

# LASERI I NJIHOVA PRIMJENA

---

**Maršal, Dominik**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:988091>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Dominik Maršal

# **LASERI I NJIHOVA PRIMJENA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2019.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional graduate study of Safety and Protection

Dominik Maršal

# **LASERS AND THEIR APPLICATION**

FINAL PAPER

Karlovac, 2019.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Dominik Maršal

# **LASERI I NJIHOVA PRIMJENA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc.Lulić Slaven

Karlovac, 2019.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**  
Trg J.J. Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Specijalistički studij: Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2019

### **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Student: Dominik Maršal

Matični broj: 0422417018

Naslov: Laseri i njihova primjena

Opis zadatka:

U završnom radu objasniti će se princip rada lasera, njegovi djelovi i karakteristike laserske svjetlosti. Također će se razmatrati primjena lasera i laserske tehnologije. Posebno će se obratiti pažnja na opasnosti i mjere zaštite prilikom upotrebe lasera.

Zadatak zadan:

02/2019.

Rok predaje rada:

06/2019.

Predviđeni datum obrane:

07/2019.

Mentor:

Dr.sc. Lulić Slaven, v. pred.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Štedul Ivan, prof. v.pred

## **PREDGOVOR**

U završnom radu većinom sam se usmjerio na princip rada lasera, podjelu lasera i na njegovu primjenu. Rad sam izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i uz pomoć dostupne literature. Zahvaljujem se svojem mentoru, Slavenu Luliću, na savjetima i usmjeravanju pri izradi rada. Zahvalio bih se i svojoj obitelji koja mi je pružila veliku podršku i strpljenje tijekom cjelokupnog studiranja te bih se zahvalio svim prijateljima i kolegama.

## **SAŽETAK**

U radu je prikazano što je svjetlost i fotoni te kako je došlo do otkrića i razvoja lasera. Nadalje, objašnjen je princip rada i dijelovi lasera te osnovna svojstva laserske zrake. Napravljena je podjela lasera i ukratko su opisani najpopularniji i najčešće korišteni laseri. Također prikazana je primjena lasera od medicine i znanosti do svakodnevnog života te je objašnjeno kako se laseri mogu upotrebljavati u zaštiti domova, ali i radnika na radu. Na kraju su objašnjene opasnosti, mjere opreza i zaštite prilikom upotrebe lasera.

Ključne riječi: laser, laserska zraka, stimulirana emisija, opasnosti, mjere zaštite.

## **ABSTRACT**

This paper shows what light and photons are and how the laser has been discovered and developed. Further more, the principle of work and parts of the laser and the basic properties of the laser beam have been explained. Laser division was made and briefly described the most popular and most commonly used lasers. Also, the application of lasers from medicine and science to everyday life is explained, and it is explained how lasers can be used to protect homes as well as workers at work. In the end, dangers, precautions and protection are explained when using the laser.

Keywords: laser, laser beam, stimulated emission, dangers, security measures.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SVJETLOST I FOTONI.....</b>	<b>2</b>
2.1. Svjetlost .....	2
2.2. Fotoni.....	3
<b>3. POVIJEST LASERA .....</b>	<b>4</b>
<b>4. PRINCIP RADA LASERA .....</b>	<b>6</b>
4.1. Sustav s tri razine .....	8
4.2. Sustav s četiri razine.....	9
4.3. Inverzija napučenosti.....	10
<b>5. GRAĐA/DIJELOVI LASERA .....</b>	<b>11</b>
5.1. Optički rezonator.....	11
5.2. Aktivni medij .....	12
5.3. Laserska/optička pumpa .....	12
5.4. Laserska zraka.....	13
<b>6. KARAKTERISTIKE LASERSKE SVJETLOSTI .....</b>	<b>14</b>
6.1. Koherentnost.....	14
6.2. Monokromatičnost .....	15
6.3. Usmjerenost .....	15
<b>7. PODJELA LASERA .....</b>	<b>16</b>
7.1. Prema načinu rada .....	16
7.1.1. Pulsni .....	16
7.1.2. Kontinuirani .....	17
7.2. Prema agregatnom stanju optičkog pojačala .....	18
7.2.1. Plinski .....	18
7.2.1.1. CO <sub>2</sub> laser .....	18
7.2.1.2. He-Ne (helij-neon) laser .....	19
7.2.2. Laseri čvrstog stanja .....	20
7.2.2.1. Rubinski laser.....	21
7.2.2.2. Nd:YAG laser .....	21
7.2.3. Tekući laseri.....	22
7.2.4. Poluvodički laseri.....	23



7.3. Prema načinu pobude .....	24
7.3.1. Pobuda optičkim sredstvom .....	24
7.3.2. Pobuda kemijskom reakcijom .....	24
7.3.3. Pobuda sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju .....	24
<b>8. PRIMJENA LASERA .....</b>	<b>25</b>
8.1. Primjena u industriji .....	25
8.1.1. Rezanje i bušenje materijala laserom .....	25
8.1.2. Zavarivanje laserom .....	26
8.2. Primjena u znanosti i tehnologiji .....	27
8.2.1. Holografija .....	27
8.2.2. Primjena u astronomiji .....	29
8.3. Primjena u medicini .....	31
8.4. Primjena u vojne svrhe .....	33
8.5. Primjena lasera u svakodnevnom životu .....	35
8.6. Primjena u zaštiti .....	36
8.6.1. Laser kao zaštita prostora .....	36
8.6.2. Laser u zaštiti na radu .....	38
<b>9. OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE PRILIKOM PRIMJENE LASERA .....</b>	<b>40</b>
<b>10. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>45</b>
<b>11. LITERATURA .....</b>	<b>46</b>
<b>12. PRILOZI .....</b>	<b>50</b>
12.1. Popis slika .....	50
12.2. Popis tablica .....	51

# 1. Uvod

Laser („Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“) je optička naprava koja emitira koherentni snop fotona. Laserska svjetlost nastaje kada stimulirana emisija dominira nad spontanom emisijom i apsorpcijom. Glavni dijelovi lasera su: optički rezonator, aktivni medij, laserska pumpa te laserska zraka. Glavne karakteristike laserske zrake su koherentnost, monokromatičnost i usmjerenost te se na temelju tih karakteristika razlikuje od svjetlosti proizvedene npr. običnom žaruljom. Laseri se dijele: prema načinu rada (pulsni i kontinuirani), prema agregatnom stanju optičkog pojačala (plinski, tekući, laseri čvrstog stanja i poluvodički laseri) i prema načinu pobude (pobuda optičkim sredstvom, kemijskom reakcijom i sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju). Primjena lasera je široka, a najčešće se primjenjuju u industriji (rezanje, bušenje i zavarivanje), u vojsci (kao oružje), primjena u znanosti i tehnologiji (holografija, astronomija), primjena u medicini (operacije, uklanjanje tetovaža), svakodnevnom životu (CD, DVD, printeri, čitači 2D bar-kodova itd.), te primjena u zaštiti za zaštitu prostora (sigurnosni alarmni sustavi) i u zaštiti na radu (za zaštitu radnika i strojeva). Laseri mogu biti iznimno štetni ukoliko se njima rukuje na neprimjeren način. Laserska energija je toliko jaka da može oštetiti ljudsko tkivo i prouzročiti opekline. Zato je prilikom rukovanja sa laserom obavezno koristiti zaštitne naočale, a osoba koja njime rukuje mora biti osposobljena za rad sa laserom, tu se misli na velike i snažne lasere koji se koriste u medicini i znanosti.

## 2. Svjetlost i fotoni

Da bismo započeli išta o laserima potrebno je znati što je svjetlost i što su fotoni. Svjetlost je elektromagnetsko zračenje i to ne samo vidljivo, već tu spadaju i infracrveno i ultraljubičasto zračenje, a foton je kvant svjetlosti i ostalih zračenja i on je posrednik u prenošenju elektromagnetskog zračenja.

### 2.1. Svjetlost

Svjetlost je po najjednostavnijoj definiciji nešto što obasjava tamu. U fizici svjetlost definiramo kao elektromagnetsko zračenje vidljivo ljudskom oku, ali i ostala zračenja poput ultraljubičastog i infracrvenog. Stara je jednako koliko i svemir. Prvi se svjetlosti dotakao grčki filozof Empedokle i primijetio da svjetlost ima konačnu brzinu gibanja. Isaac Newton je 1666. godine u svom radu „Optika“ opisao i objasnio eksperimente sa svjetlošću i zaključke do kojih je došao. Prema njemu svjetlost se sastoji od bestjelesnih čestica koje se gibaju brzinom svjetlosti. Opisao je i da se bijela svjetlost razlaže na boje (od plave na jednom kraju do crvene na drugom kraju) pomoću prizme (tablica 1). Christian Huyges je dao drugačiju teoriju o svjetlosti, odnosno on je svjetlost shvaćao kao valove. To su potvrdili i eksperimenti koje je proveo Thomas Young 1803. godine o difrakciji (ogibu) svjetlosti i radovi Augustina Fresnela i Jamesa Clerk-Maxwella. Maxwell je dokazao da se energija svjetlosti prenosi kao oscilirajući električni i magnetski poremećaj koji se može širiti kroz prazan prostor.

Tab. 1.Boja, frekvencija i valna duljina svjetlosti, tipične vrijednosti [2]

Boja	Frekvencija/ $10^{14}$ Hz	Valna duljina/nm	Energija fotona/ $10^{-19}$ J foton <sup>-1</sup>
Ultraljubičasta vidljiva svjetlost	10	300	6,6
Ljubičasta	7,1	420	4,7
Plava	6,4	470	4,2
Zelena	5,7	530	3,7
žuta	5,2	580	3,4
Narančasta	4,8	620	3,2
Crvena	4,3	700	2,8
Infracrvena	3,0	1000	1,9

## 2.2. Fotoni

Fotoni su fundamentalne čestice, nemaju masu i gibaju se brzinom  $3 \times 10^8$  m/s. Emisija fotona se prenosi u obliku impulsa elektromagnetskih valova. Prenosjenjem energije sa primarnih čestica na sekundarne nastaju valovi.

Iako je Maxwellova teorija bila uspješna i dalje je ostao problem zračenja crnog tijela. Svako zagrijano tijelo emitira elektromagnetsko zračenje (npr. svjetlost sa Sunca). Ovo zračenje se pojavljuje na visokim temperaturama u vidljivom dijelu spektra i porastom temperature povećava se udio plavog dijela svjetla u ukupnom zračenju. To se najbolje uočava kod zagrijavanja željeza. Ova pojava definirana je Wienovim zakonom pomaka iz 1893. godine, koji kaže „da se s porastom temperature spektralno područje na kojem se nalazi maksimum zračenja pomiče prema kraćim valnim duljinama.“ [3]. Poznati njemački fizičar Max Planck dobio je 1900. godine zakon koji je opisivao zračenje crnog tijela i koji se poklapao sa provedenim eksperimentima. Iz toga je izvukao dva postulata:

- 1) Energija elektromagnetskih oscilatora može se mijenjati samo za određeni, diskretni iznos, odnosno u kvantima energije.
- 2) Energija oscilatora s frekvencijom  $\nu$  može se mijenjati samo za cjelobrojni iznos umnoška frekvencije i konstante  $h$ ,

$$\Delta E = n \times h \times \nu$$

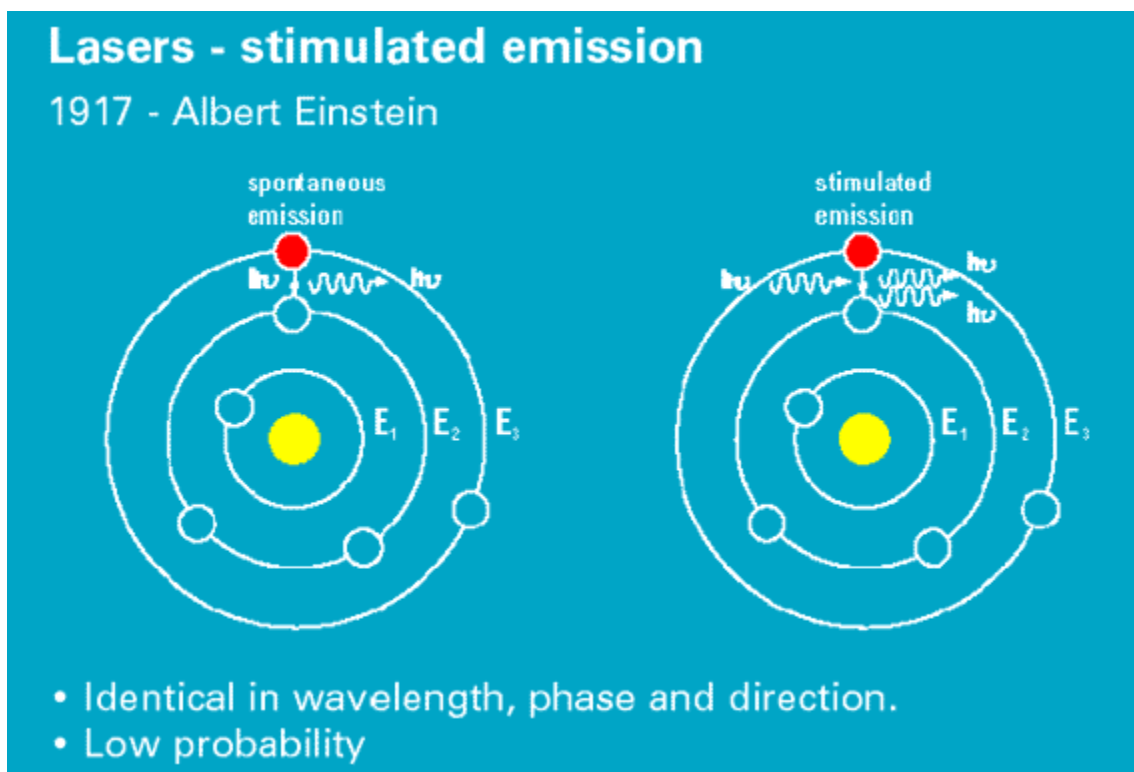
gdje je  $n$  cijeli broj, a  $h$  Planckova konstanta.

Planckov zakon bio je uspješan zbog toga jer prema kvantnoj predodžbi oscilator će biti pobuđen samo ako može primiti energiju najmanje jednaku  $h \times \nu$ . Zbog toga se veoma kratki valovi ne emitiraju, a visokofrekventni oscilatori ostaju nepobuđeni. Zbog planckovog zakona moguće je od sada gledati na zračenje frekvencije kao na skupinu čestica s energijama  $h \times \nu$ . G.N. Lewis je te čestice nazvao fotonima. Einstein je pomoću koncepta fotona uspješno objasnio fotolektrični efekt.

### 3. Povijest lasera

Albert Einstein je 1917. godine u svome radu „On the Quantum Theory of Radiation“ otkrio stimuliranu emisiju fotona na čemu se zapravo temelji djelovanje lasera. Tim radom Einstein je dao koncept i predvidio izum lasera, ali i njegovog prethodnika masera.

„Stimulirana emisija je proces kada atom iz pobuđenog stanja prelazi u niže energetska stanja potaknut nazočnošću fotona koji ima upravo energiju jednaku razlici dva atomska stanja između kojih se događa prijelaz. Pri tome atom emitira foton iste energije kao što je i upadni foton i istog pravca.“ (slika 1)[2].



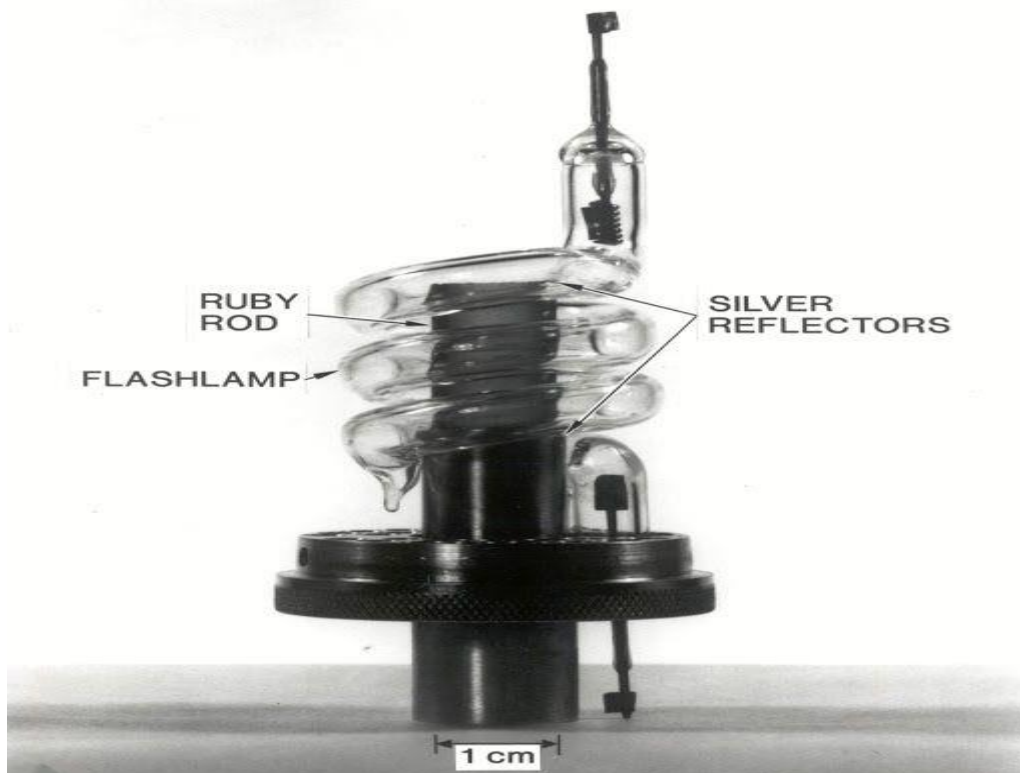
Sl. 1. Spontana i stimulirana emisija fotona [2]

Maser („microwave amplification by stimulated emission of radiation“ u prijevodu, mikrovalno pojačavanje pomoću stimulirane emisije zračenja), je uređaj sličan laseru, ali radi u drugom frekvencijskom području i bio je preteča lasera. To je zapravo oscilator koji koristi snop molekula amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) kao emitirajući medij, a otkrio ga je C.H. Townes sa svojim suradnicima 1954. godine. Prvi laser („Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ u prijevodu; pojačavanje svjetla stimuliranom emisijom zračenja) napravio je Theodore H. Maiman 1960. godine u Huges Research Laboratorie Malibu u Kaliforniji. On je uspio dobiti stimuliranu emisiju u vidljivom području što nikome do tada nije uspjelo. Maimanov laser je u pulsnom režimu emitirao svjetlost valne duljine 694 nm, a to je postigao

tako da je obasjavao kristal rubina sa svjetlosnom lampom koji je imao posrebrene plohe (slika 2). Na taj način je uspio objediniti tri osnovna elementa za stvaranje laserske svjetlosti, a to su:

- aktivni medij (kristal rubina)
- laserska bljeskalica (svjetlost)
- rezonatorsku šupljinu sa dva rubna zrcala (posrebrene plohe).

Laser je dakle optička naprava koja emitira koherentni snop fotona.



Sl. 2. Rubinski laser [8]

Prvi proizvedeni laser postao je jedan od najboljih, najpriznatijih i najpoznatijih izuma fizike. U eksperimentu 1962. godine laserska zraka je odaslana na površinu Mjeseca koji je od Zemlje udaljen gotovo 400 000 kilometara i ta je zraka obasjavala površinu promjera oko 3 kilometra, dok bi zraka iz nekog drugog izvora obasjavala površinu promjera od oko 40 000 kilometara. Zbog takve tehnologije i snage laser je prozvan glasnikom nove ere i već tada se vidjelo da će se laser primjenjivati u različitim područjima. Razvoj lasera tekao je vrlo brzo i ubrzo su se razvili razne vrste lasera, poput plinskog lasera, poluvodičkog lasera, tekućeg lasera, čvrstog lasera.

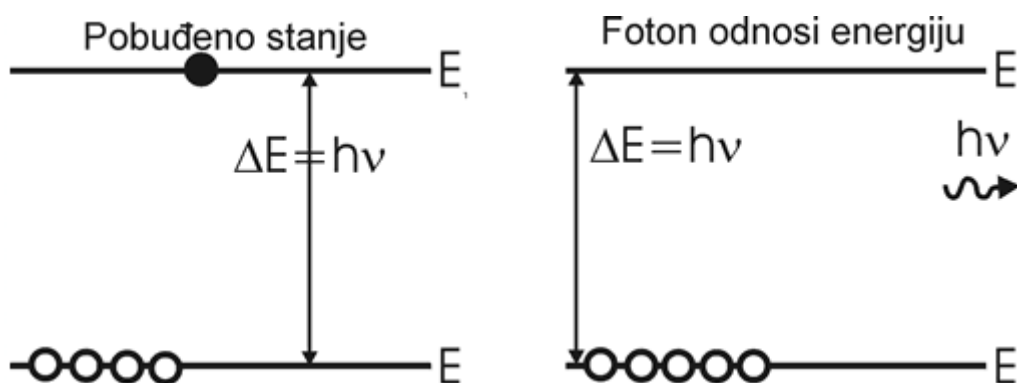
## 4. Princip rada lasera

Da bismo razumjeli kako radi laser prvo moramo ukratko proučiti atome, molekule i kvantnu mehaniku. Atomi izgrađuju sve tvari oko nas, a sastoje se od jezgre (protoni i neutroni) i elektronskog omotača (elektroni). Kako se atomi neprestano gibaju (vibriraju, rotiraju i sl.) oni mogu biti u različitim stupnjevima pobuđenosti koje su izazvale različite energije (svjetlosna, električna, toplinska). Elektron se nakon pobude vraća u svoje osnovno stanje i prilikom toga oslobađa svjetlosne čestice odnosno fotone. Svi fotoni nalaze se na istoj valnoj duljini i koherentni su odnosno frekvencija, faza i polarizacija su im jednaki.

Glavni procesi nastanka laserske svjetlosti su:

- spontana emisija
- stimulirana emisija
- inverzija napučenosti

Spontanu emisiju objasnio je A. Einstein i ona je osnova za apsorpciju i simuliranu emisiju koji su ključni za rad lasera (slika 3). Einstein je zaključio da se atom u pobuđenom stanju nalazi vrlo kratko, oko  $10^{-8}$  s, nakon toga vremena on spontano prelazi u niže energijsko stanje emitirajući pri tome foton čija je energija jednaka razlici energija odgovarajućih energijskih nivoa. To zračenje naziva se nekoherentno zračenje i takvo zračenje je obična svjetlost.



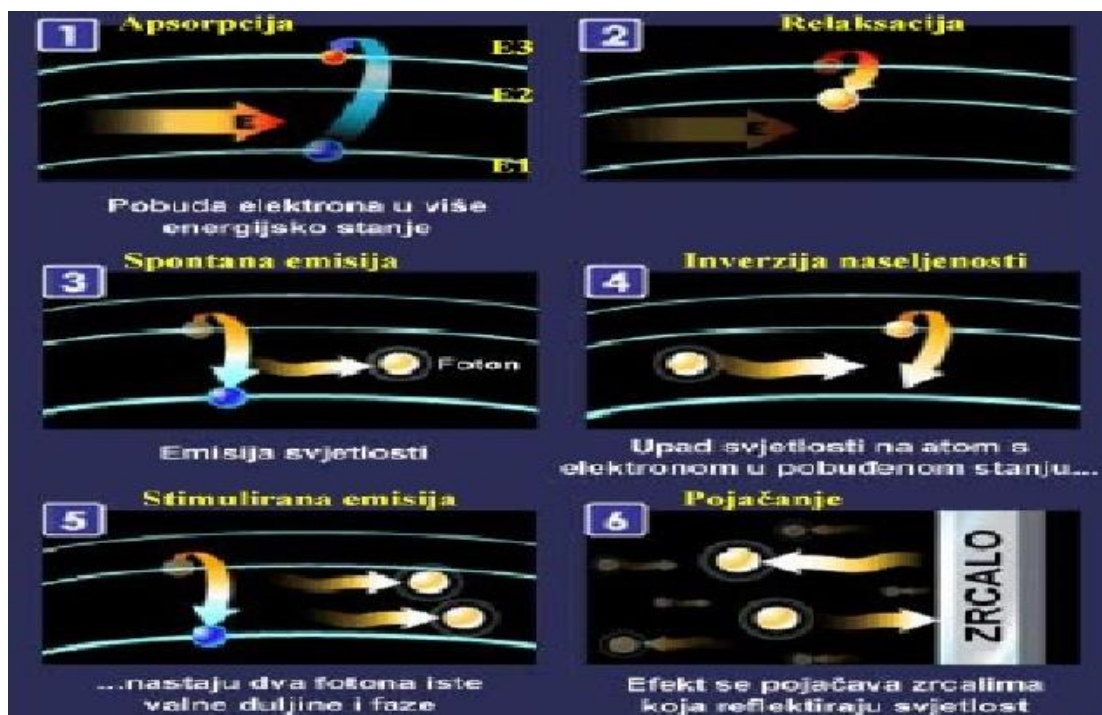
Sl. 3. Spontana emisija [10]

Da bi se stvorio preduvjet za spontanu emisiju atomi moraju prijeći u pobuđeno stanje, to se događa kada atom apsorbira foton odgovarajuće valne duljine i prilikom čega taj foton nestaje.

Kada se na istom mjestu nađe veliki broj atoma sa isto tako velikim viškom energije (atomi koji su postigli inverziju napučenosti) oni spontano emitiraju fotone u različitim

smjerovima. Ako na te iste atome pošaljemo fotone određene valne duljine i faze, oni će djelovati na atom te će on ranije emitirati fotone identične faze, valne duljine i smjera kretanja koje imaju upadni fotoni. Takvo zračenje se naziva koherentno zračenje i ono je posljedica stimulirane emisije, do je obična svjetlost posljedica slučajne emisije. Kretanjem više usmjerenih fotona kroz pobuđene atome stvara se efekt lavine i sve više koherentnih fotona putuje kroz medij.

Apsorpcijom energije atomi prelaze iz osnovnog stanja u pobuđeno. Sada se taj pobuđeni atom nastoji vratiti u niže energetske stanje (relaksacija), te on emitira foton, odnosno svjetlost. Ako na atom u pobuđenom stanju naiđe foton, a energija odgovara energetskej razlici pobuđenog i osnovnog stanja tada se atom vraća u osnovno stanje. Prilikom toga emitira foton koji ima istu valnu duljinu tj. frekvenciju i istu fazu kao upadni foton. Taj se proces nastavlja kroz medij, gdje zrcalo, koje je visoke reflektivnosti odbija gotovo sve koherentne fotone natrag u medij te se tako pojačava svjetlost stimuliranom emisijom zračenja (slika 4). Na taj način fotoni se kroz medij gibaju naprijed – nazad. Zbog tog gibanja naprijed – nazad, vrlo brzo nastaje veliki broj fotona istih karakteristika, jer se svakim prolaskom zbog stimulirane emisije broj fotona povećava. Zrcalo koje se nalazi na kraju lasera dio svjetlosti propušta, dio emitira, odnosno polureflektirajuće je. Ta propuštena svjetlost naziva se laserska svjetlost. Laser je napravljen tako da je snop svjetlosti koji se propušta vrlo uzak i izrazito koncentriran i jak, dok je kod obične svjetlosti snop raspršen i nije tako jak.



Sl. 4. Proces nastajanja laserskog zračenja [12]

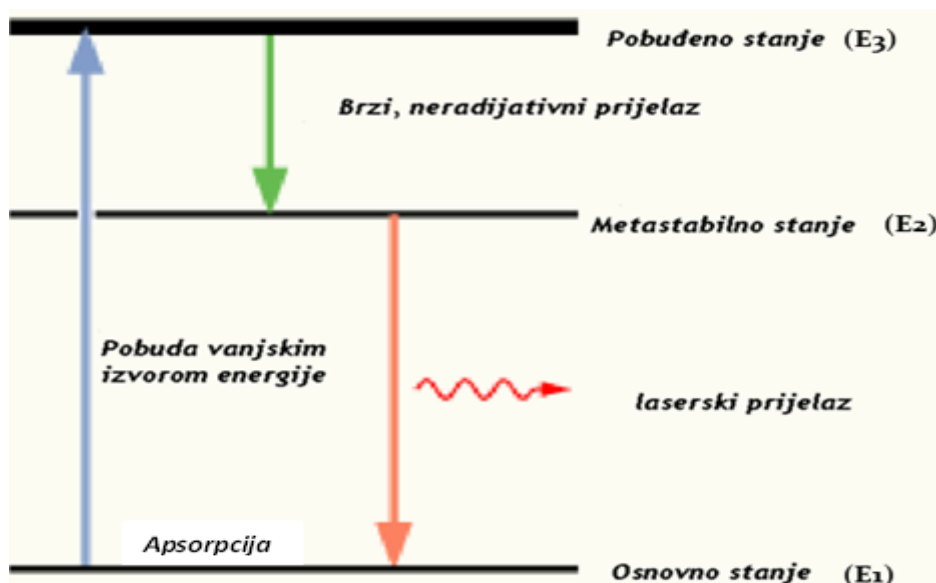


Kada stimulirana emisija dominira nad spontanom emisijom i apsorpcijom, tek onda se može proizvesti laserska svjetlost. Ta dominacija se postiže inverzijom napučenosti atoma u radnom tijelu. Dakle pobuđeno stanje mora imati veći broj atoma ( $N_2$ ), od broja atoma u osnovnom stanju ( $N_1$ ),  $N_2 > N_1$ .

Inverziju napučenosti gotovo je nemoguće izvesti u sustavu sa dvije energetske razine jer gornja granica odgovara situaciji  $N_2 = N_1$ . Atomi ili molekule u tekućinama, čvrstim tvarima i plinovima uvijek imaju više od dvije energetske razine, najčešće se tu radi o sustavima sa tri ili četiri energetske razine. U tom se slučaju inverzija napučenosti postiže smanjenjem napučenosti stanja niže energije ili povećanjem napučenosti stanja više energije.

#### 4.1. Sustav s tri razine

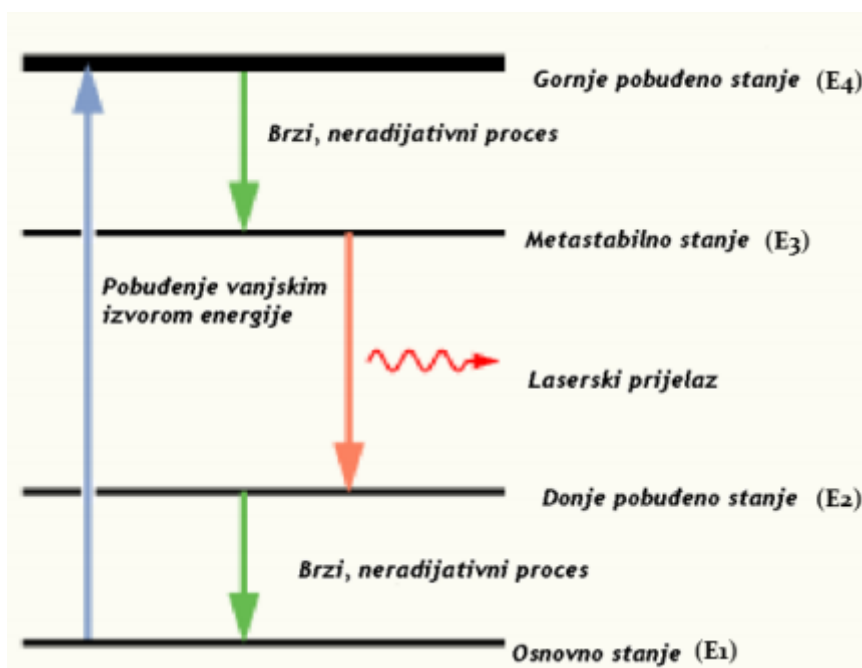
Na početku se većina atoma nalazi u osnovnom stanju energije ( $E_1$ ). Potom se događa pobuda zbog koje atomi prelaze iz osnovnog stanja ( $E_1$ ) u pobuđeno stanje, odnosno na višu energetska razinu ( $E_3$ ). Tamo se atomi zadržavaju od prilike  $10^{-8}$  s i zatim prelaze (bez zračenja) na razinu ( $E_2$ ) koja je metastabilna. Većina atoma ostaje u tome stanju jer je vrijeme života metastabilne razine relativno dugo ( $10^{-3}$  s). Kada se postigne dovoljno snažna pobuda da nakon nekog vremena više od 50% atoma bude u metastabilnoj razini ( $E_2$ ) tada se kaže da je postignuta inverzija napučenosti razine  $E_2$  i razine  $E_1$ . Kada se događa prijelaz sa razine  $E_2$  na  $E_1$  nastaje laserska svjetlost (slika 5). Nedostatak ovog sustava je taj što donja razina laserskog prijelaza nije prazna, a to se rješava povećanjem broja energetskih razina na četiri razine.



Sl. 5. Sustav s tri razine [5]

## 4.2. Sustav s četiri razine

Kao što se vidi na slici (6) sustav s četiri razine ima iznad osnovnog stanja ( $E_1$ ) dodatni energetski nivo ( $E_2$ ). Između razina  $E_3$  i  $E_2$  postiže se inverzija napučenosti. Kako bi se olakšalo održavanje inverzije napučenosti dodatni energetski nivo  $E_2$  mora imati kratko vrijeme života, odnosno donji energetski nivo laserskog prijelaza mora se vrlo brzo prazniti. Zbog toga u sustavu s četiri energetske razine nisu potrebne toliko velike snage pumpanja kao kod sustava s tri energetske razine. Ovakav princip se primjenjuje kod lasera koji rade u kontinuiranom radu jer je lasersko djelovanje moguće i kada se većina atoma nalazi u osnovnom stanju ( $E_1$ ) (slika 6).



Sl. 6. Sustav s četiri razine [5]

### 4.3. Inverzija napučenosti

Kao što smo već rekli inverzija napučenosti se postiže kada je broj atoma u pobuđenom stanju veći od broja atoma u osnovnom stanju i postiže se samo u metastabilnoj razini. Postiže se samo u rijetkim slučajevima i rijetke tvari mogu biti iskoristive kao laserski medij.

Načini postizanja inverzije napučenosti:

#### 1. Pobuda elektronima

Pobuda sudarom prvog reda. Pobuda se postiže neelastičnim sudarom atoma i elektrona. Prilikom sudara elektron predaje svoju energiju atomu i taj atom prelazi u pobuđeno stanje. Ova vrsta pobude upotrebljava se kod Ar-ion lasera.

#### 2. Pobuda sudarom drugog reda

Koristi se u plinskim smjesama sa dvije komponente, tj. sa dva atoma (A i B). Da bi funkcioniralo ti atomi moraju imati približno jednake energetske razine. Pobuda se događa u dva koraka. Atom A sudarom sa elektronom prelazi u pobuđeno stanje A\*, zatim sudarom atoma A\* sa atomom B, atom B prelazi u pobuđeno stanje B\*, a atom A\* se vraća u osnovno stanje. Laserski nastaju u atomu B.

#### 3. Optičko pumpanje

To je postupak u kojem se pobuđivanje elektrona na višu energetska razinu događa vanjskim zračenjem atoma ili molekula u različitim agregatnim stanjima.

Kada se događa prijelaz iz pobuđenog stanja u osnovno stanje dolazi do nastajanja kvantnog skoka, tj. emisije fotona čija energija odgovara razlici energetska razina i vrijedi Boltzmanov zakon:

$$N_2 = N_1 \times e^{-hv/kT}$$

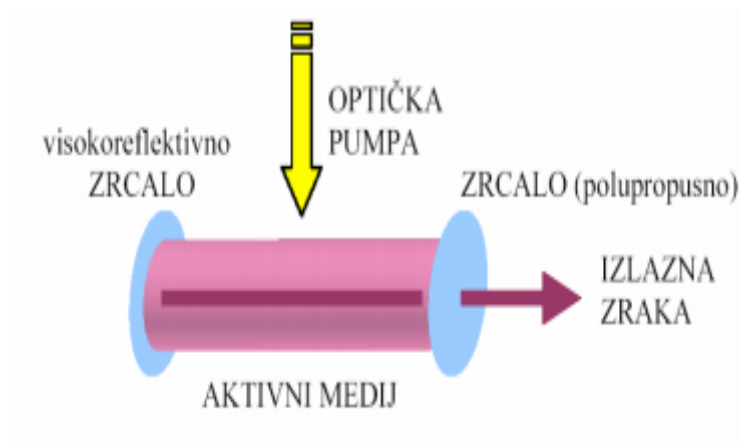
gdje je:

- $h$  – Planckova konstanta ( $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ )
- $\nu$  – frekvencija
- $k$  – Boltzmanova konstanta ( $k_b = 1,3806505(24) \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
- $T$  – termodinamička temperatura.

## 5. Građa i dijelovi lasera

Laser se sastoji od četiri osnovna dijela (slika 7):

- Optičkih rezonatora (visokoreflektivno i polupropusno zrcalo)
- Aktivnog medija
- Laserske/optičke pumpe
- Izlazne laserske zrake



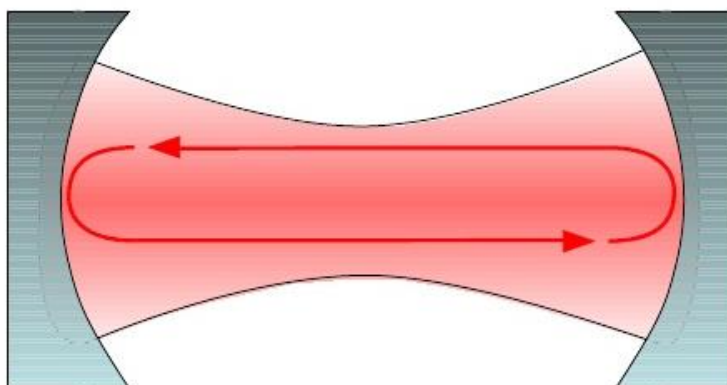
Sl. 7. Dijelovi lasera [12]

### 5.1. Optički rezonator

Sastavljen je od dva paralelna zrcala od kojih je jedno 100% reflektirajuće, a drugo polupropusno, odnosno reflektirajuće oko 90% i ono omogućuje da dio svjetlosti napusti rezonatorsku šupljinu i stvori lasersku zraku (slika 8). Stopostotno reflektirajuće zrcalo ima svrhu da reflektira emitirane fotone u aktivnu sredinu koja se nalazi između ta dva zrcala. Postoji rezonator sa ravnim zrcalima i rezonator sa sfernim zrcalima. Kod ravnih zrcala uvjet je taj da svjetlost koja putuje kroz rezonator mora biti okomita na površinu zrcala da bi ostala unutar rezonatora. Da bi svjetlost konstruktivno interferirala duljina rezonatora mora biti jednaka cjelobrojnom umnošku polovine valne duljine svjetlosti. Sferna zrcala se koriste kada kod fokusiranja zrake koja divergira, odnosno raspršuje se. U rezonatoru fotoni reagiraju sa pobuđenim atomima.

## Resonator

An optical Resonator is an arrangement that allows a beam of light to circulate in a closed path



Sl. 8. Optički rezonator [18]

### 5.2. Aktivni medij

Aktivni odnosno laserski medij određuje na kojoj će valnoj duljini raditi laser i u njemu sa svakim prolazom fotona dolazi do pojačavanja laserske svjetlosti. Pobudom iz vanjskog izvora stvara se inverzija naseljenosti energetske razine, a time i stimulirana emisija fotona i stvaranje laserske svjetlosti. Postoje tri vrste medija u kojima laser funkcioniše: tekućine, plinovi i čvrste tvari. Tekućine su većinom organska kemijska otapala (npr. metanol) u koja su dodana bojila (npr. fluorescein) i ti laseri se nazivaju laseri s bojilima. Plin kao medij, laseri takvog tipa kao lasersku pumpu koriste električno pražnjenje naboja ( $\text{CO}_2$ , kripton, argon, smjesa He-Ne).

### 5.3. Laserska i optička pumpa

Laserska pumpa osigurava energiju potrebnu za rad lasera. Ta energija može biti električno pražnjenje naboja, eksplozija, kemijska reakcija, bljeskalica ili elektrolučna svjetiljka. Ovisno o laserskom materijalu odabire se odgovarajuća vrsta laserske pumpe. Tako se na primjer u laseru s krutim medijem koristi fokusirano svjetlo s laserskom diodom ili ksenon bljeskalicom kao laserskom pumpom, dok plinski laseri rade na principu električnog pumpanja.

## 5.4. Laserska zraka

Laserska zraka je primjer kako se kvantna mehanika može manifestirati u makroskopskim sustavima (slika 9). Postoje dvije vrste čestica u kvantnoj mehanici

- Bose - Einsteinove čestice koje se nazivaju bosoni i
- Fermi - Diracove čestice koje se nazivaju fermioni.

Fotoni se ponašaju kao bosoni i mogu biti u istom kvantnom stanju, dok fermioni to ne mogu. Vrijedi pravilo da što se više bosona nalazi u istom kvantnom stanju to je veća vjerojatnost da će im se još više bosona pridružiti.



Sl. 9. Laserske zrake [20]

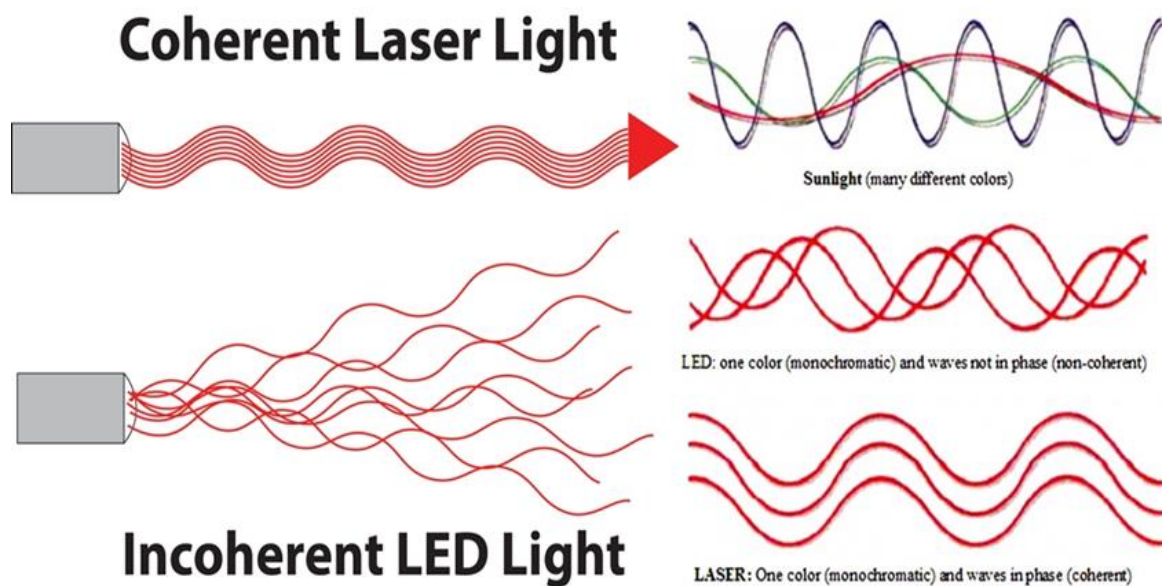
## 6. Karakteristike laserske svjetlosti

Laserska svjetlost se uvelike razlikuje od obične svjetlosti. Glavne karakteristike laserske svjetlosti su:

- Koherentnost
- Monokromatičnost
- Usmjerenost

### 6.1. Koherentnost

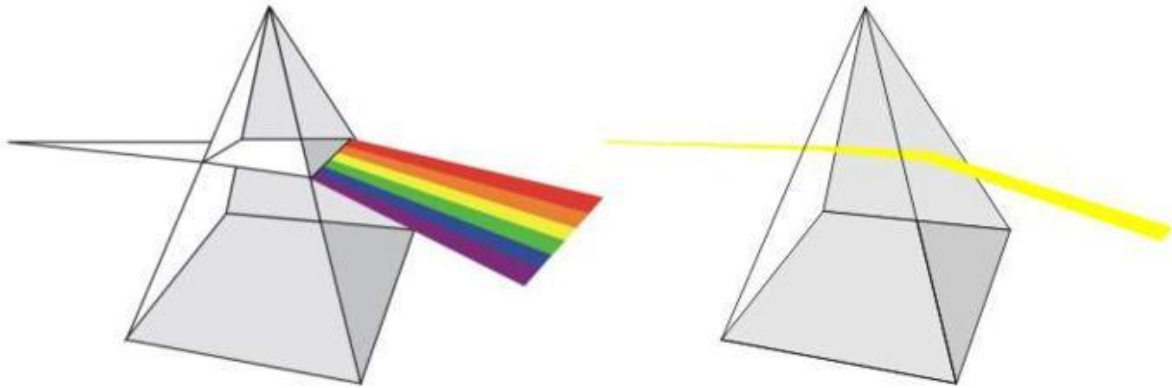
Koherencija općenito se definira kao mjera korelacije faza između različitih točaka vala. Možemo ju objasniti uz pomoć dva čepa koji plutaju na vodi. Izvor valova je kamen bačen daleko od tih čepova i u tom slučaju imamo savršenu koherentnost u gibanju čepova iako oni nisu u fazi (jedan se giba dolje, drugi gore), ali relativna faza između tih čepova u vremenu će ostati konstantna. Što nije slučaj ako ih promatramo kada pada kiša jer kapljice padaju nasumično u različitim vremenskim razmacima i čepovi se gibaju gore-dolje bez korelacije u njihovom međusobnom gibanju. Dakle iz toga možemo definirati koherentnu svjetlost kao svjetlost koja je emitirana iz koherentnih izvora u kojima se vremenski i prostorno podudaraju titraji pojedinih atoma. „Ovo svojstvo laserske svjetlosti možemo definirati kao zračenje povezanih valova istog smjera te između tih valova razlika u fazi je konstantna, pa se stoga energija vala usredotočuje na jednu specifičnu i određenu točku.“ (slika 10)[13]. Obična svjetlost nije koherentna već je raspršena.



Sl. 10. Koherentna i nekoherentna zraka [21]

## 6.2. Monokromatičnost

Odlika monokromatske svjetlosti je ta da sadrži samo jednu valnu duljinu, što podrazumijeva i samo jednu boju. Prilikom prolaska bijele svjetlosti kroz prizmu ona se razlaže na više različitih boja (slika 11). A kada monokromatska svjetlost prolazi kroz prizmu boja ostaje nepromijenjena upravo zbog te jedne valne duljine, odnosno boje koju sadrži.



Sl. 11. Monokromatska svjetlost [22]

## 6.3. Usmjerenost

Laserska zraka se može usmjeriti na velike udaljenosti bez velikog rasipanja prilikom njezinog emitiranja jer je njezina usmjerenost jako gusto koncentrirana. Zraka se može usmjeriti i na vrlo velike udaljenosti, ali će i dalje biti gusto koncentrirana jer se zračenje širi u usko ograničenom paralelnom snopu velike usmjerenosti. Kao primjer usmjerenosti imamo lasersku zraku kojom je mjerena udaljenost Mjeseca. Ona je na površini mjeseca napravila radijus od samo nekoliko metara, dok bi obična svjetlost napravila mnogo puta veći radijus.



## 7. Podjela lasera

Lasere možemo podijeliti u tri skupine ovisno o svojstvima koja se promatraju:

- 1) Prema načinu rada
  - pulsni
  - kontinuirani
- 2) Prema agregatnom stanju optičkog pojačala
  - plinski
  - laseri čvrstog stanja
  - tekući
  - poluvodički
- 3) Prema načinu pobude
  - pobuda optičkim sredstvom
  - pobuda kemijskom reakcijom
  - pobuda sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju

### 7.1. Prema načinu rada

Laseri se prema načinu rada mogu podijeliti na pulsne i kontinuirane lasere.

#### 7.1.1. Pulsni

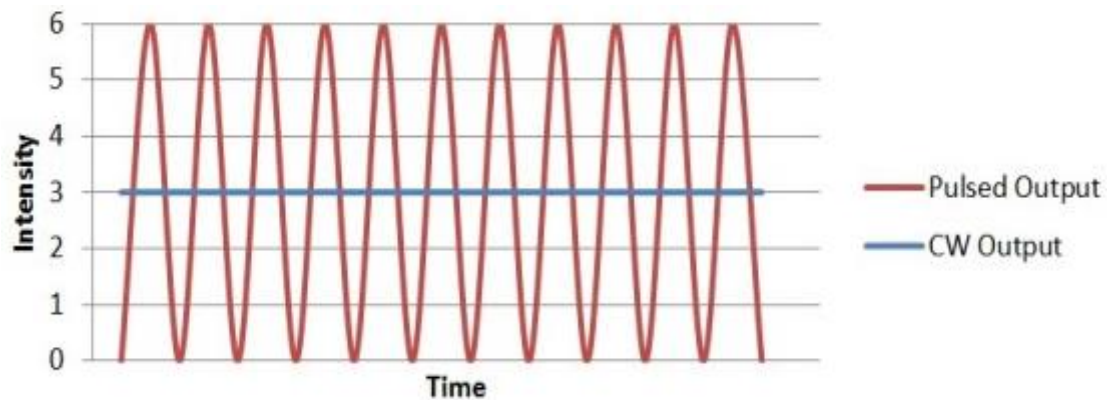
Pulsni laseri koriste potpuno nepropusna zrcala i jedno od tih zrcala se periodički pomiče izvan optičkog puta lasera. Kada se zrcalo ne pomiče sa svoga mjesta ono zadržava zraku unutar rezonatora i ta se zraka zbog stimulirane emisije zračenja pojačava. Uklanjanjem zrcala laser ispušta kratki puls intenzivnog laserskog zračenja (slika 12). Puls se može proizvesti i ako u rezonator stavimo određeno bojilo koje apsorbira zračenje. Apsorpcijom molekule zračenja prelaze u pobuđeno stanje i kada sve dođu u pobuđeno stanje više ne mogu apsorbirati nego propuštaju zračenje. Fotoni ne mogu proći kroz lasersku zraku dok se ne uspostavi inverzija napučenosti u laserskom mediju. Sve dok bojilo ne postane prozirno laserski medij se puni energijom i kada se postigne prozirnost energija iz medija se pretvara u lasersku zraku. Takvo nastajanje laserskih pulseva naziva se Q - prekidanje (engl. Q - switching). Laser može pulsirati u pulsevima od tek 1 fs ili 1 as (fs - femtosekunda,  $1 \text{ s} = 10^{15} \text{ fs}$ ; as – atosekunda,  $1 \text{ s} = 10^{18} \text{ as}$ ). Takve lasere moguće je pronaći samo u znanstvenim laboratorijima.



Sl. 12. Pulsna laserska zraka [12]

### 7.1.2. Kontinuirani

Kontinuiranom laseru (cw - continuouswave laser) optičko pojačalo nalazi se između dva paralelna zrcala (rezonator). Jedno zrcalo je 100% nepropusno, odnosno reflektirajuće, dok drugo zrcalo propušta malu količinu svjetla (manje od 1%). Unutar rezonatora dolazi do reflektiranja snopa, energiji zračenja raste gustoća i kada se postignu uvjeti za lasersko emitiranje, snop izlazi iz laserske šupljine i prolazi kroz polupropusno zrcalo. Dakle kod kontinuiranih lasera svjetlost je konstantna u vremenu, dok se kod pulsnih mijenja periodički (slika 13).



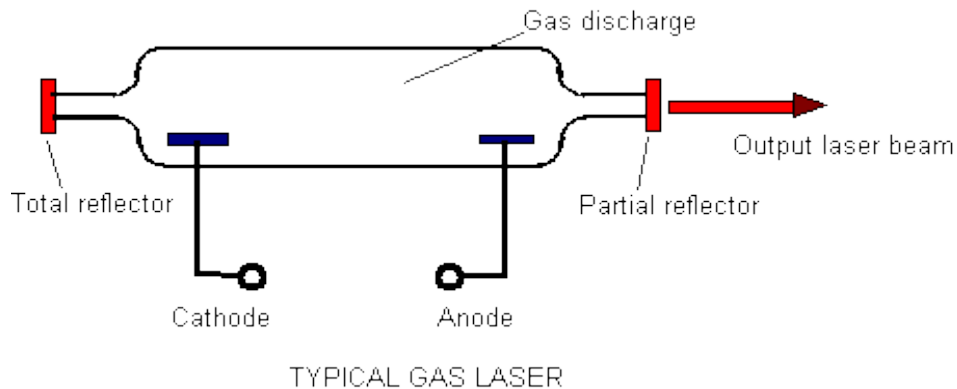
Sl. 13. Kontinuirana i pulsna zraka [27]

## 7.2. Prema agregatnom stanju optičkog pojačala

Prema agregatnom stanju optičkog pojačala laseri se mogu podijeliti na: plinske, laseri čvrstog stanja, tekući i poluvodički laseri.

### 7.2.1. Plinski

Plinski laseri se dodatno mogu podijeliti na ionske, atomske, kemijske i molekularne. Kao što im i samo ime kaže, plinskim laserima radni medije je u plinovitom stanju te pod određenim tlakom i smješten je u laserskoj cijevi (slika 14). Električnim pražnjenjem kroz plin u cijevi ostvaruje se pobuđivanje atoma (slika 15). Najčešće korišteni plinski laseri su CO<sub>2</sub> laser, He-Ne (helij-neon) laser i argon laser.



Sl. 14. Shema plinskog lasera[28]

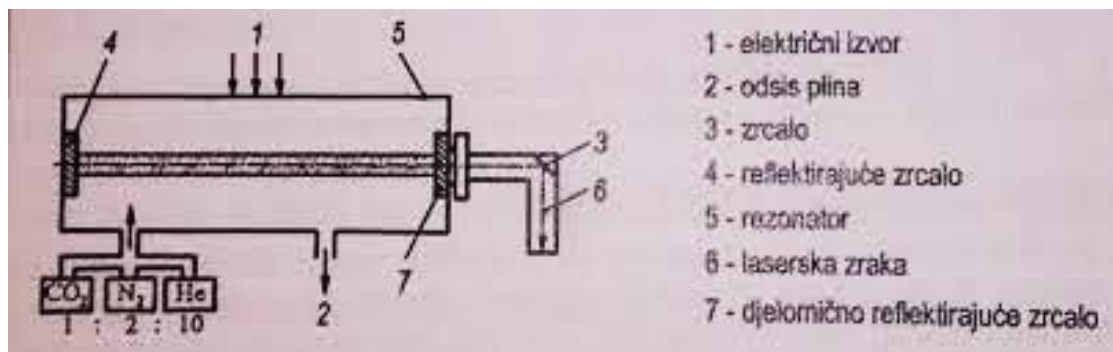


Sl. 15. Plinski laser [29]

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

Kao aktivni medij koristi molekule ugljikova dioksida. Radi u području molekulskog spektra. Za pobudu se koriste toplinsko, optičko i kemijsko pumpanje te električni izboj. Ovi laseri emitiraju svjetlost valne duljine od 10,6  $\mu\text{m}$ . Rezonator je ispunjen mješavinom

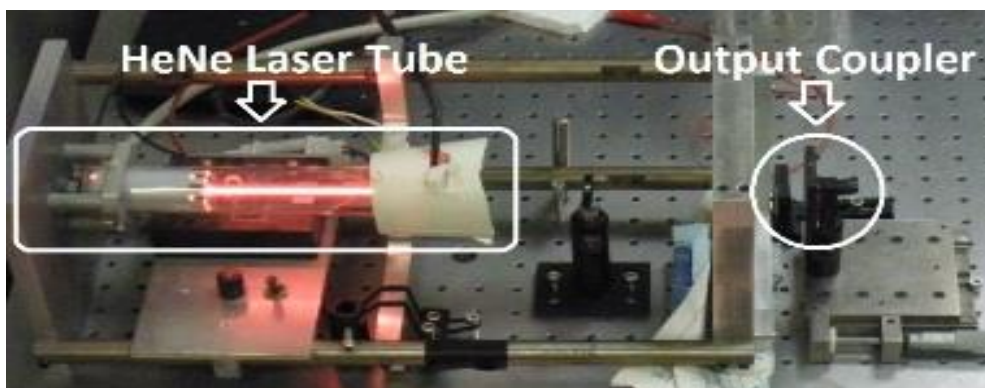
ugljkova dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dušika ( $\text{N}_2$ ) i helija ( $\text{He}$ ) (slika 16). Sastav mješavine ovisi o vrsti, snazi i načinu rada lasera. Nečistoće u mješavini stvaraju probleme u radu lasera, odnosno smanjuju mu izlaznu snagu, povećavaju potrošnju laserskih plinova i sl. Tijekom laserske reakcije molekule dušika sudaraju se sa molekulama  $\text{CO}_2$  i predaju im energiju. Molekule  $\text{CO}_2$  se pobuđuju na više energetske stanje pomoću pumpanja visokog napona od 30 kV. Prelaskom sa višeg stanja u niže emitiraju se fotoni i stvara se laserska zraka. Sudarom s atomima helija, molekule  $\text{CO}_2$  se vraćaju u početno stanje i sve kreće od početka. Proces se izvodi na tlaku od 100 do 250 hPa. Energija koja je višak i ne može se upotrijebiti pretvara se u toplinsku energiju i odvodi iz sustava. Potrebno je osigurati temperaturu do 200 °C da bi laser radio efikasno. Maksimalna snaga  $\text{CO}_2$  lasera je 50 kW.



Sl. 16. Shema  $\text{CO}_2$  lasera [30]

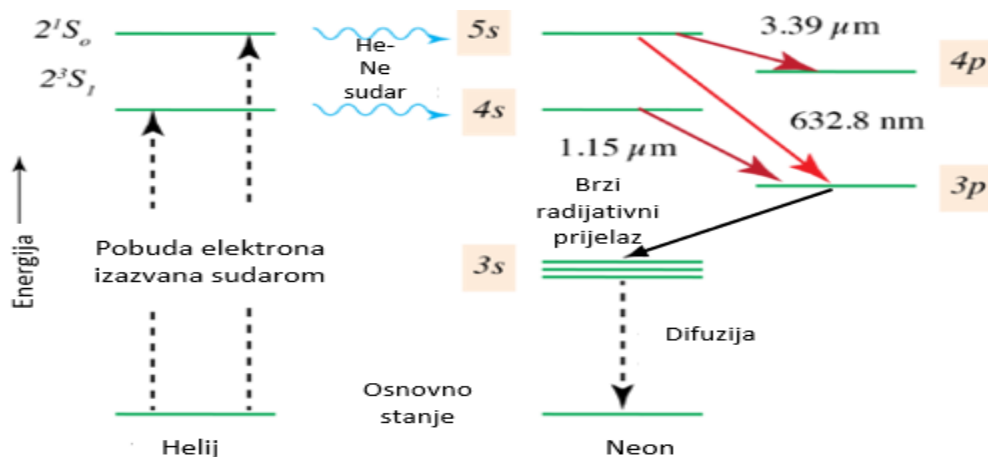
#### 7.2.1.2. He-Ne (helij-neon) laser

He-Ne laser je plinski laser koji se sastoji od smjese helija i neona u odnosu 80/20 u korist helija i smještena je u staklenoj cijevi (slika 17). Pobuda se izaziva izmjeničnom strujom. Konstruirao ga je Ali Javan sa suradnicima 1961. godine i bio je prvi plinski laser sa kontinuiranim načinom rada. Daje svjetlost valne duljine 632,8 nm.



Sl. 17. He-Ne laser [31]

Smjesa helija i neona je aktivni medij i nalazi u staklenoj cijevi (pod niskim tlakom). Laser se sastoji od četiri energetska nivoa. Atomi helija se pobuđuju i sudaraju se atomima neona te prelaze u stanje koje zrači valnom duljinom 632,8 nm. Elektrode kojima se dovodi visoki napon nalaze se blizu krajeva cijevi. Napon stvara elektrone koji ubrzavanjem prouzrokuju sudare atoma helija i neona, a samim time ti atomi prelaze u pobuđeno stanje. Atomi helija se iz pobuđenih stanja relaksiraju u niža stanja emitiranjem fotona ili sudarima s drugim atomima. Ako se relaksiraju u 2s stanje oni se ne mogu vratiti u svoje osnovno (1s) stanje jer je prilikom emitiranja ili apsorpiranja fotona potrebno promijeniti kvantni broj kutne količine gibanja za 1 (foton ima kvantni broj kutne količine gibanja 1, a s-orbitale 0). Stanje 2s He je zbog tog metastabilno stanje. Energija 2s stanja helija je približno jednaka energiji stanja 4s neona. Sudarom atomi helija predaju energiju atomima neona pri čemu oni prelaze u 4s stanje (slika 18). Stimuliranom emisijom atomi neona emitiraju fotone i prelaze u neko drugo stanje. Najintenzivniji je prijelaz u 3p stanje i tada se emitiraju fotoni valne duljine 632,8 nm (crvena svjetlost). Ovaj laser može emitirati i žutu (vidljivu svjetlost) i zelenu, kao i UV i IR.



Sl. 18. Energetski nivoi He-Ne lasera [5]

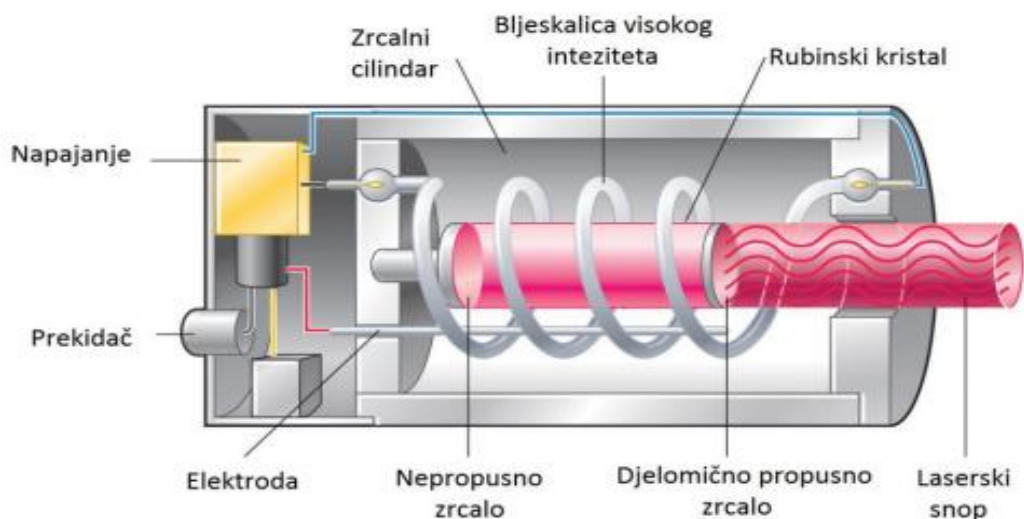
### 7.2.2. Laseri čvrstog stanja

Čvrsto tijelo ovisno o strukturi može biti kristal ili amorfno tijelo. Ako su atomi, ioni ili molekule raspoređene nasumično onda je riječ o amorfnom tijelu (staklo, plastika, smola i sl.), a ako su raspoređeni tako da tvore kristalnu rešetku onda je riječ o kristalu. Kao aktivni medij koriste se kristali ili stakla, najčešće u obliku štapića. Oni apsorbiraju svjetlost, ali ju ne luminisciraju, odnosno emitiraju već energiju predaju rešetci. Da bi se došlo do luminiscencije potrebno je dodati primjese iona prijelaznih i plemenitih metala. Pobuda se izvodi s intenzivnim izvorom svjetla, najčešće se to radi sa ksenonskim bljeskalicama ili sa

LED diodama u zadnje vrijeme. Laseri čvrstog stanja emitiraju svjetlost valne duljine 1064 nm. Prvi laser čvrstog stanja bio je rubinski laser, on se i danas koristi, a najpoznatiji laser ove vrste je Nd:YAG laser.

#### 7.2.2.1. Rubinski laser

Izumio ga je Theodore H. Maiman 1960. godine i bio je to prvi konstruirani laser. Aktivni medij u laseru je kristalni štapić sintetskog rubina (slika 19). Rubin se sastoji od aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i atoma kroma  $\text{Cr}^{3+}$ . Ružičaste je boje zbog  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , a ako povećavamo koncentraciju kromovih iona boja će prijeći iz ružičaste u crvenu. Rubinska šipka mora biti homogena i bez ikakvog oštećenja. Rubne površine moraju biti rezane i optički polirane pod kutom od  $60^\circ$  ili  $90^\circ$  jer je tada moguće postići najbolju stimuliranu emisiju. Daje zraku valne duljine do 704,1 nm. Kao pubuđivač koristi se plinska lampa punjena ksenonom.

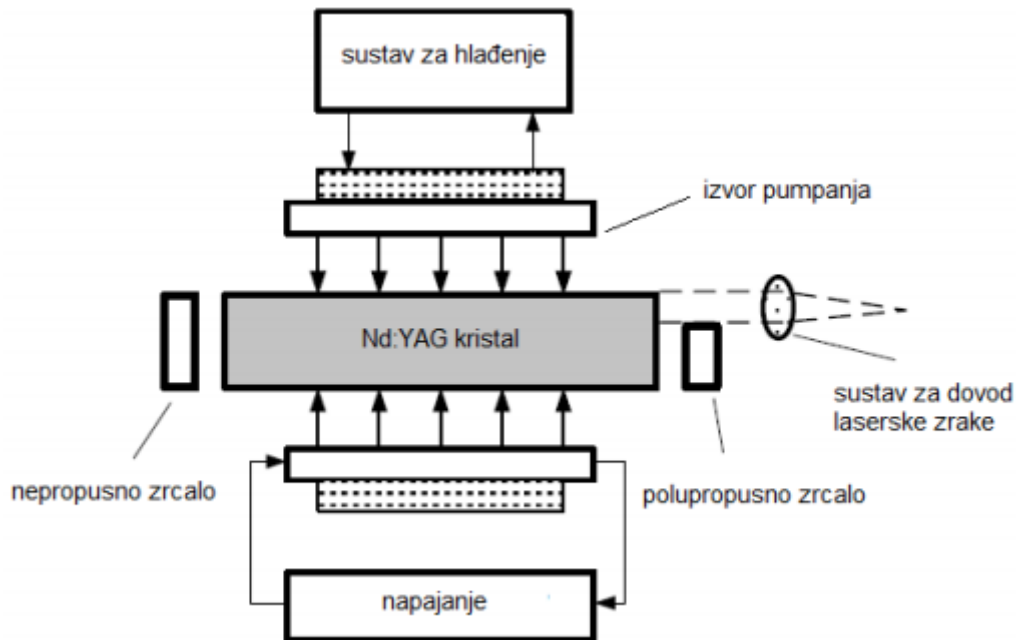


Sl. 19. Shema rubinskog lasera [32]

#### 7.2.2.2. Nd:YAG laser

Nd:YAG laser ima krutu jezgru i sastoji se od štapića itrij-aluminij-granata (YAG) sa atomima neodimija ( $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Zbog tih štapića naziva se još i štapni laser. Najčešće je korišteni laser sa krutim medijem i emitira IC svjetlost valne duljine 1,06  $\mu\text{m}$ . Aktivni medij u laseru su trostruko ionizirani ioni neodimija ( $\text{Nd}^{3+}$ ). Može se koristiti i itrij (Yb) umjesto neodimija pa se takav laser onda naziva Yb:YAG laser. Šipke u laseru su duge nekoliko stotina milimetara, a promjer im je nekoliko milimetara. Pobuda se ostvaruje intenzivnim izvorom svjetla, najčešće je to ksenonska ili kriptomonska bljeskalica ili laserska dioda (slika 20). Kod pumpanja sa laserskim diodama veći je stupanj djelovanja i duži vijek trajanja. Ova

vrsta lasera ima veliku primjenu u medicini kod zahvata na svim dijelovima tijela, ali također se uvelike koristi kao laser za robotsko zavarivanje te ima veliku snagu.



Sl. 20. Shema Nd:YAG lasera [11]

### 7.2.3. Tekući laseri

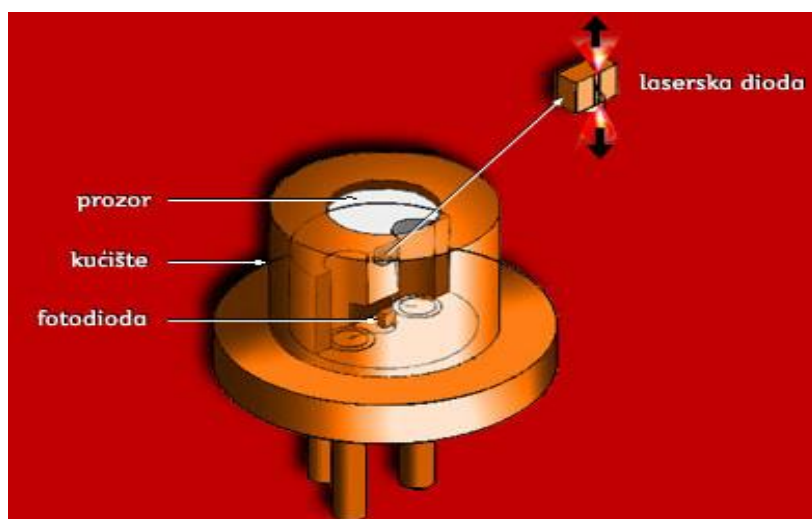
Uz čvrsta tijela i plinove, tekućine također mogu biti upotrebljavane kao laserski medij. Imaju dosta prednosti, kao što je jednostavnije hlađenje koje se događa cirkulacijom aktivnog medija. Još jedna od prednosti je ta da dozvoljavaju izmjenu koncentracije aktivnih iona. Nedostatak ovih lasera je promjena indeksa loma zbog velikog koeficijenta termičke ekspanzije kod tekućeg medija. Zbog termičke promjene i strujanja tekućine stvara se nehomogenost u indeksu loma, a samim time smanjuje se i kvaliteta lasera. Kod izrade tekućih lasera najvažnije je izabrati materijal koji u tekućoj fazi pokazuje luminiscenciju. Kao aktivni medij koriste se organske tekućine jer imaju jaku luminiscenciju, dok je kod anorganskih ona slabija. Tekućine su u laseru su vrlo viskozne i više liče na staklo nego na tekućinu. Njihovo svojstvo je širok spektar emisije, koji dozvoljava prilagodbu oscilacija lasera. Ovakvi laseri se još nazivaju i obojeni laseri ili dye laseri. Prvi laserski efekt na tekućini ostvaren je koristeći helatni spoj trovalentnog europija kao aktivni medij otopljen u organskom otapalu, a proizveli su ga Lempicki i Samelson 1963. godine.

#### 7.2.4. Poluvodički laseri

Poluvodički ili diodni laser je mali kristal proizveden sa jako velikom točnošću i podijeljen u dva osnovna područja, od kojih svaki ima svoja električna svojstva. Na n-strani poluvodiča nalazi se višak elektrona i taj višak predstavlja nosioce struje, dok se na p-strani nalazi višak šupljina koji predstavlja nedostatak elektrona. Ako na p-stranu dovedemo pozitivan napon, a na n-stranu negativan napon, elektroni i šupljine poteći će jedni prema drugima i početi sudarati u ultratankom prostoru koji se naziva kvantna jama. Tu se oni rekombiniraju i dolazi do emisije fotona. Na krajevima dioda nalaze se visokoreflektirajuća zrcala i dolazi do emitiranja koherentnih fotona, odnosno stvara se laserska zraka. Boja svjetlosti ovisi o svojstvima poluvodičkog spoja, odnosno o iznosu energijskog rascjepa (engl. band-gap).

Ovi laseri emitiraju kontinuirano zračenje i ono je malih snaga (do 10 0mW) i to najčešće u infracrvenom i crvenom dijelu spektra. Ako spojimo više lasera zajedno na istu momolitnu podlogu možemo proizvesti snagu i do 100 W. Zbog svoje male konstrukcije, jednostavne tehnologije i niske cijene imaju široku upotrebu i masovno se proizvode. Primjena im je široka i koriste se npr. u čitačima cijena u trgovinama, kao čitači CD-ova i DVD-ova, kao laserski pokazivači, instrumenti za mjerenje duljine i slično.

Kućičte lasera sa stražnje strane ima tri električna kontakta (nožice), a sa prednje strane se nalazi tanki stakleni prozor kroz koji prolazi zraka. U kućičtu je smješten laserski čip dimenzija oko 0,5x5x300 mikrona i integrirana fotodioda isto mikronskih dimenzija (slika 21). Fotodiodom se kontrolira valna duljina i snaga zračenja lasera optoelektričnom povratnom vezom.



Sl. 21. Prikaz poluvodičkog lasera [34]



## 7.3. Prema načinu pobude

### 7.3.1. Pobuda optičkim sredstvom

Optičko sredstvo je plazma, vakuum ili neka prozirna tvar (kojom se može širiti svjetlost) koja se sastoji od elektrona i iona dobivenih električnim izbojem. Osnovno svojstvo optičkog sredstva je propusnost elektromagnetskih valova koja ovisi o međudjelovanju fotona i molekula u tom optičkom sredstvu. Inverzija naseljenosti se dobiva tako da se atom koji je neutralan prvo ionizira u sudaru sa elektronom i zatim se taj pozitivni ion u sudaru sa elektronima pobuđuje na više energijske razine.

### 7.3.2. Pobuda kemijskom reakcijom

Ova vrsta pobude koristi se kod plinovitih laserskih medija koji se sastoji od dvije ili više kemijski aktivnih komponenti. Ovi laseri koriste te kemijske reakcije radi postizanja inverzije naseljenosti. Prednost im je ta što nije potrebna nikakva vanjska pobuda, odnosno djelovanje, već se pobuda dobiva samom kemijskom reakcijom. Do reakcije dolazi cijepanjem komponenata, ali moguće ju je započeti i sa iskrom. Oslobođena energija prouzrokuje vibraciju nastalih molekula.

### 7.3.3. Pobuda sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju

Ovo je najefikasniji način pobude sa sve plinske medije. Propuštanjem struje kroz plin postiže se dovoljno intenzivna emisija koja se bazira na međusobnim sudarima elektrona sa atomima ili molekulama. Energija pobude je vidljiva u UV području, pa se sukladno tome tamo događa i emisija, odnosno u području gdje je vidljiva energija titranja tamo je i emisija. Vibracijskom pobudom mijenja se titranje atoma u molekuli te su energija titranja i emisija u IC području. Rotacijskom pobudom molekule rotira se cijela molekula. Te pobude su nižih energija i pripadaju mikrovalnom području.

## 8. Primjena lasera

Laseri se danas primjenjuju u raznim područjima. Primjena im je jako široka zbog njihove učinkovitosti i raznolikosti. Očekuje se da će njihova primjena u budućnosti samo rasti. Prema primjeni lasere ćemo podijeliti u slijedeće skupine:

- Primjena u industriji
- Primjena u znanosti i tehnologiji
- Primjena u vojne svrhe
- Primjena u medicini
- Primjena u svakodnevnom životu
- Primjena u zaštiti

### 8.1. Primjena u industriji

Primjena lasera u industriji je velika, a najčešće se koriste za rezanje i bušenje materijala (metal, drvo, papir i dr.), za zavarivanje metala, mjerenje udaljenosti predmeta, 3D modeliranje.

Prednost obrade materijala laserom naspram drugih je:

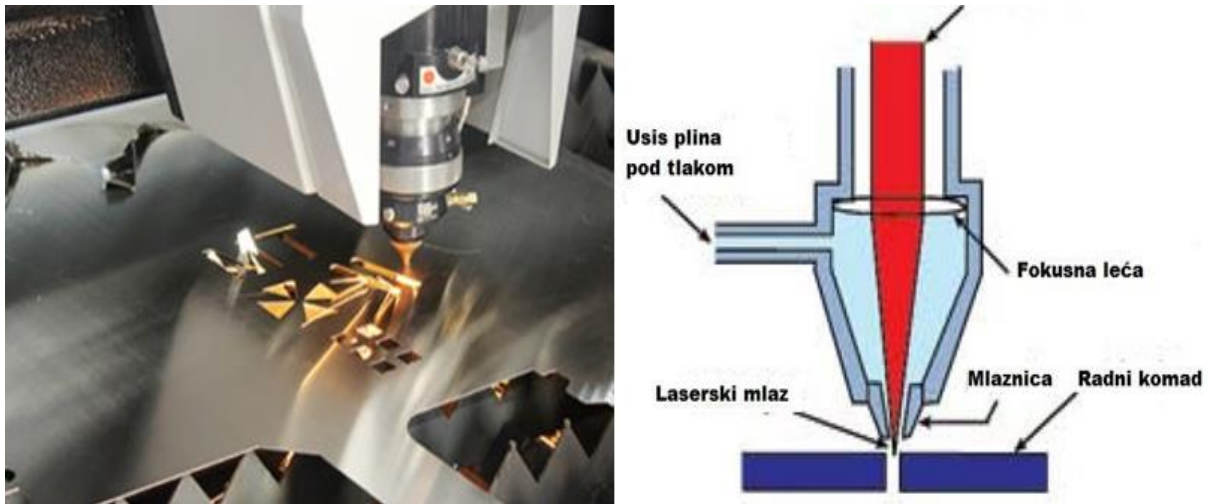
- Velika čistoća i nema kontaminacije
- Većina parametara se kontrolira elektronički, odnosno strojno
- Nema pritiska na površinu koju se osvjetljava

#### 8.1.1. Rezanje i bušenje materijala laserom

Velika snaga i visoki intenzitet pulsnih lasera, koji se danas proizvode, omogućava nam njihovu upotrebu u obradi materijala, ponajprije u rezanju i bušenju. S obzirom da pulsevi lasera traju kratko i da je interakcija medija i materijala vrlo kratka prilikom rezanja ili bušenja materijala ne dolazi do taljenja ili deponiranja, već se ispara i ostaju nam čisti rubovi reza ili rupe. Rezanje laserom je toplinski proces, u kojem je rez ostvaren zagrijavanjem fokusiranom laserskom zrakom u kombinaciji sa strujanjem aktivnog ili inertnog plina. Zraka tali materijal na koji djeluje, a mlaz plina pod tlakom otpuhuje rastaljeni materijal od zarez (slika 22). Rezanje se ostvaruje pomicanjem radne glave po željenoj putanji. Prednosti rezanja

laserom su dakle: bolja preciznost, laserska zraka se ne troši, jednostavnije rezanje, nema taljenja materijala, mogu se rezati sve vrste materijala. Nedostaci su pak visoke investicije i troškovi.

Postoje tri vrste laserskog rezanja: lasersko rezanje kisikom, lasersko rezanje isparavanjem i lasersko rezanje taljenjem.



Sl. 22. Primjer i shema rezanja laserom [36]

### 8.1.2. Zavarivanje laserom

Za zavarivanje laserom koristi se CO<sub>2</sub> laser sa velikom snagom do 12 kW. Zavarivanje se ostvaruje usmjeravanjem laserskog snopa u jednu točku da bi se dobila dovoljna snaga za topljenje dva ili više spojenih materijala (slika 23). Taj spoj se odmah i hladi da bi što čvršći. Zbog velikih snaga CO<sub>2</sub> lasera za fokusiranje zrake prilikom zavarivanja ne koriste se obična ogledala, već se koriste vodom hlađena ogledala. Zavarivanje se obavlja uz primjenu inertnih plinova kao što su helij, neon, argon itd. čija je uloga zaštita mjesta i područje oko vara, zaštita optike od topline i para. Prednosti laserskog zavarivanja su te da je moguće zavarivati materijale vrlo malih debljina, mogu se zavarivati sve vrste materijala, velika brzina zavarivanja (do 10 m/min), vrlo velika kvaliteta vara, povoljna cijena i dr. Zavarivanje laserom ostvaruje se na dva načina: zavarivanje taljenjem i zavarivanje protaljivanjem. Lasersko zavarivanje ima veliku ulogu u automobilskoj industriji.



Sl. 23. Usporedba laserskog i normalnog vara [37]

## 8.2. Primjena u znanosti i tehnologiji

Laseri su u današnje vrijeme vrlo važan kotačić u za istraživanje i napredak znanosti i tehnologije. Primjenjuju se u istraživanju i unapređivanju telekomunikacija, astronomiji, spektroskopiji, fotokemiji, nuklearnoj fuziji, holografiji i dr. Objasniti ću samo neke od brojnih primjena u znanosti i tehnologiji.

### 8.2.1. Holografija

Holografija je metoda kojom se na fotografskoj ploči stvaraju i reproduciraju 3D slike primjenom lasera (koherentnom svjetlosti). Fotografska ploča registrira raspored intenziteta i sve smjerove i faze svjetlosne zrake, za razliku od fotografija u kojima se registrira samo intenzitet svjetlosnih zraka. Dakle holografija nam omogućava pohranjivanje 3D strukture snimljenog objekta (slika 24). Holografiju otkrio je mađarski znanstvenik Dennis Gabor 1948. godine, ali tek je izum lasera kasnijih godina omogućio njezinu primjenu. Holografija je omogućila i novi princip rada računala na bazi optičkih memorija. Riješila je mnogo problema u fizici tehnici, ali je zapravo rijetko korištena jer je proces vrlo složen i skup.



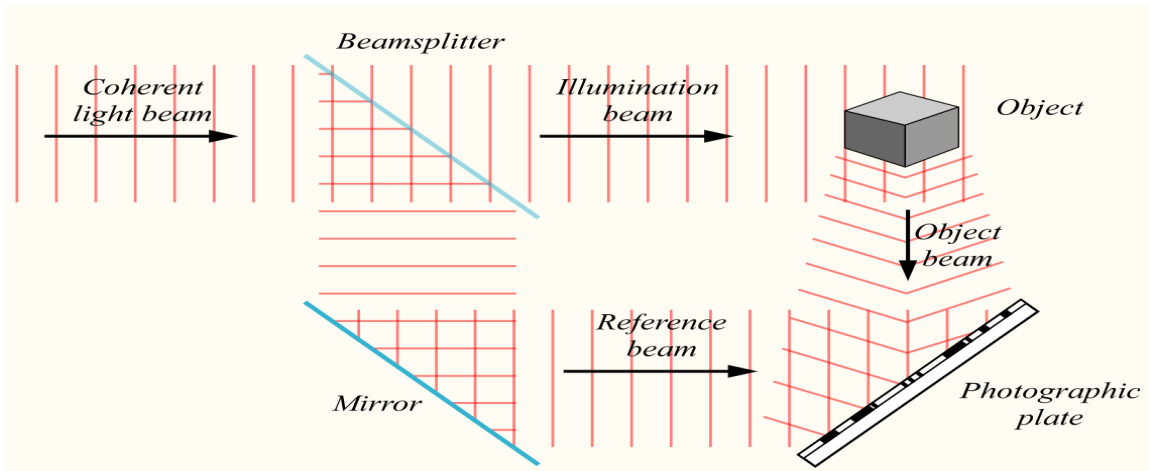
Sl. 24. Primjer holograma [39]

Princip stvaranja holograma je slijedeći: laserom osvjetljavamo željeni objekt, dio svjetla kojim se osvjetljava objekt pada i na fotoploču. Na fotoploči dolazi do interferencije (miješanja, sukoba) dva polja svjetla (izvornog koherentnog i raspršenog od snimanog predmeta). Na hologramu (fotoploči) se ne vide konture predmeta, nego interferencije koje u svojim svijetlim i tamnim linijama sadržavaju sve informacije o smjeru, fazi i intenzitetu svjetla sa snimljenog predmeta.

Kako bi se iz holograma opet rekonstruirala slika, mora se ponoviti identičan postupak kakav je napravljen pri dobivanju tog holograma. „Kada se snimljeni hologram rasvijetli jednakim ravnim referentnim valom koji pada na nj pod jednakim kutom kao i pri snimanju, svjetlo kroz hologram djelomično prolazi bez ogiba, kao val nultog reda, a djelomično se ogiba formirajući valove 1. reda. Jedan val 1. reda daje realnu sliku objekta, a drugi val 1. reda virtualnu sliku. Obje slike su trodimenzionalne, s time da se realna slika može dalje registrirati (snimiti) fotografskim postupkom, a virtualna ne.“(slika 25). [38]

Reprodukcijom holograma dobiva se slika koja je iste veličine kao objekt, odnosno vjerna je originalu. Ovisno o kutu iz kojeg se promatra hologram moguće je vidjeti i predmete koji stoje jedan iza drugoga. Gledatelj koji gleda hologram ima dojam da kroz okvir holograma gleda svijetli predmet.

Svako mjesto na hologramu sadrži sliku objekta, što bi značilo da ako prerežemo hologram na dva jednaka dijela, nećemo izgubiti pola slike, već se na svakoj polovici može vidjeti cijeli objekt. Daljnjim dijeljenjem holograma i dalje će na svakom komadiću ostati barem gruba slika objekta. Ovo svojstvo holograma daje mu veliku prednost nad običnim fotografijama jer ako i dođe do neke greške na fotoosjetljivoj emulziji još uvijek ćemo imati dovoljno kvalitetnu sliku, dok ako se dogodi neko oštećenje negativa, fotografija je zauvijek izgubljena.



Sl. 25. Shema snimanja holograma [40]

### 8.2.2. Primjena u astronomiji

Laseri u astronomiji su vrlo važni već sada, a u budućnosti će vjerojatno imati još veću važnost. Pomoću lasera izmjerena je udaljenost Mjeseca od Zemlje. Jedna od prvih ekspedicija na Mjesec ostavila je na njegovoj površini tzv. retroreflektor. Retroreflektor je zapravo zrcalo koje reflektira svaku zraku koja je udarila u njega u istom smjeru iz kojeg je došla. Pokus je izveden tako da je na jedan veliki teleskop (promjera 2 m) montiran vrlo osjetljivi detektor svjetlosnog zračenja (brojač fotona). Kroz teleskop je prema retroreflektoru ispaljen vrlo kratak i snažan puls laserske zrake. Snop je bio toliko snažan da je na površini Mjeseca obasjao površinu od samo 2 km oko retroreflektora (slika 26). Mjerenjem vremena potrebno da zraka dođe do Mjeseca i natrag izračunata je udaljenost Mjeseca od Zemlje u tom trenutku.

Nakon toga lansiran je u Zemljinu orbitu satelit opremljen sa mnogo retroreflektora. On kruži po točno poznatoj putanji i uz pomoć njega može se na površini Zemlje u nekoliko centimetara odrediti položaj lasera koji je odaslao zraku prema satelitu. On se koristi za praćenje pomicanja kontinenata i navigaciju brodova.

Laser se nameće i kao idealno sredstvo za komunikaciju u svemiru, zbog svoje mogućnosti prijenosa velikog broja informacija. Na Zemlji za komunikaciju laserima potrebni su posebni svjetlovodi, odnosno optička vlakna, jer ima dosta smetnji poput padalina, magle i sl. U svemiru nema tih smetnji i moguće je prenositi informacije bez samo sa laserskim zrakama.

Uvelike se radi i na tome da se laseri koriste i kao pogonske čestice raketnih motora. Takav pogon smanjio bi potrošnju goriva, a u nekim slučajevima svemirski brodovi ne bi ni morali imati gorivo u sebi, već bi se on navodio uz pomoć lasera sa zemlje. No i dalje je veliki put ispred ostvarivanja takvog cilja.



Sl. 26. Laserska zraka odaslana prema Mjesecu [42]

### 8.3. Primjena u medicini

Lasere se uvelike koriste i u medicini. Najčešće se upotrebljavaju u kirurgiji, oftamologiji, stomatologiji, dermatologiji za uklanjanje tetovaža (slika 27).

Lasere u kliničkoj upotrebi dijele se prema sljedećim kriterijima:

#### a) Dijelovi tijela

Ova podjela dijeli lasere na površinsku i unutar tjelesnu primjenu. Površinska primjena odnosi se na kožu i vidljivu sluznicu. Unutar tjelesna primjena obuhvaća otvorenu kirurgiju i endoskopiju, šuplje organe, krvožilni sustav i tjelesne šupljine.

#### b) Laserski postupci

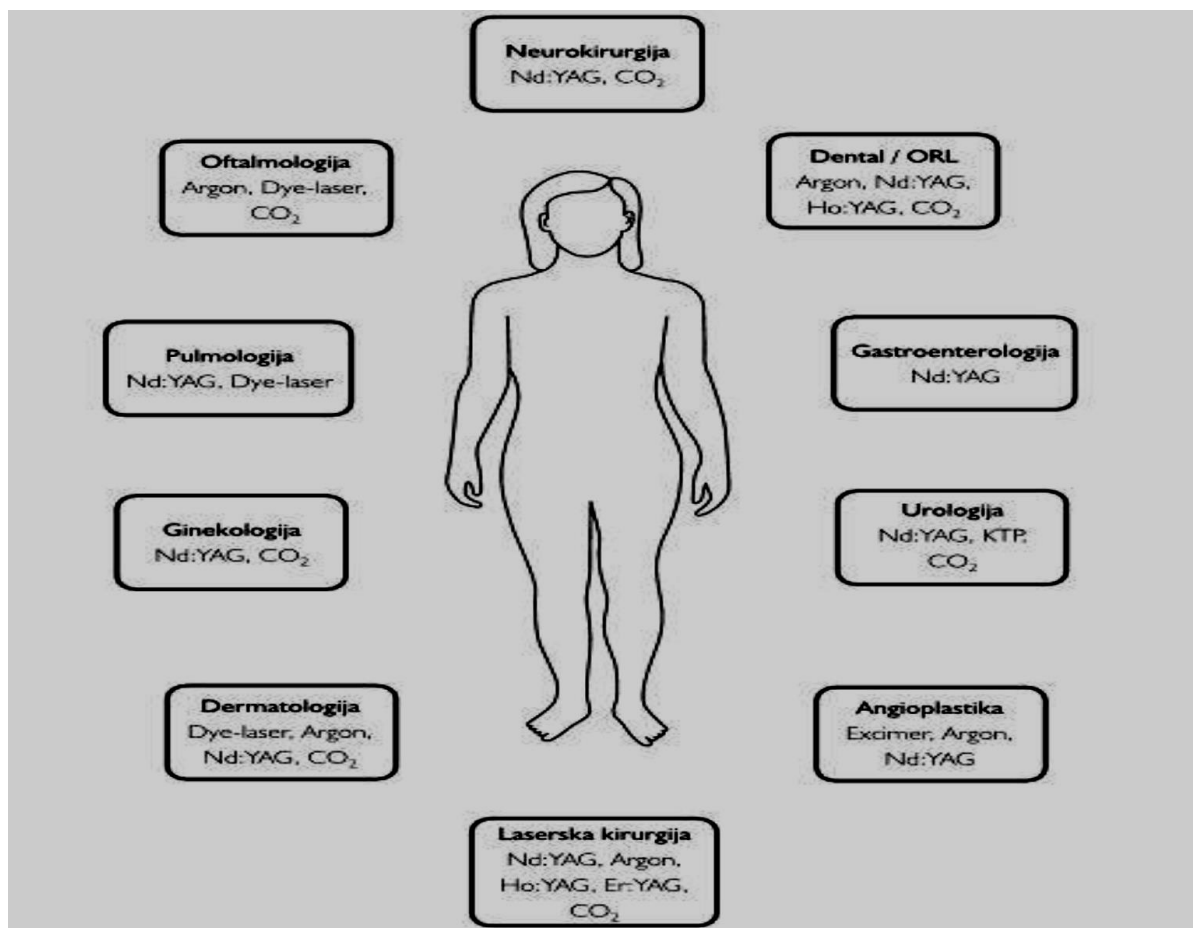
Postoje četiri laserska postupka: fotokemijska reakcija, laserski inducirana termoterapija, „fotografiranje“ i rezanje, tj. uklanjanje tkiva.

Laserski induciranom termoterapijom (LITT) je moguća promjena svojstva tkiva zagrijavanjem preko 60 °C uslijed čega dolazi do koagulacije.

#### c) Način primjene

Lasere koristimo u terapiji i dijagnostici. U terapiji laser se koristi kao kirurški instrument za pripremu, srašćivanje ili rezanje tkiva za vrijeme operacije.





Sl. 27. Podjela medicinskih lasera po disciplinama [43]

U Sjedinjenim Američkim Državama 1961. godine izvedena je prva laserska operacija. Radilo se o uklanjanju retinalnog tumora sa rubinskim laserom. U laboratoriju profesora P. Heringa na Sveučilištu u Düsseldorfu obavljaju se operacije rezanja kostiju pulsним CO<sub>2</sub> laserom. Rezanje se obavlja uz pomoć računalno vođenog fokusiranog laserskog snopa koji može obrezati koštano tkivo bilo kojeg traga rezanja. Rezanjem prsnog koša na ovaj način, kosti se relativno lako razdvoje, a zarastanje i zacjelivanje je puno brže i bezbolnije. Osim rezanja laserom se može obavljati i bušenje tkiva, riječ je o mikro i nano rupicama u raznim tankim slojevima.

Nadalje laseri se upotrebljavaju i za estetsko-korektivne zahvate, ali imaju jako važnu ulogu i u oftamologiji, gdje se laserska zraka upotrebljava za uklanjanje dioptrije. Glavno svojstvo lasera je da ulazi u oko, a da ga ne oštećuje i time je ova operacija postala rutinski zahvat u oftamologiji.

U stomatologiji se koriste razne vrste lasera, a snažniji laseri se primjenjuju na zubnu caklinu i dentin. Nd:YAG laseri se najčešće upotrebljavaju za zubnu caklinu. Laseri se koriste

dakle za izbjeljivanje zubi, uklanjanje zubnih naslaga, pripremanje zuba za punjenje ispunama, za uklanjanje bakterija prilikom čišćenja zubnih kanala i mnoge druge primjene.

U dermatologiji laseri se najčešće primjenjuju za tretiranje tumora, korigiranje ožiljaka i za uklanjanje tetovaža. Za uklanjanje tetovaža primjenjuju se CO<sub>2</sub> laseri. Laserska svjetlost se apsorbira selektivno u pigmentu te dolazi do zagrijavanja i pucanja čestica pigmenta. Čestice su dovoljno male da ih naše tijelo može izbaciti iz organizma putem imunološkog sustava. Laser ima točno određenu valnu duljinu i selektivno uništava pigment boje tetovaže, ali pri tome ne uništava okolno zdravo tkivo. Postupci uklanjanja tetovaže nisu bezbolni, već se prilikom tretmana osjeća peckanje kože na koju se djeluje (slika 28). Puno je lakše ukloniti crnu tetovažu od tetovaže u boji, jer crni pigment apsorbira sve valne duljine.



Sl. 28. Lasersko uklanjanje tetovaže [44]

#### 8.4. Primjena u vojne svrhe

Vojska uvijek traži nove načine i tehnologije kako napraviti što efikasnije i bolje oružje ili što bolju obranu. Laser je zato vrlo zanimljiva tehnologija za vojsku jer se može koristiti u svim područjima u vojsci, kako za naoružanje, tako i za obranu od npr. raketa. No da bi se potencijal lasera do kraja iskoristio potrebno ga je razviti da može djelovati na veću daljinu, jer mu za to, za sada, smeta atmosfera, odnosno CO<sub>2</sub>, vodene pare, kisik i dušik. Izvan atmosfere se laseri mogu nesmetano koristiti i teoretski je moguće voditi tzv. „Zvezdane ratove“. Neki od primjera korištenja lasera u vojsci su (slika 29):

- Laser weaponsystem (LaWS) - je oružje američke vojske koje je prvi puta testirano 2014. godine. To je sistem koji se koristi slabom ili jakim infracrvenom svjetloću koju emitira laser. Ovisno koje je jačine može se koristiti kao vizualno informativno sredstvo ili kao oružje ta uništavanje letjelica ili brodova u blizini.
- Zeus (HLONS) – je laserska tehnologija koja se koristi za nalaženje i deaktiviranje eksplozivnih minskih naprava. Koristi se laser sa čvrstom jezgrom, poput onoga koji se koristi i u kirurgiji. On siječe površinu i time aktivira eksplozivne naprave. Montira se na vozilo i to je jedno od prvih laserskih oružja korištenih na bojištu.
- Boeing YAL-1 – to je zračno lasersko oružje koje se montira na avion Boeing 747-400F. Zadaća oružja je obrambena, odnosno zadatak mu je da uništi rakete koje se približavaju avionu.
- Još jedna od primjena lasera je i označavanje ciljeva za rakete. To je možda i najčešća primjena lasera u vojsci. Laser odašilje impulsne kodove koji se odbijaju od mete i šalje informacije na automatski upravljaju raketu ili bombu koja pada na metu. A označavanje laserom koristi se i kod označavanje mete kod upotrebe vatrenog oružja za lakši pogodak mete.



Sl. 29. Primjena lasera u vojne svrhe[45]

## 8.5. Primjena lasera u svakodnevnom životu

Lasere u svakodnevnom životu susrećemo u optičkim medijima za pohranu podataka (CD, DVD, Blue-ray), laserskim pisacima (printerima), čitačima 2D bar-koda u trgovinama, zaštitnim hologramima (na kreditnim karticama, vrijednosnim papirima, itd.), laserski show-ovi, prijenos podataka svjetlovodima, laser tag (suvremena taktička igra).

Glavna karakteristika laserskih printera je brzina ispisa i niska cijena ispisne stranice. Printer dobiva naredbu računala i laserski osvjetljava kolor-fotografski papir zelenim, crvenim i plavim laserskim svjetlom djelujući na pojedine slojeve. Da bi se dobila gotova fotografija mora se još kemijski obraditi.

Laser tag je igra označivanja koja se igra s pištoljima/puškama koji ispaljuju infracrvene laserske zrake (slika 30). Svaki igrač na sebi nosi infracrveno osjetljive mete na prsluku. Može se igrati u zatvorenom i otvorenom, igra se u skupinama, jedni protiv drugih. Danas je to vrlo popularna igra za sve uzraste, jer je u usporedbi sa paintballom, koji ima slične karakteristike, bezbolna.



Sl. 30. Laser tag [48]

## 8.6. Primjena u zaštiti

Laseri se sve više primjenjuju i u zaštiti domova, poslovnih prostora, skladišta i sl. Koriste se i za zaštitu radnika koji rade na određenim strojevima ili u određenim prostorima, na način da kada se prekine laserska zraka (barijera) zaustavlja se stroj ili se obavještava da je netko ušao u nedozvoljeni prostor.

### 8.6.1. Laser kao zaštita prostora

Prije ne tako mnogo vremena laserski sigurnosni sustavi, zajedno sa detektorima pokreta bili su vrlo skupi i nešto što su si samo rijetki mogli priuštiti i većinom su se primjenjivali u nekim većim i bogatijim tvrtkama, ali danas postoje mnogi sigurnosni alarmni sustavi koji koriste lasere i mogu štititi gotovo sve vrste prostora i prostore velikih dimenzija, a nisu tako skupi.

Kućni sigurnosni laserski sustavi većinom se sastoje od dva bitna dijela: alarma i infracrveni senzori pokreta. Stariji laserski sustavi su ovisili o priključcima spojenim na tipkovnicu i vlasnik je morao upotrebljavati posebne kodove kako bi uključio ili isključio sustav. Danas je većina laserskih alarmnih sustava bežična i jedinice se mogu uključivati i isključivati sa daljinskim, a u nekim modelima je moguće to učiniti sa mobitelom s bilo kojeg mjesta na svijetu. Laserski alarmni sustav je u osnovi koncentrirani izvor svjetlosti koji prenosi „pencil beam“ (snop olovke) svjetlosti koja djeluje kao detektor pokreta koji će se oglasiti kada provalnik ili nešto slično prekine tu zraku. Detektor je stvoren da bude iznimno osjetljiv na svjetlo i prenosi električnu energiju kada ga pogodi laserska svjetlost. Da bi se stvorio savršeni krug oko cijele kuće, često se koriste ogledala.

Vrlo važna komponenta senzora laserskog sigurnosnog sustava je infracrveni (IC) detektor pokreta. U sustavu se koriste zrake infracrvenog svjetla kojima je karakteristika da osjete kada dođe do promjene topline u okolini. Kada provalnik stupi u jedno od ovih zraka, senzor reagira jer osjeća toplinu tijela koja zrači iz te osobe. Ključna stavka za učinkovito funkcioniranje ovog sustava je postavljanje infracrvenih senzora tako da svjetlosni snopovi pokrivaju cijelo područje. Na taj način je nemoguće da netko uđe u zaštićeno područje, a da ga senzor ne uhvati. Senzor, koji je povezan bežičnom vezom s jedinicom za uzbunu, tada šalje jedinici poruku kako bi se upozorio servis gdje je kupljen sigurnosni sustav. Oni tada nazivaju dom, a ako se nitko ne javi, zovu policiju. Jedinica također ima i zvučnik koji ispušta vrlo glasan zvuk.

Kako laserska svjetlost putuje samo u ravnoj liniji, moguće je pokriti samo jedan dio npr. dvorišta. Dakle laser se smješta u jedan, a detektor u drugi kut dvorišta (slika 31). No ponekad to nije dovoljna zaštita i potrebno je zaštititi cijelo dvorište. Zato se koriste zrcala i ono se postavlja pod takvim kutom da usmjerava snop prema detektoru i na taj način je moguće pokriti cijelo dvorište sa laserskim zrakama. Ako bilo što blokira snop između lasera i detektora, alarm će se odmah oglasiti.

Laserski sustavi dolaze u različitim inačicama, s različitim razinama performansi. Postoje oni koje kupci mogu sami postaviti i oni će ili zujati ili zvoniti nakon prekida laserske zrake, ovisno kako su podešeni. Obično se u praksi oni namještaju na automatsko biranje, tako da se odmah zove ili policija ili tvrtka za nadzor sigurnosti. Još jedna dodatna zaštita je ta da se elektronika može postaviti tako da uzrokuje bljeskanje vanjskih svjetala i tako zastraši provalnika te olakša policiji pronalazak kuće u kojoj se oglasio alarm.

Prednosti laserskog sigurnosnog sustava je ta da su jednostavni za ugradnju i mogu se koristiti izvan i unutar kuće, također može biti vrlo dobar perimetarski alarm za zaštitu granica imovine. Mogu se koristiti i na bazenima, gdje se postavlja na način da se osjeti kada mala djeca dođu preblizu ruba bazena. Za rad su im potrebne obične električne i telefonske utičnice. Nedostaci ovakvih sustava su i dalje njegova visoka cijena, pogotovo ako se ne želi zaštititi samo jedan prostor, već cijela kuća ili okolina. Ti sustavi ne sprečavaju krađu ili provalu, već samo dojavljuju njima.



Sl. 31. Primjer kućnog laserskog sigurnosnog sustava [49]

### 8.6.2. Laser u zaštiti na radu

Lasere u zaštiti na radu susrećemo u obliku zaštita zaustavljanje preša, pa kao laserske svjetlosne zavjese, laserske barijere (ograde), 2D laserski skeneri (slika 32).

#### 1) Laserske barijere (ograde)

To je laserska zaštita koja radi na principu stvaranja nevidljivih laserskih barijera, dakle više laserskih zraka koje se nalaze između odašiljača i prijamnika. Sastavni dijelovi su odašiljač i prijamnik laserskih zraka. Princip rada je vrlo jednostavan, ako se neki objekt ili osobna nađe u neposrednoj blizini štice prostora i prekine lasersku zraku, sustav zaštite se aktivira automatski i zaustavlja stroj. Prednost ove zaštite je višenamjenska upotreba i mogućnost osiguranja većih površina. Najčešće se koriste kod: transporta paketa, procesnih centara, horizontalnih područja, prolaznih područja, ulaza u opasna područja, visokih skladišnih prostora i kod područja rada robota.

Postoje i barijere sa samo jednom laserskom zrakom, koje reagiraju na frekvenciju koju šalje odašiljač. One se koriste također kod procesnih centara, područja rada robota, horizontalnih područja, ali i kod dodavača, vrata i prolaza, strojeva koji umeću materijal.

#### 2) Zaštitni prekidač za prešu

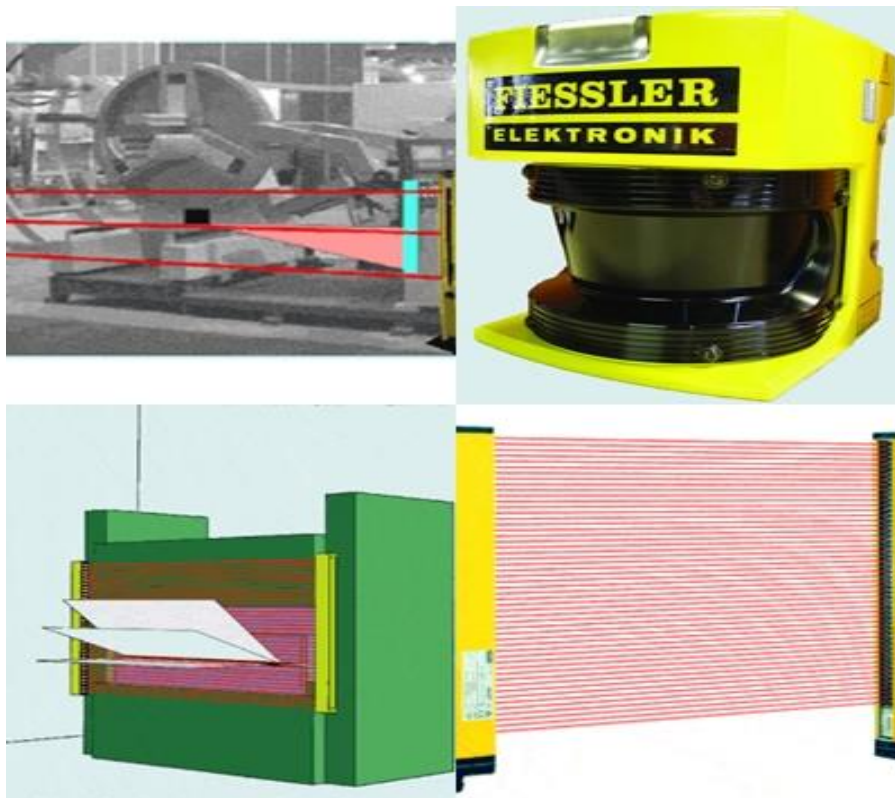
To je zaštita za prste radnika koji rade na kutnim prešama. Lasersko – optička zaštitna zraka smještena je ispred alata. Zaštita prstiju radi cijelo vrijeme dok se radi sa strojem, a povezana je sa nožnom pedalom. Ovaj ti zaštite je neophodan kod savijanja malih dijelova koji se moraju ručno pridržavati. Postoje dvije vrste zaštite, jedna koja se koristi kod automatskog podešavanja zaštite prema visini alata i kod nje su automatizirani odašiljač i prijemnik instalirani direktno na držač. Druga vrsta zaštite se koristi kod podizanja zaštite ručno isto pri podešavanju prema visini alata.

#### 3) 2D – skeneri

To su senzori koji skeniraju objekte na određenoj udaljenosti. Laserska zraka definirana je rotirajućim ogledalom. Zaštitni skener pokriva polukružno područje od 180° i radijusa do 15 m. Skener prepoznaje objekte i ljude koji se kreću u određenom zaštitnom polju. Koriste se za zaštitu od raznih objekata do 15 m, prepoznavanje, odnosno skeniranje objekata do 50 m i za osobnu zaštitu do 4 m.

#### 4) Zaštitne svjetlosne zavjese

To tzv. svjetlosna laserska zavjesa stvorena od zaštitnih laserskih zraka. Njezina je zadaća štititi stroj od mogućih kontakata sa nekim neželjenim objektima, ali i zaštita radnika koji rade na stroju da ne dođu u kontakt sa opasnim dijelovima stroja. Kao i laserska barijera sastoji se od odašiljača i prijarnika koji su ovisno o potrebama različitih dimenzija. Koriste se kod zaštite rotirajućih strojeva, tekstilnih strojeva, kod strojeva za zavarivanje i savijanje, kod strojeva za obradu drva i kablova, kod strojeva u koje se umeće materijal i sl.



Sl. 32. Laserske zaštitne naprave [50]



## 9. Opasnosti i mjere zaštite prilikom primjene lasera

Biološki utjecaji svjetlosti poznati su odavno, najpoznatiji primjer toga je naravno Sunce, koje djelovanjem na čovjeka stvara vitamin A i pigmentaciju koža, ali može dovesti i do stvaranja tumora. Najugroženije je oko, jer u sebi sadrži fotoosjetljivi sloj (mrežnicu), na kojem se svjetlost fokusira. Prirodni izvori su u pravilu slabi i ne izazivaju velike posljedice, ali izumom lasera koji stvara usmjereni snop svjetlosti, dosta se toga promijenilo. Upadom laserske svjetlosti u oko dolazi do fokusiranja zračenja u jednu točku mikronskih dimenzija i do velike gustoće energije. Posljedice ovise o upadnoj energiji i valnoj duljini svjetlosti, ali i o tome je li laser emitirao kontinuirani ili pulsni snop. Energija lasera je toliko jaka da oštećuje tkivo i oštećenja oka su u pravilu nepovratna. Zbog sve veće primjene lasera i njegove moguće opasnosti po zdravlje čovjeka započeto je proučavanje svjetlosti i pronalaženje tehnika za sigurno rukovanje laserom. Prilikom rukovanja s laserom trebalo bi se pridržavati tzv. "Sedam zlatnih pravila sigurnog korištenja lasera"

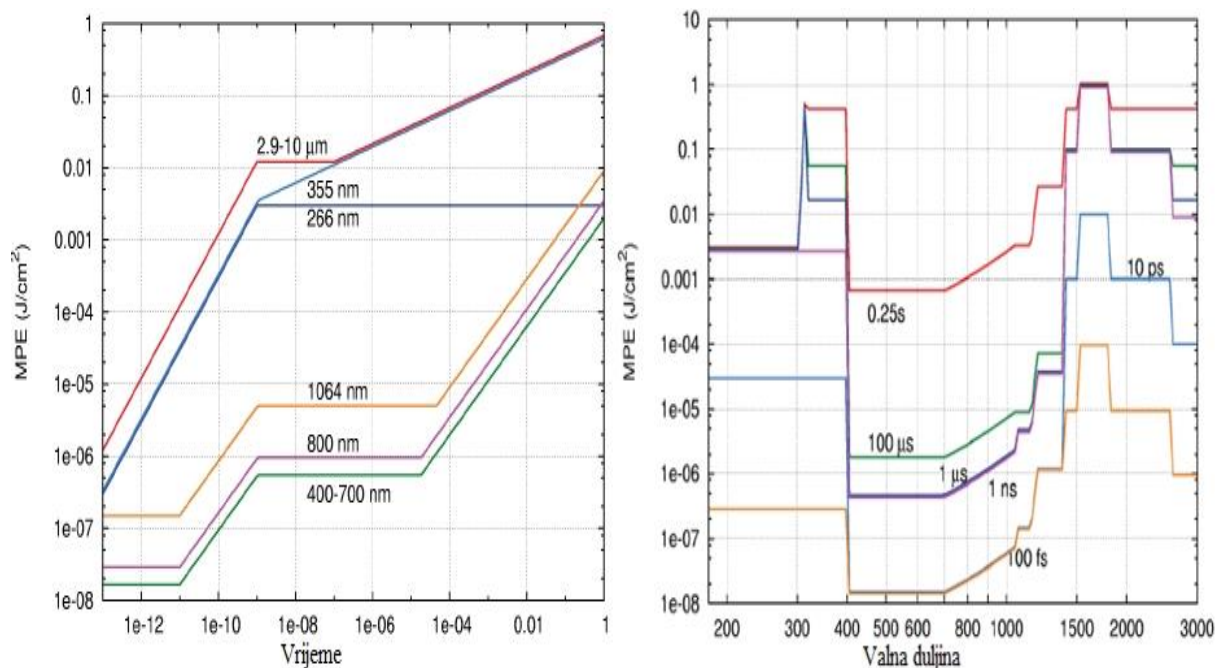
- I. Držite razmak.
- II. Nosite naočale i maske koje štite od laserskog zračenja.
- III. Fokusirajući ručni držač, odnosno optičko vlakno ne se smije upotrebljavati kao pokazivač (pointer).
- IV. Kad ga ne koristite, odložite fokusirajući ručni držač vlakna na sigurno mjesto.
- V. Ne usmjeravajte lasersku zraku na kirurške instrumente.
- VI. Ne usmjeravajte lasersku zraku na zapaljive materijale.
- VII. Uređaj prebacite u stand-by način rada kad god je moguće.

Već je rečeno da djelovanje laserskog zračenja ovisi i vrsti tkiva, načinu dovođenja svjetlosti, kao i o snazi i valnoj duljini. Na manjim energijama i snazi utjecaji nisu opasni i mogu imati terapijsko djelovanje. Povećanjem energije i snage svjetlost se pretvara u toplinu, koja dovodi do povećanja temperature tkiva i može izazvati razaranje i koagulaciju bjelančevina. Kada se laser koristi u medicinske svrhe (laserski skalpel, uklanjanje karijesa i dr.) njegovo zračenje je kontrolirano i efekti su predvidljivi i mogu se dozirati. Priliko slučajnog izlaganja laserskom zračenju posljedice i efekti se ne mogu točno odrediti, ali se mogu procijeniti. Zbog te procjene laseri su klasificirani po nivou zdravstvenog rizika (tablica 2). Klasifikacija je dana u standardu Međunarodne elektrotehničke komisije (engl. International Electrotechnical Commission – IEC).

Tab. 2. Klasifikacija laserskih uređaja po stupnju rizika[51]

Klasa	Sigurno	Opasno
1	Produženo gledanje direktnog laserskog snopa	-
1M	Gledanje laserskog snopa golim okom	Gledanje kroz optički instrument
2	Slučajni upad direktnog laserskog snopa, čak i kroz optički instrument	Namjerno gledanje laserskog snopa (duže od 0,25 s)
2M	Slučajni upad direktnog laserskog snopa	Namjerno gledanje laserskog snopa (duže od 0,25 s) ili slučajni upad snopa kroz optički instrument
3R	Kao kod klasa 1 i 2, ali ovisno o valnoj duljini	Kao klase 1 i 2, ali ovisno o valnoj duljini. Nešto povećan rizik kod dužeg izlaganja
3B	Gledanje difuzno raspršenog zračenja u izlaganje kože	Slučajno izlaganje oka direktnom laserskom snopu
4	Izvan određene zone	Slučajno izlaganje oka ili kože difuznom zračenju

Na slici 33. je prikazana grafika pomoću koje se preciznije može odrediti rizik po oči. Prikazano je maksimalno dozvoljeno izlaganje (engl. Maximum Permissible Exposure – MPE), mjereno na rožnici oka, u funkciji vremena (ekspoziciji) izlaganja laserskom zračenju (sa valnom duljinom kao parametrom) i valne duljine (sa vremenom izlaganja kao parametrom). Gustoća energije se u ovom slučaju mjeri u nivou mrežnice ljudskog oka. Na slici je vidljivo da postoje valne duljine (oko 1500 nm) na kojima je moguća puno veća izloženost oka bez štetnih posljedica. Ti laseri se često nazivaju i laseri sigurni za ljudsko oko (engl. eye-safe).



Sl. 33. Maksimalno dozvoljeno izlaganje (MPE) [51]

Zaštita od laserskog zračenja svodi se na smanjivanje intenziteta laserskog zračenja do bezopasnog nivoa. U ostvarenju tog cilja koriste se slijedeće mjere: zabrana pristupa, panoi za blokiranje laserskog snopa, upozoravajuće zvučne i svjetlosne signalizacije, zamke za lasersko zračenje, upotreba osobnih zaštitnih sredstava (zaštitne naočale sa zaštitnim filtrima). Rad sa laserskim uređajima treba biti automatiziran, a zidovi, podovi i stropovi u prostoriji gdje se koristi laser moraju biti od materijala koji ne reflektira lasersko zračenje, također sve polirane površine, kao npr. kvake na vratima i prozorima, moraju biti pokrivena materijalom crne boje, a zastori na prozorima također moraju biti crne boje. Nadalje, prostor mora imati dobru ventilaciju i biti osigurana zaštita od opasnosti od visokog napona i požara.

Osobnim zaštitnim sredstvima osigurava se zaštita očiju i kože, za oči se koriste zaštitne naočale, a za ostatak tijela se koriste rukavice, odijela i maske. Naočale su efikasna zaštita, ali ovise o nekoliko faktora, kao što je valna duljina zračenja, očekivana gustoća energije u opasnoj zoni, o potrebi za atenuacijom (proces prigušenja snopa čestica prolaskom kroz tvar) zračenja do nivoa koji je bezopasan za oko, ali dovoljan za podešavanje laserskog sistema (slika 34). Vrlo važno je osigurati i dobru vidljivost u prostoru oko lasera, zbog lakšeg rada i kretanja. Naočale za zaštitu od laserskog zračenja mogu se podijeliti u dvije skupine:

- za zaštitu u području spektra od 180 nm do 1 000 000 nm (0,001 mm)
- zaštita u području spektra od 400 nm do 700 nm (namještanje laserskih sustava)

U Hrvatskoj te naočale propisane su normom HRN EN 207:2010 i prema njoj filtri i OZO za zaštitu od laserskog zračenja moraju zadovoljavati sljedeće kriterije:

- otpornost na lasersko zračenje
- kvalitetna površina materijala filtra nakon toplinske izloženosti i UV zračenja
- spektralno propuštanje

Proizvođači takvih naočala i filtri moraju dati i sljedeće informacije:

- Obavijest o metodama kako čistiti i održavati naočale i filtre
- Obavijest i upozorenje da je oštećena OZS i kontaminirane leće potrebno zamijeniti
- Obavijest da se laserski sigurnosni filtri ne smiju koristiti ako su oštećeni ili im je promijenjena boja



Sl. 34. Naočale za zaštitu od laserskog zračenja[54]

Stalno se radi na tome da se poveća zaštita i sigurnost radnika koji rukuje sa laserom. Većina sadašnjih zaštitnih naočala koristi plastične apsorpcijske filtre. Oni rade na principu da apsorbiraju svjetlost i tu energiju pretvaraju u toplinsku, nedostatak je taj što može doći do topljenja plastike, a time i do prolaska svjetlosti do oka. Razvijen je novi materijal kod kojeg je proces topljenja kontroliran i dovodi do stvaranja male rasipne leće na površini filtra. Materijal koji se koristi sastoji se od želatine pomiješane sa organskom bojom i plastifikatorom. Boja služi za apsorpciju laserskog zračenja, a plastifikator osigurava kontrolirano topljenje i stvaranje male rasipne leće. Filtar sadrži dva sloja između kojih se nalazi transparentni sloj plastike. Upadom laserske zrake direktno na filter, njegov prvi sloj se topi i stvara mali rasipnu leću zbog koje se snop širi i tako da je na drugom apsorpcijskom

sloju gustoća energije puno manja i topljenje sloja puno sporije. Time se produžuje vrijeme tijekom kojega je intenzitet propuštene svjetlosti u sigurnim okvirima. Pri velikim snagama laserske svjetlosti zaštitni sloj se nakon nekog vremena karbonizira i stvara jako tamno područje koje slabo propušta svjetlost i time se oko dodatno štiti od prodora svjetlosti kroz zaštitni filter.

Važno je također da su osobe koje rade sa laserom svjesne potencijalnih profesionalnih rizika i opasnosti i educirane o mjerama zaštite za pojedine lasere. Moraju znati prepoznati i svaki kvar, odnosno nepravilan rad lasera kako bi spriječili povećanu i nekontroliranu izloženost pacijenta ili drugih osoba u prostoru laserskom zračenju. Osobe koje rade sa laserima moraju biti pod redovitim liječničkim nadzorom. Na prethodnom liječničkom pregledu potrebno je ustanoviti da nema nikakvih medicinskih kontradikcija za rad s laserom (kronične bolesti srca, bolesti kože, oka i dr.) U slučaju nesreće potrebno je odmah obaviti izvanredni liječnički pregled.

Znak za opasnost od laserskog zračenja je jednostranični trokut crnog ruba, unutar kojega se nalazi simbol, također crne boje, a ispuna trokuta je žute boje (slika 35).



Sl. 35. Znak za opasnost od laserskog zračenja [55]

## 10. Zaključak

Iako je od izuma lasera prošlo više od pola stoljeća njegov razvoj nije usporen, već se i dalje unapređuje njegov rad i tehnologija. Vjerojatno ni sam T. Maiman nije ni slutio koliko će njegovo otkriće biti važno u budućnosti i koliko će se laser upotrebljavati. Može se reći da je laser jedan od najznačajnijih izuma u fizici, a to dokazuje i više od 10 osvojenih Nobelovih nagrada iz područja prirodnih znanosti od otkrića lasera. Glavna prednost lasera je mogućnost primjene u gotovo svim područjima, od medicine i znanosti, do vojske i telekomunikacija. Laser će u budućnosti imati vjerojatno još veću primjenu nego danas, pogotovo ako cijena njegove izrade postane pristupačnija jer je danas još uvijek laser vrlo skup i nije dostupan svima. No njegovom sve širom primjenom i sve češćom upotrebom doći će i do većih opasnosti po ljudsko zdravlje pa će trebati sukladno razvoju lasera razvijati i osobna zaštitna sredstva koja se koriste prilikom rukovanjem sa njime, ali i educirati radnike koji će raditi s njime.

## 11. Literatura

Knjige:

- [1] Paić. M., „*Osnove fizike*“, Sveučilišna naknada Liber, Zagreb, (1991.), ISBN 86-329-0350-0

Internetske stranice:

- [1] Mujagić Edita, Difrakcija i polarizacija“, <http://www.am.unze.ba/pzi/2007/MujagicEdita/rad/svjetlost.html>, pristupljeno 25.03.2019.
- [2] Hrvoje Skenderović, Laseri, fotonski snopovi, <http://www.hfd.hr/ljskola/arhiva/1999/skenderovic/skenderovic.pdf>, pristupljeno 13.03.2019.
- [3] Maja Manojlović, Vedrana Dejanović, Fotoni, <http://www.znanje.org/i/i25/05iv03/05iv030611fll/FOTONI.htm>, pristupljeno 25.03.2019.
- [4] Jovo Pavlović, Fotoni, <https://www.val-znanje.com/index.php/tekstovi/znanost/437-fotoni>, pristupljeno 25.03.2019.
- [5] Lea Grgić, Laseri, <https://repozitorij.kemija.unios.hr/islandora/object/kemos%3A145/datastream/PDF/view>, pristupljeno 13.03.2019.
- [6] Elvira Ištoković, Laseri, <http://www.mathos.unios.hr/~mdjunic/uploads/diplomski/I%C5%A1T01.pdf>, pristupljeno 13.03.2019.
- [7] Snježana Nauhold, Laserski uređaj za graviranje, <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A228/datastream/PDF/view>, pristupljeno 13.03.2019.
- [8] Cadfael Shrewsbury, Ted Maiman ruby laser 1960, <https://www.pinterest.com/pin/273523377346306501/>, pristupljeno 25.03.2019.
- [9] Goran Pichler, Laseri i primjene, <http://projekt2.ifs.hr/documents/Svjetska%20godina%20fizike.pdf>, pristupljeno 13.03.2019.
- [10] Laseri, <http://physics.mef.hr/Predavanja/Laser/index.html>, pristupljeno 15.03.2019.
- [11] Adrian Antolić, Zavarivanje laserom, [http://repozitorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%C4%87\\_2016\\_Zavr%C5%A1ni\\_Preddiplomski.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%C4%87_2016_Zavr%C5%A1ni_Preddiplomski.pdf), pristupljeno 20.03.2019.
- [12] Ticijana Ban, Laseri u znanosti i tehnologiji, <https://www.azoo.hr/images/stories/dokumenti/Laseri.pdf>, pristupljeno 13.03.2019.
- [13] Kristijan Pavić, Lasersko zavarivanje, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:1125/preview>, pristupljeno 27.03.2019.

- [14] Iva Lukić, Pregled novijih eksperimentalnih i teorijskih rezultata u nelinearnoj optici, <https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit:399/preview>, pristupljeno 27.03.2019.
- [15] Znanost.org, <http://www.znanje.org/i/i2011/11iv05/11iv0519/laseri.htm>, pristupljeno 25.03.2019.
- [16] Laser, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=35494>, pristupljeno 26.03.2019.
- [17] Danijela Rašić, dr.med., Što je to laser?, <http://www.aquamed.hr/hr/blog-clanci/214-sto-je-to-laser>, pristupljeno 13.03.2019.
- [18] Dr. Dirk Lorensen, Lasers, <https://www.slideshare.net/dlorenser/part-i-laser-basics-lorensen-2009>, pristupljeno 27.03.2019.
- [19] Valovi materije, <http://mapmf.pmfst.unist.hr/~agicz/PredNU11slike.pdf>, pristupljeno 27.03.2019.
- [20] Antun Jastrić, Dražen Tomić, Laserske zrake – zabava koja ugrožava sigurnost letenja, <https://www.ictbusiness.info/vijesti/laserske-zrake-zabava-koja-ugrozava-sigurnost-letenja>, pristupljeno 27.03.2019.
- [21] Coherent vs InPhase vs Polarized light, <https://physics.stackexchange.com/questions/390038/coherent-vs-in-phase-vs-polarized-light>, pristupljeno 28.03.2019.
- [22] Spectral Properties of the Sodium Discharge, <http://www.lampstech.co.uk/Documents/SO%20Spectral.htm>, pristupljeno 28.03.2019.
- [23] Ana Veselinović, Milena Grahovac, Laseri i njihova primena, <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.gaf.ni.ac.rs/fizika/doc/Seminarski%20radovi/LASERI%20I%20NJIHOVA%20PRIMENA.pps>, pristupljeno 25.03.2019.
- [24] Bernik A., Stipetić I., Laserske zrake u strojnoj industriji, <https://hrcak.srce.hr/85791>, pristupljeno 13.03.2019.
- [25] J. Brnjas-Kraljević, Laser, <http://physics.mef.hr/Predavanja/IVG/pdf/laseri%202006.pdf>, pristupljeno 25.03.2019.
- [26] Dr.Sc. Nikola Gordinović, Laseri, [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://marjan.fesb.hr/~ngod/EMMF/2\\_Laseri.ppt](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://marjan.fesb.hr/~ngod/EMMF/2_Laseri.ppt), pristupljeno 25.03.2019.
- [27] Laser Processing of Thermoplastic Composites, <http://www.automateddynamics.com/article/thermoplastic-composite-basics/processing-methods/laser-processing-of-thermoplastic-composites>, pristupljeno 29.03.2019.
- [28] How lasers work, <https://department.monm.edu/chemistry/chem140/spring2005/jhass/Laser.htm>, pristupljeno 01.04.2019.
- [29] Gas phase lasers, <http://www.cuaerospace.com/Technology/Gas-Phase-Lasers>, pristupljeno 01.04.2019.
- [30] Roman Balinović, Obrada laserom – laserska obrada metala, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:488/preview>, pristupljeno 01.04.2019.
- [31] Vince Gregoric, A precise measurement of the speed of light in air from the frequency separation of longitudinal modes



- esinanopen-cavityHeNe laser, <https://laser.physics.sunysb.edu/vince/report/report.html>, pristupljeno 01.04.2019.
- [32] Vjencislav Barać, Stabilizirani laseri u mjeriteljstvu duljine, <https://core.ac.uk/download/pdf/34009158.pdf>, pristupljeno 03.01.2019.
- [33] Tekući laser, <http://www.znanje.org/i/i22/02s/LASERI/tekuci.htm>, pristupljeno 04.04.2019.
- [34] Kako izgledaju poluvodičke laserske diode, [http://eskola.hfd.hr/laseri/izgled\\_ld.htm](http://eskola.hfd.hr/laseri/izgled_ld.htm), pristupljeno 07.04.2019.
- [35] Laseri, [http://www.medioteka.hr/portal/print.php?tb=ss\\_fzk2&vid=31](http://www.medioteka.hr/portal/print.php?tb=ss_fzk2&vid=31), pristupljeno 26.03.2019.
- [36] Marko Vlahov, Optimizacija parametara laserskog rezanja, [http://repozitorij.fsb.hr/2509/1/20\\_11\\_2013\\_Marko\\_Vlahov\\_-\\_Diplomski\\_rad.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/2509/1/20_11_2013_Marko_Vlahov_-_Diplomski_rad.pdf), pristupljeno 02.04.2019.
- [37] Laser Welding Services, <http://www.alspi.com/laserwelding.htm>, pristupljeno 10.04.2019.
- [38] Holografija, [http://www.medioteka.hr/portal/ss\\_fizika2.php?ktg=3&pktg=&mid=30](http://www.medioteka.hr/portal/ss_fizika2.php?ktg=3&pktg=&mid=30), pristupljeno 10.04.2019.
- [39] Diana Shie, The 3D Hologram Whale Just Keeps Swimming, [https://www.vice.com/en\\_us/article/gvw7kb/3d-whale-hologram-synergy](https://www.vice.com/en_us/article/gvw7kb/3d-whale-hologram-synergy), pristupljeno 10.04.2019.
- [40] Ivana Čirjak, Analiza dimenzionalne stabilnosti papira primjenom holografske interferometrije, [https://eprints.grf.unizg.hr/2170/1/DB358\\_Cirjak\\_Ivana.pdf](https://eprints.grf.unizg.hr/2170/1/DB358_Cirjak_Ivana.pdf), pristupljeno 11.04.2019.
- [41] Zvezdarnica, Laseri u astronomiji i astronautici, <http://www.zvezdarnica.com/mediji/skrinjica/laseri-u-astronomiji-i-astronautici/2169>, pristupljeno 25.03.2019.
- [42] Dan Long, Astronomy Picture of the Day, <https://apod.nasa.gov/apod/ap140418.html>, pristupljeno 11.04.2019.
- [43] Primjena lasera u medicini, <http://www.hilus.hr/images/laseri.pdf>, pristupljeno 13.03.2019.
- [44] Lasersko uklanjanje tetovaža: prije i poslije. Recenzije o laserskom uklanjanju tetovaža, <https://hr.stareyesforever.com/krasota/68318-udalenie-tatu-lazerom-do-i-posle-otzyvy-ob-udalenii-tatu-lazerom.html>, pristupljeno 12.04.2019.
- [45] Dimitrije Milić, Primjena lasera u vojne svrhe i naoružanju <https://prezi.com/sxwqk3miqzo/primena-lasera-u-vojne-svrhe-i-naoruzanju/>, pristupljeno 13.04.2019.
- [46] Bernard Baranašić, Laserska tehnologija u vojnoj industriji, <https://prezi.com/axiwwbr-w8za/laserska-tehnologija-u-vojnoj-industriji/>, pristupljeno 13.04.2019.
- [47] Lara Horvat, Kvaliteta ispisa digitalnog zapisa fotografije, [https://eprints.grf.unizg.hr/2282/1/Z600\\_Horvat\\_Lara.pdf](https://eprints.grf.unizg.hr/2282/1/Z600_Horvat_Lara.pdf), pristupljeno 13.04.2019.
- [48] Delta laser, <http://www.kidstown.ie/product/delta-laser-party-package/>, pristupljeno 13.04.2019.
- [49] Best Home Security System, Laser Security System: Protect Your Home Like A Top Secret Government Facility, <http://www.besthomesecuritysystem.com/laser-security-system-protect-your-home-like-a-top-secret-government->

- [facility/?fbclid=IwAR1eheTfOjV\\_3PKpGkRG-0ZyMPJq2QdONymMchlVKMnIVhzPftZyxaGx0M4](#), pristupljeno 25.04.2019.
- [50] Zaštitni uređaji, <http://www.indel.hr/zastitni-uredaji/>, pristupljeno 25.04.2019.
- [51] Dejan Pantelić, Branka Murić, Darko Vasiljević, Zaštita od laserskog zračenja, <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/44/128/44128730.pdf?r=1&r=1>, pristupljeno 20.03.2019.
- [52] J. Goldoni, Zaštita od neionizirajućih zračenja u medicini, <https://hrcak.srce.hr/146978>, pristupljeno 20.04.2019.
- [53] mr.sc. Mensur Ferhatović, [https://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni\\_materijali/k\\_sigurnost\\_2/OZO%201%20PREDAVANJE%202017.pdf](https://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni_materijali/k_sigurnost_2/OZO%201%20PREDAVANJE%202017.pdf), pristupljeno 20.03.2019.
- [54] Zaštitne naočale za rad s laserom, <https://burza.com.hr/oglas/zastitne-naocale-za-rad-sa-laserom/49742>, pristupljeno 20.03.2019.
- [55] W004 - OPASNOST OD LASERSKOG ZRAČENJA (CS-OP-011), <https://www.czs.hr/en/cs-op-011-opasnost-od-laserskog-zra%C4%8Denja-w004>, pristupljeno 17.04.2019.

## 12. Prilozi

### 12.1. Popis slika

Sl. 1. Spontana i stimulirana emisija fotona .....	4
Sl. 2. Rubinski laser .....	5
Sl. 3. Spontana emisija .....	6
Sl. 4. Proces nastajanja laserskog zračenja .....	7
Sl. 5. Sustav s tri razine .....	8
Sl. 6. Sustav s četiri razine .....	9
Sl. 7. Dijelovi lasera .....	11
Sl. 8. Optički rezonator .....	12
Sl. 9. Laserske zrake .....	13
Sl. 10. Koherentna i nekoherentna zraka .....	14
Sl. 11. Monokromatska svjetlost .....	15
Sl. 12. Pulsna laserska zraka .....	17
Sl. 13. Kontinuirana i pulsna zraka .....	17
Sl. 14. Shema plinskog lasera .....	18
Sl. 15. Plinski laser .....	18
Sl. 16. Shema CO <sub>2</sub> lasera .....	19
Sl. 17. He-Ne laser .....	19
Sl. 18. Energetski nivoi He-Ne lasera .....	20
Sl. 19. Shema rubinskog lasera .....	21
Sl. 20. Shema Nd:YAG lasera .....	22
Sl. 21. Prikaz poluvodičkog lasera .....	23
Sl. 22. Primjer i shema rezanja laserom .....	26
Sl. 23. Usporedba laserskog i normalnog vara .....	27
Sl. 24. Primjer holograma .....	28
Sl. 25. Shema snimanja holograma .....	29
Sl. 26. Laserska zraka odaslana prema Mjesecu .....	30
Sl. 27. Podjela medicinskih lasera po disciplinama .....	32
Sl. 28. Lasersko uklanjanje tetovaže .....	33
Sl. 29. Primjena lasera u vojne svrhe .....	34
Sl. 30. Laser tag .....	35

Sl. 31. Primjer kućnog laserskog sigurnosnog sustava.....	37
Sl. 32. Laserske zaštitne naprave .....	39
Sl. 33. Maksimalno dozvoljeno izlaganje (MPE) .....	42
Sl. 34. Naočale za zaštitu od laserskog zračenja .....	43
Sl. 35. Znak za opasnost od laserskog zračenja .....	44

## 12.2. Popis tablica

Tab. 1. Boja, frekvencija i valna duljina svjetlosti, tipične vrijednosti [2].....	2
Tab. 2. Klasifikacija laserskih uređaja po stupnju rizika[51] .....	41