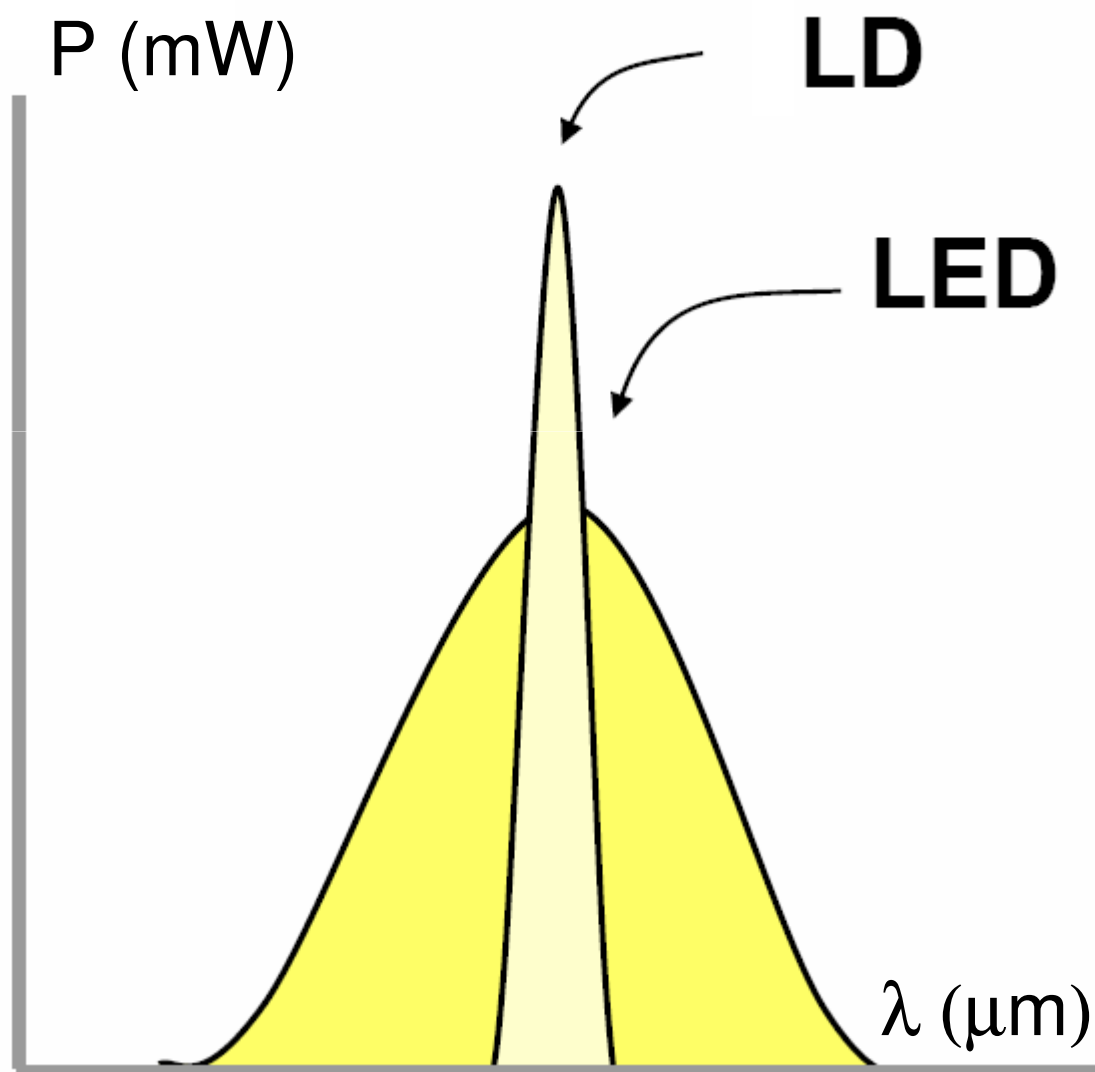


Optični viri



Mobitel d.d.,
izobraževanje

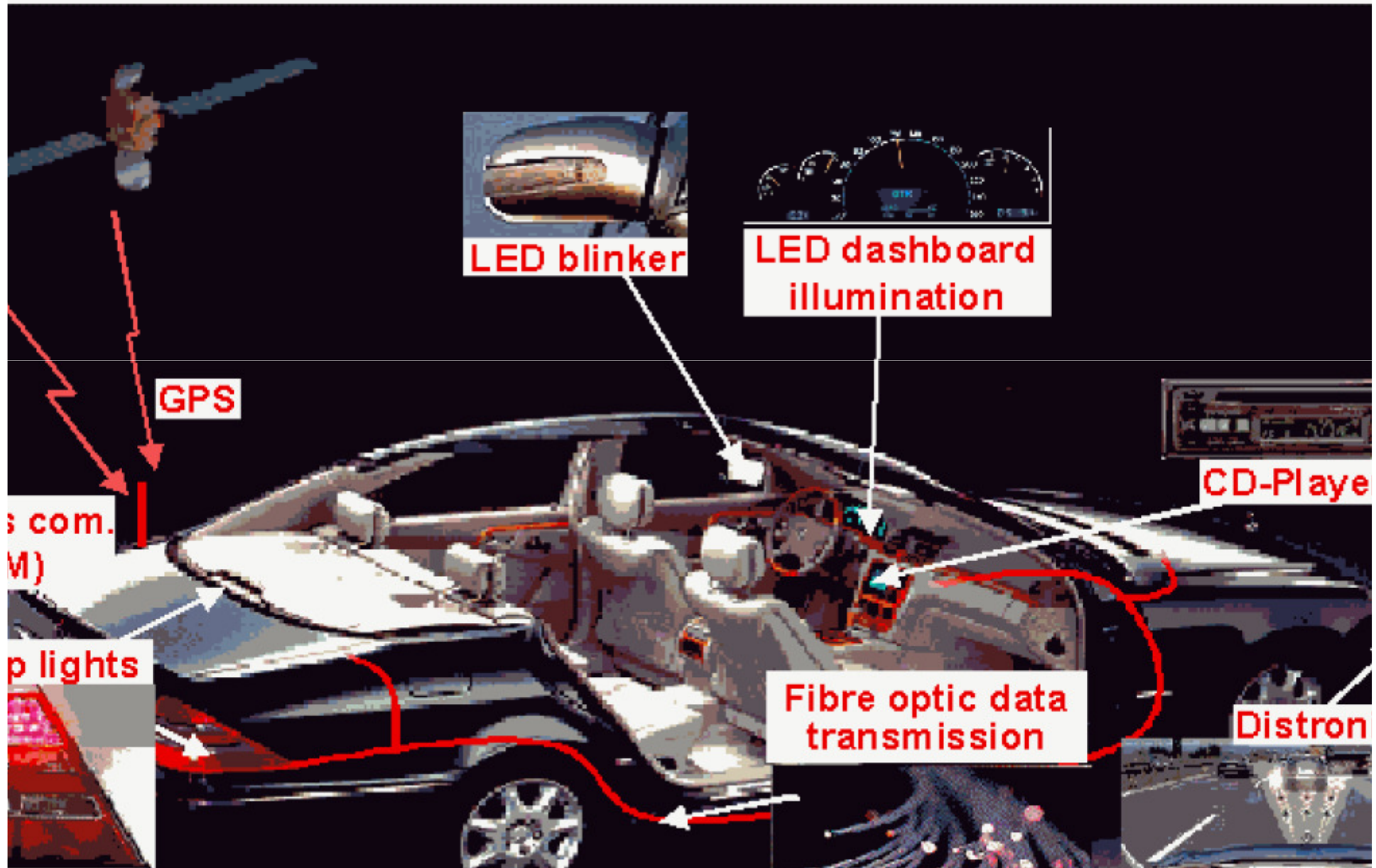
28. 5. 2010,
predavanje 10

Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

1. Fizikalne osnove fotonskega sevanja
2. Kvantni šum
3. Spontana in stimulirana emisija
4. Polprevodniki, energijski pasovi
5. Laserski plazovni pojav
6. Svetleča dioda in laser, vrste:
 - LED, čelno in stransko sevanje
 - LD, čelno in stransko sevanje
 - DFB, DBR, enorodovni
7. Heterostrukture
8. VCSEL
9. Vlakenski laserji

VCSEL Application 650nm



Svetleča dioda (LED) in laserska dioda (LD)

1. Svetleča dioda (LED):

- LED na čelno sevanje
- LED na stransko sevanje

2. Laserska dioda (LD):

- Laserska dioda na stransko sevanje
- Enorodovni laserji DFB in DBR
- Laserska dioda na čelno sevanje (VCSEL)

3. Vlakenski laserji

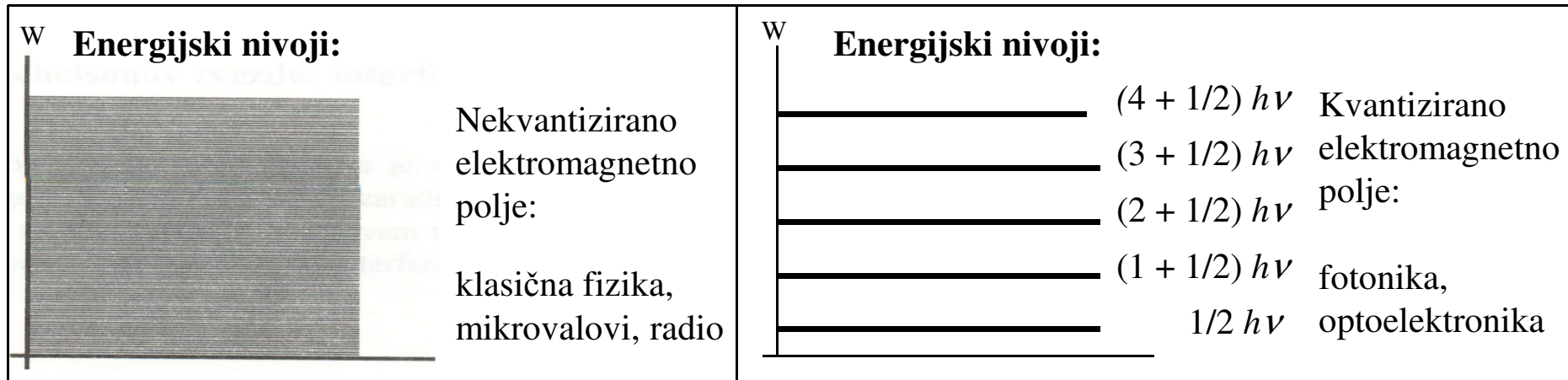
4. Posebne vrste LD:

- Laserji s kvantno jamo

5. Posebni laserji:

- Uглаšljivi, črpalni (velika moč, 1 – 10 W) in drugi

Kvantizacija elektromagnetnega polja



Energijski nivoji: $W_n = (n + 1/2) h\nu$ n število fotonov

Ničelna energija: $W_0 = 1/2 h\nu$ prostor brez fotonov, vakuumsko polje

Gostota energije kvantnega šuma: $w_k = dP_k/d\nu = 1/2 h\nu$

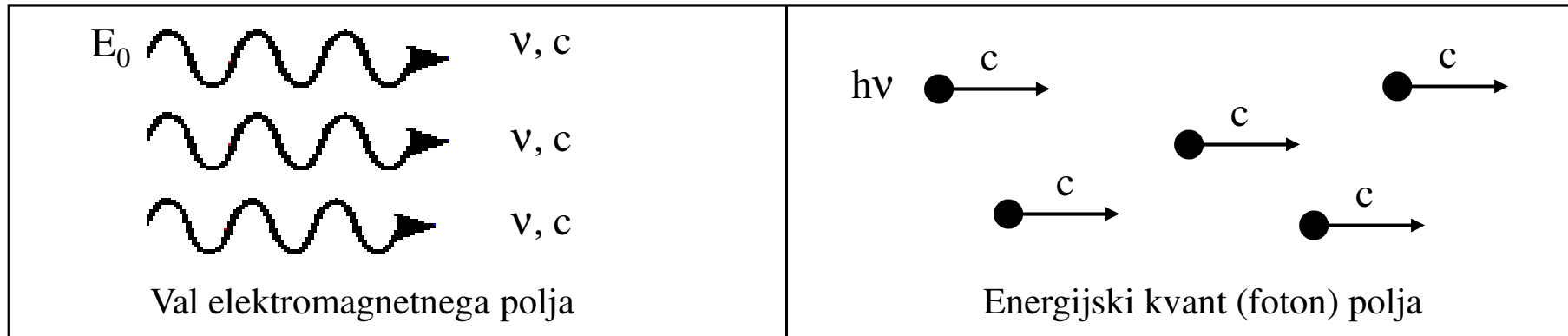
moč kvantnega šuma : $dP_k = 1/2 h\nu d\nu$, $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, Planckova konstanta

Kvantni šum predstavlja minimalno nedoločeno svetlobnega polja in je temeljna lastnost monokromatske koherentne svetlobe

Načelo nedoločljivosti:

$\Delta f \Delta t \geq \frac{1}{4\pi}$	načelo nedoločljivosti po Fourierovi transformaciji	$\Delta n \Delta \phi \geq \frac{1}{2}$	razpršenost števila fotonov in faze
$\Delta W \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$	razpršenost energijskega nivoja in časovnega intervala	$\Delta k \Delta x \geq \frac{1}{2}$	razpršenost gibalne količine in koordinate (Heisenbergovo 5 načelo nedoločljivosti)

Foton



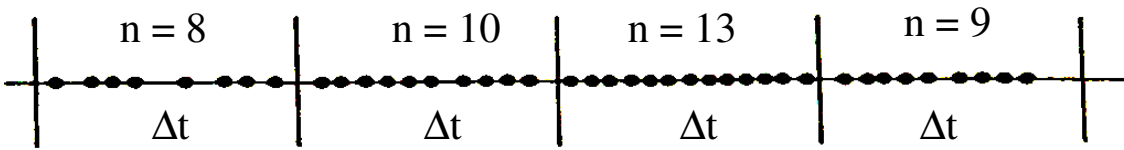
- $\vec{E}(\vec{r}, t) = \hat{i}_E E_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ električna poljska jakost monokromatskega ravninskega vala
- $\bar{S} = \frac{1}{2Z_0} E_0 E_0^*$ povprečna gostota moči
- $p(\vec{r}, t) dA dt = S dA dt$ verjetnost nahajanja fotona na ploskvici dA v času dt

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • $W = h\nu = \hbar\omega, \hbar = \frac{h}{2\pi}$ • $h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ | <p>energija fotona</p> <p>Planckova konstanta</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • $G = \hbar k = \frac{h}{\lambda} = \frac{W}{c}$ • $\Gamma = \pm \hbar$ | <p>gibalna količina fotona</p> <p>vrtlina količina fotona ustreza desni oz. levi krožni polarizaciji</p> |

Pri valovni dolžini $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ in moči $P = 1 \text{ mW}$ v vlaknu je pretok fotonov okoli 10^{16} 6 fotonov na sekundo

Statistika fotonov

- **Pojav: zrnatost fotonov v curku**

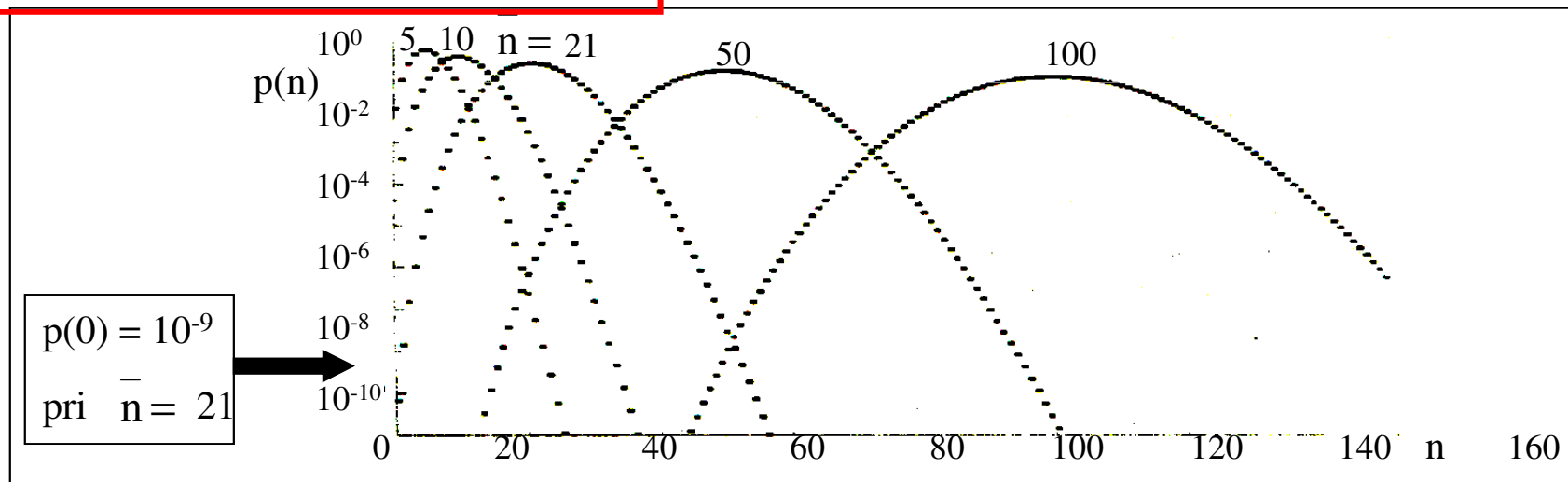


Neenakomeren pretok fotonov povzroča nedoločenost števila fotonov v časovnem intervalu, fluktuacijo in šum

- **Statistika: Poissonova porazdelitvena verjetnost**

$$p(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{P\Delta t}{h\nu} \right)^n e^{-\frac{P\Delta t}{h\nu}}, \quad \bar{n} = \frac{P\Delta t}{h\nu}$$

srednje število fotonov v intervalu Δt

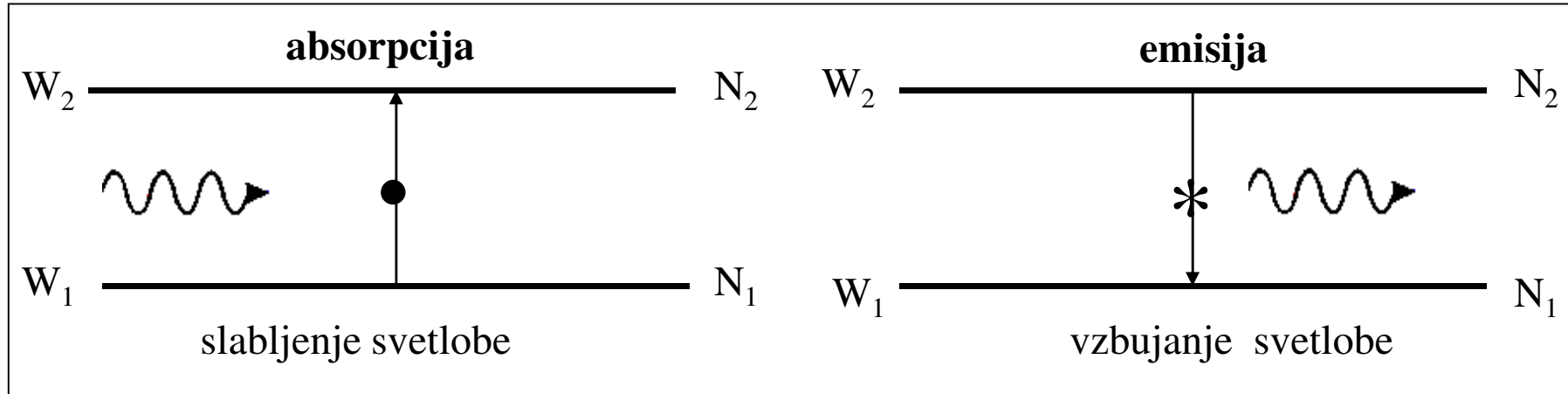


- Varianca števila fotonov $\sigma^2 = \bar{n}$
- Fluktuacija števila fotonov v intervalu $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$
- Optično razmerje: $S/N = \bar{n} / \sigma = \sigma$

$$\bullet \text{ Kvantni šum: } i_k^2 = \left(\frac{e}{\Delta t} \right)^2 \sigma^2 = 2eI\Delta f$$

Pri $n = 21$ je verjetnost, da v časovnem intervalu ne prestrežemo nobenega fotona, enaka 10^{-9} . S to verjetnostjo napake je teoretično možen sprejem NRZ impulzov z 10 - 11 fotoni!

Absorpcija in emisija



$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}N_1\rho$$

- dvig na višji nivo
- slabilna snov

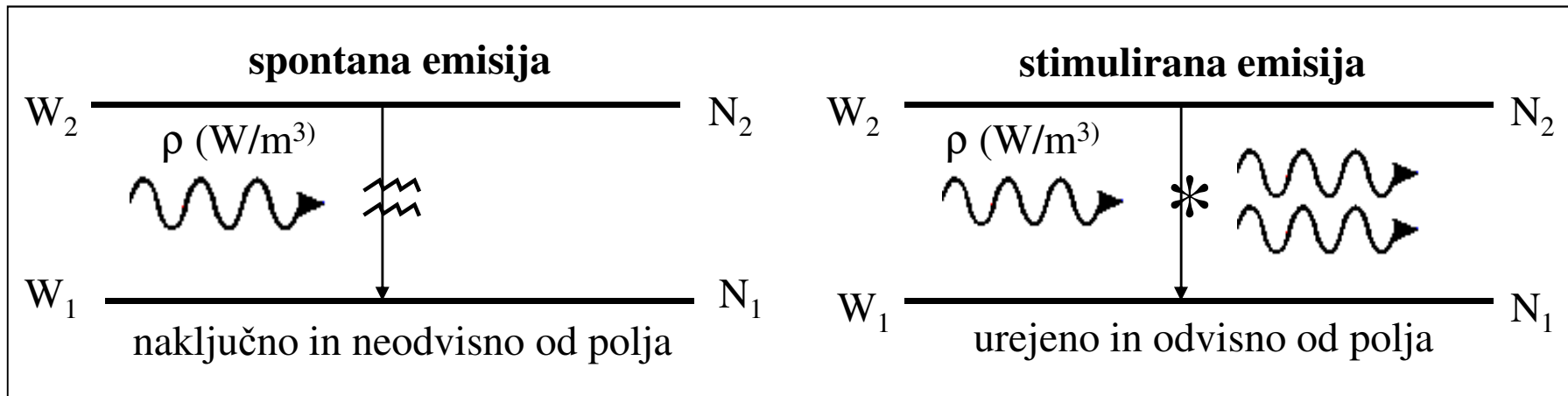
$$\frac{dN_2}{dt} < 0$$

- spust na nižji nivo
- aktivna snov

Valovna dolžina absorbirane ali emitirane svetlobe pri dvigu ali spustu med energijskima nivojema W_1 in W_2

$$\lambda_{\mu m} = \frac{1,987 \cdot 10^{-19}}{\Delta W_J} = \frac{1,2398}{\Delta W_{eV}}, \quad \Delta W = W_2 - W_1$$

Spontana in stimulirana emisija



$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}N_2\rho$$

- Generacija **naključnega** fotona:

- nekoherentno sevanje
- naključna frekvenca v širokem pasu
- naključna polarizacija
- naključna smer širjenja
- brez vpliva vpadnega polja

- **Pogoj za emisijo:**

$$N_2 > N_1 \text{ (inverzija naseljenosti)}$$

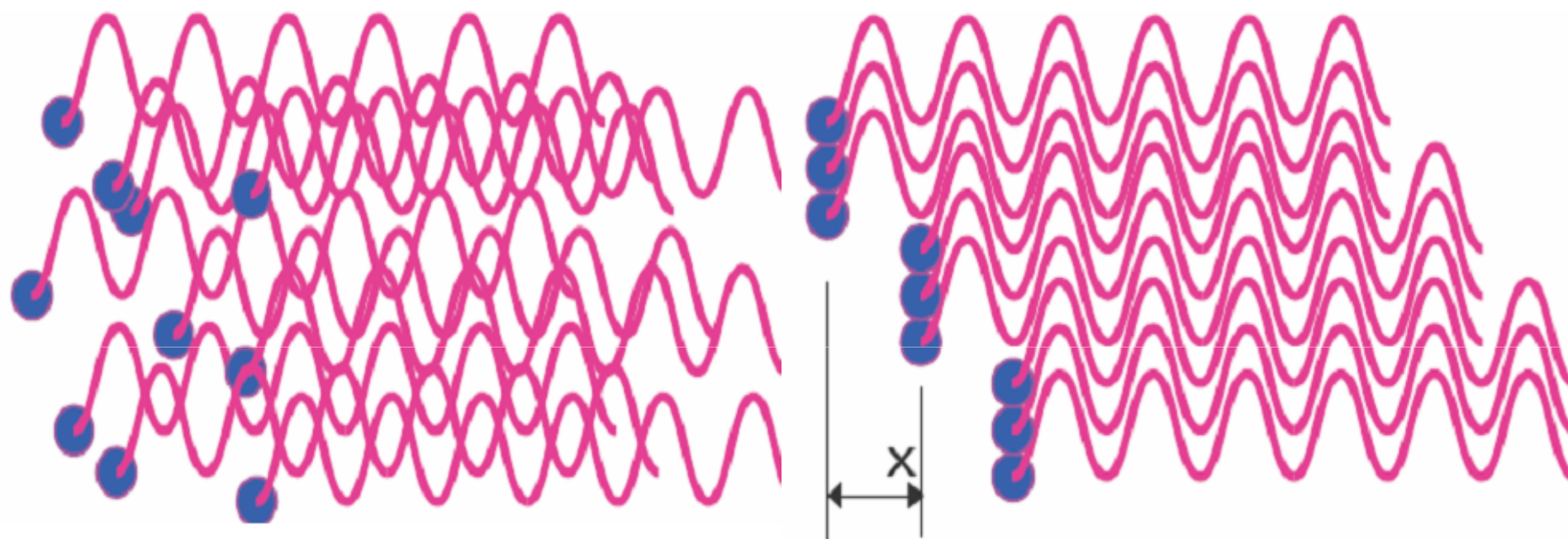
- Generacija **spodbujenega** fotona:

- koherentno sevanje
- ozek frekvenčni pas
- enaka polarizacija
- enaka smer širjenja
- sorazmerno gostoti energije ρ polja

- **Parameter inverzije:**

$$\mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$$

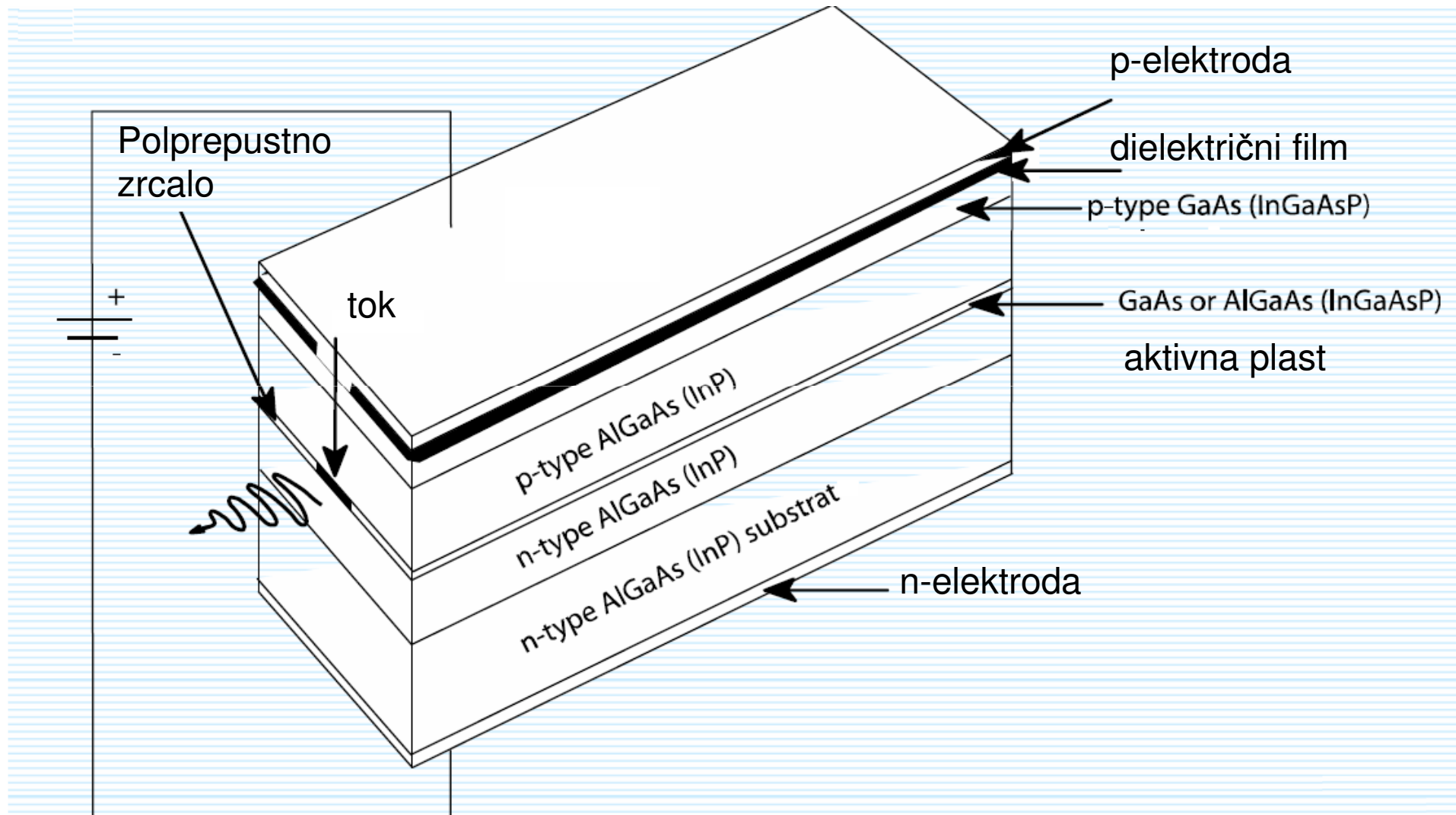
Spontana in stimulirana emisija



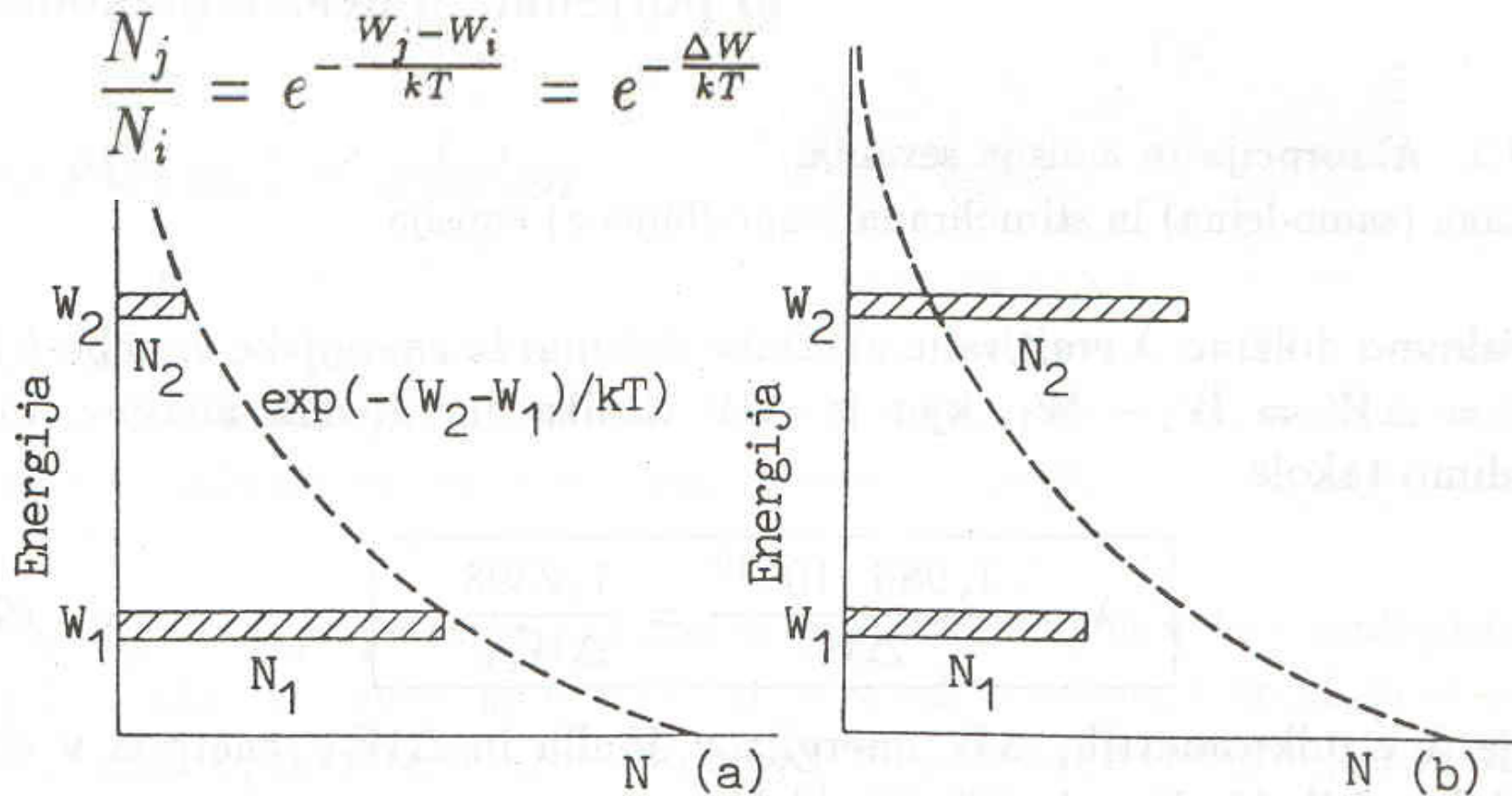
Spontana emisija
Nekoherentno polje
Šum

Stimulirana emisija
Koherentno polje
Signal

Laserska dioda AlGaAs(InP)

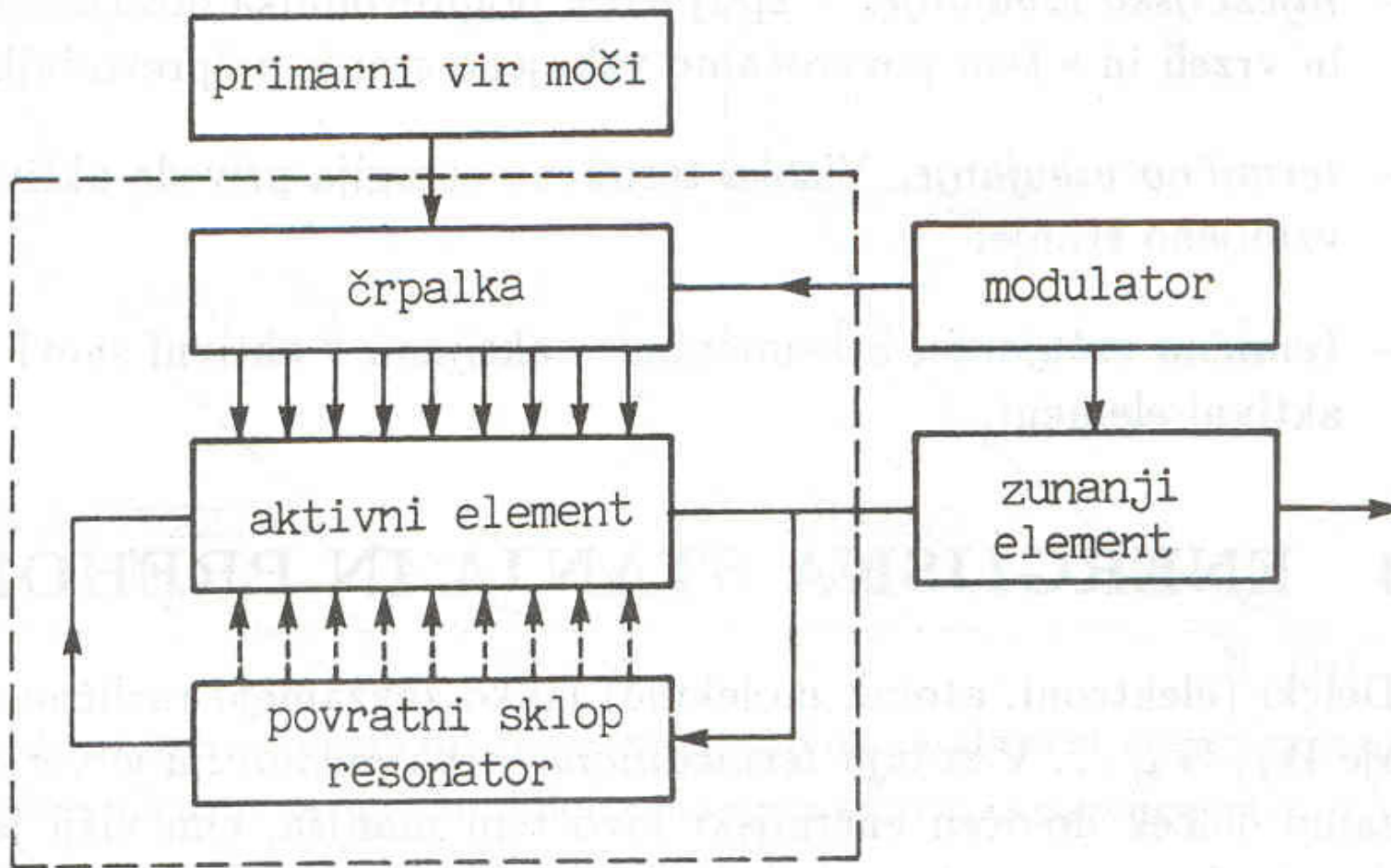


Normalna in inverzna naseljenost



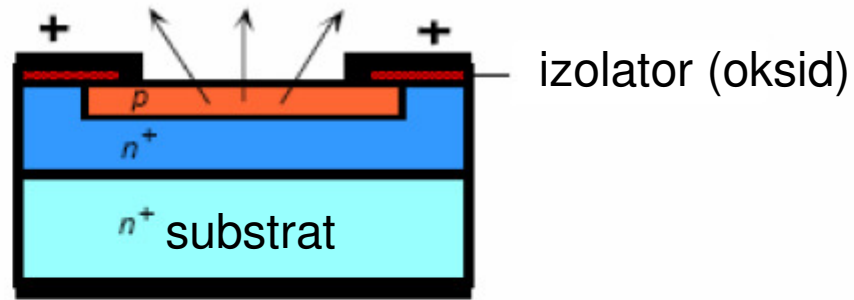
Sl. 9.2. Naseljenost energijskih nivojev: (a) normalna naseljenost energijskih nivojev v termodinamičnem ravnotežju (Boltzmannova statistika naseljenosti); (b) inverzna naseljenost energijskih nivojev ($N_2 > N_1$).

Oscilator

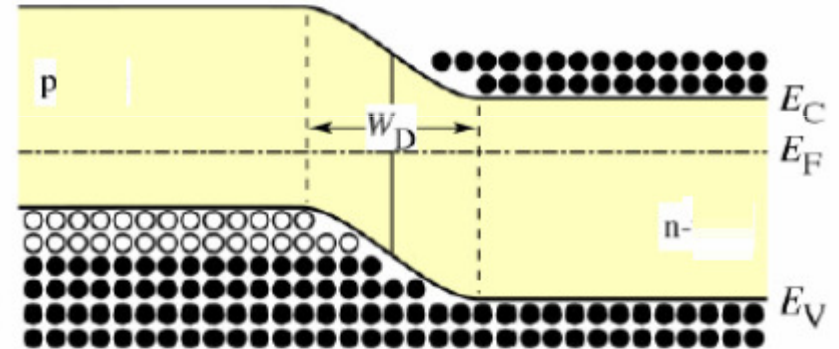
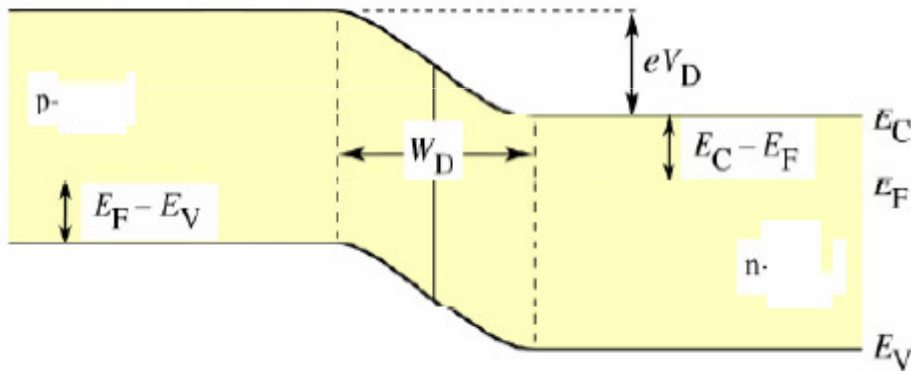


Spoj p-n

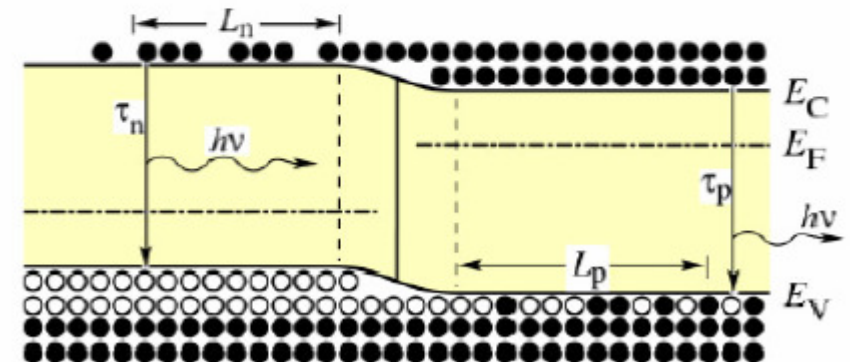
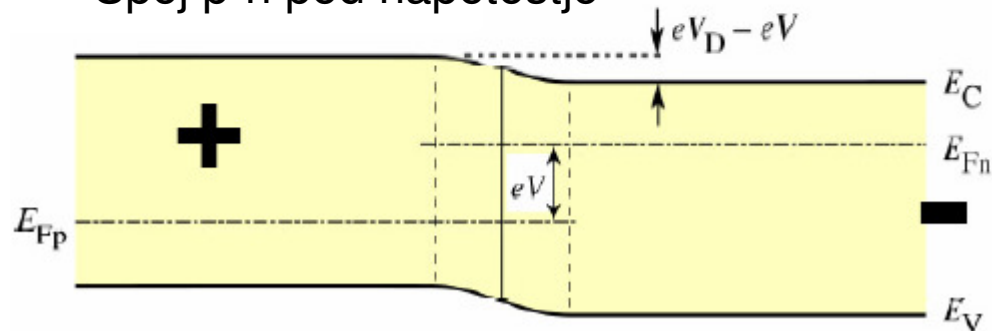
Spoj p-n



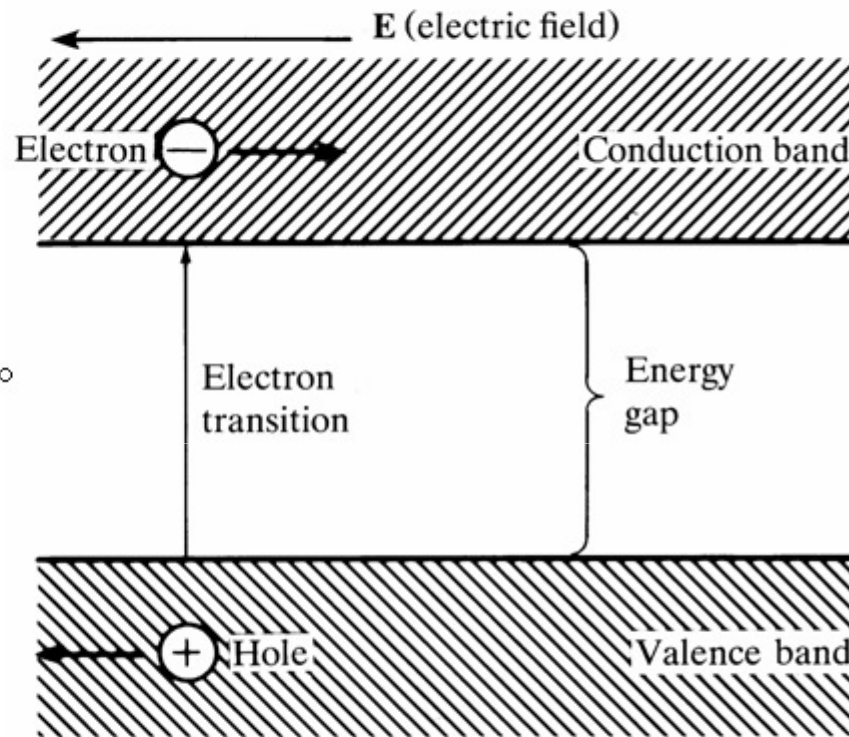
Spoj p-n brez napetosti elektroda



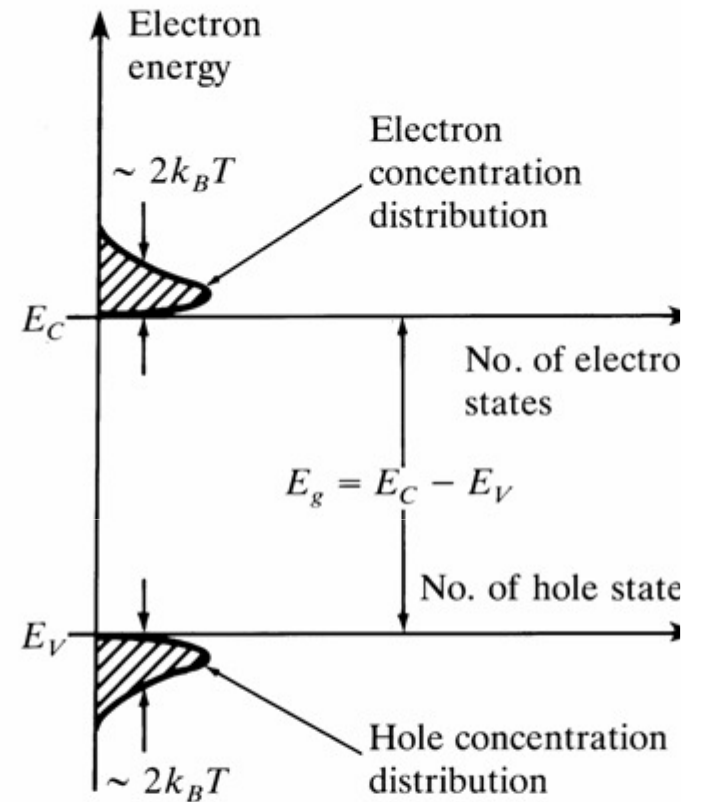
Spoj p-n pod napetostjo



Review of Semiconductor Physics



(a)

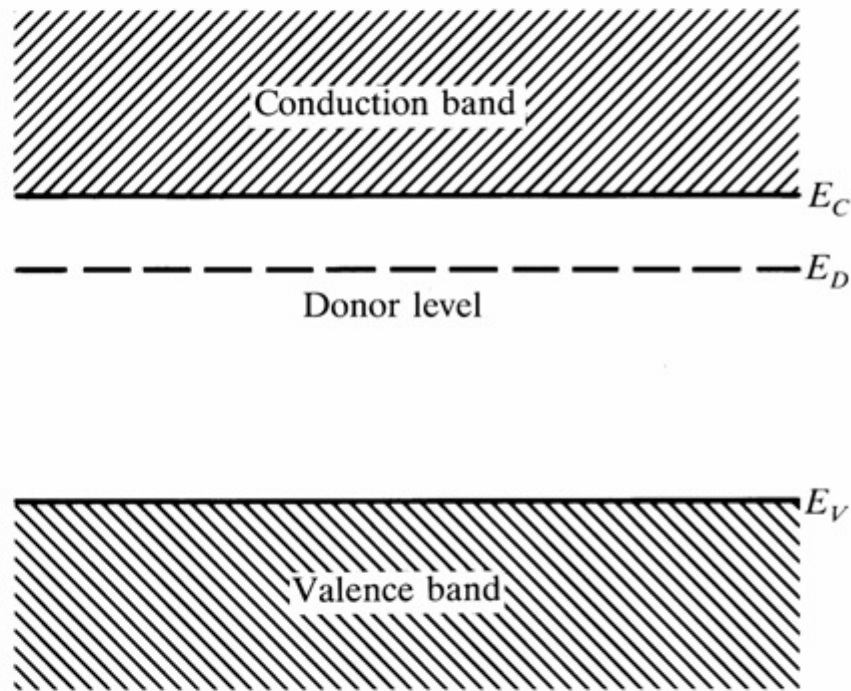


(b)

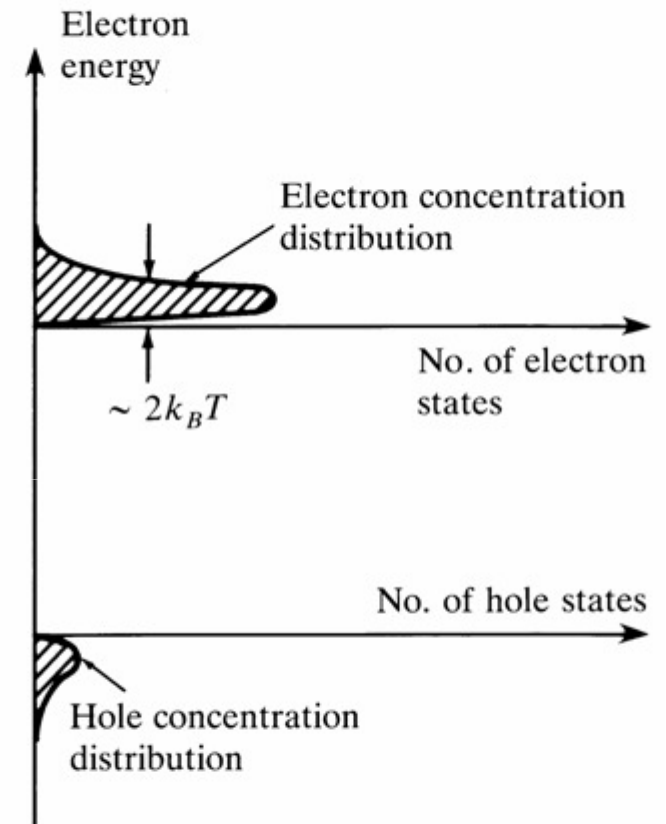
$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

- a) Energy level diagrams showing the excitation of an electron from the valence band to the conduction band. The resultant free electron can freely move under the application of electric field.
- b) Equal electron & hole concentrations in an intrinsic semiconductor created by the thermal excitation of electrons across the band gap

n-Type Semiconductor



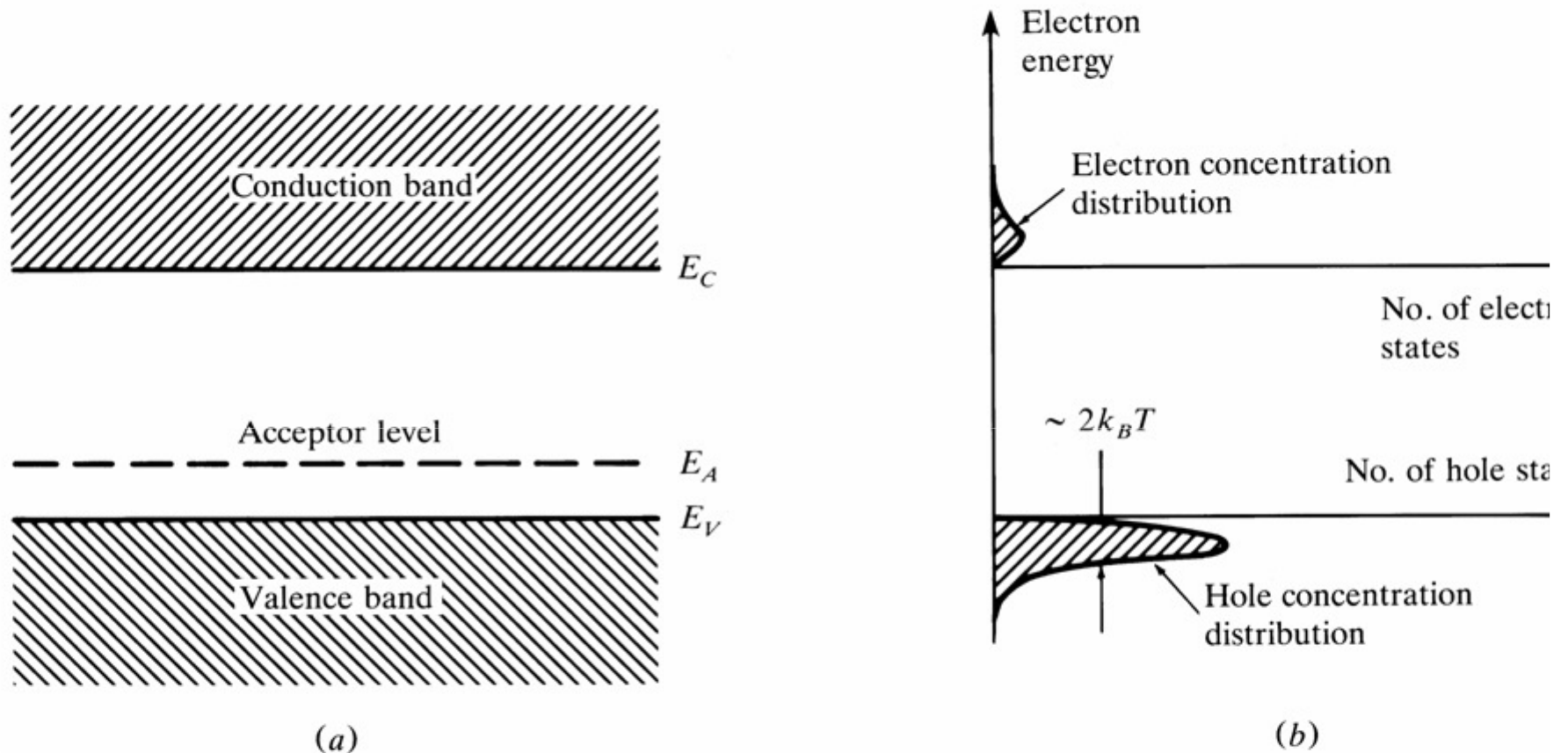
(a)



(b)

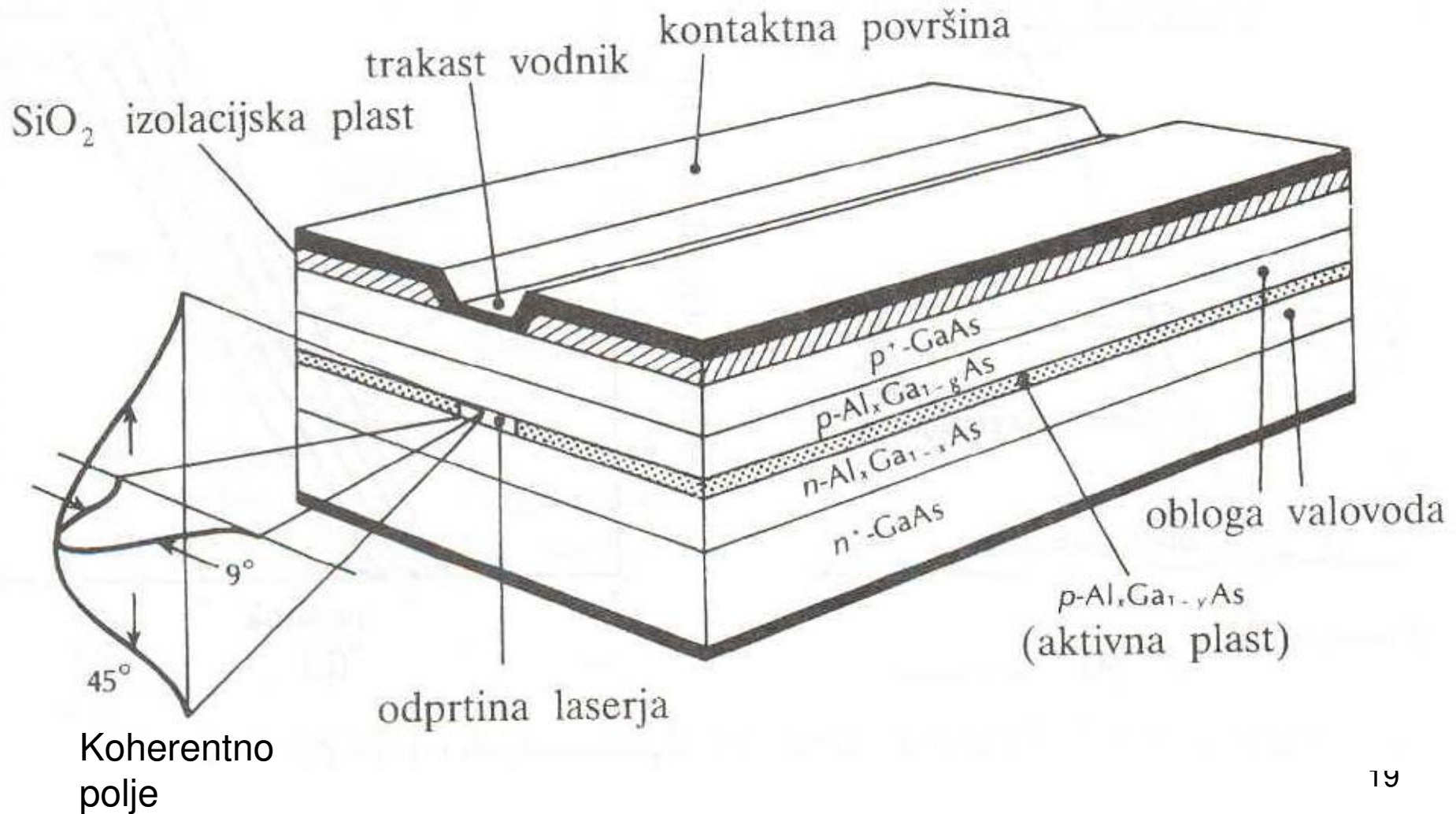
- a) Donor level in an *n*-type semiconductor.
- b) The ionization of donor impurities creates an increased electron concentration distribution.

p -Type Semiconductor

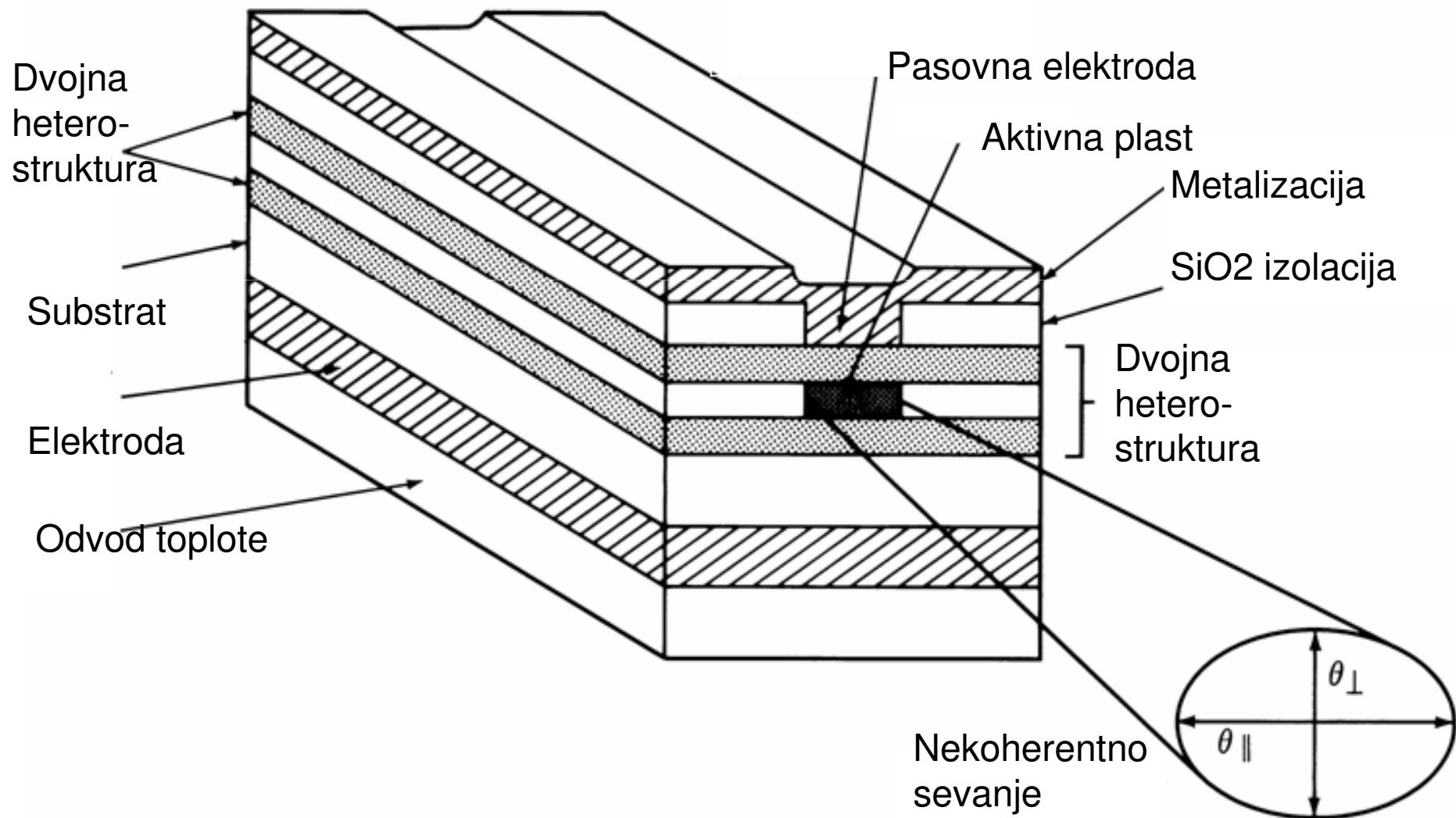


- a) Acceptor level in an p -type semiconductor.
- b) The ionization of acceptor impurities creates an increased hole concentration distribution

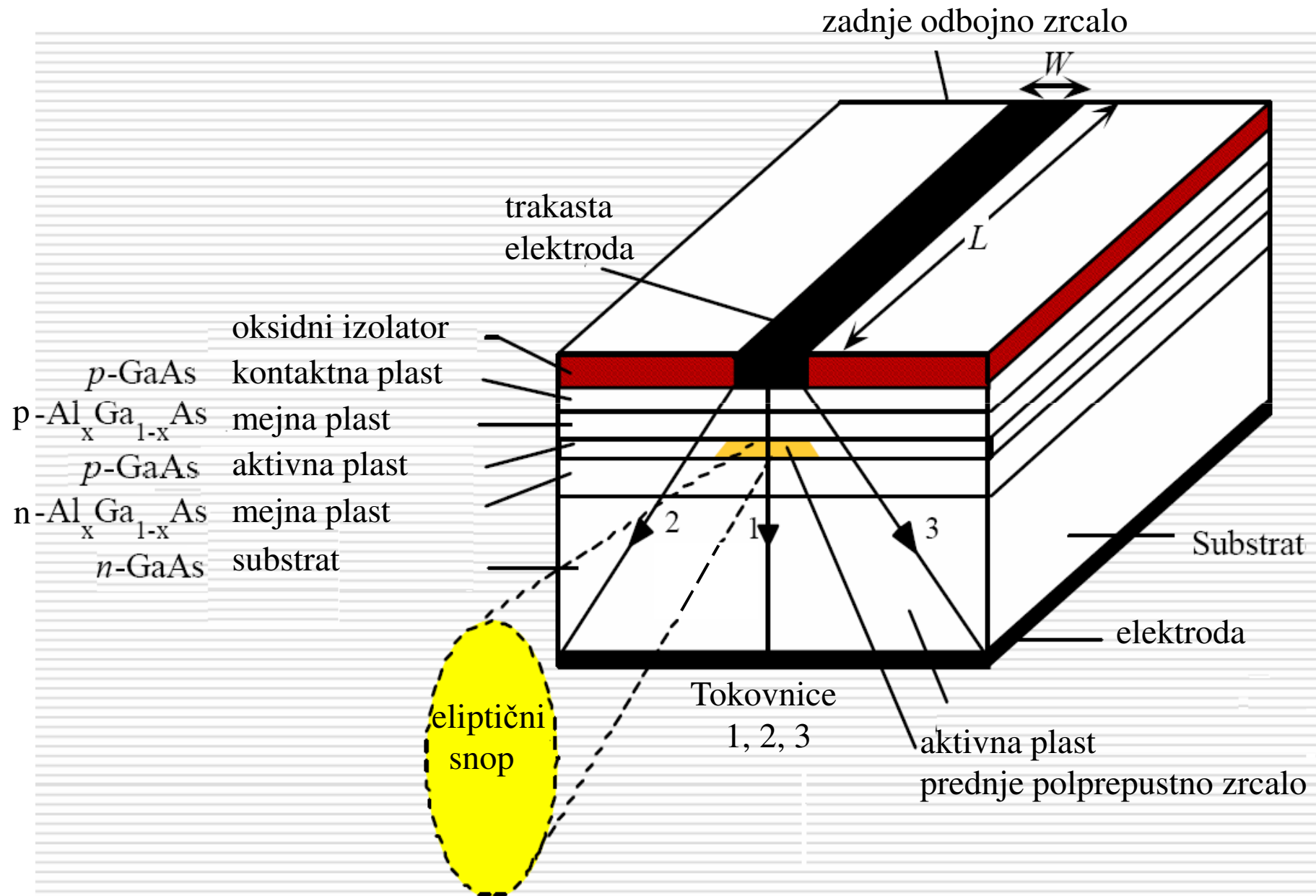
Struktura laserske diode LD



Struktura svetleče diode LED

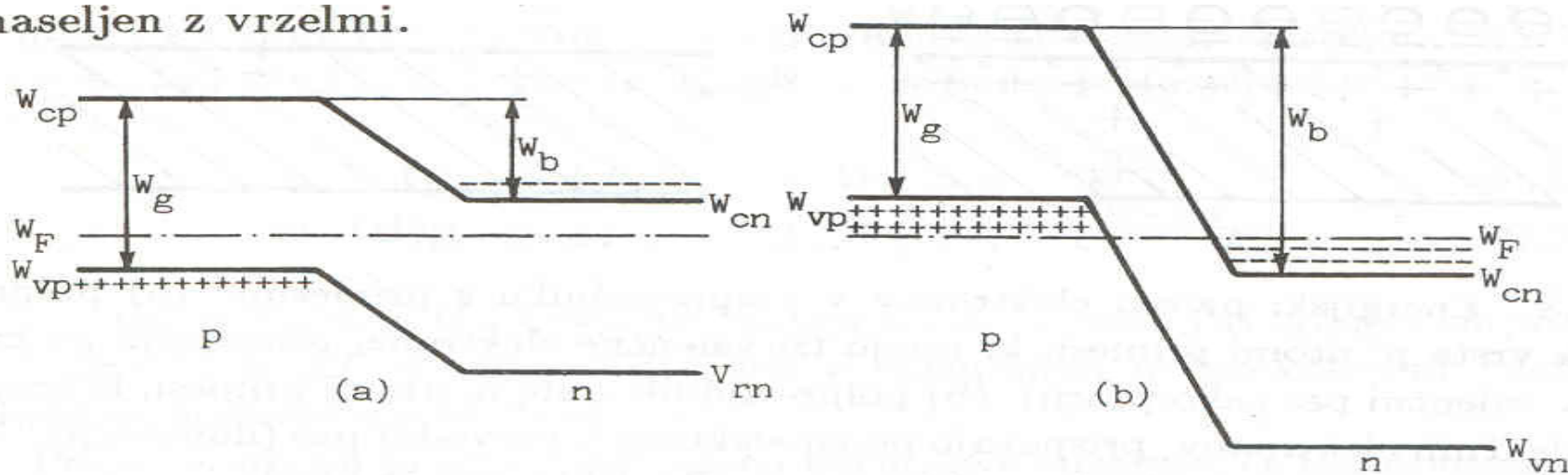


Struktura laserske diode

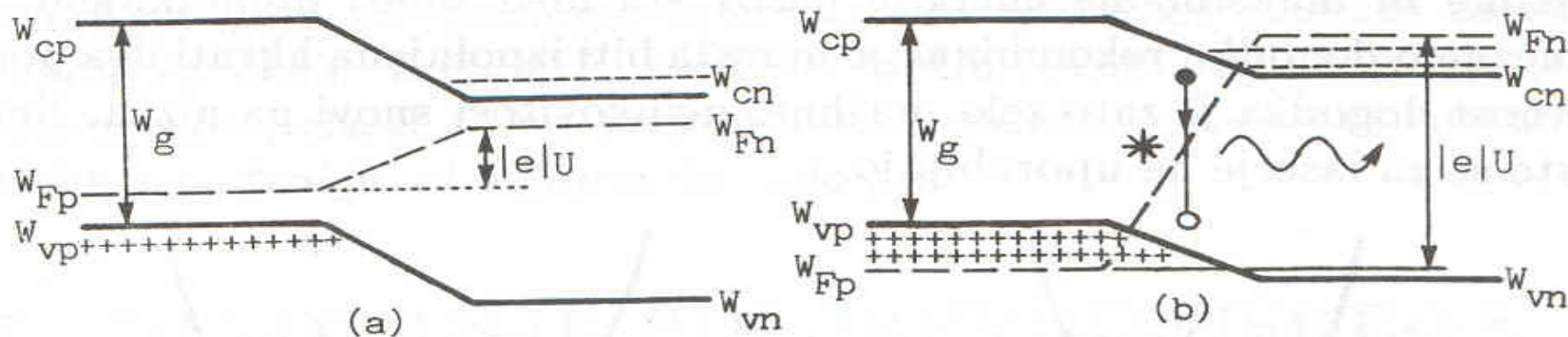


Zaporna plast spoja p-n

naseljen z vrzelmi.



Sl. 9.9. Zaporna plast spoja $p-n$ v termodinamičnem ravnotežju: (a) majhna koncentracija primesi, Fermijev nivo leži v prepovedanem pasu; (b) visoka koncentracija primesi, Fermijev nivo sega v prevodni oziroma valenčni pas.

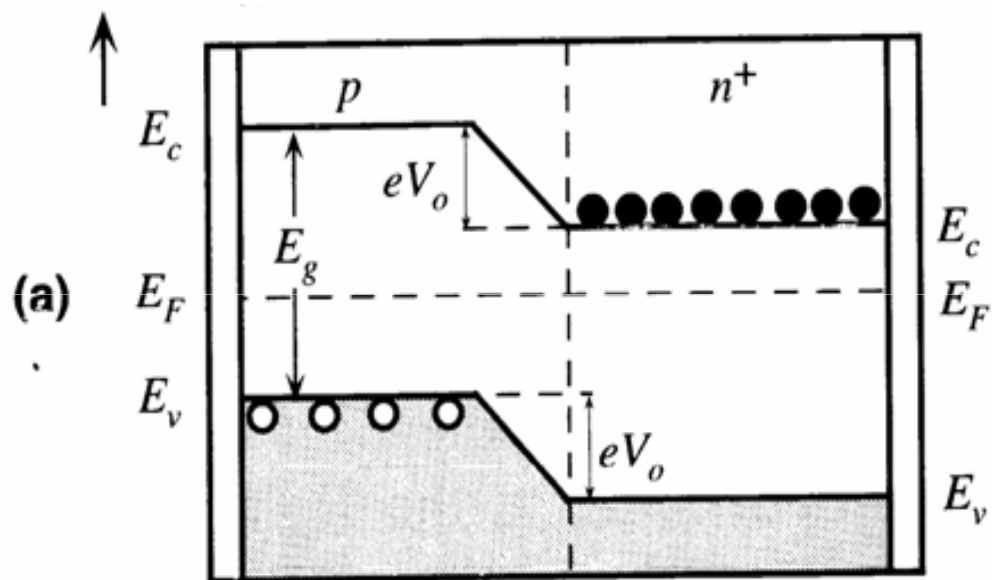


Sl. 9.10. Zaporna plast spoja $p-n$ pri vsiljeni napetosti: (a) znižana bariera pri nizki koncentraciji primesi in nizki vsiljeni napetosti; (b) znižana bariera pri visoki koncentraciji primesi in povišani vsiljeni napetosti.

LED, p-n spoj

Energijski nivoji v odsotnosti napetosti

Energijski nivoji pri zunanji napetosti



→ Dimenzija v spoj

- Elektroni v prevodnem pasu
- Vrzeli v valenčnem pasu

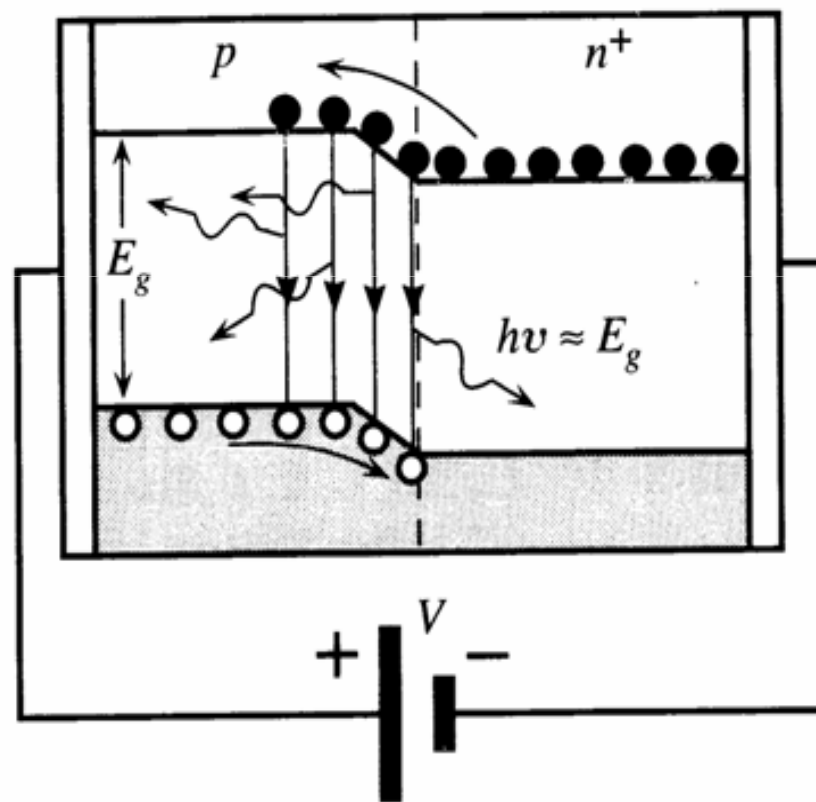
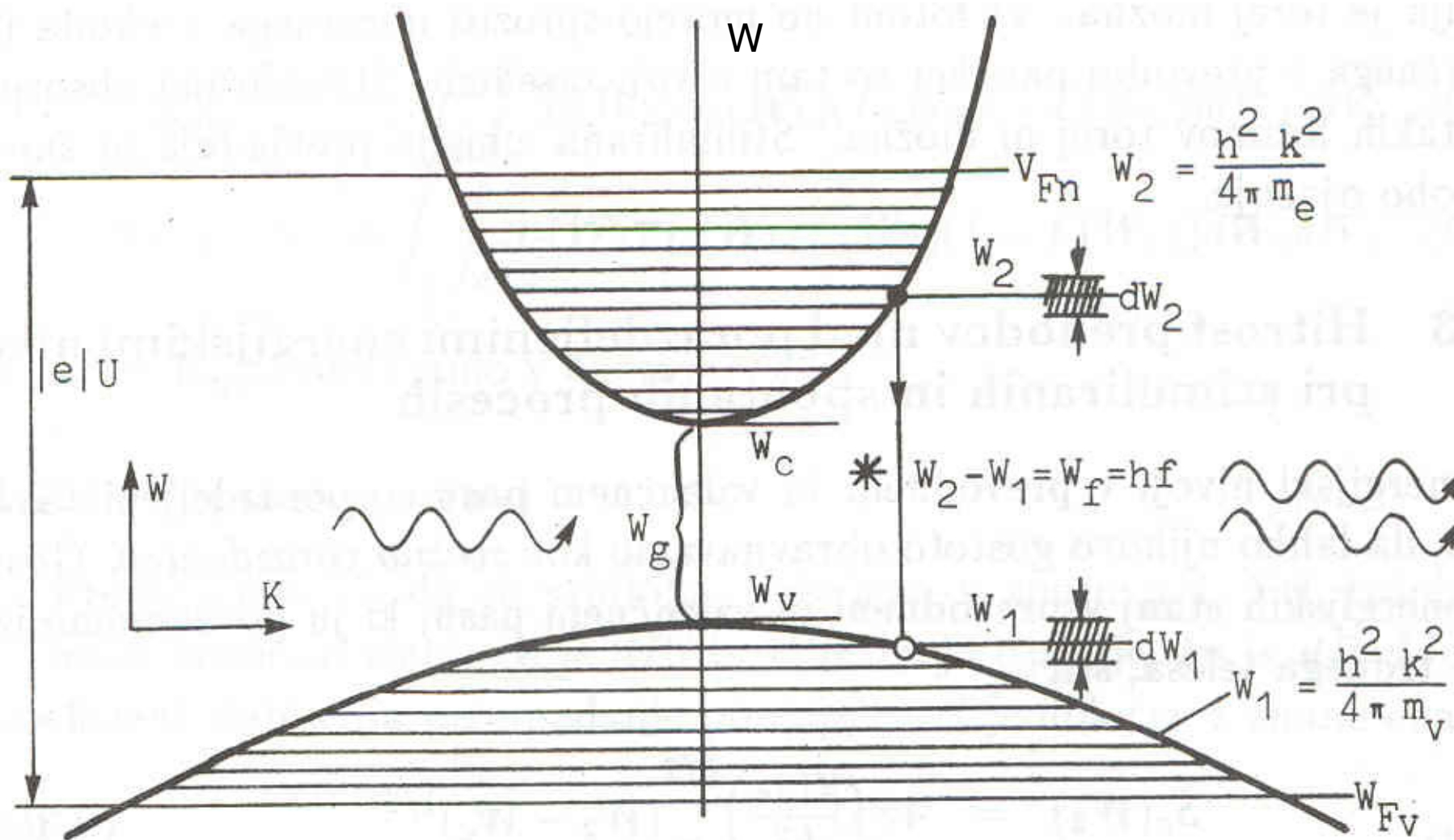


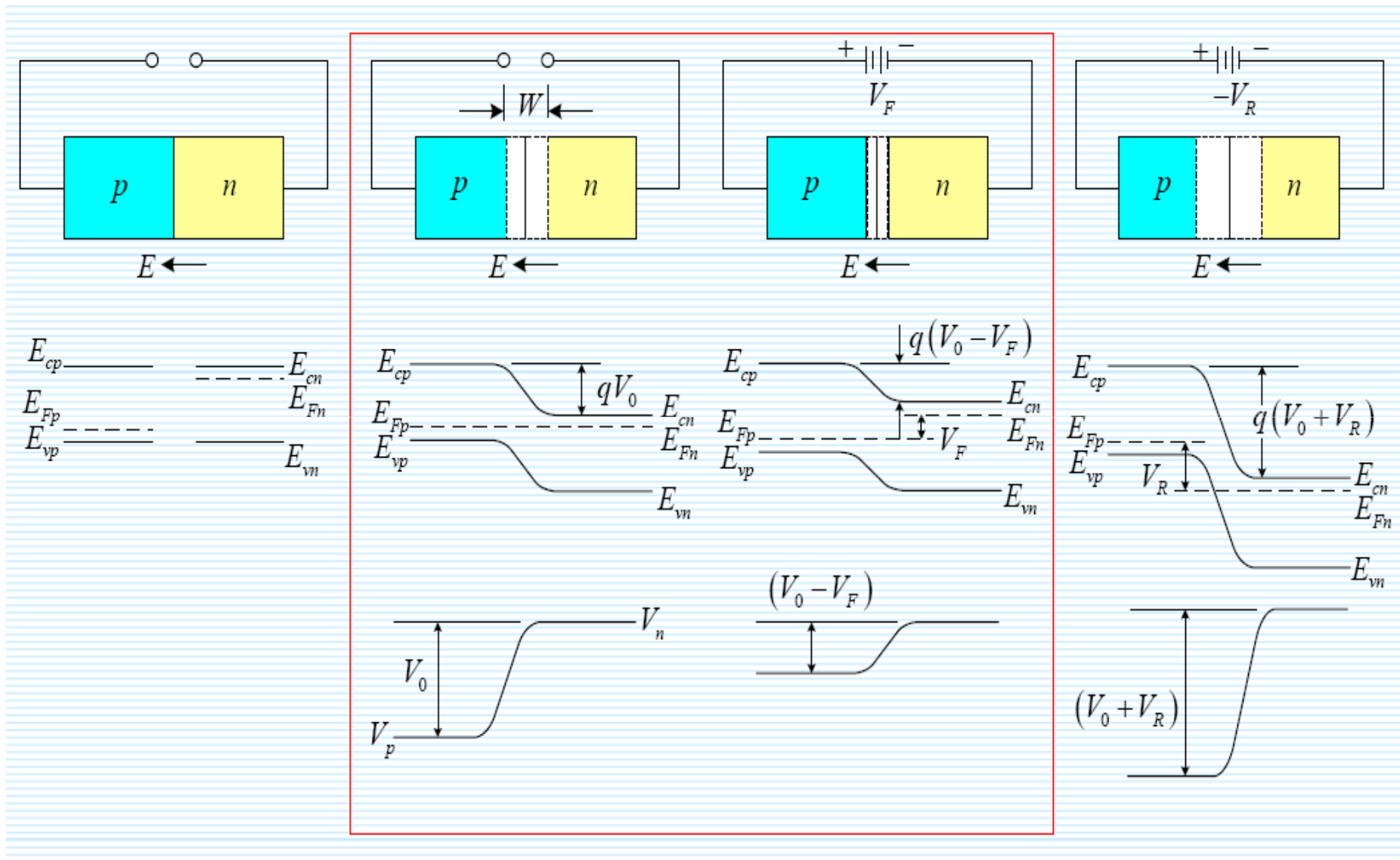
Diagram W-K



W...energija

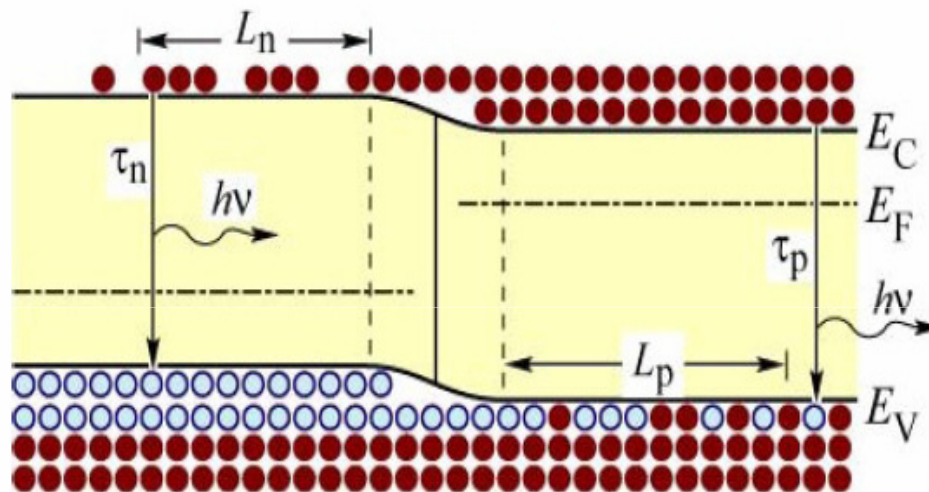
K...gibalna količina

Spoj p-n



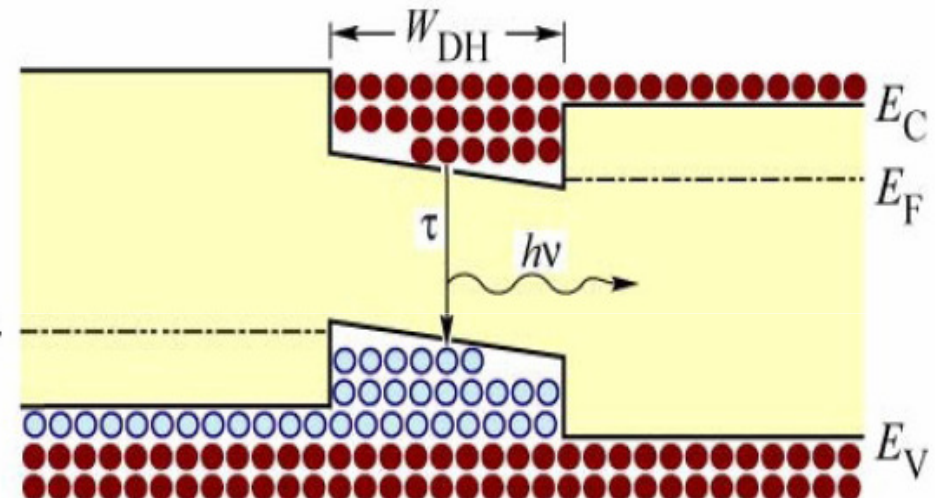
Rekombinacijsko območje

Homospojna struktura pod napetostjo



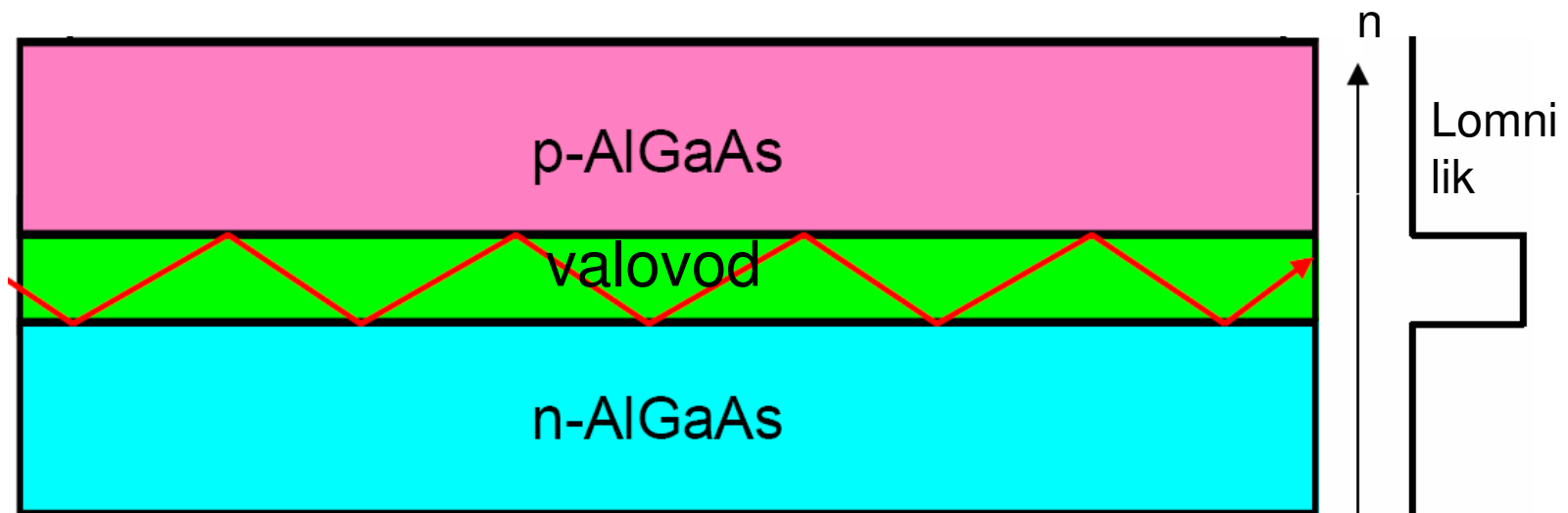
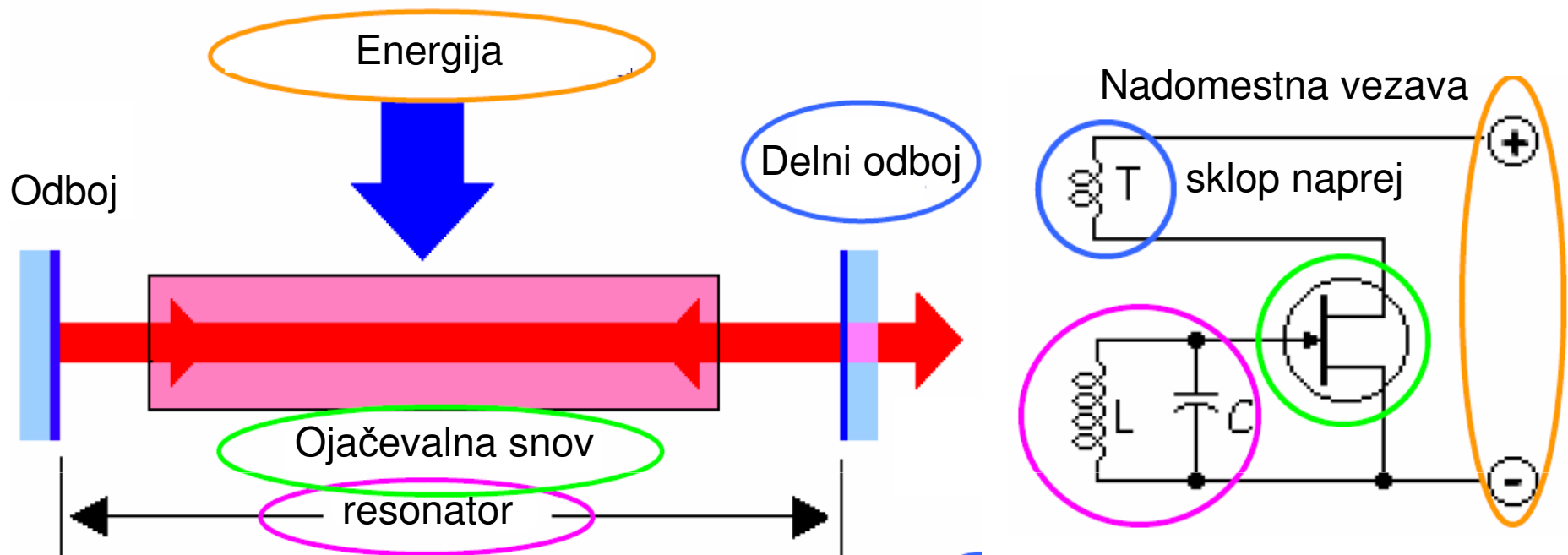
Območje spoja, kjer nastaja rekombinacija, določajo **lastnosti materiala** (difuzijska dolžina)

Heterospojna struktura pod napetostjo

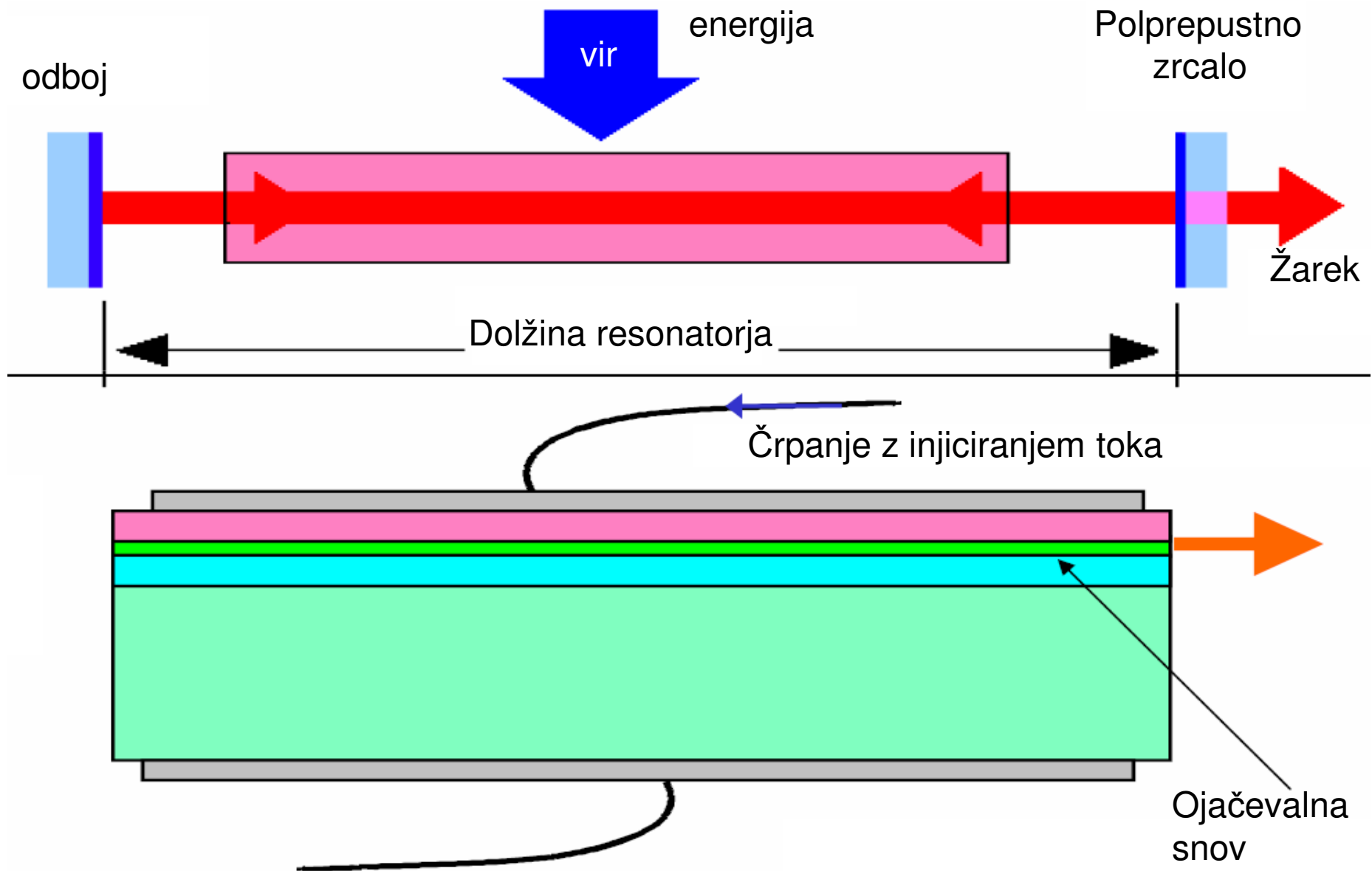


Območje rekombinacije je določeno z debelino plasti, ki je **parameter pri načrtovanju**.

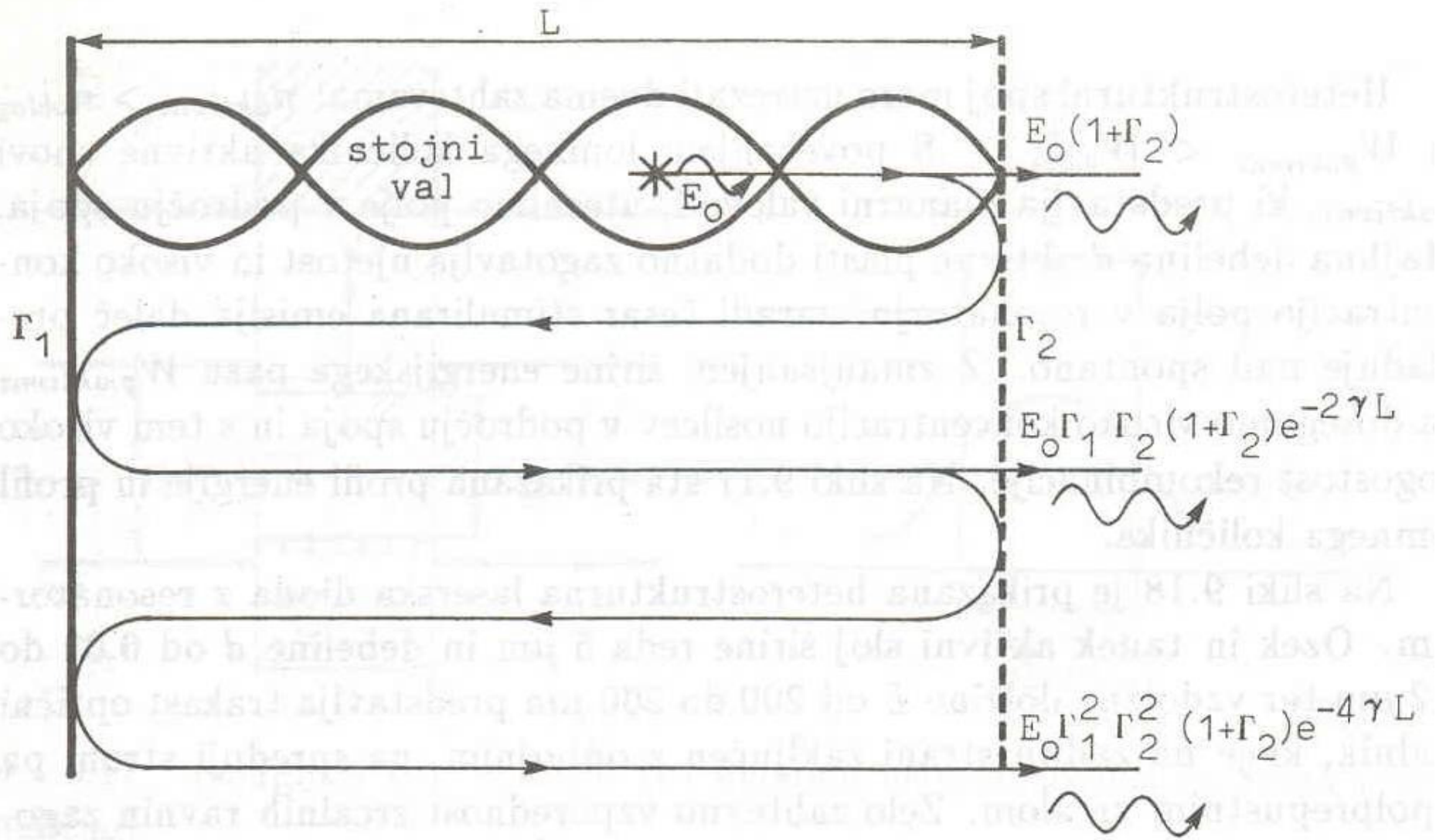
Laserska dioda kot oscilator



Laserska struktura in princip

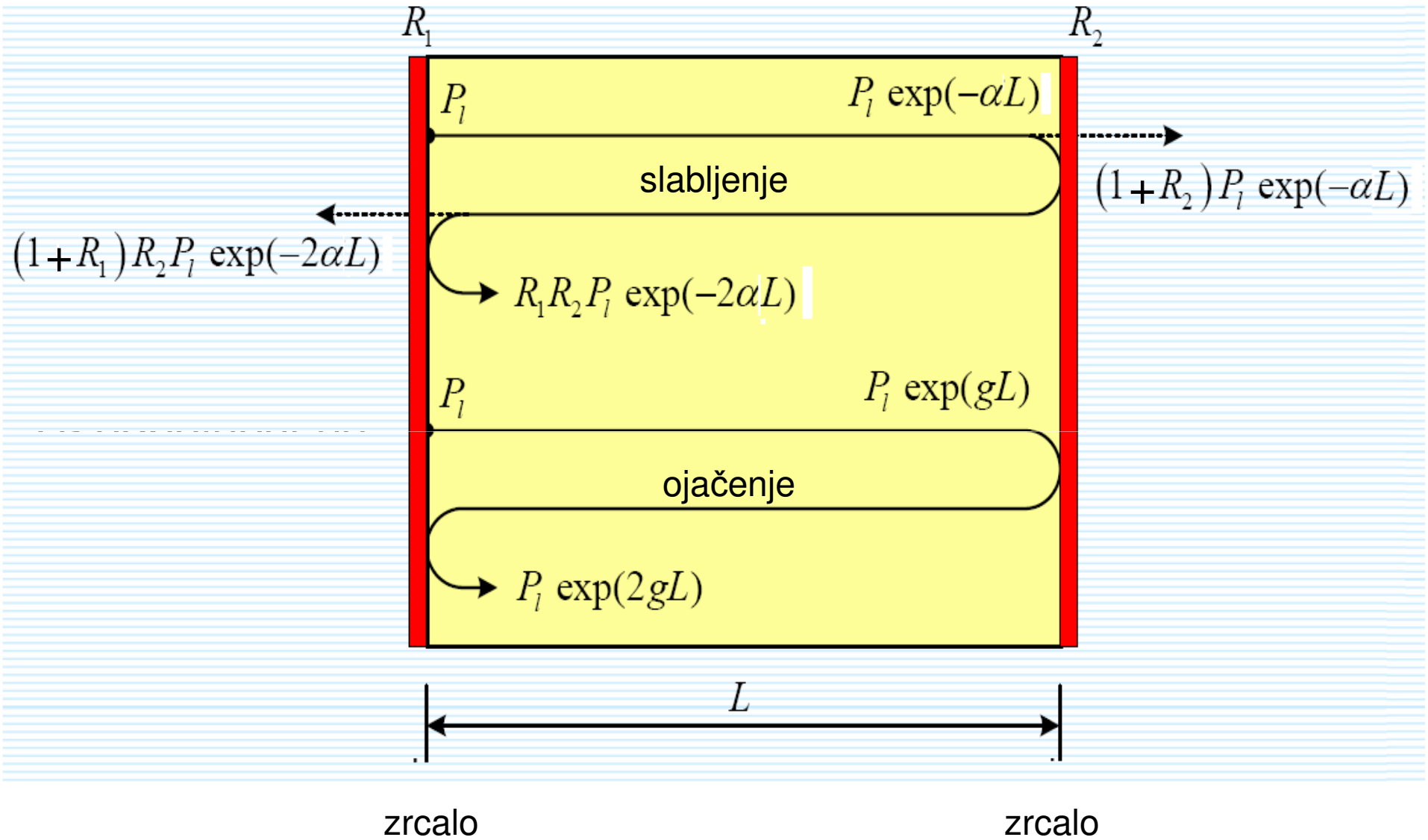


Nastanek resonančnega pojava



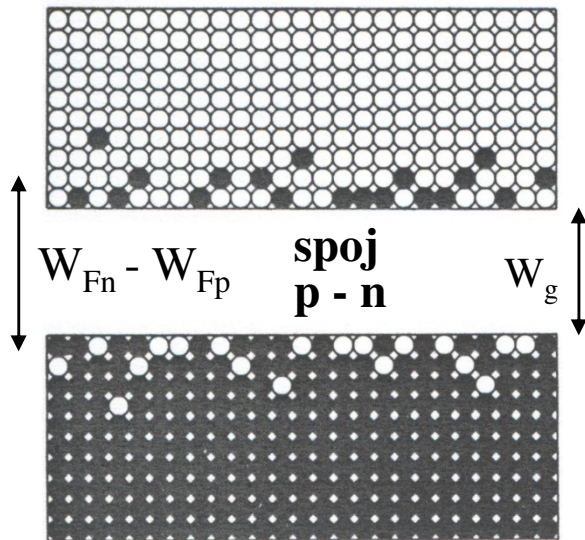
Sl. 9.19. Časovno zaporedje odbitih valov v resonatorju (shematski prikaz).

Slabljenje in ojačenje v snovi resonatorja



Resonator

Generacija svetlobe v polprevodnikih



Materiali:

GaAs,
AlGaAs,
InP

Rekombinacija para elektron - vrzel

Nastanek fotona energije $h\nu$:

$$W_g < h\nu < W_{Fn} - W_{Fp}$$

W_{Fn} , W_{Fp} - Fermijeva nivoja

Pogoj: inverzija neseljenosti

• Črpanje:

- zunanja vsiljena napetost U povzroči razmik Fermijevih nivojev $eU = W_{Fn} - W_{Fp}$
- heterospoj omogoča koncentracijo nosilcev in polja v aktivni plasti (valovod v spoju p - n)

• Sevanje:

- stimulirana emisija (spodbujena rekombinacija elektronov in vrzeli)
- spontana emisija (naključna rekombinacija elektronov in vrzeli)

• Šum:

- relativni intenzitetni šum (fluktuacija optične moči, ki se v RF spektru detektira kot šum)

$$\overline{i_{RIN}^2} = (RP)^2 RIN \Delta f \quad \text{srednjekvadratna vrednost šumnega toka}$$

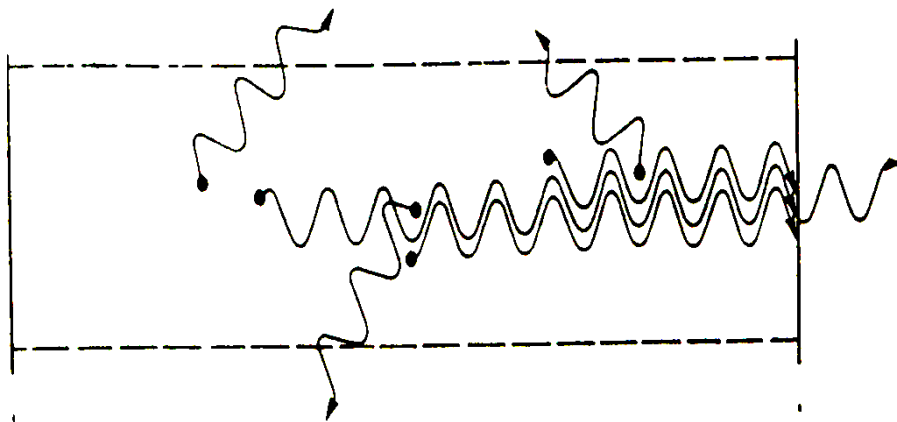
RIN ... koeficient relativnega intenzitetnega šuma v Hz^{-1}

P moč laserja na vходу detektorja v W

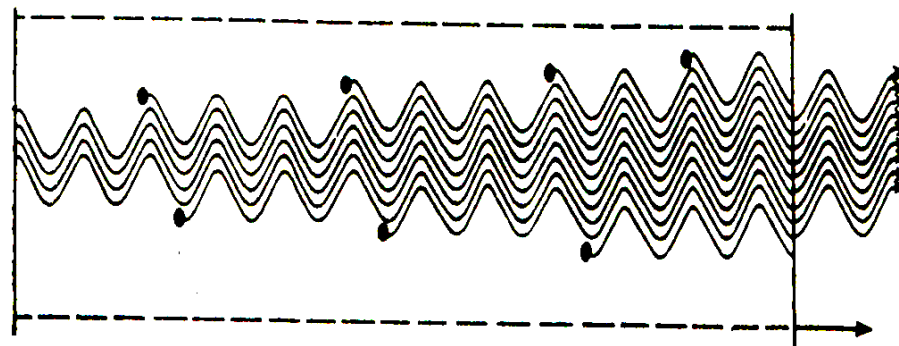
Δf radiofrekvenčni pas sprejemnika v Hz

ρ odzivnost fotodetektorja v A/W

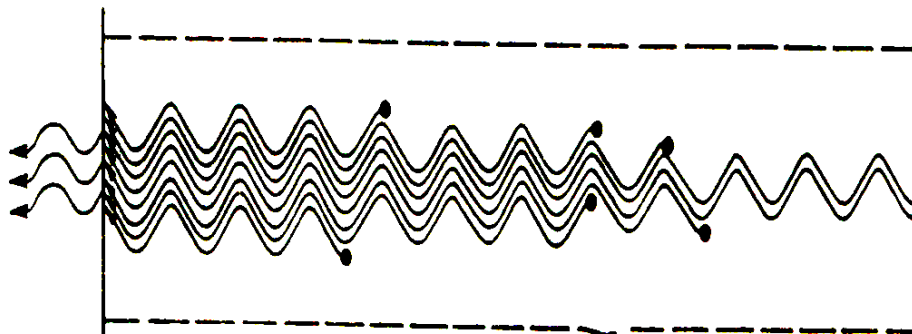
Laserski plazovni pojav



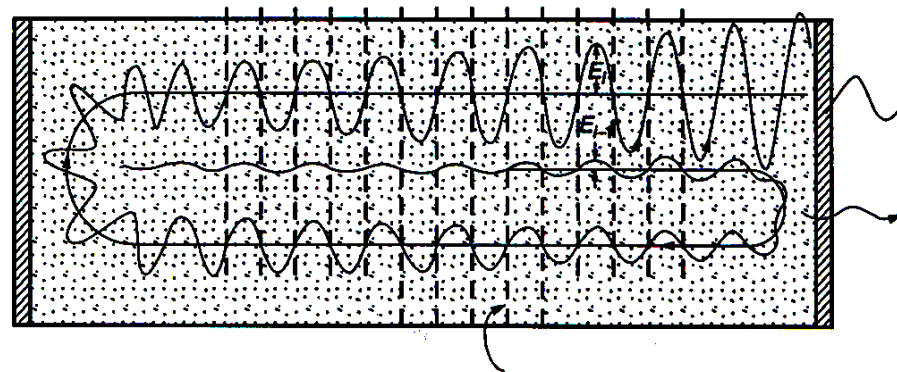
1. Spontana emisija in začetek stimulirane emisije v aktivni snovi med polprepustnima zrcaloma. Zrcali svetlobo odbijata in jo delno prepuščata.



3. Odboj od levega polprepustnega zrcala in dodatna stimulirana emisija. Na poti skozi snov se stimulirana emisija znova ojači.

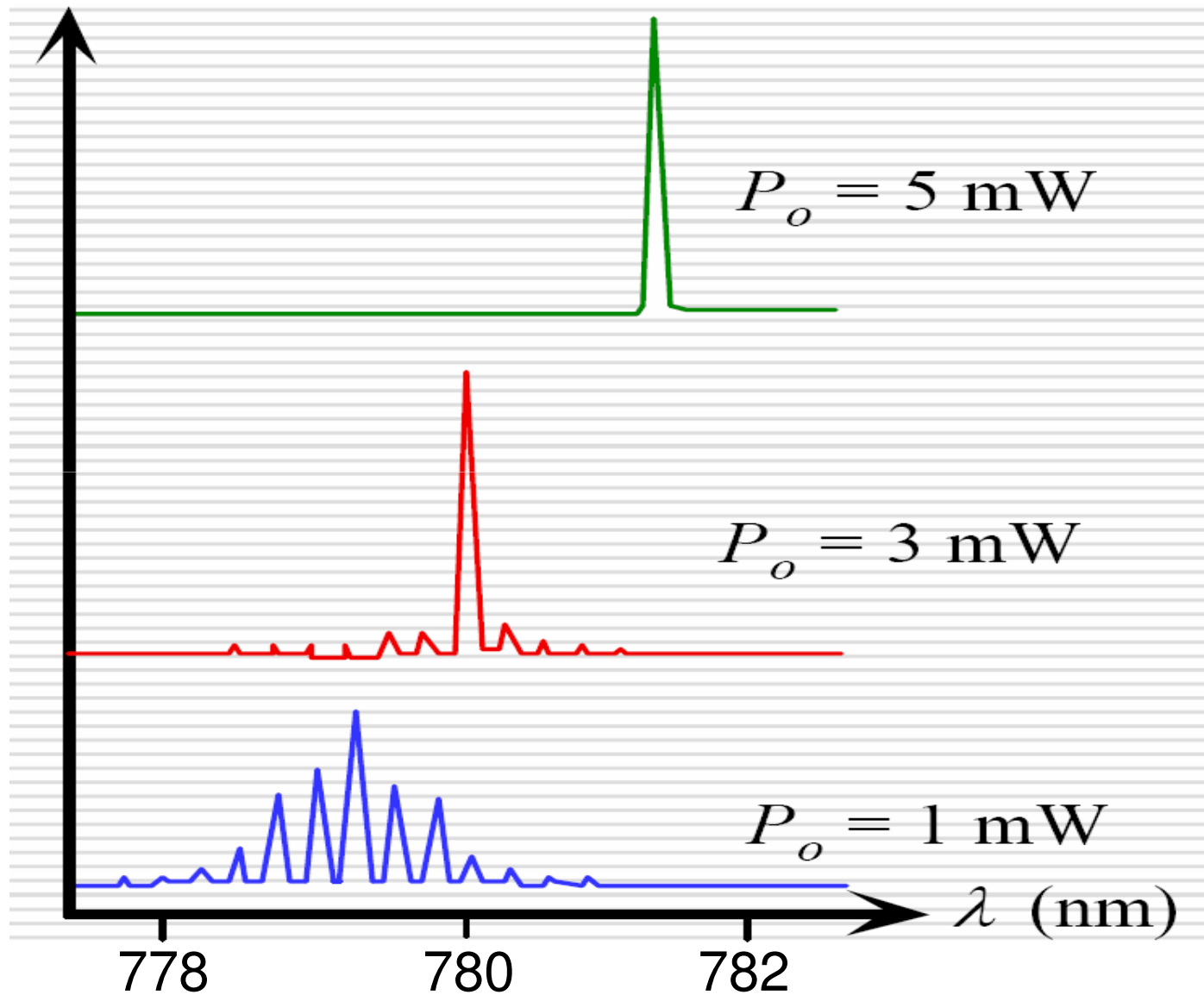


2. Odboj od desnega polprepustnega zrcala in stimulirana emisija. Na poti skozi snov nastaja dodatna stimulirana emisija, ki svetlobo ojačuje.

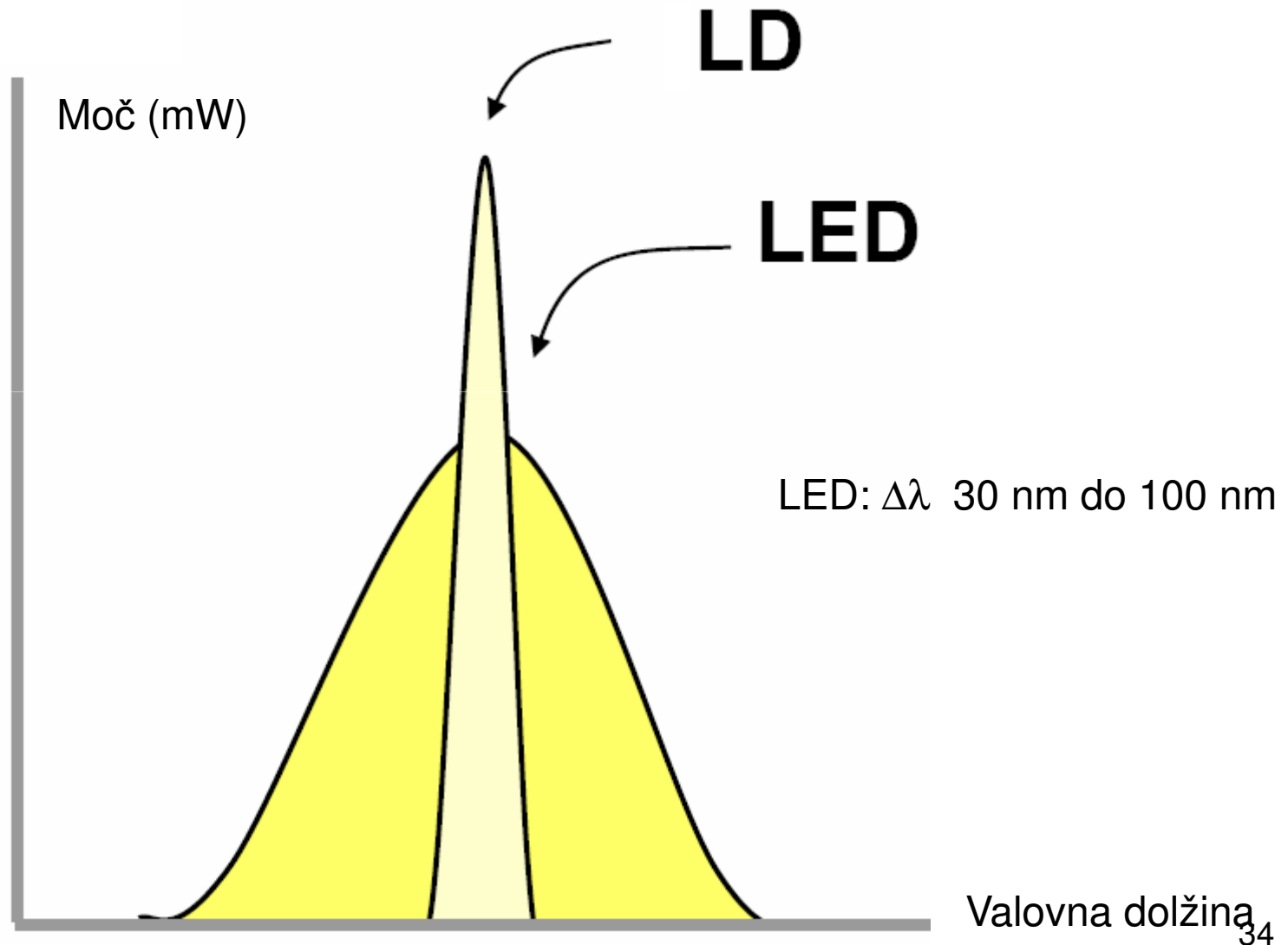


4. Resonatorski pojav na valovni dolžini, pri kateri je dolžina resonatorja mnogokratnik valovne dolžine ($L = m\lambda/2$). Polje naraste na vrednost, pri kateri je generirana moč enaka sevani moči skozi zrcali in absorbirani moči v snovi.

Spekter in plazovni pojav

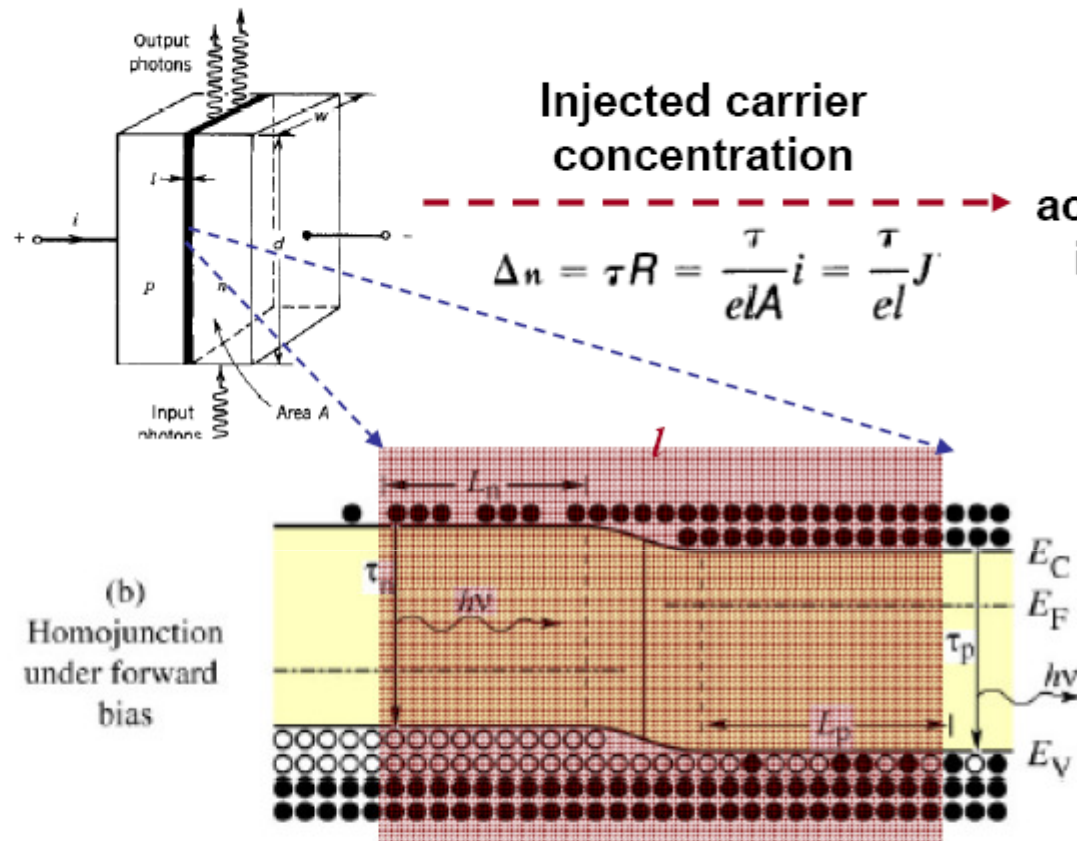


Spekter LD in LED

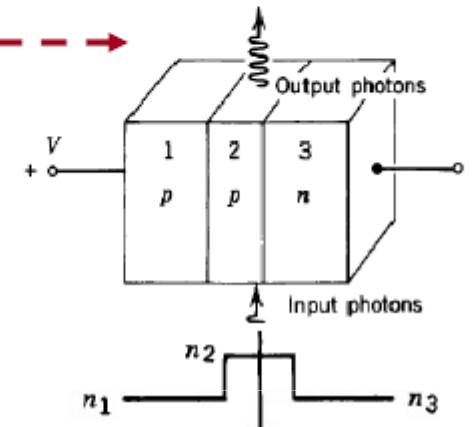


Heterostruktüre

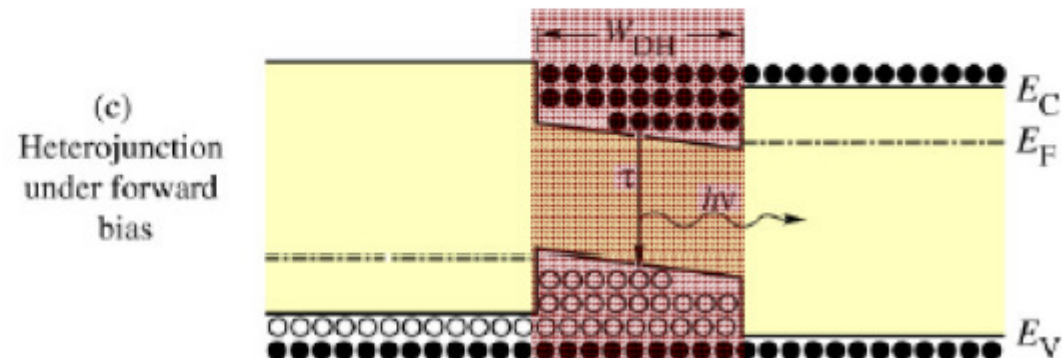
Heterostructures



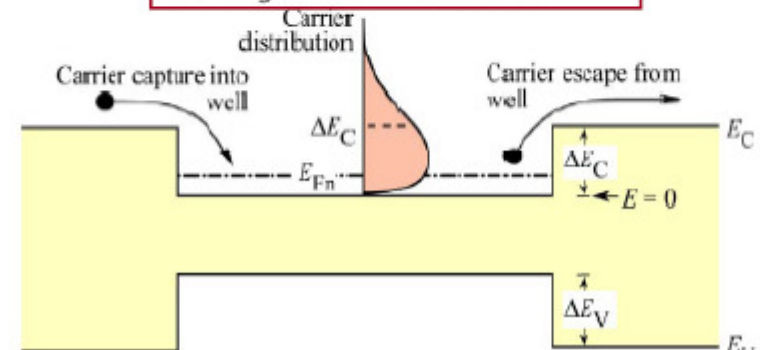
(Double) Heterostructures



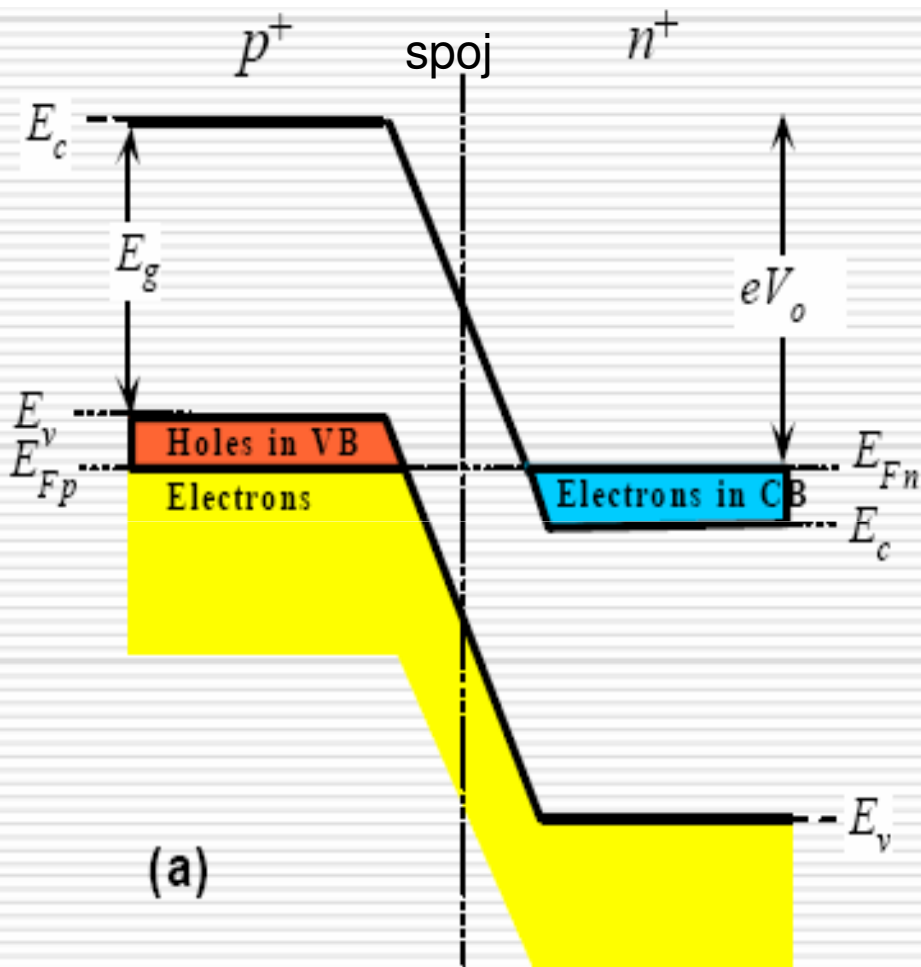
Layer 1: p-type, energy gap E_{g1} , refractive index n_1
 Layer 2: p-type, energy gap E_{g2} , refractive index n_2
 Layer 3: n-type, energy gap E_{g3} , refractive index n_3



carriers are confined by the heterojunction barriers.

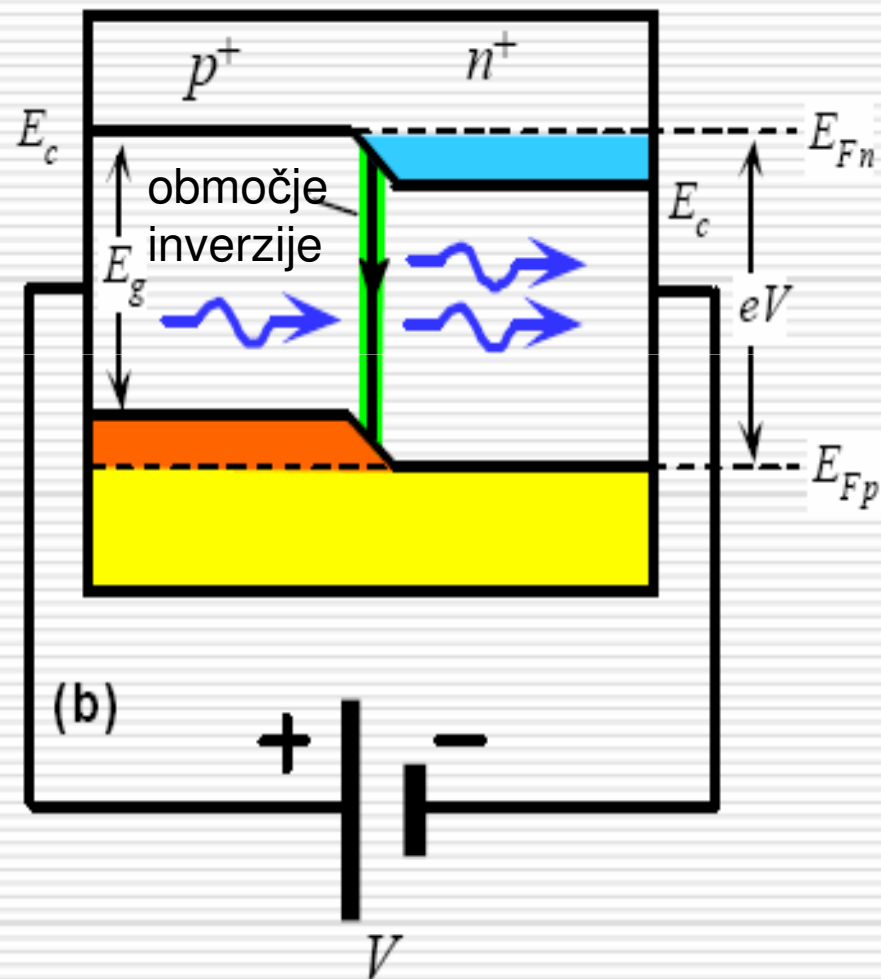


Primer heterostrukture

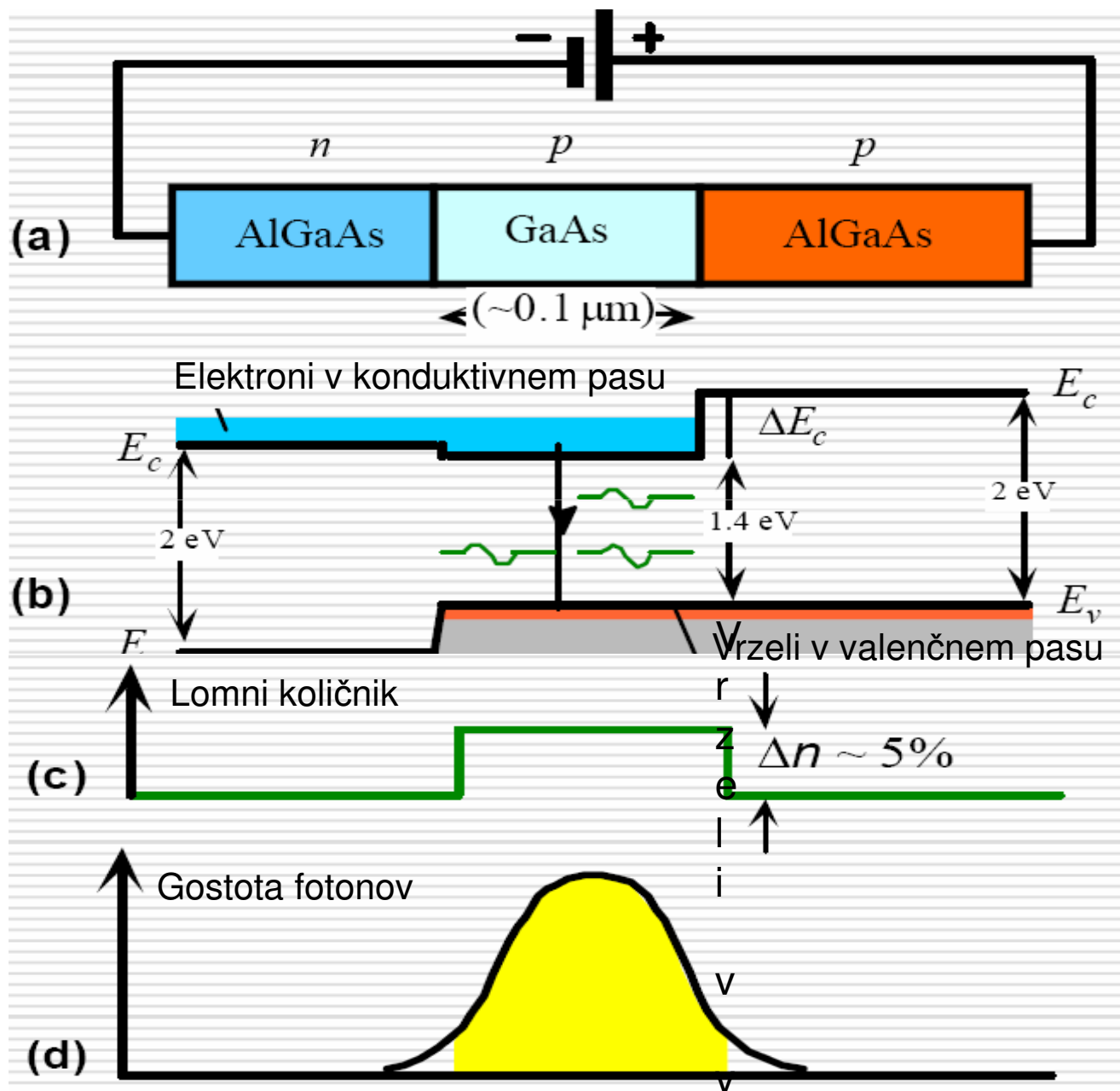


(Degeneriran) p-n spoj brez zunanje napetosti

Pasovni diagram pri zadostni napetosti za populacijsko inverzijo



Heterostrukturna LD



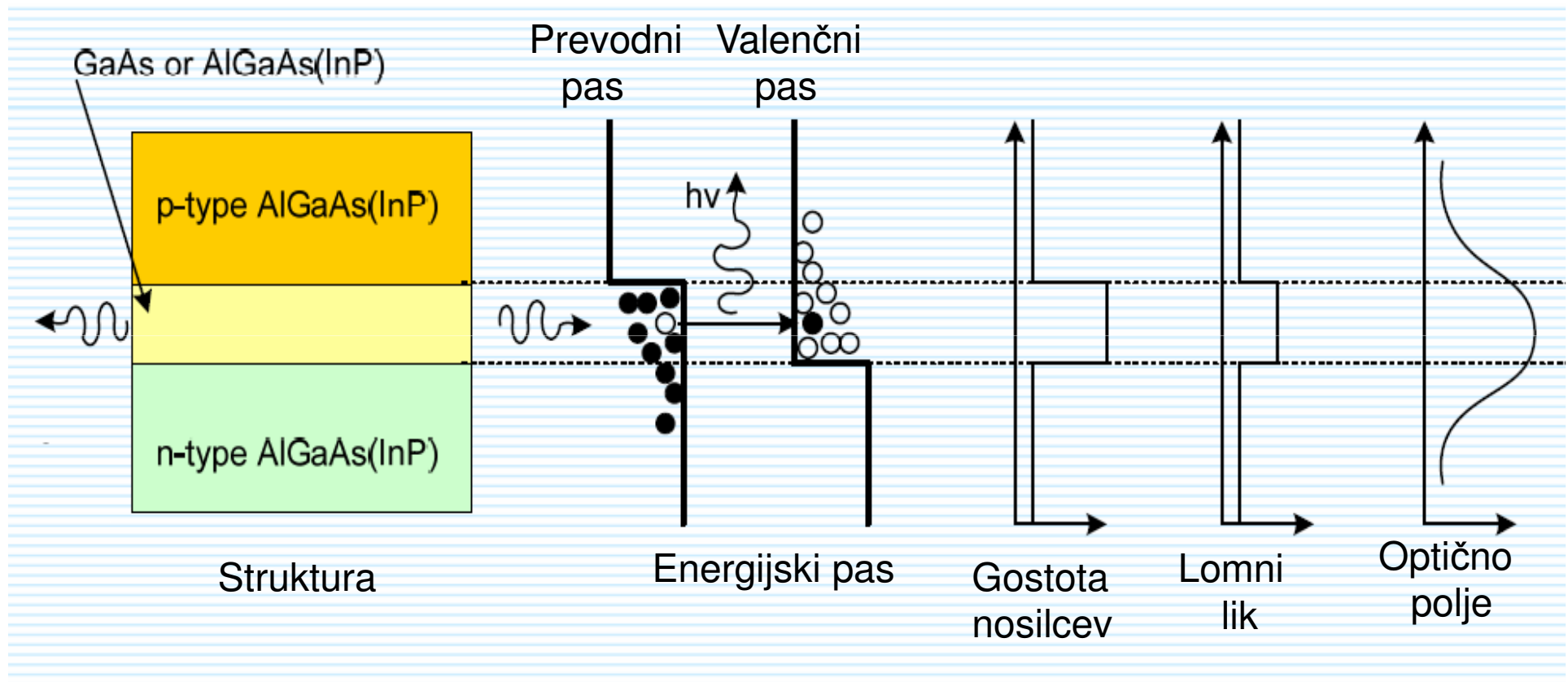
Dvojna heterostrukturna dioda ima dva spoja med materialoma GaAs in AlGaAs

V p-GaAs aktivni plasti se pojavljajo rekombinacije in plazovni pojav

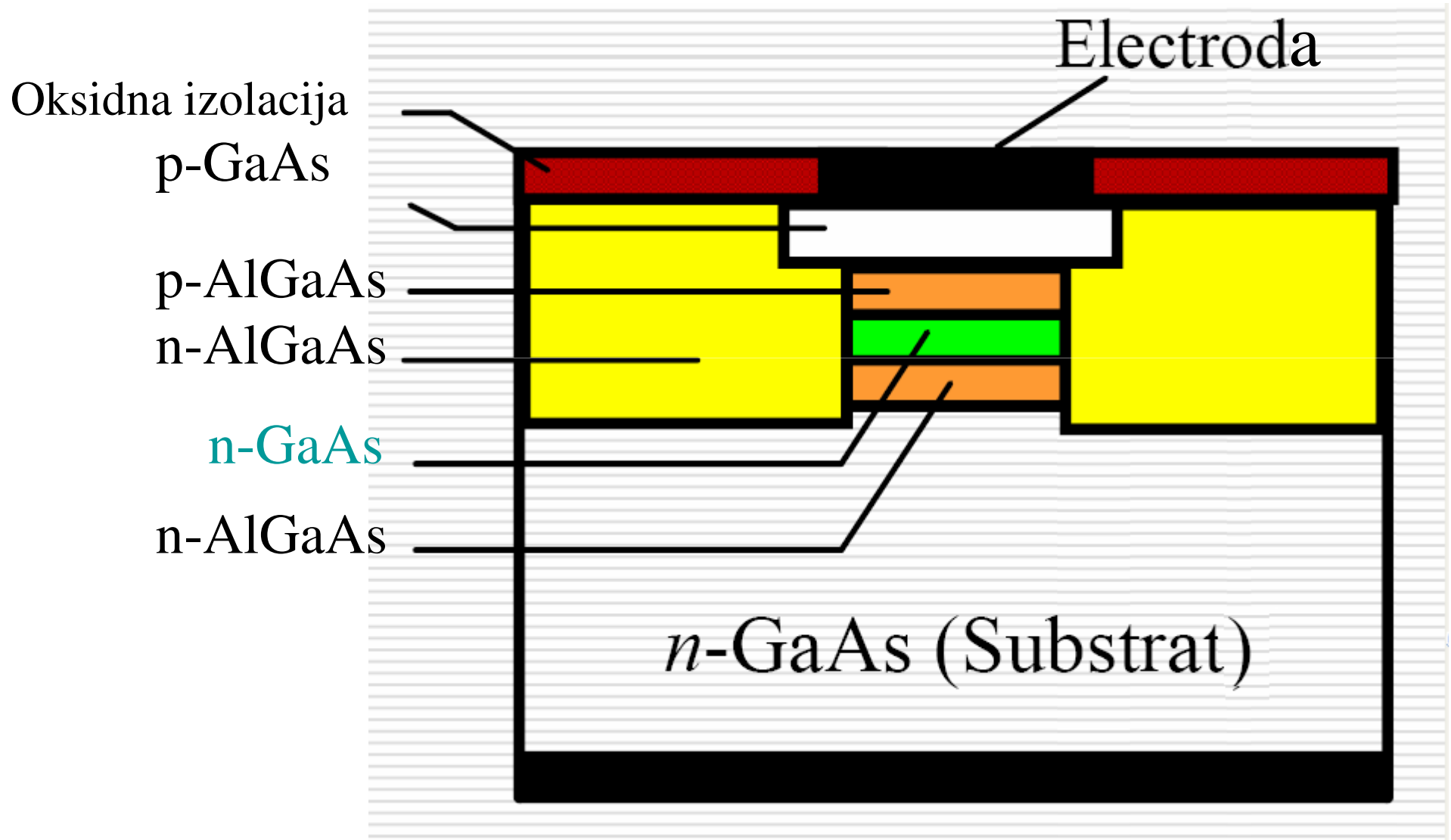
Material širšega energijskega pasu ima nižji lomni količnik

AlGaAs na obeh straneh omeujeta valovod

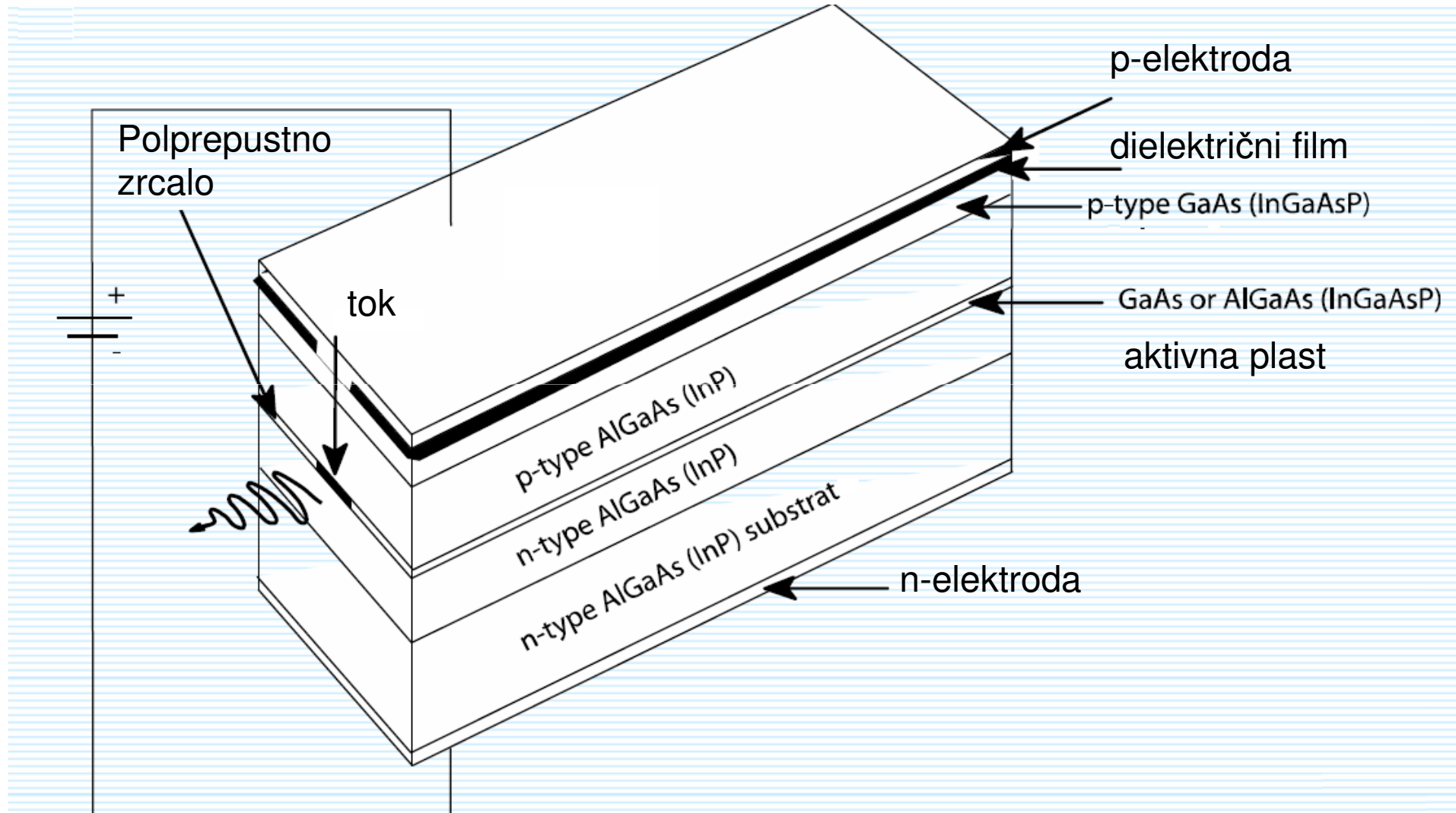
Energijske in optične lastnosti heterostrukture



Heterostruktura laserske diode

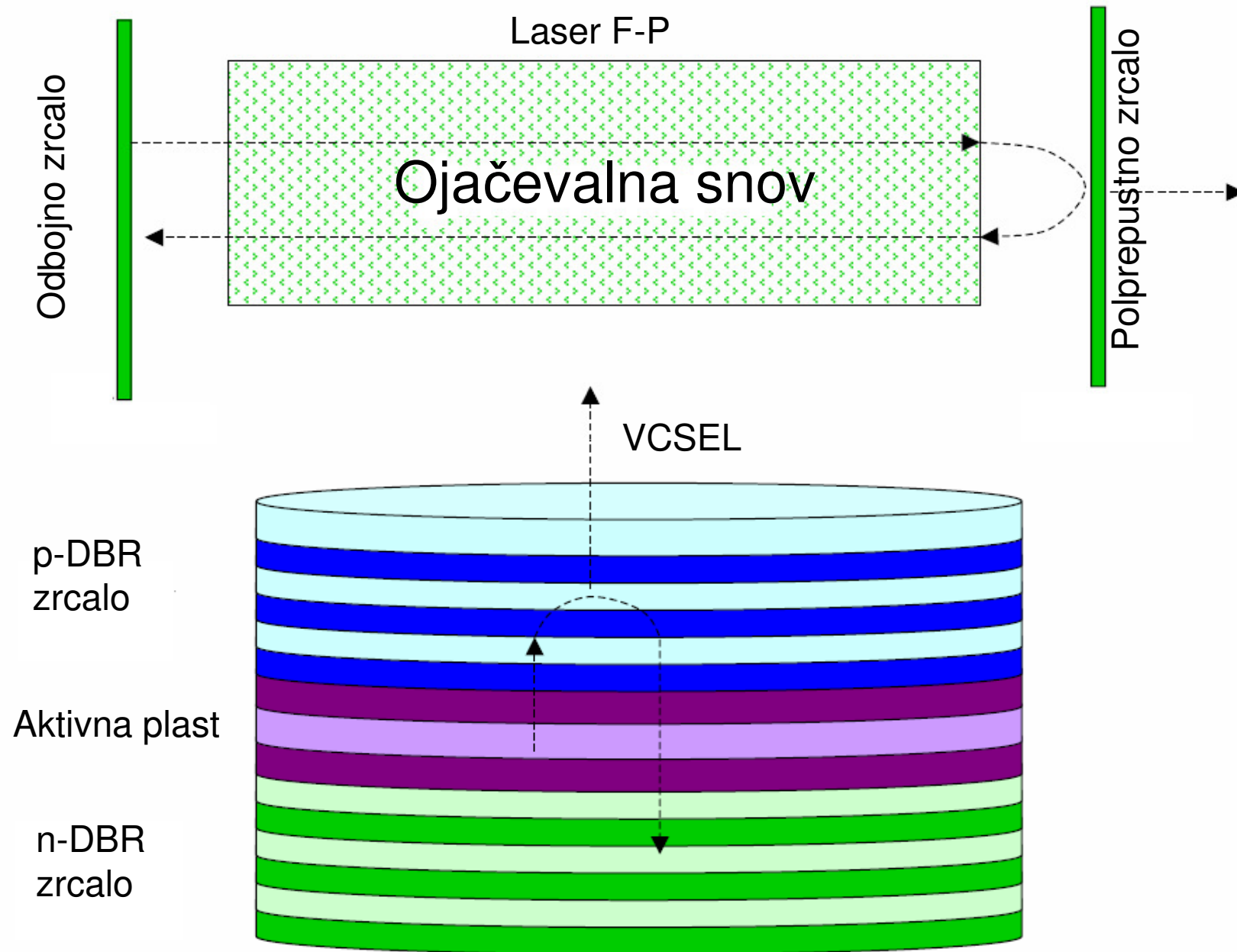


Laserska dioda AlGaAs(InP)

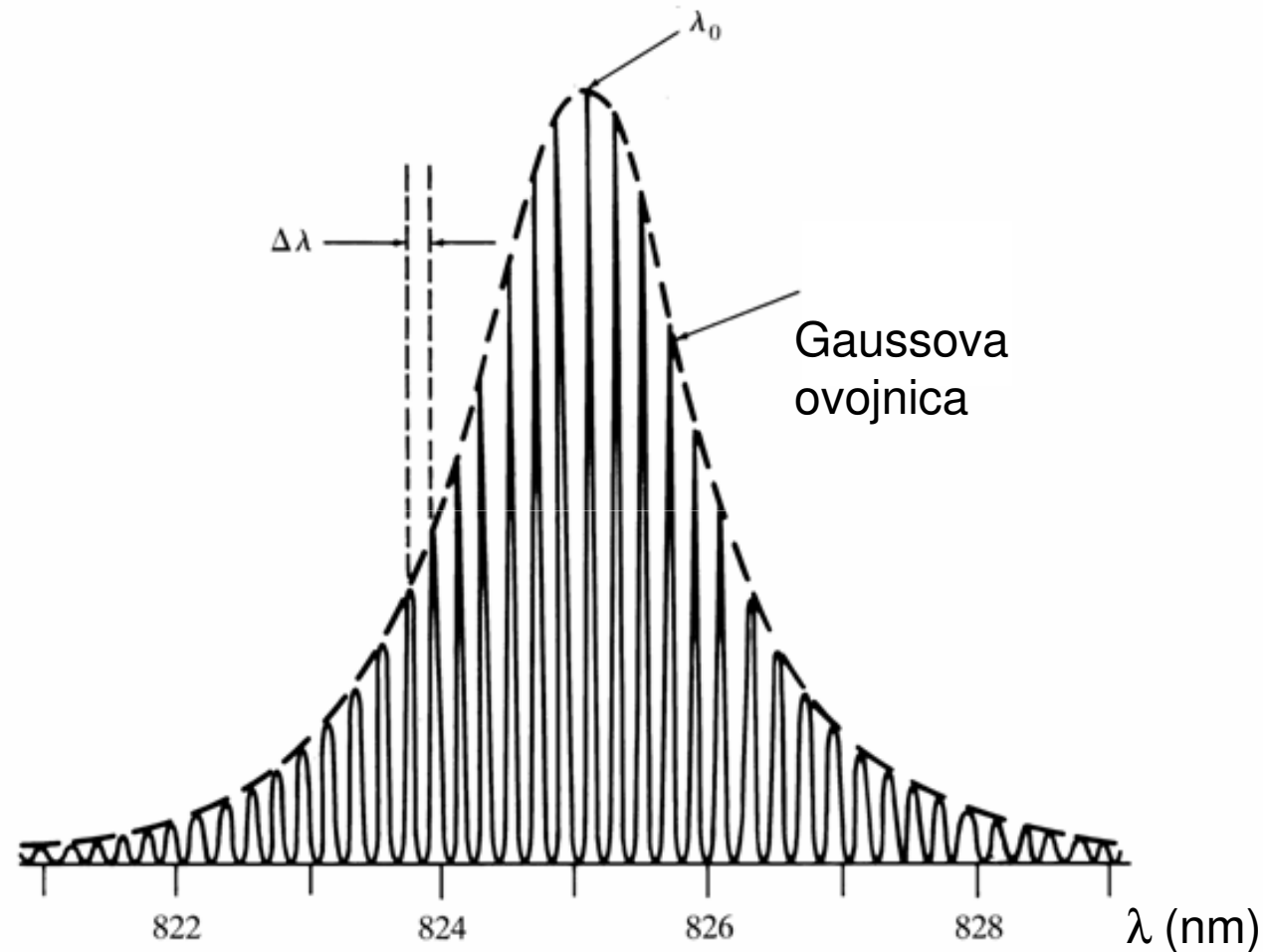


Pogoji delovanja laserja

LD – princip delovanja



Model spektra laserske diode



$$g(\lambda) = g(0) \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \sigma : \text{širina spektra}$$

Conditions for gain (lasing)

- $E_2 - E_1 < F_c - F_v$ (population inversion)
- $g \geq (1/L) \ln(1/R) + \alpha$ (net gain)
- $\lambda = 2nL/p$, p an integer (phase coherence)

Optični viri - razvrstitev in pregled

1. Polprevodniški viri (električno vzbujanje):

- svetleča dioda (Light Emitting Diode) - LED
 - svetleča dioda na čelno sevanje
 - svetleča dioda na stransko sevanje
- laserska dioda z resonatorjem Fabry-Perot - LD FP
- laserska dioda na porazdeljen povratni sklop (Distributed Feed Back) - LD DFB
- **laserska dioda na porazdeljen Braggov odboj (Distributed Bragg Reflector) - LD DBR**
- laser z vertikalnim resonatorjem na čelno sevanje (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) - VCSEL

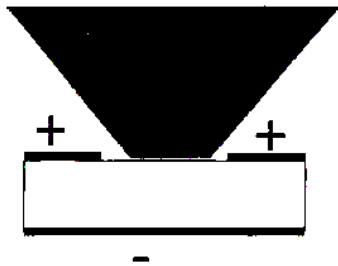
2. Vlakenski laserji (optično vzbujanje):

- vlakenski laser (Fiber Laser) - FL
 - vlakenski laser z aktivnimi primesmi v vlaknu
 - vlakenski laser na stimulirano Ramanovo sipanje
- superkontinuum (SuperContinuum source) - SC

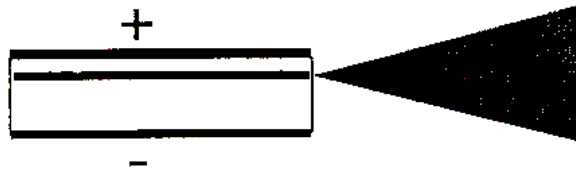
nekoherentni
*
koherentni

Polprevodniški viri - LED, laser, VCSEL

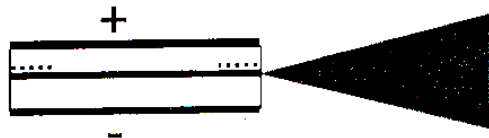
SLED



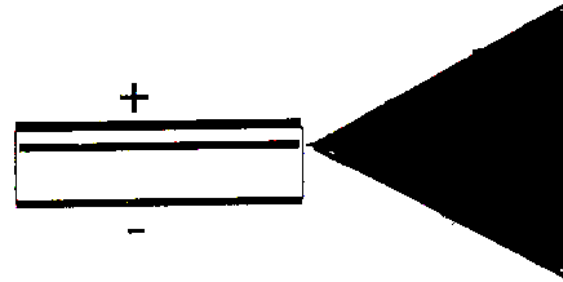
Laser F - P



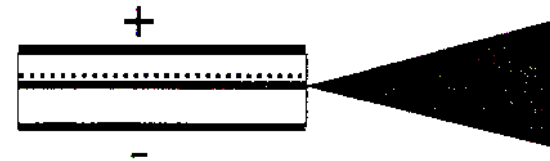
Laser DBR



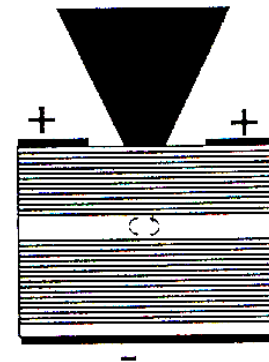
ELED



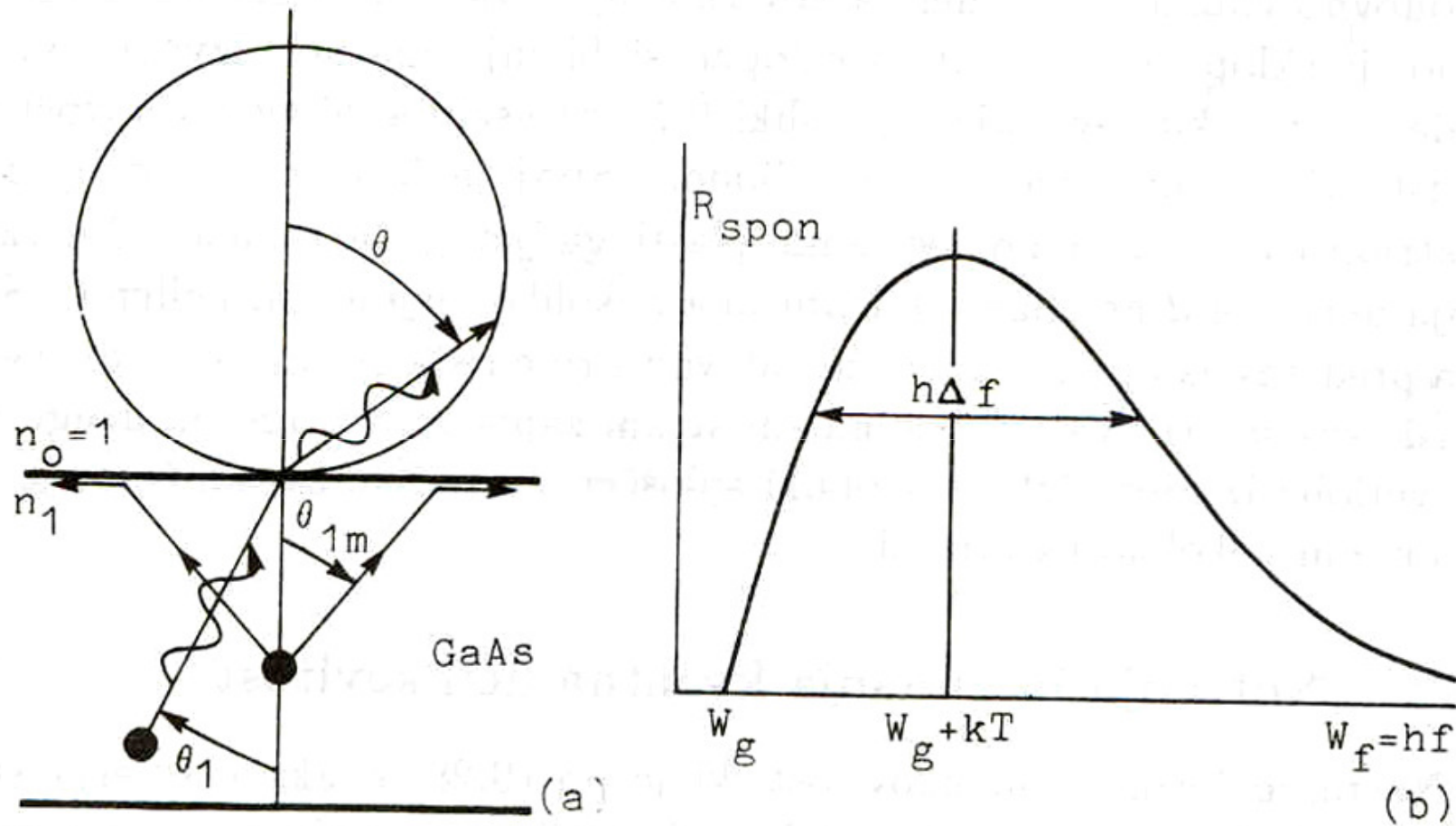
Laser DBF



VCSEL



LED – smerni diagram in spekter

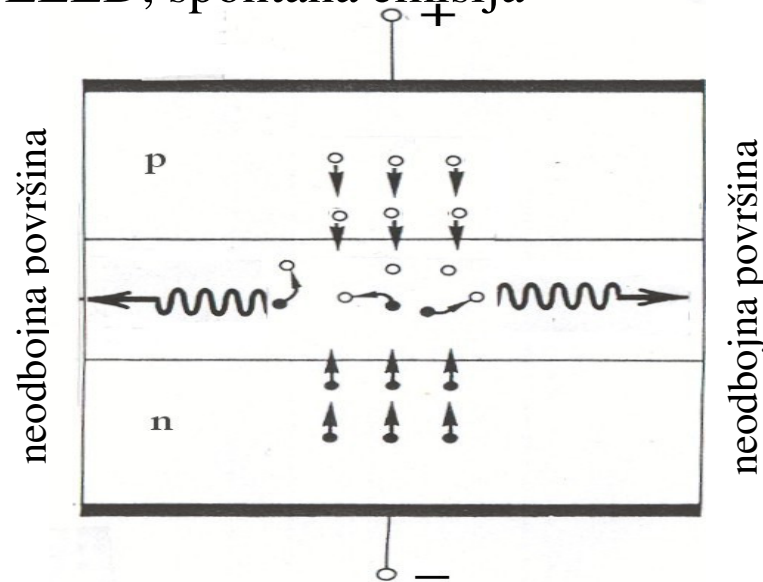


Sl. 9.15. Svetleča dioda: (a) lomni pojav na mejni plasti; (b) spekter spontane emisije.

Polprevodniška dioda - stransko sevanje, LED in laser

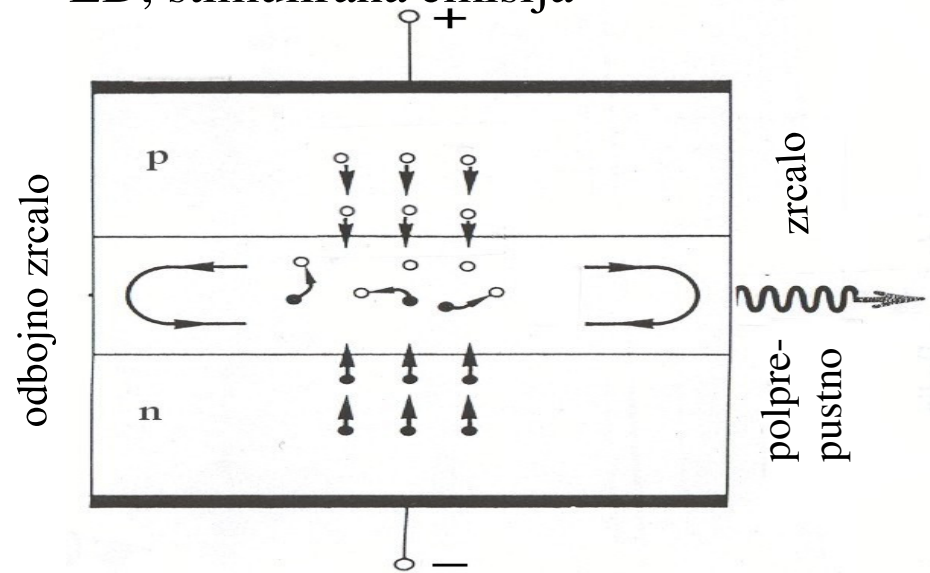
Polprevodniški viri na stransko sevanje:

Svetleča dioda na stransko sevanje
ELED, spontana emisija



Fotoni, ki v aktivni plasti nastajajo z rekombinacijo elektronov in vrzeli, se širijo vzdolžno po p-n spoju in izstopajo skozi prepustno prednjo in zadnjo površino. Svetleča dioda nima resonatorja in zato tudi ne povratnega sklopa. Svetloba je **nekoherentna**.

Laserska dioda na stransko sevanje
LD, stimulirana emisija

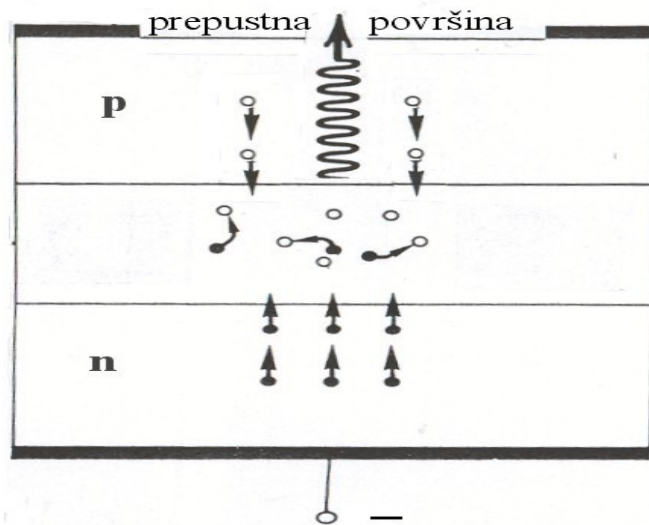


Fotoni, ki na enak način kot pri svetleči diodi ELED nastajajo v aktivni plasti - ta deluje hkrati kot optični valnovod - se na obeh koncih spoja odbijajo od Fresnelovih zrcal. Tako nastali resonator daje povratni sklop in prinaša dodatno selektivnost. Svetloba je **koherentna**.

Polprevodniški viri - čelno sevanje, princip

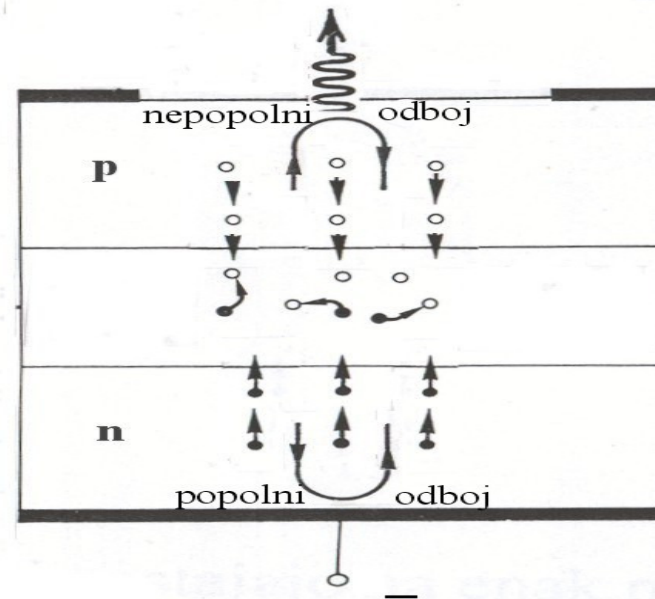
Polprevodniški viri na čelno sevanje:

Svetleča dioda na čelno sevanje SLED, spontana emisija



Fotoni, ki v aktivni plasti nastajajo z rekombinacijo elektronov in vrzeli, izstopajo čelno na dielektrični meji. Ni resonatorja, povratnega sklopa in selektivnega mehanizma. Svetloba spektra 100 nm je **nekoherentna**.

Laserska dioda na čelno sevanje VCSEL, stimulirana emisija

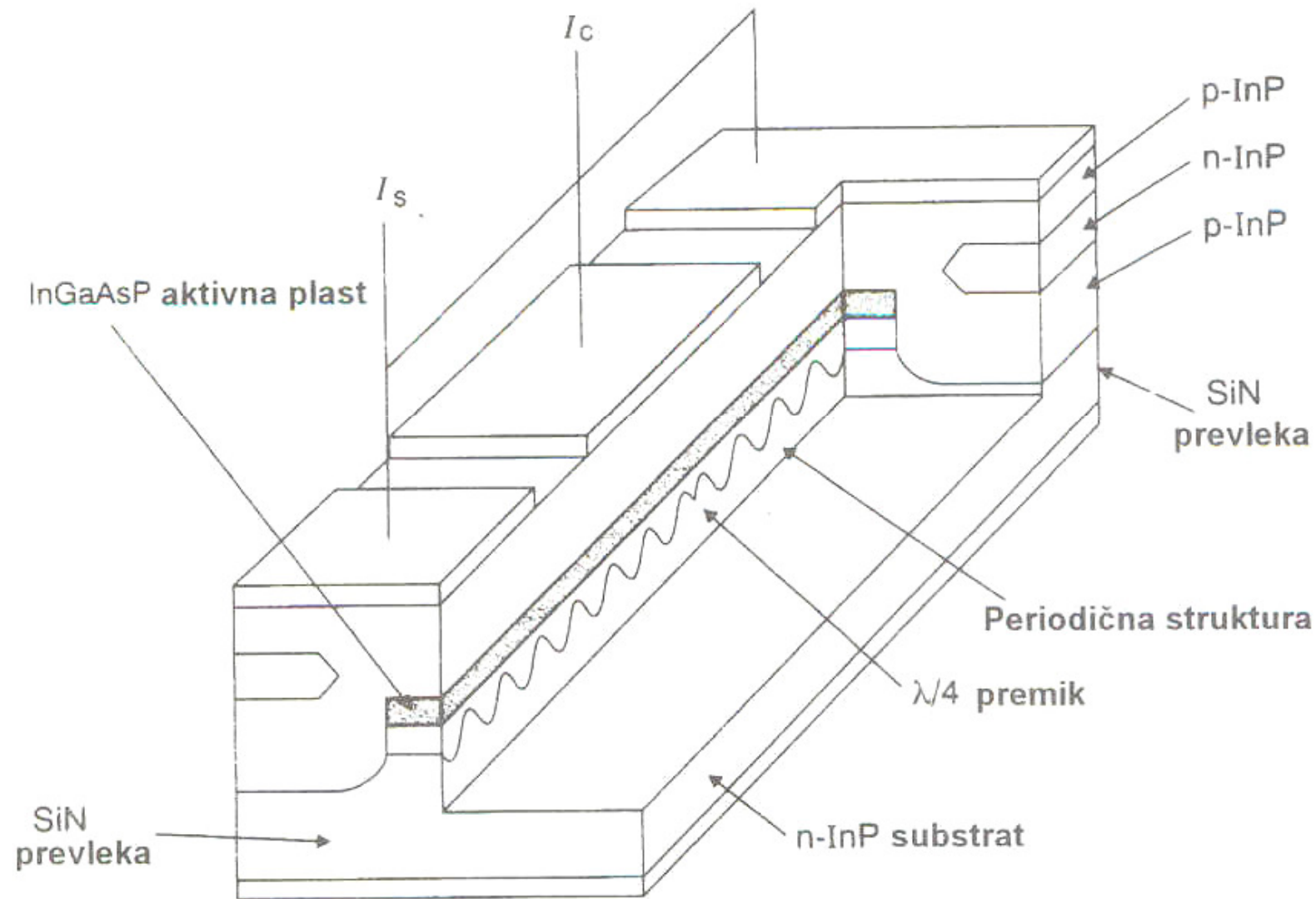


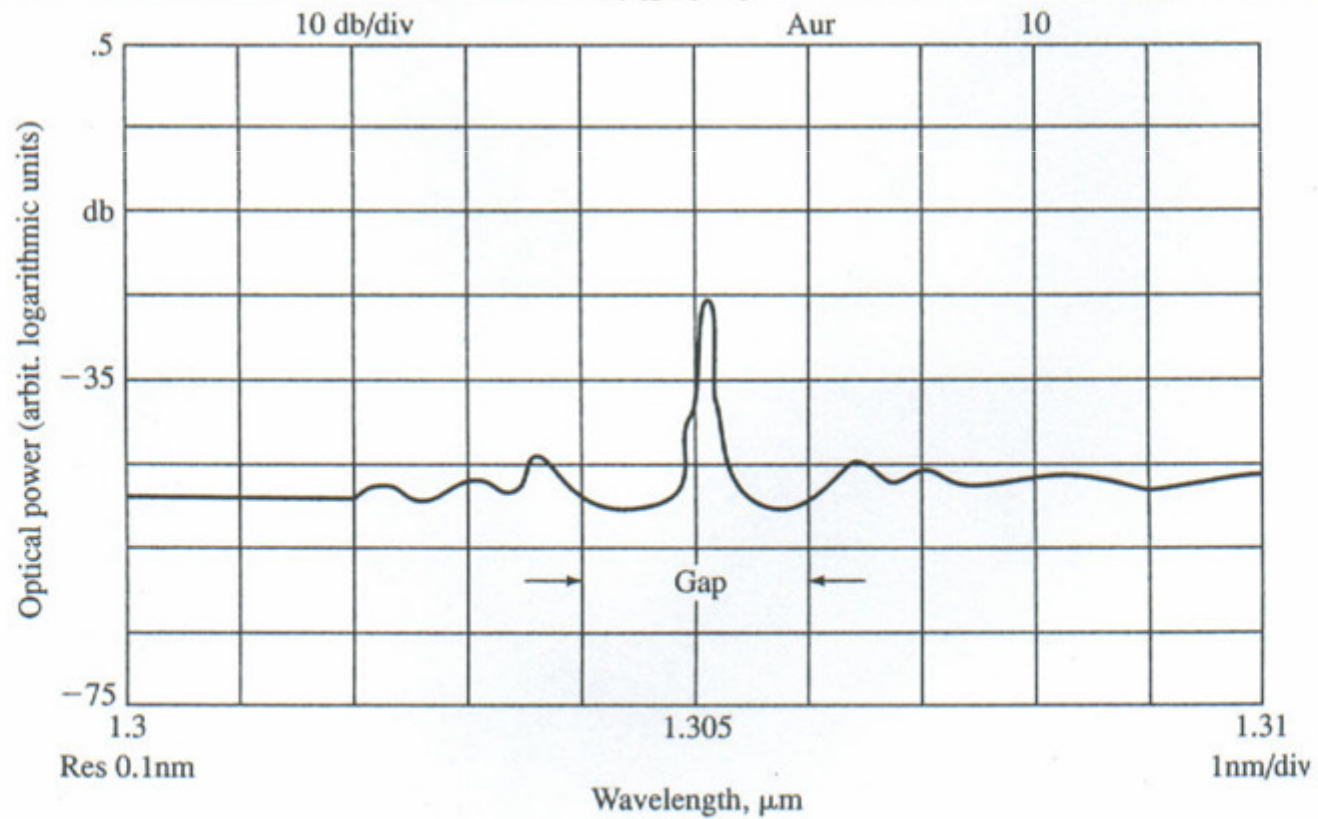
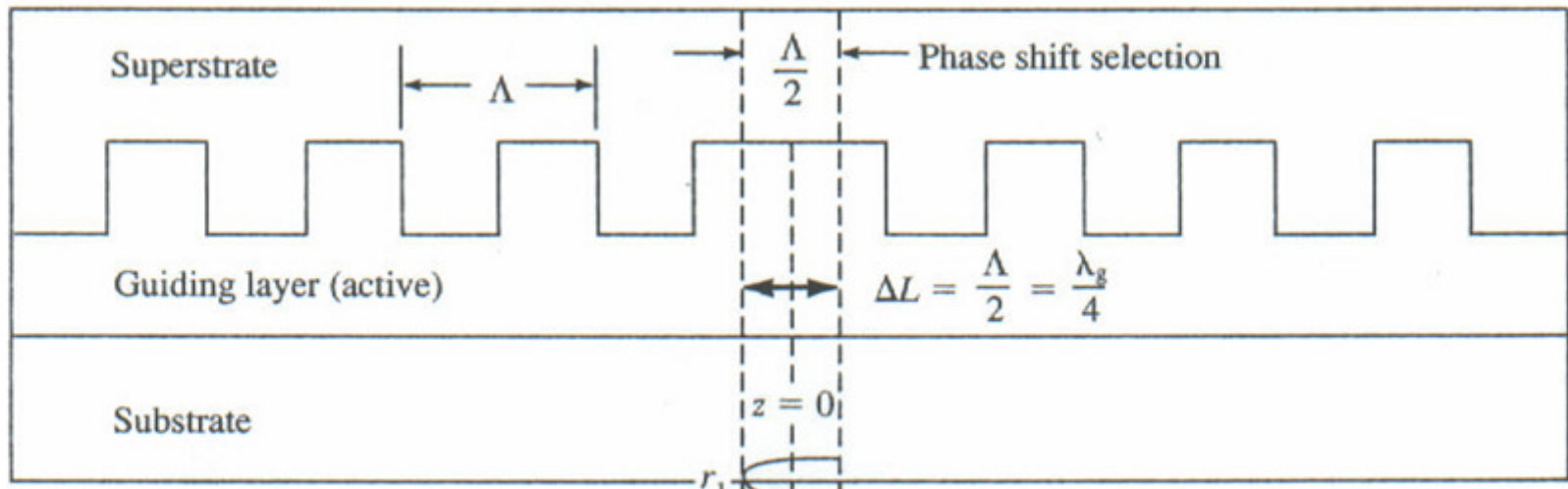
Fotoni, ki nastajajo na enak način v aktivni plasti, izstopajo čelno na aktivno plast v vertikalni resonator, omejen z Braggovima zrcaloma. Resonator daje povratni sklop in selekcijo spektra. Svetloba je **koherentna**.

Enorodovni laserji

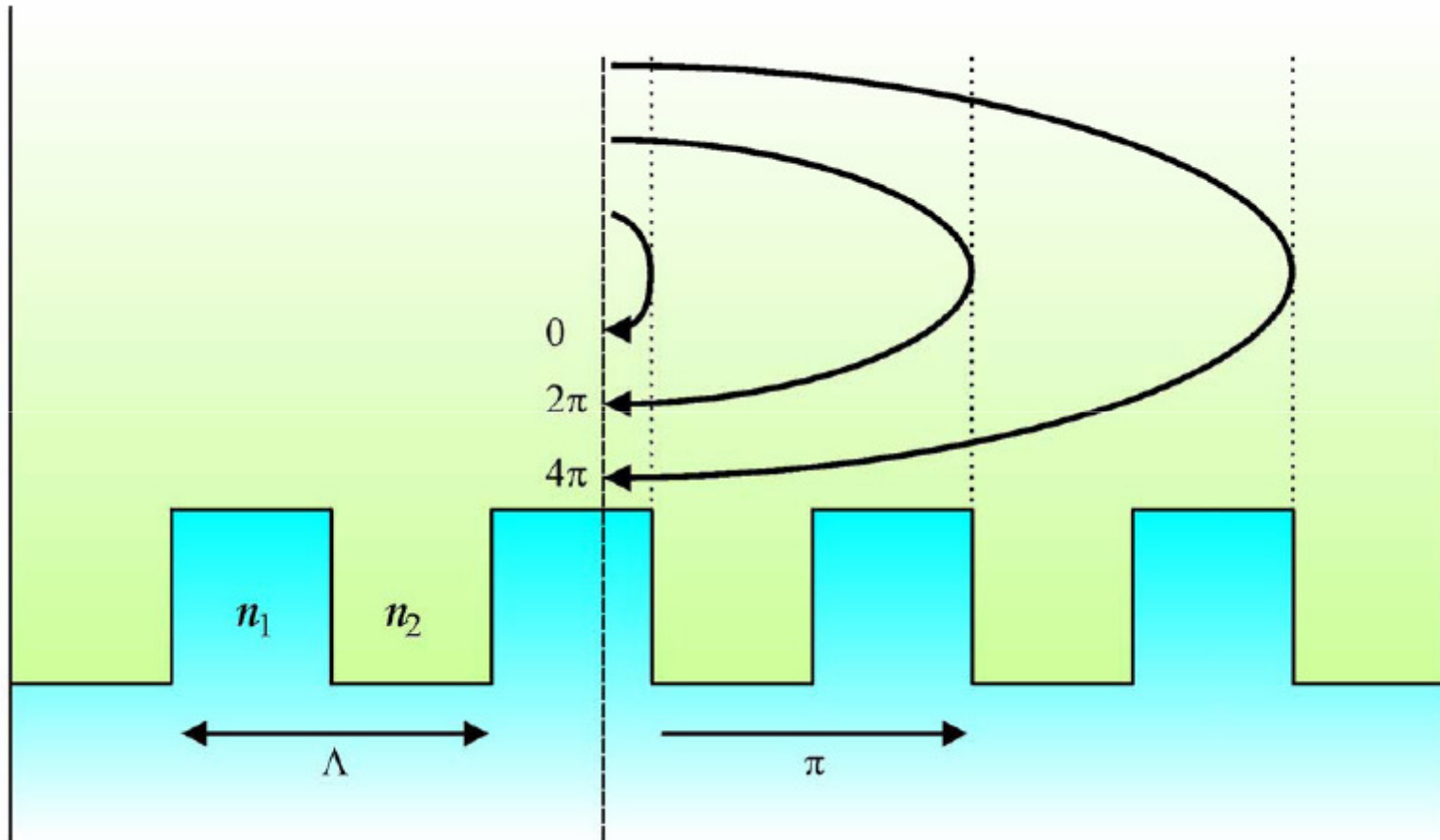
DFB in DBR

LD DFB





Konstruktivna interferenca

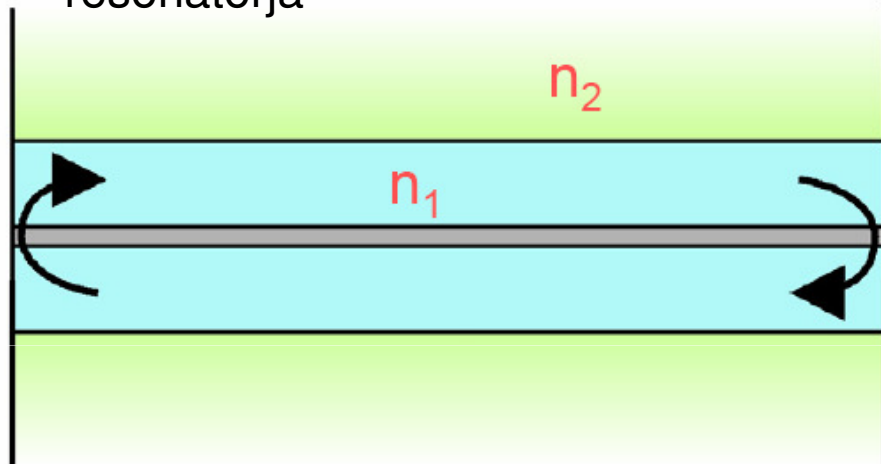


Periodična struktura v DFB ali DBR resonatorju

Vrste enorodovnih laserjev

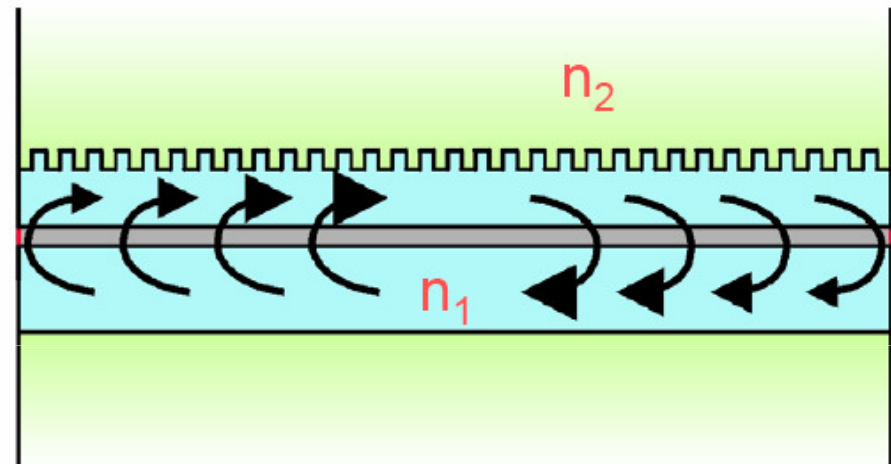
Laser FP- Fabry-Perrot

Odboj od zrcal na koncih resonatorja



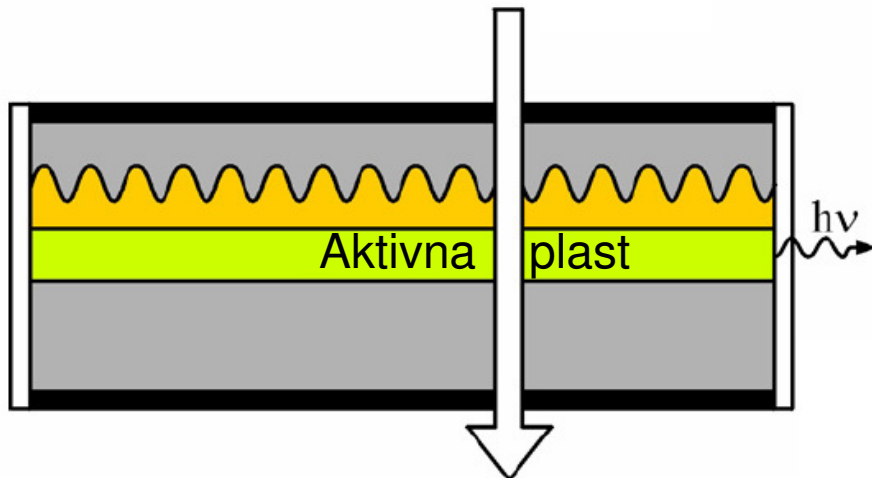
Laser DFB

Konstruktivni odboj od periodične strukture po vsej dolžini resonatorja



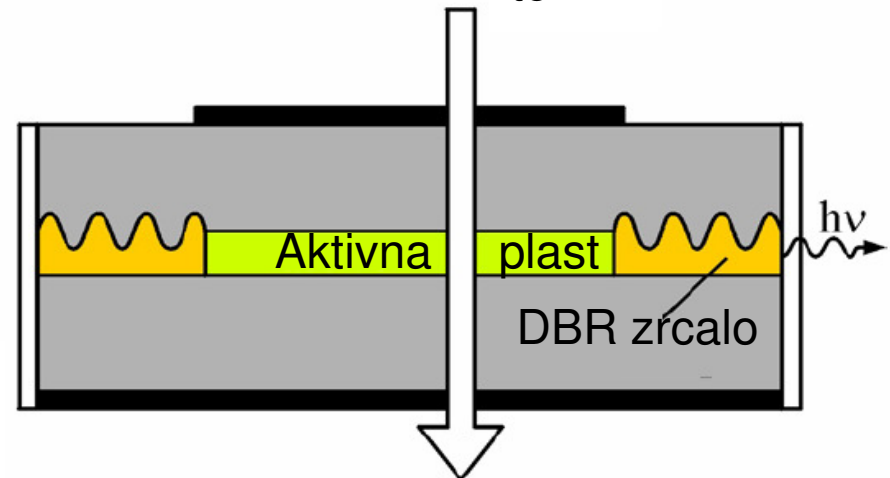
Laser DBF

tok

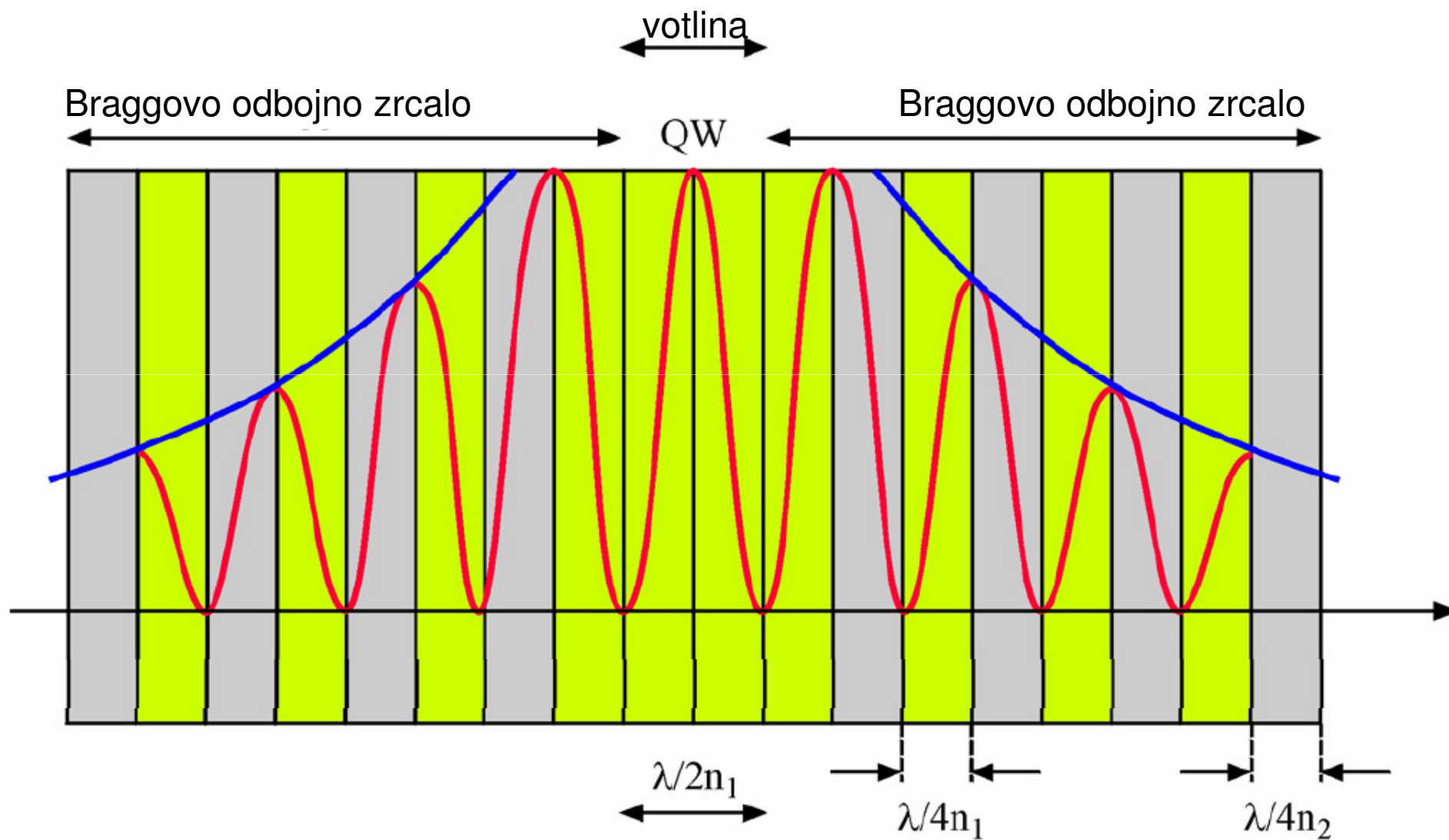


Laser DBR

tok

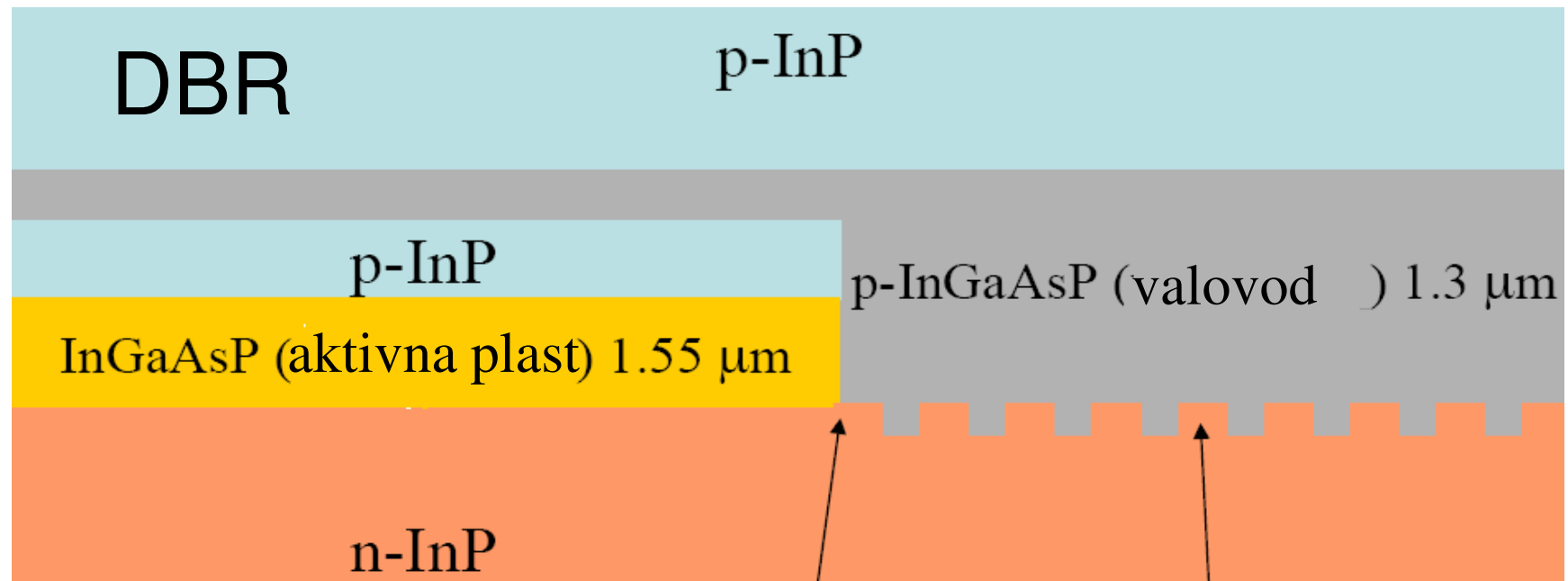
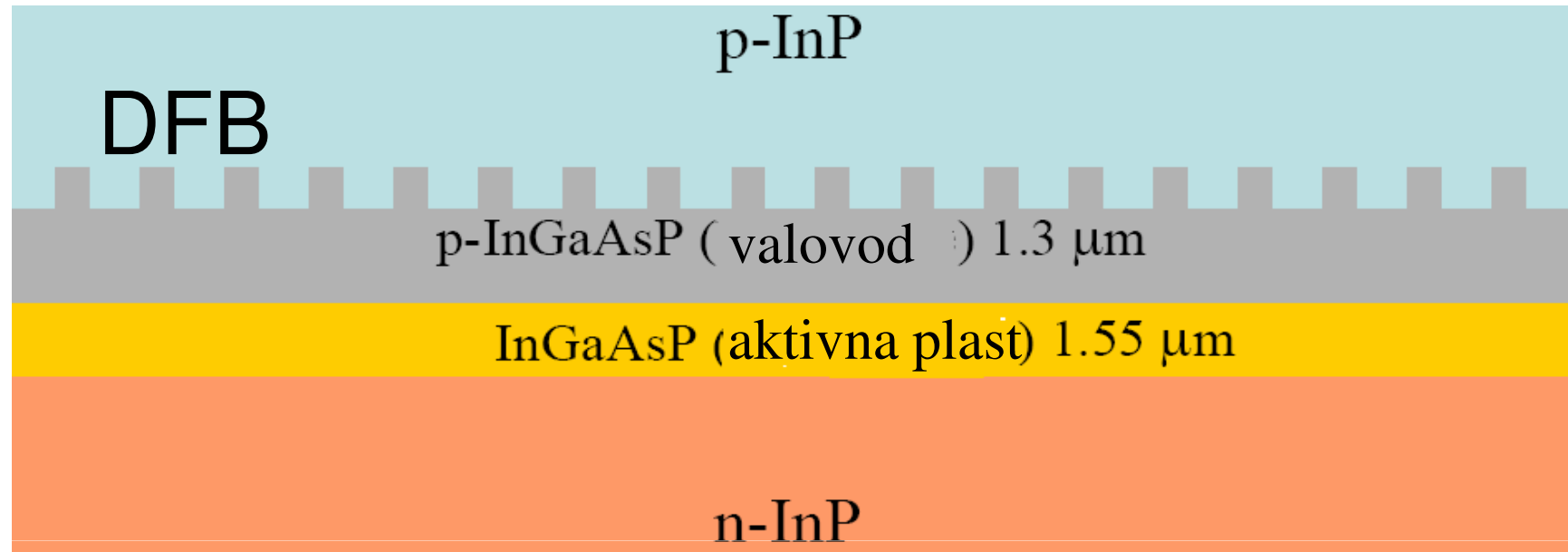


Laser DBR – polje resonatorja

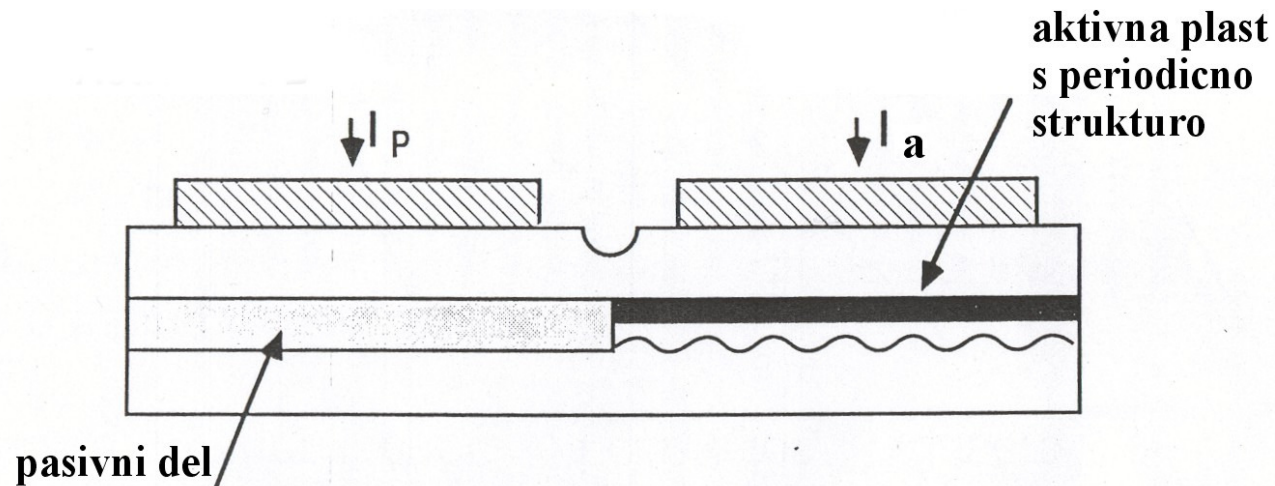


Efektivna dolžina resonatorja

Struktura DFB in DBR



Sodobni telekomunikacijski laser - laser DFB

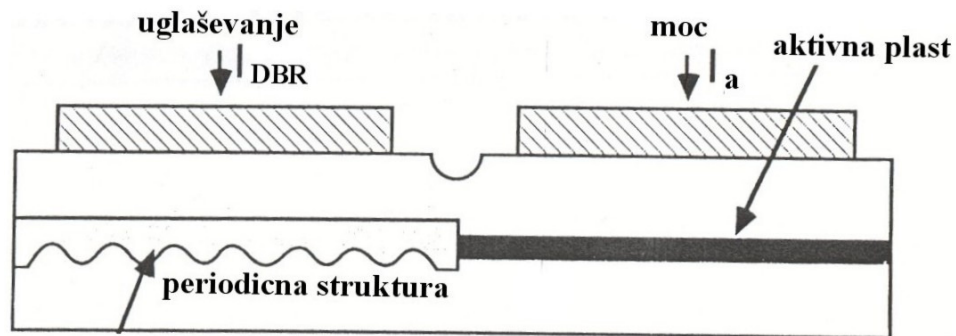


• Karakteristike:

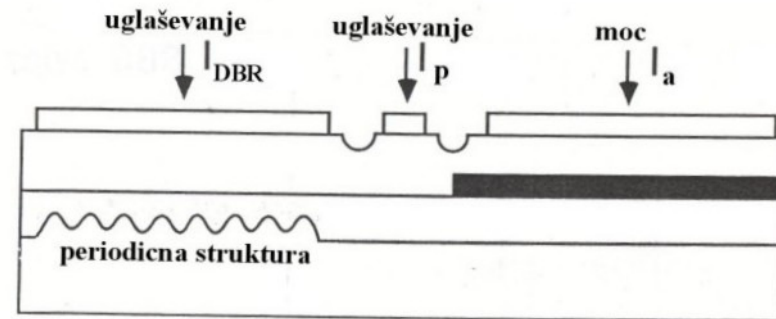
- dolga periodična struktura s šibkim sklopom napredujočega in odbitega vala
- ozek spekter širine reda 1 MHz (mnogo ožji od širine modulatorskega spektra)
- direktna modulacija (žvižg 0,3 nm) za bitne hitrosti do 2,5 oziroma 10 Gb/s
- zunanja modulacija za bitne hitrosti okoli in nad 40 Gb/s z integriranim EA modulatorjem (žvižg 0,02 nm) ali modulatorjem MZ
- doseg 200 km pri direktni modulaciji 2,5 Gb/s na valovni dolžini 1550 nm
- temperaturno in tokovno ugaševanje valovne dolžine (0,1 nm/°C, do 3 nm)
- staranje 0,01 nm/leto
- prehod na preprost laser Fabry-Perot širine spektra reda nm in moči do 20 mW
- laser DFB je tržno dosegljiv

Sodobni telekomunikacijski laser - laser DBR

Laser DBR z ugaševanjem valovne dolžine Braggovega zrcala



Laser DBR z ugaševanjem valovne dolžine Braggovega zrcala in valovne dolžine longitudinalnega rodu (fazna sekcije)

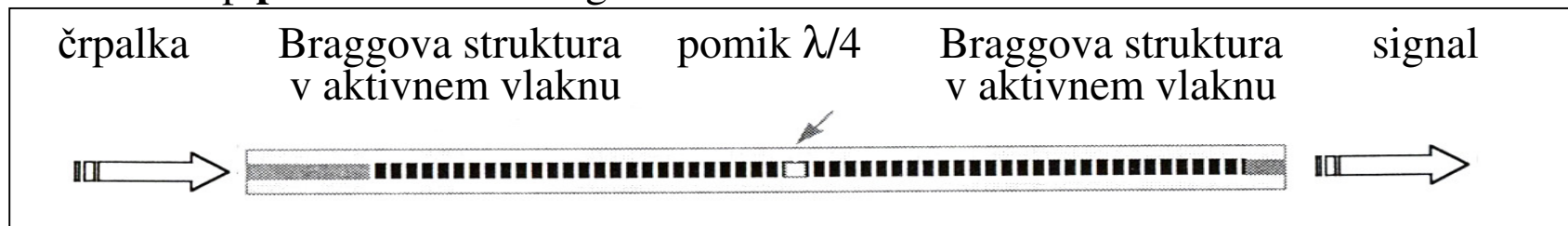


• Karakteristike:

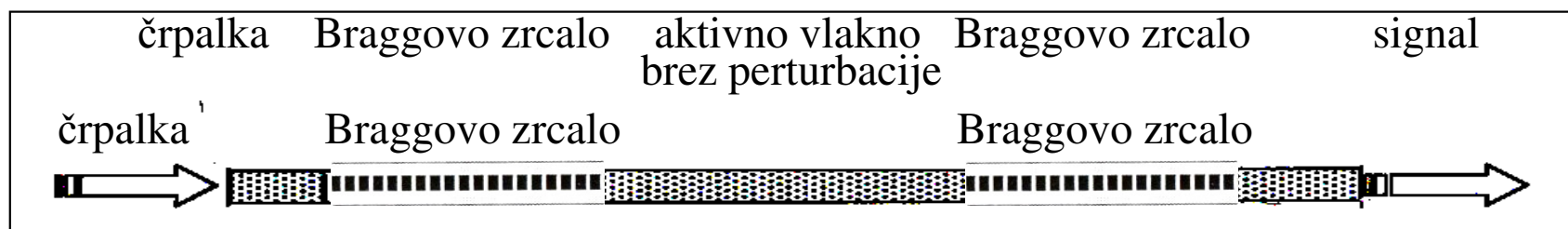
- ozek spekter širine reda 1 MHz (mnogo ožji od širine modulacijskega spektra)
- moč do 100 mW
- zunanja modulacija z EA ali MZ modulatorjem za bitne hitrosti okoli in nad 40 Gb/s
- tokovno ugaševanje valovne dolžine s periodično strukturo (sprememba Bragrove valovne dolžine) in s fazno sekcijo (pomik longitudinalnega rodu), največ 17 nm
- integrirana izvedba z EA modulatorjem
- več posebnih izvedb: SG-DBR (ugaševanje do 50 nm), SSG-DBR, GACC-DBR in druge različice.
- Laser DBR še ni tržno dosegljiv, perspektiven vir za ugaševanje

Vlakenski laserji - vrste in strukture

1. Vlakenski laser s primesjo Yb^{3+} in Er^{3+} in resonatorjem na porazdeljen povratni sklop **po dolžini** aktivnega dela vlakna



2. Vlakenski laser s primesjo Yb^{3+} in Er^{3+} in Braggovima porazdeljenima zrcaloma **na koncih** aktivnega vlakna



3. Vlakenski laser na Ramanov pojav v vlaknu SiO_2 s primesjo GeO_2 , ki ga omejujejo selektivna kaskadna odbojna Braggova zrcala



Vlakenski laserji - značilne karakteristike

1. Vlakenski laserji z aktivno primesjo Yb^{3+} in Er^{3+} , stimulirana emisija:

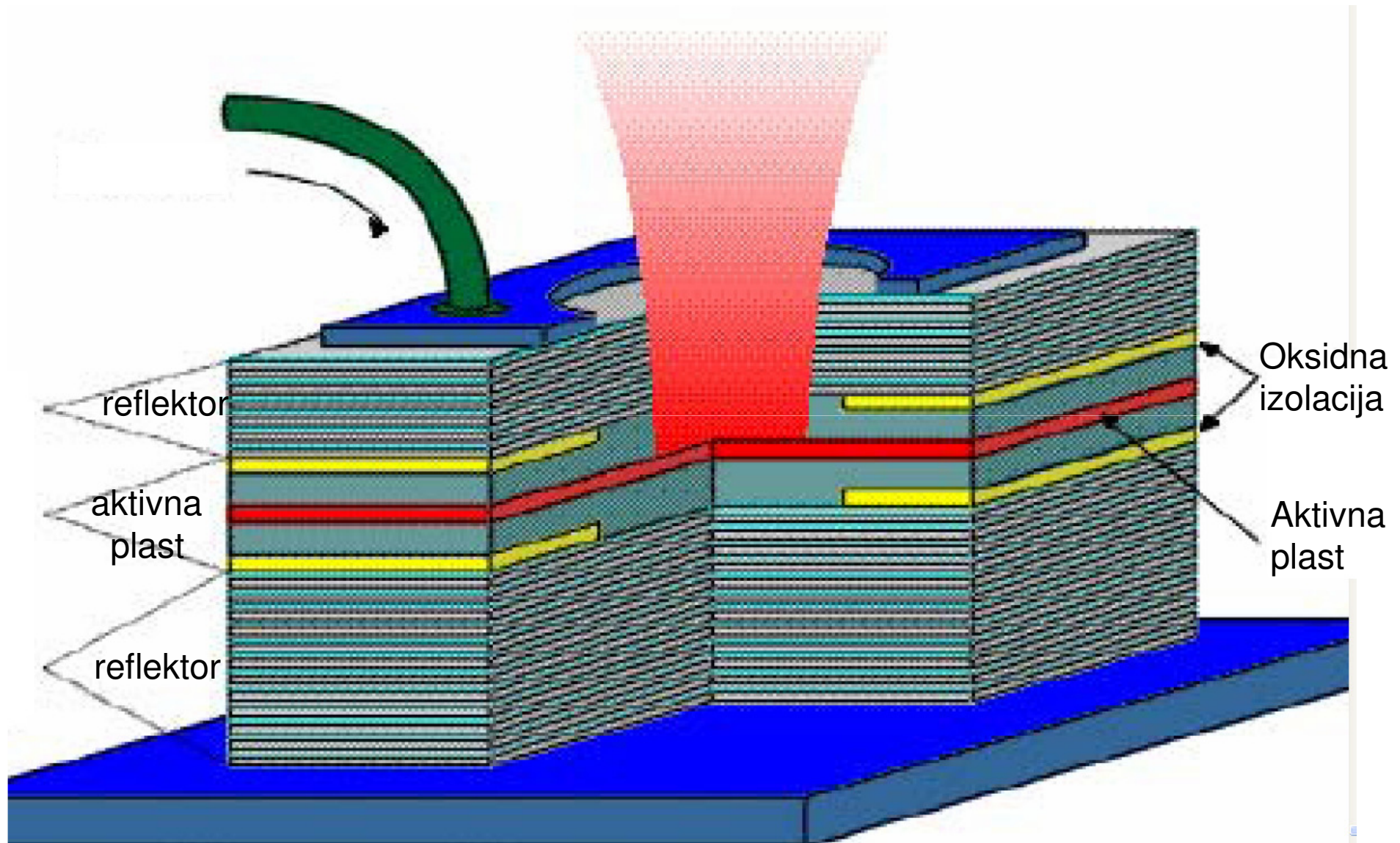
- *znatna izhodna moč 10 mW, potencialno mnogo več*
 - *ozek spekter širine reda 100 kHz, uglašljivost z raztegom vlakna do 30 nm*
 - *nizek relativni intenzitetni šum, $\text{RIN} < 150 \text{ dB/Hz}$*
 - *ugodno razmerje signal/šum, $\text{S/N} > 65 \text{ dB}$*
 - *razmeroma nizka moč črpalke pri 980 nm, $P_c < 100 \text{ mW}$*
 - *visok izkoristek moči, 10% do potencialno 40%*
 - *majhna dolžina aktivnega vlakna, visoka stopnja integracije v vlaknu*
- (Vir: Southampton Photonics (SPI), ORC Southampton University)

2. Vlakenski laser s primesjo GeO_2 , stimulirano Ramanovo sipanje:

- *zelo visoka izhodna moč $P = 100 \text{ mW}$ do 1 W*
- *razmeroma ozek spekter 1 nm, odvisen od selektivnosti zrcal*
- *zelo visoka potrebna moč črpalke (Yb^{3+}) $P > 1 \text{ W}$ na valovni dolžini 1117 nm ob dobrem izkoristku konverzije*
- *slabljenje resonančnih frekvenc nižjega reda, 20 dB*
- *uporaba za črpalni laser dislociranih vlakenskih ojačevalnikov EDFA*

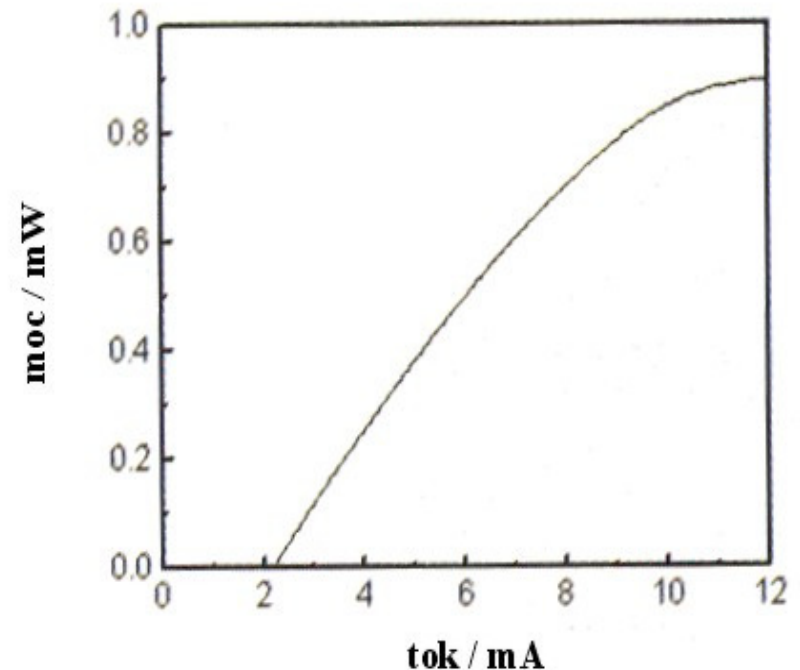
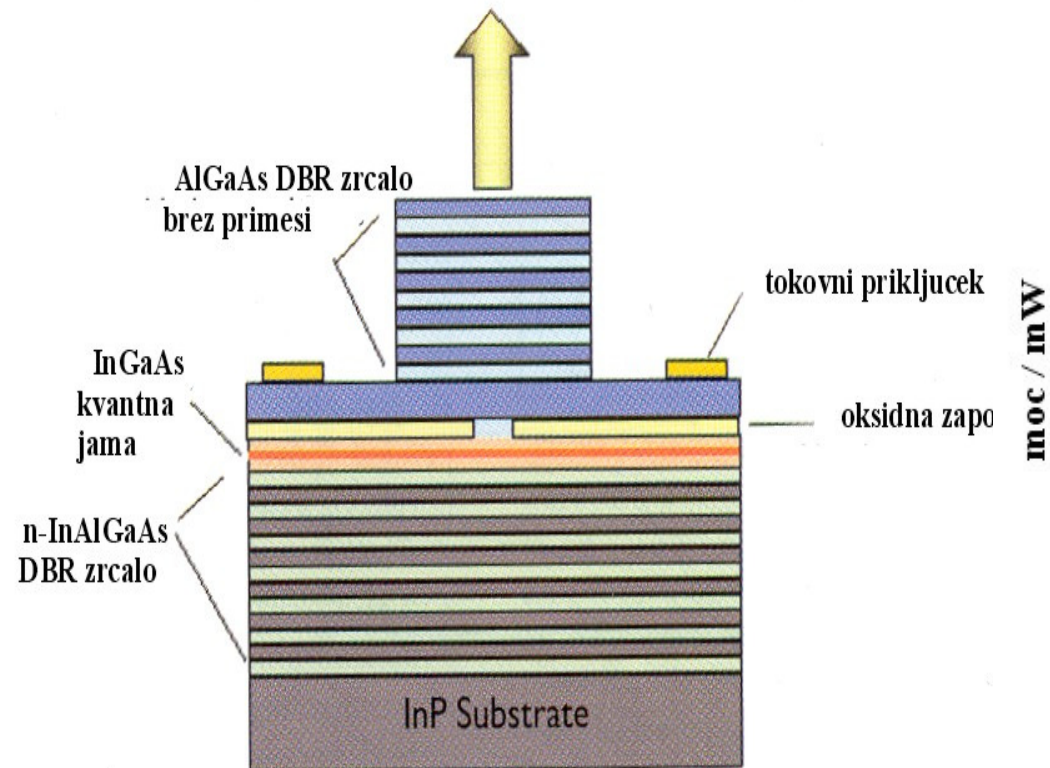
VCSEL

VCSEL – čelno sevanje



Laserska dioda VCSEL-valovna dolžina 1550nm?

- valovna dolžina 850 nm, dobre karakteristike in vsestranska uporaba
- valovna dolžina 1300 nm, ugodne karakteristike, uporaba v LAN in dostopovnem omrežju
- valovna dolžina 1550 nm, v fazi razvoja in izpopolnitve za potencialno množično uporabo v LAN in METRO



Primer diode VCSEL, izdelani na substratu InP. Moč pri 1550 nm je pod 1 mW in še ni zadostna za optični prenos.

Laserska dioda VCSEL-lastnosti in problemi

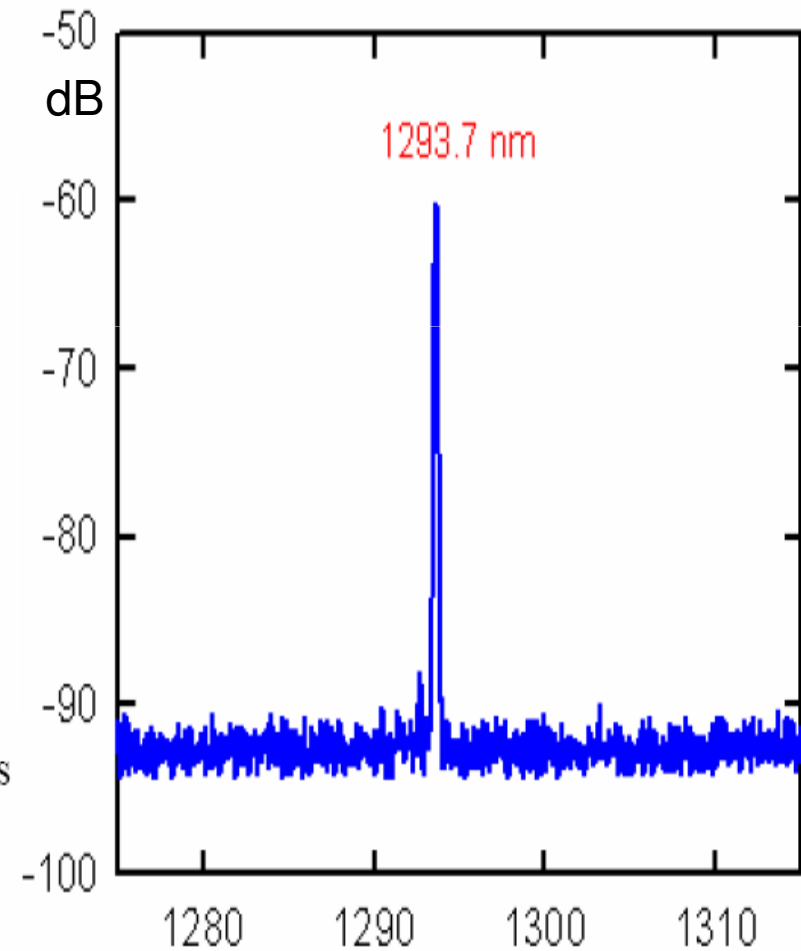
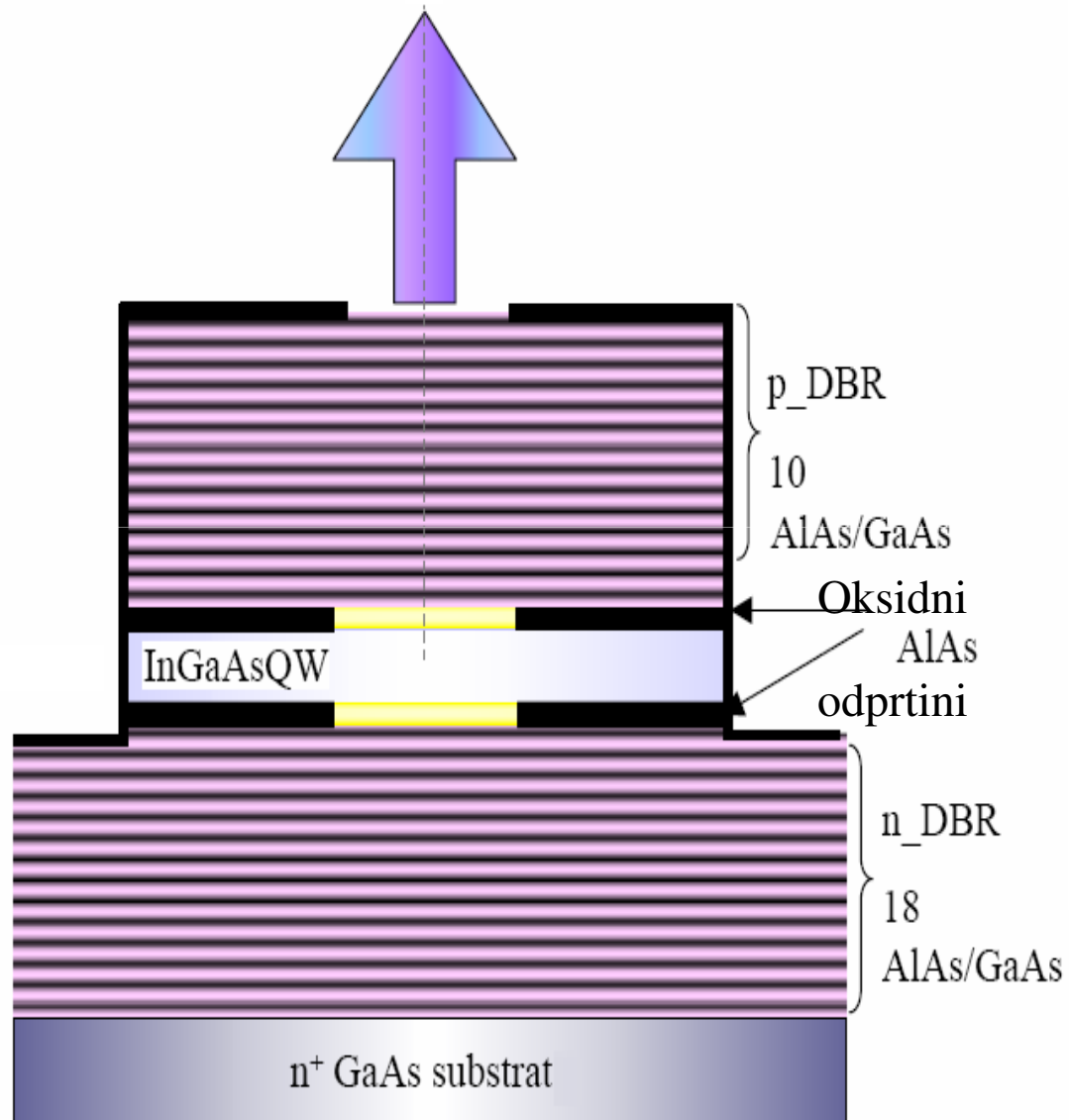
• Lastnosti:

- izpeljava iz svetleče diode SLED in laserske diode DBR
- *cenen postopek izdelave in testiranja na rezini - potencialno nizka cena in masovna proizvodnja*
- osnovna materiala GaAs (0,8 - 1,0 μm) in InP (1,3 - 1,6 μm)
- širjenje svetlobe pravokotno na aktivno plast
- Braggova odbojna struktura v p in n delu spoja
- tanka aktivna plast in kratka resonančna votlina, vzpostavi se osnovni Fabry-Perotov rod
- *čist spekter, velika potlačitev stranskih rodov*
- izpeljanke VCSEL v treh valovnih področjih (0,85 μm , 1,3 μm in 1,55 μm).
- nizek pragovni tok (nekaj mA)
- ugoden sklop z vlaknom
- možnost ugaševanja
- direktna modulacija 2,5 Gb/s
- perspektivna uporaba v LAN in METRO zaradi potencialno nizke cene

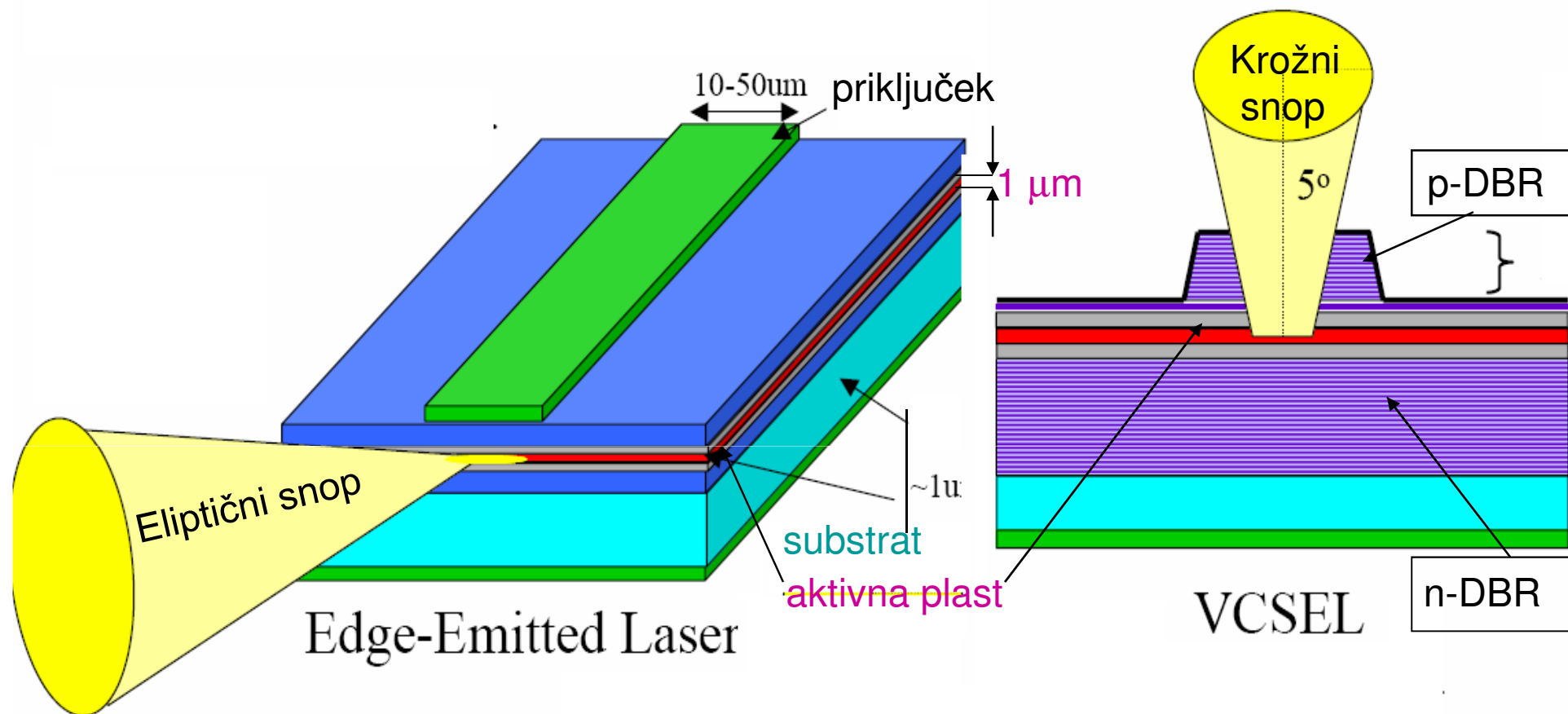
• Problemi (valovna dolžina 1550 nm):

- *nizka izhodna moč ($P < 1\text{ mW}$)*
- temperaturna odvisnost ojačenja
- nezadostna razlika lomnih količnikov v Braggovi strukturi
- razpoložljivi materiali še niso zadosti primerni

Struktura VCSEL in spekter



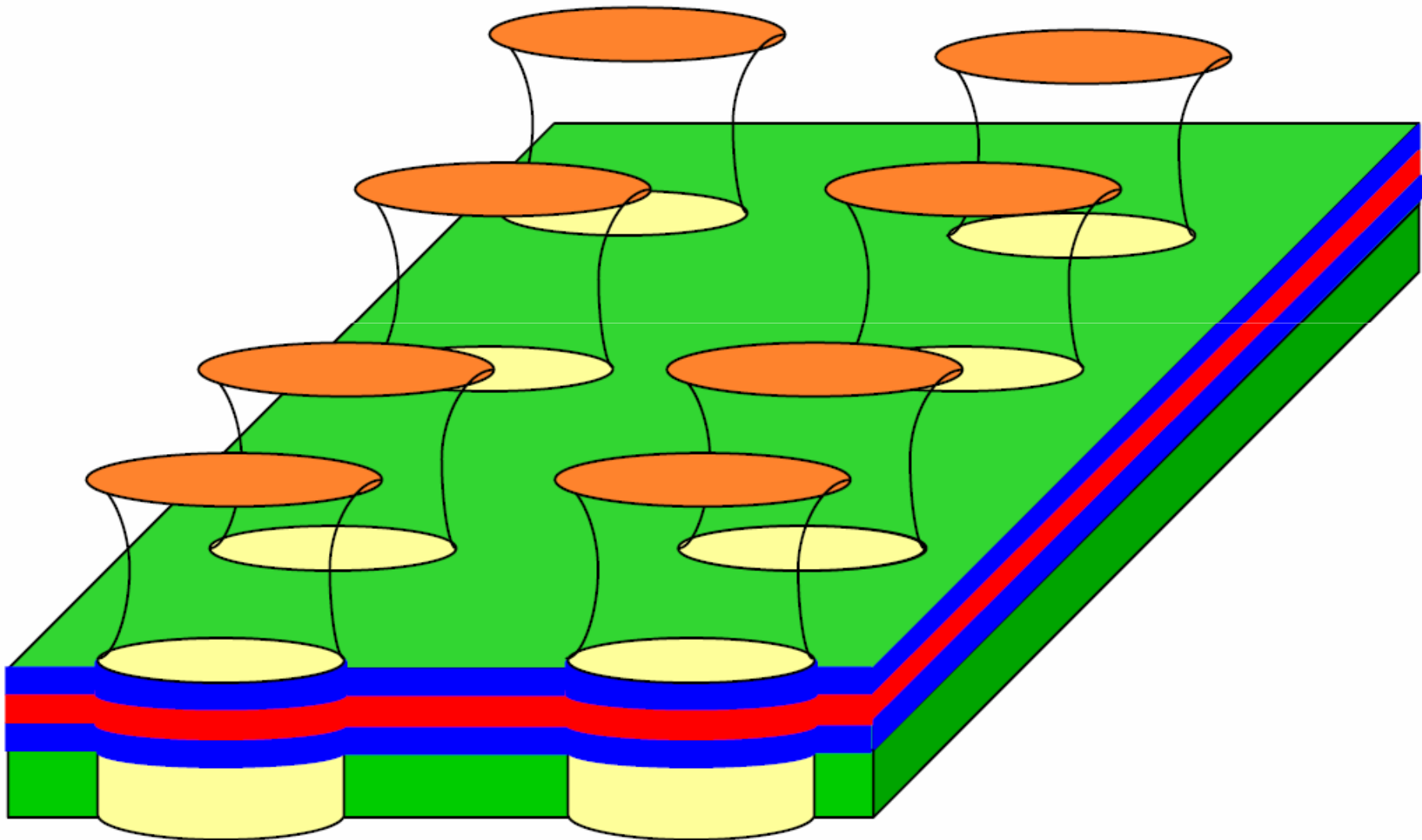
Primerjava LD in VCSEL



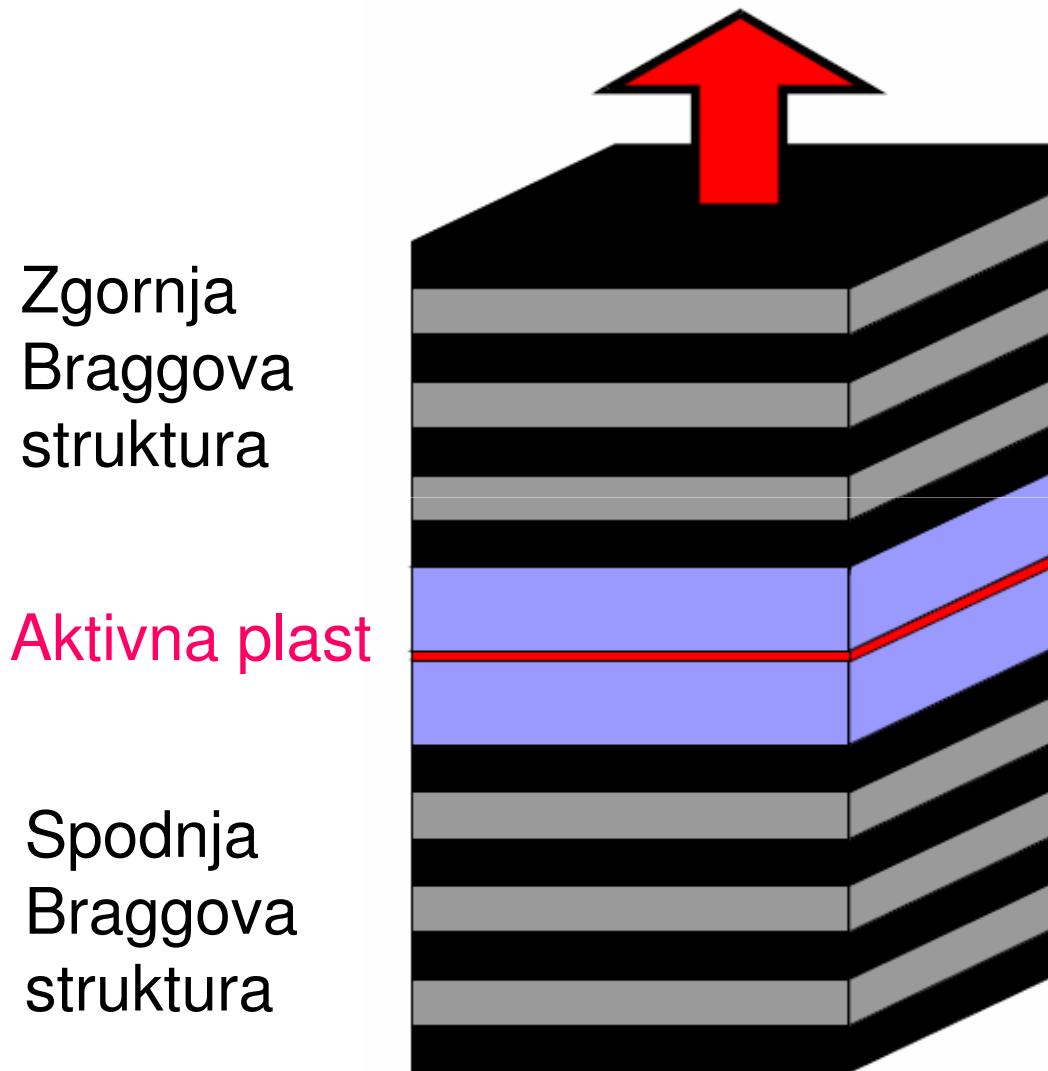
LD s stranskim
sevanjem
(običajni laser)

Laser z bočnim
sevanjem

Skupina VCSEL



Materiali VCSEL



AlAs:Zn (36x)
 $\text{Al}_{.5}\text{Ga}_{.5}\text{As:Zn}$

$(\text{Al}_{.33}\text{Ga}_{.67})_{.5}\text{In}_{.5}\text{P}$
 $\text{Ga}_{.4}\text{In}_{.6}\text{P}$ QW
 $(\text{Al}_{.33}\text{Ga}_{.67})_{.5}\text{In}_{.5}\text{P}$

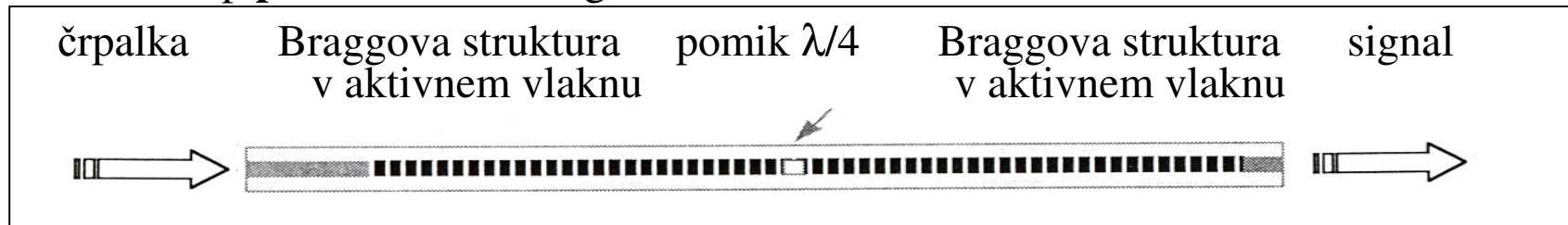
$\text{Al}_{.5}\text{Ga}_{.5}\text{As:Se}$ (55x)
AlAs:Se

Mirror properties:

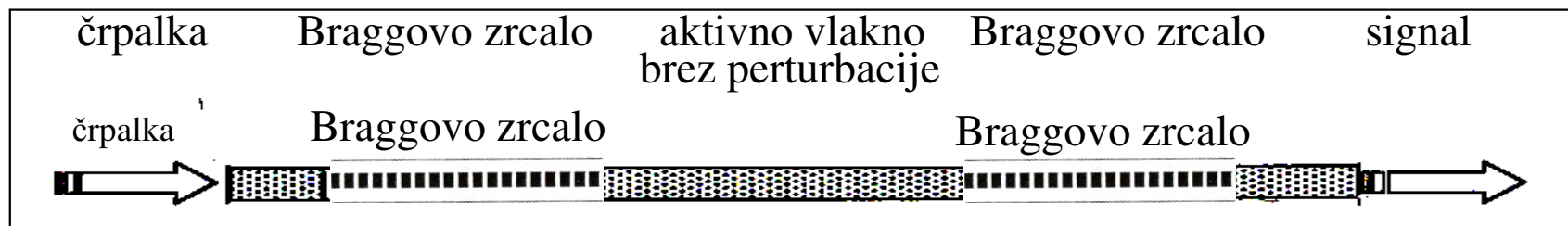
- Period ~ 100nm
- Number of periods: 30-60
- Refractive index contrast:

Vlakenski laserji - vrste in strukture

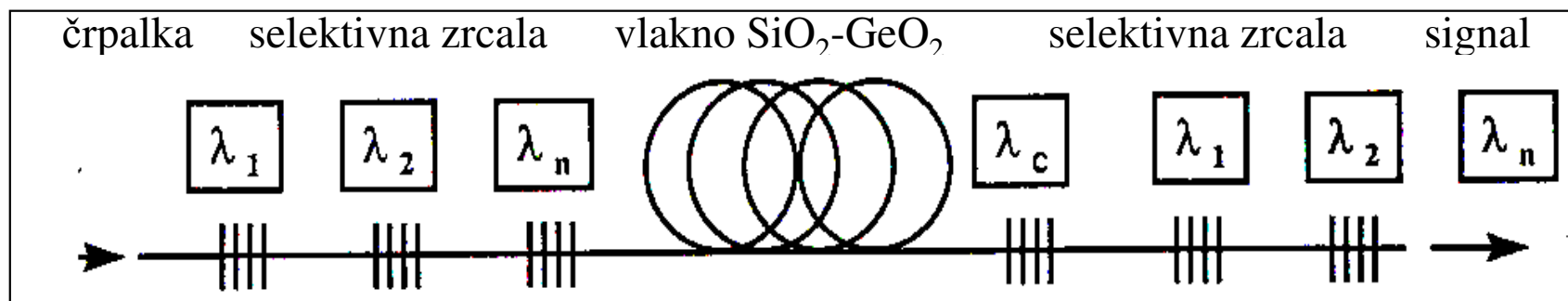
1. Vlakenski laser s primesjo Yb^{3+} in Er^{3+} in resonatorjem na porazdeljen povratni sklop **po dolžini** aktivnega dela vlakna



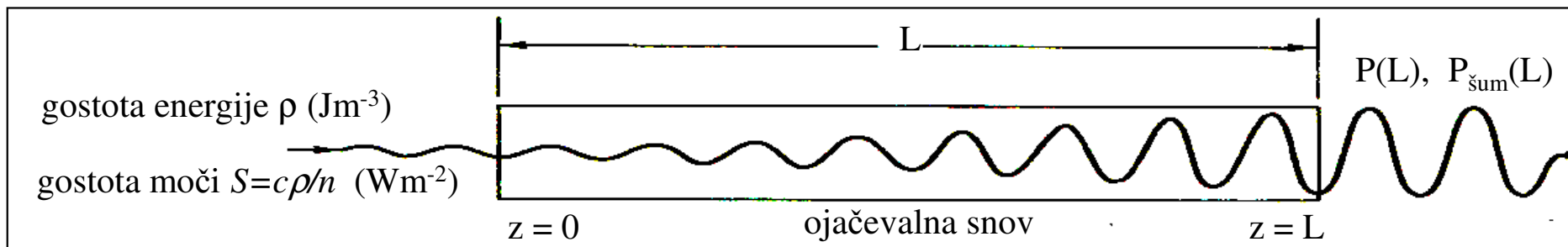
2. Vlakenski laser s primesjo Yb^{3+} in Er^{3+} in Braggovima porazdeljenima zrcaloma **na koncih** aktivnega vlakna



3. Vlakenski laser na Ramanov pojav v vlaknu SiO_2 s primesjo GeO_2 , ki ga omejujejo selektivna kaskadna odbojna Braggova zrcala

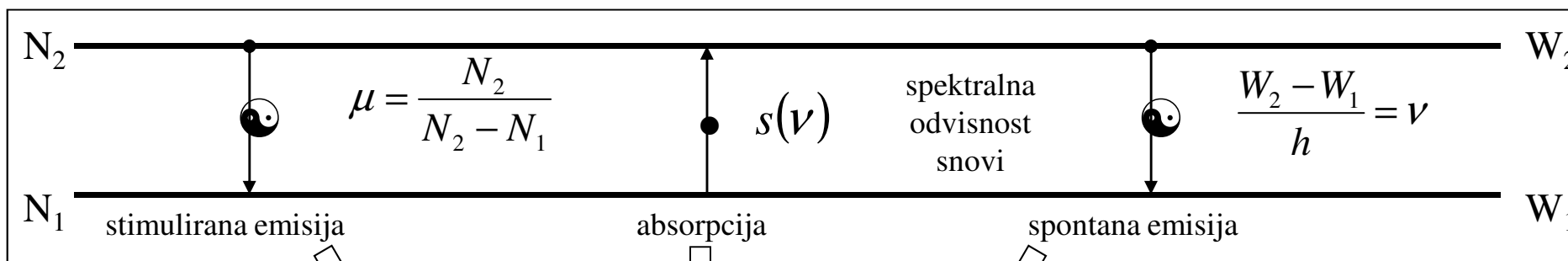


Ojačevanje signala in šuma



• **Val v ojačevalni (aktivni, vzbujeni) snovi:**

- **princip polprevodniškega ojačevalnika (SOA):** Gaussov snop v aktivnem polprevodniku (spoju p-n z inverzijo naseljenosti). Električno vzbujanje
- **princip ojačevalnika z obogatenim vlaknom (DFA):** jedro enorodovnega vlakna, obogateno z ioni aktivnih primesi. Optično vzbujanje



$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{dz} \frac{dN}{dt} h\nu = BS \frac{n}{c} s(\nu) N_2 h\nu - BS \frac{n}{c} s(\nu) N_1 h\nu + \frac{1}{2} A s(\nu) N_2 h\nu \frac{d\Omega}{4\pi}$$

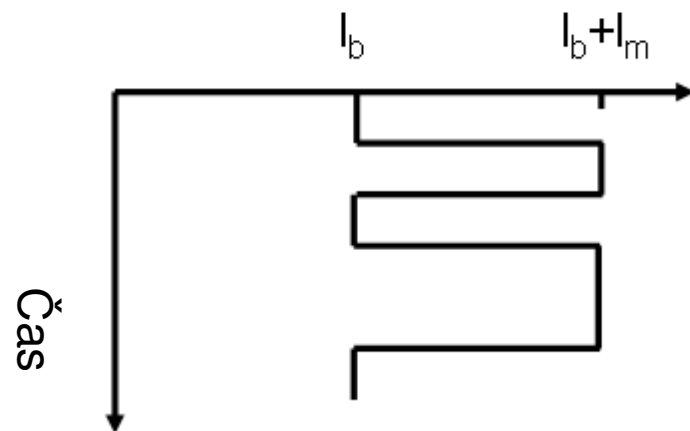
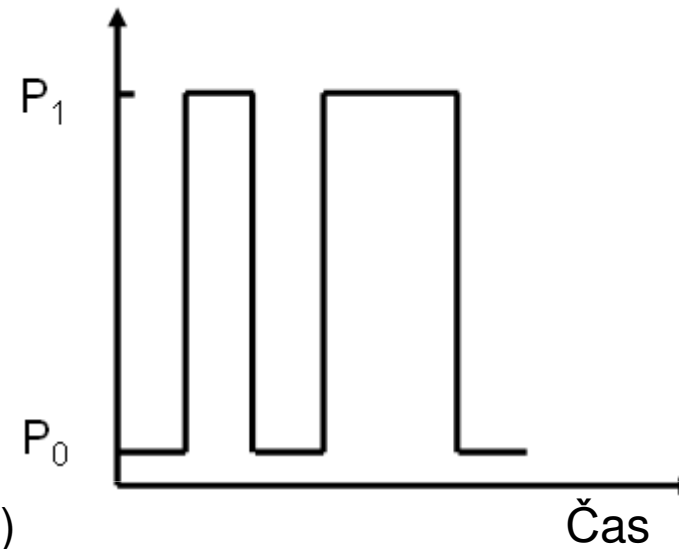
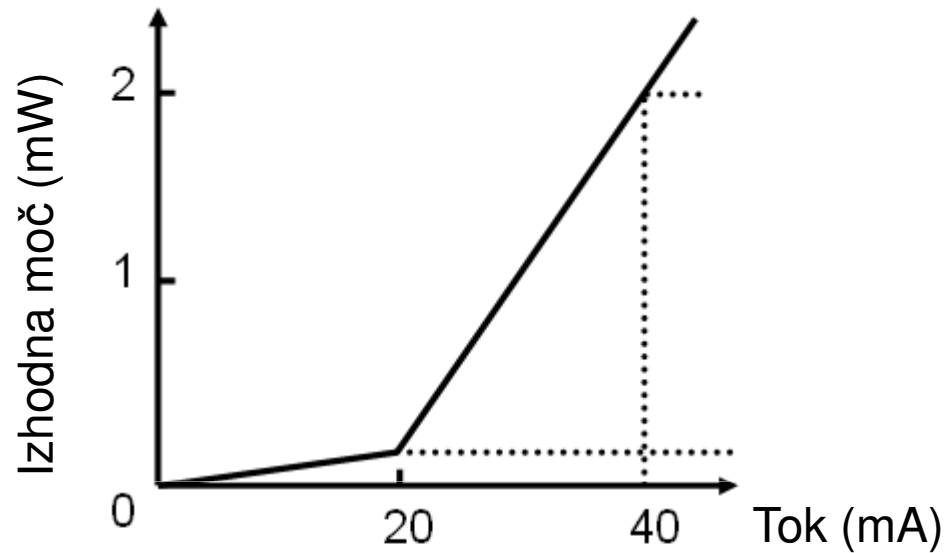
$$B_{12} = B_{21} = B$$

• **Izhodni signal:** $P(L) = GP(0), G = e^{gL}, g = B(N_2 - N_1) \frac{nh}{\lambda} s(\nu)$

• **Izhodni šum:** $P_{\text{šum}}(L) = \mu(G - 1)h\nu\Delta\nu$ polariziran

(spontana emisija): $P_{\text{šum}}(L) = 2\mu(G - 1)h\nu\Delta\nu$ nepolariziran

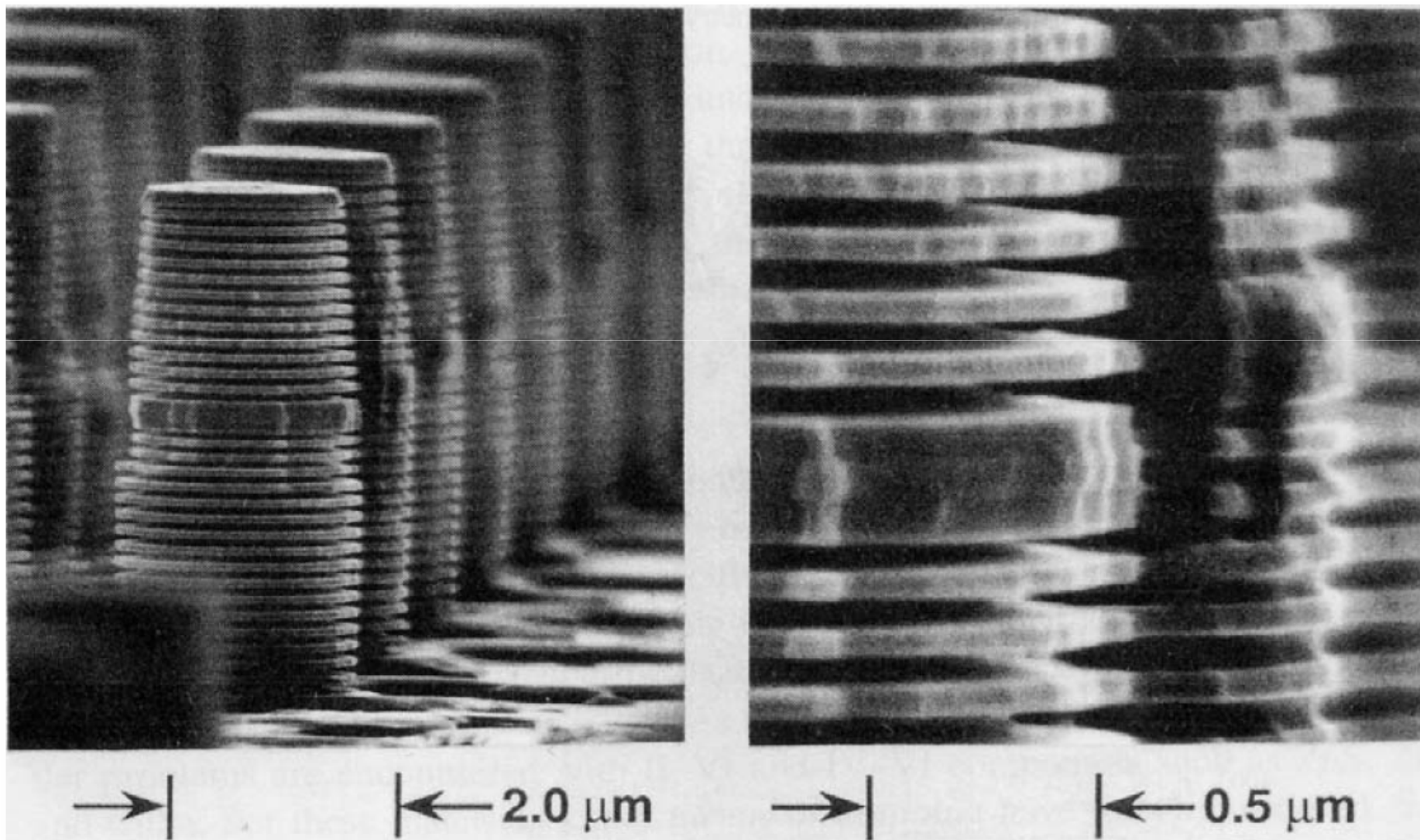
Direktna (tokovna) modulacija LD



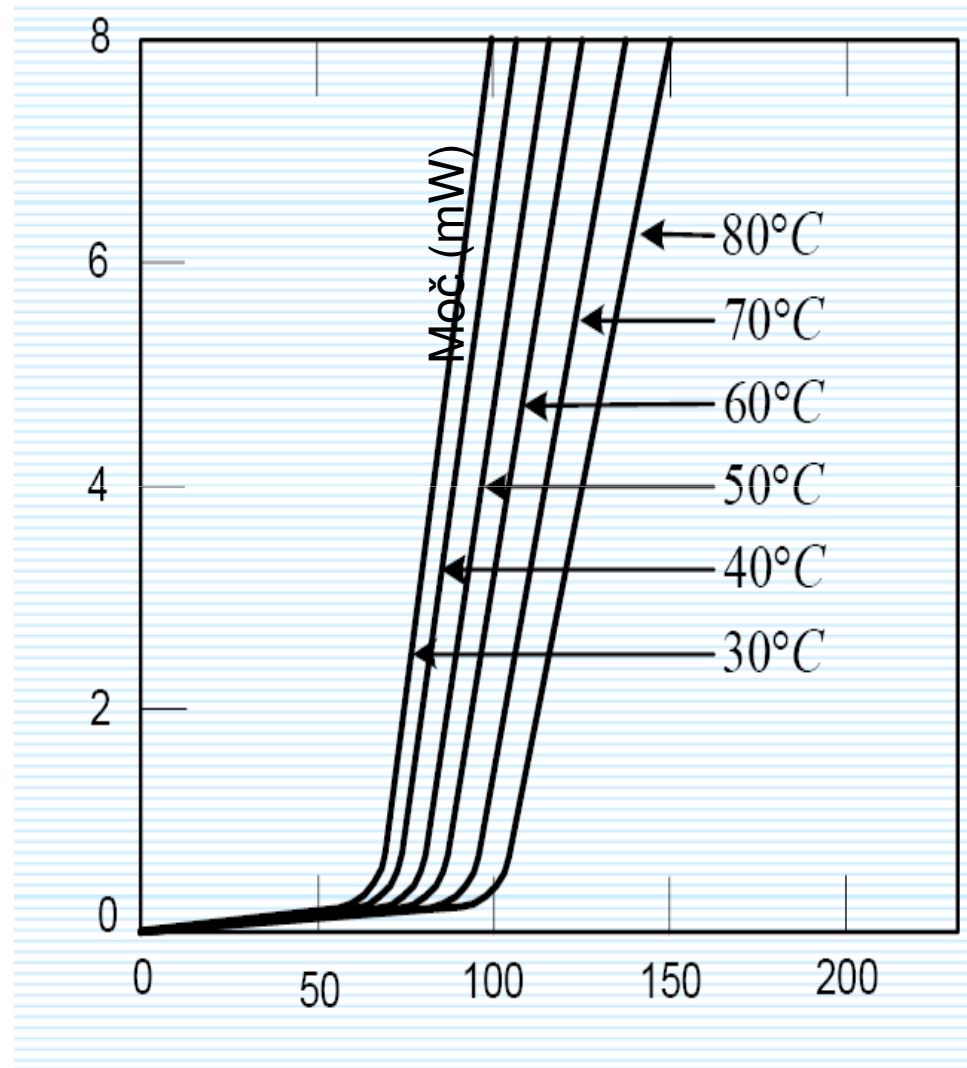
Razmerje moči $r = P_1/P_0$

Struktura VCSEL

Skupina VCSEL



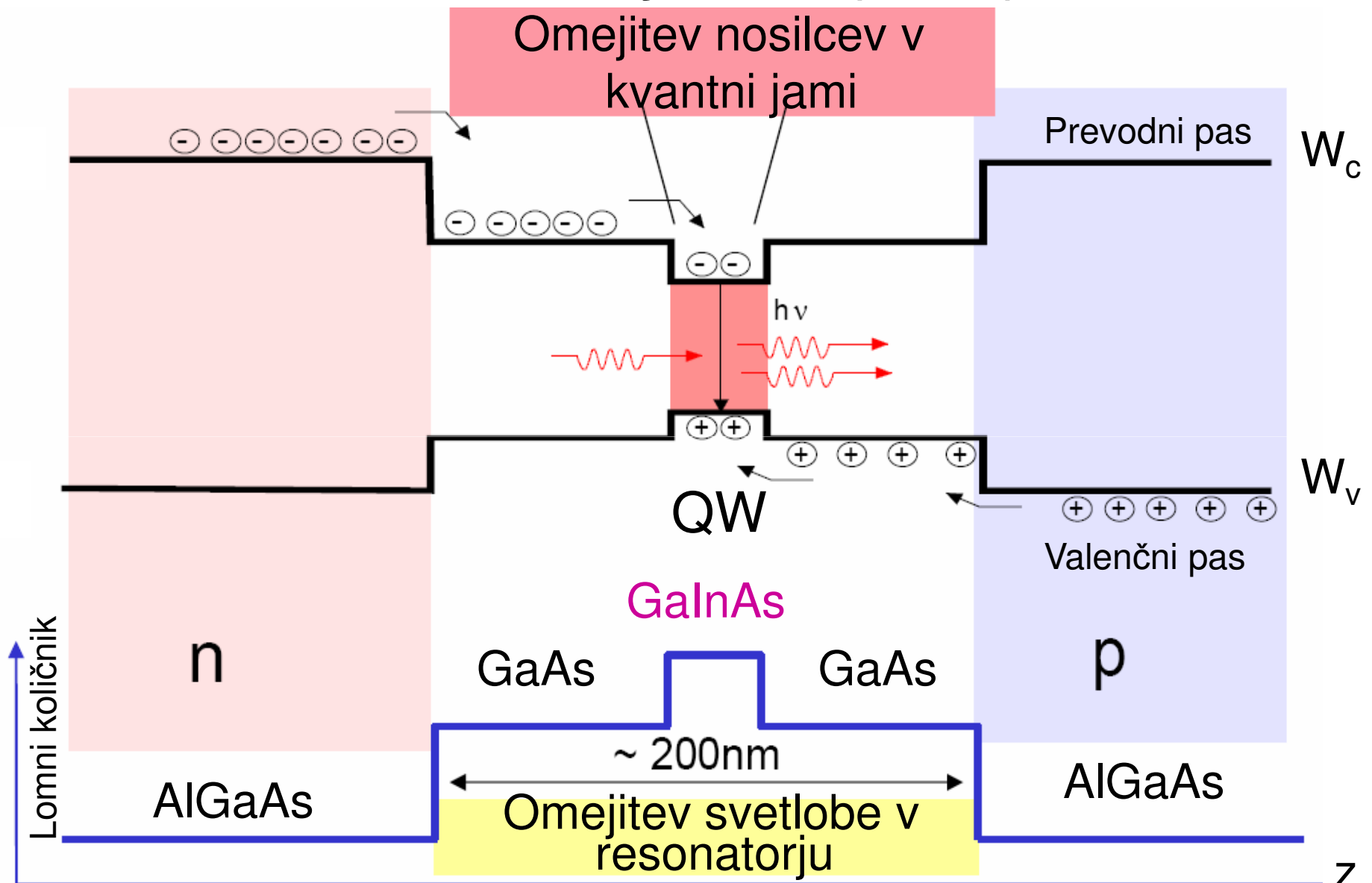
Odvisnost od temperature



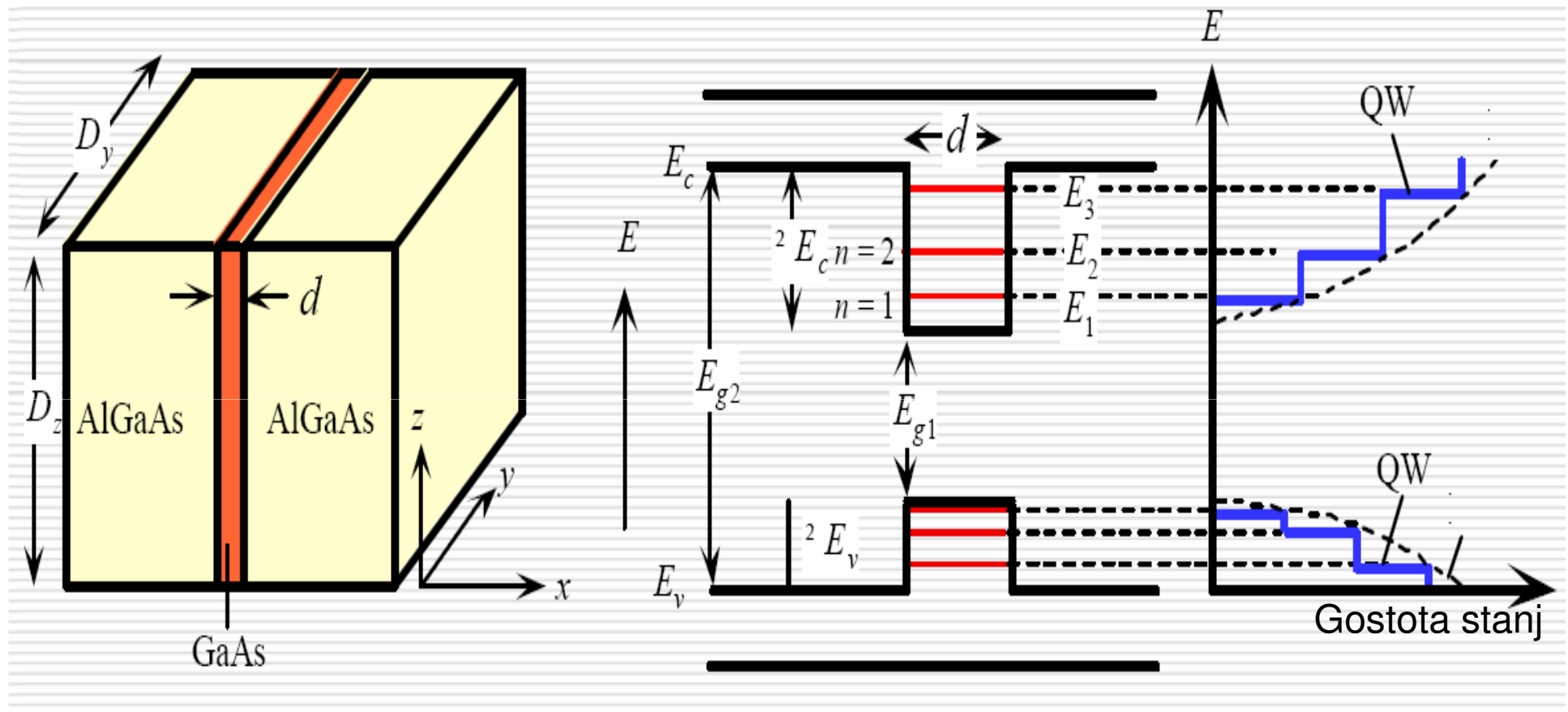
Tok (mA)

Kvantne jame

Kvantna jama (QW)



Kvantna jama – energijski nivoji

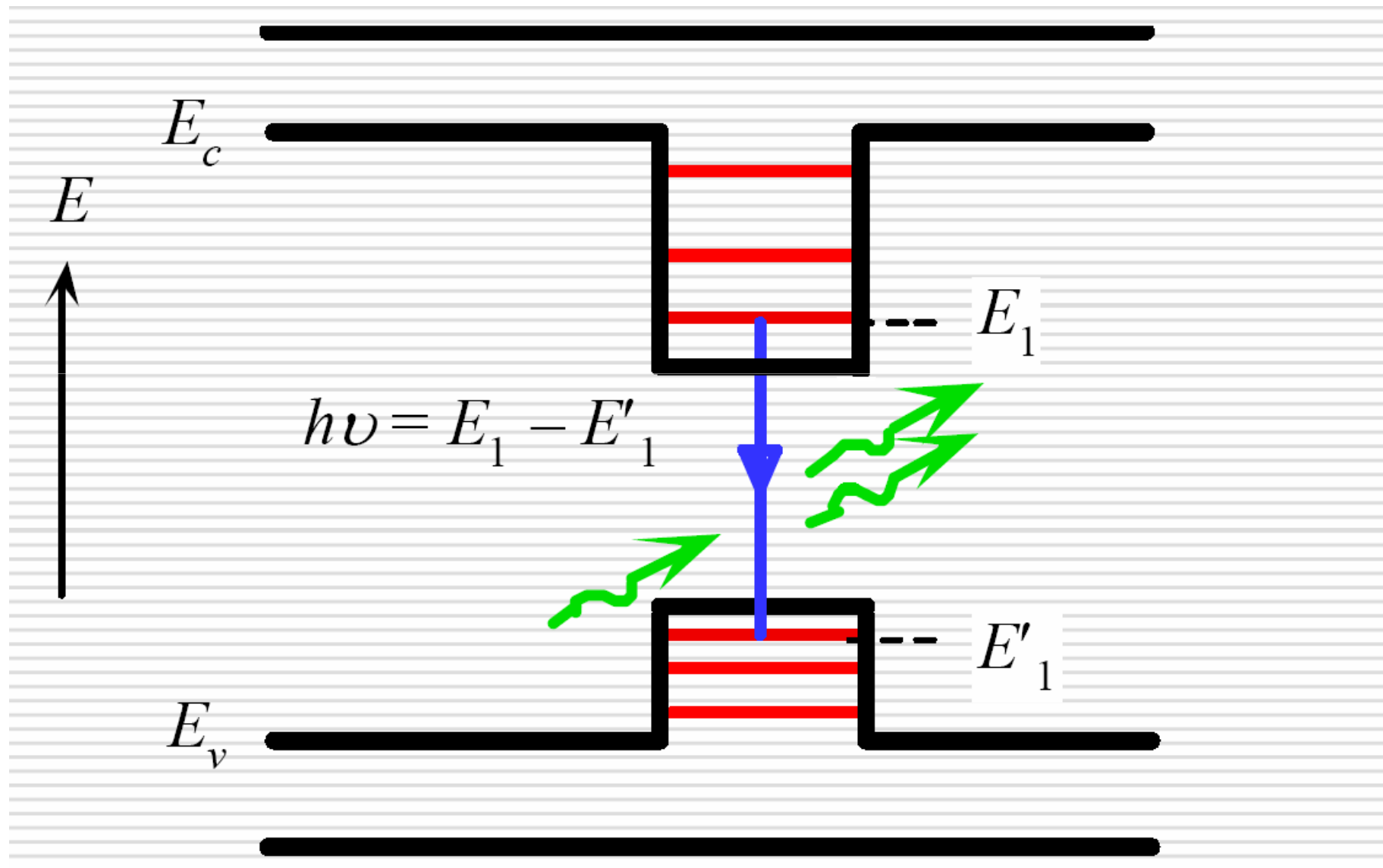


Struktura QW s tanko aktivni plastjo GaAs

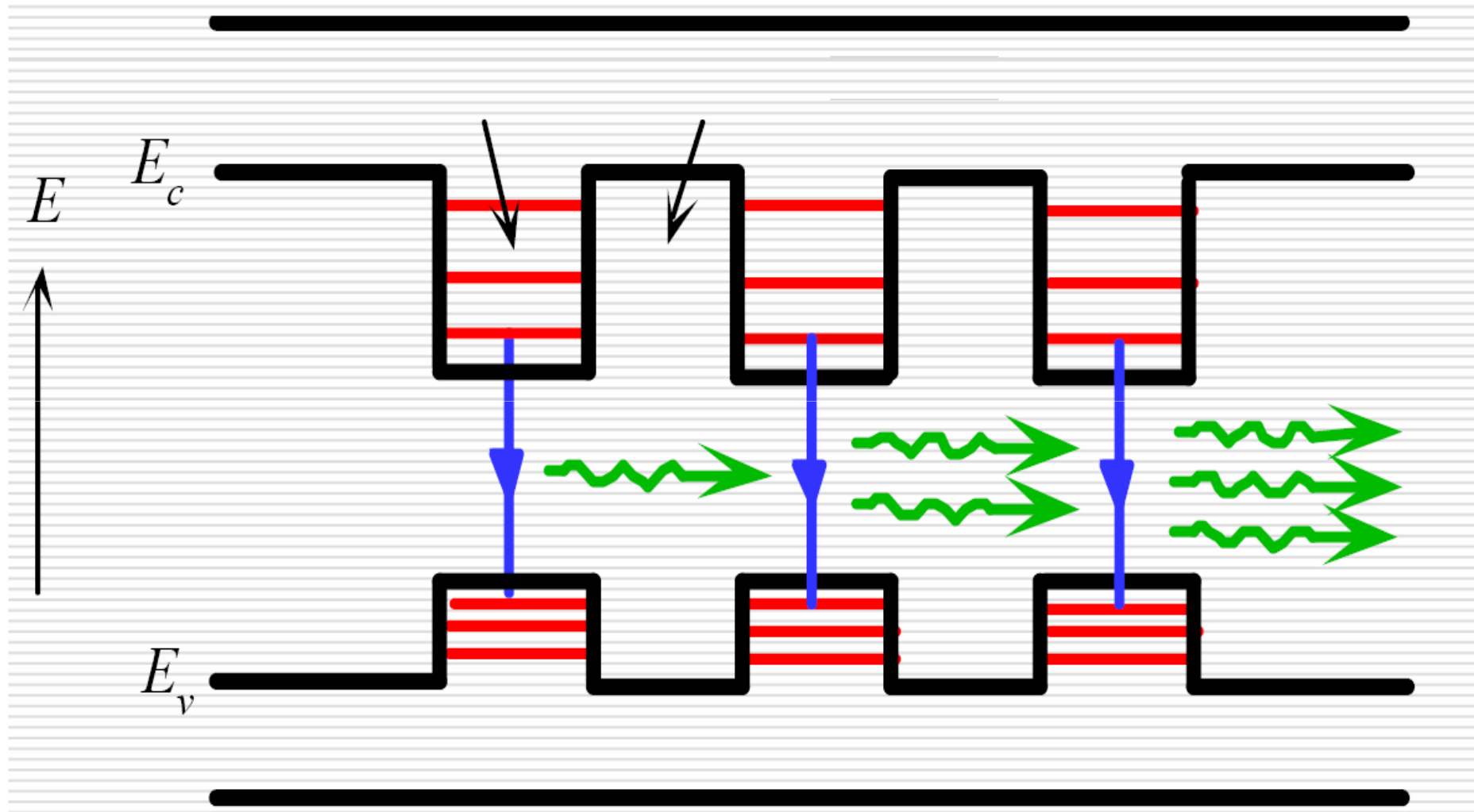
Energijski nivoji E_c in E_v

Gostota stanj

Sevanje kvantne jame

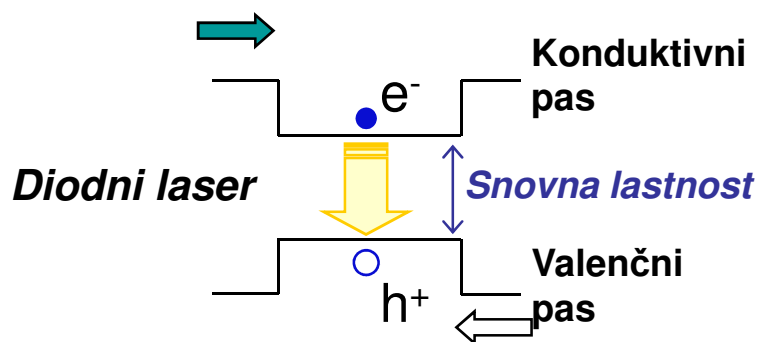


MQW

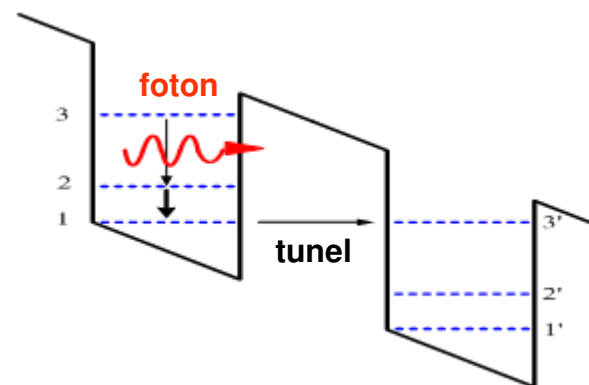


Kvantni kaskadni laser - medpodpasovni prehodi

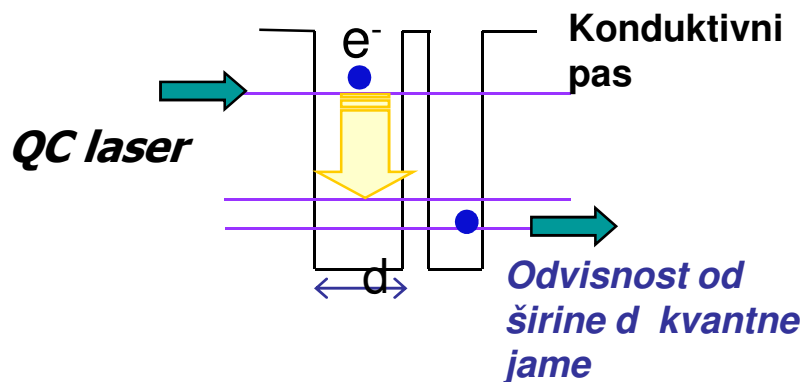
Medpasovni prehod



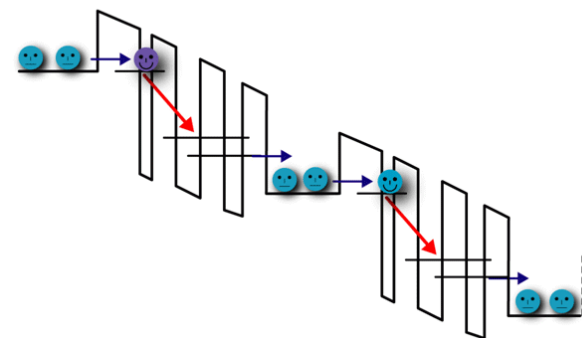
Medpodpasovni prehod v kaskadi



Kvantna jama - Medpodpasovni prehod

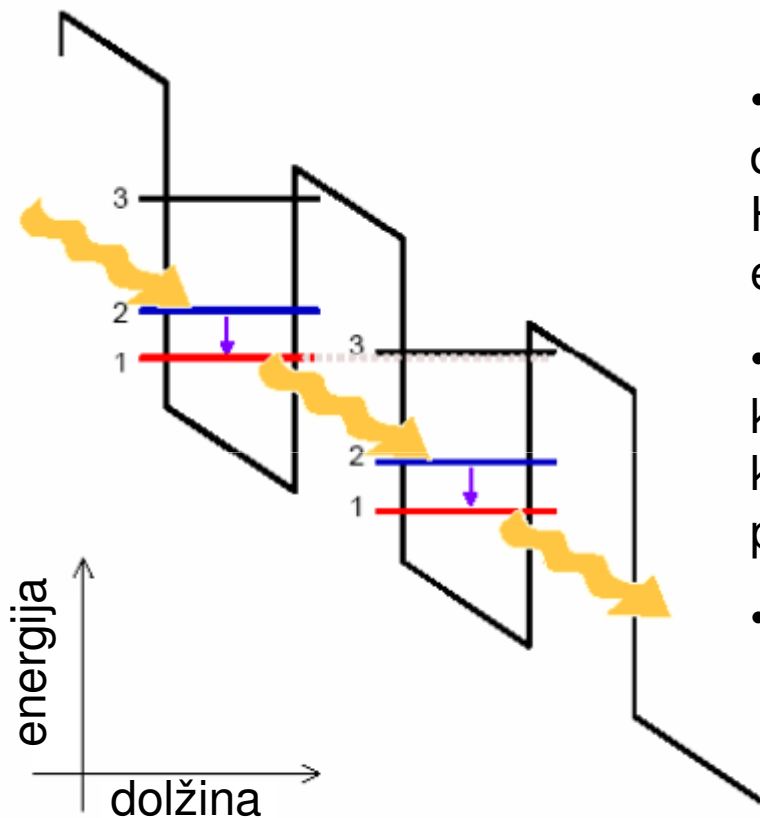


Posamezni elektron generira n fotonov



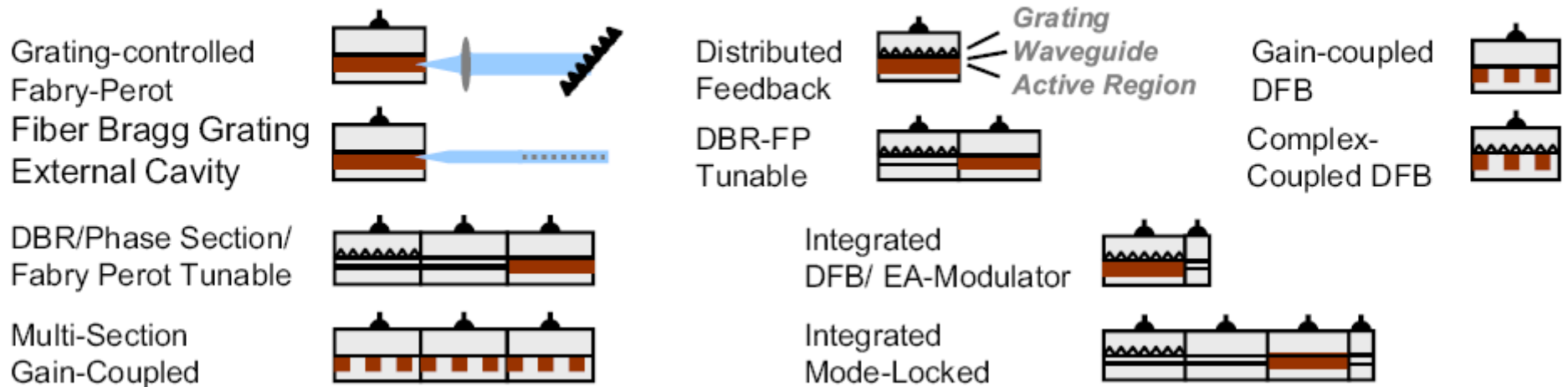
Multiplikativni proces!

Kvantni kaskadni laser - QCL

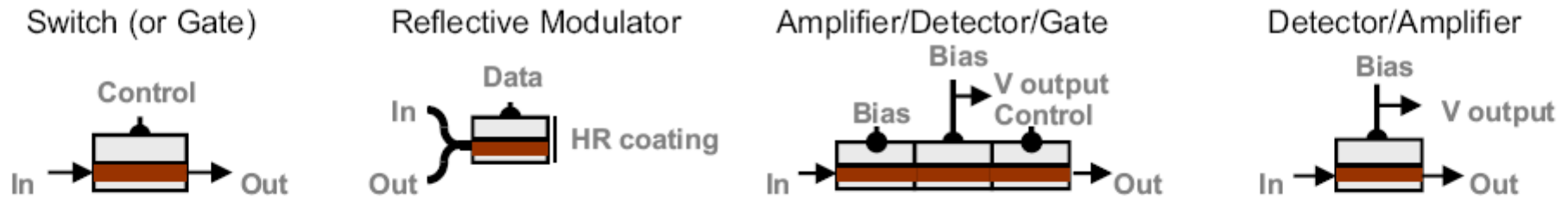


- Valovna dolžina je odvisna od debeline plasti in ne od vrste materiala. Hahko dobimo vse valovne dolžine z eno vrsto materiala
- Vsak elektron pri skakanju po kaskadi seva N ($N = 20 - 75$) fotonov, kjer je N število plasti. Plazovni pojav, potencialno visoka moč laserja.
- Interes za teraherčno področje.

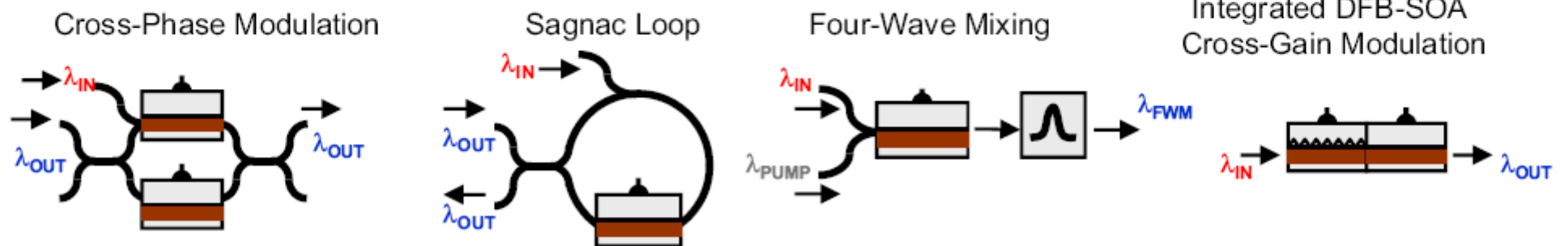
Tunable and Fixed Lasers



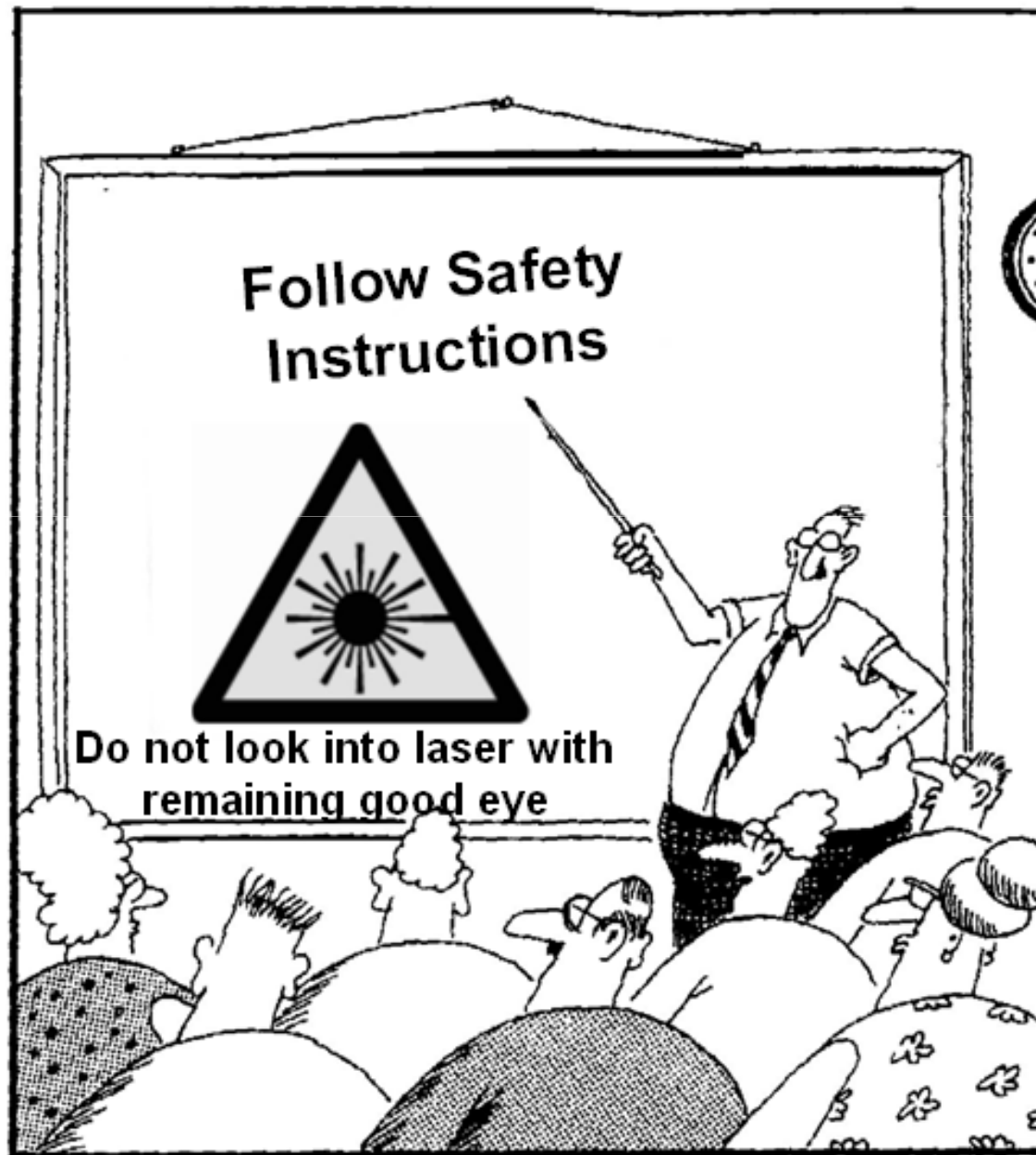
SOA Signal Processing



SOA Wavelength Converters



Opozorilo



Konec