

## 11. Svetlobni viri

### 11.1. Lastnosti svetlobnih virov

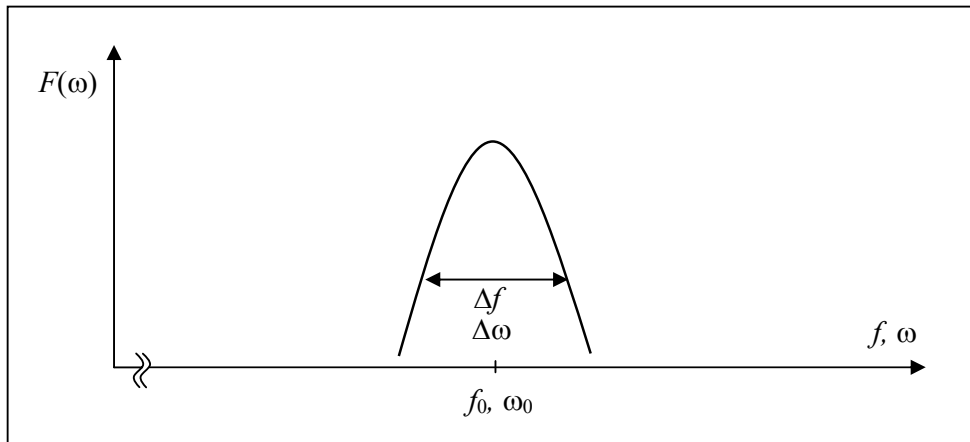
Ključni element za komunikacijo po optičnem vlaknu je svetlobni vir. Zanj imamo štiri zahteve:

1. izhodna moč vira,
2. frekvenčna pasovna širina,
3. prečna koherenca,
4. možnost modulacije.

#### 11.1.1. Izhodna moč in frekvenčna pasovna širina svetlobnega vira

Električni izvori so karakterizirani z močjo  $P$  in frekvenčnim spektrom  $F(\omega)$ , ki ga lahko podamo tudi kot časovno odvisnost napetosti  $u(t)$ . V optiki časovne odvisnosti ne moremo meriti zaradi previsoke frekvence svetlobe, saj ima recimo signal z valovno dolžino  $\lambda_0=1550$  nm frekvenco  $f_0=194$  THz. Za prikaz svetlobnih signalov je torej mnogo primernejši frekvenčni prostor, kjer prikazemo jakostni spekter  $F(\omega)$ , ki pa ne nosi informacije o fazi. Iz slike 1, ki prikazuje spekter optičnega signala, razberemo optično moč in valovno širino  $\Delta\lambda$ .

$$|\Delta\lambda| = |\Delta f| \cdot \frac{\lambda_0^2}{c_0} = |\Delta f| \cdot \frac{c_0}{f^2} \quad (1)$$



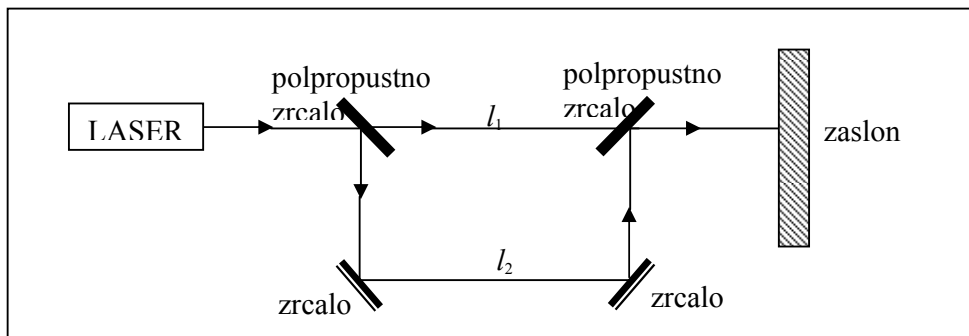
Slika 1: Prikaz izhodnega signala iz svetlobnega vira v frekvenčnem prostoru.

Če je izvor svetlobe zelo ozek, definiramo širino spektra s količino, ki se imenuje **vzdolžna koherenčna dolžina**  $d$ . To je razlika poti, ki jo mora v interferometru (slika 2) prepotovati svetloba, da interferenca izgine.

$$d = \frac{c_0}{\Delta f} = l_2 - l_1 \quad (2)$$

Vidimo torej, da je mogoče širino spektra svetlobnega signala lahko podajati kot:

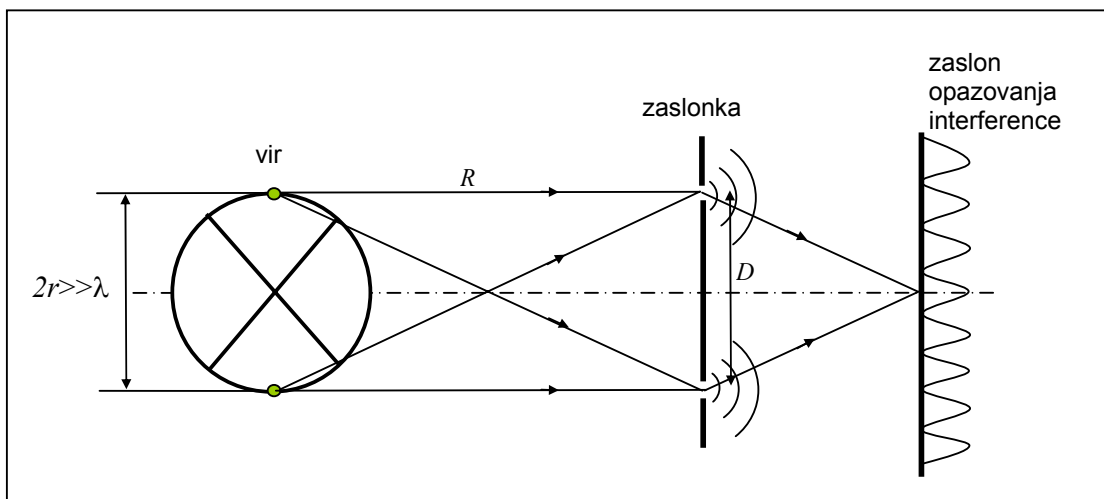
- valvnodolžinsko širino  $\Delta\lambda$ ,
- frekvenčno širino  $\Delta f$ ,
- koherenčno dolžino  $d$ .



Slika 2: Interferometer.

### 11.1.2. Prečna koherenca

Ker frekvenčni spekter ne podaja informacije o fazi v optiki potrebujemo za opis vira še eno količino – prečno koherenco, ki nam pove, ali so posamezni izvori sofazni. To količino imenujemo **prečna koherenca**  $D$ . Prečna koherenčna dolžina je tista dolžina, pri kateri pri razmikljanju rež interference izgine.



Slika 3: Definicija prečne koherence.

V primeru majhne prečne koherence imamo opravka z neodvisnimi izvori (LED).

V primeru velike ali celo neskončne koherence imamo opravka s sinhroniziranimi izvori (LASER).

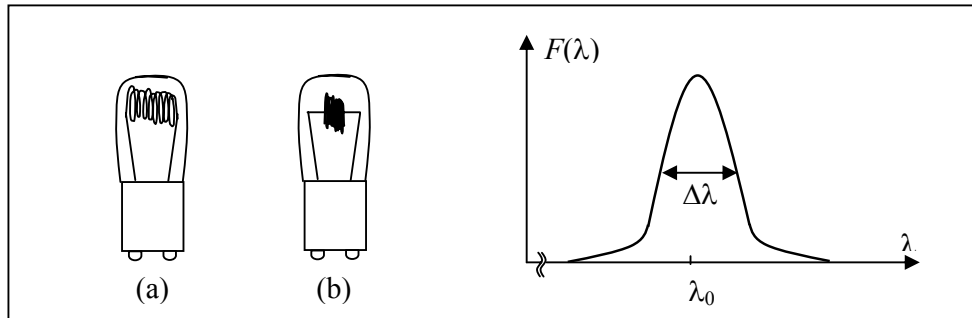
## 11.2. Tipi svetlobnih virov

Vrste svetlobnih virov in njihova področja uporabe so zelo raznoliki. Namembnost svetlobnih virov se razteza od razsvetljave preko merilne tehnike, telekomunikacij in industrijskih aplikacij vse do medicine.

V tem poglavju se bomo seznanili s splošnimi svetlobnimi viri, polprevodniško svetlečo diodo in zlasti z lasersko diodo ter visoko koherentnimi komunikacijskimi laserji.

### 11.2.1. Toplotno-svetlobni viri

Tipični predstavnik toplotno-svetlobnih virov je žarnica s tungstenovo žarilno nitko. Nitka oddaja svetlobo, ko se zaradi svoje upornosti segreje do take stopnje, da zažari. Povzročitelji so elektroni, ki izstopajo iz svoje orbite, ko skozi steče elektrika. Ko elektroni vanjo ponovno vstopajo, oddajajo svetlobo in toploto. Približno 95% energije se spremeni v toploto in le 5% v svetlobo. Žarnice z žarilno nitko se izdelujejo za izhodne moči od 0,1 W do 10 kW. Tovrstni izvori niso koherentni, lahko pa se izdelajo v zelo majhnih izvedbah, kar izboljša koherenco.



Slika 4: Običajna žarnica (a) in žarnica primerna za optiko (b) ter optični spekter.

#### Primer:

Koliko je frekvenčni pas  $\Delta f$  optičnega toplotnega vira s spektralno širino čez celotno vidno področje od vijolične ( $\lambda_1=0,38 \mu\text{m}$ ) do rdeče ( $\lambda_2= 0,76 \mu\text{m}$ ) svetlobe?

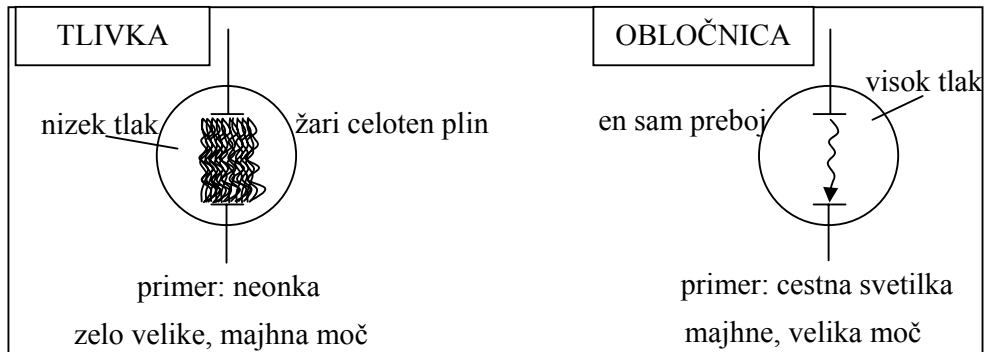
$$f_1 = \frac{c_0}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 789,47 \text{ THz} \quad f_2 = \frac{c_0}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0,76 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 394,74 \text{ THz}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 789,47 \text{ THz} - 394,74 \text{ THz} = 394,73 \text{ THz}$$

Toplotno-svetlobnih virov se zaradi toplotne vztrajnosti ne da hitro modulirati. Prehoden pojav pri žarnici znaša tipično nekaj milisekund.

V optičnih komunikacijah se toplotno-svetlobni izvori uporabljajo v merilni tehniki, kjer potrebujemo širokospektralni vir svetlobe ali izvor šuma.

### 11.2.2. Tlivke in obločnice



Slika 5: Tlivka in obločnica.

Spekter ni zvezen, temveč je sestavljen iz spektralnih črt, kot prikazuje slika 6. Spektralne črte ustrezajo energijskim nivojem  $W_m$  molekul plina, ki se nahaja v viru. Ionizacija plina v tlivki predstavlja velik preskok med energijskimi nivoji.

Pri prehodu molekule iz višjega na nižji nivo pride do oddaje fotona, kar imenujemo spontana emisija. Frekvenca oziroma valovna dolžina oddanega fotona je odvisna od razlike med energijskimi nivoji.

$$f = \frac{\Delta W}{h} \quad (3)$$

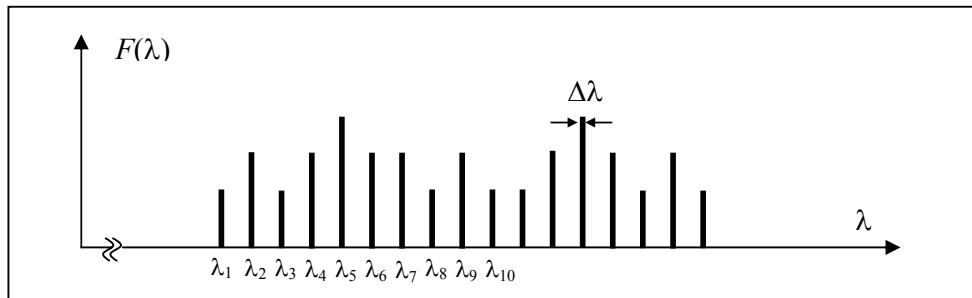
$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W} \quad (4)$$

$h$  je Plankova konstanta, ki znaša  $6,624 \cdot 10^{-34}$  J·s.

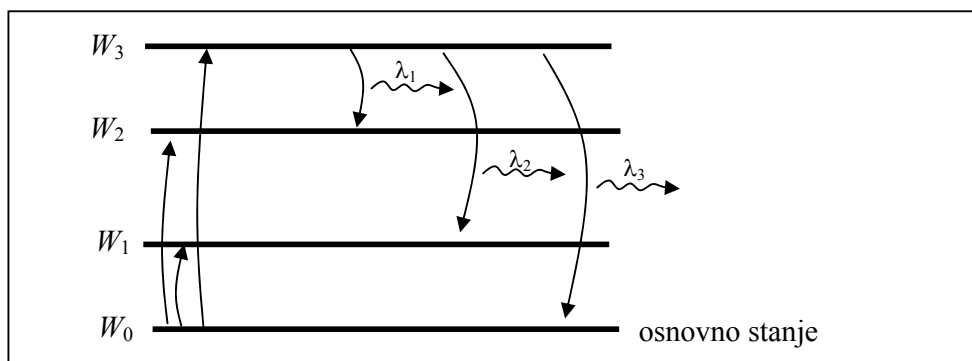
Iz praktičnosti se pri energijskih nivojih za enoto uporablja eV, ki je primernejša kot enota J.

$W=U \cdot Q$ , kjer je  $Q$  elektrina enega elektrona

$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



Slika 6: Optični spekter tlivke ali obločnice.



Slika 7: Energijski nivoji plina.

**Primer:**

Kolikšna je energija fotonov v vidnem področju od vijolične ( $\lambda_1=0,38 \mu\text{m}$ ) do rdeče ( $\lambda_2=0,76 \mu\text{m}$ ) svetlobe?

Iz predhodnega primera sledi, da pripadajoče področje obsega pas med 395 THz in 789 THz.

$$W_1 = h \cdot f_1 = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 789 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 5,23 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,3 \text{ eV}$$

$$W_2 = h \cdot f_2 = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 395 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 2,62 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \text{ eV}$$

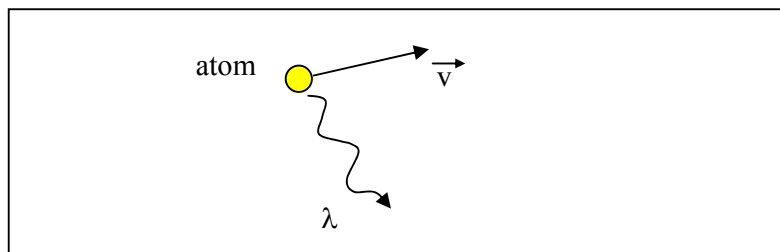
Tlivke so dimenzijsko zelo velike, obločnice so nekoliko manjše. Tako ene kot druge imajo velike izmere svetila, kar vodi v slabo prečno koherenco.

Prečna koherenca je pri tlivkah in obločnicah boljša kot pri toplotnih virih. K temu prispevajo predvsem diskretni spekter in izredno ozke spektralne črte. Širina  $\Delta\lambda$  je teoretično neskončno majhna, vendar v fizikalnem svetu prihaja do razširitve spektralnih črt. Vzrok temu sta toplotno gibanje molekul in trki med njimi.

Toplotno gibanje molekul, ki sevajo fotone z določeno frekvenco, znižujejo in povečujejo njihovo frekvenco zaradi Dopplerjevega pojava. Dopplerjev pojav, ki je prikazan na sliki 8, je prevladujoč mehanizem razširitve spektralne črte v plinskih snoveh. Glede na opazovalca svetlobe je vektor termične hitrosti sevajočih atomov naključno porazdeljen. Atomi, ki se gibljejo proti opazovalcu, izkazujejo Dopplerjev premik proti višji frekvenci in obratno. Razširitev spektra znaša

$$\Delta\lambda \approx 3 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda_0, \tag{5}$$

kar pri sobni temperaturi znaša  $\Delta f \approx 1 \text{ GHz}$ .



Slika 8: Toplotno gibanje molekule plina, ki oddaja foton.

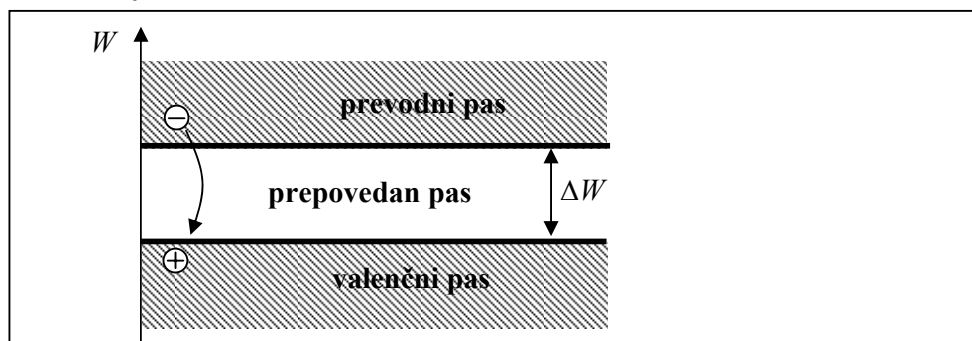
Zaradi termičnega gibanja doživljajo molekule plina, s temperaturo  $T$ , pogoste medsebojne trke. Trki med molekulami so še pogostejši zaradi visokega tlaka plina. Po trku se spremeni faza sevajočega fotona, kar se izkazuje kot fazni preskok. Ker je povprečni čas med dvema trkoma mnogo krajši od

časa trajanja oscilacij, se v času sevanja fotona dogodi mnogo faznih skokov, ki v končnem učinku razširjajo frekvenčni pas.

Električna modulacija tlivk in obločnic je mogoča, vendar je odzivni čas omejen s prehodnim pojavom, ki znaša približno mikrosekunda. Seveda električne modulacije ni enostavno izvesti, ker imamo visoko napajalno napetost.

### 11.2.3. Svetleča dioda (LED)

Delovanje LED (angl. Light Emitting Diode) je tudi vezano na energijske nivoje. Kot je prikazano na sliki 9, imajo električne snovi dva energijska pasa, ki ju imenujemo prevodni in valenčni pas. Glede na velikost prepovedanega pasu  $\Delta W$  med prevodnim in valenčnim pasom ločimo snovi v prevodnike, polprevodnike in izolatorje. Polprevodniki imajo prepovedan pas velik nekaj  $eV$ , kar je mogoče izkoristiti za sevanje vidne in infrardeče svetlobe.



Slika 9: Energijski nivoji polprevodnika.

Pri rekombinaciji elektron-vrzel se sprosti energija v obliki:

- fotona (svetloba),
- fonona (toplota).

Verjetnost, da se pri rekombinaciji elektron-vrzel v siliciju (Si) sprosti foton, je  $P_{foton}=10^{-4}$ . Verjetnost, da se pri tej rekombinaciji sprosti fonon, je  $P_{fonon}=99,99\%$ .

Verjetnost, da se pri rekombinaciji elektron-vrzel v galijevem arzenidu (GaAs) sprosti foton je približno 50 %. Torej je tudi verjetnost, da se pri tej rekombinaciji sprosti fonon približno 50 %.

Pri izdelavi svetlobnega izvora iz polprevodnika želimo uporabiti snov, ki bo dala čim več svetlobe. LED imajo boljši izkoristek kot običajna svetila. Prve svetleče diode so bile iz GaAs, kasneje pa so preizkušali še ostale kombinacije snovi, ki so prikazane v tabeli na sliki 10.

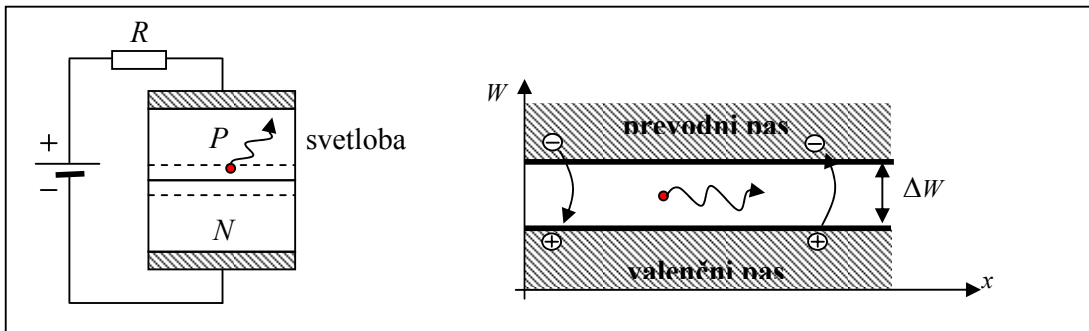
Elementarni polprevodniki, posebno Si, so bili zelo uporabni v razvoju mikroelektronike, imajo pa nekaj pomembnih slabih lastnosti. Njihov prehod med energijskimi pasovi je indirektn. Pri indirektnem prehodu imajo nosilci izredno dolgo življenjsko dobo, česar posledica je majhna kvantna učinkovitost snovi. To pomeni, da zelo slabo oddajajo svetlobo in je njihov absorpcijski koeficient nizek. Za sončne celice je Si tehnološko ustrezen, ampak zaradi majhnega prepovedanega pasu je učinkovitost pretvorbe nizka.

Takoj je postalo jasno, da običajni polprevodniški materiali niso primerni za uporabo v optoelektroniki, zato so se raziskovalci obrnili k sestavljenim polprevodnikom, ki so ponujali mnogo zelenih lastnosti in jih je bilo mogoče sintetizirati brez večjih težav. Sestavljeni polprevodniki so, kot pove že ime, izdelani iz elementov, ki pripadajo različnim stolpcem periodnega sistema. Primer so III-V, II-VI, IV-VI ali IV-IV spojine. Zgodovinsko gledano so bili najprej izdelani III-V sestavljeni polprevodniki (InSb – leta 1950), ki so tudi največ uporabljani. Njihova glavna predstavnika sta GaAs in InP. Sestavljeni polprevodniki imajo enako povprečno valenčno število kot elementarni polprevodniki.

snov	Širina prepovedanega energijskega pasu [eV]	Mejna valovna dolžina [nm]	barva
Ge	0,67	1850	
Si	1,12	1107	
GaP	2,1	590	rumena/zelena
GaAsP	1,9	640	rdeča
InP	1,35	918	
GaAs	1,43	867	IR 850 nm
InSb	0,17	7293	
GaN	3,5	354	Modra/UV
SiC	3,5	350	Modra/UV
GaAlP	0,8 – 2,0		
$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	0,74	1675	
InGaAsP	0,87	1425	IR 1300 in 1550

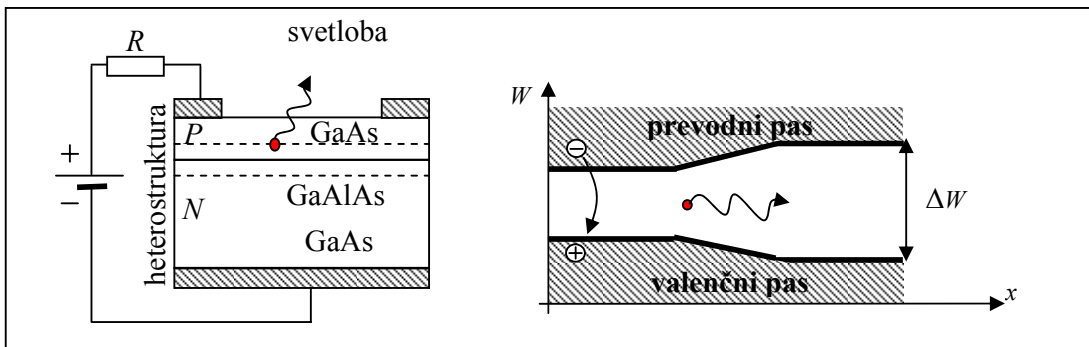
Slika 10: Tabela polprevodnikov s pripadajočimi širinami energijskega pasu.

Svetlečo diodo uporabljamo v prevodni smeri, kot prikazuje slika 11. Vedno jo priklopimo preko upora, kar pomeni, da imamo tokovni izvor. Če je LED zasnovana kot je prikazano na sliki 11, se vsi nastali fotoni ponovno absorbirajo.



Slika 11: Slabo zasnovana LED.

Pri pravilno zasnovani fotodiodi, ki jo prikazuje slika 12, svetloba izhaja na vrhu in so ostali deli fotodiode prozorni, tako da se svetloba v njih ne absorbira. Ustvarjen foton se ne absorbira, ker ima premalo energije.



Slika 12: Dobro zasnovana LED.

Odzivni čas LED je od 1 do 100 ns. Svetloba ni polarizirana, ker je generacija fotona naključna. Ker je LED nekoherenten izvor s slabo prečno koherenco, imamo zelo slab sklopni izkoristek ( $\eta < 1\%$ ). Svetleča dioda je razmeroma majhen izvor (primerljiv z jedrom mnogorodovnega vlakna). Napetost na LED je odvisna od barve, ki jo LED oddaja.

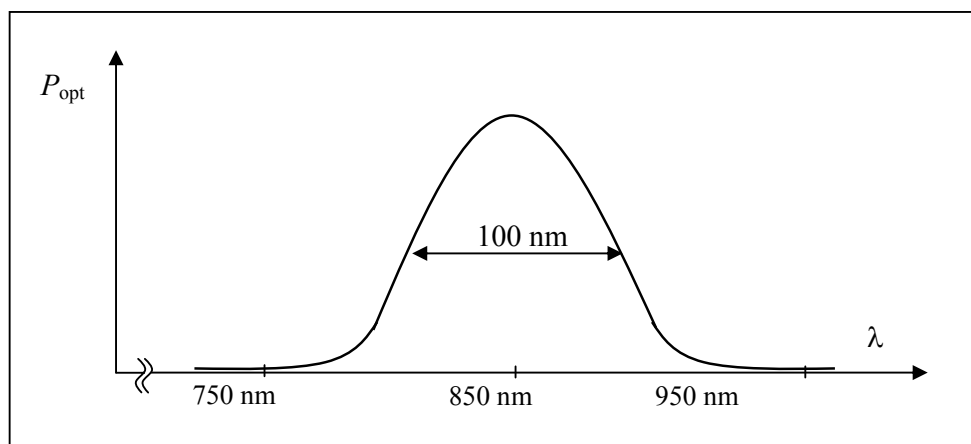
**Primer:**

Izračunaj napetost na LED, ki oddaja svetlobo z valovno dolžino 900 nm.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W}$$

$$\Delta W = U \cdot |Q_e|$$

$$U = \frac{h \cdot c_0}{|Q_e| \cdot \lambda} = \frac{6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{\underline{1,4 \text{ V}}}$$



Slika 13: Primer optičnega spektra LED.

Svetilnost LED z urami obratovanja počasi upada.

LED ima zelo dolgo življenjsko dobo, ki jo definiramo s 100.000 urami (več kot 11 let), pri čemer se smatra, da do takrat oddaja vsaj 50% svetlobe, ki je deklarirana pri novi diodi.

V primerjavi s klasičnimi žarnicami na žarilno nitko, ki imajo življenjsko dobo 1000 ur, drži LED najmanj 100-krat dlje. Odlikuje pa jih tudi odpornost na tresenje in udarce.



## 11.2.4. LASER

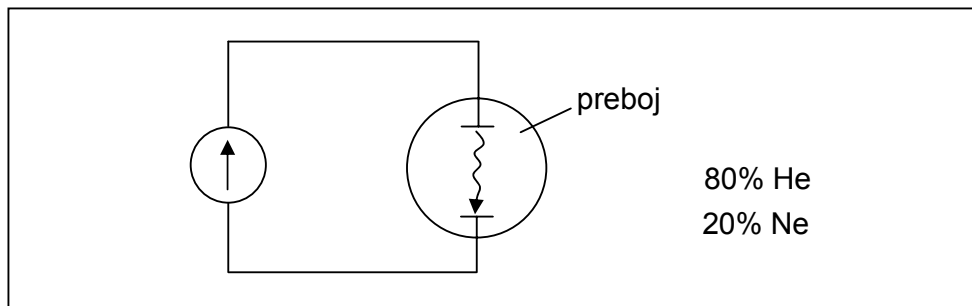
L. Schawlow, ki ga skupaj z nekaterimi drugimi štejejo za iznajditelja laserja, je izdelal prvi laser leta 1958. Prav odkritje laserja kot vira koherentne svetlobe je omogočilo nastanek novih tehnologij in med njimi v prvi vrsti razvoj optičnih komunikacij.

Prvi LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je bil ojačevalnik svetlobe, ki je izkoriščal pojav stimulirane emisije v rubinovem kristalu. V zadnjih 40-ih letih so bili razviti laserji različne namembnosti, ki kot optično ojačevalno snov uporabljajo zelo različne materiale v različnih agregatnih stanjih, na primer:

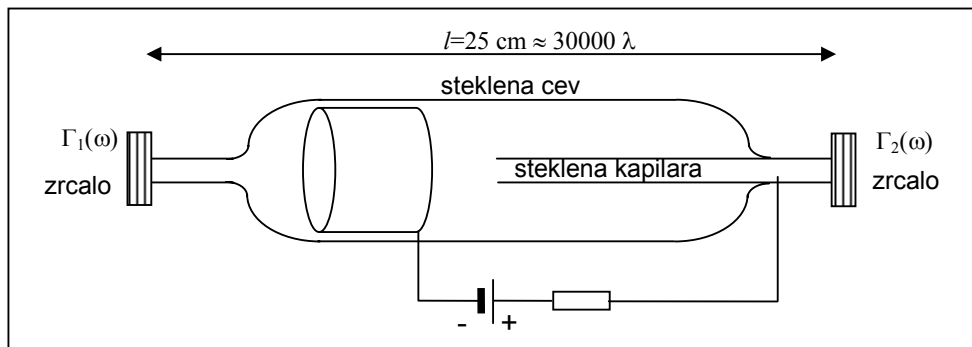
1. plinski laserji,
2. laserji trdnega telesa,
3. tekočinski laserji.

### 11.2.4.1. Plinski LASER

Prva stvar, ki jo želimo doseči pri delovanju laserja, je obratna naseljenost na energijskih nivojih  $N_2 > N_1$ .



Slika 14: Tlívka napolnjena s helijem in neonom.



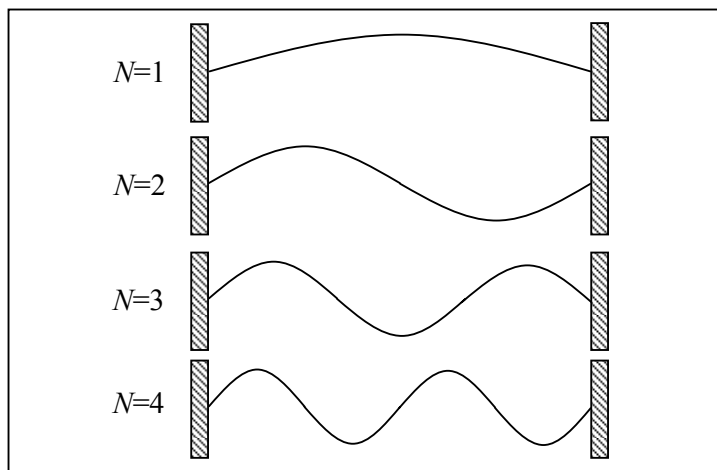
Slika 15: Plinski HeNe laser.

Negativna elektroda mora biti velika, ker se segreva, medtem ko iz nje izhajajo elektroni. Naloga steklene kapilare je zgostitev električnega toka in praznjenje spodnjega energijskega nivoja s pomočjo trkov Ne atomov ob stene kapilare.

Zrcali s frekvenčno odvisno odbojnostjo  $\Gamma_1(\omega)$  in  $\Gamma_2(\omega)$  pogojujeta barvo laserja (rdeč, oranžen, rumen, zelen,...). Pri HeNe laserju, ki ne uporablja frekvenčno odvisnih zrcal, niha le-ta z valovno dolžino 1200 nm. Ojačanje za rdečo svetlobo (632,8 nm) je pri HeNe 2 dB/m.

Pri plinskem laserju je dolžina resonatorja veliko večja od valovne dolžine. Takšen resonator torej omogoča nihanje na velikem številu rodov. Slika 16 prikazuje prve štiri rodove, ki so rešitev resonančnih pogojev. Posamezna resonančna frekvenca je večkratnik polovice valovne dolžine

$$f_0 = \frac{c_0}{N \cdot \frac{\lambda_0}{2}}, \quad (6)$$



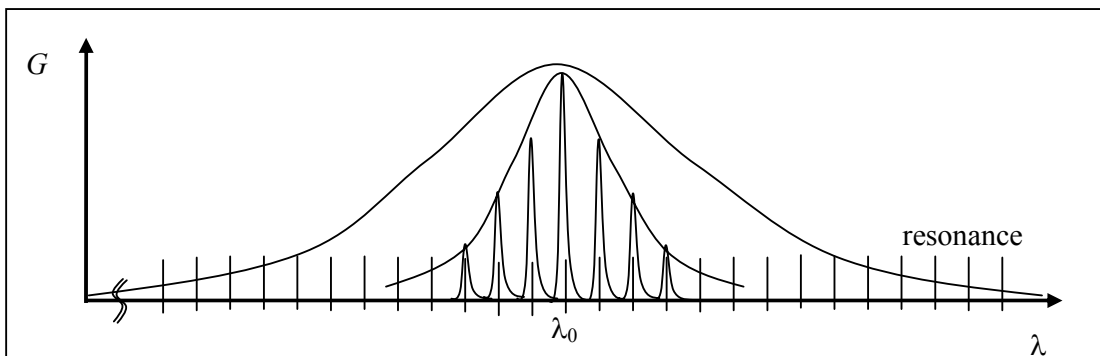
Slika 16: Rešitve za resonator.

**Primer:**

Izračunaj število vzdolžnih rodov, ki jih omogoča resonator HeNe laserja z dolžino  $l=25$  cm, ki niha na centralni frekvenci  $f_N=474$  THz.

$$f_N = \frac{c}{2 \cdot l} \cdot N \quad N=1, 2, 3, \dots$$

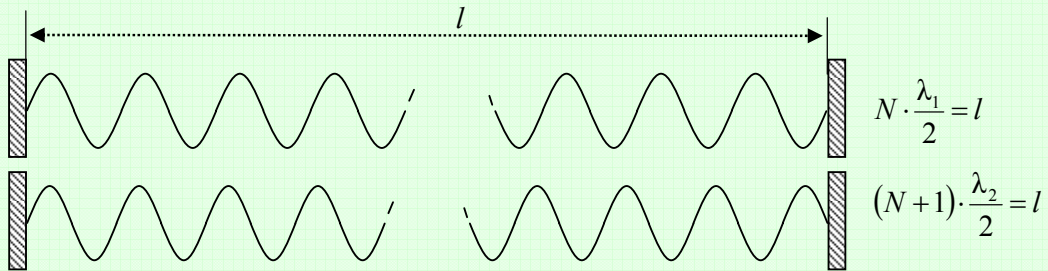
$$N = \frac{2f_N l}{c} = \frac{2 \cdot 474 \text{ THz} \cdot 0,25 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{7 \cdot 10^5}$$



Slika 17: Resonance laserja.

**Primer:**

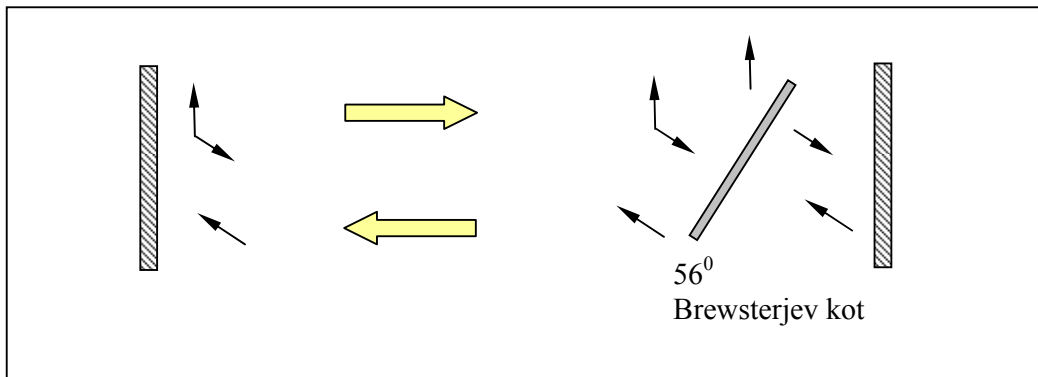
Razdalja med zrcali helij-neonske laserske cevi (dolžina cevi) znaša  $l=25$  cm. Izračunajte frekvenčni razmik med sosednjima spektralnima črtama laserja, ko cev niha na več vzdolžnih rodovih! Lomni količnik razredčenega plina v cevi je zelo blizu enote, cev niha samo na osnovnem prečnem rodu.



$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1}$$

$$\Delta f = c \left( \frac{N+1}{2l} - \frac{N}{2l} \right)$$

$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2l \cdot n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,25 \text{ m} \cdot 1} = \underline{\underline{600 \text{ MHz}}}$$



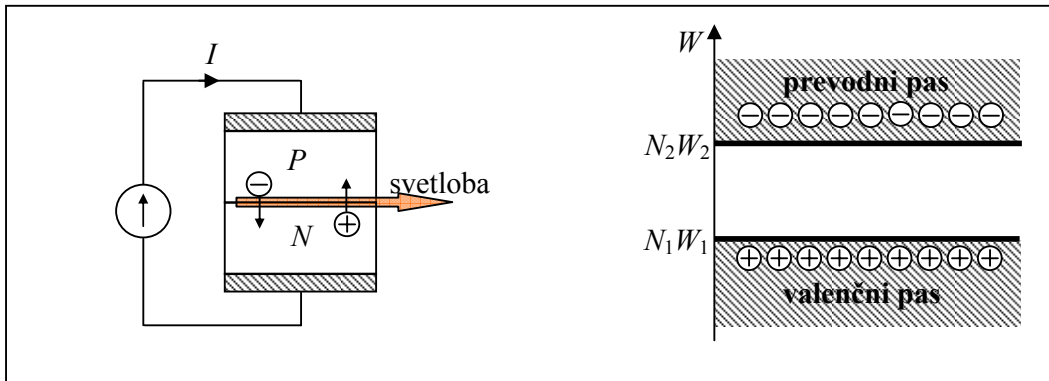
Slika 18: Plinski laser z Brewsterjevim oknom.

### 11.2.4.2. Polprevodniški LASER

Polprevodniški laserski čip je zelo majhna naprava, kar nam omogoča, da dosežemo velike gostote toka skozi polprevodnik

$$J = \frac{dI}{dA} \quad (5)$$

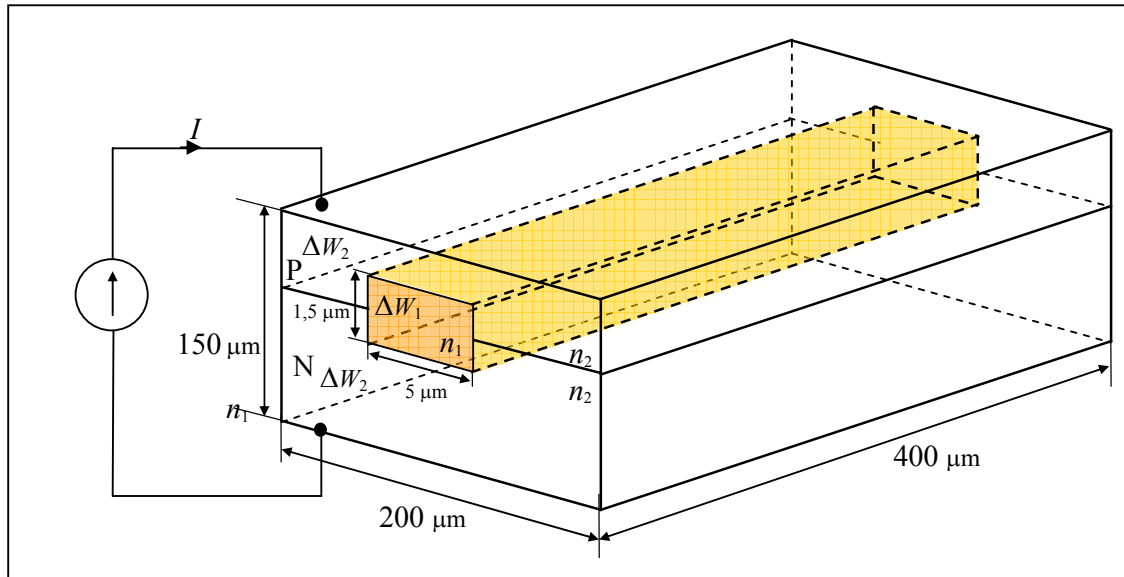
Velike gostote toka povzročajo inverzno porazdelitev delcev, ki omogočajo lasersko ojačanje. Sprva so se takšne naprave uporabljale pri nizkih temperaturah  $T \sim 77$  K (tekoči dušik).



Slika 19: Zasnova laserja.

Možni sta dve izboljšavi glede na predhodno svetlečo diodo:

- Izgubo svetlobe, ki že tako težko nastane, preprečimo z uporabo heterostrukture.
- Optični spekter izboljšamo s selektivnejšim resonatorjem svetlobe.



Slika 20: Struktura laserja.

PN spoj z vgrajenim pravokotnim valovodom mora imeti večji lomni količnik kot okolica  $n_1 > n_2$ .

Širina prepovedanega energijskega pasu mora zunaj znašati več kot v valovodu  $\Delta W_2 > \Delta W_1$ .

Nameščanje zrcal na koncih čipa ni potrebno, ker imajo polprevodniki lomni količnik od 3,5 do 4, kar pomeni, da so odbojnosti od koncev velike.

Lasersko ojačanje  $G \approx 10^4$  dB/m.

**Primer:**

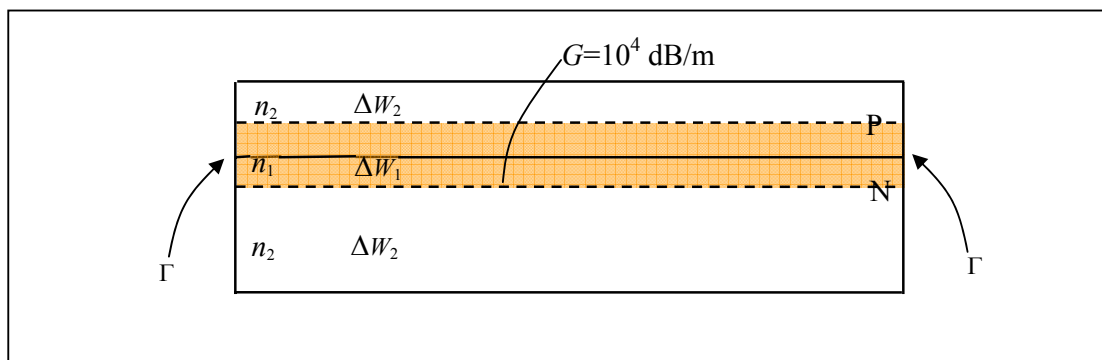
Izračunaj, koliko svetlobe se odbije na meji polprevodnik-zrak, če valovanje vpade pravokotno  $\theta_v=0$  na mejo iz polprevodnika z lomnim količnikom  $n_2=4$ !

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos\theta_v - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_v}}{\cos\theta_v + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_v}} = \frac{1-n}{1+n} = \frac{-3}{5} = -0,6$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos\theta_v - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_v}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cos\theta_v + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2\theta_v}} = \frac{n_2-1}{n_2+1} = \frac{3}{5} = 0,6$$

$$\Gamma = \frac{|\Gamma_{TE}| + |\Gamma_{TM}|}{2} = \frac{0,6 + 0,6}{2} = 0,6$$

$$\frac{P_{\text{odbita}}}{P_{\text{vpadna}}} = |\Gamma|^2 = \underline{\underline{36\%}}$$

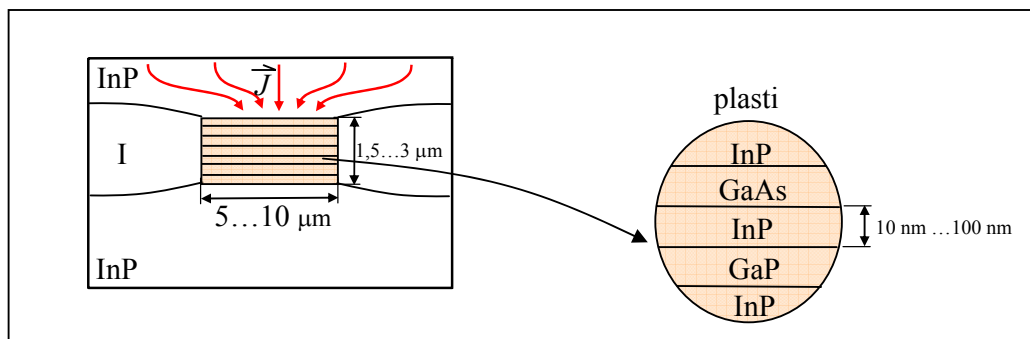


Slika 21: Prerez laserja.

$\lambda \approx 900 \text{ nm}$	$\lambda \approx 1300 \text{ nm}$	$\lambda \approx 1550 \text{ nm}$
GaAlAs (jedro)	InGaAsP (jedro)	ternarni polprevodnik
GaAs (obloga)	InP (obloga)	
} leta 1980		} leta 1990

Slika 22: Izbor polprevodnika.

Polprevodnike izberemo glede na želeno izhodno valovno dolžino. Do leta 1980 so znali izdelati zgolj laserje, ki so oddajali svetlobo 900 nm. V letu 1990 so s pomočjo ternarnih polprevodnikov izdelali laserje, ki so oddajali svetlobo z višjimi valovnimi dolžinami.

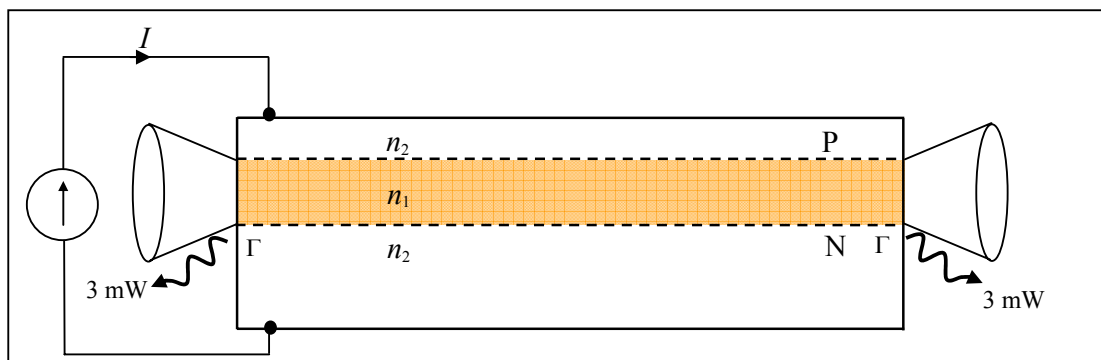


Slika 23: Plasti v prerezu laserja.

Na straneh valovoda imamo osirimašeno področje I, zato da se ves tok skoncentrira skozi valovod.

Valovod je izdelan s pomočjo MBE tehnologije, ki omogoča nizanje zelo tanke plasti. Tanke plasti tvorijo MQW strukturo, ki se obnaša kot večkratna kvantna jama (multiple quantum well). Točna sestava WQW še ni dorečena in je v fazi raziskav ter razvoja.

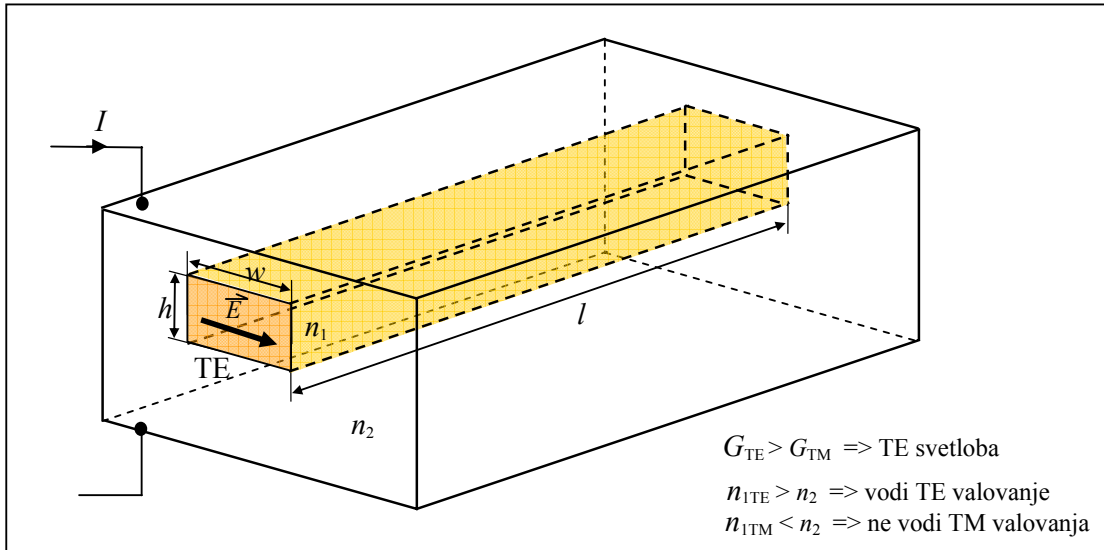
Polprevodniški laser oddaja svetlobo z jakostjo približno 3 mW na obeh straneh laserskega čipa, kot prikazuje slika 24. 50 % svetlobe torej mečemo stran.



Slika 24: Prerez laserja.

Ojačanje laserske snovi je različno za različni polarizaciji. Običajno velja, da je  $G_{TE} > G_{TM}$ .

Tudi lomna količnika valovoda sta različna glede na polarizacijo. Lomni količnik valovoda je za TE polarizacijo večji od lomnega količnika obloge, kar pomeni, da prihaja do vodenja TE valovanje. Nasprotno velja, da je lomni količnik valovoda za TM valovanje manjši od lomnega količnika obloge, kar pomeni, da TM valovanje nima pogojev za vodenje. Polarizacija, ki izhaja iz valovoda je torej vodoravna, kot prikazuje slika 22.



Slika 25: Polarizacija valovanja iz laserja.

Ker imamo tri dimenzije, dobimo  $TE_l$ ,  $TE_m$  in  $TE_n$ , kar lahko zapišemo  $TE_{l,m,n}$ .

Višina valovoda  $h \approx 1,5 \mu\text{m}$  je majhne izmere, tako da vodi samo en rod.

Širino valovoda  $w$  lahko izbiramo, torej laser lahko niha na več rodovih. Običajno znaša  $w = 5 \mu\text{m}$ .

Dolžina valovoda  $l$  podaja ojačanje laserja in je običajno velika, ker potrebujemo veliko ojačanje. Pri polprevodnikih je dolžina valovoda v okviru od  $200 \mu\text{m}$  do  $500 \mu\text{m}$ .

Rodovi, ki izhajajo iz takega laserja, so  $TE_{0,0,n}$ , kjer prvi dve ničli označujeta osnovna rodova.

**Primer:**

Polprevodniški laser vsebuje resonator, kjer predstavljata zrcali odbojnosti polprevodnik/zrak na mejnih ploskvah čipa. Izračunajte potrebno dolžino  $l$  valovoda v čipu, da naprava začne delovati kot laser! Dielektrična konstanta polprevodnika znaša  $\epsilon_r = 14$  za svetlobo z valovno dolžino  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ . Lasersko ojačenje v valovodu pri izbranem delovnem toku doseže  $G = 5000 \text{ dB/m}$  za TE polarizacijo.

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = 3,742 \qquad \Gamma_{\text{TE}} = \frac{1-n}{1+n} = -0,578$$

$$a_{\text{dB}} = 10 \log |\Gamma_{\text{TE}}|^2 = -4,758 \text{ dB}$$

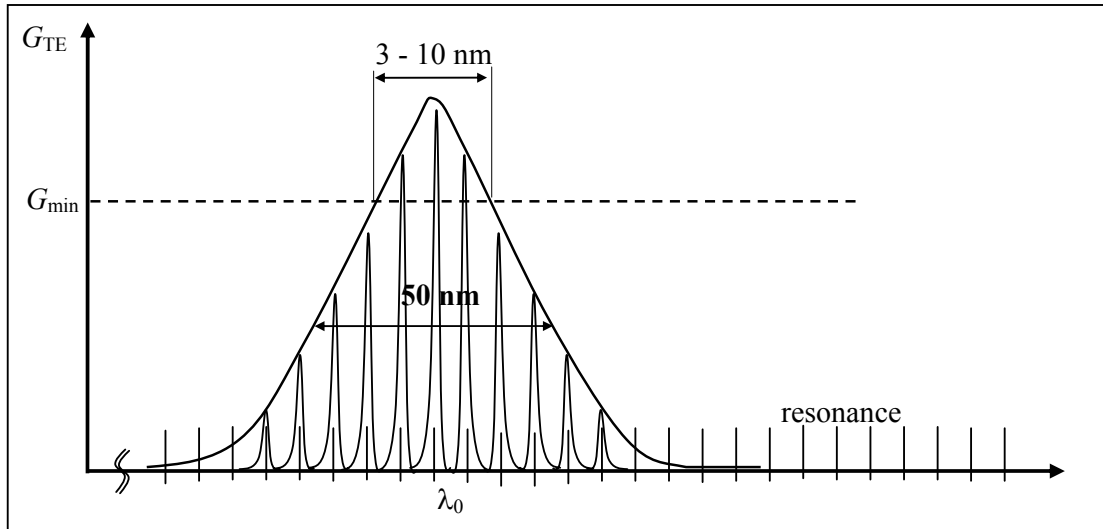
$$2lG + 2a_{\text{dB}} = 0 \rightarrow l = -\frac{a_{\text{dB}}}{G} = 0,952 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,952 \text{ mm}$$

**Primer:**

Izračunaj število vzdolžnih rodov, ki jih omogoča resonator polprevodniškega laserja z dolžino  $l = 400 \mu\text{m}$ . Lomni količnik polprevodnika znaša  $n_1 = 3,7$ , za svetlobo z valovno dolžino  $\lambda = 850 \text{ nm}$ .

$$l = N \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2n_1} \quad N=1,2,3,\dots$$

$$N = \frac{2n_1 l}{\lambda} = \frac{2 \cdot 3,7 \cdot 400 \mu\text{m}}{850 \text{ nm}} = \underline{\underline{3400 \text{ rodov}}} = 3400 \text{ polvalov}$$



Slika 26: Spekter laserske diode.

**Primer:**

Izračunaj frekvenčni razmik med posameznimi vzdolžnimi rodovi v resonatorju polprevodniškega laserja z dolžino  $l=400 \mu\text{m}$ . Lomni količnik polprevodnika znaša  $n_1=3,7$ , za svetlobo z valovno dolžino  $\lambda=850 \text{ nm}$ .

$$\Delta f = \frac{c}{2l} = \frac{c_0}{2l \cdot n_1} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 3,7} = \underline{\underline{100 \text{ GHz}}}$$

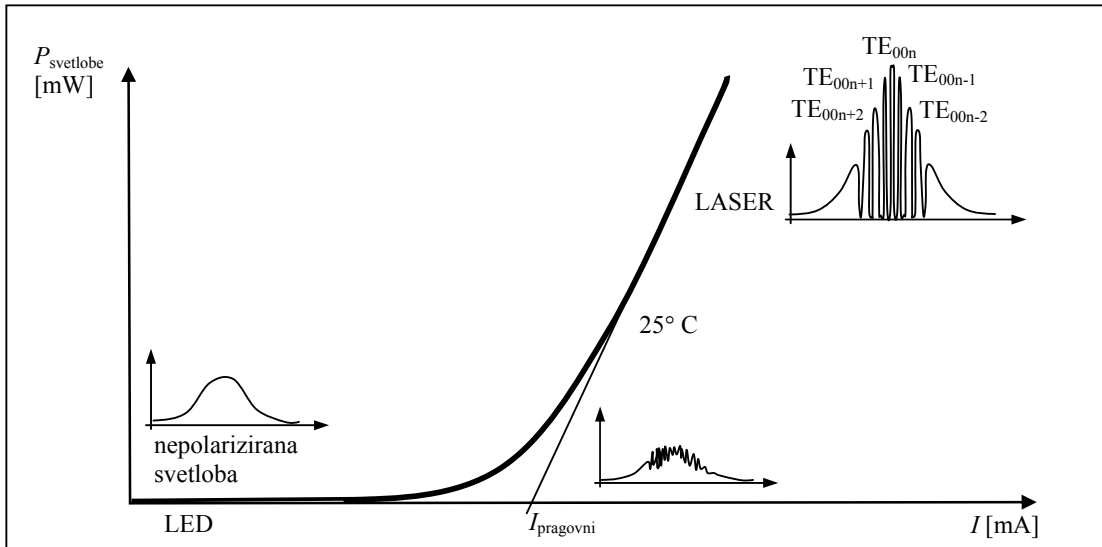
**Primer:**

Izračunaj število rodov, na katerih dejansko niha laser, če je širina ojačevalnega pasu 5 THz.

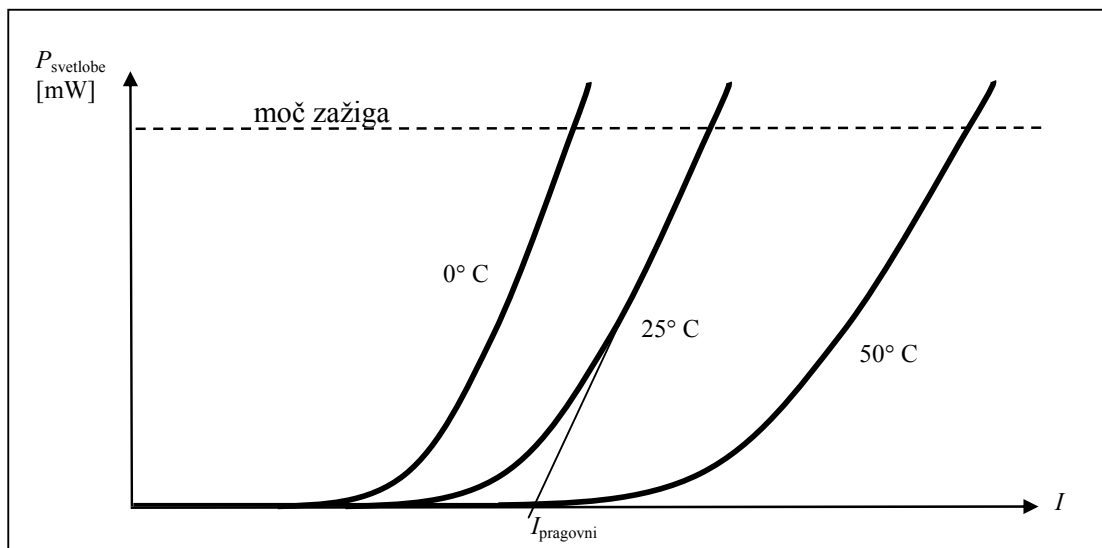
$$M = \frac{\Delta f_g}{\frac{c_0}{2l \cdot n_1}} = \frac{5 \text{ THz}}{100 \text{ GHz}} = \underline{\underline{50 \text{ rodov}}}$$

Frekvenčni spekter laserja je odvisen od toka. Pri tokih, ki so nižji od kolenskega toka, laser oddaja nepolariziran zvezen šum. Pri kolenskem toku je spekter seštevek spektra LED in LASERJA. Nad kolenskim tokom se spekter preoblikuje v glavniki rodov, ki je značilen za Fabry-Perojeve laserje. Pri normalnem delovanju imajo od 3 do 100 vzdolžnih rodov.





Slika 27: Frekvenčni spekter Fabry-Perojevega laserja v odvisnosti od toka.



Slika 28: Temperaturna odvisnost karakteristike polprevodniškega laserja.

Pragovni tok za polprevodniški laser, ki oddaja optično moč 3 mW pri sobni temperaturi  $T=25^\circ\text{C}$  znaša od 100 mA do 5 mA. Večji pragovni tokovi so predvsem značilni za starejše laserje, ki so jih izdelovali pred 20 leti. Pri sodobnih laserjih je pragovni tok nižji in znaša tudi do 5 mA.

Pragovni tok se večja z višanjem temperature

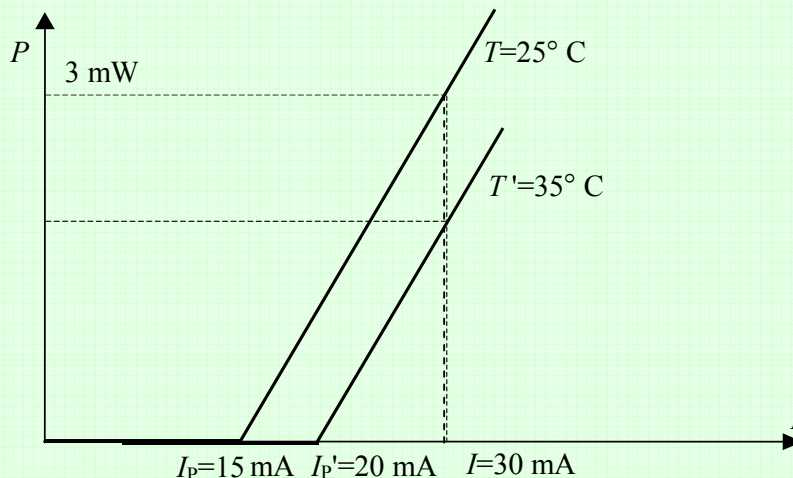
$$I_{\text{prag}}(T + \Delta T) = I_{\text{prag}}(T) \cdot e^{\frac{\Delta T}{T_0}} \quad (6)$$

kjer je  $\Delta T$  sprememba temperature,  $T_0$  pa je specifična karakteristična temperatura substrata. Manjša kot je  $T_0$ , bolj občutljiv je laser na spremembe. Na primer pri GaAlAs znaša 120 K – 230 K, pri InGaAsP pa znaša 60 K – 80 K.

Za običajne polprevodnike je nevarna povišana temperatura. Pri znižanju temperature pri istem toku laser odda večjo optično moč in lahko pride do zažiga zrcal in s tem uničenja laserja. Za polprevodniške laserje je torej nevarnejša nižja temperatura.

**Primer:**

Polprevodniški laser ima pri  $T=25^{\circ}\text{C}$  pragovni tok  $I_p=15\text{ mA}$ , ki se pri  $T'=35^{\circ}\text{C}$  poveča na  $I_p'=20\text{ mA}$ . Laser sicer krmilimo s konstantnim tokom  $I=30\text{ mA}$ . Kolikšno moč  $P'$  pričakujemo iz laserja pri  $T'=35^{\circ}\text{C}$ , če daje laser moč  $P=3\text{ mW}$  pri  $T=25^{\circ}\text{C}$ ?



$$\left. \begin{aligned} P &= \alpha(I - I_p); I \geq I_p \\ P' &= \alpha(I - I_p'); I \geq I_p' \end{aligned} \right\} \frac{P'}{P} = \frac{I - I_p'}{I - I_p}$$

$$P' = P \frac{I - I_p'}{I - I_p} = 3\text{ mW} \cdot \frac{30\text{ mA} - 20\text{ mA}}{30\text{ mA} - 15\text{ mA}} = \underline{\underline{2\text{ mW}}}$$

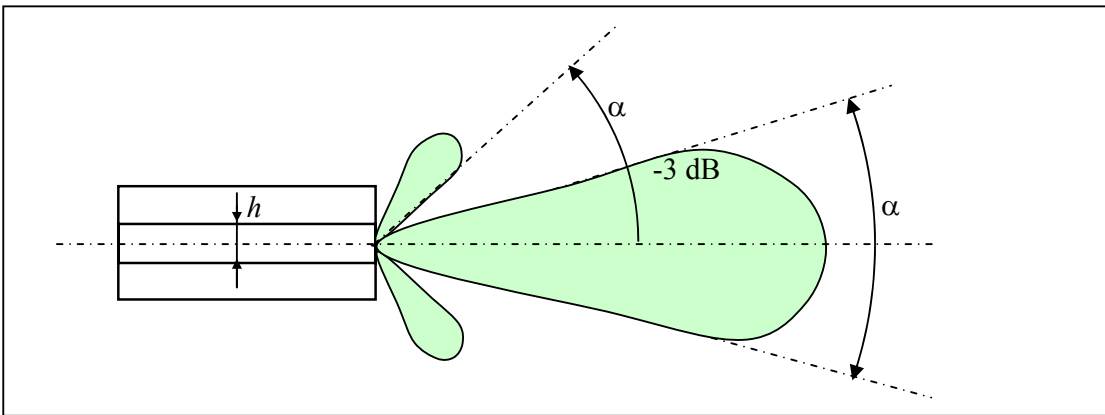
Temperaturna sprememba ima vpliv tudi na izhodni spekter. S povečanjem temperature se podaljša dolžina resonatorja in poveča lomni količnik, zaradi česar se spekter premakne proti višlim valovnim dolžinam. Temperaturni koeficient spremembe  $\Delta\lambda/\Delta T$  pri GaAlAs znaša  $0,12\text{ nm/K}$ , pri InGaAsP pa znaša  $0,08\text{ nm/K}$ .

Ker se s spremembo temperature spreminja položaj in oblika ojačenja ima FP laser pri višji temperaturi manjše število rodov.





Slika 29: \_\_\_\_\_.



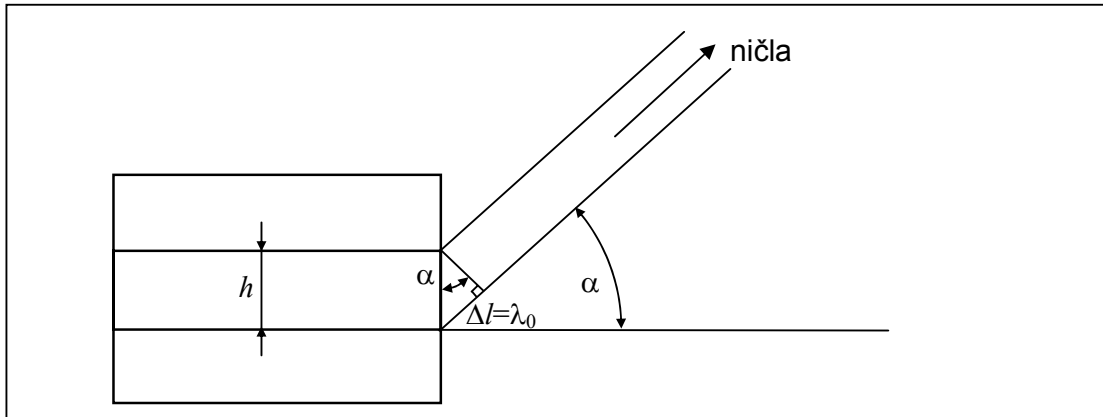
Slika 30: Smerni diagram sevanja laserja.

Smerni diagram je posledica ukrivljanja valovnih front na izhodu iz valovoda. Do ukrivljenosti pride zaradi različnih poti od konca valovoda. Ničla v smernem diagramu se pojavi, ko je razlika poti enaka  $\lambda_0$ , kot prikazuje slika 30.

$$\lambda_0 = h \cdot \sin \alpha. \quad (7)$$

Kot, pri katerem se nahaja ničla, je določen z

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda_0}{h} \approx \frac{\lambda_0}{h} \ll 1. \quad (8)$$



Slika 31: Določitev ničle v smernem diagramu.

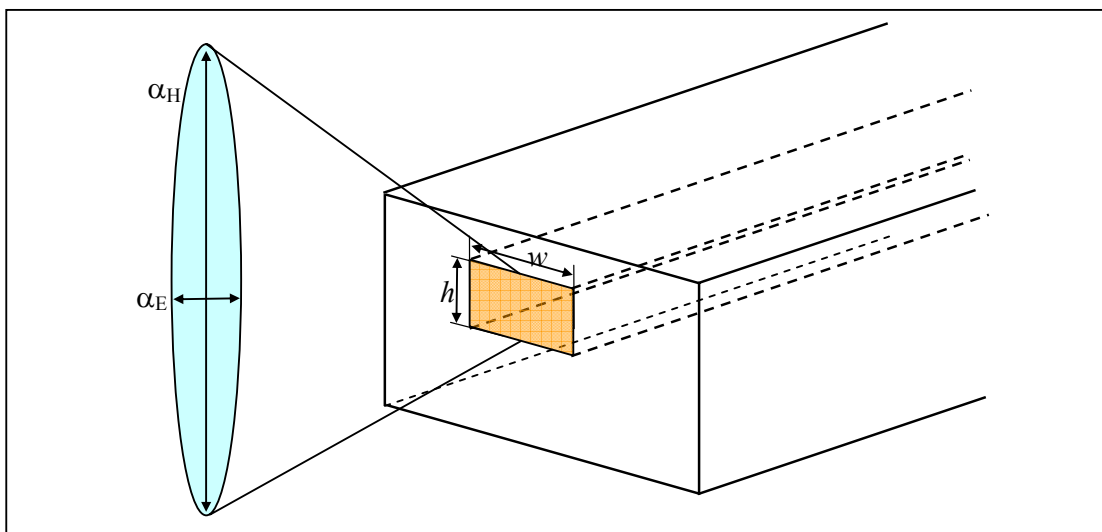
Ker ima valovod v laserskem čipu različno širino in višino, se ničla razlikuje od orientacije čipa. Laserski žarek ne proizvaja okroglega žarka, temveč žarek v obliki eliksoida, kot prikazuje slika 26.

**Primer:**

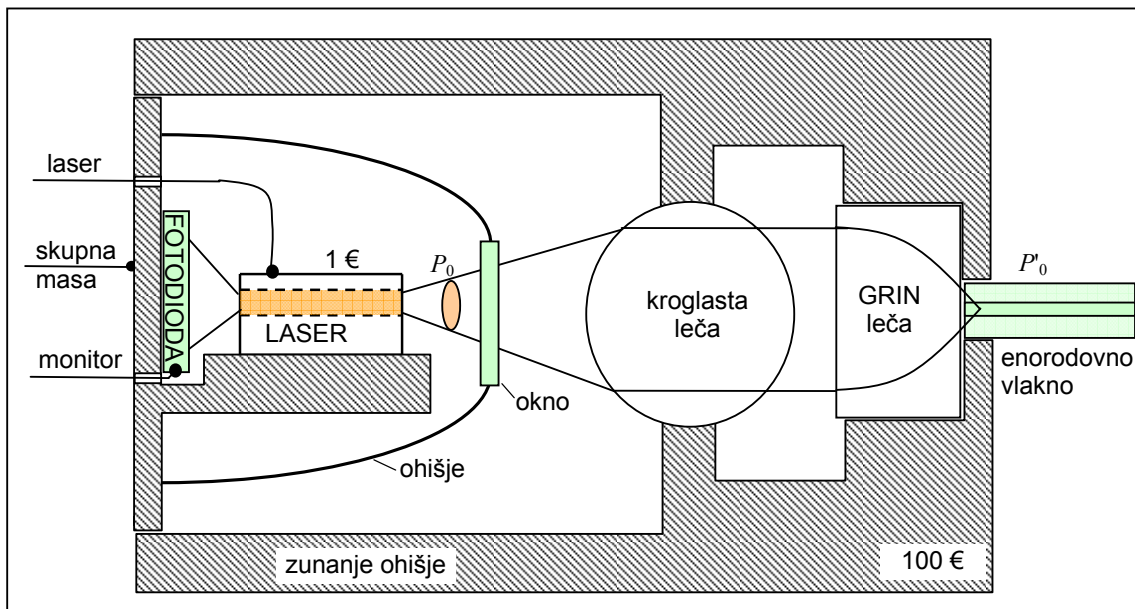
Izračunaj kot za obe polarizaciji, pri katerem nastane v sevalnem diagramu polprevodniškega laserja ničla, če ima valovod širino  $w=5 \mu\text{m}$  in višino  $h=1,5 \mu\text{m}$  in iz laserja izhaja svetloba z valovno dolžino  $\lambda=850 \text{ nm}$ .

$$\alpha_E \approx \frac{\lambda_0}{w} = \frac{0,85 \mu\text{m}}{5 \mu\text{m}} = 0,17 \text{ rd} = \underline{\underline{9^\circ}}$$

$$\alpha_H \approx \frac{\lambda_0}{h} = \frac{0,85 \mu\text{m}}{1,5 \mu\text{m}} = \underline{\underline{32^\circ}}$$



Slika 32: Oblika izhodnega žarka.



Slika 33: Prerez ohišja laserja.

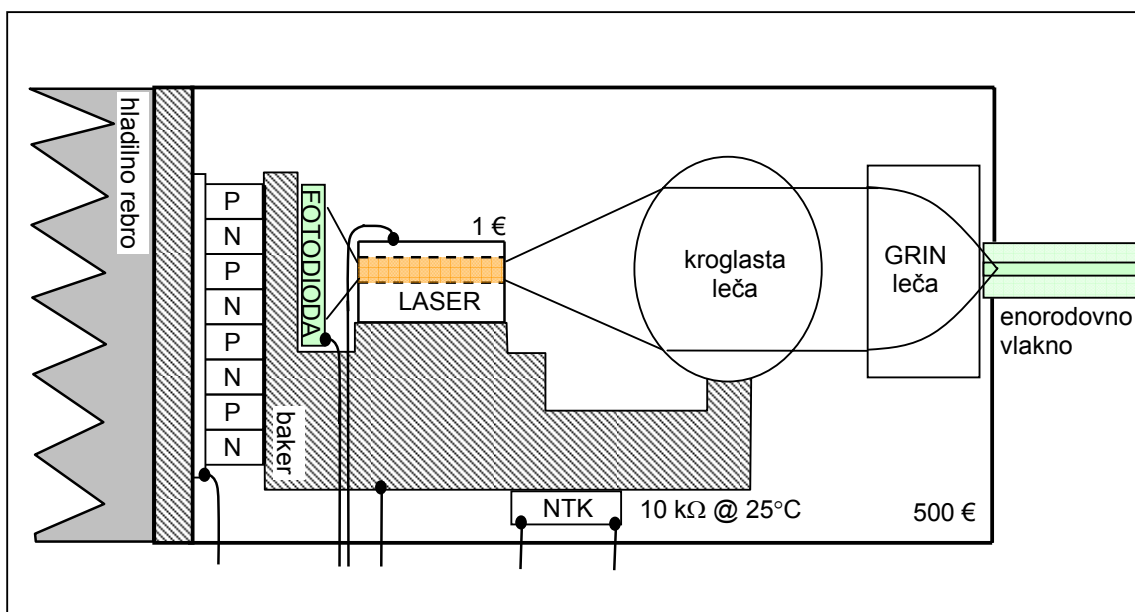
Pri sklopu svetlobe si pomagamo s kroglasto in GRIN lečo, ki je leča z gradientnim lomnim likom. Pri tovrstnem laserju imamo približno 50 % sklop svetlobe iz laserja na enorodovno vlakno.

$$\eta_{\text{sklopa}} = \frac{P'_0}{P_0} = 50 \% \quad (30 \% \dots 70 \%) \quad (9)$$

V vlakno na ta način sklopimo optično moč  $P'_0$ , ki znaša od 1 do 100 mW.

Spektralna širina tovrstnega laserja znaša  $\Delta\lambda=1\dots 20$  nm

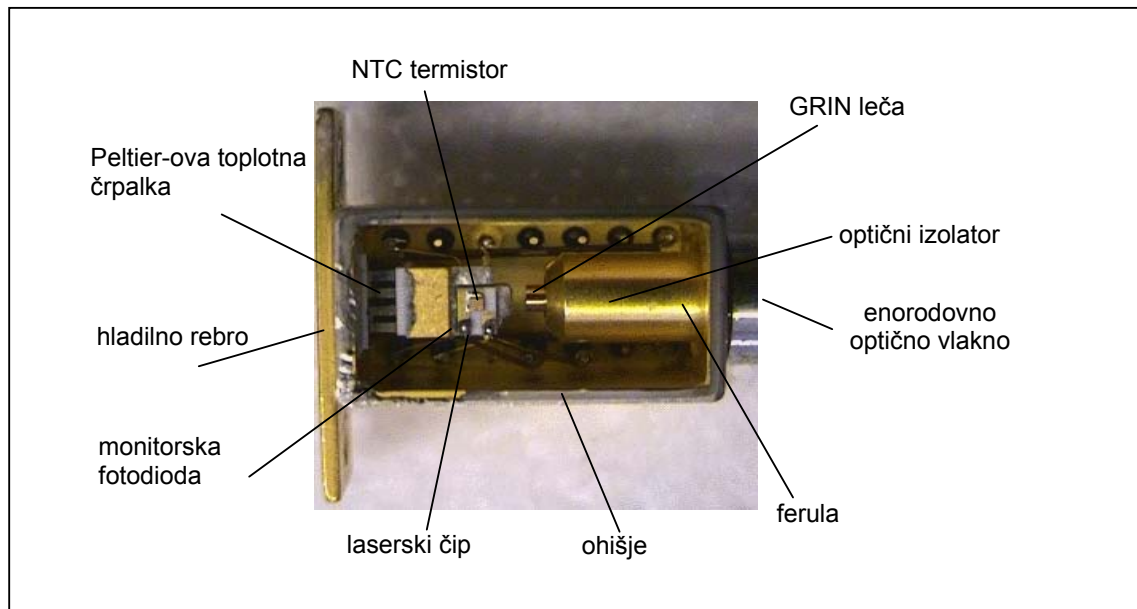
Odziv laserja je  $\tau \approx 300$  ps.



Slika 34: Prerez ohišja laserja.

Baterija termočlenov je sestavljena iz kockic močno dopiranih polprevodnikov, ki služijo za odvajanje toplote, ki nastaja v laserskem čipu. NTK upor nam omogoča stabilizacijo temperature laserskega čipa na  $T_0 \pm 0,01^\circ \text{C}$ .

Cena laserskega čipa je približno 1 evro, kar je 500-krat manj kot cena celotnega laserja. Večino denarja se namreč porabi za izdelavo ohišja in montažo laserja.

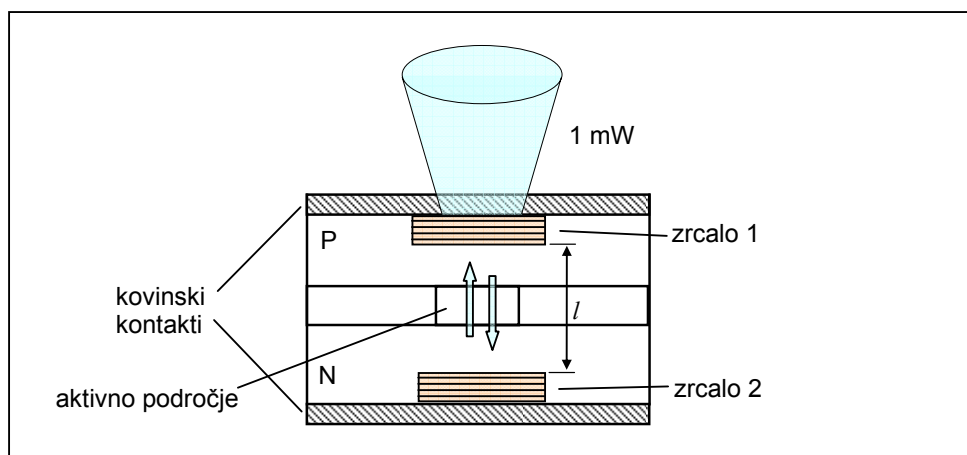


Slika 35: Fotografija prereza ohišja laserja.

## VCSEL

Vertical Cavity Surface Emitting LASER

Polprevodniški laser z vertikalno resonančno votlino daje na izhodu žarek okrogle oblike, kar omogoča enostaven direkten spoj na optično vlakno, brez vsakršnih leč.



Slika 36: Prerez VCSEL.

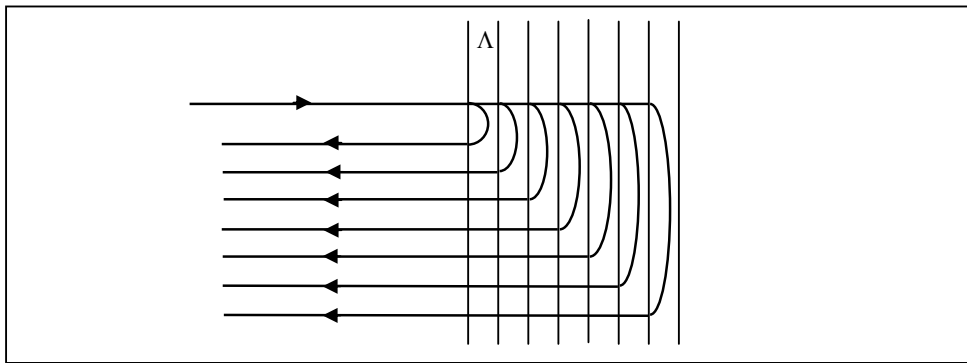
### Laser s porazdeljenim sklopom

V zahtevnejših optičnih povezavah prevladujejo laserji, katere odlikuje zelo ozek spekter, saj so optične zveze, ki so izdelane s takimi laserji, precej manj občutljive na disperzijo.

Z namenom izboljšanja spektra svetlobe, ki izhaja iz laserja, je potrebno vgraditi dodatne mehanizme spektralne selektivnosti. Najbolj ugodno bi bilo, če bi bila širina spektralne črte čim manjša, razdalja med črtami pa večja od širine ojačenja snovi, tako da bi se znotraj ojačenja pojavila samo ena spektralna črta.

Rešitev za povečano spektralno selektivnost je povratni sklop, ki je porazdeljen po dolžini aktivnega elementa. Če tak sklop uresničimo na primerni dolžini resonatorja, odpade potreba po diskretnem zrcalnem odboju na obeh koncih aktivne snovi.

Porazdeljen povratni sklop in s tem dodatno selektivnost uresničimo s periodično strukturo. Periodična struktura, ki je izdelana iz večjega števila snovi z različnimi lomnimi količniki, vnese dodatno selektivnost. Od vsake plasti se valovanje delno odbije, kot prikazuje slika 36. Odboj od enega preskoka je v praksi zelo majhen in znaša samo  $|\Gamma| \approx 10^{-3}$ . Pri Braggovi valovni dolžini se nam valovi nazaj seštejejo. Periodična struktura torej deluje kot frekvenčno odvisno zrcalo.

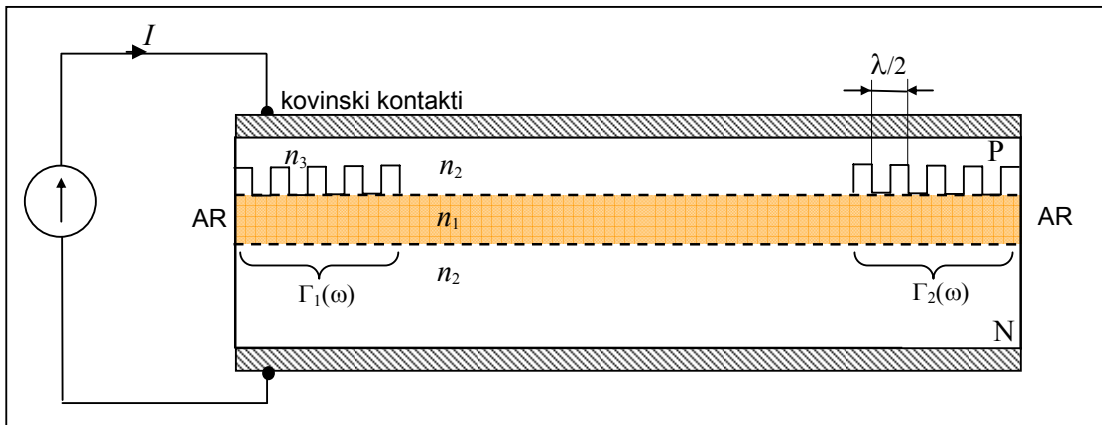


Slika 37: Braggovo zrcalo.

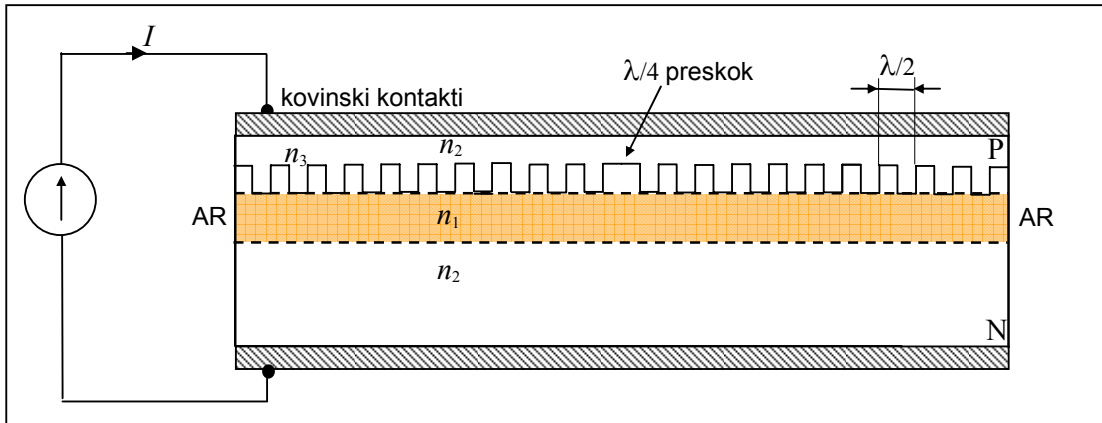
Za implementacijo zrcala v obliki periodične strukture obstajata dve možnosti. Glede na izvedbo tako dobimo DBR ali DFB laser.

Pri DBR (Distributed Bragg reflector) laserju imamo porazdeljeno Braggovo zrcalo, kot prikazuje slika 36. Porazdeljeno Braggovo zrcalo je periodična motnja, kjer se signal delno odbije. Zrcalo je frekvenčno odvisno in selektivno.

Pri DFB (distributed-feedback) laserju imamo v celotni strukturi porazdeljeno povratno vezavo, kot prikazuje slika 37. Na sredini imamo preskok za  $\lambda/4$ , zato da se odboji iz obeh strani seštejejo v fazi. Če preskoka ne bi bilo, bi laser nihal na dveh rodovih.



Slika 38: Prerez DBR laserja.



Slika 39: Prerez DFB laserja.

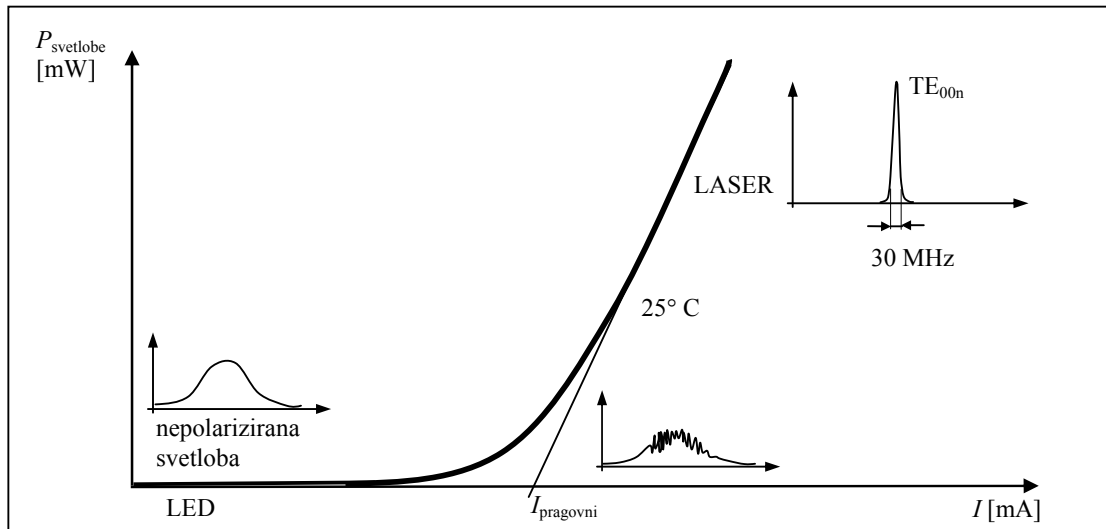
Antirefleksni (AR) sloj na koncu laserja je nujno potreben, ker bi v nasprotnem primeru končni odboj motil delovanje periodične strukture.

Perioda zobčkov je  $\lambda/2$ , kar pomeni, da je vsak zobček velik  $\lambda/4$  in vsak utorček  $\lambda/4$ .

**Primer:**

Kakšna je dimenzija zobčka oziroma utorčka pri laserju za 1550 nm?

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4 \cdot n} = \frac{1550 \text{ nm}}{4 \cdot 3,7} \approx \underline{100 \text{ nm}}$$



Slika 40: Frekvenčni spekter laserja s periodično strukturo v odvisnosti od toka.

Širina spektralne črte pri laserjih z vgrajeno periodično strukturo je približno 30 MHz, kar je za  $10^4$ -krat boljše kot pri FP laserju. Primerjalno tabelo med kvalitetami različnih virov prikazuje tabela na sliki 40.  $f_0 \cdot 10^{-7}$  širina spektra ni nikakršen omejujoč dejavnik v optičnih komunikacijah, zato ožje črte, kot jo imajo laserji z vgrajeno periodično strukturo, ne potrebujemo.



širina spektralne črte	oscilator
$f_0 \cdot 10^{-3}$	FP laser
$f_0 \cdot 10^{-4}$	električni RC oscilator
$f_0 \cdot 10^{-7}$	laser z vgrajeno periodično strukturo
$f_0 \cdot 10^{-9}$	električni oscilator s keramičnim kristalom
$f_0 \cdot 10^{-14}$	atomska ura

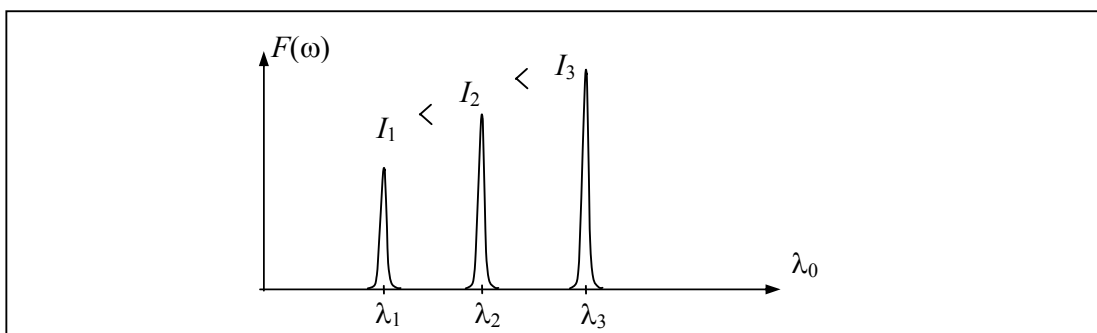
Slika 41: frekvenčni spekter laserja s periodično strukturo v odvisnosti od toka.

### 1. Nevšečnost laserjev z vgrajeno periodično strukturo

Zaradi povečanega toka je večje število prostih nosilcev – elektronov in s tem lomni količnik polprevodnika. Zaradi povečanega lomnega količnika se poveča izhodna valovna dolžina

$$\lambda_0 = \lambda \cdot n(I). \quad (9)$$

Pri modulaciji s tokom pride torej tudi do frekvenčne modulacije in s tem do umetne razširitve spektra. Ta nevšečnost se sicer dogaja tudi pri FP laserju, vendar zaradi širšega spektra tega ne opazimo. Če se želimo izogniti frekvenčni modulaciji, je potrebno uporabiti zunanjo modulacijo, ki jo izvedemo s pomočjo zunanjega optičnega modulatorja.

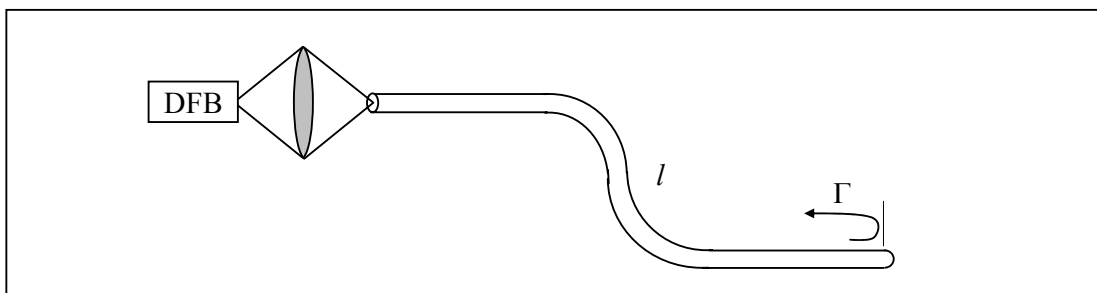


Slika 42: Frekvenčni spekter laserja s periodično strukturo v odvisnosti od toka.

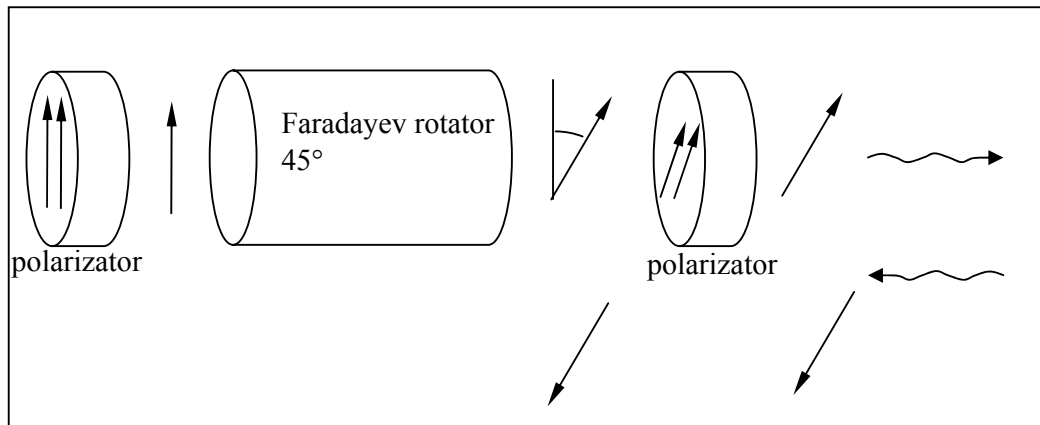
Ta pojav lahko uporabimo za električno ugaševanje valovne dolžine, pri čemer je svoboda spreminjanja valovne dolžine približno  $\Delta\lambda \approx 0,5$  nm.

### 2. Nevšečnost laserjev z vgrajeno periodično strukturo

Vsak odboj od zunaj nazaj v laser z vgrajeno periodično strukturo pokvari spekter laserja. Če se želimo izogniti povratnim odbojem, je potrebno uporabiti optični izolator.



Slika 43: Priključitev laserja na optično vlakno brez izolatorja.



Slika 44: Magnetno optični izolator.

**Primer:**

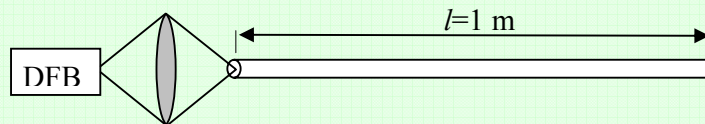
Polprevodniški DFB laser s širino spektra 30 MHz je sklopljen z lečami na izhodno svetlobno vlakno brez optičnega izolatorja. Koliko naj bo dolžina vlakna, da odboj ne bo motil delovanja laserja?

Dolžina mora biti večja od vzdolžne koherenčne dolžine  $d$

$$d = \frac{c_0}{\Delta f} = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ m/s}}{30 \text{ MHz}} \approx \underline{\underline{10 \text{ m}}}$$

**Primer:**

Polprevodniški DFB laser za nazivno valovno dolžino  $\lambda=1550 \text{ nm}$  je sklopljen z lečami na izhodno svetlobno vlakno brez optičnega izolatorja. Določite razdaljo med sosednjima rodovoma  $\Delta\lambda$ , med katerima preskakuje laser zaradi delnega odboja svetlobe na konektorskem spoju vlaken na razdalji  $l=1 \text{ m}$  od laserja! ( $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $n_{\text{jedra}}=1,46$ )



$$\Delta f = \frac{c_0}{2ln} = \underline{\underline{102,7 \text{ MHz}}}$$

$$\Delta\lambda = \Delta f \cdot \frac{\lambda_0^2}{c_0} = \underline{\underline{8,23 \cdot 10^{-13} \text{ m} = 0,823 \text{ pm}}}$$

### 3. Nevšečnost laserjev z vgrajeno periodično strukturo

Zaradi zgradbe in uporabljenih materialov pri tovrstnih laserjih je izhodna valovna dolžina odvisna od temperature laserskega čipa, saj se s spremembo temperature spremeni lomni količnik polprevodnika v laserju. Temperaturna sprememba valovne dolžine pri DFB laserju je manjša od temperaturnega

koeficienta FP laserja in znaša tipično  $0,08 \text{ nm}/^\circ \text{C}$ , lahko pa je v mejah od  $0,02 \text{ nm}/^\circ \text{C}$  do  $0,1 \text{ nm}/^\circ \text{C}$ . Zato je pri tovrstnih laserjih nujna uporaba dragega pakiranja v 14-pinsko »butterfly« ohišje s termoelektričnim Peltierovim hladilnikom, ki prepreči drsenje valovne dolžine.

**Primer:**

Izračunaj premik valovne dolžine pri DFB laserju s temperaturnim koeficientom  $0,1 \text{ nm}/^\circ \text{C}$ , če je temperatura poleti  $35^\circ \text{C}$  in pozimi  $-20^\circ \text{C}$ .

$$\Delta T = 35^\circ \text{C} - (-20^\circ \text{C}) = 55^\circ \text{C}$$

$$\Delta \lambda = 55^\circ \text{C} \cdot 0,1 \text{ nm}/^\circ \text{C} = 5,5 \text{ nm}$$

Ta pojav lahko uporabimo za temperaturno uglaševanje valovne dolžine, pri čemer je svoboda spreminjanja valovne dolžine približno  $\Delta \lambda \approx 5 \text{ nm}$ .