

# Lasersko zavarivanje

---

Trpčevski, Zlatko

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:103250>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-23**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



**Zlatko Trpčevski**

**LASERSKO ZAVARIVANJE**

Završni rad

Pula, lipnja 2024.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



**Zlatko Trpčevski**

**LASERSKO ZAVARIVANJE**

Završni rad

JMBAG: 0303096490, redovan student

Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij proizvodnog strojarstva

Predmet: Tehnike spajanja

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo

Mentor: doc. dr. sc. Davor Stanić

Pula, lipnja 2024.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Davoru Staniću na pomoći i stručnima savjetima prilikom izrade završnog rada, a ponajviše na strpljenju i razumijevanju. Veliko hvala mojoj obitelji na podršci te prijateljima koji su uvijek bili na raspolaganju za pomoći.

Davor Stanić  
( ime i prezime nastavnika )



Tehnički fakultet u Puli

Tehnike spajanja  
( predmet )

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**  
**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**  
**ZADATAK TEME ZAVRŠNOGA RADA**

**Pristupniku Zlatku Trpčevskom**

**MBS: 0303096490**

**Studentu stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:**

**Lasersko zavarivanje**

**Sadržaj zadatka: U završnom radu objasniti će se povijest lasera, njegov način rada, osnovni dijelovi lasera i glavne vrste lasera. Također će se razmatrati karakteristike laserske svjetlosti i laserske tehnologije te primjena laserskog zavarivanja u industrijama.**

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

**Redovni, proizvodno strojarstvo**

(status, smjer)

**Datum:**

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Zlatko Trpčevski, kandidat za prvostupnika proizvodnog strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

Zt.

U Puli, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ godine



## IZJAVA

### O korištenju autorskog djela

Ja, Zlatko Trpčevski dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u puli kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „Lasersko zavarivanje“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice ( stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama. Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, \_\_\_\_\_ (datum)

Student

Zt.

-----

# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	Hipoteza rada.....	2
1.2.	Ciljevi rada.....	2
1.3.	Metodologija rada.....	2
1.4.	Struktura rada .....	2
2.	LASERSKA TEHNOLOGIJA .....	3
3.	PROCES NASTAJANJA LASERSKE ZRAKE .....	4
3.1.	Energetske razine lasera .....	7
3.1.1.	Laser s tri energetske razine .....	7
3.1.2.	Laser s četiri energetske razine.....	8
3.2.	Spontana emisija.....	9
3.3.	Stimulirana emisija.....	10
3.4.	Laserska svjetlost .....	11
3.4.1.	Monokromatičnost .....	11
3.4.2.	Koherentnost .....	13
3.4.3.	Usmjerenost.....	14
4.	DIJELOVI LASERA .....	15
4.1.	Laserski medij.....	16
4.2.	Laserska pumpa .....	17
4.3.	Optički rezonator .....	17
5.	VRSTE LASERA .....	18
5.1.	Plinski laseri.....	18
5.1.1.	He-Ne laser.....	19
5.1.2.	CO <sub>2</sub> laseri .....	21
5.2.	Tekući laseri s bojom.....	22
5.3.	Laseri čvrstog stanja.....	23
5.3.1.	Rubinski laser .....	24
5.3.2.	Nd:YAG laser .....	25
5.4.	Poluvodički laseri .....	26
6.	TEHNIKE LASERSKOG ZAVARIVANJA .....	27
6.1.	Kondukcijski način zavarivanja.....	27



6.2.	Zavarivanje ključanicom.....	28
7.	PARAMETRI LASERSKOG ZAVARIVANJA.....	29
7.1.	Snaga i brzina zavarivanja laserske zrake.....	29
7.2.	Karakteristike laserskog snopa.....	29
7.3.	Mod.....	29
7.4.	Stabilnost .....	30
7.5.	Polarizacija .....	30
7.6.	Pulsni i kontinuirani način rada.....	30
7.7.	Zaštitni plin.....	31
7.8.	Položaj žarišne točke u odnosu na površinu obratka .....	32
7.9.	Konfiguracija spojeva .....	32
8.	ZAVARLJIVOST MATERIJALA.....	33
9.	PRIMJENA LASERSKOG ZAVARIVANJA .....	34
9.1.	Primjena laserskog zavarivanja u automobilskoj industriji.....	34
10.	PREDNOSTI I NEDOSTATCI LASERSKOG ZAVARIVANJA.....	36
10.1.	Prednosti .....	36
10.2.	Nedostatci .....	37
11.	ZAKLJUČAK .....	38
12.	LITERATURA .....	39

POPIS SLIKA

POPIS OZNAKA

## **Sažetak**

Tehnologija i proizvodnja laserom u današnje vrijeme se sve više razvija i napreduje. Imaju iznimno široku primjenu u različitim tehničkim i medicinskim granama. Ukratko laser je uređaj ili svjetlosni oscilator, tj. generator koherentnog tipa zračenja. Uvodni dio teoretskog dijela temelji se na poviješću i nastanku lasera te principu rada lasera. Također, u nastavku su opisane energetske razine lasera, spontana i stimulirana emisija te karakteristike laserske svjetlosti. Obrađeni su dijelovi lasera i vrste lasera te uklatko su opisani najpoznatiji i najčešće korišteni laseri za zavarivanje. Između ostalog analizirane su laserske tehnologije i primjena laserskog zavarivanja u industrijama.

Ključne riječi: laser, zavarivanje, svjetlost, tehnologije, industrije

## **Summary**

Technology and laser production are increasingly developing and advancing nowadays. They are extensively used in various technical and medical branches. In short, the laser is a device or a light oscillator, i.e. a generator of a coherent type of radiation. The introductory part of the theoretical part is based on the history and creation of lasers and the principle of laser operation. Also, below are the energy levels of lasers, spontaneous and stimulated emissions and characteristics of laser light. Parts of lasers and types of lases were processed and the most famous and most commonly used lasers for weding were briefly described. Among other things, laser technologies and application of laser welding in industries were analysed.

Keywords: laser, welding, light, technologies, industries

## 1. UVOD

Laser je izvor topline velike snage. Stoga je lasersko zavarivanje prepoznato kao napredni proces spajanja materijala laserskom zrakom velike snage i visoke gustoće energije. Lasersko zavarivanje je relativno nova tehnologija u usporedbi s konvencionalnim metodama elektrolučnog zavarivanja.

Njegove glavne prednosti su veća brzina zavarivanja, visoka kvaliteta zavara i niski unos energije u metal što ga najviše razlikuje od ostalih procesa zavarivanja.

Zona utjecaja topline je vrlo kontrolirana, tj. mala. Također, penetracija je vrlo visoka sa proizvedenim uskim zavarima koji se formiraju tijekom zavarivanja snopom lasera velike gustoće ili elektrona.

Njegovi najčešći nedostaci su grbavost, poroznost i prskanje. Neke nesavršenosti također mogu proizaći iz malog promjera grede. Bez dodatnog materijala, komadi koje treba zavariti moraju biti dobro konstruirani.

Netočno pozicioniranje zraka tada može rezultirati nedostatkom fuzije, konkavnim korijenskim površinama i popuštenim zavarima. Visoke brzine hlađenja također mogu dovesti do stvaranja pora u vrlo dubokim zavarima s nedovoljnim otplinjavanjem.

Eksperimentalna i modelna istraživanja mogu se međusobno nadopunjavati kako bi dublje razumjeli ovaj proces, uzroke grešaka i dodatno poboljšali kvalitetu zavara.

Lasersko zavarivanje zahtijeva veliku gustoću snage u rasponu od oko  $5 \times 10^4$  do  $10^7 \text{ W/cm}^2$ . Ovu snagu može omogućiti plinski  $\text{CO}_2$  laser ( valne duljine reda veličine  $10 \mu\text{m}$  ) kao i laseri čvrstog stanja kao što su: Nd:YAG – štapić, Yb:YAG – disk i Yb:staklo – vlakno ( s valnim duljinama reda veličine  $1 \mu\text{m}$ ). [1,2]

### **1.1. Hipoteza rada**

Razjasniti lasersko zavarivanje te utvrditi da li omogućuje napredniji proces spajanja materijala u usporedbi s konvencionalnim postupcima zavarivanja.

### **1.2. Ciljevi rada**

Ciljevi istraživanja ovog završnog rada su:

- Opisati proces laserskog zavarivanja
- Prikazati osnovne dijelove lasera i objasniti njihovu ulogu
- Navesti glavne vrste lasera
- Prikazati parametre laserskog zavarivanja
- Predstaviti primjenu laserskog zavarivanja, te opisati njegove prednosti i nedostatke

### **1.3. Metodologija rada**

Prilikom izrade završnog rada korišteni su podatci istraživanjem stručne literature i članaka koji se odnose na temu završnog rada.

### **1.4. Struktura rada**

Završni rad se sastoji od 12 poglavlja.

U prvom poglavlju objašnjena je tema koja je analizirana u ovom završnom radu.

U drugom poglavlju biti će opisana laserska tehnologija.

Treće poglavlje sadrži proces nastajanja laserske zrake, energetske razine lasera, spontanu emisiju, stimuliranu emisiju i lasersku svjetlost te njezina osnovna svojstva.

U četvrtom poglavlju biti će prikazani dijelovi lasera te njihova funkcija.

U petom poglavlju su navedene i opisane vrste lasera.

U šestom poglavlju su objašnjene dvije tehnike laserskog zavarivanja.

Sedmo poglavlje obuhvaća parametre laserskog zavarivanja.

U osmom poglavlju je opisana zavarljivost.

U devetom poglavlju je prikazana primjena laserskog zavarivanja.

U desetom poglavlju su navedene prednosti i nedostaci laserskog zavarivanja.

U jedanaestom poglavlju biti će prikazan zaključak ovog završnog rada.

Dvanaesto poglavlje sadrži literaturu, popis slika i popis oznaka.

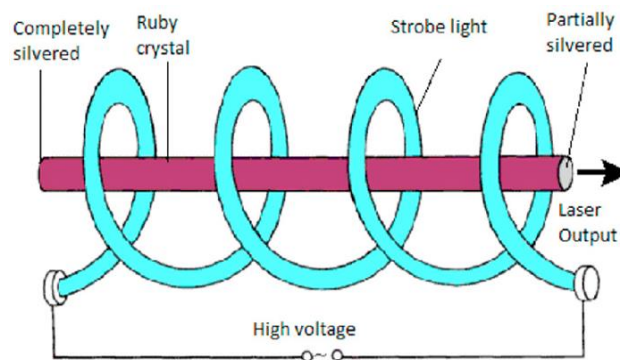
## 2. LASERSKA TEHNOLOGIJA

Riječ LASER je engleski akronim ( „ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ ).

Prvi je laser razvio Amerikanac Theodore Mainman 1960. Godine Hughesovim laboratorijima u Kaliforniji. Konstruirao je svjetlosni izvor koji se razlikovao od svih do tada poznatih svjetlosnih izvora.

Materijal prototipa bio je rubin kristal ( $Al_2O_3$  s  $Cr_2O_3$  koji ima odgovarajuću metastabilnu energetska razinu) u kojem je laserski učinak za pobuđivanje koristio stroboskopsko svjetlo. Kristali rubina na dva kraja su imali polureflektirajuće zrcalo i zrcalo visoke refleksije kao što je prikazano na slici 1.

Slika 1. Shema rubinskog lasera



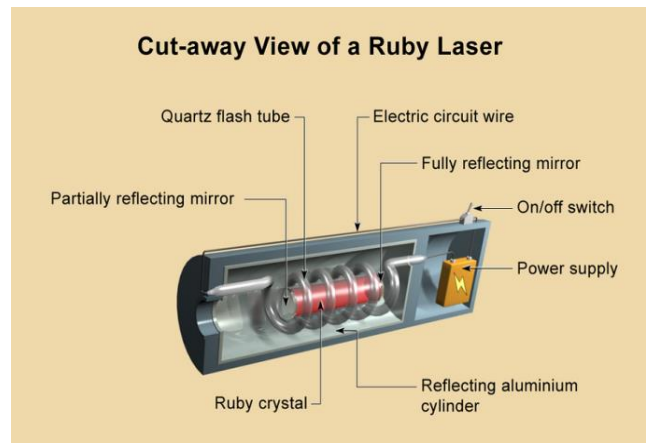
Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Ruby-Laser-Schematics-1\\_fig1\\_324201750](https://www.researchgate.net/figure/Ruby-Laser-Schematics-1_fig1_324201750)

Kada se stroboskopska svjetla pobude, stvara se kristal rubina i metastabilna razina energije koja pokreće lasersku emisiju koja se reflektira naprijed – natrag duž osi.

Budući da na strani rubina nema zrcala, višestruke refleksije uklanjaju divergentne zrake i samo striktno paralelne zrake s osi kristala ostaju u sustavu. Kada energija svjetla prijeđe razinu koja može pobjeći polureflektirajućem zrcalu, laser zasvjetli.

Tada su izlazne zrake paralelne zbog geometrijskog rasporeda sustava, a divergent je zanemarivo malen. Laserska zraka ima veliku energiju stoga je korisna za tehnologiju zavarivanja taljenjem. [3]

Slika 2. Dijelovi prvog rubinskog lasera



Izvor: [https://povijest.hr/wp-content/uploads/2016/05/1024px-Ruby\\_laser\\_main.png](https://povijest.hr/wp-content/uploads/2016/05/1024px-Ruby_laser_main.png)

### 3. PROCES NASTAJANJA LASERSKE ZRAKE

Laserske zrake nastaju kada elektroni u atomima u optičkim materijalima poput stakla, kristala ili plina apsorbiraju energiju električne struje ili svjetla. Takva dodatna energija "pobuđuje" elektrone dovoljno da se pomaknu iz orbite niže energije u orbitu više energije oko jezgre atoma.

Laser iskorištava kvantna svojstva atoma koji apsorbiraju i zrače čestice svjetlosti koje se nazivaju fotoni. Kada se elektroni u atomima vrate u svoje osnovno stanje bilo spontani ili kada su stimulirani svjetlom ili drugim izvorom energije, čak i drugim laserom u nekim slučajevima, emitiraju više fotona.

Svjetlost se sastoji od fotona koji se kreće u valovima. Obična vidljiva svjetlost, npr. iz kućne žarulje ili baterijske svjetiljke, sastoji se od više valnih duljina ili boja i nekoherentna je, što znači da se vrhovi i dolje svjetlosnih valova kreću na različitim valnim duljinama i u različitim smjerovima.

U laserskom snopu, svjetlosni valovi su koherentni što znači da se snop fotona kreće u istom smjeru na istoj valnoj duljini. To se postiže slanjem energiziranih elektrona kroz optički medij za pojačanje kao što je čvrsti materijal poput stakla ili plina.

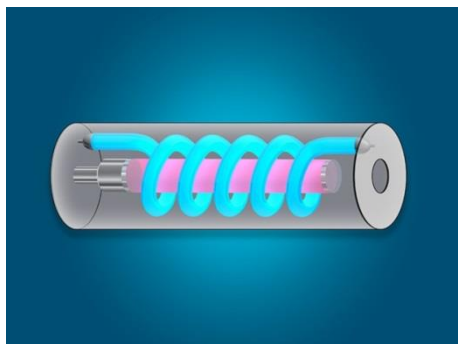
Određena valna duljina svjetlosti određena je količinom energije koja se oslobađa kada pobuđeni elektron padne na nižu orbitu. Razine uvedene energije mogu se prilagoditi materijalu u mediju pojačanja kako bi se proizvela željena boja snopa.

Zrcalo na jednoj strani optičkog materijala lasera odbija foton natrag prema elektronima. Prostor između zrcala ili šupljina dizajniran je tako da se foton koji je potreban za određenu vrstu medija za optičko pojačanje vrati u medij kako bi se stimulirala emisija gotovo točnog klona tog fotona. Obojica se kreću u istom smjeru i brzinom, kako bi se odbili od drugog zrcala s druge strane i ponovili proces kloniranja.

Dva postaju četiri, četiri postaju osam i tako dalje dok se fotoni ne pojačaju dovoljno da svi prođu pored zrcala i optičkog materijala u savršenom skladu. Takav sklad daje laseru snagu. Laserske zrake mogu ostati oštro fokusirane na velikim udaljenostima, čak i do Mjeseca i natrag.

Osnovni laser, kao što je ovaj crveni rubinski laser, sastoji se od šipke izrađene od kristala rubina sa zrcalom na svakom kraju i bljeskalice.

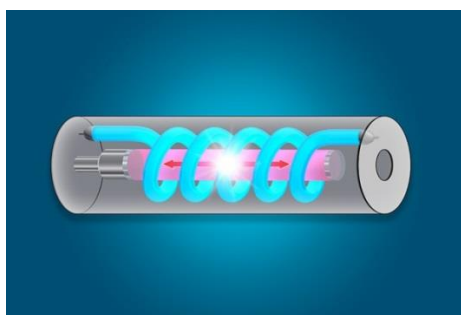
Slika 3. Dijelovi rubinskog lasera



Izvor: <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>

Bljesak svjetlosti iz bljeskalice dodaje energiju unutar štapića, pobuđujući atome rubina i proizvodeći svjetlosne čestice zvane fotoni.

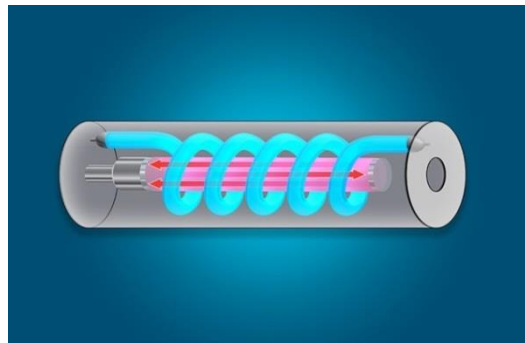
Slika 4. Bljesak unutar rubinskog lasera



Izvor: <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>

Fotoni udaraju u atome, stvarajući sve više i više fotona koji se odbijaju naprijed-natrag između zrcala unutar šipke.

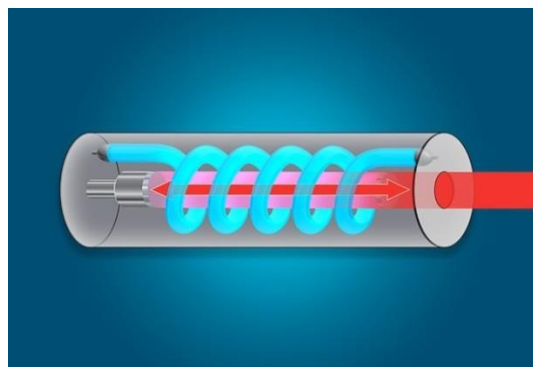
Slika 5. Nastajanje laserskog zračenja



Izvor: <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>

Broj fotona postaje toliki da prolaze kroz jedno od zrcala, koje je djelomično reflektirajuće, i izlazi laserska zraka.

Slika 6. Lasersko zračenje



Izvor: <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>



### 3.1. Energetske razine lasera

#### 3.1.1. Laser s tri energetske razine

Kod lasera s tri energetske razine, dvije razine energije između kojih se pojavljuje laser su: donja razina laserske energije ( $E_1$ ) i gornja razina laserske energije ( $E_2$ ).

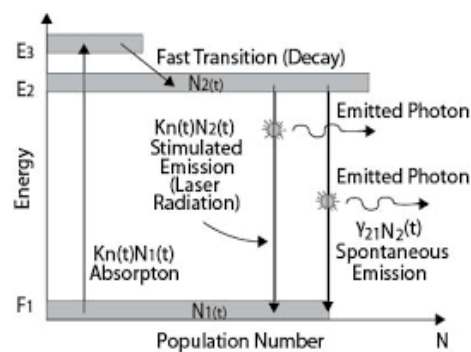
Da bi se postigla laserska energija, energija se mora pumpati u sustav da bi se stvorila inverzija populacije. Tako da će više atoma biti na energetskej razini ( $E_2$ ) nego na razini tla ( $E_1$ ).

Atomi se pumpaju iz osnovnog stanja ( $E_1$ ) na energetske razine ( $E_3$ ) koja je visoko pobuđena razina. Na toj razini u prosjeku ostaju  $10^{-8}$  sekundi i potom prelaze bez radioaktivnog zračenja na razinu  $E_2$  koja je metastabilna energetska razina.

Budući da je životni vijek metastabilne energetske razine relativno dug, (reda veličine  $10^{-3}$  sekunde) mnogo atoma ostaje u ovoj razini ili stanju.

Ako je pumpanje dovoljno jako, tada će nakon pumpanja 50% atoma biti na energetskej razini ( $E_2$ ), populacijska inverzija postoji i može doći do laserskog svjetla. [6]

Slika 7. Laser s tri energetske razine



Izvor: LASERSKE ZRAKE U STROJNOJ INDUSTRIJI Bernik A., Stipetić I., Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska, 2011., str. 7.

### 3.1.2. Laser s četiri energetske razine

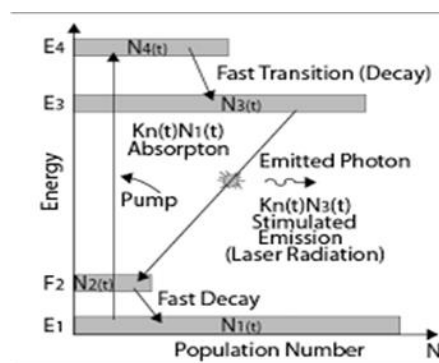
U usporedbi s ekvivalentnim dijagramom lasera s tri razine, postoji dodatna energetska razina iznad osnovnog stanja. Ova dodatna razina energije ima vrlo kratak vijek trajanja.

Rad lasera s četiri razine pumpanja sličan je pumpanju lasera s tri razine. To se radi brzom populacijom gornje laserske razine ( $E_3$ ) preko više energetske razine ( $E_4$ ).

Prednost lasera s četiri razine je mala populacija niže laserske energije ( $E_2$ ) koja se brzo isprazni i to omogućava održanje inverzne populacije između razine  $E_2$  i  $E_1$ . Za stvaranje inverzije populacije, nema potrebe pumpati više od 50% atoma na gornju razinu lasera.

Populacija donje laserske razine  $N_2(t)$  brzo opada od osnovnog stanja, tako da je praktički prazna. Zbog toga je kontinuirani rad lasera s četiri razine moguć čak i ako 99% atoma ostane u osnovnom stanju. [7]

Slika 8. Laser s četiri energetske razine



Izvor: LASERSKE ZRAKE U STROJNOJ INDUSTRIJI Bernik A., Stipetić I., Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska, 2011., str. 8.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LASERSKE ZRAKE U STROJNOJ INDUSTRIJI Bernik A., Stipetić I., Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska, 2011.

### 3.2. Spontana emisija

Spontana emisija je proces u kojem atom prelazi iz pobuđenog energetskeg stanja u niže energetske stanje koje nije stimulirana nikakvim upadnim zračenjem, već se javlja više-manje prirodno.

To se događa jer se pobuđeni atomi žele vratiti na osnovno stanje i ako se ostave na miru, samo je pitanje vremena kada će to učiniti. Ako je atom potpuno stabilan u pobuđenom stanju, ne bi bilo spontane emisije.

Prijelaz između energetskeg razina  $E_2$  i  $E_1$  rezultira emisijom fotona energije koju daje

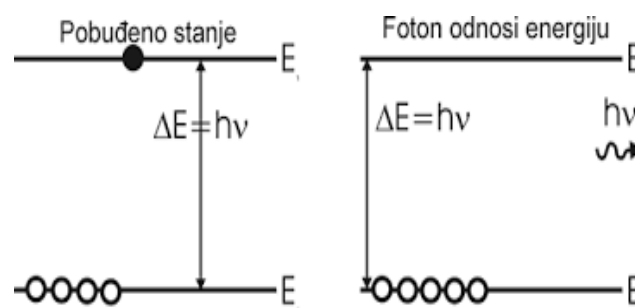
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h_p \nu$$

gdje je  $\nu$  frekvencija emitiranog fotona. Kod spontane emisije, brzina emisije po jedinici volumena,  $n_{sp}$ , na nižu razinu energije jedino je proporcionalna populaciji  $N_2$ , na višoj energetskeg razini i neovisna je o energiji zračenja gustoća. Dakle, imamo formulu:

$$n_{sp} = A_e N_2$$

gdje je  $A_e$  Einsteinov koeficijent za spontanu emisiju vjerojatnosti po jedinici vremena. Fotoni koji emitiraju pojedinačni atomi pod spontanim emisijama su neovisni jedni o drugima, pa stoga ne postoji ni faza ni usmjereni odnos između njih. [5]

Slika 9. Spontana emisija



Izvor: [http://physics.mef.hr/Predavanja/Laser/spontana\\_emis.gif](http://physics.mef.hr/Predavanja/Laser/spontana_emis.gif)

### 3.3. Stimulirana emisija

Ako je atom na energetskej razini 2 podvrgnut elektromagnetskom zračenju ili fotonu frekvencije  $\nu$  koji odgovara razlici energije  $E = E_2 - E_1$  između razina 1 i 2, tada će foton stimulirati atom da prijeđe u niže energetske stanje.

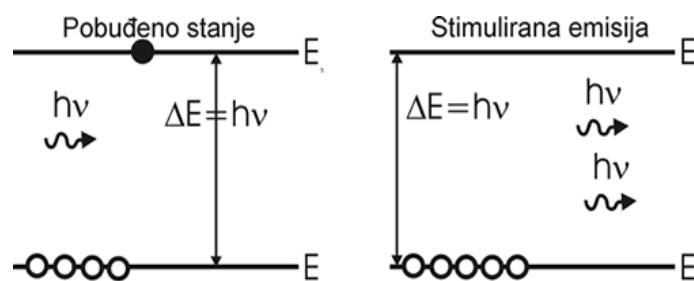
Energija emitirana kao rezultat ovog prijelaza, koja je u obliku elektromagnetskog fotona ili vala, isto je kao i stimulirajući foton koji je superponiran na upadni foton, čime se pojačava emitirana svjetlost.

To rezultira stimuliranom emisijom, gdje upadni i emitirani fotoni imaju iste karakteristike u fazi, što rezultira visokim stupnjem koherencije, smjera, frekvencije i stanjem polarizacije emitiranog fotona koji su isti kao i kod upadnog fotona. Dva fotona mogu generirati još jednu seriju, s rezultirajućom lavinom fotona.

Brzina emisije po jedinici volumena,  $n_{st}$ , u slučaju stimulirane emisije je proporcionalna broju populacije na razini 2 kao i gustoći energije te je dana formula

$$n_{st} = B_{21}N_2e(\nu)$$

Slika 10. Stimulirana emisija



Izvor: <http://physics.mef.hr/Predavanja/Laser/stimulirana.gif>

Gdje je  $B_{21}$  Einsteinov koeficijent za stimuliranu emisiju vjerojatnosti po jedinici vremena i jedinici gustoće energije ( $\text{m}^3, \text{Hz}/\text{J s}$ ) [5]

### 3.4. Laserska svjetlost

Lasersko svjetlo pokazuje neke jedinstvene karakteristike ili svojstva što ga čini jedinstvenim u odnosu na svjetlo drugih izvora. Primjerice lasersko svjetlo ima daleko veću čistoću boje nego svjetlo drugih izvora.

To jest, sva svjetlost koju proizvodi laser je gotovo potpuno iste boje, ili monokromatski. Još jedna jedinstvena karakteristika laserskog svjetla je njegov visok stupanj usmjerenosti. Svi svjetlosni valovi koje proizvodi laser napuštaju laser putujući vrlo skoro u istom smjeru.

Jedan rezultat ove usmjerenosti je da se laserska zraka može fokusirati na vrlo male točke, uvelike povećavajući svoj intenzitet. Ove karakteristike ili svojstva monokromatičnosti i usmjerenosti, zajedno s faznom konzistentnošću laserske svjetlosti kombiniraju se u jedan opisni pojam koji se zove koherencija, odnosno koherentnost. Koherentnost je ono što lasersko svjetlo čini drugačijem od svjetla koje proizvodi bilo koji drugi izvor. [8]

Važni čimbenici koji ističu osnovna svojstva laserskih zraka su sljedeći:

1. Monokromatičnost
2. Koherentnost
3. Usmjerenost

#### 3.4.1. Monokromatičnost

Kaže se da je svjetlosni snop monokromatski kada sadrži elektromagnetne valove jedne određene valne duljine ili jedne boje. Za razliku od konvencionalnih izvora čija se emisija kontinuirano proteže preko širokog pojasa, laseri se uglavnom smatraju monokromatskim.

Međutim, valna duljina od izvora svjetlosti, uključujući lasere, nikada nije potpuno monokromatski, već pokriva frekvenciju propusnosti koja ovisi o prirodi izvora i mehanizmima širenja uključenosti.

Za lasere, oscilirajuća širina pojasa može biti vrlo uska i može varirati od  $\Delta\nu = 500 \text{ Hz}$  ( $\Delta\lambda = 10^{-11} \mu\text{m}$  na  $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$  za visokokvalitetni stabilni plinski laser do više od  $1 \text{ GHz}$  ( $\Delta\lambda = 10^{-6} \mu\text{m}$ ) za lasere čvrstog stanja. Za usporedbu, propusnost za konvencionalni monokromatski izvor kao što je natrijeva lampa može biti veličine nekoliko gigaherca.

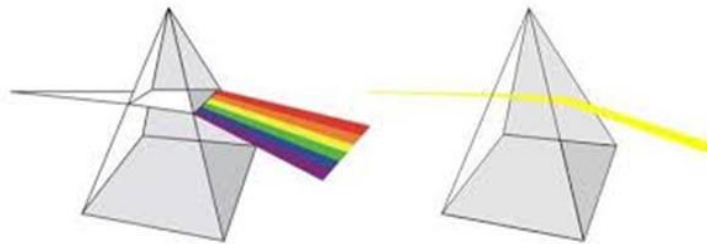
Teoretski, minimalna oscilirajuća širina linije (ili fluktuacija laserske frekvencije)  $\delta\nu$  lasera koji oscilira u pojedinačnom načinu rada koji je u stabilnom stanju je određen spontanom emisijom i može se pokazati formulom:

$$\delta\nu = \frac{4\pi h_p \nu_o (\Delta\nu)^2}{q}$$

gdje je  $q$  snaga u oscilirajućem polju,  $h_p$  je Planckova konstanta,  $\Delta\nu$  je polu-širina rezonancije pri pola maksimalnog intenziteta,  $\nu_o$  je frekvencija osciliranja i  $\delta\nu$  je minimalna oscilirajuća širina linije.

Jednadžba pokazuje da povećanje snage lasera rezultira smanjenjem teoretske širine linije. To je zato što je povećanje snage posljedica povećanja u omjeru stimuliranih i spontanih emisija.

Slika 11. Bijela svjetlost u odnosu na monokromatsku svjetlost



Izvor: [file:///C:/Users/zeppelin26/Downloads/cimera\\_lovre\\_ffri\\_2015\\_zavrs\\_sveuc.pdf](file:///C:/Users/zeppelin26/Downloads/cimera_lovre_ffri_2015_zavrs_sveuc.pdf)

Za pulsirajuću lasersku zraku, minimalna širina linije zadana je obrnuto od trajanja impulsa,  $\Delta\tau_p$ :

$$\delta\nu = \frac{1}{\Delta\tau_p}$$

Dakle, što je kraće trajanje impulsa, širina linije je veća. Oscilirajuća širina linije je također šira za laser koji oscilira na mnogo načina.

Monokromatičnost je važna u laserskoj obradi materijala, jer određuje opseg do kojeg se laserska zraka može fokusirati. Budući da je radijus u točki fokus svjetlosnog snopa ovisi o valnoj duljini, monokromatski snop može biti oštrije fokusiran od snopa sa širokim pojasom.

Ovo možda nije značajno u laserskom zavarivanju ili toplinskim obradama materijala, ali u laserskom rezanju ili mikrofabrikaciji, proces učinkovitosti značajno ovisi o tome koliko je dobro fokusirana zraka. [5]

### 3.4.2. Koherentnost

Dva vala u laserskoj zraci prikazana su na slici. Ovi valovi ilustriraju jedinstvene karakteristike laserskog svjetla. Imaju gotovo istu valnu duljinu, isti smjer i istu fazu. Zajedno ova tri svojstva čine svjetlo koherentnim, a ta je koherencija svojstvo laserskog svjetla koje ga razlikuje od svih drugih vrsta svjetla.

Slika 12. Koherentna svjetlost



Izvor: [http://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/9%20F2\\_interferencija.pdf](http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/9%20F2_interferencija.pdf)

Sve stvari koje se mogu uraditi samo laserskim svjetlom mogu se učiniti jer je laserska svjetlost koherentna. Monokromatsko lasersko svjetlo može se koristiti za ispitivanje strukture atoma ili za kontrolu složenih kemijskih reakcija, jer je koherentan. Visoko usmjerena laserska svjetlost može prenositi energiju na velike udaljenosti ili fokusirati tu energiju na vrlo visoke intenzitete, jer je koherentan.

Fazno konzistentno lasersko svjetlo može proizvesti realne trodimenzionalne holograme ili stvoriti ultrakratke pulseve svjetlosti čije je trajanje samo nekoliko optičkih ciklusa. Koherentna svjetlost iz lasera zaista je druga vrsta svjetlosti od one koju emitira bilo koji drugi izvor.

Fenomen koherencije ovisi o prostoru i vremenu, pa se shodno tome obično mora uzeti u obzir prostorna i vremenska koherencija.

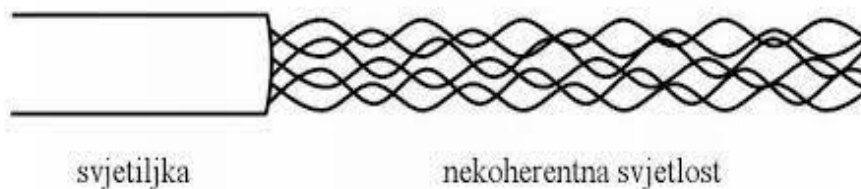
Prostorna koherencija odnosi se na pojavu pri kojoj fazna razlika između dvije točke na valnoj fronti elektromagnetskog polja ostaju konstantne s vremenom. Često opisuje fazni odnos između dva snopa svjetlosti, čak iako jedna zraka može biti i prostorna nekoherentna.

Vremenska koherencija odnosi se na situaciju u kojoj je fazna razlika između valne fronte elektromagnetskog polja u zadanoj točki P u trenutku t i da u isto vrijeme točka P i vrijeme  $t + \tau_0$  ostaje konstantno s vremenom. Elektromagnetski val je tada vremenski koherentan tijekom razdoblja  $\tau_0$  čija se faza mijenja u intervalima od  $\tau_0$ .

Vremenska koherencija često opisuje fazni odnos povezan s jednim snopom svjetla. Iako zraka može imati i prostornu i vremensku koherenciju, dvije ne moraju nužno koegzistirati.

Drugim riječima, val koji je prostorno koherentan može biti privremeno nekoherentan, i obrnuto. Radi jasnoće, ilustrirana je nekoherentna zraka koja je prikazana na slici. [5]

Slika 13. Nekoherentna zraka



Izvor: [http://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/9%20F2\\_interferencija.pdf](http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/9%20F2_interferencija.pdf)

### 3.4.3. Usmjerenost

Lasersko svjetlo ima vrlo malu divergenciju, odnosno visoko je usmjereno. Laserska zraka dolazi iz rezonantne šupljine, a samo valovi koji se šire blizu osi rezonatora mogu održavati oscilacije u šupljini.

Usmjerenost emitirane zrake određena je konfiguracijom zrcala laserske šupljine. U njegovoj najjednostavnijoj strukturi, šupljina se sastoji od dva zrcala raspoređena tako da se svjetlost odbija i vraća, svaki put prolazeći kroz medij pojačanja.

Jedno od dva zrcala, izlazna spojnica, je djelomično prozirna, dopuštajući izlaznoj zraci da izađe kroz njega. Struktura laserske šupljine određuje usmjerenost ili kolimaciju laserske zrake, što zauzvrat određuje sposobnost laserske zrake koja treba biti fokusirana u malu točku.



Usmjerenost je opisana kutom divergencije svjetlosnog snopa. Za savršeno prostorno koherentno svjetlo, zraka promjera otvora  $D$  će imati neizbježnu divergenciju zbog difrakcije. Iz teorije difrakcije kut divergencije  $\theta_d$  je:

$$\theta_d = \frac{\beta \lambda}{D}$$

$\lambda$  i  $D$  su valne duljine, odnosno promjeri snopa,  $\beta$  je koeficijent čija je vrijednost oko jedinice i ovisi o vrsti distribucije amplitude svjetlosti i definiciji promjera snopa  $\theta_d$  naziva se difrakcijska ograničena divergencija.

Ako je zraka djelomično prostorna koherentna, njezina je divergencija veća od difrakcijske ograničene divergencije. U ovom slučaju divergencija postaje:

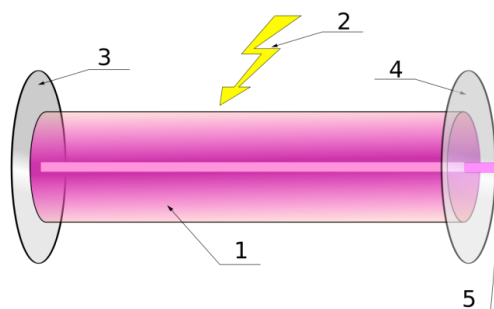
$$\theta = \frac{\beta \lambda}{(Sc)^{1/2}}$$

gdje je  $Sc$  područje koherencije. [9]

## 4. DIJELOVI LASERA

Laser ili laserski sustav se sastoji od tri osnovna dijela ili komponente kao što vidimo na slici: 1) laserskog medija, 2) laserske pumpe ili energije za pobuđivanje medija i optičkog rezonatora koji obuhvaća 3) 100% reflektirajuće zrcalo i 4) 99% reflektirajuće zrcalo, 5) laserska zraka

Slika 14. Dijelovi lasera



Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Opt%C4%8Dko\\_pumpanje#/media/Datoteka:Laser.svg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Opt%C4%8Dko_pumpanje#/media/Datoteka:Laser.svg)

#### 4.1. Laserski medij

Laserski medij također poznat kao aktivni medij ili medij pojačanja je medij u kojem se odvija spontana i stimulirana emisija zračenja. Općenito, populacija niže energetske razine veća je od populacije više energetske razine ili stanja. Međutim, nakon postizanja inverzije naseljenosti, populacija više energetske razine stanja postaje veća od nižeg energetske razine stanja.

Nakon što prime dovoljno energije iz izvora, elektroni u nižem energetske razine stanju se pobuđuju u više energetske razine stanje. Elektroni ne ostaju dugo u pobuđenom stanju jer je vrijeme života elektrona vrlo kratko u pobuđenom stanju. Stoga će se nakon kratkog razdoblja elektroni u pobuđenom stanju vratiti u osnovno stanje oslobađanjem energije u obliku fotona ili svjetlosti. To se zove spontana emisija.

Kod spontane emisije svaki elektron emitira jedan foton dok pada u osnovno stanje. Kada se ti emitirani fotoni sudare s elektronima u pobuđenom stanju, to prisiljava metastabilne elektrone da padnu natrag u osnovno stanje. Kao rezultat, elektroni ponovno oslobađaju energiju u obliku fotona. To se zove stimulirana emisija.

U stimuliranoj emisiji svaki elektron emitira dva fotona dok pada u osnovno stanje. Kada ovi emitirani fotoni ponovno dođu u interakciju s elektronima metastabilnog stanja, tada opet svaki elektron emitira dva fotona, Stoga se milijuni fotona generiraju korištenjem samo malog broja fotona.

Ako koristimo električnu energiju kao izvor energije tada će jedan foton ili nekoliko fotona proizvesti veliki broj fotona procesom stimulirane emisije. U laserskom mediju se tako postiže pojačanje svjetlosti. Laserski medij određuje karakteristike emitiranog laserskog svjetla. Laserski medij može biti čvrst, tekući ili plinoviti.

Rubinski laser može biti primjer za laser u čvrstom stanju. Pri tome se kao aktivni medij koristi kristal rubina. U ovom laseru, ksenonska cijev za pražnjenje djeluje kao izvor pumpe koja služi za davanje bljeskalice.

Helij – neonski laser je primjer za plinski laser. Pri tome se neon koristi kao aktivni medij. Radiofrekvencijski generator djeluje kao izvor pumpe u He-Ne laseru. [10]

## 4.2. Laserska pumpa

Izvor pumpe ili izvor energije je dio laserskog sustava koji daje energiju laserskom mediju. Da bismo dobili lasersku emisiju, prvo moramo proizvesti inverziju naseljenosti. Inverzija naseljenosti je proces postizanja većeg broja elektrona u stanju više energije u odnosu na stanju niže energije.

Izvor energije opskrbljuje laserski medij dovoljnom količinom energije kojom se elektroni u nižem energetske stanju pobuđuju u više energetske stanje. Kao rezultat toga dobivamo inverziju naseljenosti u aktivnom mediju ili laserskom mediju.

Primjeri izvora energije uključuju električna pražnjenja, svjetlost drugog lasera, kemijske reakcije i bljeskalice. Vrsta korištenog izvora energije najviše ovisi o laserskom mediju. Ekscimer laser kao izvor energije koristi kemijsku reakciju, helij laser kao izvor energije koristi električno pražnjenje, a Nd:YAG laser kao izvor energije koristi svjetlost fokusiranu iz diodnog lasera. [10]

## 4.3. Optički rezonator

Laserski medij je okružen s dva paralelna zrcala koja osiguravaju povratnu informaciju svjetlosti. Jedno zrcalo je potpuno reflektirajuće, dok je drugo djelomično reflektirajuće. Ova dva zrcala kao cjelina nazivaju se optički rezonator. Optički rezonator je također poznat kao optička šupljina ili rezonantna šupljina.

Ova dva zrcala imaju optičke premaze koji određuju njihova svojstva refleksije. Optički premaz je tanak sloj materijala nanesenog na materijale kao što su zrcalo ili leće. Svako je zrcalo drugačije presvučeno. Stoga će svako zrcalo drugačije reflektirati svjetlost. Jedno zrcalo će u potpunosti reflektirati svjetlost, dol će drugo djelomično reflektirati svjetlost.

Potpuno reflektirajuće zrcalo naziva se visoki reflektor, dok se djelomično reflektirajuće zrcalo naziva izlazni spojnik. Izlazna spojnica omogućit će dijelu svjetlosti da napusti optičku šupljinu kako bi proizvela izlaznu zraku lasera.

Kada se laserskom mediju dovede energija, elektroni nižeg energetske stanja u laserskom mediju će prijeći u pobuđeno stanje. Nakon kratkog vremena, elektroni u pobuđenom stanju će se vratiti u osnovno stanje oslobađanjem energije u obliku fotona ili svjetlosti. Ovaj proces emisije fotona naziva se spontana emisija. Dakle, svjetlost se proizvodi u aktivnom mediju procesom koji se naziva spontana emisija.

Svjetlo stvoreno unutar laserskog medija odbijati će se naprijed-natrag između dva zrcala. To stimulira druge elektrone da oslobađaju svjetlost dok padaju u osnovno stanje. Isto tako, veliki broj elektrona je stimuliran da emitira svjetlost. Tako se postiže optički dobitak.

Ovo pojačano svjetlo izlazi kroz djelomično reflektirajuće zrcalo. Proces stimuliranja elektrona drugih atoma da proizvode svjetlost u laserskom mediju naziva se stimulirana emisija.

Svjetlost u laserskom mediju reflektira se stotine puta između zrcala prije nego što pobjegne kroz djelomično reflektirajuće zrcalo. Svjetlo koje je pobjeglo iz djelomično reflektirajućeg zrcala nastaje procesom stimulirane emisije. Dakle, ovo svjetlo će putovati na velike udaljenosti bez širenja u prostoru.

## 5. VRSTE LASERA

Postoje razne vrste lasera. Svaki od njih ima različite karakteristike koje ovise u velikoj mjeri na laserski medij koji se koristi za lasersko djelovanje. U ovom poglavlju će se raspravljati o glavnim vrstama lasera prema agregatnom stanju. Osnovne vrste lasera su sljedeće:

1. Plinski laseri
2. Tekući laseri
3. Laseri čvrstog stanja
4. Poluvodički laseri

Iako se poluvodički laseri također temelje na čvrstom materijalu, razmatraju se zasebno jer su mehanizmi pumpanja i lasera različiti. U svakoj vrsti lasera razvijen je niz lasera koji koriste različite aktivne medije. [5]

### 5.1. Plinski laseri

Plinski laseri su među najčešćim oblicima u laserskoj industriji. Razine snage kod plinskih lasera su u rasponu od nekoliko kilovata (CO<sub>2</sub> laser) do milivata (He-Ne laser). Mogu raditi u kontinuiranom i pulsirajućem načinu rada, s izlaznim frekvencijama u rasponu od ultraljubičastog do infracrvenog.

Kao što naziv sugerira, plinski laseri koriste plinoviti medij kao aktivni medij. Uobičajeni primjeri su He-Ne i CO<sub>2</sub> laseri. Mehanizmi širenja u plinskim laserima nisu tako jaki kao oni u čvrstim tvarima. Stoga su rezultirajuće širine linija relativno male, određene prvenstveno Dopplerovim širenjem. Razlog tome je što je zbog niskih

tlakova koji se obično koriste u plinskim laserima, ekspanzija pri sudaru relativno mala. Kao rezultat toga, razine energije su relativno uske, a time i oštra linija emisije koja je neophodna za pobuđivanje atoma.

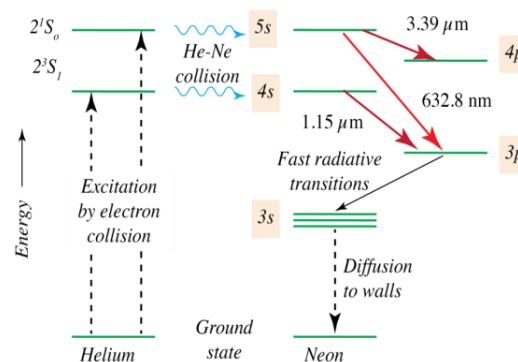
Optičko pumpanje sa širokim spektrom emisije stoga nije prikladno za pumpanje plinskih lasera zato jer bi rezultiralo neučinkovitim pumpanjem. Električno pumpanje je najčešći način pobuđivanja aktivnog medija u plinskim laserima. Pumpanje se vrši kemijskim putem, snopom elektrona ili pomoću plinsko-dinamičkog širenja. [5]

### 5.1.1. He-Ne laser

Najčešći primjer lasera s neutralnim atomima koje koriste inertne plinove kao aktivni medij je He-Ne laser, koji je također bio prvi laser koji je generirao kontinuirani način rada. Aktivni medij u ovom slučaju sastoji se od 1 dijela neona na 10 dijelova helija.

Na slici je laser s četiri razine, a slika ilustrira shemu energetske razine He-Ne lasera. Atomi helija se jednostavnije ili efikasnije pobuđuju na više razine pomoću sudara elektrona nego atomi neona.

Slika 15. Energetske razine He-Ne sustava



Izvor:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Helium%E2%80%93Neon\\_laser#/media/File:HeNe\\_Laser\\_Levels.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Helium%E2%80%93Neon_laser#/media/File:HeNe_Laser_Levels.png)

Na slici 16. je shematski prikaz He-Ne lasera. Cijev za pražnjenje je tipično 20-80 cm duljine. Na krajevima su zrcala, koja mogu biti unutarnja ili izvan zatvorene cijevi. Interni sustav ima nedostatak da ga treba povremeno zamijeniti zbog erozije od strane pražnjenja. Naprotiv, kod vanjskog sustava, prozori na krajevima cijevi odbijaju dio zrake što dovodi do gubitaka.

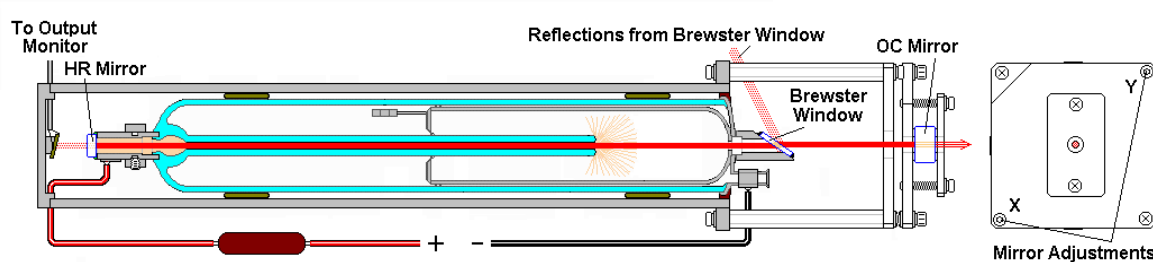
Ovaj problem je ublažen pomoću postavljanja prozora pod Brewsterovim kutom  $\theta_B$  koji je zadan formulom:

$$\tan_{\theta_B} = n$$

gdje je  $n$  indeks loma materijala prozora.

Izlazna zraka He-Ne lasera ima širinu pojasa od oko 1,6 GHz prvenstveno zahvaljujući Dopplerovom širenju. Stoga može postojati nekoliko aksijalnih načina rada istovremeno. Jednostruki aksijalni način rada može se postići smanjenjem šupljine duljine oko 10-15 cm. To omogućuje postizanje visoke stabilnosti kontroliranjem duljine šupljine.

Slika 16. Shema He-Ne lasera



HeNe Laser Tube with Internal HR and Brewster Window with External OC

Izvor: <https://www.experimental-engineering.co.uk/wp-content/uploads/2016/08/onebrew1.gif>

Istosmjerna struja, koja se provodi na dvije elektrode sa naponom od 1 kV, održava električno tinjajuće pražnjenje s umjerenom gustoćom struje. U najjednostavnijem slučaju se koristi balansirani otpornik koji će stabilizirati struju. Struja je veličine npr. 10 mA, što dovodi da laser proizvodi električnu snagu veličine 10 W. [5]

Staklena cijev ima Brewsterove prozore, a laserska zrcala moraju tvoriti laserski rezonator s malim povratnim gubitkom od ispod 1%. Zbog gubitka ovisnog o polarizaciji na Brewsterovim prozorima, dobiva se stabilna linearna polarizacija.

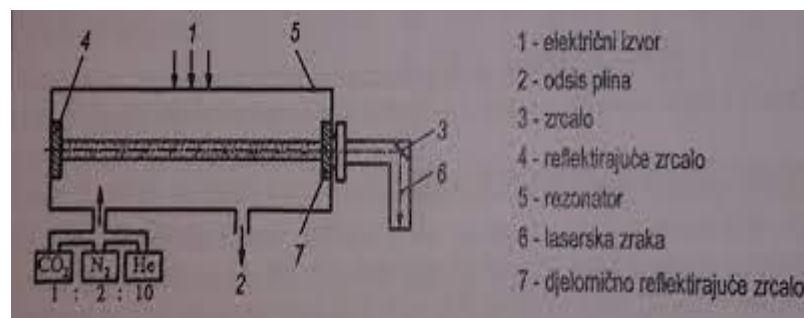
Uobičajene primjene za He-Ne lasere uključuju senzor položaja, čitanje znakova ili barkoda, poravnanje, mjerenje pomaka interferometrijom, holografija i video disk memorije. [11]

### 5.1.2. CO<sub>2</sub> laseri

CO<sub>2</sub> laseri su plinski laseri koji emitiraju infracrveno svjetlo u spektralnim područjima valnih duljina. Sastoji se od mješavina plinova 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 moguće pobuđivanje molekula CO<sub>2</sub> na gornju energetska razinu, dokazalo se da je najučinkovitije koristiti rezonantnu energiju molekule dušika.

Molekule dušika su pobuđene električnim pražnjenjem na metastabilnu vibracijsku razinu te pri sudaru s njima prenose energiju pobude na molekule CO<sub>2</sub>. Molekule CO<sub>2</sub> nakon sudara prelaze na veću energetska razinu. Helij služi za depopulaciju nižih energetska razina i za eliminiranje toplote.

Slika 17. Shema i princip rada CO<sub>2</sub> lasera



Izvor: OBRADA LASEROM – LASERSKA OBRADA METALA, ZAVRŠNI RAD, Roman Balinović

CO<sub>2</sub> laseri stvaraju zraku valnih duljina od 10,6 μm, također mogu proizvesti zrake između 9 i 11 μm. To se zbiva zbog različitih vibracijskih stanja molekula CO<sub>2</sub>. Učinkovitost pretvorbe snage kod CO<sub>2</sub> lasera može biti čak do 20%.

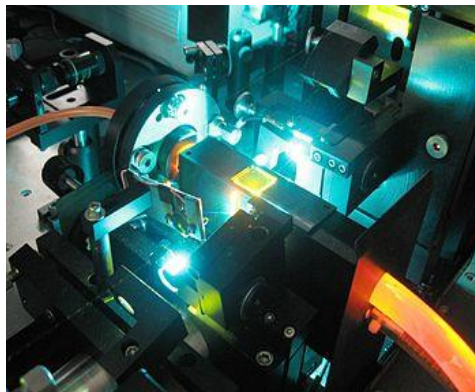
CO<sub>2</sub> laseri se najviše koriste za lasersku obradu materijala kao npr. zavarivanje i rezanje metala, lasersko kaljenje, lasersko lemljenje u elektronici, laserski 3D ispis polimernih materijala, lasersko označavanje raznih materijala i za rezanje plastičnih materijala kao što su drvo i staklo. [12]

## 5.2. Tekući laseri s bojom

Tekući laseri su laseri s optičkim pumpanjem u kojima je medij za dobivanje tekućina na sobnoj temperaturi. Najuspješniji od svih tekućih lasera su laseri s bojom. Ovi laseri generiraju širokopojasno lasersko svjetlo iz pobuđenih energetske stanja organskih boja otopljenih u tekućim otapalima. Izlaz može biti pulsirajući ili kontinuirani (CW) i obuhvaća spektar od bliskog UV do bliskog IR, ovisno o korištenoj boji.

Velike organske molekule boje pobuđuju se u viša energetska stanja lučnim svjetiljkama, bljeskalicama ili drugim laserima kao što su Nd:YAG s udvostručenom frekvencijom, bakrena para, argon-ion, dušik i ekscimer. Otopina boje obično se pumpa poprečno kroz lasersku šupljinu i nalazi se u prozirnoj komori koja se naziva protočna ćelija.

Slika 18. Stolni CW laser na boji temeljenog na rodaminu 6G koji emitira žutu boju



Izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dye\\_laser](https://en.wikipedia.org/wiki/Dye_laser)

Širokopojasna laserska emisija potječe od interakcija između vibracijskih i elektroničkih stanja molekula boje koje dijele elektroničke energetske razine u široke energetske pojaseve slične onima kod vibracijskih lasera. Optika šupljine selektivne valne duljine, kao što je prizma ili difrakcijska rešetka, može se koristiti za podešavanje željene frekvencije.

Efikasnost, mogućnost podešavanja i visoka koherencija lasera na bojilu čine ih idealnima za znanstvena, medicinska i spektroskopska istraživanja. Osim toga, njihova širokopojasna emisija čini ih posebno prikladnima za generiranje ultrakratkih laserskih impulsa. [13]



### 5.3. Laseri čvrstog stanja

Laseri u čvrstom stanju su laseri koji se temelje na medijima za pojačanje i čvrstom stanju kao što su kristali ili stakla dopirana ionima rijetkih zemalja ili prijelaznih metala. Laseri u čvrstom stanju koji su dopirani ionima, ponekad se i nazivaju laseri dopiranog izolatora koji se mogu izraditi u obliku masovnih lasera, vlaknastih lasera ili drugih vrsta valovodnih lasera. Takvi laseri mogu generirati izlaznu snagu između nekoliko milivata i mnogo kilovata. Prvi od svih lasera u čvrstom stanju bio je pulsirajući rubinski laser, koji je demonstrirao Mainman 1960.godine.

Mnogi laseri u čvrstom stanju optički se pumpaju bljeskalicama ili lučnim svjetiljkama. Takvi izvori pumpi su relativno jeftini i mogu dati vrlo velike snage. Međutim, oni dovode do prilično niske energetske učinkovitosti, umjerenog životnog vijeka i jakih toplinskih učinaka kao što je toplinska leća u mediju pojačanja. Laserske diode danas se najčešće koriste za pumpanje lasera u čvrstom stanju.

Laserski prijelazi kristala ili stakla dopiranih rijetkim zemljama ili prijelaznim metalima obično su slabo dopušteni prijelazi, tj. prijelazi s vrlo niskom snagom oscilatora što dovodi do dugog životnog vijeka gornjeg stanja i posljedično dobrom skladištenju energije, s gornjim stanjem životni vijek je od mikrosekundi do milisekundi.

Dugi životni vijek u gornjem stanju čini lasere čvrstog stanja vrlo prikladnim za Q prebacivanje: laserski kristal može lako pohraniti količinu energije koja, kada se oslobodi u obliku nanosekundnog svjetlosnog pulsa, dovodi do vršne snage koja je reda veličine iznad dostižne prosječne snage. U zaključanom način rada, laseri u čvrstom stanju mogu generirati ultrakratke impulse s trajanjem mjerenim u pikosekundama ili femtosekundama.

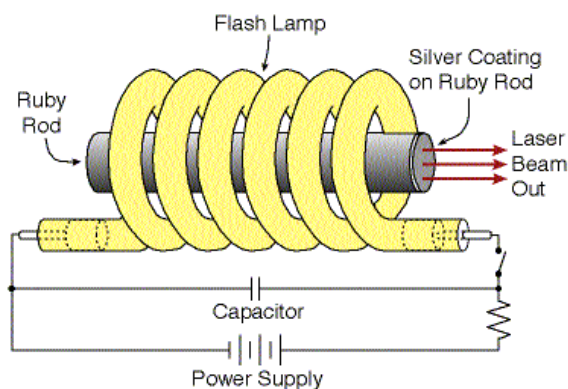
Različite vrste lasera u čvrstom stanju znatno se razlikuju za podešavanje valne duljine. Većina laserskih kristala dopiranih rijetkim zemljama, kao što su Nd:YAG i Nd:YVO<sub>4</sub> imaju prilično malu propusnost pojačanja od reda 1 nm ili manje, tako da je ugađanje moguće samo unutar prilično ograničenog raspona. S druge strane, rasponi ugađanja od desetaka nanometara i više mogući su sa staklima dopiranim rijetkim zemljama, a posebno s kristalima dopiranim prijelaznim metalima kao što su Ti:safir, Cr:LiSAF i Cr:ZnSe. [14]

### 5.3.1. Rubinski laser

Značaj rubinskog lasera je u tome što je to bio prvi laser koji je uspješno napravljen. Kristalni štapić sintetskog kristala je jedan kristal rubina, koji se sastoji od kristalnog aluminijev oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) koji je dopiran kromom ( $\text{Cr}^{3+}$ ) Krom čini oko 0,05% težine štapića i zamjenjuje neke od aluminijevih iona. Dobiven materijal je ružičaste boje. [5]

Prvi laser koji je konstruirao Theodore H. Maiman u Hughesovim istraživačkim laboratorijima 1960. godine, bio je rubinski laser koji je kao pobudu imao bljeskalicu i emitirao je svjetlost valne duljine od 694,3 nm. Veličina rubinskog štapića obično se kreće od 0,5 do 1 cm i duljine 5 do 20 cm. Optičko pumpanje je moguće u zelenom i plavom spektralnom području.

Slika 19. Shematski prikaz rubinskog lasera



Izvor: <https://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-6/C6s2t1p5.htm>

Iako su kasnije razvijeni mnogi drugi čvrsti laseri, rubinski laseri pripadaju relativno malom broju čvrstih vidljivih lasera; većina drugih emitira u infracrvenom spektralnom području. Rubinski laser pripada klasi medija za lasersko pojačanje s tri razine i stoga zahtjeva prilično visoke intenzitete pumpe za proizvodnju laserskog pojačanja.

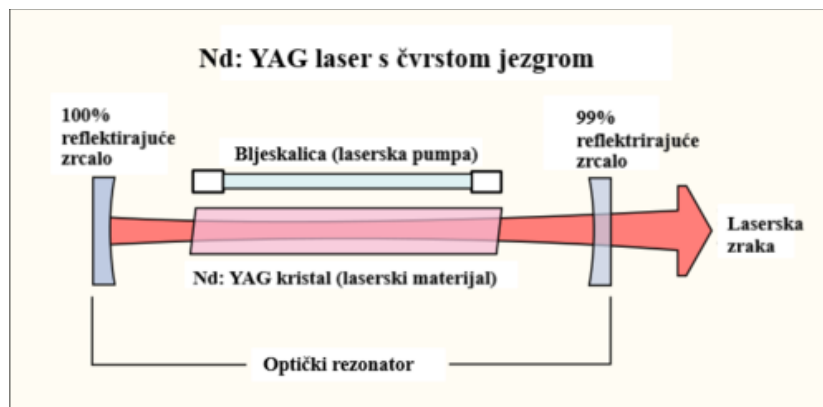
Rubinski laseri se uglavnom pumpaju bljeskalicama u slobodnom načinu rada ili s Q prebacivanjem za nanosekundni puls s odgovarajućom većom vršnom snagom. Prilično visoke energije impulsa mogu se postići, iako teško u kombinaciji s visokom kvalitetom snopa.

Zbog svoje ograničene učinkovitosti, rubinski laseri nisu naširoko korišteni. Početne primjene bile su za laserske daljinomjere, fotografiju velike brzine, pulsirajuću holografiju, tetovaže i uklanjanje dlaka. Danas se koriste s Q prebacivanjem za dijamantno bušenje. [15]

### 5.3.2. Nd:YAG laser

Kod ovih lasera laserski medij se sastoji od kristala itrij-aluminij granata (YAG) kemijskog sastava  $Y_3Al_5O_{12}$ , gdje neodimij ( $Nd^{3+}$ ) zamjenjuje do 1% iona itrija ( $Y^{3+}$ ). Djelovanje Nd:YAG lasera može biti ili u kontinuiranom valu (CW) ili u pulsirajućem načinu rada, ovisno o tome je li pumpanje kontinuirano ili isprekidano. Nd:YAG laseri kao pobudu mogu koristiti lasersku diodu ili bljeskalicu visokog intenziteta (bljeskalica punjena ksenonom ili kriptonom). Nd:YAG laseri obično emitiraju svjetlost valne duljine od 1064 nm, u infracrvenom području.

Slika 20. Shematski prikaz Nd:YAG lasera



Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a\\_lasera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera)

Izlazna snaga u CW modu varira od 150 W do 6 kW, a u impulsnom modu s Q-prebacivanjem je reda veličine 50 MW s trajanjem impulsa od oko 20 ps, s brzinom ponavljanja od 1-100 Hz.

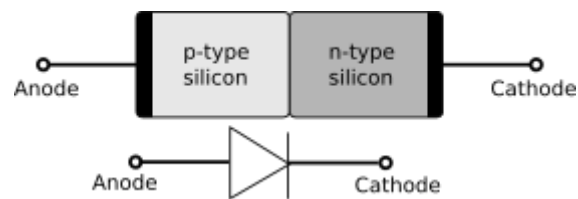
Laser s kontinuiranim valovima velike snage (do 2 kW) može se postići s tri Nd:YAG štapića u liniji kao jedan oscilator, sa svakim štapićem koja se pumpa lučnom lampom. Vrlo visoke snage (do 6 kW) dobivaju se pumpanjem diodnim laserom.

Učinkovitost pulsirajućih i kontinuiranih Nd:YAG lasera obično se kreće između 1 i 3%. Primjene Nd:YAG lasera uključuju lasersku kirurgiju, obradu materijala kao npr. zavarivanje, rezanje, bušenje i modificiranje površine. [5]

## 5.4. Poluvodički laseri

Poluvodički laser, također poznati kao diodni laseri su podijeljeni u dva osnovna područja p i n. P-n spoj je granica između dva poluvodička materijala. Na tzv. n-strani razine energije su gotovo ispunjene elektronima tako da su oni nosioci struje, dok p predstavlja razinu energije gdje nedostaju elektroni.

Slika 21. P-n spoj

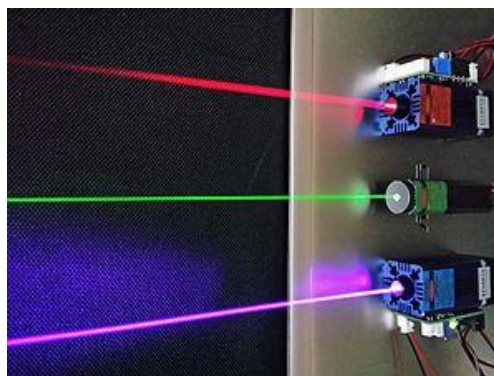


Izvor: [https://sh.wikipedia.org/wiki/PN\\_spoj](https://sh.wikipedia.org/wiki/PN_spoj)

Kada se primijeni određeni napon na ta dva područja, elektroni se počinju kretati jedni prema drugima. Elektroni se tada sudaraju, odnosno rekombiniraju u tzv. kvantnoj jami gdje dolazi do stvaranja ili emisije fotona.

Koherentno zračenje dobivamo ako se na krajevima poluvodiča ili dioda nalaze zrcala koja visokom refleksijom omogućuju laserski efekt. Boja svjetlosti ili energija fotona ovisi o svojstvima poluvodičkog spoja. Poluvodički laseri najčešće rade u infracrvenom spektralnom području. [16]

Slika 22. Primjer poluvodičkih lasera



Izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_laser\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_laser_theory)

## 6. TEHNIKE LASERSKOG ZAVARIVANJA

Kada laserska zraka upadne na metalnu površinu, odvija se niz događaja. Značajan dio zrake može se u početku reflektirati. Mali postotak koji se apsorbira zagrijava površinu, podižući njezinu temperaturu. S povećanjem temperature, površinska apsorpcija se povećava što dodatno povećava temperaturu. To bi na kraju moglo rezultirati lokaliziranim taljenjem i mogućim isparavanjem metala. Takvo isparavanje, ako se dogodi stvara parnu šupljinu u metalu.

Lasersko zavarivanje stoga može biti u dva oblika:

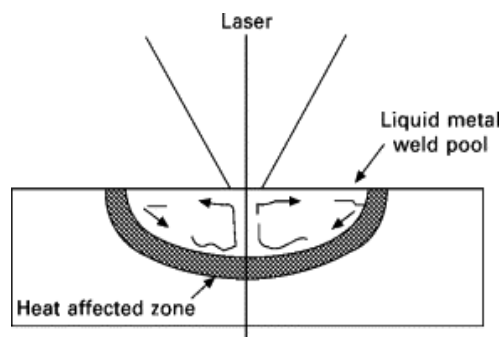
1. Kondukcijski način zavarivanja
2. Zavarivanje ključanicom (engl. Keyhole)

Kondukcijski način zavarivanja obično se koristi za zavarivanje folija i tankih ploča, dok se zavarivanje putem ključanice upotrebljava za relativno debele presjeke. [5]

### 6.1. Kondukcijski način zavarivanja

Kondukcijski način zavarivanja obično se odvija pri gustoći snage  $10^6 \text{ W/cm}^2$ , pri čemu je isparavanje izratka minimalno. Prvo se taloži snaga lasera na površini i zatim se kondukcijom prenose u okolinu. Aktivacija je stoga kontrolirana kondukcijom od početne točke kontakta, tj. površine obratka, uzrokujući zagrijavanje male površine iznad tališta. Dobiveni zavar je plići sa širom zonom utjecaja topline u usporedbi s onom koju proizvodi zavarivanje ključanice. Češći je kod lasera male snage, uglavnom ispod 1 kW. Oblik metalne kupke ili kratera u kondukcijskom načinu zavarivanja utječe na protok u metalnoj kupki i prisutnošću površinski aktivnih elemenata. [5]

Slika 23. Shematski prikaz kondukcijskog načina zavarivanja



Izvor: <https://www.sciencedirect.com/>

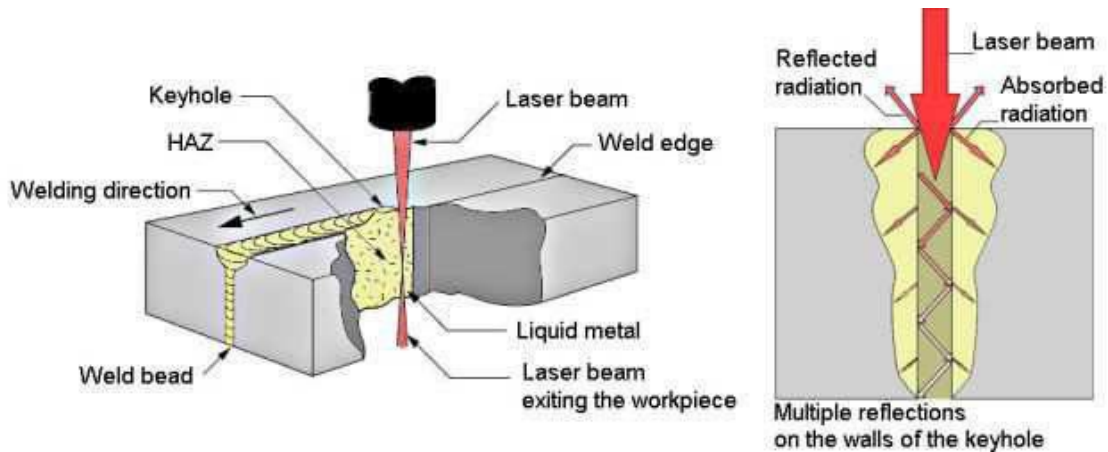
## 6.2. Zavarivanje ključanicom

Postupak se izvodi pri vrlo velikim gustoćama snage veličine  $10^6 \text{W/cm}^2$  gdje dio radnog materijala isparava i stvara šupljinu, odnosno ključanicu koja je okružena rastaljenim metalom koji je zauzvrat okružen čvrstim materijalom. Rastopljeni materijal oko ključanice ispunjava šupljinu dok zraka prolazi duž spoja.

Sile koje nastoje urušiti šupljinu ključanice su sljedeće:

1. Površinska napetost na granici rastaljenog metala i pare ili plazme
2. Hidrostatski tlak rastaljenog metala
3. Hidrodinamički tlak rastaljenog metala

Slika 24. Shematski prikaz laserskog zavarivanja ključanice



Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Keyhole-welding-process-4\\_fig1\\_280575244](https://www.researchgate.net/figure/Keyhole-welding-process-4_fig1_280575244)

Navedene sile su međutim uravnotežene:

1. Tlakom pare koji postoji unutar šupljine i koji je veći od atmosferskog pritiska za oko 10% i gura rastaljeni metal prema periferiji
2. Tlakom ablacije materijala dok isparava s unutarnje površine ključanice i koji pojačava tlak pare

[5]

## 7. PARAMETRI LASERSKOG ZAVARIVANJA

Glavni parametri za upravljanje procesom laserskog zavarivanja su sljedeći:

1. Snaga (P, W) i brzina zavarivanja (V, cm/min) laserske zrake
2. Karakteristike laserskog snopa ( mod, stabilnost, polarizacija, oblik- pulsni ili CW )
3. Zaštitni plin
4. Položaj žarišne točke u odnosu na površinu obratka
5. Konfiguracija spojeva [5]

### 7.1. Snaga i brzina zavarivanja laserske zrake

Dubina prodiranja opada gotovo eksponencijalno s povećanjem brzine poprečnog kretanja za danu snagu. Nasuprot tome, omjer dubine i širine raste s povećanjem poprečne brzine, iako ne tako drastično, a zatim se izravnavaju. Za određenu brzinu, dubina prodiranja raste s povećanjem ulazne snage. Rezultati dobiveni laserskim zavarivanjem male snage npr. manje od 5 kW ne mogu se ekstrapolirati na zavarivanje velike snage, npr. 20 kW. To je zbog razlika uzrokovanih utjecajem zaštite od plazme koji proizlaze iz velike gustoće ili visokih stopa isparavanja koje uzrokuju pojačano stvaranje plazme. [5]

### 7.2. Karakteristike laserskog snopa

Glavne karakteristike laserskog snopa koje utječu na proces laserskog zavarivanja uključuju mod, stabilnost, polarizaciju i oblik (pulsni ili kontinuirani režim rada). [5]

### 7.3. Mod

Mod ili intenzitet energije laserskog snopa ima značajan utjecaj na oblik zrna zavara. TEM<sub>00</sub> način rada ima rezultate većeg omjera dubine i širine od načina višeg reda. To je prvenstveno zbog koncentriranijeg oblika TEM<sub>00</sub> moda, što rezultira najvećom mogućnošću fokusiranja laserske zrake na najmanju površinu. Međutim, veća veličina točke višemodnih zraka čine ga više prikladnim za primjene sučeonog zavarivanja jer smanjuje zahtjeve za tijesnim pristajanjem. [5]

#### **7.4. Stabilnost**

Na ponovljivost ili postojanost kvalitete zavara utječe stabilnost snopa. Vremenske varijacije od karakteristike snopa kao što su izlazna snaga i struktura moda, kao i varijacije u koeficijentu apsorpcije s temperaturom uzrokuju varijacije u procesu zavarivanja, a time i rezultat kvalitete zavara. [5]

#### **7.5. Polarizacija**

Utjecaj polarizacije zrake na proces zavarivanja ovisi o materijalu i uvjetima zavarivanja. Kod zavarivanja nekih čelika, dubina prodiranja varira ovisno o smjeru polarizacije zrake, odnosno pojačava se kada je smjer polarizacije usklađen sa smjerom zavarivanja. Takav efekt je vidljiv samo iznad kritične brzine zavarivanja, ispod koje polarizacija smjera nema utjecaja na prodor snopa. Ova razlika u postupanju je najviše vjerojatno rezultat gubitka korelacije između bilo koje polarizacije zrake i elektromagnetskog polja u ključanici uslijed procesa raspršenja, ponovnog zračenja i višestruke refleksije na stijenkama ključanice. [5]

#### **7.6. Pulsni i kontinuirani način rada**

Pulsne i CW laserske zrake se mogu koristiti za zavarivanje, pri čemu su pulsne zrake prikladnije za točkasto zavarivanje, dok su CW zrake prikladnije za kontinuirane zavare. Pulsirajuće zrake također se mogu koristiti za kontinuirane zavare ako se impulsi preklapaju. Dodatni procesni parametri koje treba uzeti u obzir pri zavarivanju pulsirajućim zrakama su trajanje impulsa, oblik i frekvencija impulsa, odnosno stopa ponavljanja.

U korištenju pulsirajuće zrake za zavarivanje ključanice, impulsi bi trebali biti dovoljno visoke energije da izvrši značajan potisak na rastaljeni metal kako bi održao ključanicu, nakon što se formira, morat će biti dovoljno razmaknuta da spriječi smrzavanje metala dok je snop isključen. Kada se u obratku u kratkim razdobljima dovode velike količine energije, oni imaju tendenciju da se koncentriraju blizu površine kao toplina, budući da je potrebno vrijeme da se toplina provede u masu materijala. To rezultira visokim temperaturnim gradijentima u neposrednoj blizini izvora topline, proizvodeći visoke stope hlađenja nakon što se laserska zraka isključi. [5]



## 7.7. Zaštitni plin

U laserskom zavarivanju, zaštitni plin se može koristiti za više namjena:

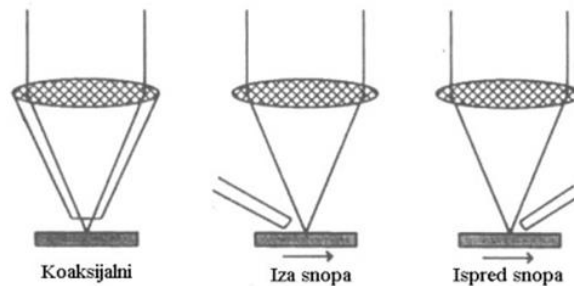
1. Služi za otklanjanje pare i formirane plazme, omogućujući laserskom snopu da dosegne svoj cilj
2. Osigurati zaštitno okruženje za metalnu kupku ili krater
3. Zaštita leće za fokusiranje

Najčešći plinovi koji se koriste za lasersko zavarivanje su argon (Ar) i helij (He). Argon se češće koristi za lasersko zavarivanje male do srednje snage jer je jeftiniji od helija, a njegova veća gustoća rezultira boljom zaštitom. Površinski zavar zaštićen argonom je također glatkiji od one dobivene zaštitom od helija. Budući da je gustoća helija niža, potrebne su veće brzine protoka za učinkovitu zaštitu.

Međutim, za primjene velike snage ili niske brzine, helij je poželjniji jer ima veći potencijal ionizacije. Kada se argon koristi za primjenu veće snage, njegova ionizacija se rezultira u značajnom dijelu zrake koja se apsorbira.

Općenito najbolju zaštitu od penetracije laserske zrake pruža helij, pa zatim dušik i argon. Dušik se ne koristi tako često kao argon i helij jer može stvarati nitride koji bi mogli izazvati krtost zavara. Kvaliteta zavara zbog toga ovisi o vrsti korištenog zaštitnog plina.

Slika 25. Prikaz načina dovođenja zaštitnog plina



Izvor: <https://wurth.rs/blog/lasersko-zavarivanje.htm>

Uloga upotrebe zaštitnog plina je zaštita leće za fokusiranje. Za malu snagu primjene, npr. do 1500 W, normalni protok zaštitnog plina (oko 10 L/min) za zaštitu zavara također je primjeren za zaštitu leće, sve dok postoji struja plina koaksijalna s laserskom zrakom.

Na konačni oblik zavarenog spoja utječe način nanošenja zaštitnog plina. Na primjer, kod zavarivanja čelika s laserom od 10 kW uz korištenje aksijalne plinske mlaznice promjera 2 mm i pri niskim brzinama protoka helija npr. manje od 5 L/min se ne stvara ključanica zbog toga što najveći dio energije snopa tada apsorbira plazma.

Daljnja povećanja brzine protoka plina tada proizvode linearno i blago povećanje prodiranja laserske zrake. Protok plina može biti dovoljno snažan iznad 40 L/min da izbaci rastaljeni metal iz kratera, što rezultira nepravilnim oblikom zavara. [5]

### **7.8. Položaj žarišne točke u odnosu na površinu obratka**

Za odabrani optički sustav (fokusirajuća leća), položaj žarišne točke u odnosu na površinu obratka određuje veličinu zrake na površini obratka, a to utječe na širinu kratera i dubinu prodiranja.

Optimalna lokacija žarišta rezultira maksimalnim omjerom dubine i širine, odnosno najveća dubina prodiranja i minimalna širina kratera javljaju se za gotovo isto žarišno položje. [5]

### **7.9. Konfiguracija spojeva**

Postoje različite vrste konfiguracije spojeva koje se mogu upotrebljavati u zavarivanju. Zbog male količine laserskog snopa, laseri se prvenstveno koriste za preklopne ili četvrtaste sučeone spojeve.

Osnovno pravilo je da dopušteni razmak sučeonog spoja mora biti manji od 10% debljine materijala. U protivnom postoji vjerojatnost da većina ili cijela laserska zraka prođe izravno kroz raskor, što bi rezultiralo neadekvatnim zavarom.

Zahtjevi za spajanje preklopnih spojeva nisu kritični kao za sučeone spojeve, budući da u preklopnom spoju laserska zraka prodire kroz jedan komad u temeljnu komponentu. Preklopni spojevi su prikladniji kada se koristi gornja komponenta koja je relativno tanka ( uglavnom manja od 1 mm debljine ).

Do sada je značajan broj laserskih zavara koji su napravljeni autogeni, ne uključuju dodatni metal. Međutim, dodatni metal se može koristiti gdje je to potrebno, posebno za nekvadratne sučeone spojeve ili kada je sučeoni razmak relativno velik. [5]

## 8. ZAVARLJIVOST MATERIJALA

Zavarljivost definira Američko društvo za zavarivanje (AWS) kao sposobnost materijala da se zavari pod nametnutim uvjetima izrade u specifičnu, prikladno dizajniranu strukturu i da zadovoljavajuće funkcionira u predviđenoj upotrebi.

Od zadovoljavajućeg zavarenog spoja očekivalo bi se da odgovara čvrstoći, rastezljivosti, žilavosti i otpornosti na koroziju spojenih materijala u nizu radnih uvjeta koje spoj doživljava.

Konstruktivski čelici dizajnirani su za izvrsnu zavarljivost i predstavljaju mjerilo s kojom se uspoređuju svi ostali materijali. Zavarljivost konstrukcijskog čelika stalno se poboljšava.

Previše je faktora koji utječu na zavarljivost da bi se mogla smatrati drugim osim kvalitativnim pojmom. Fizička svojstva materijala koja smanjuju zavarljivost uključuju sljedeće:

1. Viša temperatura taljenja, primjer - volfram
2. Niža temperatura isparavanja, primjeri - olovo, cink
3. Veća toplinska vodljivost (Za prevladavanje gubitka topline potrebna je veća snaga), primjeri – bakar, zlato, srebro
4. Veća toplinska ekspanzija – niža zavarljivost zbog većih zaostalih naprezanja i izobličenja, primjeri od nehrđajućeg čelika

Metalurški faktori koji utječu na zavarljivost su:

1. Materijal sa širokim rasponom smrzavanja ima tendenciju pucanja uslijed skrućivanja. Neke nečistoće, poput sumpora, mogu stvoriti sastojke s niskim talištem. Aluminijske legure koje se mogu toplinski obraditi imaju visok rizik od pucanja uslijed skrućivanja zbog svog širokog raspona smrzavanja.
2. Oksidacija na visokoj temperaturi utječe na vlaženje i smanjuje zavarljivost.
3. Topljivost plina u tekućem metalu zavara može utjecati na rizik od poroznosti
4. Promjene čvrste faze mogu dovesti do krтости zavara ili gubitka korozijske učinkovitosti. Čelik s visokom prokaljivošću ima visok rizik od vodikovog pucanja.

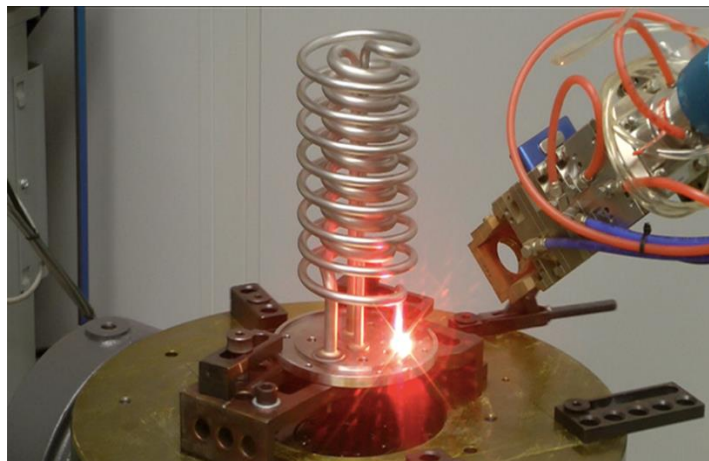
[17]

## 9. PRIMJENA LASERSKOG ZAVARIVANJA

Lasersko zavarivanje u današnje vrijeme ima vrlo široku primjenu u različitim industrijskim tehnikama proizvodnje, kao što su automobilska, brodograđevna, elektronička, zrakoplovna industrija i ostale dr. Jedna od važnijih područja primjene laserskog zavarivanja je precizna tehnika - dijelovi motora, zupčanici, cilindri, vratila i dr.

Praktički svi materijali mogu biti zavareni tehnikom laserskog zavarivanja, jedino što se ponekad zna dogoditi problem kod materijala s visokom površinskom refleksijom što dovodi do gubitka energije za zavarivanje. [18]

Slika 26. Primjer laserskog zavarivanja amortizera



Izvor: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/is-laser-welding-a-good-fit-for-your-operation>

### 9.1. Primjena laserskog zavarivanja u automobilskoj industriji

Moderni laserski izvori visoke svjetline su ključ visoko učinkovite proizvodnje inženjerstva u automobilskoj industriji. U većini slučajeva, tehnologija laserskog zavarivanja koristi se kada postoje posebni zahtjevi od dizajna i konstrukcije koje nijedna druga tehnologija spajanja ne može ostvariti.

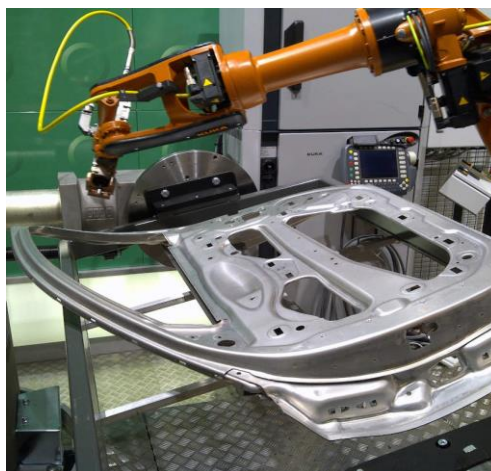
Primjena tehnologije laserskog zavarivanja u automobilskoj industriji započela je u Njemačkoj početkom 1980-ih godina. Europski proizvođači, uglavnom njemački kao što su Mercedes Benz, Volkswagen, Audi i Volvo u Švedskoj preuzeli su vodstvo u primjeni zavarivanja laserom za zavarivanje limova, kao što su okviri vrata i karoserije. [19]

Uloga laserskog zavarivanja u automobilskoj industriji značajno se povećala u posljednjih nekoliko godina, uglavnom zbog proizvodne učinkovitosti, kvalitete i isplativosti. Sustav laserskog zavarivanja proizvodi snop svjetlosti visokog intenziteta koji je fokusiran u jednu točku te tako daje koncentrirani izvor topline, omogućavajući uske, duboke varove i visoke brzine zavarivanja. Postupak se često upotrebljava u primjenama masovne proizvodnje, kao što je automobilska industrija.

Lasersko zavarivanje je uobičajeno za mnoge automobilske primjene, uključujući zavarivanje velikih okvira karoserije, okvira vrata, prtljažnika, hauba automobila i šasije, te lasersko zavarivanje plastike, npr. za prednja i stražnja svjetla, kao i elektronička kućišta.

Lasersko zavarivanje također se naširoko koristi za zavarivanje metala brojnih podkomponenti, uključujući inicijatore zračnih jastuka, namotaje motornih zavojnica, spojeve akumulatora na šipku sabirnice za elektroniku vozila i električne veze unutar konstrukcije automobila.

Slika 27. Lasersko zavarivanje vratiju automobila



Izvor: <https://www.precitec.com/laser-welding/applications/lightweight-construction/>

Ranije se zavarivanje za ove primjene obavljalo nizom drugih tehnologija, uključujući elektrootporno zavarivanje i elektrolučno.

Lasersko zavarivanje je proces koji prenosi manje topline, što rezultira višom lokaliziranom toplinom s manjom zonom utjecaja topline (ZUT).

Osim toga s industrijskim razvitkom koja se kreće prema lakšim i provodljivijim materijalima, lakše je zavarivati laserskim zavarivanjem nego npr. otpornim zavarivanjem. To je zbog toga što lasersko zavarivanje daje lokaliziranu toplinu. Bolja dostupnost i manje ograničenja za dijelove povećavaju fleksibilnost dizajna u odnosu na ostale tehnike zavarivanja.

Korištenje laserskog zavarivanja može uštedjeti troškove proizvodnje automobila i poboljšati učinkovitost proizvodnje. S porastom potražnje na globalnom automobilskom tržištu i ubrzanim napretkom automobilske inteligencije, kombinacija napredne tehnologije laserske obrade i automobilske proizvodnje postala je trend. U budućnosti, s povećanjem potražnje za automobilima, posebno novim energetske vozilima, potražnja za laserskim zavarivanjem u proizvodnim linijama će se nastaviti povećavati. [20]

## **10. PREDNOSTI I NEDOSTATCI LASERSKOG ZAVARIVANJA**

### **10.1. Prednosti**

Glavne prednosti laserskog zavarivanja u odnosu na konvencionalne metode kao što je elektrolučno zavarivanje uključuju sljedeće:

1. Visoki omjer dubine i širine, u rasponu od 3:1 do 10:1.
2. Nizak i visoko lokaliziran ukupni unos topline koji rezultira minimalnom distorzijom i malom zonom utjecaja topline.
3. Beskontaktna obrada.
4. Na lasersku zraku ne utječe magnetsko polje niti prolazak kroz zrak, shodno tome ne zahtjeva vakuum za zavarivanje kao što je potreban kod elektrolučnog zavarivanja.
5. Lakši pristup području zavara budući da se laserska zraka može lako usmjeriti na inače nedostupna područja. U tom kontekstu, Nd:YAG laseri su fleksibilniji od CO<sub>2</sub> lasera budući da se Nd:YAG laseri lakše dovode do obratka pomoću optičkih kabela.
6. Sposobnost zavarivanja različitih materijala budući da je unos topline ograničen na vrlo mala područja.
7. Sposobnost kontrole gustoće snage fokusiranjem laserske zrake.
8. Lako automatiziran proces.
9. Relativno brži od većine konvencionalnih postupaka zavarivanja.
10. Relativno visoka čvrstoća zavarivanja u usporedbi s većinom konvencionalnih postupaka zavarivanja.

## 10.2. Nedostatci

1. Visoke stope hlađenja. Nizak unos energije rezultira visokim brzinama hlađenja koje može izazvati otvrdnjavanje u zavarenom rubu i u dijelovima zone utjecaja topline. To se posebno odnosi na materijale visoke kaljivosti kao što su visoko ugljični i neki legirani čelici. Stvaranje takvih nepoželjnih mikrostrukture uglavnom se ublažava predgrijavanjem prije zavarivanja ili toplinom nakon zavarivanja.
2. Visoki poprečni gradijenti temperature koji mogu rezultirati mikropukotinama.
3. Potreba za preciznim uklapanjem spojeva. Mala veličina izvora topline i rezultirajuća metalna kupka ili krater zahtjeva blisko i točno postavljene spojeve, posebno u slučaju sučeonog zavarivanja budući da će svaki značajan otvor rezultirati prazninom, podrezivanjem ili gubitkom snage kroz otvor.
4. Visoki početni troškovi laserskog zavarivanja.[5]

## 11. ZAKLJUČAK

Tehnologija i proizvodnja lasera svakodnevno raste i napreduje. Od izuma lasera 1960. godine pa sve do danas možemo vidjeti kako se postupno laserska tehnologija razvijala. Glavne prednosti laserskog zavarivanja su to što osiguravaju zavarivanje velikim brzinama, stvaraju neznatne deformacije, unosi se malo topline na mjesto zavara, ostvaruje se brzo hlađenje materijala te visoka kvaliteta zavarenog spoja. Svaki aspekt ima svoje nedostatke i ograničenja pa tako i ova tehnika zavarivanja. Glavni nedostatak u odnosu na ostale vrste zavarivanja su i dalje visoki investicijski troškovi i troškovi održavanja.

Danas laseri imaju vrlo široku primjenu u različitim tehničkim i medicinskim granama. Također, laserska tehnologija je sve prisutnija u području obrade materijala. Područje primjene laserske tehnologije vrlo je rasprostranjeno, od graviranja i bušenja metala, pa sve do njihovog zavarivanja. Bez laserskog zavarivanja, mnoge industrije bi koristile konvencionalne postupke zavarivanja koje su manje precizne i zahtijevaju više vremena i resursa za postizanje istih rezultata kao lasersko zavarivanje.

Također, neke tehnološke inovacije, poput preciznih medicinskih uređaja ili složenih elektroničkih komponenti, možda ne bi bilo moguće bez prednosti koje pruža lasersko zavarivanje. U budućnosti se očekuje još veća primjena lasera nego u današnje vrijeme, naročito ako cijena izrade bude jeftinija, odnosno pristupačnija.



## 12. LITERATURA

- [1] Josefine Svenungsson, Isabelle Choquet, Alexander F. H. Kaplan: Laser welding process – a review of keyhole welding modelling, 15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 15, 25-27 August 2015, Lappeenranta, Finland, dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/>
- [2] Seiji Katayama: Handbook of laser welding technologies, 2013., dostupno na:  
<https://www.nspvco.com/wp-content/uploads/2021/12/Laser%20welding%20Handbook.pdf>
- [3] Tunde Kovacs: Laser welding process specification base on welding theories.11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu-Mures, Romania, dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/>
- [4] <https://lasers.llnl.gov/education/how-lasers-work>
- [5] Elijah Kannatey-Asibu, Jr. PRINCIPLES OF LASER MATERIALS PROCESSING
- [6] Rami Arieli:“The Laser Adventure“ Chapter 2.11 page 1, dostupno na: <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-2/F2s11p1.htm>
- [7] Rami Arieli:“The Laser Adventure“ Chapter 2.12 page 1, dostupno na: <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-2/F2s12p1.htm>
- [8] C. Breck Hitz, J. Ewing, Jeff Hecht: Introduction to Laser Technology, Fourth Edition, dostupno na: [http://s1.iran-mavad.com/pdf96/Intoduction%20to%20laser%20technology\\_iran-mavad.com.pdf](http://s1.iran-mavad.com/pdf96/Intoduction%20to%20laser%20technology_iran-mavad.com.pdf)
- [9] Svojstva laserskih zraka, dostupno na: <https://www.lkouniv.ac.in/site/writereaddata/siteContent/202006151236284892/NK-Properties%20of%20Laser%20Beam.pdf>

[10] Dijelovi lasera, dostupno na:

<https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/laserconstruction.html>

[11] He-Ne laseri, dostupno na:

[https://www.rp-photonics.com/helium\\_neon\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/helium_neon_lasers.html)

[12] CO<sub>2</sub> laseri, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/co2\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html)

[13] Thomas V. Higgins, "The three phases of lasers: solid-state, gas, and liquid, Laser Focus World, July 1995, p. 73-85, dostupno na:

[https://www.umu.se/globalassets/centralwebb/studentwebben/institutioner/institutionen-for-fysik/laserfysik/186926\\_the-three-phases-of-light...-137673\\_lfw-1995-july-p-73-to-85-to-lab-0.pdf](https://www.umu.se/globalassets/centralwebb/studentwebben/institutioner/institutionen-for-fysik/laserfysik/186926_the-three-phases-of-light...-137673_lfw-1995-july-p-73-to-85-to-lab-0.pdf)

[14] Laseri čvrstog stanja, dostupno na:

[https://www.rp-photonics.com/solid\\_state\\_lasers.html#ref1](https://www.rp-photonics.com/solid_state_lasers.html#ref1)

[15] Rubinski laser, dostupno na: [https://www.rp-photonics.com/ruby\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/ruby_lasers.html)

[16] Poluvodički laseri, dostupno na:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#Poluvodi%C4%8Dki\\_laseri](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#Poluvodi%C4%8Dki_laseri) i [https://www.rp-photonics.com/semiconductor\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/semiconductor_lasers.html)

[17] Zavarljivost materijala, John Taylor: An Engineer's Guide to Fabricating Steel Structures Volume 1: Fabrication Methods, AUSTRALIAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, Weldability and Welding Defects, 2001.,

dostupno na: [https://www.steel.org.au/getattachment/49e7e58f-2fd1-44f8-af79-312e3d6c6961/Weldability-and-welding-defects\\_bk205.pdf](https://www.steel.org.au/getattachment/49e7e58f-2fd1-44f8-af79-312e3d6c6961/Weldability-and-welding-defects_bk205.pdf)

[18] Primjena laserskog zavarivanja, dostupno na:

<https://wurth.rs/blog/lasersko-zavarivanje.htm>

[19] <https://www.hqlaserglobal.com/The-Trend-of-Laser-Welding-in-Automotive.html>

[20] <https://fastenerengineering.com/how-is-laser-welding-used-in-the-automotive-industry/>

## POPIS SLIKA

- Slika 1. Shema rubinskog lasera
- Slika 2. Dijelovi prvog rubinskog lasera
- Slika 3. Dijelovi rubinskog lasera
- Slika 4. Bljesak unutar rubinskog lasera
- Slika 5. Nastajanje laserskog zračenja
- Slika 6. Lasersko zračenje
- Slika 7. Laser s tri energetske razine
- Slika 8. Laser s četiri energetske razine
- Slika 9. Spontana emisija
- Slika 10. Stimulirana emisija
- Slika 11. Bijela svjetlost u odnosu na monokromatsku svjetlost
- Slika 12. Koherentna svjetlost
- Slika 13. Nekoherentna zraka
- Slika 14. Dijelovi lasera
- Slika 15. Energetske razine He-Ne sustava
- Slika 16. Shema He-Ne lasera
- Slika 17. Shema i princip rada CO<sub>2</sub> lasera
- Slika 18. Stolni CW laser na boji temeljenog na rodaminu 6G koji emitira žutu boju
- Slika 19. Shematski prikaz rubinskog lasera
- Slika 20. Shematski prikaz Nd:YAG lasera
- Slika 21. P-n spoj
- Slika 22. Primjer poluvodičkog lasera
- Slika 23. Shematski prikaz kondukcijskog načina zavarivanja
- Slika 24. Shematski prikaz laserskog zavarivanja ključanice
- Slika 25. Prikaz načina dovođenja zaštitnog plina
- Slika 26. Primjer laserskog zavarivanja amortizera
- Slika 27. Lasersko zavarivanje vratiju automobila

**POPIS OZNAKA**

OZNAKA	OPIS
$E_1, E_2, E_3, E_4$	Energetske razine
$N_2$	Populacija donje laserske razine
$( E_2 - E_1 )$	Razlika energetske razine u atomu
$\nu$	Frekvencija
$n_{sp}$	Brzina spontane emisije
$A_e$	Einsteinov koeficijent za spontanu emisiju
$n_{st}$	Brzina stimulirane emisije
$B_{21}$	Einsteinov koeficijent za stimuliranu emisiju
$\lambda$	Valna duljina
$\delta_\nu$	Minimalna oscilirajuća širina linije
$q$	Snaga u oscilirajućem polju
$h_p$	Planckova konstanta
$\Delta\nu$	Polu-širina rezonancije pri pola maksimalnog intenziteta
$\nu_o$	Frekvencija osciliranja
$\Delta\tau_p$	Trajanje impulsa
$\theta_d$	Kut divergencije
D	Valna duljina
$\beta$	Koeficijent
Sc	Područje koherencije
n	Indeks loma materijala prozora
$\tan\theta_B$	Brewsterov kut
P	Snaga
$v$	Brzina zavarivanja
q	Gustoća snage
TEM	Transverzalni elektromagnetni mod