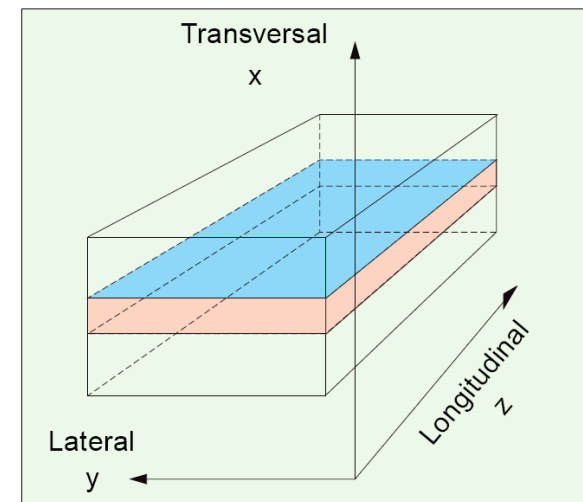
- ▶ Pentru eficientizarea pomparii de energie din exterior  $L = 100 \div 200 \mu\text{m}$ ,  $k \cong 400$

# Dioda LASER Fabry Perot



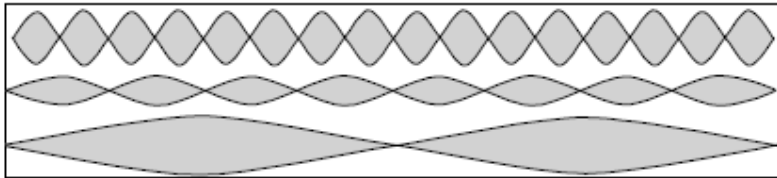
Height:  $0.1 - 0.2 \mu\text{m}$   
Length:  $250 - 500 \mu\text{m}$   
Width:  $5 - 15 \mu\text{m}$   
Sides: rough-cut  
Front: cleaved  
Back: 100% reflector

Definirea directiilor in  
dioda LASER

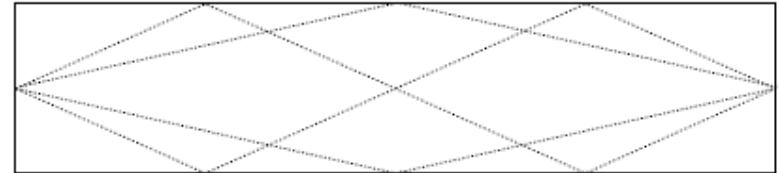




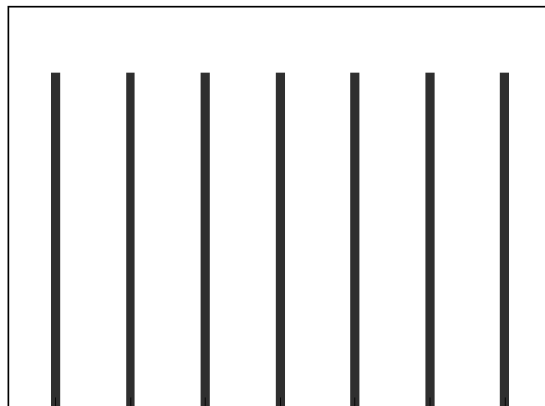
# Spectrul diodei LASER



Longitudinal Modes



Lateral Modes



1.490 1.494 1.497 1.5 1.503 1.507 1.510  
Wavelength (nm)

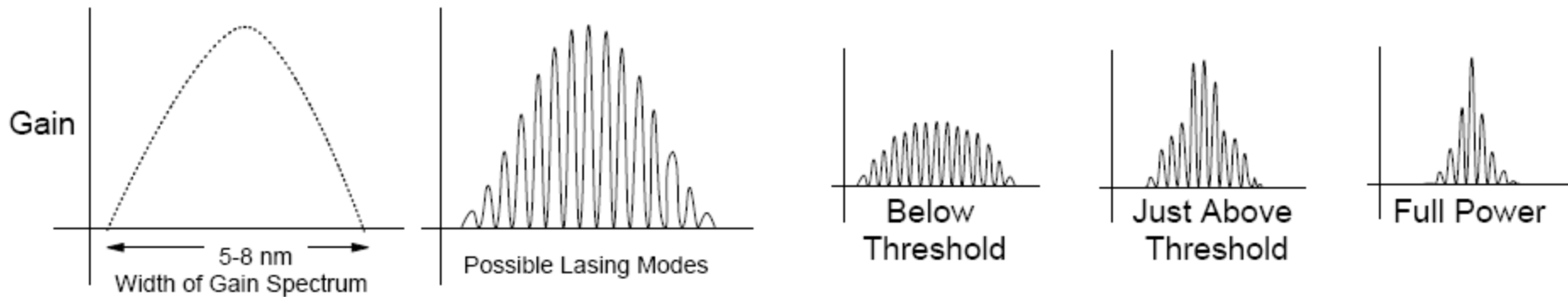
$$f_k = k \cdot \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot L}$$

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

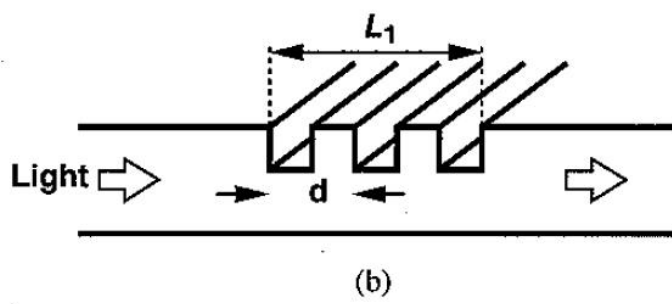
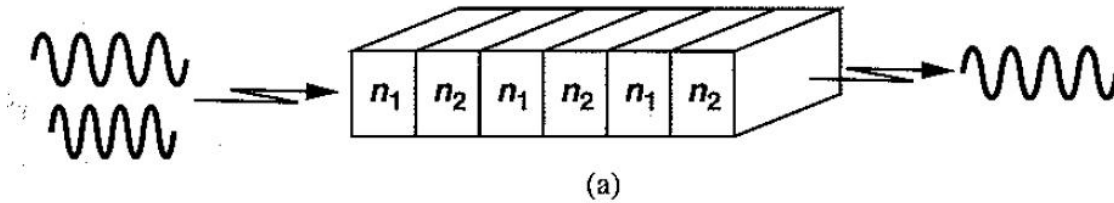
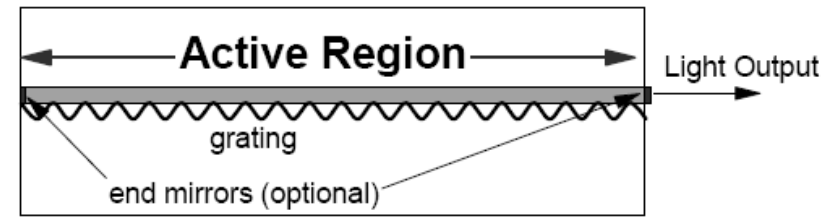
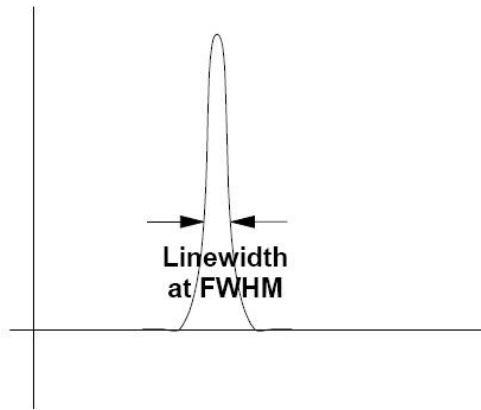
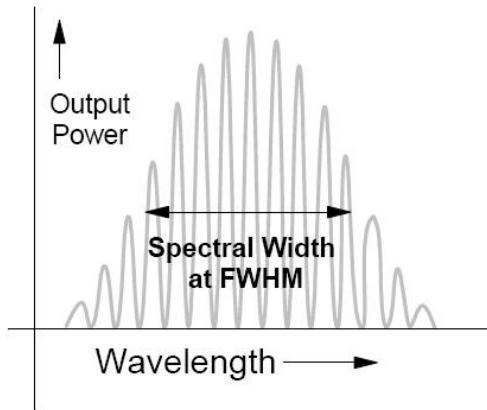
$$\Delta \lambda \cong \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot n \cdot L}$$

# Spectrul diodei LASER

- ▶ Castigul diodei laser (eficacitatea aparitiei emisiei stimulate) depinde
  - de caracteristicile energetice ale materialului din care e realizata dioda
  - de energia pompata din exterior (curentul prin dioda)

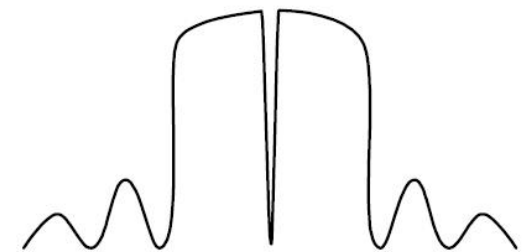
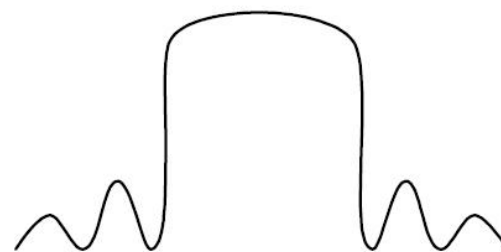
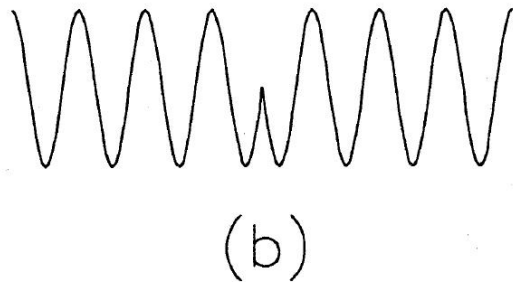
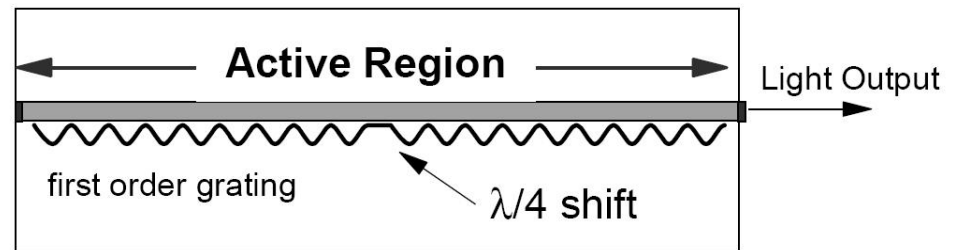
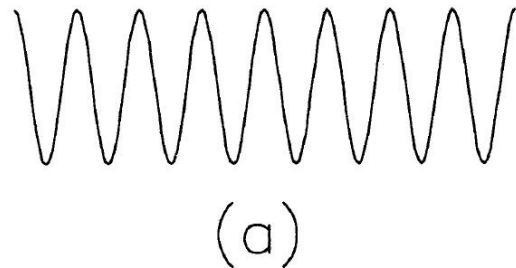


# Distributed Feedback (DFB) Lasers



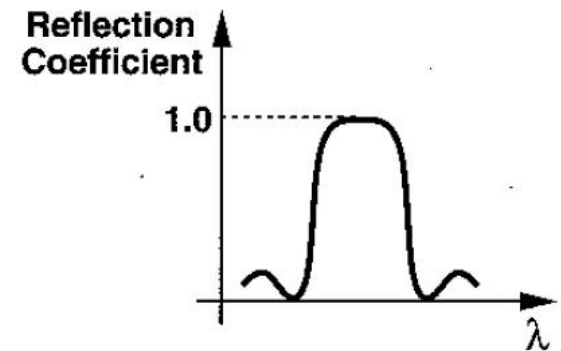
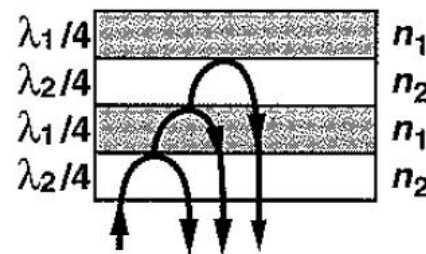
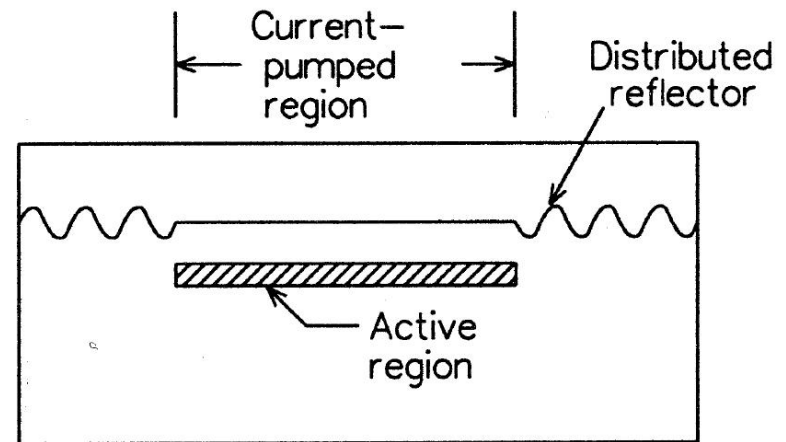
# Distributed Feedback (DFB) Lasers

- ▶ Pentru operarea in impulsuri, un salt de  $\lambda/4$  ingusteaza suplimentar spectrul diodei laser



# Distributed Bragg Reflector (DBR) Lasers

- ▶ Se utilizeaza suprafete reflective selective pentru filtrare optica

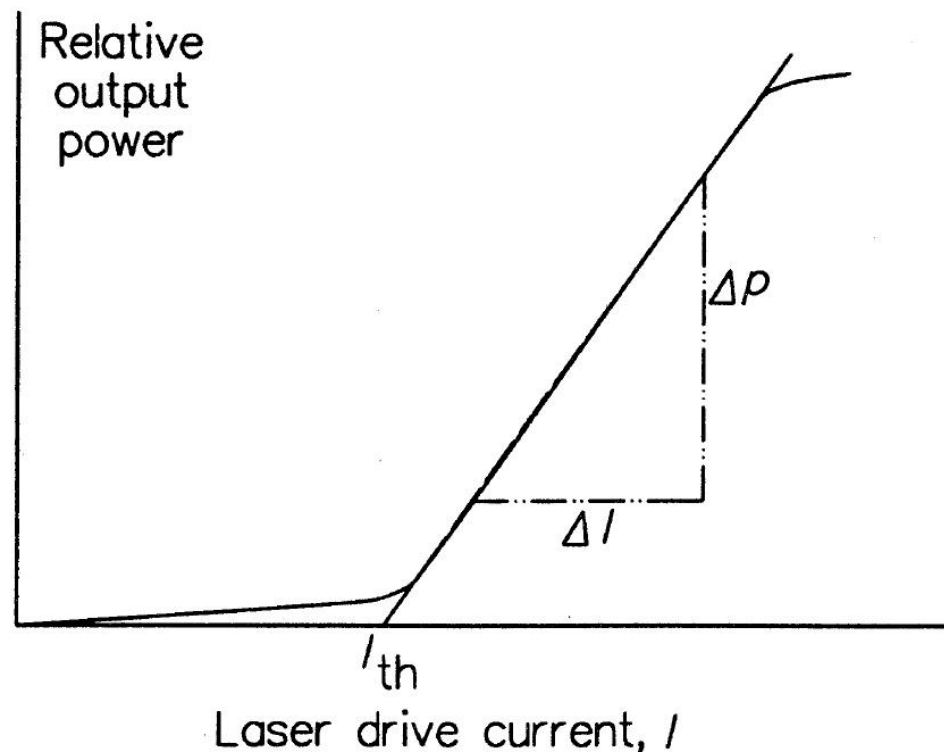


# Caracteristici curent tensiune

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

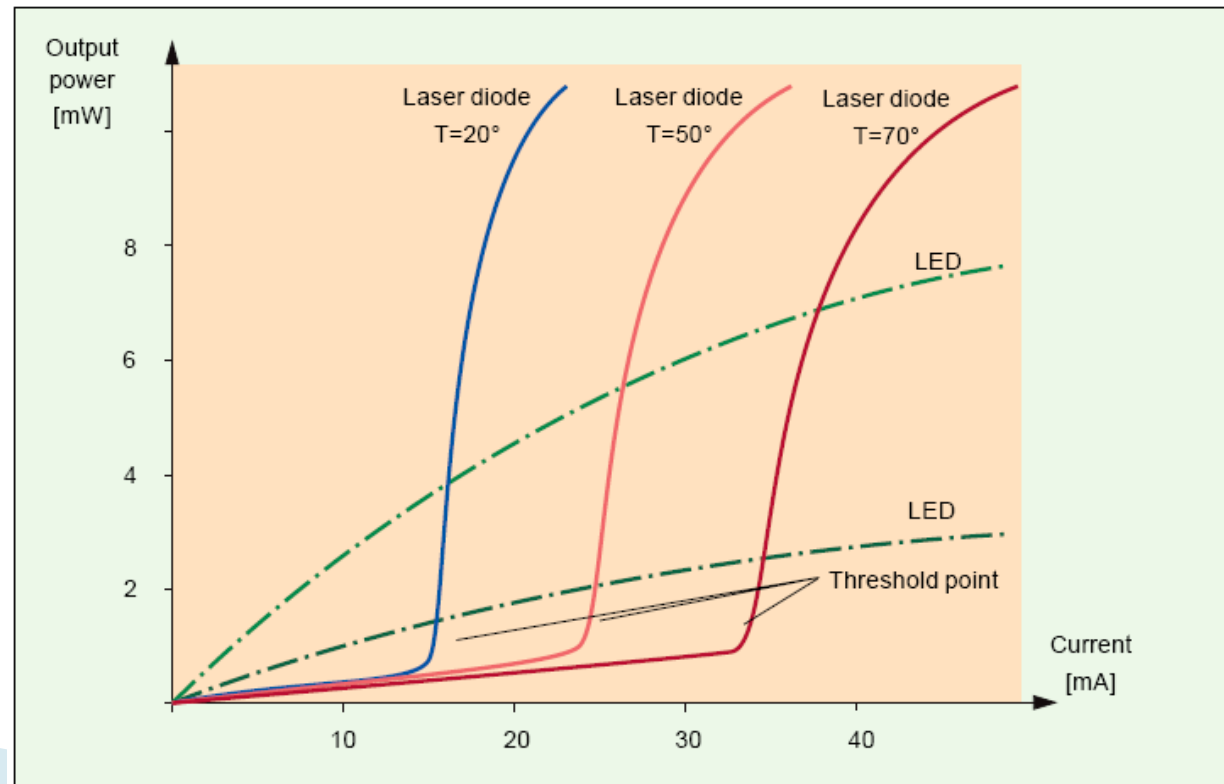
$$I > I_{th}$$

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



# Temperatura si îmbatrânire

- ▶ Curentul de prag variaza cu temperatura si cu timpul
- ▶ Variatia tipica 1–2%/°C





# Dependenta de temperatura

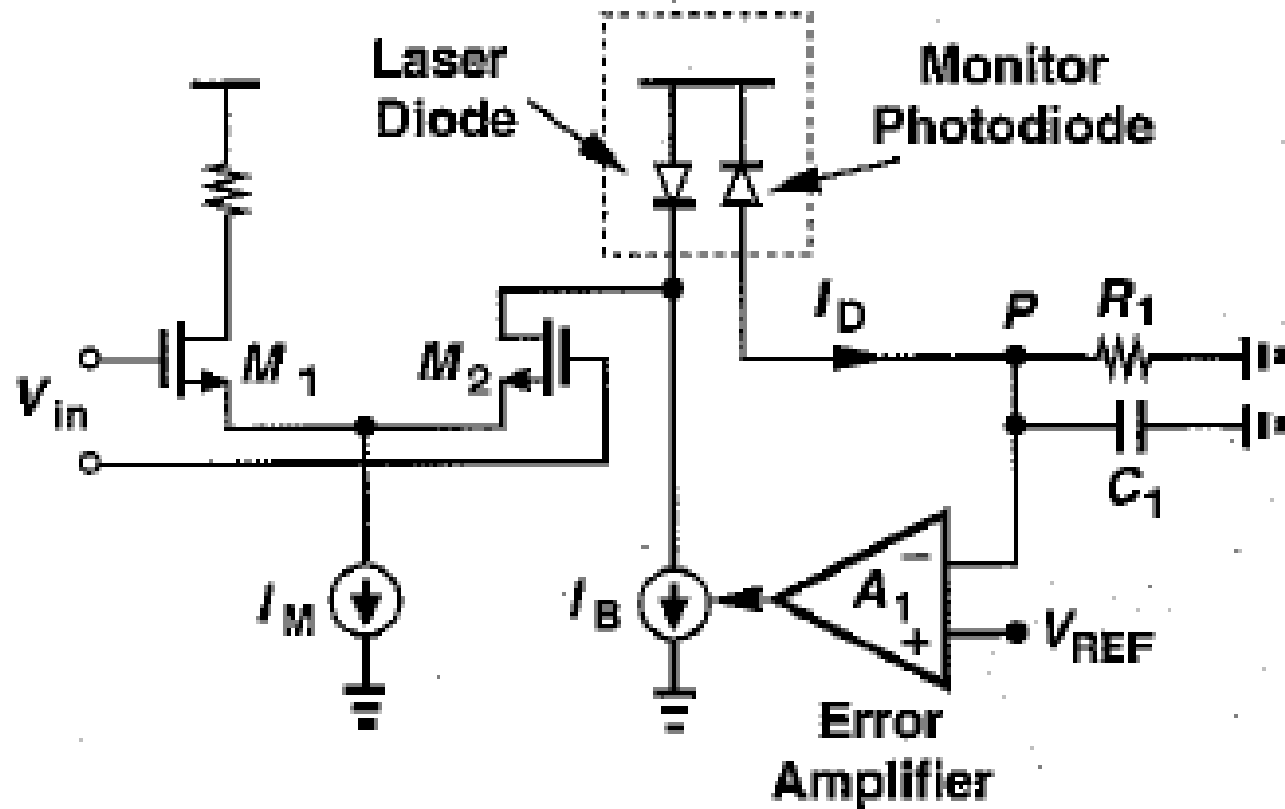
- ▶ Dependenta de temperatura a curentului de prag este exponentiala

- ▶ 
$$I_{th} = I_0 \cdot e^{T/T_0}$$

- ▶  $I_0$  e o constanta determinata la temperatura de referinta

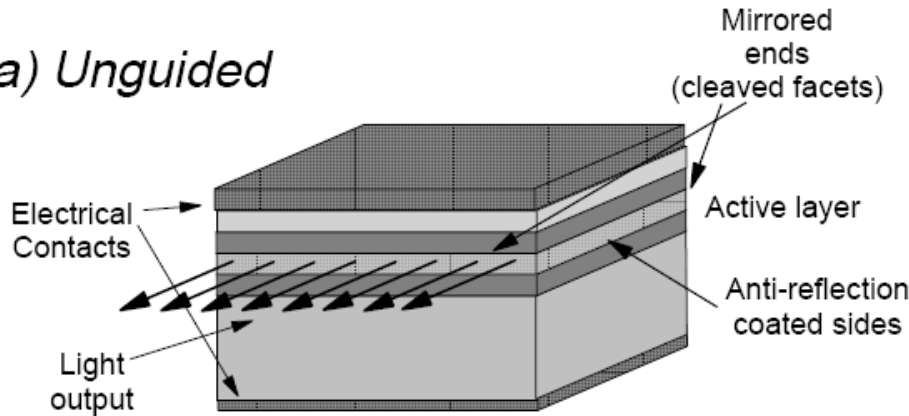
Material	Lungime de unda	$T_0$
InGaAsP	1300 nm	60÷70 K
InGaAsP	1500 nm	50÷70 K
GaAlAs	850 nm	110÷140 K

# Monitorizarea radiației de spate

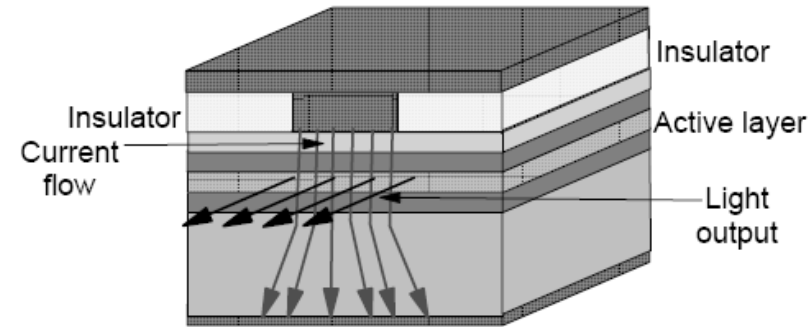


# Dirrecționarea luminii în laser-ul Fabry Perot

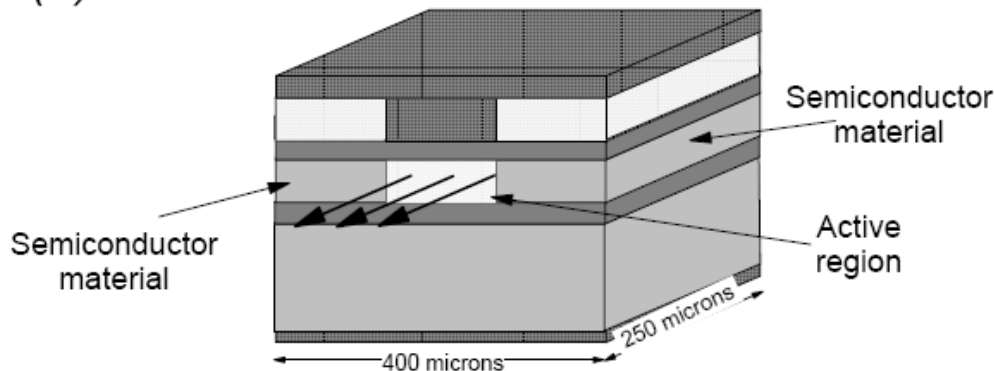
(a) Unguided



(b) Gain Guided

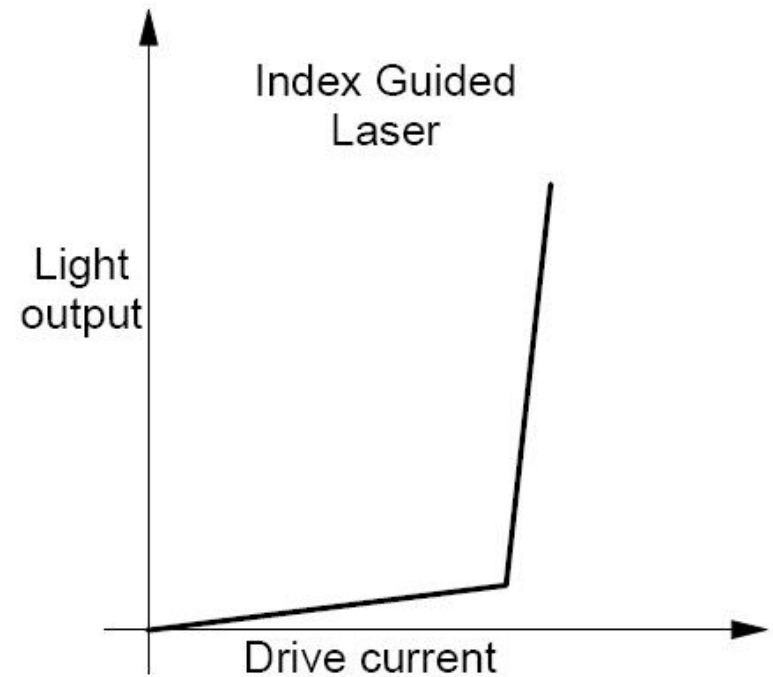
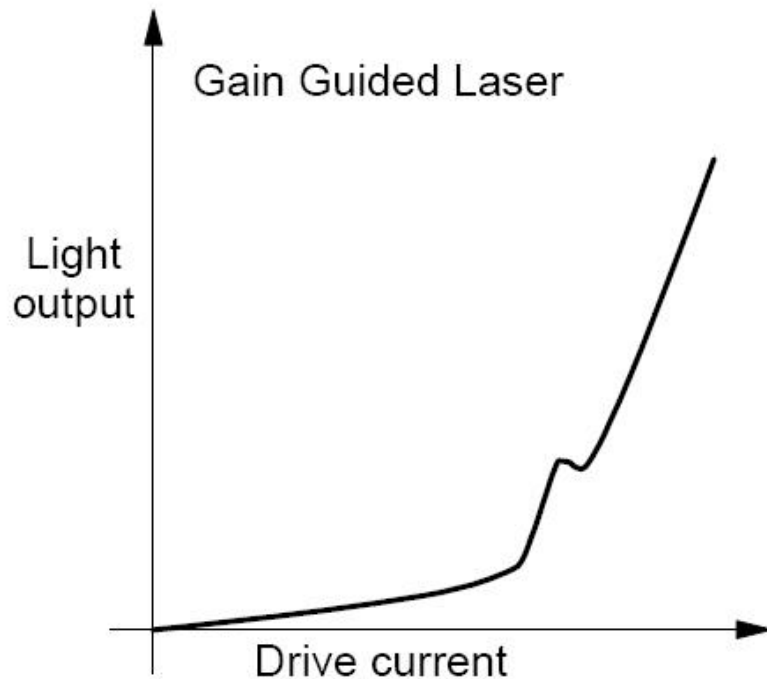


(c) Index Guided

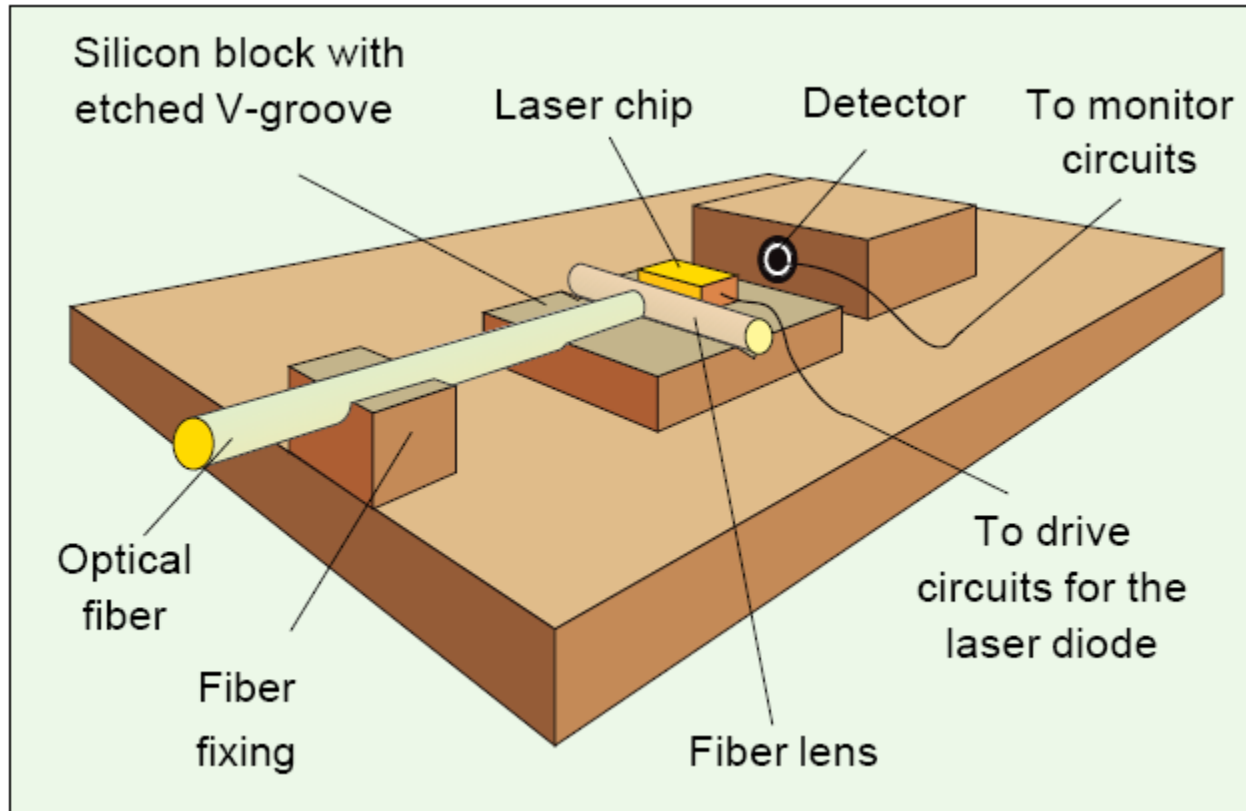


# Efectul ghidarii

- ▶ Gain guided – 8 ÷ 20 linii spectrale (5 ÷ 8 nm)
- ▶ Index guided – 1 ÷ 5 linii spectrale (1 ÷ 3 nm)



# Cuplarea luminii în fibră



# Directivitatea radiatiei exterioare

- ▶ Sursa Lambertiana

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

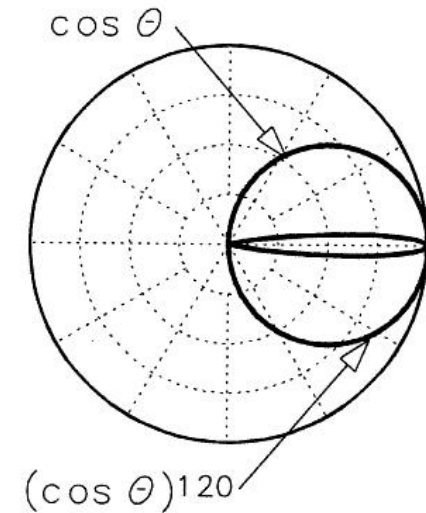
- Eficienta cuplarii in fibra

$$\eta = \frac{P_f}{P_s} = NA^2 \cdot \left( \frac{a}{r_s} \right)^2$$

$$\eta = \frac{P_f}{P_s} = NA^2 \cdot \left( \frac{a}{r_s} \right)^2 \cdot \left( \frac{g}{g+2} \right)$$

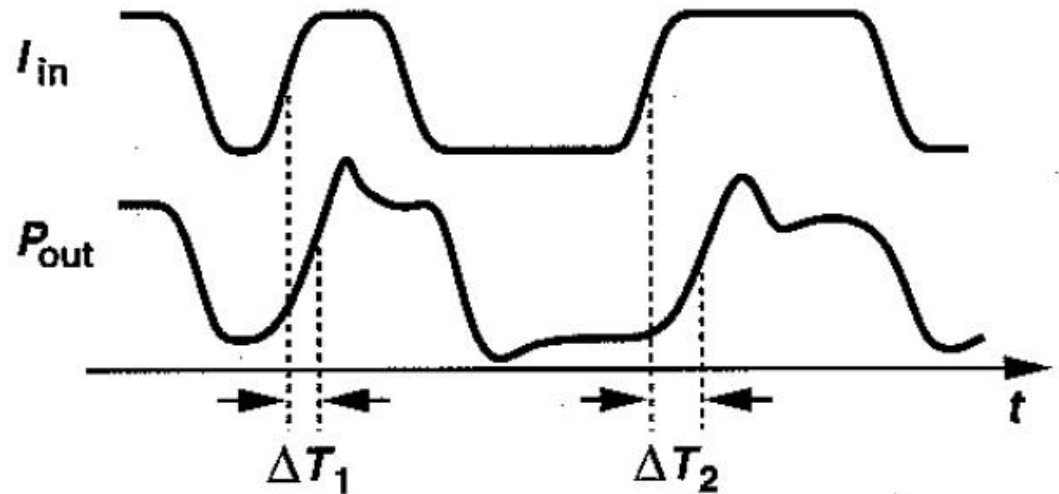
- ▶ Aproximatie Lambertiana pentru surse cu directivitate crescuta

$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos^m \theta \quad \eta = \frac{P_f}{P_s} = \left( \frac{m+1}{2} \right) \cdot NA^2$$



# Turn-on delay

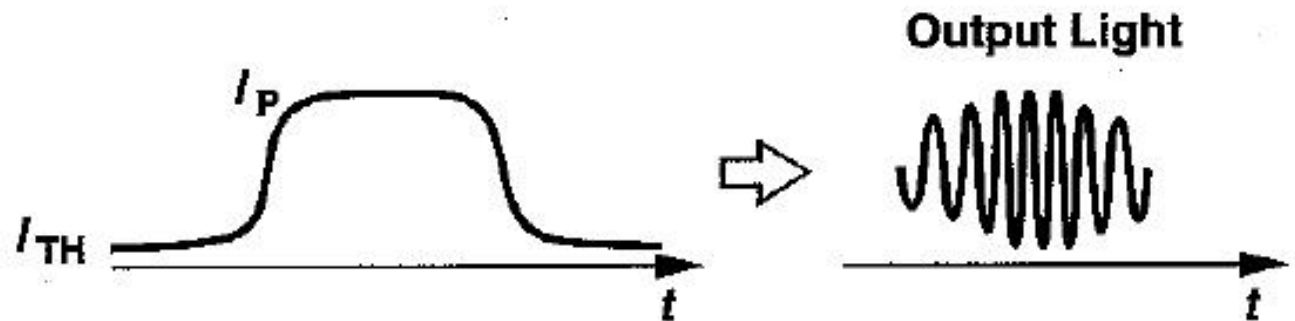
- ▶ La alimentarea cu curent a diodei laser emisia este initial spontana, devenind stimulata dupa amorsarea acesteia
- ▶ emisia spontana este un fenomen intrinsec aleator
- ▶ Intarzierea este variabila – jitter





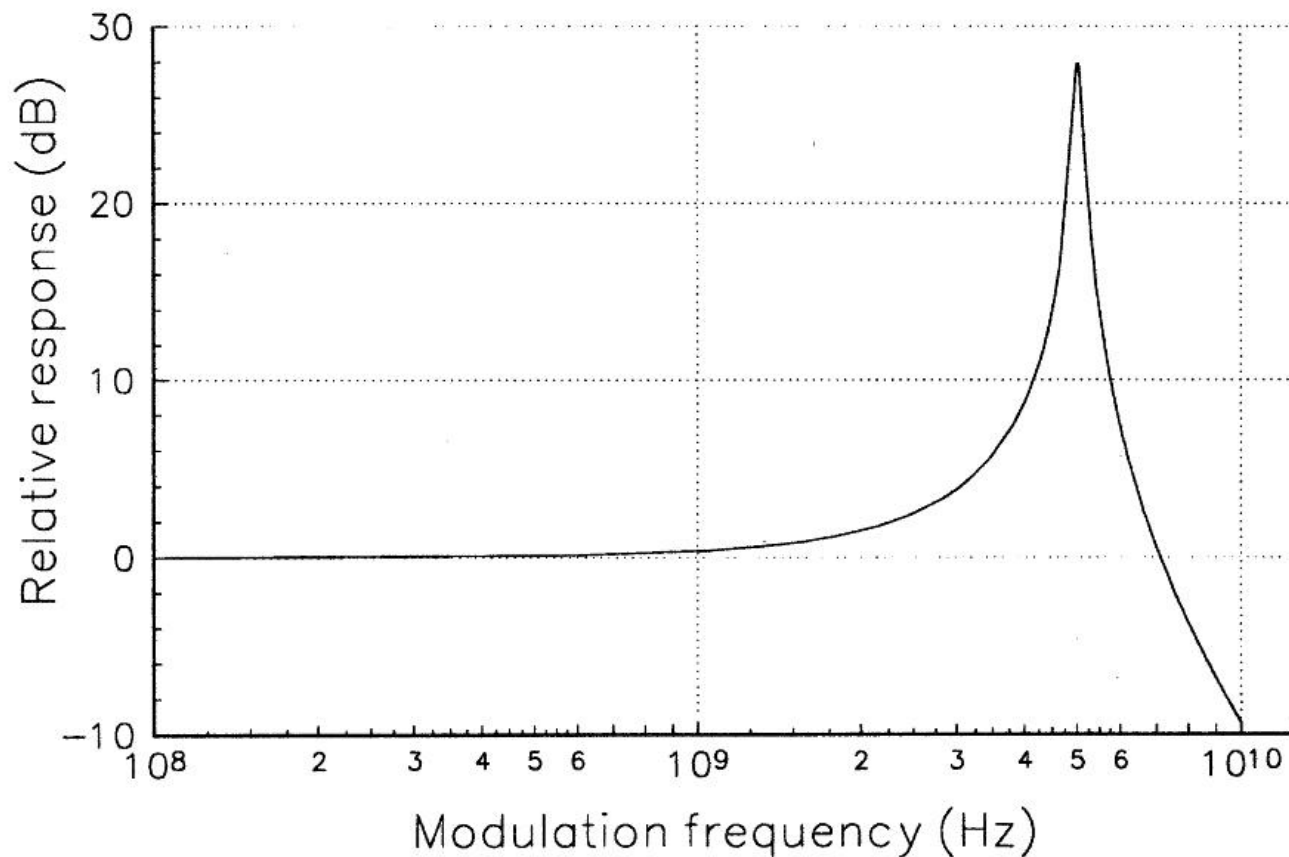
# Chirping

- ▶ Frecventa de oscilatie depinde de indicele de refractie al materialului
- ▶ Indicele de refractie depinde de concentratia de purtatori
- ▶ Cand curentul este modulata in impuls apare o modulatie a frecventei luminii cu efectul cresterii latimii spectrale a diodei (un ordin de magnitudine)



# Raspunsul unei diode laser

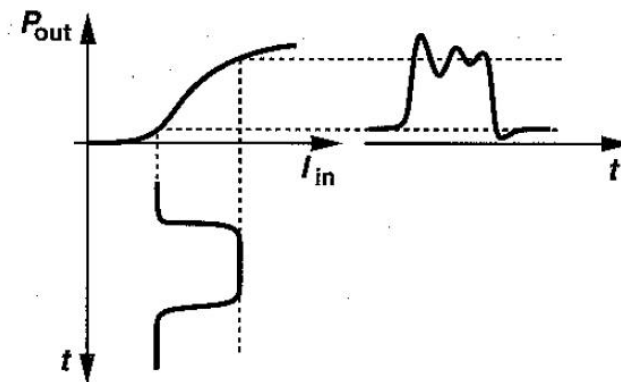
- ▶ oscilatii de relaxare - x GHz



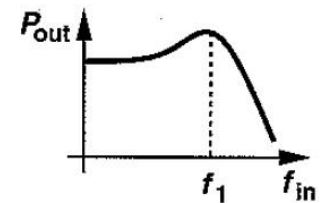
# Oscilatii de relaxare

- ▶ Generate de schimbul de energie între electroni și fotoni
- ▶ Amorsarea emisiei stimulate duce la descreșterea numărului de electroni în starea excitată, ceea ce duce la micșorarea emisiei de fotoni
- ▶ Acumularea din nou a electronilor în starea excitată duce din nou la creșterea puterii

▶  $f_1 = 1 \div 4 \text{ GHz}$



(a)



(b)

# Oscilatii de relaxare

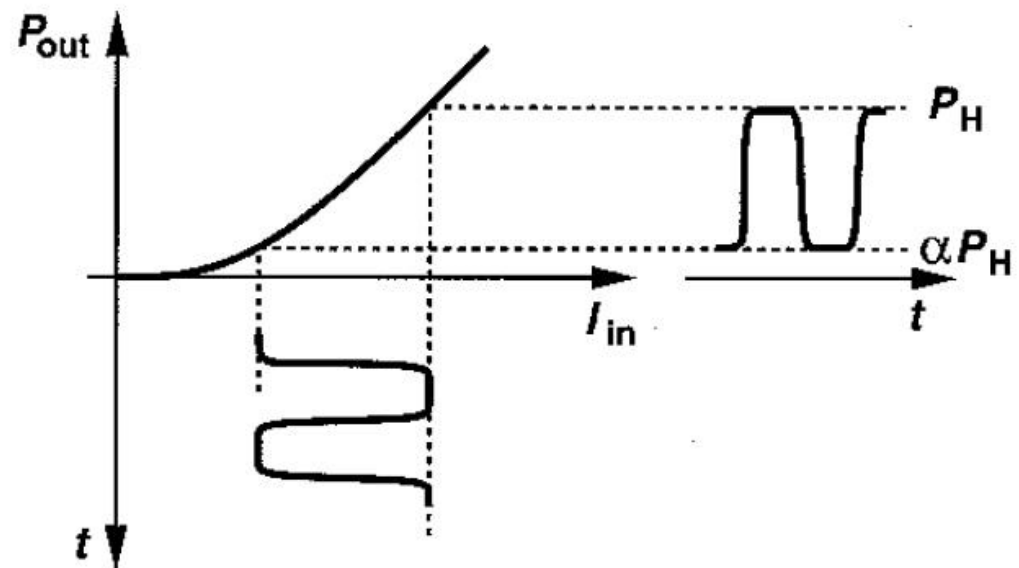
- ▶ Cresterea vitezei si minimizarea erorilor date de oscilatiile de relaxare si variatiile timpului de amorsare dioda este **partial** stinsa in timpul transmisiei unui nivel 0 logic

- ▶ Raport de stingere

$$ER = \frac{P_H}{\alpha \cdot P_H} = \frac{1}{\alpha}$$

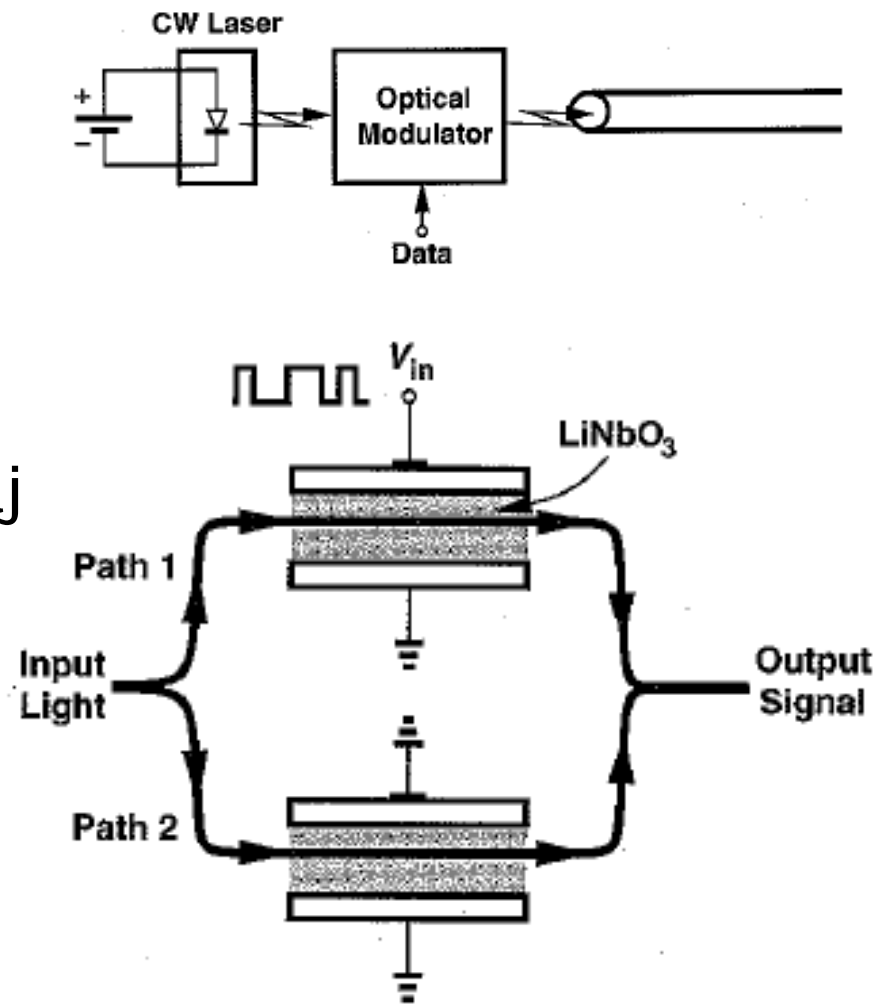
- ▶ Raportul semnal zgomot scade cu  $(1-\alpha)$

- ▶ Tipic  $ER = 10 \div 15 \text{dB}$



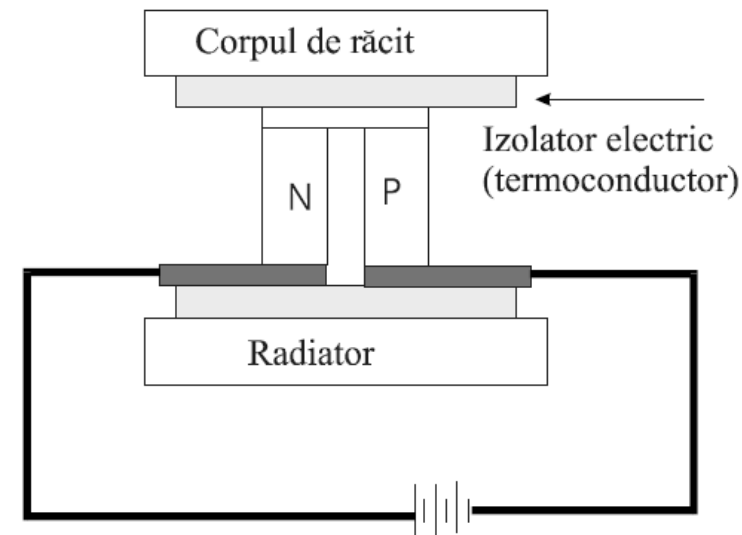
# Modulație optică

- ▶ Pentru viteze mari se prefera utilizarea emisiei continue și modularea optică a radiației
- ▶ În  $\text{LiNbO}_3$  viteza luminii depinde de câmpul electric, ceea ce permite introducerea unui defazaj egal  $\pi$
- ▶ Crește complexitatea circuitului de control
- ▶ Tensiuni de 4÷6 V necesare



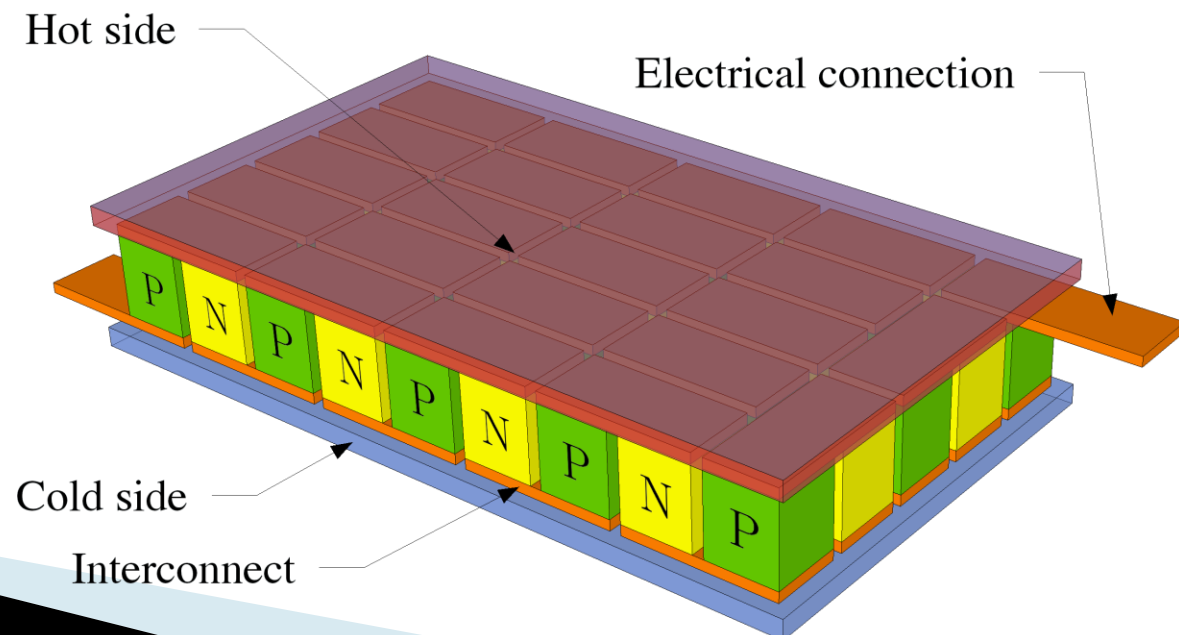
# Dispozitiv termoelectric (Peltier)

- ▶ Jonctiunea intre doua materiale conductoare diferite poate genera sau absorbi caldura in functie de sensul curentului
- ▶ Tipic se utilizeaza doua regiuni semiconductoare puternic dopate (tipic telurit de bismut) conectate electric in serie iar termic in paralel



# Dispozitiv termoelectric (Peltier)

- ▶ Poate produce o diferenta maxima de temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$
- ▶ Lucreaza la nivele mici de caldura disipata
- ▶ Devine cu atat mai ineficient cu cat fluxul termic disipat e mai mare
- ▶ De 4 ori mai putin eficiente decat sistemele cu compresie de vapori

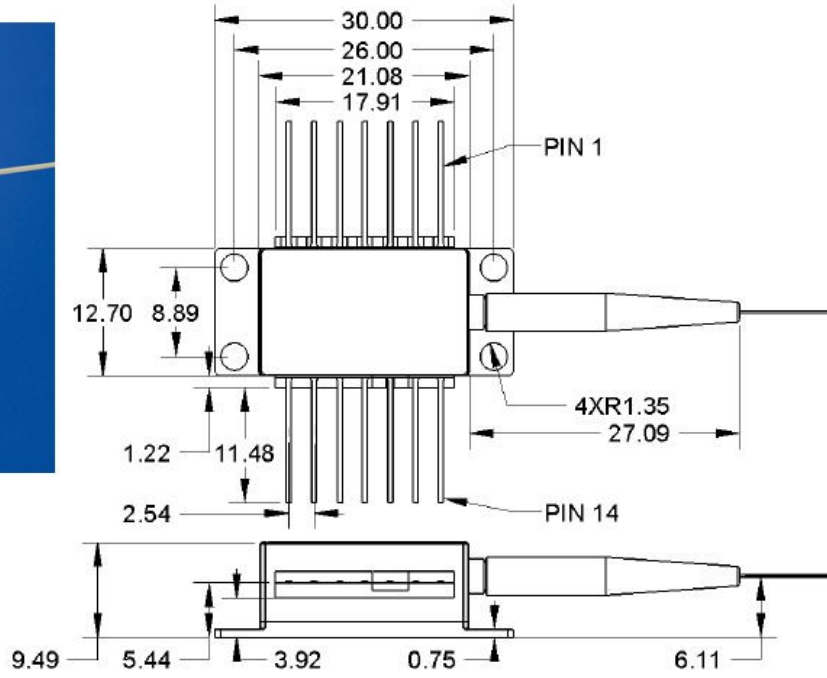




# 1550nm DFB Laser

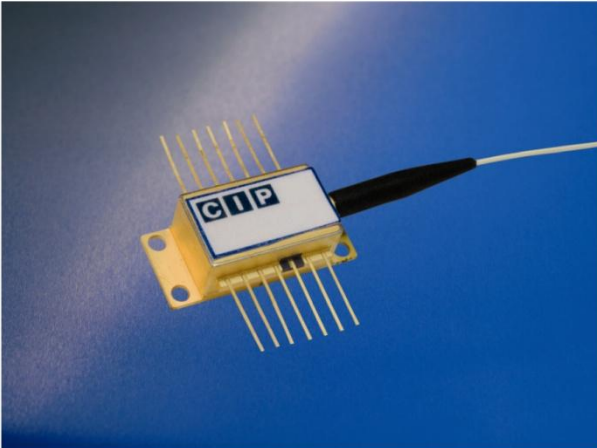
## Mechanical Drawing

All units in mm



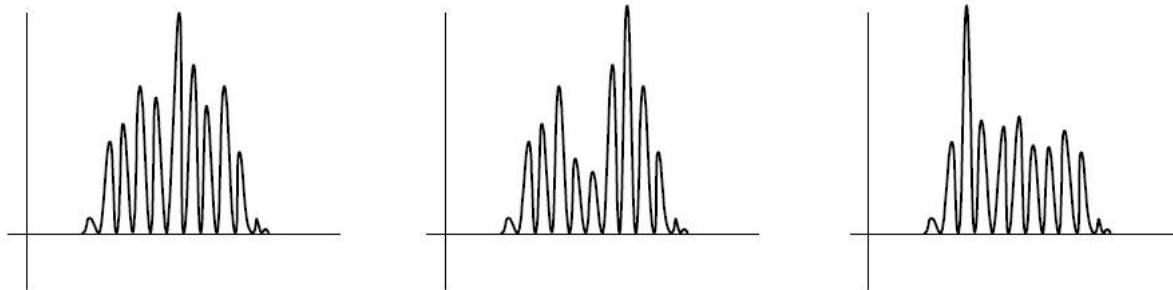
## Pin out

Pin	Description
1	Thermistor
2	Thermistor
3	Laser Cathode (Bias)
4	Monitor PD Anode
5	Monitor PD Cathode
6	TEC +
7	TEC -
8	Case GND, Laser Anode
9	Case GND, Laser Anode
10	Case GND, Laser Anode
11	Case GND, Laser Anode
12	Laser Cathode (modulation)
13	Case GND, Laser Anode
14	Case GND, Laser Anode



# Alte caracteristici DL

- ▶ Mode hopping – salt de mod (hole burning)

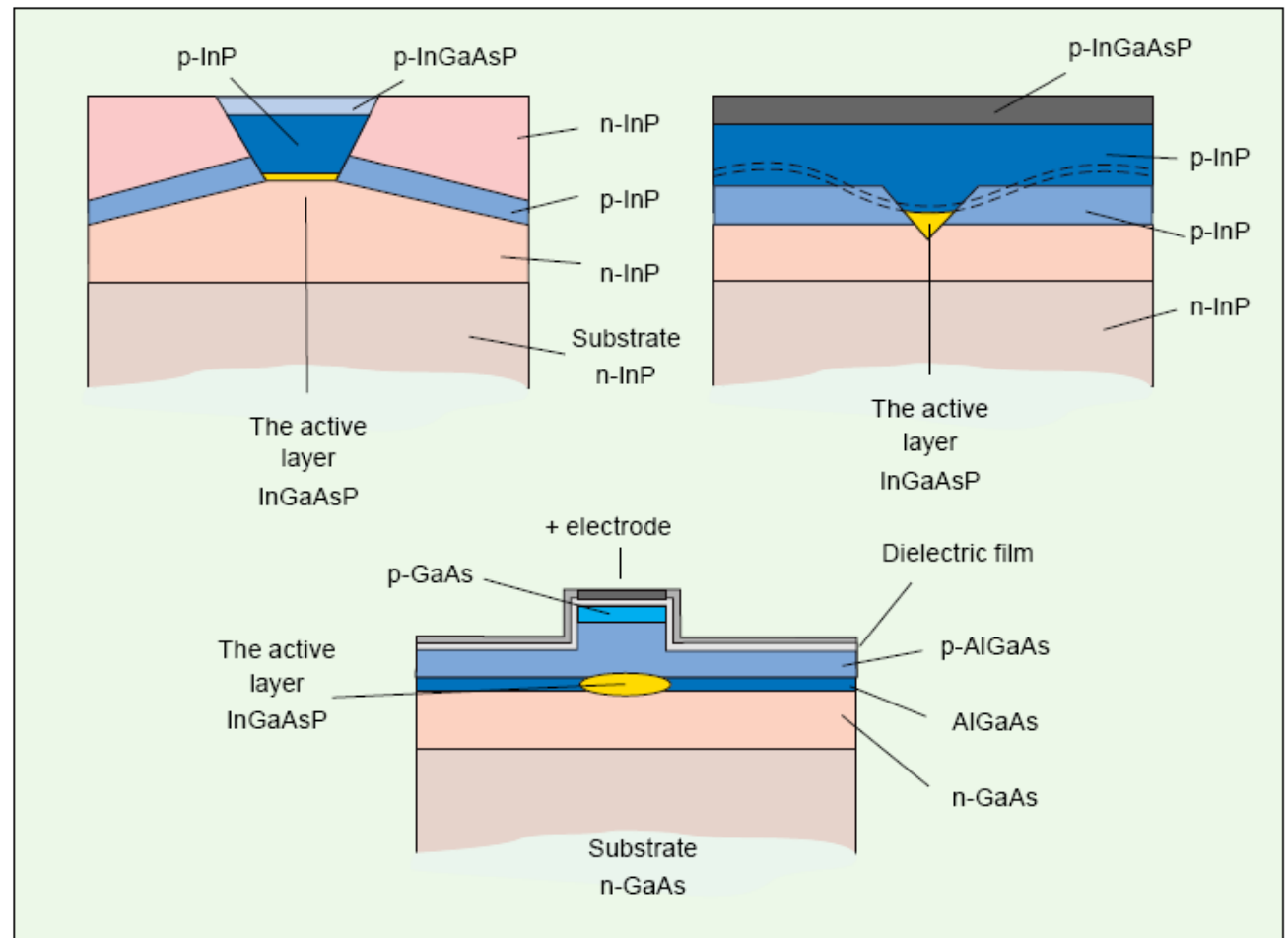


- ▶ RIN – Relative Intensity Noise (generat de emisia spontana)
- ▶ Zgomot de faza (idem) – necesitatea modulatiei in amplitudine
- ▶ Zgomot intercavitati (reflexiile din exterior in zona activa)
- ▶ Drift – variatia parametrilor cu varsta si temperatura (in special distanta intre oglinzi)

# Diode LASER cu heterojunțione

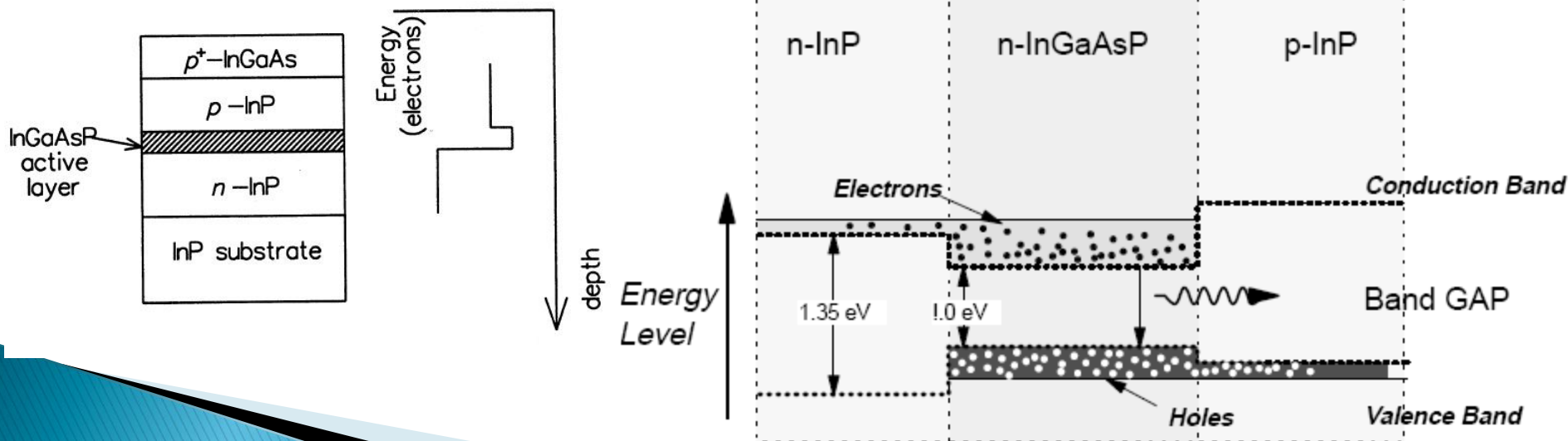
Heterojunțione  
ingropata

Heterojunțione  
muchie (ridge)



# Heterojunții – principiu

- ▶ Concentrare verticală a purtătorilor
  - Electronii sunt atrași din zona n în zona activă
  - O barieră energetică existentă între zona activă și zona n concentrează electronii în zona activă
  - Situație similară corespunzătoare golurilor
  - Purtătorii sunt concentrați în zona activă, crescând eficiența

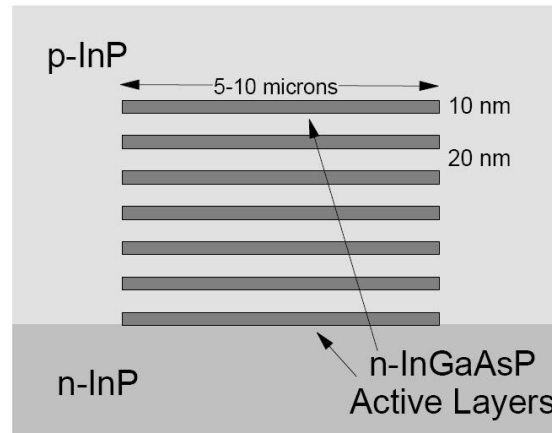


# Quantum Well Laser

- ▶ Cand lumina e pastrata in cavitati mai mici decat lungimea de unda nu mai poate fi modelata prin unda, modelul devine cuantic
- ▶ Daca inaltimea zonei active scade la 5–20 nm comportarea diodei laser se schimba
  - energia necesara pentru inversarea de populatie se reduce, deci curentul de prag scade
  - dimensiunea redusa a zonei active duce la scaderea puterii maxime

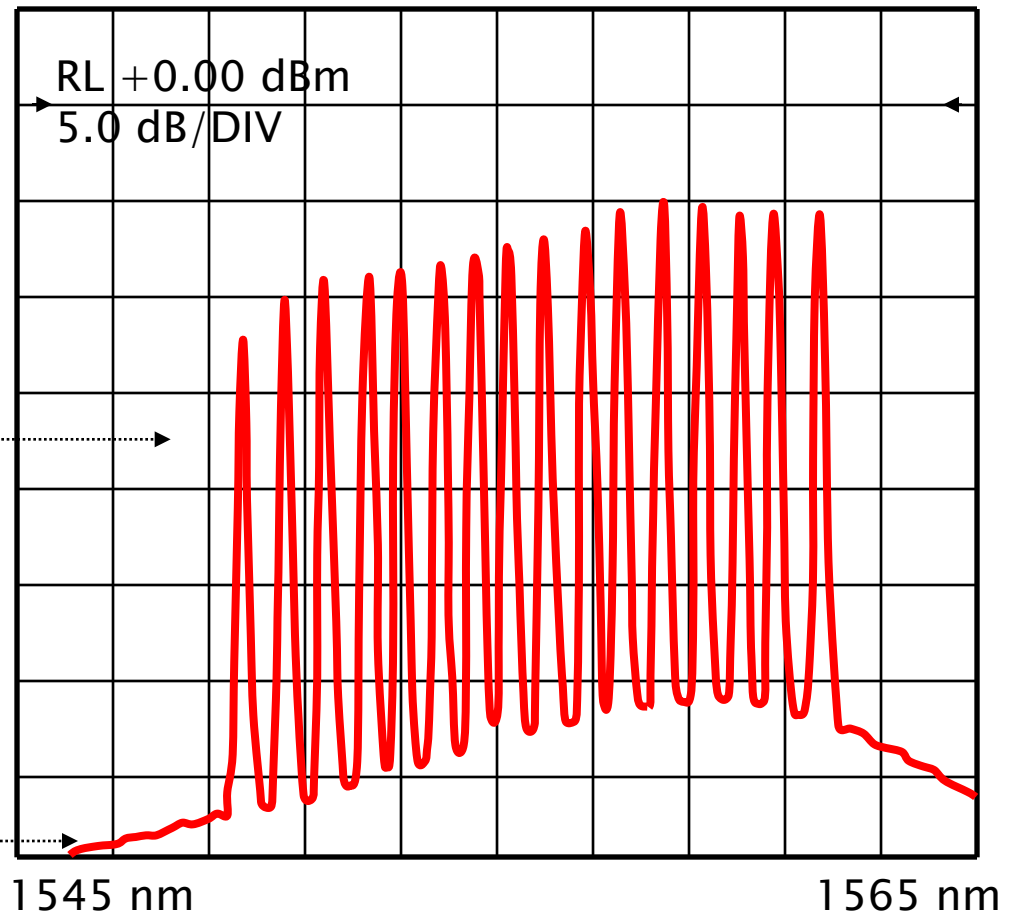
# Quantum Well Laser

- ▶ multiple straturi subtiri suprapuse – Multiple Quantum Well



- ▶ Avantaje
  - curent de prag redus
  - stabilitate crescuta a frecventei la functionarea in impuls
  - latime mica a liniilor spectrale
  - zgomot redus

# Spectrul WDM – Wavelength Division Multiplexing



Canale: 16  
Spațiere: 0.8 nm

Emisie spontană  
Amplificată (ASE)

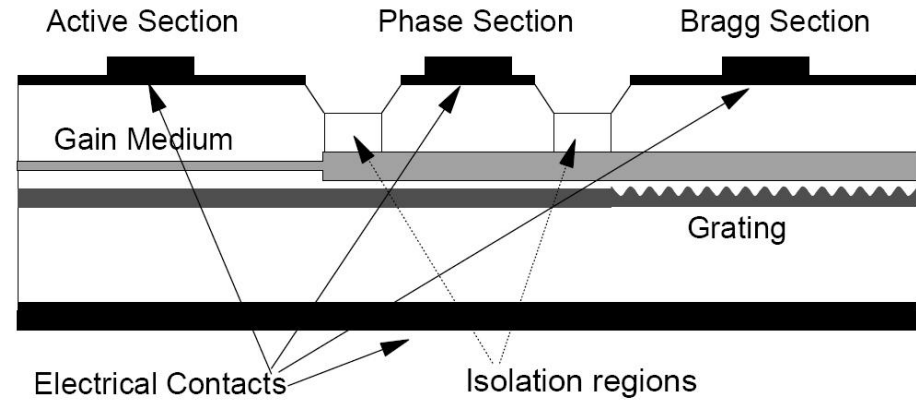
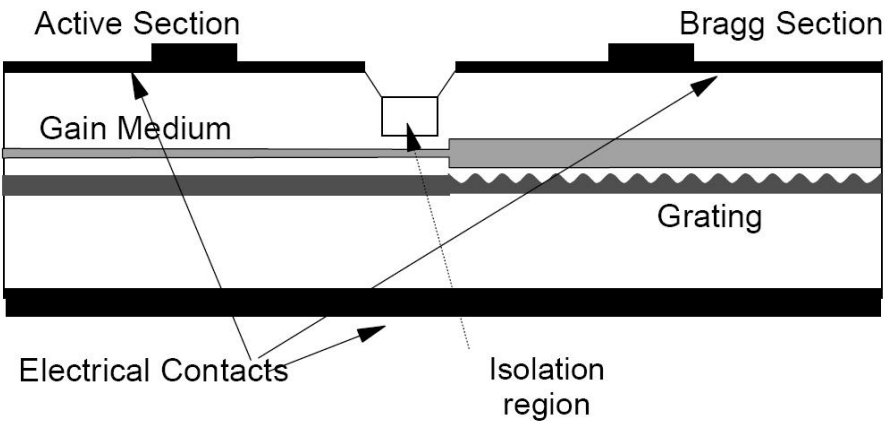
# Diode laser reglabile

## ▶ Necesitate

- In sistemele WDM exista necesitatea (in propuneri pentru arhitecturi viitoare de retele) pentru reglaj foarte rapid al lungimii de unda pe un anume canal – zeci de ns
- In aceleasi sisteme intervine necesitatea rutarii prin lungime de unda – timp de reglaj necesar de ordinul secundelor)
- realizarea cererilor de date – timp de reglaj de ordinul sute de  $\mu$ s
- reglarea emitatorilor individuali in sistemele WDM
  - lipsa necesitatii controlului strict la productia diodelor
  - degradarea lungimii de unda in timp



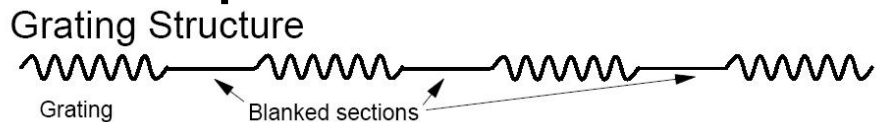
# Diode laser reglabile



- ▶ Curentul trece prin zona activa ducand la amplificarea luminii
- ▶ curentul ce parcurge zona corespunzatoare reflectorului Bragg modifica indicele de refractie al acestei zone deci lungimea de unda
- ▶ zona centrala suplimentara permite reglaj fin suplimentar in jurul valorii impuse de reflectorul Bragg

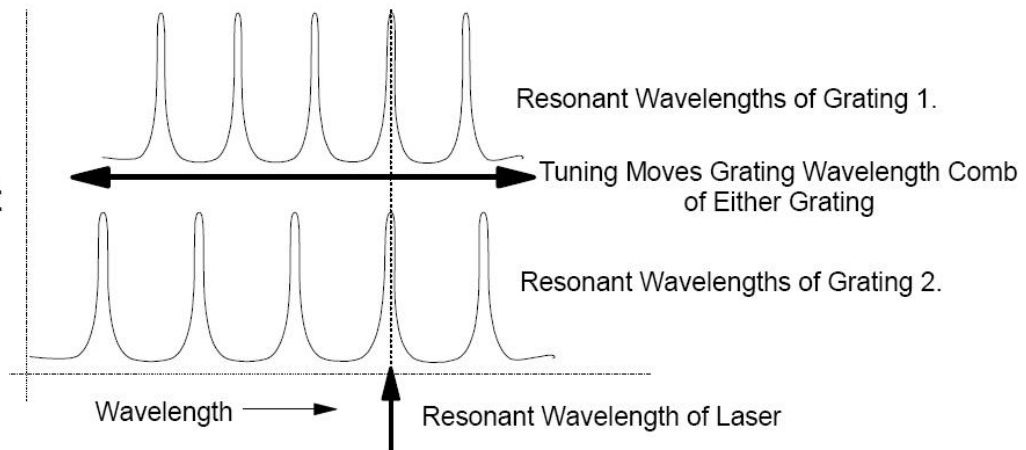
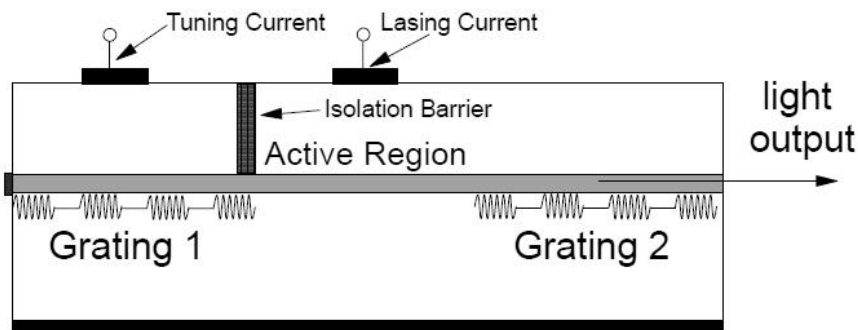
# Diode laser reglabile

- ▶ Dezavantajul metodelor anterioare e dat de limita redusa a reglajului ( $\sim 10\text{nm}$ )
- ▶ Reflectorul Bragg esantionat (periodic) produce spectru de filtrare discret

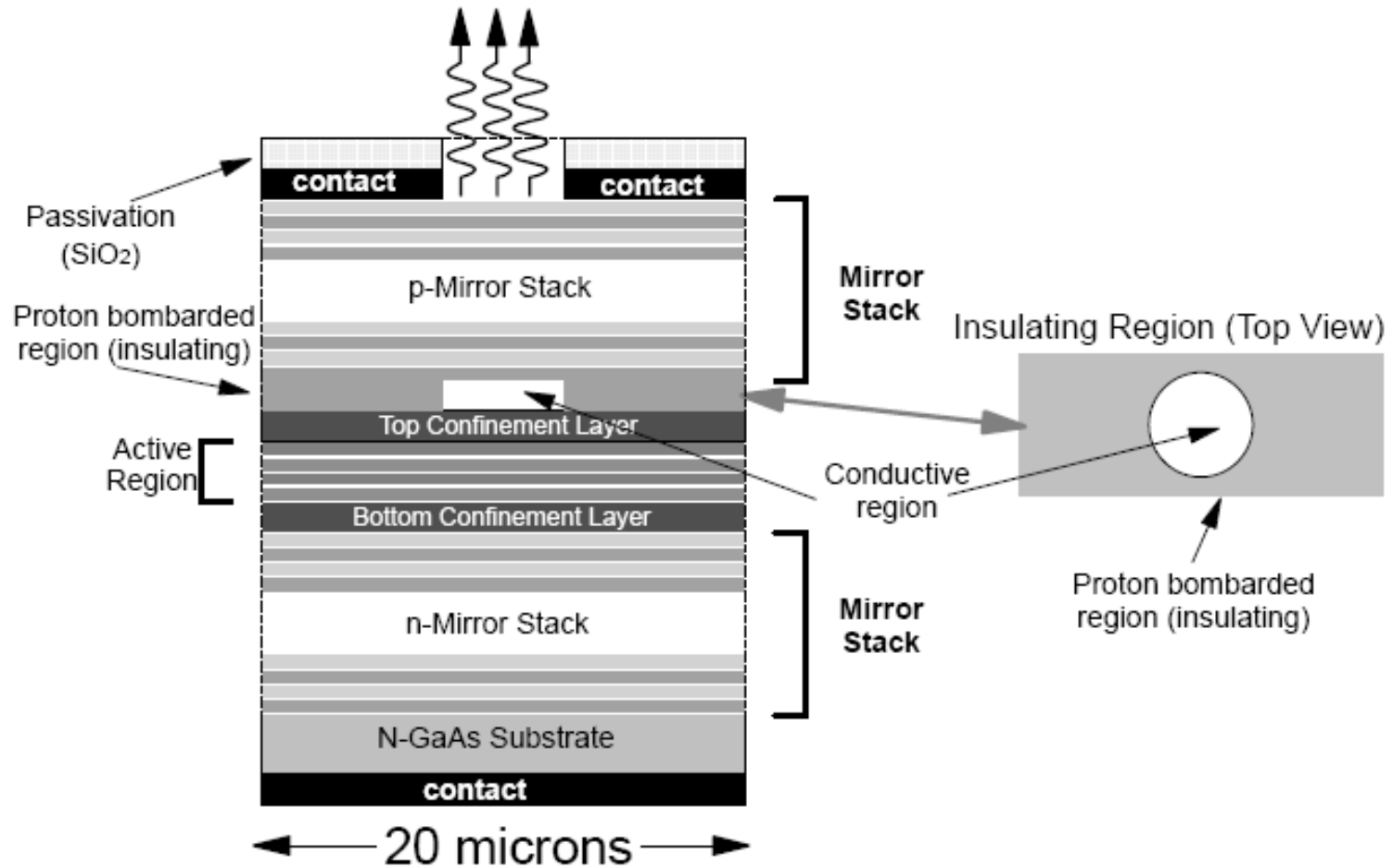


Dezavantaj :  
reglajul e discret

- ▶ Regland unul din reflectori se obtine rezonanta la suprapunerea celor doua spectre

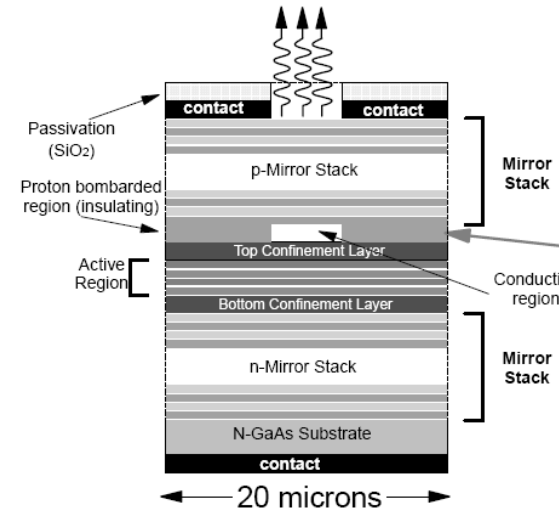


# Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)



# Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)

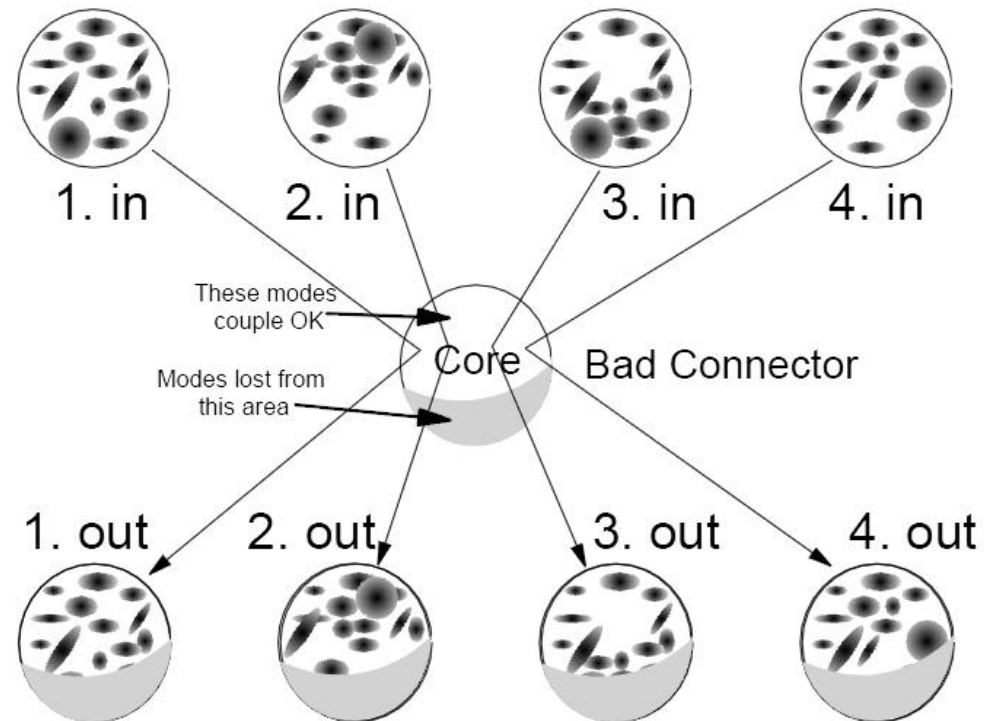
- ▶ Oglinzile pot fi realizate din straturi succesive din semiconductori cu indici de refractie diferiti – reflector Bragg
- ▶ Prelucrarea laterala se rezuma la taierea materialului
  - ▶ Caracteristici
    - ▶ puteri de ordinul 1mW
    - ▶ lungimi de unda 850 si 980 nm
    - ▶ radiatie de iesire circulara cu divergenta redusa
    - ▶ Curenti de prag foarte mici (5mA) si putere disipata redusa
    - ▶ circuite de control speciale nu sunt necesare
    - ▶ Banda de modulatie mare (2.4GHz)
    - ▶ Stabilitate mare cu temperatura si durata de viata



# VCSEL

## ▶ Caracteristici

- VCSEL produce mai multe moduri transversale
  - insensibila la pierderile selective la mod din fibrele multimod (principala limitare in utilizarea diodelor laser in fibrele multimod)



# Contact

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