

# Vrste lasera i njihova primjena

---

**Wollitz, Mauro**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:868758>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
ODJEL ZA ELEKTROTEHNIKU I RAČUNARSTVO

MAURO WOLLITZ  
VRSTE LASERA I NJIHOVA PRIMJENA

ZAVRŠNI RAD

Dubrovnik, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
ODJEL ZA ELEKTROTEHNIKU I RAČUNARSTVO

VRSTE LASERA I NJIHOVA PRIMJENA  
ZAVRŠNI RAD

Studij: Elektrotehničke i komunikacijske tehnologije u pomorstvu

Kolegij: Optički komunikacijski sustavi

Mentor: doc. dr. sc. Anamaria Bjelopera

Student: Mauro Wollitz

Dubrovnik, rujan 2022.

## SAŽETAK

Laser je elektronički uređaj koji u optičkim komunikacijskim sustavima predstavlja izvor svjetlosti. Pomoću njega električni signal se pretvara u svjetlost, tj. u njemu nastaje usmjereni snop svjetlosti koji se nadalje putem optičkog vlakna prenosi do detektora svjetlosti koji prima svjetlosne impulse te ih pretvara nazad u električne signale.

U ovom radu biti će opisano i objašnjeno kako u laseru nastaje snop svjetlosti, njegovi dijelovi, te koje vrste lasera postoje i u kojim se poljima znanosti koriste, ali prije navedenih tema trebamo prvo objasniti osobine svjetlosti kako bi razumjeli pozadinu rada lasera.

**Ključne riječi:** detektor svjetlosti, laser, optičko vlakno, svjetlosni impulsi

## SUMMARY

Laser is an electronic device that represents a light source in optical communication systems. With it we convert electric signals to light, i.e. a light beam is formed within it which is then transmitted through an optical fiber to a light detector which receives the light pulses and then reverts them back to electrical signals.

This thesis will describe and explain how a light beam is formed in a laser, its parts and what types of lasers are there and in which scientific fields are they used, but before said topics we have to explain the properties of light so we could understand the working background of a laser.

**Key words:** laser, light detector, light pulses, optical fiber

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OSOBINE SVJETLOSTI</b> .....	2
2.1. APSORPCIJA .....	4
2.2. SPONTANA EMISIJA .....	5
2.3. STIMULIRANA EMISIJA .....	5
2.4. INVERZIJA NASELJENOSTI.....	6
2.5. METASTABILNO STANJE.....	7
<b>3. PRINCIP RADA LASERA</b> .....	8
3.1. DIJELOVI LASERA.....	8
3.2. PRINCIP NASTANKA LASERSKE ZRAKE .....	9
<b>4. VRSTE LASERA</b> .....	12
4.1. PODJELA LASERA PREMA NAČINU RADA.....	12
4.2. PLINSKI LASERI.....	13
4.2.1. CO <sub>2</sub> laser.....	13
4.2.2. He-Ne laser.....	14
4.3. LASERI ČVRSTOG STANJA.....	15
4.3.1. RUBINSKI LASER.....	15
4.3.2. Nd:YAG laser.....	15
4.4. TEKUĆI LASERI .....	16
4.5. POLUVODIČKI LASERI.....	16
<b>5. LASERI U SVAKODNEVNOM ŽIVOTU</b> .....	18
5.1. LASERI U TELEKOMUNIKACIJAMA .....	18
5.1.1. VCSEL LASER.....	18
5.1.2. FP LASER.....	19
5.1.3. DFB LASER.....	19
5.2. PRIMJENA LASERA U MEDICINI.....	20
5.3. LASERI U INDUSTRIJI.....	20
5.4. OPĆENITA PRIMJENA LASERA .....	20
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	23
<b>LITERATURA</b> .....	24
<b>POPIS SLIKA</b> .....	25

## 1. UVOD

Početak 20-og stoljeća, točnije 1917., Albert Einstein predstavlja glavni koncept rada lasera na temelju stimulirane emisije, gdje foton (kvant elektromagnetskog zračenja) koji djeluje s pobuđenom molekulom ili atomom pri sudaru stvara emisiju, tj. novi foton koji je istog smjera širenja, frekvencije, faze i polarizacije.

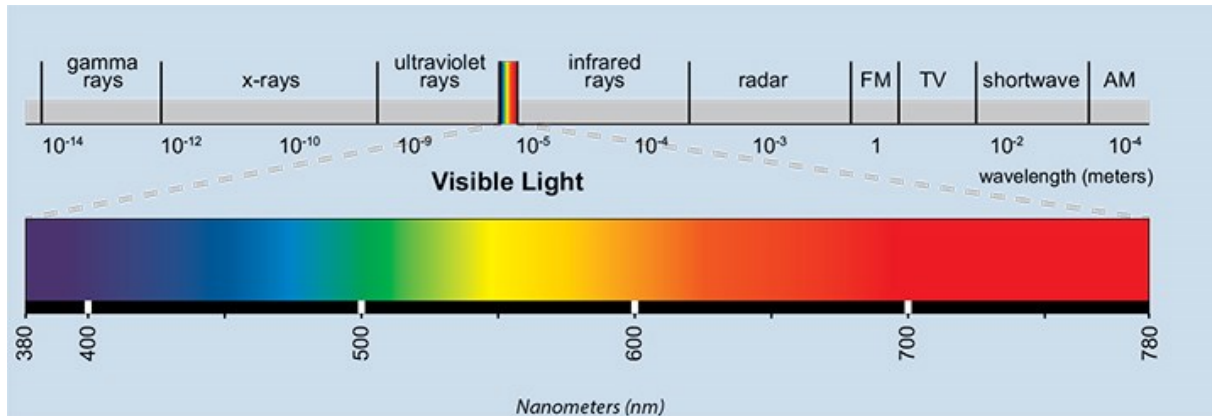
1950-ih kao preteča lasera izumljen je MASER (engl. *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), koji je na bazi amonijaka imao plinoviti sustav s dva energetska stanja s kojim su mogli konstantno održavati oscilacije i inverziju populacije (koja će biti opisana kasnije u radu). Skraćenica LASER pak dolazi od naziva *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Tek je 1960. demonstriran prvi funkcionirajući laser, na bazi kristala rubina. Ovaj laser je bio jako lagan za napraviti i bio je korišten u mnogim eksperimentima. Jedan od zanimljivijih eksperimenata dogodio se 1969., gdje je snop svjetlosti poslan na Mjesec, potom reflektiran nazad od retroreflektora, tj. katadioptera, kojeg su postavili američki astronauti tijekom misije Apollo. Povratno putovanje te zrake dalo je mjeru udaljenosti od Zemlje do Mjeseca [1].



Slika 1. Eksperiment slanja zrake na mjesec prikazan u seriji Teorija velikog praska

## 2. OSOBINE SVJETLOSTI

Svjetlost je vidljivo elektromagnetsko zračenje koje ljudsko oko može promatrati, a to je svjetlost rasponu od 380 do 780 nm (slika 2.).



Slika 2. Raspon vidljive svjetlosti

Postoje dvije teorije koje su vezane za svjetlost. Prva je Korpuskularna teorija koja opisuje svjetlost kao snop čestica koje se šire po istom pravcu ili po više pravaca istovremeno, jedna iza druge, te također objašnjava pojavu širenja, refleksiju i lom zrake svjetlosti. Druga teorija je tzv. Valna teorija svjetlosti, koja prikazuje svjetlost kao elektromagnetski val te opisuje pojave difrakcije, interferencije i polarizacije.

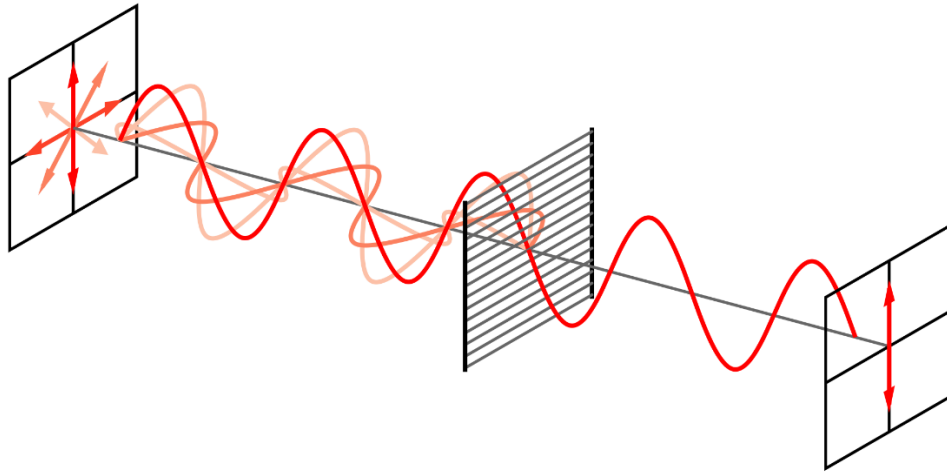
Da bi razumjeli rad lasera važne su sljedeće osobine svjetlosti:

### 1. POLIKROMATSKA – MONOKROMATSKA:

- Ako se svjetlost sastoji od više valnih duljina ona je tada polikromatska.
- Ako se svjetlost sastoji od samo jedne valne duljine, kao što je u većini lasera, takva svjetlost je onda monokromatska.

### 2. NEPOLARIZIRANA – POLARIZIRANA:

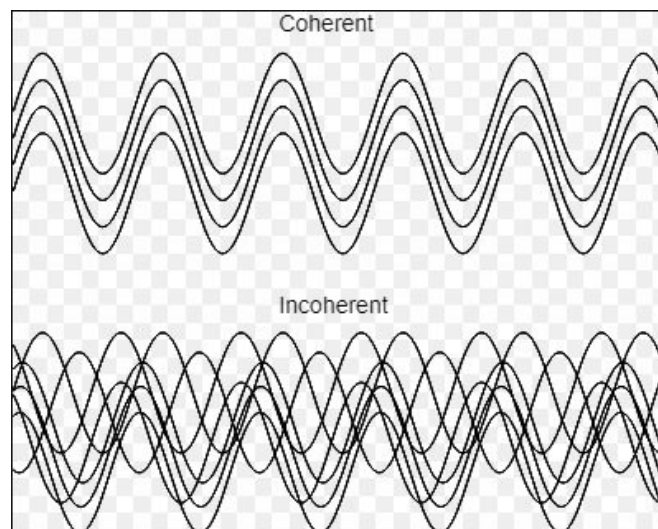
- Ako električno polje **E** i magnetsko polje **B** mogu titrati u svim ravninama koje sadrže pravac širenja svjetlosti, svjetlost je tada nepolarizirana.
- Ako električno polje titra u samo jednoj ravnini (a magnetsko, naravno, u onoj koja je na nju okomita), onda je svjetlost polarizirana.



Slika 3. Polarizacija svjetlosti

### 3. KOHERENTOST – NEKOHERENTNOST

- Ako dvije zrake svjetlosti ili više njih imaju iste valne duljine i faze onda su one koherentne, a ako nisu u fazi onda su nekoherentne (slika 4.).



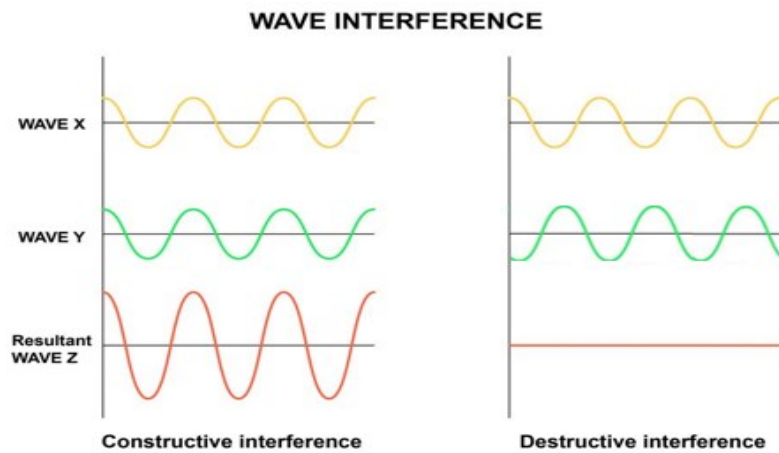
Slika 4. Prikaz koherentne i nekoherentne zrake

### 4. INTERFERENCIJA

- Interferencija je mjesto susreta dva vala u jednoj prostornoj točki. Izvan područja susreta širenje svakog vala nastavlja se neometano (kao da valovi prolaze neometano jedan kroz drugog).
- Ako se susretnu maksimum jednog i minimum drugog vala i ako su im amplitude jednake, zbrajanjem se valovi poništavaju. To se zove destruktivna interferencija.



- Ako se susretnu dva maksimuma tada se ti valovi zbrajaju u točki susreta te se djelovanje valova pojačava. To nazivamo konstruktivna interferencija.



Slika 5. Interferencija valova

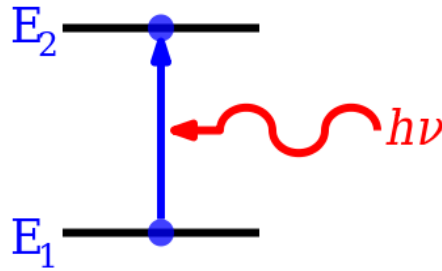
## 2.1. APSORPCIJA

Apsorpcija je proces u kojem tvar upija energiju elektromagnetskog zračenja, u ovom slučaju foton te on predaje energiju elektronu koji pomoću te energije prelazi iz osnovnog stanja (energija  $E_1$ ) u pobuđeno stanje (energija  $E_2$ ). U prirodi apsorpcija je češća od emisije. Svaki foton ima energiju jednaku:

$$E = h\nu \quad (1)$$

gdje je  $h$  Planckova konstanta koja iznosi  $6.626 \times 10^{-34}$  Js, a  $\nu$  je frekvencija zračenja fotona. Jednadžba za energiju zračenja ne vrijedi samo za svjetlosne frekvencije, već za svako elektromagnetsko zračenje. Pobuđeni elektron se nakon nekog vremena vrati u prvobitno stanje te emitira svjetlost. Kako bi se to dogodilo upadni foton mora imati energiju:

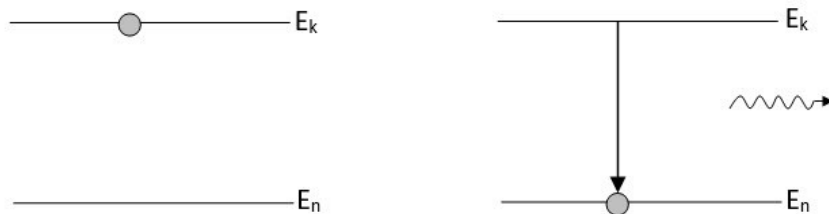
$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad (2)$$



Slika 6. Proces apsorpcije

## 2.2. SPONTANA EMISIJA

Proces spontane emisije događa se kada se već pobuđeni elektron vraća iz razine veće energije u nižu razinu, relaksira se, a razlika energija pobuđenog ( $E_2$ ) i osnovnog ( $E_1$ ) stanja se izrači u prostor kao elektromagnetski val energije:  $\Delta E = E_2 - E_1$ . To zračenje je nekoherentno. Spontana emisija (slika 7.) se neprestano odvija u prirodnim izvorima svjetlosti kao što je Sunce.



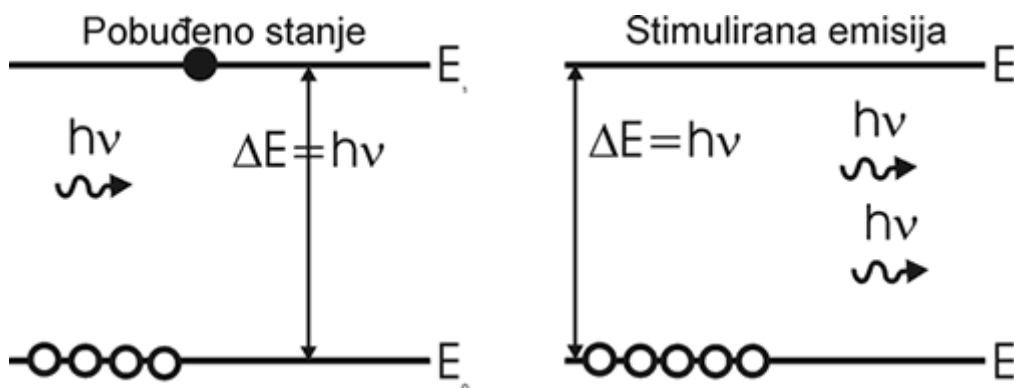
Slika 7. Proces spontane emisije

## 2.3. STIMULIRANA EMISIJA

Stimulirana emisija je reverzan proces u odnosu na apsorpciju. Ona se događa kada na elektron koji se već nalazi u pobuđenom stanju i u kratkom vremenu prije relaksacije naiđe foton koji ima energiju jednaku razlici energija pobuđenog ( $E_2$ ) i osnovnog ( $E_1$ ) stanja:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (3)$$

Tada je moguć prijelaz elektrona iz pobuđenog u osnovno stanje te će se dogoditi emisija još jednog fotona jednakog upadnom fotonu. Dva fotona znači veća amplituda zračenja, tj. izlazna svjetlost je veća. U prirodi je ovaj proces gotovo zanemariv.

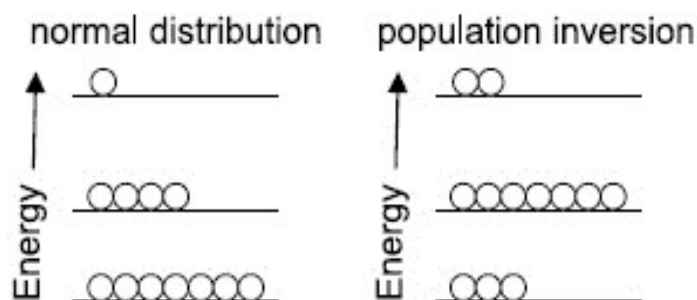


Slika 8. Proces stimulirane emisije

Susret fotona i već pobuđenog elektrona možemo smatrati konstruktivnom interferencijom dva vala (znači ista amplituda, faza, frekvencija, polarizacija) pri čemu se amplituda vala udvostručila (slika 8.).

#### 2.4. INVERZIJA NASELJENOSTI

Elektroni se u atomima razmještaju tako da uvijek redom popunjavaju energetske razine od najniže prema najvišoj energetskej razini. Elektron se neće nalaziti na višoj energetskej razini ako je niža energetska razina prazna. To nazivamo normalnom naseljenošću. Ako se, zbog privedene energije, dogodi da elektron prijeđe na višu energetske razinu, tamo se neće zadržati dulje od  $10^{-8}$  s. Stanje u kojem bi elektroni popunjavali više energetske razine iako u nižim razinama ima slobodnog mjesta zove se inverzija naseljenosti (slika 9.).

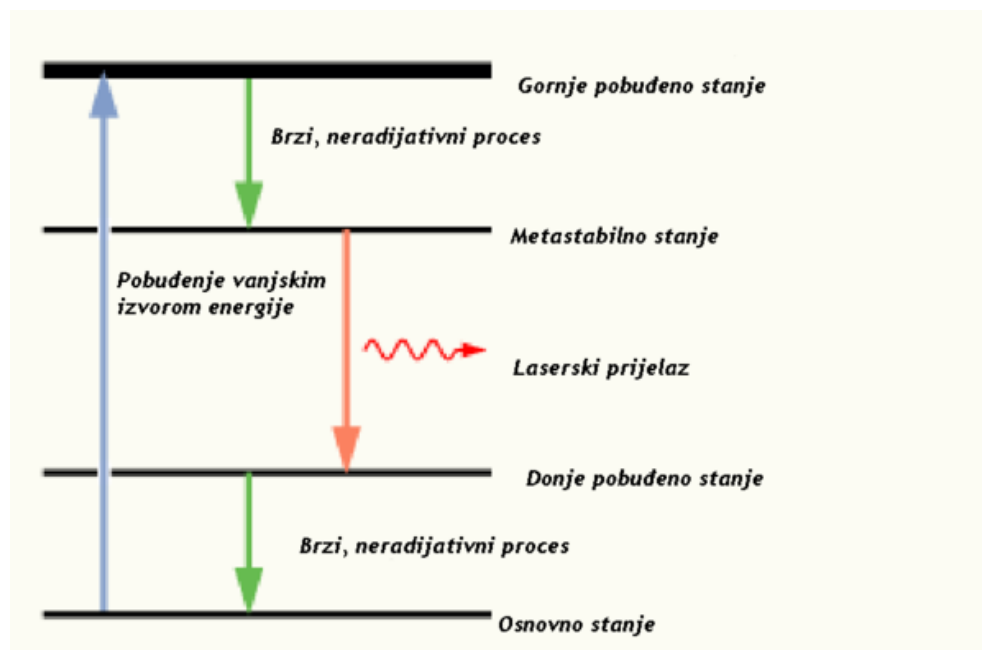


Slika 9. Inverzija populacije

Ako postoji inverzija naseljenosti, vjerojatnost da upadni foton nađe na pobuđeni elektron je velika, pa tako i mogućnost događanja stimulirane emisije. Inverzija naseljenosti je preduvjet za stimuliranu emisiju.

## 2.5. METASTABILNO STANJE

Metastabilno stanje je energetska razina koja nije osnovna razina za neki elektron, ali se na toj razini elektron može prije vraćanja u osnovno stanje, tj. prije relaksacije, zadržati puno duže nego u višoj nestabilnoj razini (slika 10.). To vrijeme iznosi oko  $10^{-3}$  s.



Slika 10. Metastabilno stanje

Inverzija naseljenosti i stimulirana emisija se mogu ostvariti u posebnim materijalima koji imaju metastabilna stanja.

U laseru postoji izvor energije koja se stalno predaje elektronima, pa oni prelaze na više nestabilne razine (kajih može biti više, a ne samo jedna), odakle se relaksiraju na metastabilnu razinu i zadržavaju neko vrijeme. Ako se zatim dogodi spontana ili stimulirana emisija, metastabilna razina ostaje popunjena jer se stalno novi elektroni prebacuju na nestabilne razine i relaksiraju se na metastabilnu. Zbog ovog izvora energije (laserska pumpa) koja stalno predaje energiju elektronima, između metastabilne i osnovne razine održava se inverzija naseljenosti te se time stvara uvjet za stimuliranu emisiju.

### 3. PRINCIP RADA LASERA

#### 3.1. DIJELOVI LASERA

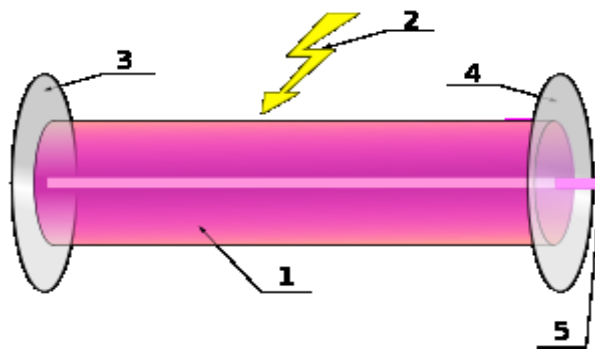
Dijelovi lasera su:

- Laserski medij (optičko pojačalo)
- Optička (energetska) pumpa
- Zrcala (optički rezonator)
- Izlazna laserska zraka

Laserski medij je tvar, tj. materijal čija je struktura takva da postoje metastabilne razine. Laserska zraka se formira u mediju pomoću lavinom stimuliranih emisija.

Optička pumpa je dio lasera koji daje energiju elektronima laserskog medija kako bi prešli u pobuđeno stanje. U pobuđenom stanju elektroni ostaju kratko i relaksiraju se u metastabilno stanje. Tako se stvara inverzija naseljenosti; elektroni se nalaze na višoj energetskej razini (metastabilnoj), a niža razina (osnovno stanje) je slobodna. U raznim vrstama lasera, različite su i optičke pumpe.

Optički rezonator je dio lasera koji se koristi za pojačavanje stimuliranih fotona pomoću oscilacija, tj. fotoni se reflektiraju između dva paralelna zrcala. Prvo zrcalo je kompletno reflektirajuće (100%), a drugo zrcalo je djelomično reflektirajuće (99% ili manje) te ono propušta dio svjetlosti [2].



Slika 11. Dijelovi lasera: 1) Laserski medij, 2) Energija za pobuđivanje medija, 3) 100% reflektirajuće zrcalo, 4) 99% reflektirajuće zrcalo, 5) Laserska zraka

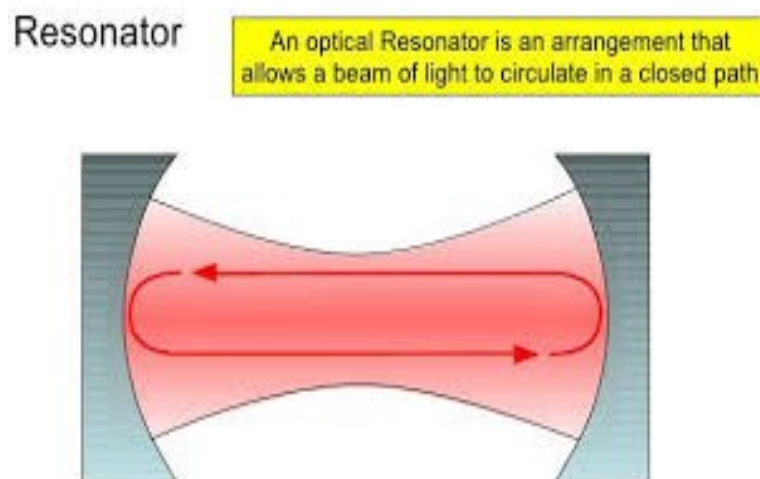
### 3.2. PRINCIP NASTANKA LASERSKE ZRAKE

Optička pumpa daje energiju elektronima za prijelaz u pobuđena stanja, iz kojih se relaksiraju na metastabilnu razinu. Elektroni se s metastabilne razine relaksiraju u osnovno stanje i pri tome zrače fotone koji imaju energiju jednaku razlici energija metastabilnog i osnovnog stanja. Između tako nastalih fotona i elektrona na metastabilnoj razini (koju stalno popunjava optička pumpa) dolazi do interakcije te se događa stimulirana emisija. To je moguće zato jer fotoni koji su nastali relaksacijom imaju upravo energiju jednaku razlici energija metastabilnog i osnovnog stanja elektrona. U stimuliranoj emisiji nastaje novi foton, jednak prvome, a elektron se relaksira u osnovno stanje (nepobuđeno) [2].

Sad dva fotona mogu u novim stimuliranim emisijama s elektronima na metastabilnoj razini proizvesti još dva fotona. Tako od jednog nastaju 2, od 2 nastaju 4, od 4 nastaju 8 itd. Fotoni putuju kroz laserski medij do zrcala, reflektiraju se i vraćaju se u laserski medij i sudjeluju u novim stimuliranim emisijama. Tako nastaje lavina fotona, a sa svakom emisijom pojačava se intenzitet svjetlosti. U ravnotežnom stanju veliki broj fotona se giba između zrcala, tj. titra između zrcala, pa se prostor između njih zove rezonantna šupljina [2].

Ti fotoni čine lasersku zraku. Ukupan konačni broj fotona, tj. snaga svjetlosti, koji nastaju u laserskom mediju i koji se gibaju između zrcala ovisi o geometriji lasera, građi laserskog medija i energetskog pumpi. Frekvencija, točnije valna duljina laserske svjetlosti određena je razlikom energija metastabilnog i osnovnog stanja elektrona:

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (4)$$



Slika 12. Refleksija zrake u optičkom rezonatoru

Treba napomenuti da metastabilnih razina u istom materijalu može biti više od jedne, pa tako i izračenih valnih duljina laserske svjetlosti, ali se konstrukcijom lasera postiže da snaga zračenja za jednu od njih bude puno veća nego za ostale, a neželjene valne duljine mogu se dodatno eliminirati optičkim filterima. Ako se stimulirana emisija promatra kao konstruktivna interferencija dva vala (fotona i elektrona), svi fotoni koji sudjeluju u stimuliranim emisijama i koji stvaraju lasersku zraku zadovoljavaju uvjete konstruktivne interferencije tj. imaju:

- istu valnu duljinu;
- istu polarizaciju;
- isti smjer gibanja;
- isti fazni kut.

Razmak  $L$  između zrcala mora biti takav da sadrži cijeli broj polovina valnih duljina ( $\lambda/2$ ) zračene svjetlosti:

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

gdje je  $n$  cijeli broj;  $n=1,2,3\dots$

Kada se fotoni reflektiraju od zrcalo, to je refleksija vala na čvrstom kraju. Pri tome se mijenja faza vala za  $180^\circ$ . Kad je razmak među zrcalima dobro podešen, foton koji se odbije od jednog pa od drugog zrcala mijenja fazu  $2 \times 180^\circ$  (slika 12.), to znači da su fotoni istog smjera gibanja u fazi, pa mogu sudjelovati u stimuliranim emisijama [2].

Osnovne veličine u laseru su:

- $L$  – duljina aktivnog materijala
- $R_1, R_2$  – reflektivnost zrcala
- $\gamma$  – pojačanje po jedinici duljine
- $I$  – intenzitet elektromagnetskog zračenja.

Minimalno potrebno pojačanje po jedinici duljine  $\gamma$  matematički se može izraziti preko izraza:

$$I e^{2\gamma L} R_1 R_2 \geq I \quad (6)$$

$$e^{2\gamma L} \geq \frac{1}{R_1 R_2} \quad (7)$$

$$\gamma \geq \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (8)$$

Posljednja jednadžba je tzv. laserska jednadžba, te ona predstavlja uvjet postojanja laserskih oscilacija.

Osnovne karakteristike lasera su:

- Prag uzbuđe – ulazna snaga u laser mora imati iznos iznad određenog praga kako bi laser mogao emitirati svjetlost.
- Izlazni spektar – izlazna snaga lasera se proteže preko određenog frekventnog područja. Snaga se ne rasprostire jednoliko preko cijelog frekventnog područja, već ima više maksimuma i minimuma.
- Oblik radijacije – područje kutova unutar kojih laser emitira svjetlost ovisi o veličini područja emisije i modova osciliranja unutar lasera.



## 4. VRSTE LASERA

Laseri se mogu podijeliti u tri skupine:

- Način rada – pulsni i kontinuirani;
- Agregatno stanje – plinski, tekući, laseri čvrstog stanja i poluvodički;
- Način pobude [3].

### 4.1. PODJELA LASERA PREMA NAČINU RADA

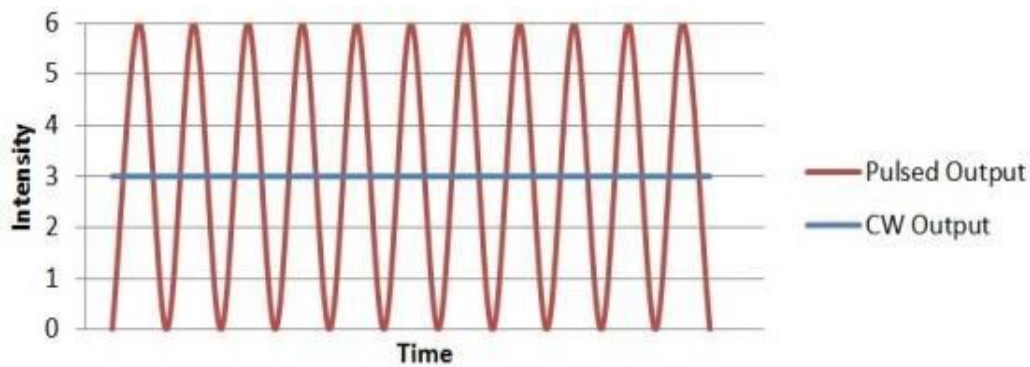
Pulsni laseri su laseri koji emitiraju svjetlost u kratkim impulsima. Oni koriste 100% reflektirajuća zrcala od kojih se jedno zrcalo pomiče u određenom vremenu. Pomakom zrcala propušta se dio laserske zrake [3].



Slika 13. Laserska zraka pulsnog lasera

Pulsevi se mogu proizvesti čak i ako se u rezonator stavi određeno bojilo koje apsorbira zračenje. Apsorpcijom molekule zračenja prelaze u pobuđeno stanje i kada sve dođu u pobuđeno stanje, apsorpcija više nije moguća nego se propušta zračenje. Dok se ne uspostavi inverzija naseljenosti u mediju, fotoni ne mogu proći kroz lasersku zraku. Bojilo mora postati prozirno kako bi se energija iz medija mogla pretvoriti u lasersku zraku, a sve do tog trenutka medij se puni energijom. Takvo nastajanje laserskih pulseva naziva se Q – prekidanje (engl. *Q – switching*). Laser može pulsirati u pulsevima od 1 fs ili 1 as (fs – femtosekunda,  $1\text{ s} = 10^{15}\text{ fs}$ ; as – atosekunda,  $1\text{ s} = 10^{18}\text{ as}$ ). Takvi laseri se mogu pronaći samo u znanstvenim laboratorijima [3].

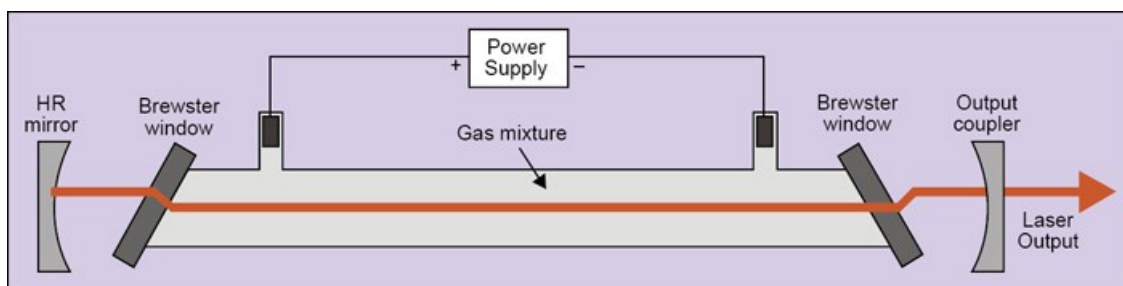
Za razliku od pulsnih lasera, kontinuirani laseri emitiraju konstantnu zraku. Lasersku zraku ovih lasera moguće je proizvesti u različitim materijalima kao što su plin, kristali i razni poluvodički materijali [3].



Slika 14. Prikaz kontinuirane i pulsne zraka

## 4.2. PLINSKI LASERI

To su laseri u kojem se električna struja izbija u medij u kojem se nalazi plin te pomoću nje pobuđuje atome u plinu i proizvodi koherentnu svjetlost. Najčešći plinski laseri su CO<sub>2</sub> laser, He-Ne (helij-neon) laser i argonski laser [3].



Slika 15. Prikaz plinskog lasera

### 4.2.1. CO<sub>2</sub> laser

Ovi laseri proizvode svjetlost malih valnih duljina u infracrvenom spektru. Bazira se na plinskoj smjesi koja sadrži ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>), helij (He), dušik (N<sub>2</sub>) i malog udjela vodika (H<sub>2</sub>) i kisika (O<sub>2</sub>). Iako je pobuda molekula CO<sub>2</sub> na veću energetska razinu moguća, dokazalo se da je najefikasnije koristiti rezonantnu energiju molekula dušika. Molekule dušika su pobuđene električnim izbojem na metastabilnu razinu te one prebacuju energiju pobude na molekule CO<sub>2</sub> tijekom sudaranja. Molekule CO<sub>2</sub> nakon sudara prelaze na veću energetska razinu. Helij služi za depopulaciju nižih energetska razina i odvodi toplinu [5].

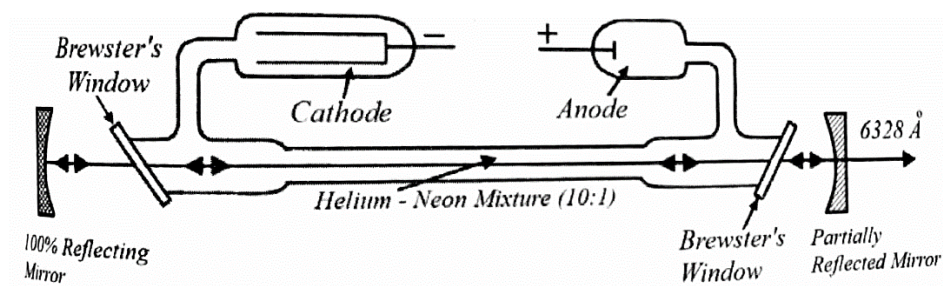
CO<sub>2</sub> laseri stvaraju zraku valne duljine od 10,6 μm, ali uz nju mogu proizvesti zrake između 9 i 11 μm. To se događa zbog različitih vibracijskih stanja molekula CO<sub>2</sub> [5].



Slika 16. Prikaz CO<sub>2</sub> lasera

#### 4.2.2. He-Ne laser

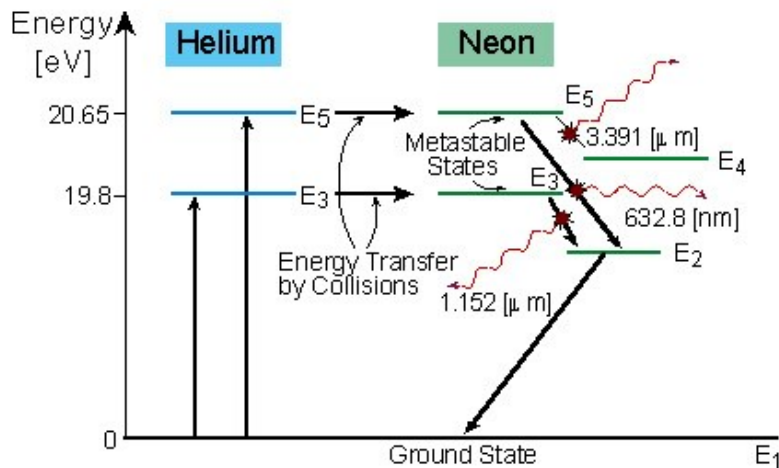
He-Ne laseri su najčešća vrsta kontinuiranih lasera, te je bio prvi demonstrirani plinski laser (1961. godine). Emitiraju crvenu svjetlost valne duljine od 632,8 nm uz snagu od samo nekoliko milivata i imaju jako kvalitetnu lasersku zraku. Laserski medij je staklena cijev dužine od 15 do 50 cm koja se sastoji od plinske smjese u odnosu 80/20 u korist helija [3].



Slika 17. Prikaz He-Ne lasera

Istosmjerna struja srednje gustoće, koja se dovodi na dvije elektrode sa naponom od 1kV (koji može biti veći tijekom paljenja), održava sjaj u cijevi dok traje električno izbijanje. U najjednostavnijim slučajevima postoji balansirani otpornik koji stabilizira struju. Struja je veličine 10 mA, a laser proizvodi snagu od oko 10 W [6].

Uz crvenu svjetlost, ovaj laser može emitirati zelenu (543,5 nm), žutu (594 nm) i narančastu (612 nm) svjetlost [6].



Slika 18. Energetske razine He-Ne lasera

### 4.3. LASERI ČVRSTOG STANJA

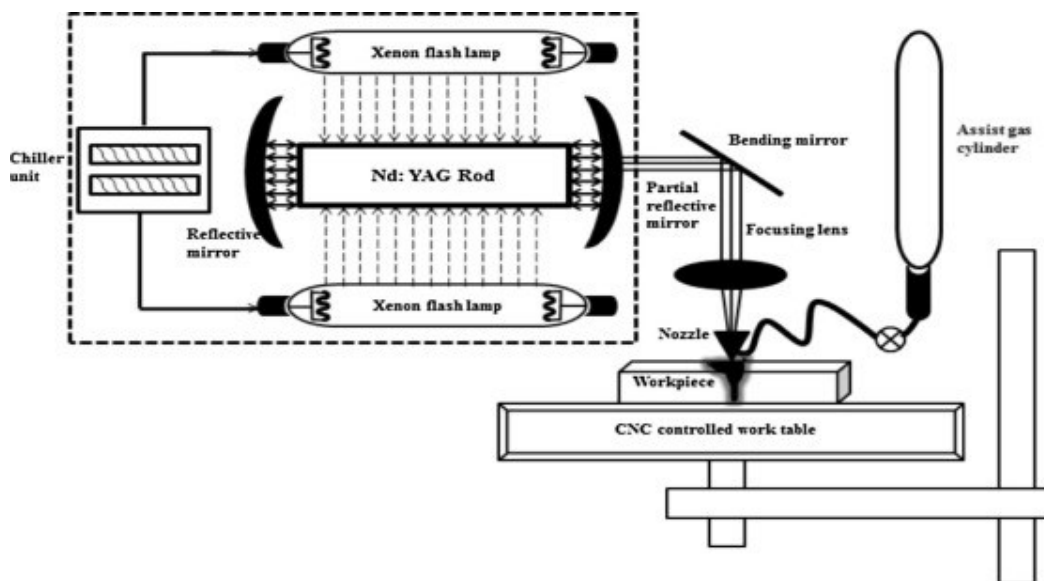
Laseri čvrstog stanja koriste laserski medij koji je čvrste strukture, kao što su staklo ili kristali koji su dopirani sa rijetkim zemnim ili promjenjivim metalnim ionima. Dolaze u formi masovnih, optičkih ili valovodnih lasera. Generiraju izlaznu snagu od nekoliko milivata do nekoliko kilovata [7].

#### 4.3.1. RUBINSKI LASER

Rubinski laser je laser koji kao laserski medij koristi sintetski kristal rubina. Rubin je kromom dopiran mineral (aluminijev oksid,  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Prvi laser, kojeg je demonstrirao Theodore H. Maiman 1960., bio je rubinski laser koji je kao pobudu imao bljeskalicu i emitirao je svjetlost valne duljine od 694,3 nm. Zbog svojih limitiranih performansi, rubinski laseri nisu u širokoj primjeni. Koristili su se za lasersko mjerenje udaljenosti, brzo fotografiranje, pulsirajuću holografiju, medicinske svrhe itd. [8].

#### 4.3.2. Nd:YAG laser

Kod ovih lasera laserski medij se sastoji od štapića itrij-aluminij granata (YAG) sa atomima neodimija ( $\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Kao pobudu mogu koristiti diodu ili bljeskalicu (bljeskalica punjena ksenonom ili kriptonom). Pobuda bljeskalicom je moguća zbog široke apsorpcije kod valnih duljina oko 800 nm i zbog medija koji ima 4 energetske razine. Najčešća valna duljina koju proizvodi ovaj laser je 1064 nm i ima veliku primjenu u medicini [3], [9].



Slika 19. Prikaz Nd:YAG lasera

#### 4.4. TEKUĆI LASERI

Tečući laseri kao aktivni medij koriste tekućine pri sobnim temperaturama. Ovi laseri generiraju svjetlo širokog spektra zbog pobuđenih energetske razine organskih bojila koji su rastopljeni u tekućini. Izlazna zraka može biti pulsna ili kontinuirana, a spektar joj se proteže od ultra-ljubičastih do infracrvenih zraka što ovisi o korištenom bojilu.

Efikasnost, usklađenost i velika koherentnost ovih lasera čini ih idealnim za znanstvena i medicinska istraživanja. Zbog svog širokog spektra emisije prikladni su za generiranje ultra-kratkih laserskih pulseva [10].

#### 4.5. POLUVODIČKI LASERI

Poluvodički laser dolazi u formi laserske diode koja je posebno projektirana dioda koja pri propusnoj polarizaciji emitira lasersku svjetlost. Kad struja (energetska pumpa) teče kroz diodu, elektroni iz vodljivog pojasa n strane prelaze u vodljivi pojas p strane. U valentnom pojasu p strane ima puno slobodnih energetske razine, šupljina, tada struja kroz diodu popunjava više energetske razine p strane elektronima koji stižu sa n strane (vodljivi pojas), a na nižim razinama (šupljine u valentnom pojasu) ima slobodnih mjesta što na p strani predstavlja inverziju naseljenosti.

Osobina koju dioda ima kada zrači svjetlost kad je propusno polarizirana zove se injektirana elektroluminiscencija. Ove diode proizvode lasersku zraku valnih duljina od 750 do 900 nm za GaAs (galij-arsenid) diodu i 1200 do 1700 nm za InGaAs (indij-galij-arsenid) diodu [2].



Slika 20. Prikaz poluvodičkog lasera – laserska dioda

## 5. LASERI U SVAKODNEVNOM ŽIVOTU

### 5.1. LASERI U TELEKOMUNIKACIJAMA

Kod primjena u telekomunikacijama laseri se najviše koriste u optičkim komunikacijskim sustavima. U optičkim komunikacijama laseri su najbolji izvori svjetlosti zbog velikog frekvencijskog pojasa, uskog izlaznog spektra i kolimirane zrake te pomoću njih možemo slati jako velike podatke putem optičkog vlakna na velike udaljenosti uz jako male gubitke.

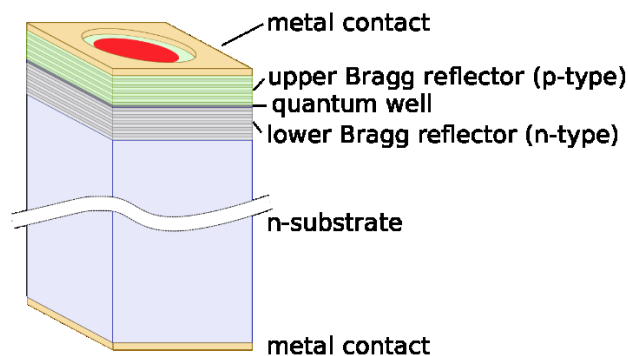
Postoje 3 vrste lasera za optičke komunikacije:

- VCSEL (engl. *Vertical-cavity surface-emitting laser*)
- FP (engl. *Fabry-Perot*) laser
- DFB (engl. *Distributed-feedback*) laser

#### 5.1.1. VCSEL LASER

VCSEL laser je poluvodička laserska dioda sa monolitnim rezonatorom gdje se svjetlost emitira okomito na površinu čipa. Rezonator je sastavljen od dva poluvodička Bragg zrcala. Između njih je aktivni materijal koji sadrži nekoliko kvantnih praznina debljine svega nekoliko mikrometara.

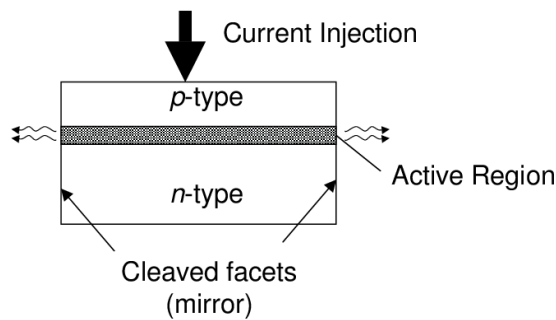
U većini slučajeva aktivni materijal je električni pobuđen sa nekoliko desetaka milivata i generira izlaznu snagu između 0,5 do 5 mW ili veće snage za višemodne uređaje. Struja teče kroz cilindričnu elektrodu iz koje izlazi izlazna zraka, a struja je ograničena u području rezonatorskog moda koristeći električni vodljive (dopirane) slojeve zrcala sa izolirajućim materijalom oko njih. Proizvode svjetlost valne duljine 850 nm [11].



Slika 21. VCSEL laser

### 5.1.2. FP LASER

Fabry-Perot laserska dioda je najčešća vrsta laserskih dioda koja ima Fabry-Perot rezonator. U njemu se refleksija svjetlosti događa na oba kraja, ali ne unutar aktivnog materijala. U najjednostavnijim slučajevima, krajnje refleksije u ovom laseru su tzv. Fresnelove refleksije na granici strukture poluvodičkog uređaja i zraka. Ove diode emitiraju svjetlost valnih duljina u širokim granicama (1310 nm i 1550 nm), od vidljive svjetlosti do srednjih i velikih infracrvenih zraka [12].

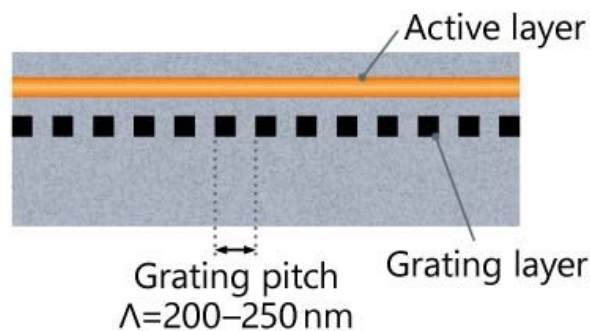


Slika 22. Fabry-Perot dioda

### 5.1.3. DFB LASER

DFB laser je laser omogućuje glatku, podesivu kontrolu valnih duljina i jako uske širine spektra koja je potrebna za precizne optičke komunikacije i spektroskopiju. Sastoji se od rešetkaste strukture unutar poluvodiča koji može raditi u jednom longitudinalnom i jednim transverzalnom modu. Podešavanje se postiže modulacijom laserske struje ili temperature čipa. Proizvode svjetlost valnih duljina 1310 nm i 1550 nm.

Koriste se za alkalijsku spektroskopiju, lasersko hlađenje i detekciju plina [13].



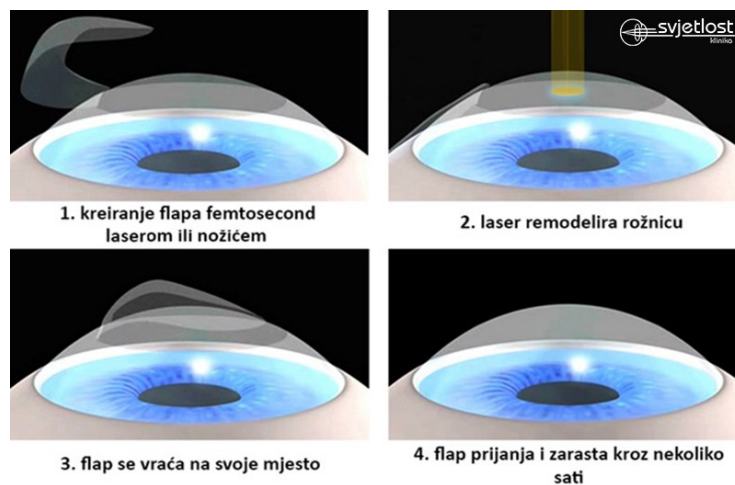
Slika 23. Struktura DFB lasera



## 5.2. PRIMJENA LASERA U MEDICINI

Laseri u medicini imaju jako široku primjenu, kao što su laserska operacija vida, stomatologija, dermatologija i razni kozmetički tretmani poput odstranjivanja tetovaža i kose. Različite vrste lasera su potrebne ovisno o valnoj duljini, izlaznoj snazi, načinu rada itd. Također, laseri se koriste i u kirurgiji kod eksploatacije rezanja tkiva s minimalnim krvarenjem.

U suštini medicinski laseri moraju ispuniti stroge uvjete. Moraju biti jako pouzdani, jer ako se dogodi kvar tijekom operacije ishod može biti koban [14].



Slika 24. Laserska korekcija vida

## 5.3. LASERI U INDUSTRIJI

Laserska obrada materijala je jedna od glavnih područja njihove primjene. U današnjici koriste se u velikom rasponu u različitim industrijskim tehnikama proizvodnje, uključujući masovnu proizvodnju običnih stvari, te specijalnih primjena. Najčešće se koriste za rezanje, obilježavanje, zavarivanje i bušenje materijala poput metala, plastike, drva itd. [15]

## 5.4. OPĆENITA PRIMJENA LASERA

Optičko pohranjivanje podataka, kao što su kompaktni diskovi (engl. *Compact Disc*, CD), DVD (engl. *Digital Video Disc*), Blue-ray diskovi, se gotovo uvijek bazira na laserskoj tehnologiji i ima jako veliku prostornu usklađenost, te se može koristiti za adresiranje jako malih točaka na mediju za pohranjivanje, što omogućava jako veliku gustoću memorijske pohrane.



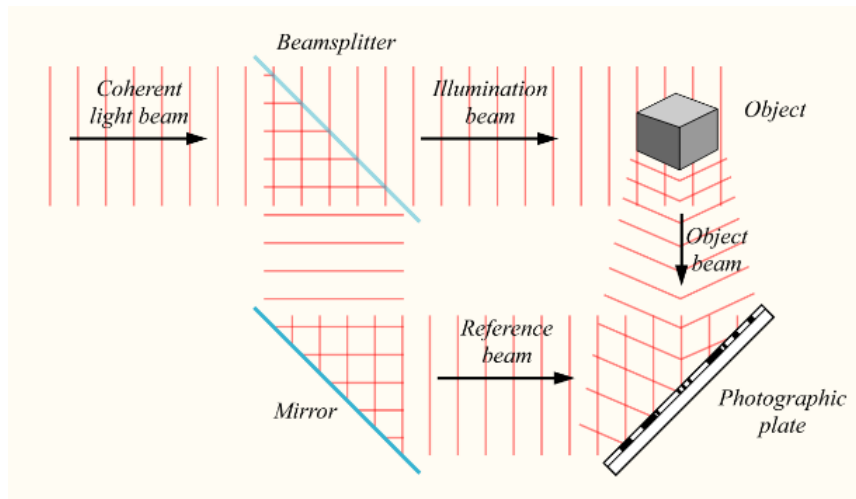
Slika 25. CD i Blue-ray

Osim pohrane podataka laseri se koriste još u astronomiji, građevinskim uređajima, bar-kod skenerima, laserskim pisačima, noćnim klubovima za *light show* itd.



Slika 26. 2D skener za bar-kod

Holografija je metoda stvaranja i reproduciranja trodimenzionalnih slika na fotografskoj ploči koristeći koherentnu svjetlost (laser). Holografski prikazi se nazivaju hologrami. Hologram predstavlja 3D sliku koja je, uz pomoć lasera konstruirana tako da izgleda kao da ima dubinu poput pravih slika. Hologrami nastaju obasjavanjem predmeta laserskim svjetlom, te se ta svjetlost odbija od predmet i pada na fotografsku ploču, gdje se laserski zrak dijeli i pada na zrcalo. Kada se fotografska ploča razvije, dobije se crno-bijela slika koja kada se ponovno osvjetli laserom, iza ploče pravi ono što nazivamo hologramom [16].



Slika 27. Prikaz nastanka holograma

## **6. ZAKLJUČAK**

Od prvog lasera pa sve do danas, možemo vidjeti kako se laserska tehnologija postepeno razvijala u svim aspektima. Laser je uređaj s kojim se susrećemo svaki dan, a da to i ne znamo, jer je kao izum ostavio jako veliki utjecaj na svakodnevni život. Pomoću njega obavljamo svoj posao, medicinske zahvate te brzo komuniciramo zbog prijenosa podataka koju pružaju optički komunikacijski sustavi. U budućnosti će primjena lasera biti još veća nego u današnje vrijeme u svim granama znanosti.

## LITERATURA

- [1] Townes, Charles H. The first laser, The University of Chicago Press, Ltd., 2003.
- [2] Medunić, Ivona. Svjetlovodna Tehnika, skripta za učenike, Pomorsko-tehnička škola Dubrovnik
- [3] Maršal, Dominik. Laseri i njihova primjena, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2019.
- [4] Grgić, Lea. Laseri, Završni rad, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
- [5] CO<sub>2</sub> laseri, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/co2\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html), pristup: 15. rujna 2022.
- [6] He-Ne laseri, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/helium\\_neon\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/helium_neon_lasers.html), pristup: 15. rujna 2022.
- [7] Laseri čvrstog stanja, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/solid\\_state\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/solid_state_lasers.html), pristup: 15. rujna 2022.
- [8] Rubinski laser, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/ruby\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/ruby_lasers.html), pristup: 16. rujna 2022.
- [9] YAG laseri, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/yag\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html), pristup: 16. rujna 2022.
- [10] Tekući laseri, dostupno na: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16553578/the-three-phases-of-lasers-solidstate-gas-and-liquid>, pristup: 16. rujna 2022.
- [11] VCSEL laser, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/vertical\\_cavity\\_surface\\_emitting\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/vertical_cavity_surface_emitting_lasers.html), pristup: 17. rujna 2022.
- [12] FP laser, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/fabry\\_perot\\_laser\\_diodes.html](https://www.rp-photonics.com/fabry_perot_laser_diodes.html), pristup: 19. rujna 2022.
- [13] DFB laser, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/distributed\\_feedback\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/distributed_feedback_lasers.html), pristup: 19. rujna 2022.
- [14] Laseri u medicini, dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/medical-laser>, pristup: 20. rujna 2022.
- [15] Primjena lasera, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/laser\\_applications.html](https://www.rp-photonics.com/laser_applications.html), pristup: 20. rujna 2022.
- [16] Holografija, dostupno na: <https://www.rp-photonics.com/holography.html>, pristup: 21. rujna 2022.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Eksperiment slanja zrake na mjesec prikazan u seriji Teorija velikog praska .....	1
Slika 2. Raspon vidljive svjetlosti .....	2
Slika 3. Polarizacija svjetlosti .....	3
Slika 4. Prikaz koherentne i nekoherentne zrake.....	3
Slika 5. Interferencija valova.....	4
Slika 6. Proces apsorpcije.....	5
Slika 7. Proces spontane emisije .....	5
Slika 8. Proces stimulirane emisije.....	6
Slika 9. Inverzija populacije .....	6
Slika 10. Metastabilno stanje.....	7
Slika 11. Dijelovi lasera: 1) Laserski medij, 2) Energija za pobuđivanje medija, 3)100% reflektirajuće zrcalo, 4) 99% reflektirajuće zrcalo, 5) Laserska zraka .....	8
Slika 12. Refleksija zrake u optičkom rezonatoru.....	9
Slika 13. Laserska zraka pulsnog lasera .....	12
Slika 14. Prikaz kontinuirane i pulsne zraka .....	13
Slika 15. Prikaz plinskog lasera .....	13
Slika 16. Prikaz CO <sub>2</sub> lasera .....	14
Slika 17. Prikaz He-Ne lasera.....	14
Slika 18. Energetske razine He-Ne lasera .....	15
Slika 19. Prikaz Nd:YAG lasera.....	16
Slika 20. Prikaz poluvodičkog lasera – laserska dioda.....	17
Slika 21. VCSEL laser.....	18
Slika 22. Fabry-Perot dioda.....	19
Slika 23. Struktura DFB lasera.....	19
Slika 24. Laserska korekcija vida.....	20
Slika 25. CD i Blue-ray .....	21
Slika 26. 2D skener za bar-kod .....	21
Slika 27. Prikaz nastanka holograma.....	22

## **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam završni rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na studijima Sveučilišta u Dubrovniku, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentorice doc. dr. sc. Anamarije Bjelopera kojoj se još jednom srdačno zahvaljujem.

Mauro Wollitz