

Optoelectronică, structuri și tehnologii

Curs 8
2012/2013

Orar

▶ Curs

- marti, 13-16, P7
- $2C \Rightarrow 3C$
 - $(14-4)*2/3 \approx 6.66$
 - $4+6.66=11-0.33$

Dioda Laser

Capitolul 9

Partea I

Caracteristici dioda laser

▶ Avantaje

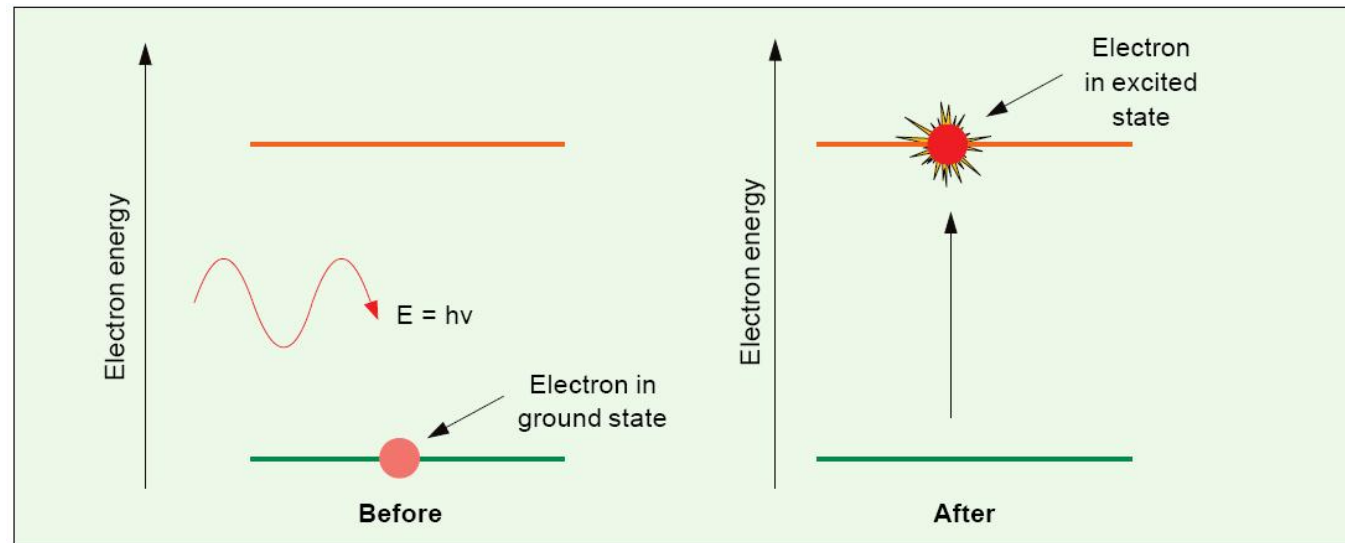
- Putere optica ridicata (50mW functionare continua, 4W functionare in impulsuri)
- Precizie ridicata a controlului (impulsuri cu latimea de ordinul fs – femptosecunde) – viteza mare de lucru
- Spectru ingust, teoretic LASER ofera o singura linie spectrala
- Lumina coerenta si directiva (~80% poate fi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

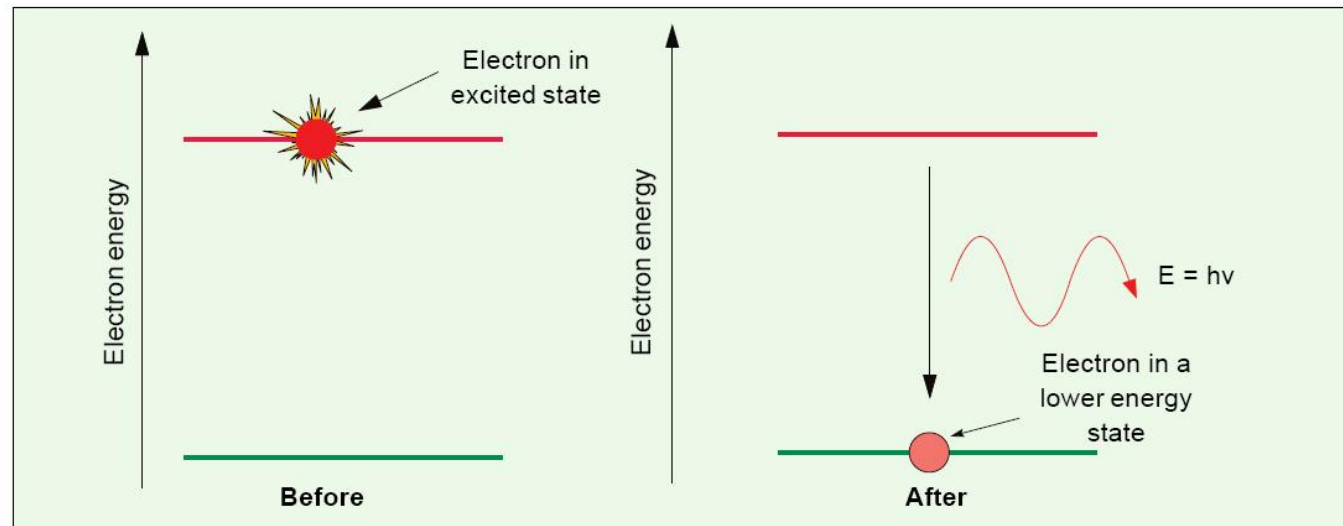
Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ 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



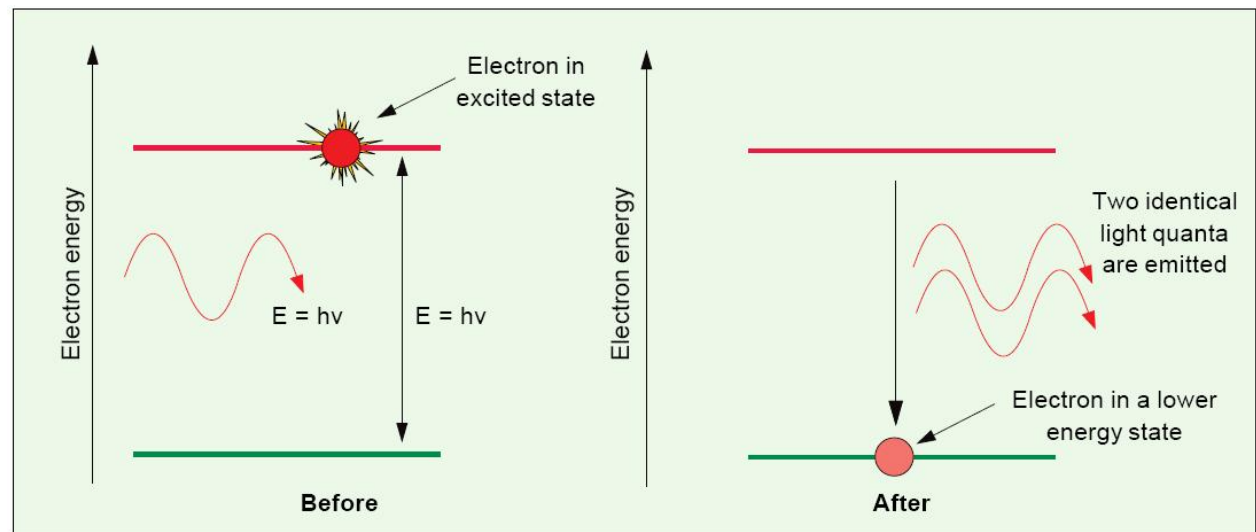
Dioda LASER – Principiu de operare

- ▶ 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

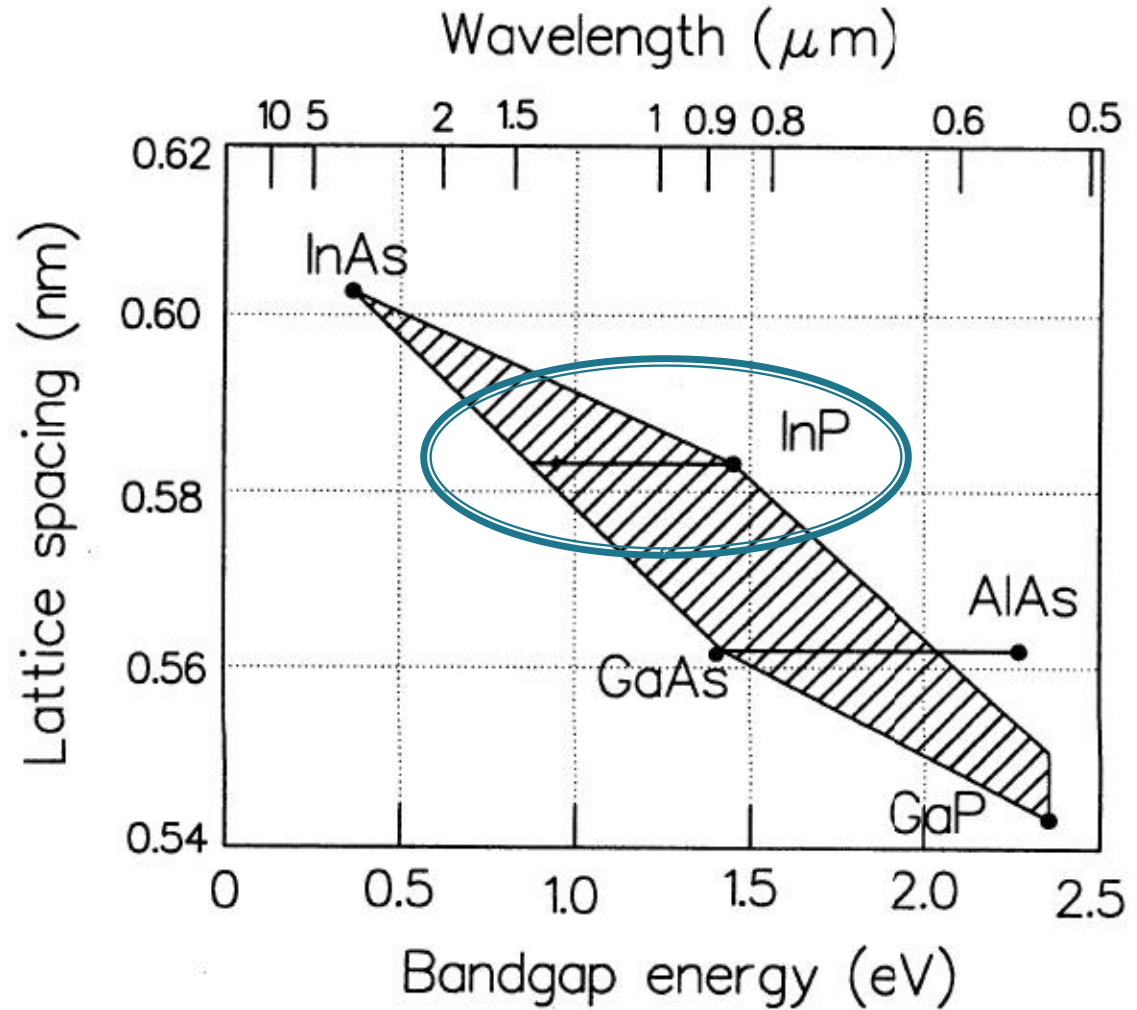
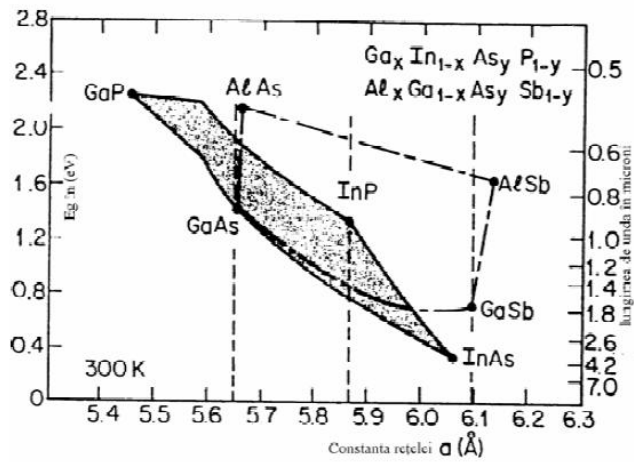
Lățimea benzii interzise/lungime de undă pentru materialele uzuale

Material	Formula	Wavelength Range λ (μm)	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

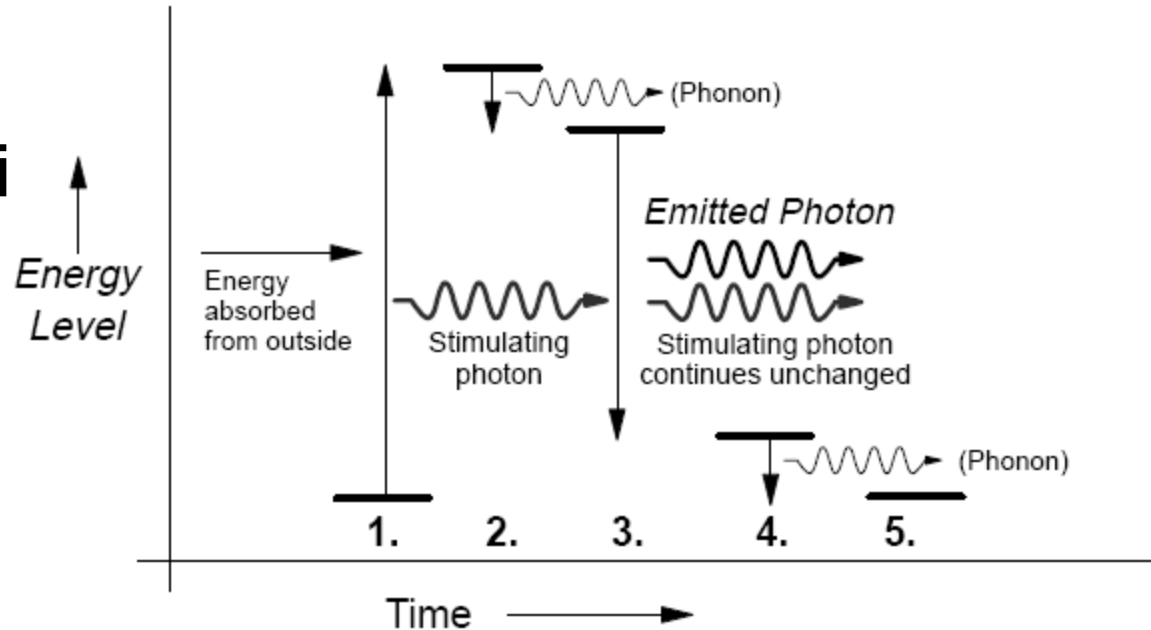
- ▶ Inversiune de populatie
 - necesara deoarece electronii au capabilitatea de a absorbi energie **la aceeasi frecventa** la care are loc emisia stimulata
 - se defineste probabilistic: probabilitatea de emisie stimulata sa fie mai mare decat probabilitatea de absorbtie

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

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

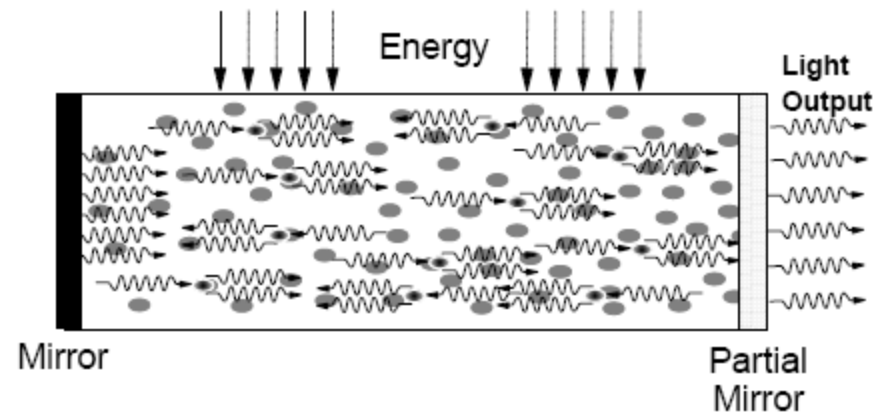
Materialie cu 4 nivele energetice

- ▶ 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



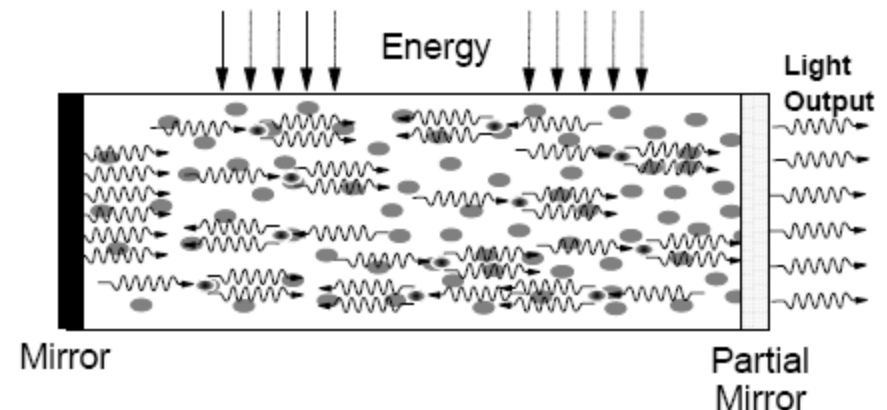
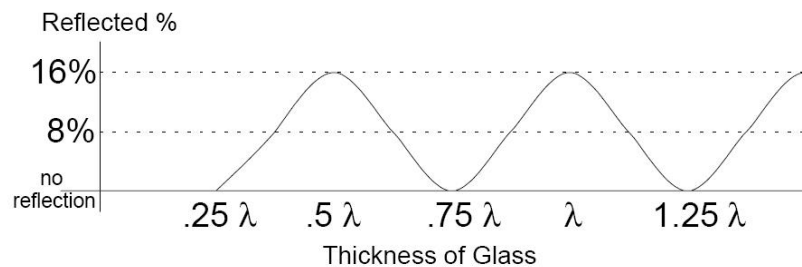
Dioda LASER – Principiu de realizare

- ▶ 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)



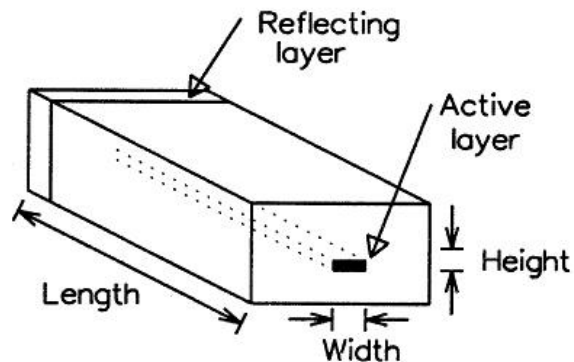
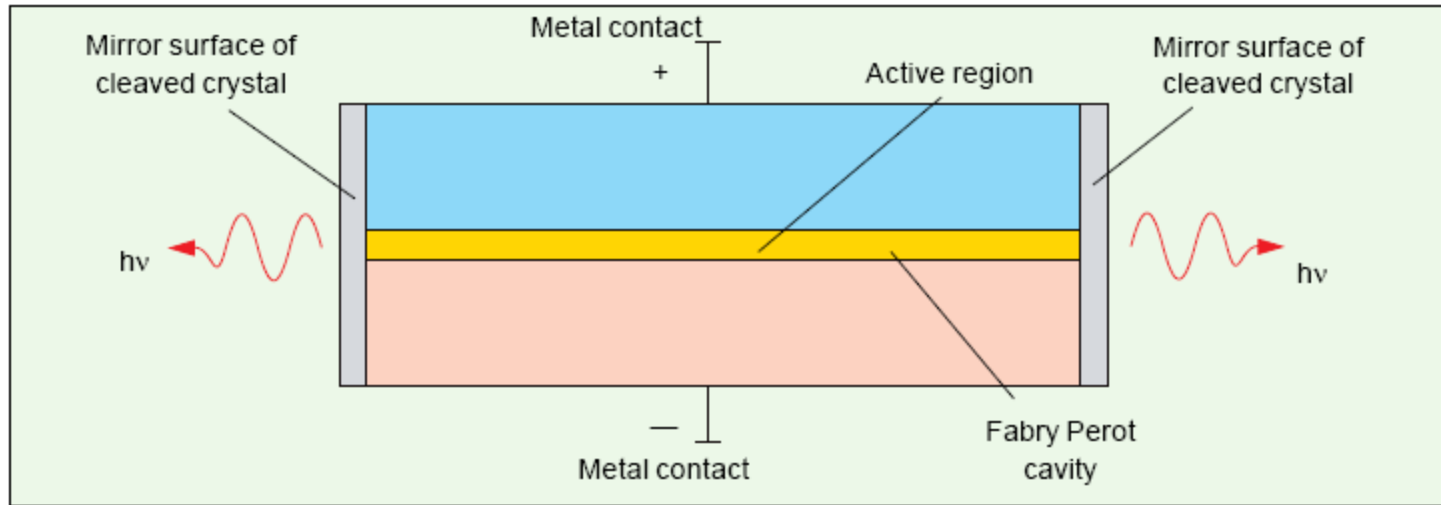
Dioda LASER – Principiu de realizare

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

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

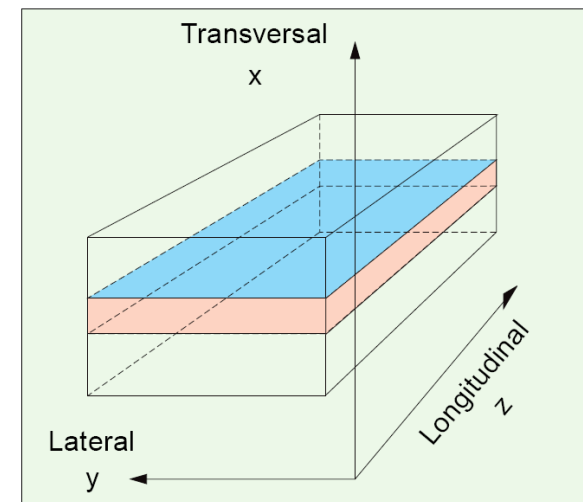
- ▶ Pentru eficientizarea pomparii de energie din exterior $L = 100 \div 200 \mu\text{m}$, $k \cong 400$

Dioda LASER Fabry Perot

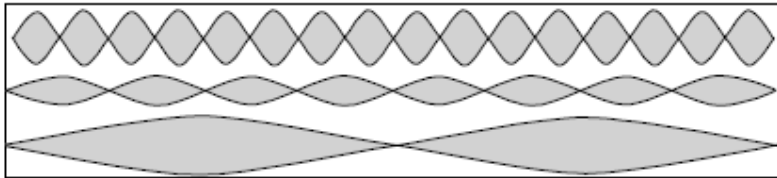


Height: $0.1 - 0.2 \mu\text{m}$
Length: $250 - 500 \mu\text{m}$
Width: $5 - 15 \mu\text{m}$
Sides: rough-cut
Front: cleaved
Back: 100% reflector

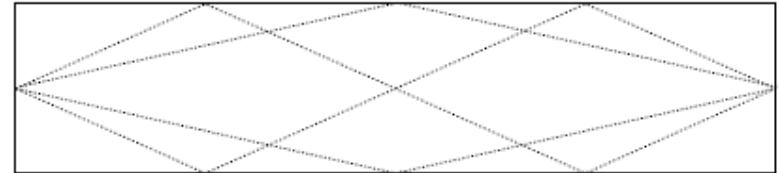
Definirea directiilor in dioda LASER



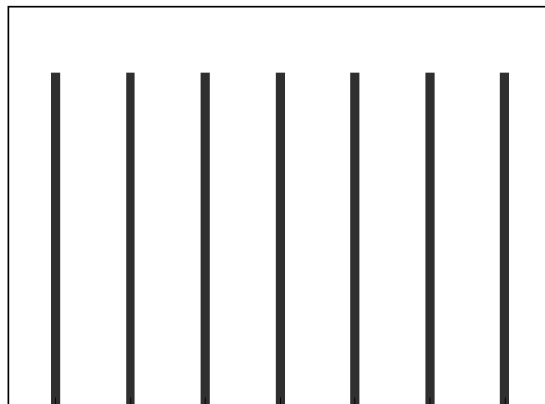
Spectrul diodei LASER



Longitudinal Modes



Lateral Modes



1.490 1.494 1.497 1.5 1.503 1.507 1.510
Wavelength (nm)

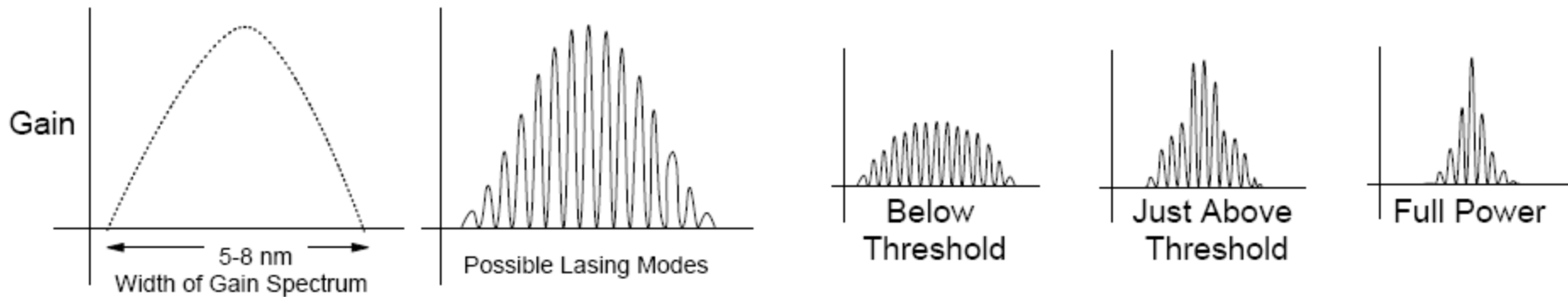
$$f_k = k \cdot \frac{c_0}{2 \cdot n \cdot L}$$

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

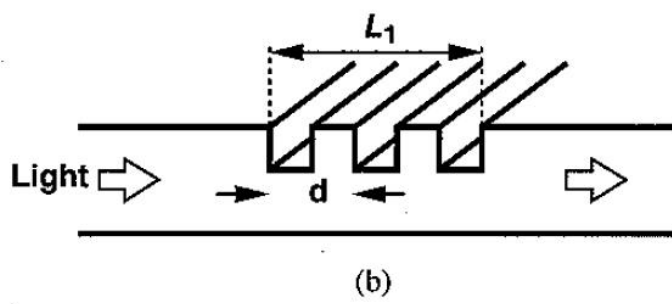
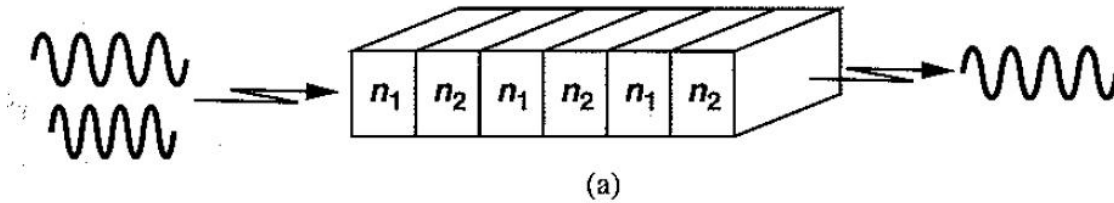
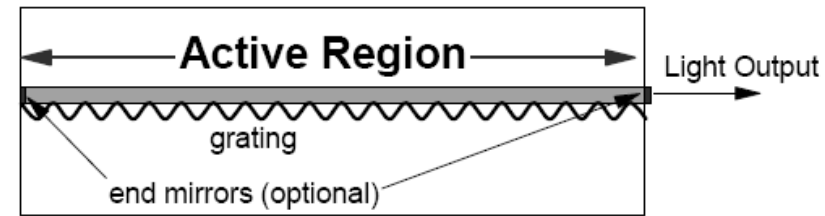
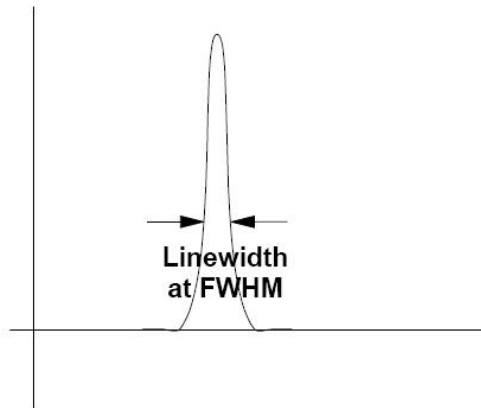
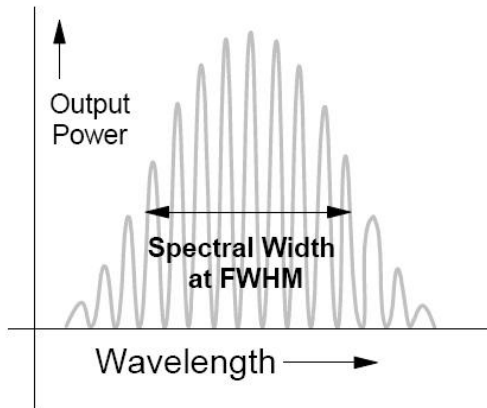
$$\Delta \lambda \cong \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot n \cdot L}$$

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)

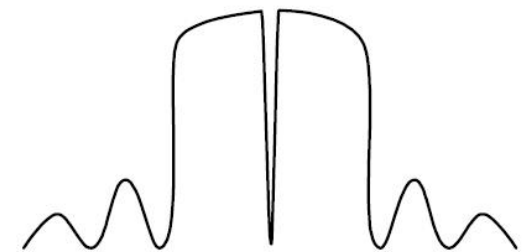
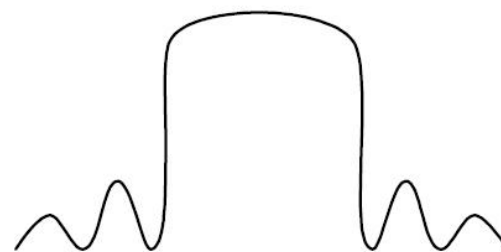
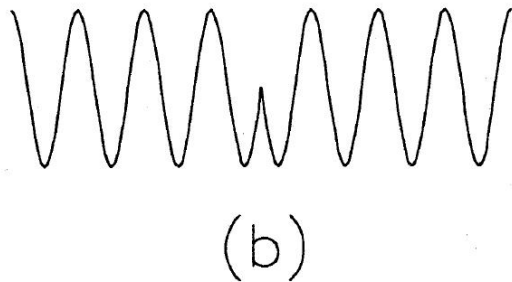
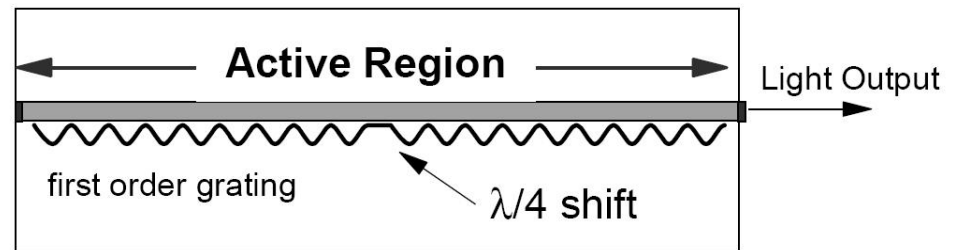
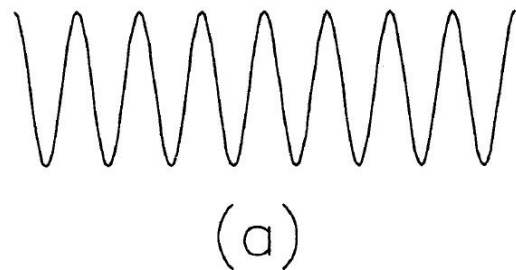


Distributed Feedback (DFB) Lasers



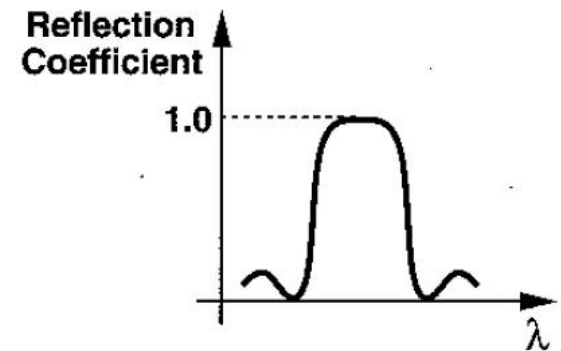
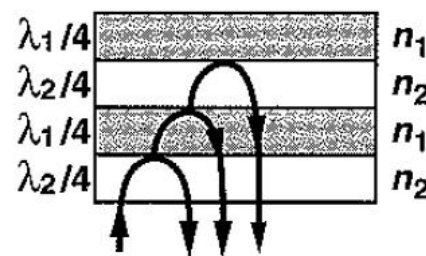
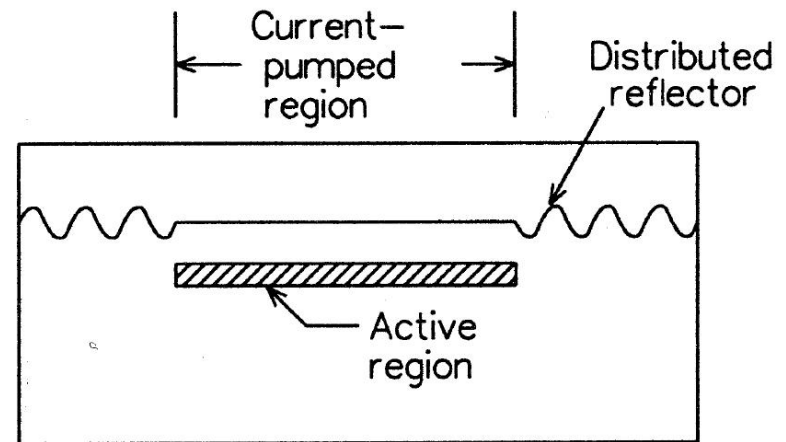
Distributed Feedback (DFB) Lasers

- ▶ 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

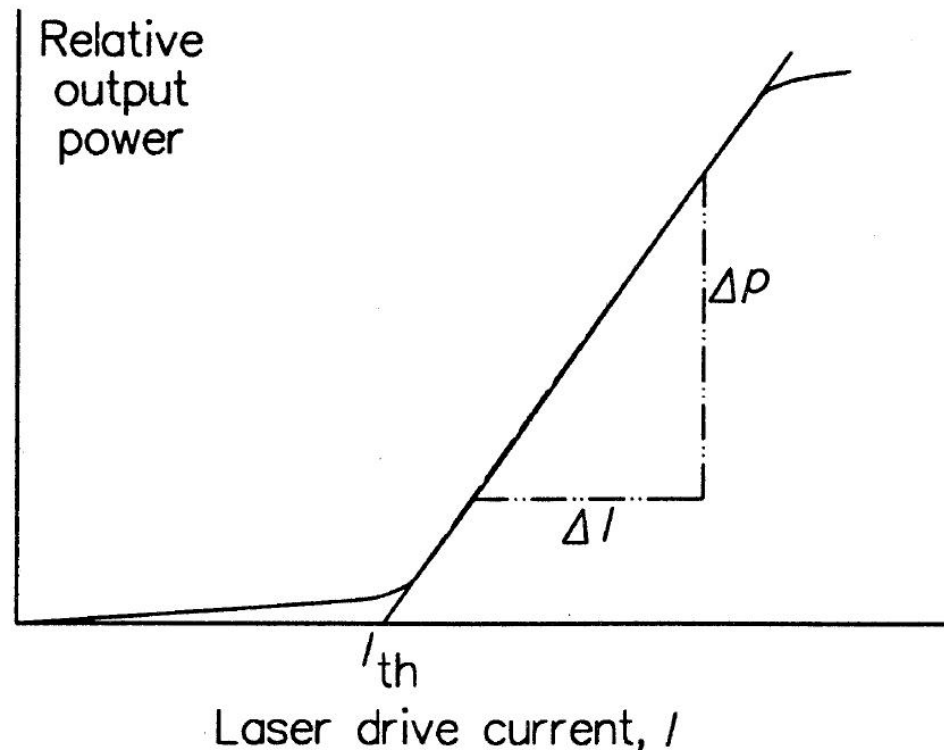


Caracteristici curent tensiune

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

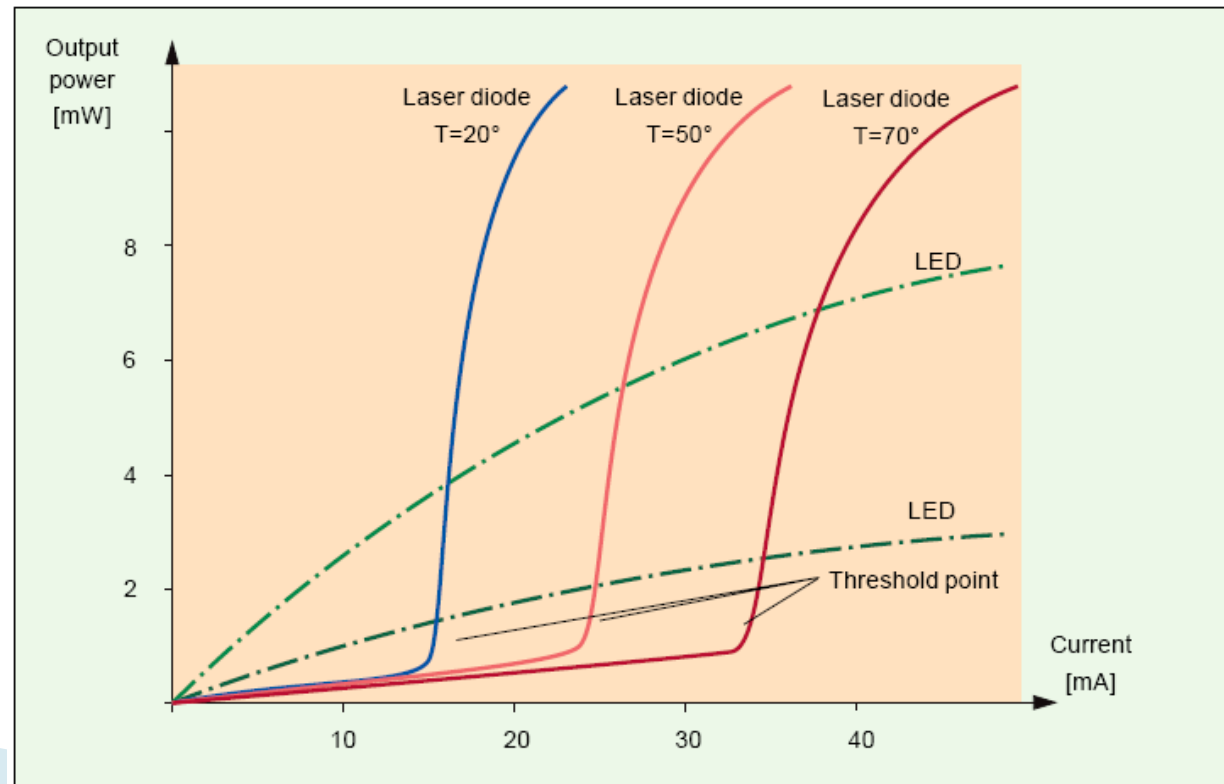
$$I > I_{th}$$

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



Temperatura si îmbatrânire

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



Dependenta de temperatura

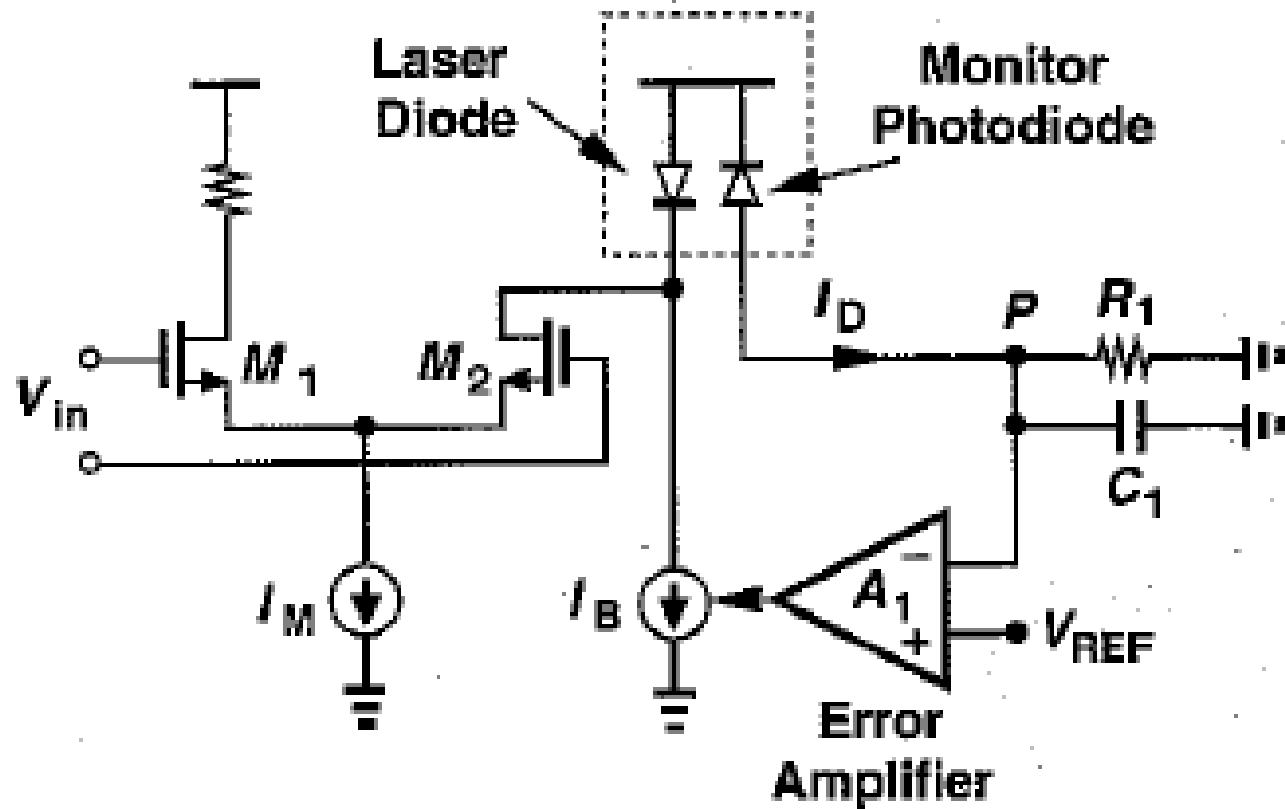
- ▶ Dependenta de temperatura a curentului de prag este exponentiala

- ▶
$$I_{th} = I_0 \cdot e^{T/T_0}$$

- ▶ I_0 e o constanta determinata la temperatura de referinta

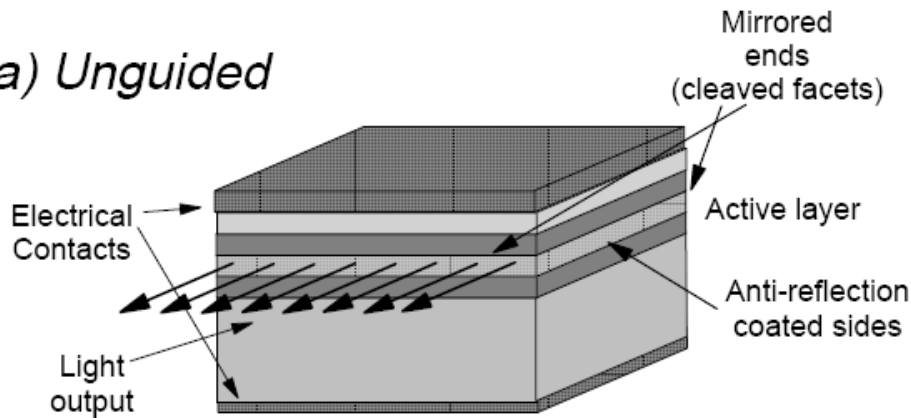
Material	Lungime de unda	T_0
InGaAsP	1300 nm	60÷70 K
InGaAsP	1500 nm	50÷70 K
GaAlAs	850 nm	110÷140 K

Monitorizarea radiației de spate

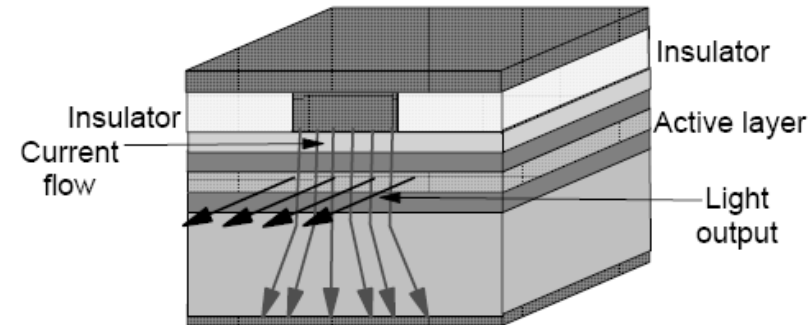


Dirrecționarea lumini în laser-ul Fabry Perot

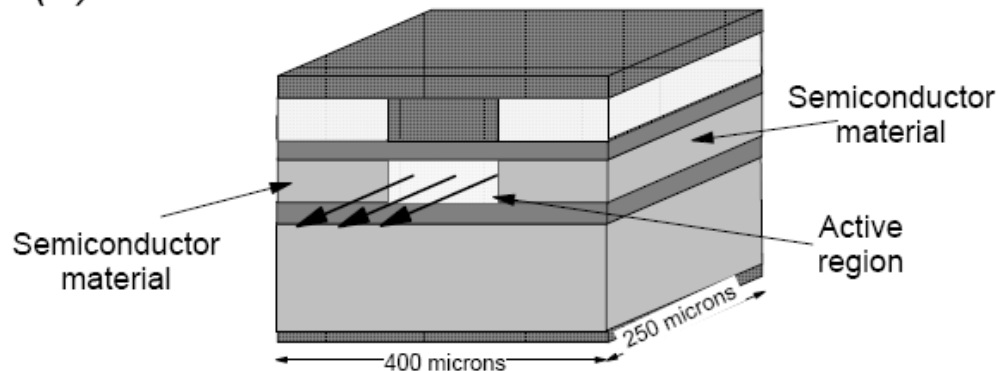
(a) Unguided



(b) Gain Guided

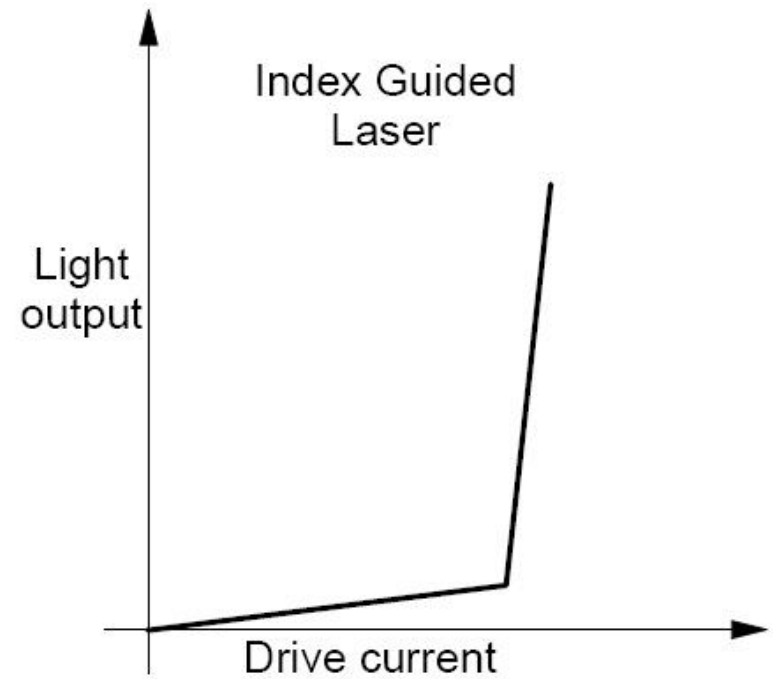
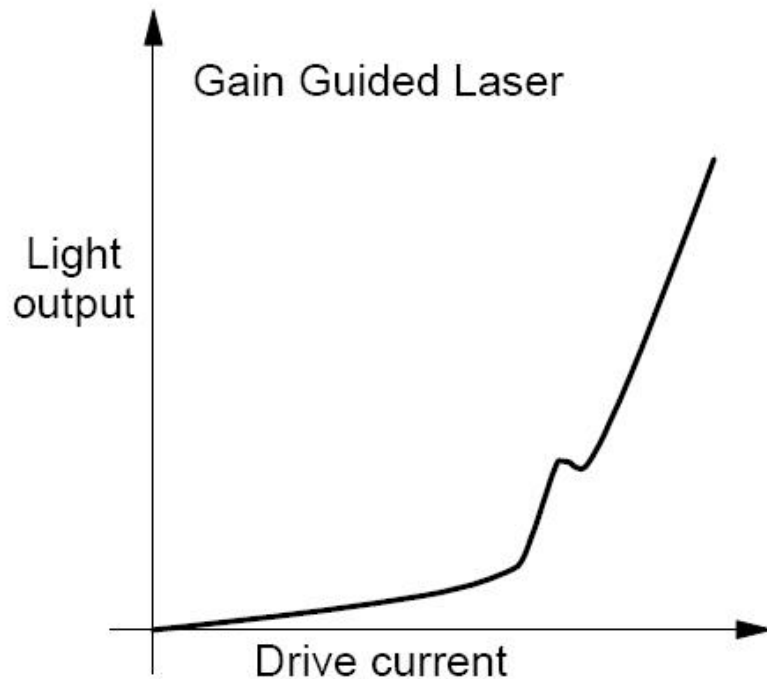


(c) Index Guided

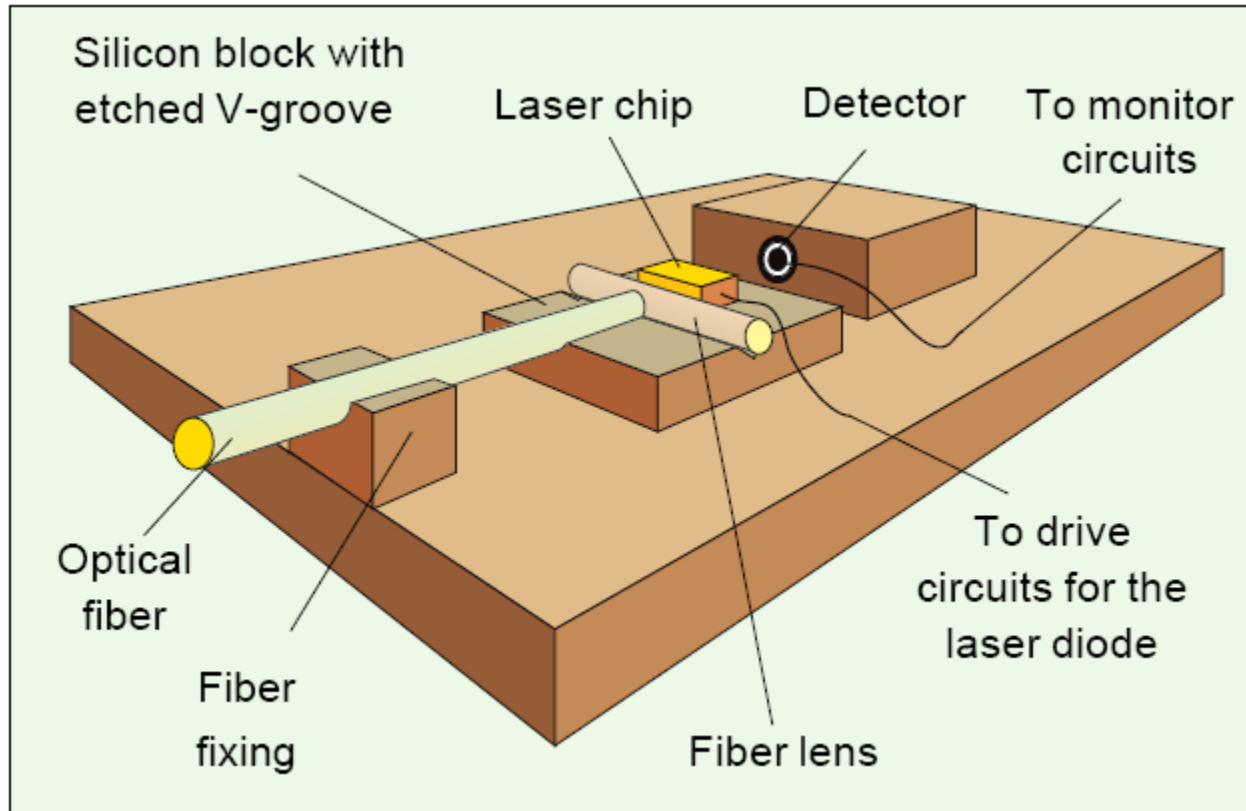


Efectul ghidarii

- ▶ 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

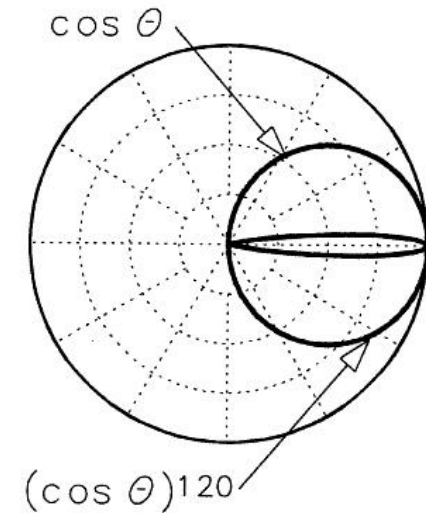
$$\eta = \frac{P_f}{P_s} = NA^2 \cdot \left(\frac{a}{r_s} \right)^2$$

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

- ▶ Aproximatie Lambertiana pentru surse cu directivitate crescuta

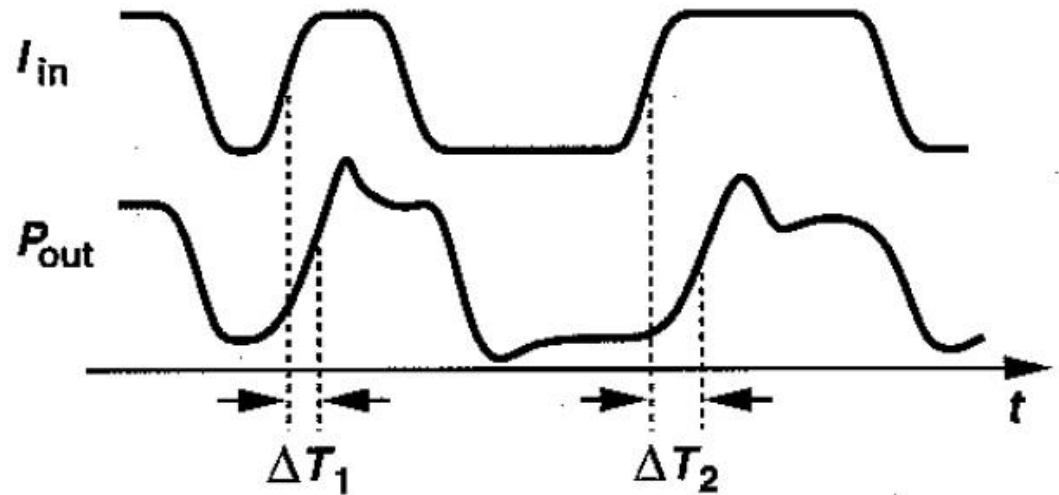
$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos^n \theta$$

$$\eta = \frac{P_f}{P_s} = \left(\frac{n+1}{2} \right) \cdot NA^2$$



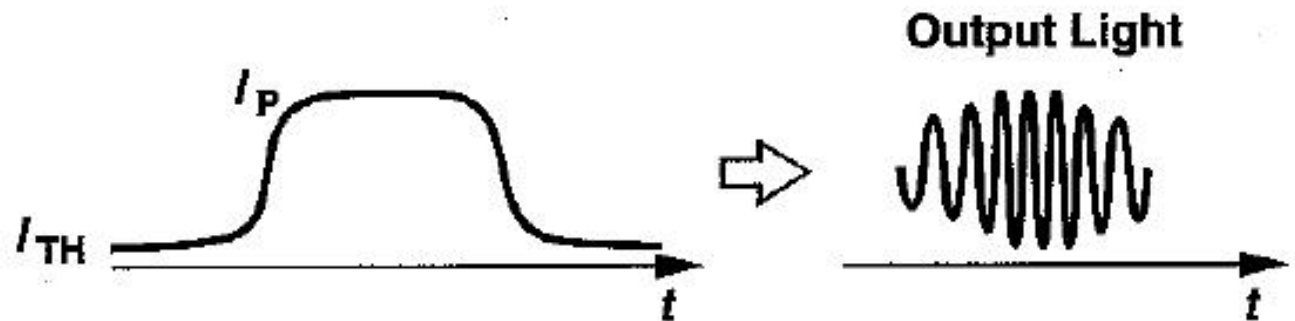
Turn-on delay

- ▶ 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

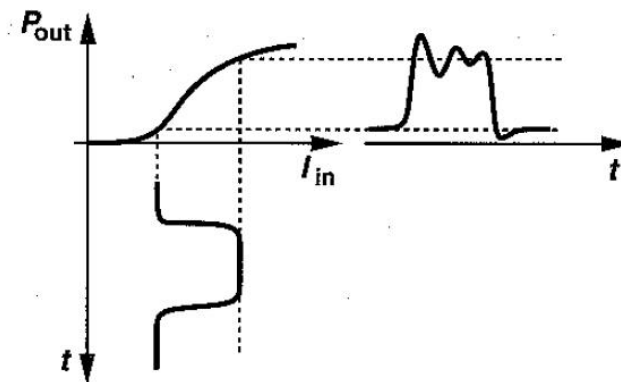
- ▶ Frecventa de oscilatie depinde de indicele de refractie al materialului
- ▶ Indicele de refractie depinde de concentratia de purtatori
- ▶ Cand curentul este modulata in impuls apare o modulatie a frecventei luminii cu efectul cresterii latimii spectrale a diodei (un ordin de magnitudine)



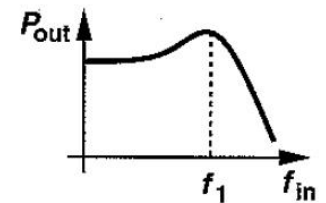
Oscilatii de relaxare

- ▶ Generate de schimburi de energie între electroni și fotoni
- ▶ Amorsarea emisie stimulate duce la descreșterea numărului de electroni în starea excitată, ceea ce duce la micșorarea emisie 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

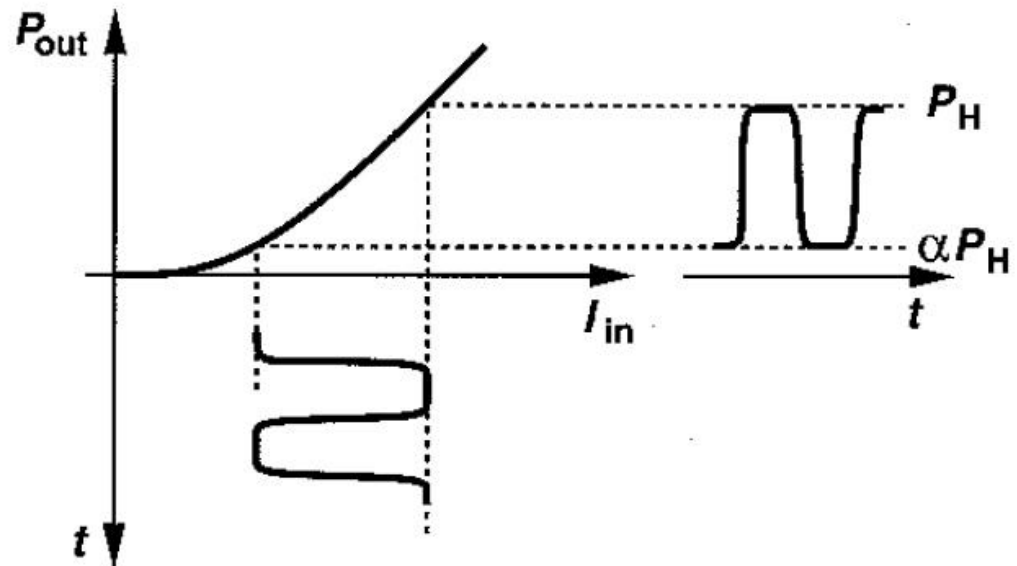
- ▶ Cresterea vitezei si minimizarea erorilor date de oscilatiile de relaxare si variatiile timpului de amorsare dioda este **partial** stinsa in timpul transmisiei unui nivel 0 logic

- ▶ Raport de stingere

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

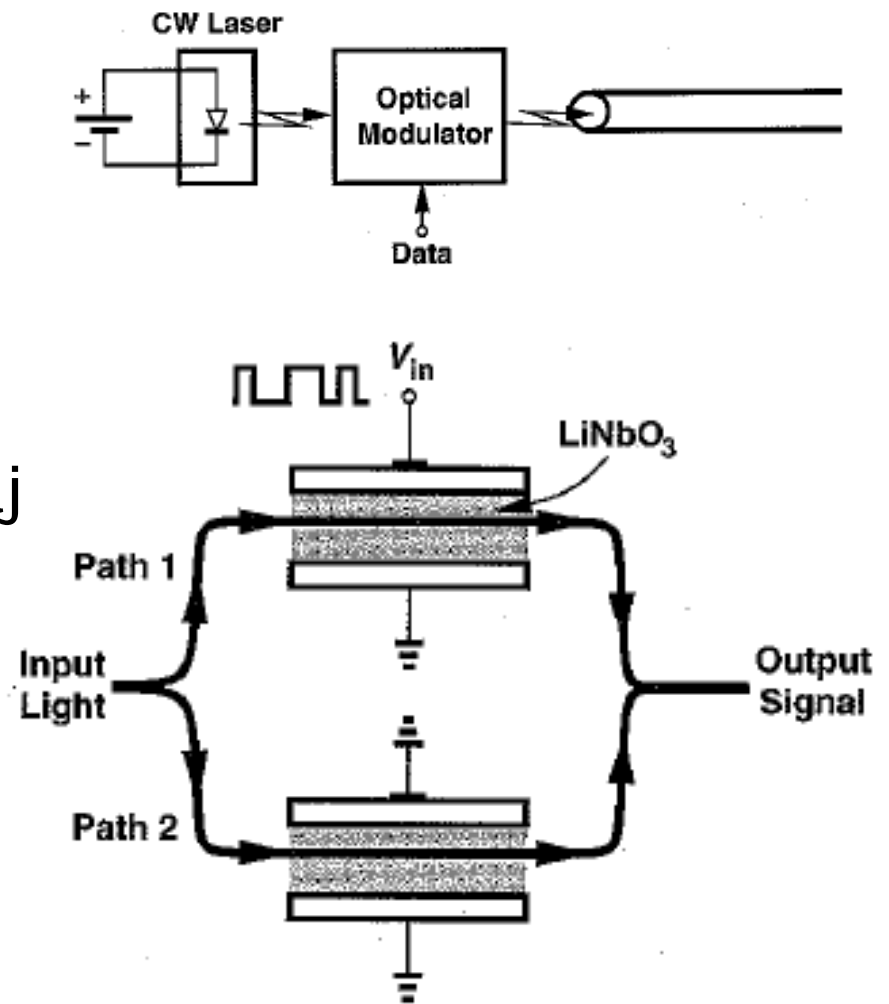
- ▶ Raportul semnal zgomot scade cu $(1-\alpha)$

- ▶ Tipic $ER = 10 \div 15 \text{dB}$



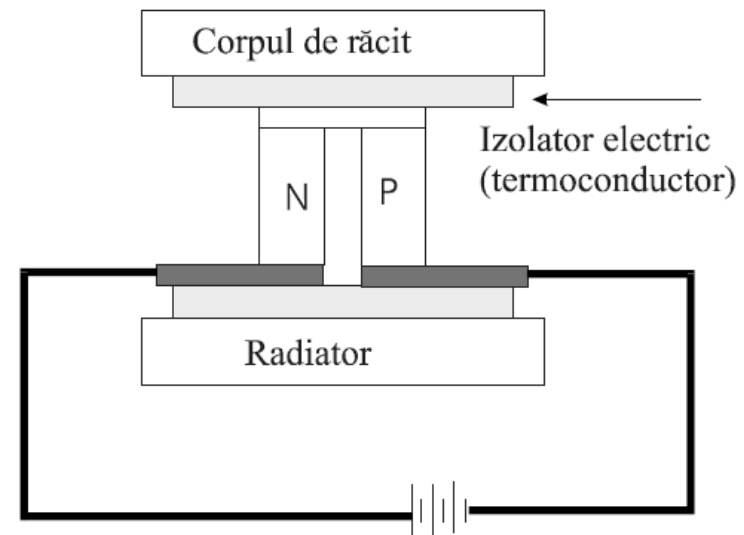
Modulație optică

- ▶ Pentru viteze mari se prefera utilizarea emisiei continue și modularea optică a radiației
- ▶ În LiNbO_3 viteza luminii depinde de câmpul electric, ceea ce permite introducerea unui defazaj egal π
- ▶ Crește complexitatea circuitului de control
- ▶ Tensiuni de 4÷6 V necesare



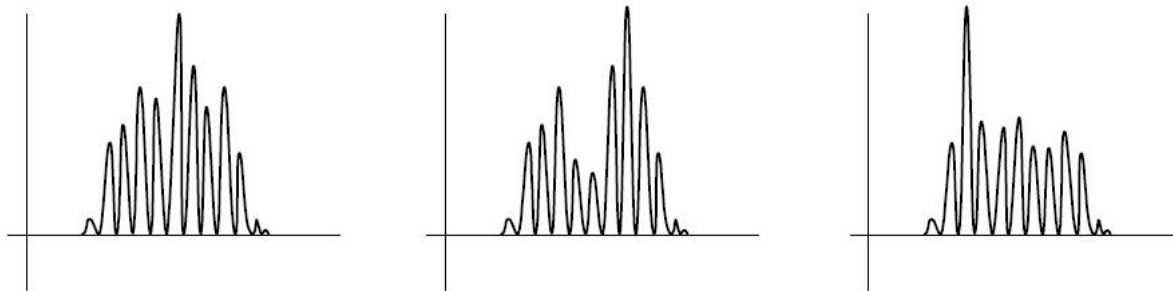
Dispozitiv termoelectric (Peltier)

- ▶ 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



Alte caracteristici DL

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

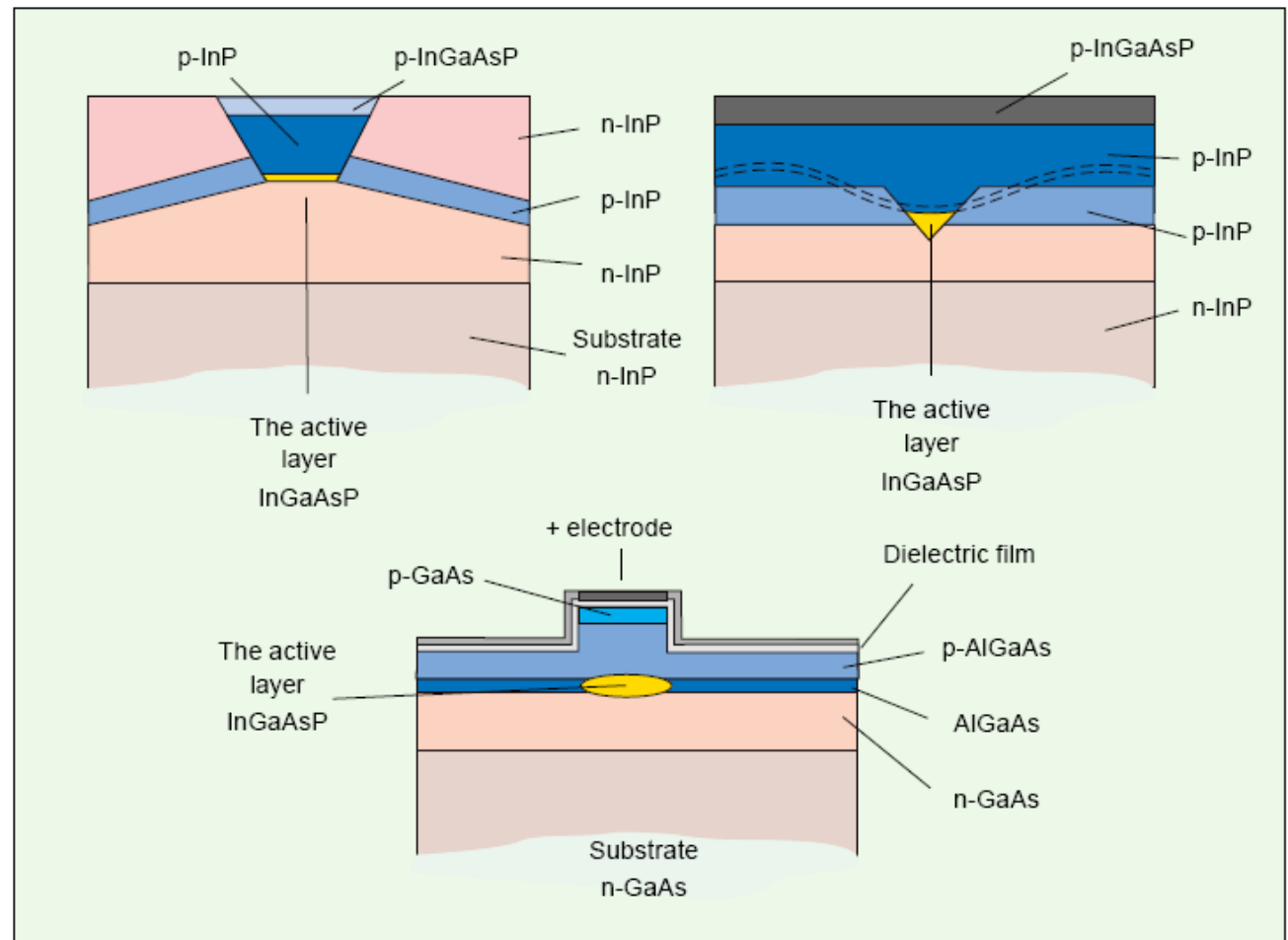


- ▶ RIN – Relative Intensity Noise (generat de emisia spontana)
- ▶ Zgomot de faza (idem) – necesitatea modulatiei in amplitudine
- ▶ Zgomot intercavitati (reflexiile din exterior in zona activa)
- ▶ Drift – variatia parametrilor cu varsta si temperatura (in special distanta intre oglinzi)

Diode LASER cu heterojunțione

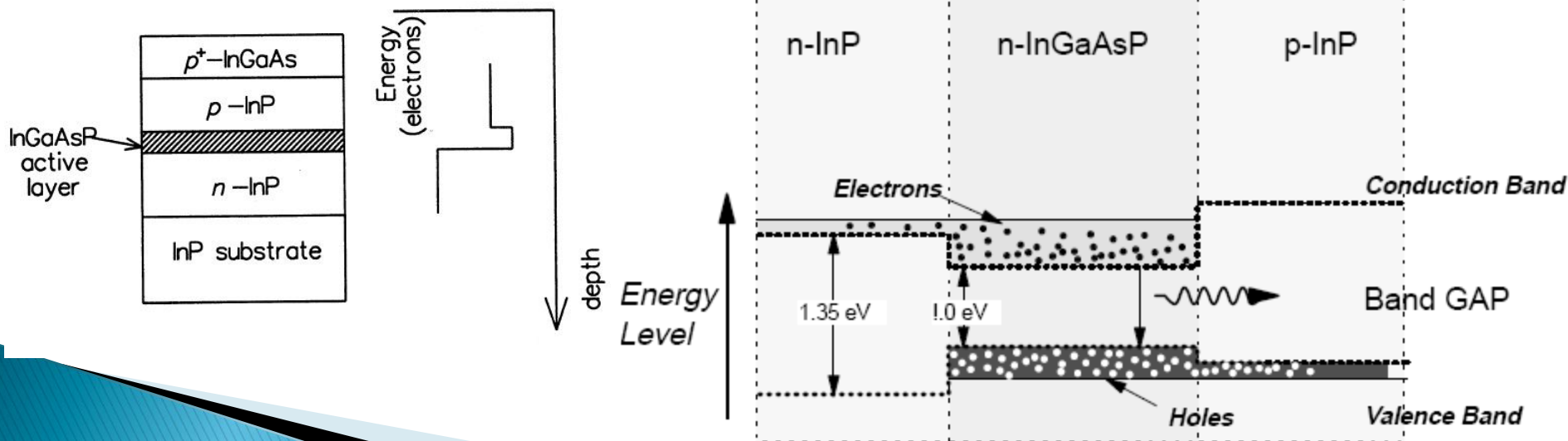
Heterojunțione
ingropata

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

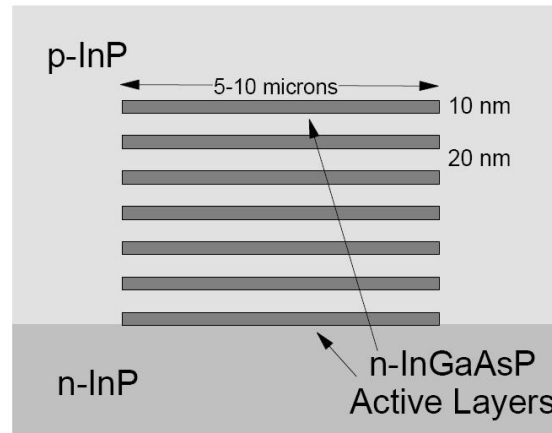


Quantum Well Laser

- ▶ 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

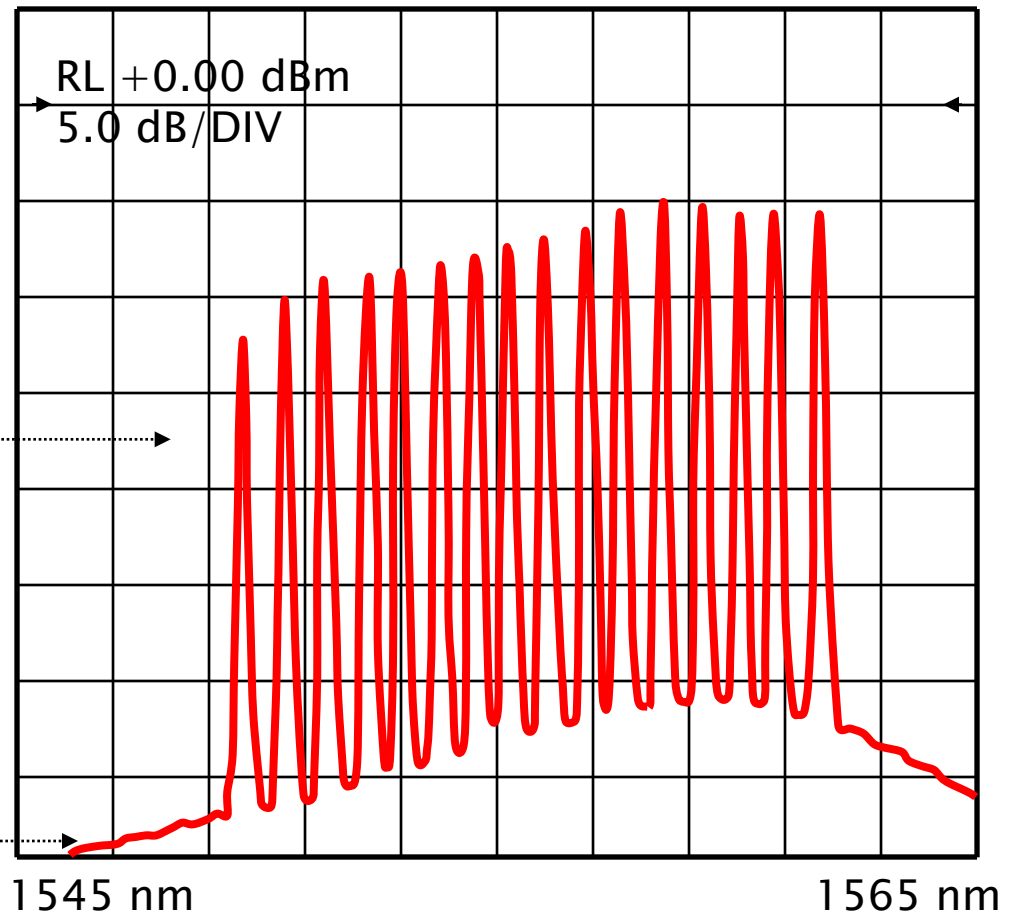
Quantum Well Laser

- ▶ 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

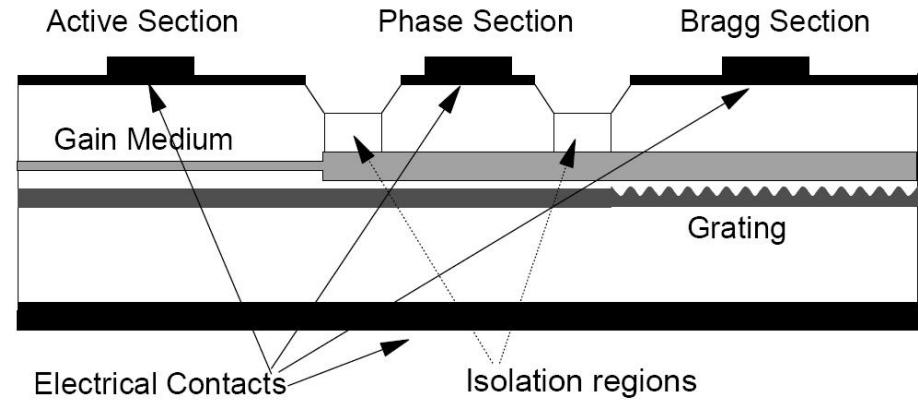
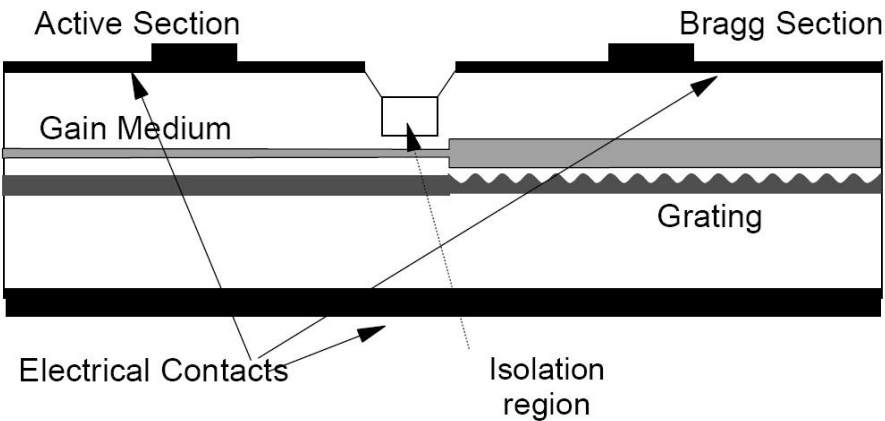
Emisie spontană
Amplificată (ASE)

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 μ s
- reglarea emitatorilor individuali in sistemele WDM
 - lipsa necesitatii controlului strict la productia diodelor
 - degradarea lungimii de unda in timp

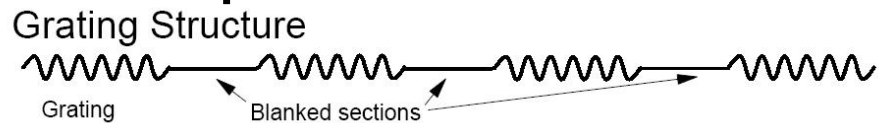
Diode laser reglabile



- ▶ 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

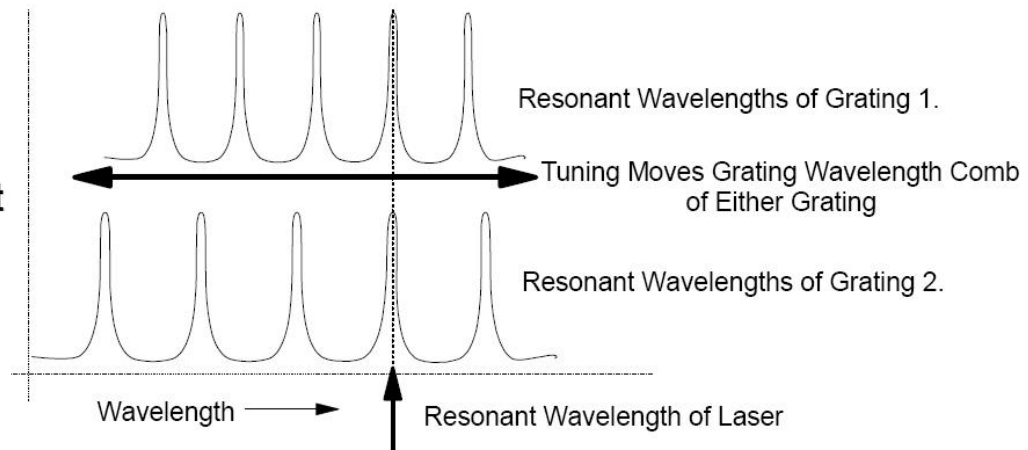
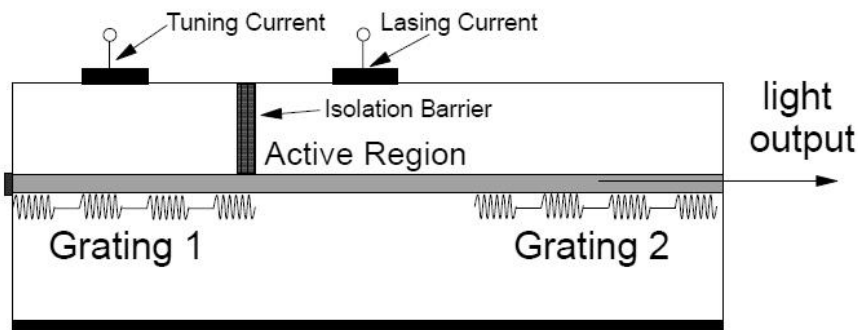
Diode laser reglabile

- ▶ Dezavantajul metodelor anterioare e dat de limita redusa a reglajului (~10nm)
- ▶ Reflectorul Bragg esantionat (periodic) produce spectru de filtrare discret

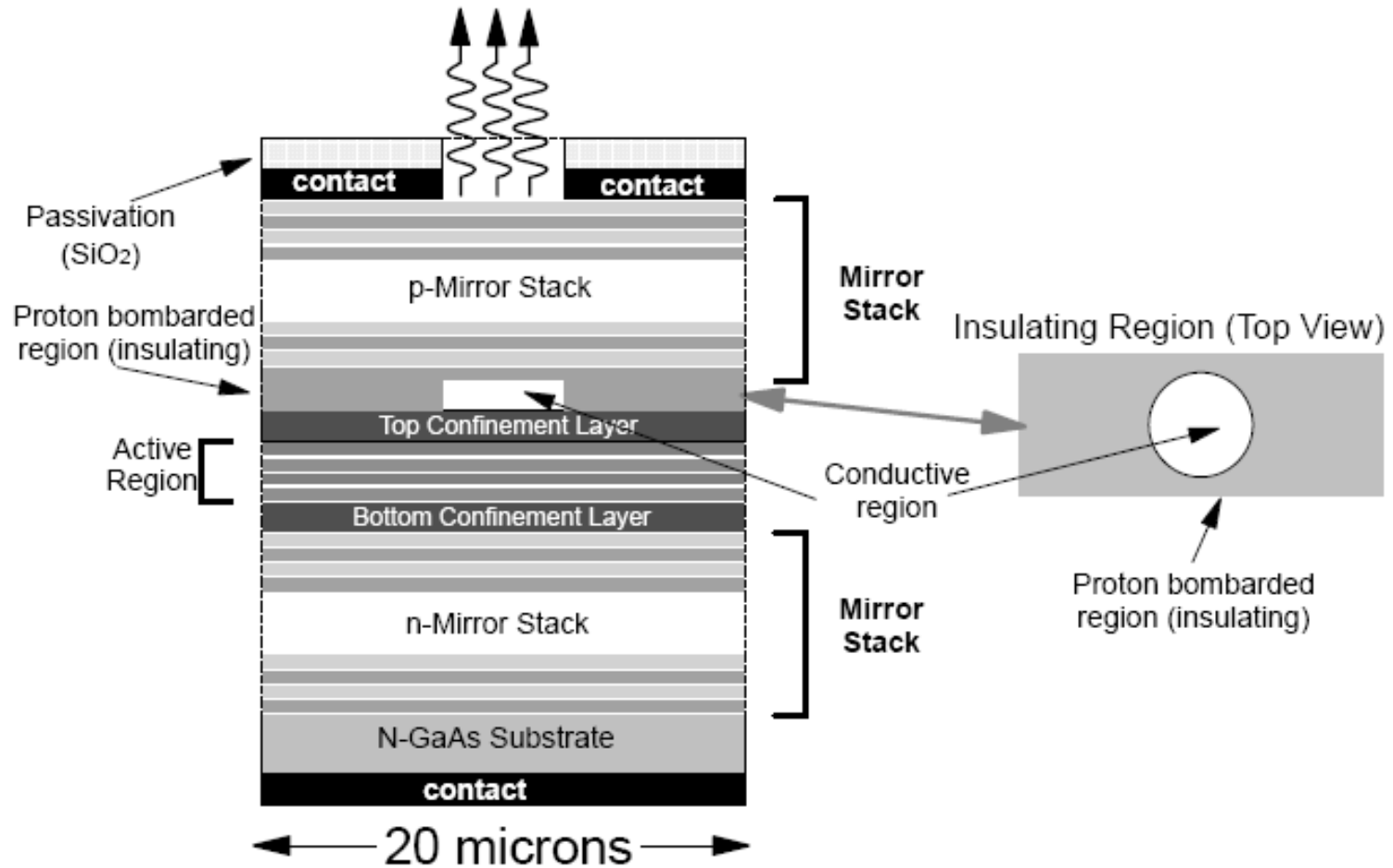


Dezavantaj :
reglajul e discret

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

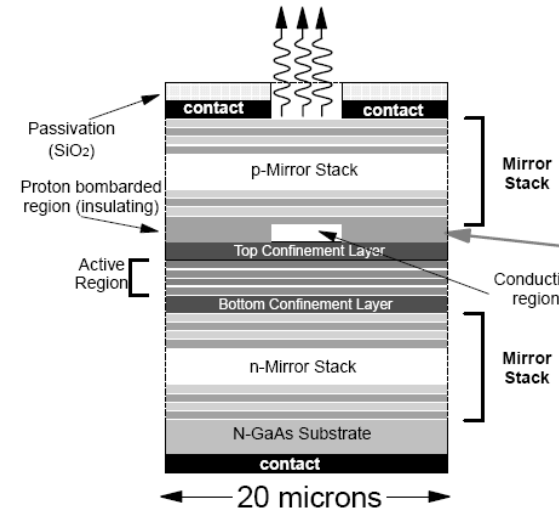


Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)



VCSEL

- ▶ Oglinzile pot fi realizate din straturi succesive din semiconductori cu indici de refractie diferiti – reflector Bragg
- ▶ Prelucrarea laterala se rezuma la taierea materialului
- ▶ Numarul total de straturi poate ajunge la 500
- ▶ Caracteristici
 - ▶ puteri de ordinul 1 mW
 - ▶ lungimi de unda 850 si 980 nm
 - ▶ radiatie de iesire circulara cu divergenta redusa



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)
- 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

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

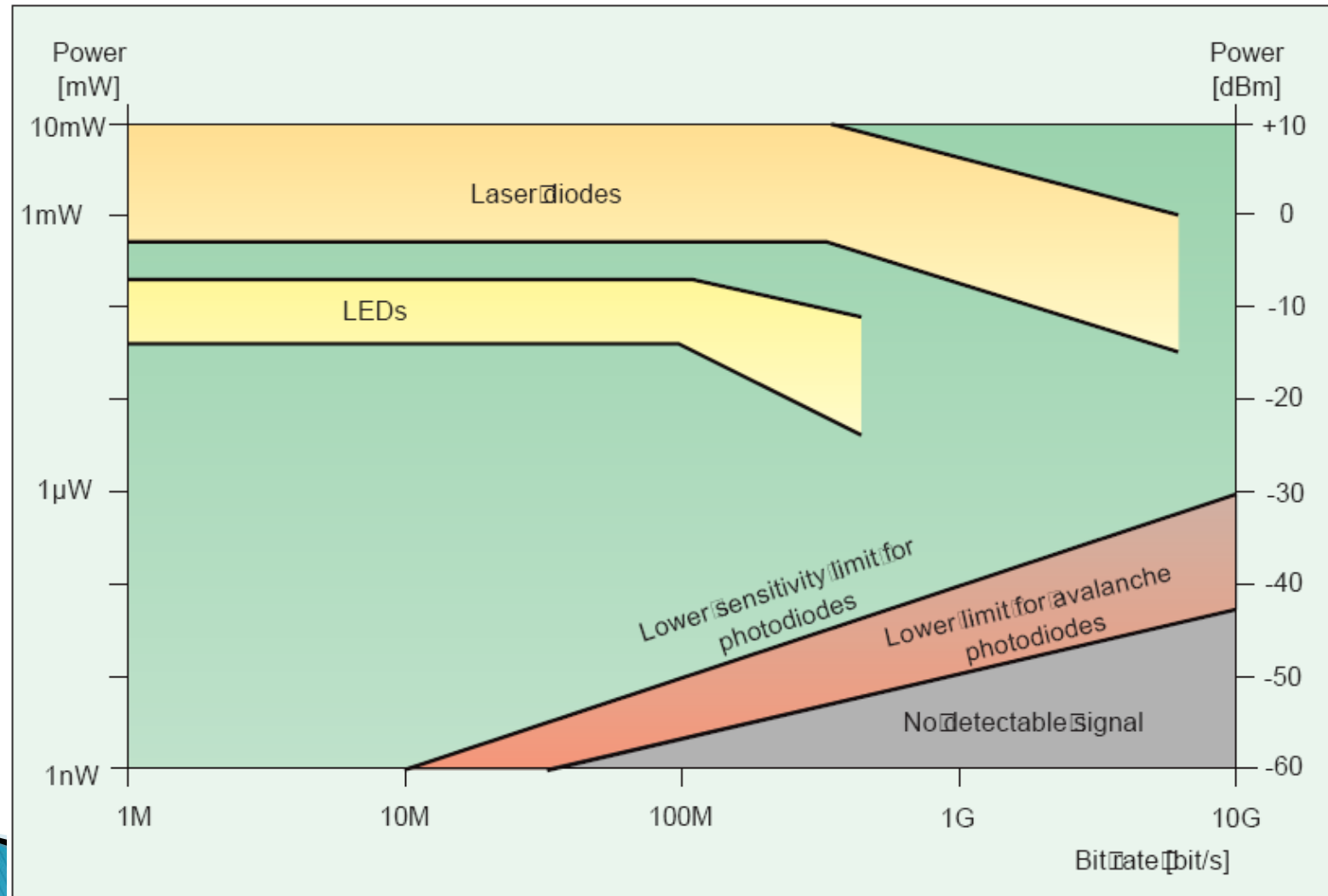
Degradare in timp

- ▶ Puterea scade in timp exponential

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-t/\tau_m}$$

- ▶ τ_m – timpul de viata
- ▶ Diodele laser sunt supuse la conditii extreme de lucru
 - densitati de curent in zona activa $2000 \div 5000 \text{ A/cm}^2$
 - densitati de putere optica: $10^5 \div 10^6 \text{ W/cm}^2$
- ▶ Diverse definitii ale timpului de viata fac comparatiile dificile

Limite putere/bandă a dispozitivelor optoelectronice



Contact

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