

# Zavarivanje laserom

---

**Cimera, Lovre**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:186:915568>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences - FHSSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
FILOZOFSKI FAKULTET  
ODSJEK ZA POLITEHNIKU**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAVARIVANJE LASEROM**

**Rijeka, 2015.**

SVEUČILIŠTE U RIJECI

Filozofski fakultet

Odsjek za politehniku

Studijski program: Preddiplomski studij politehnike

Student: Lovre Cimera, mat. broj: 1206991380036

Tema završnog rada: Zavarivanje laserom

Mentor: Prof.dr.sc. Marko Dunder

Rijeka, 2015.

**Sveučilište u Rijeci**  
Filozofski fakultet  
**ODSJEK ZA POLITEHNIKU**  
Sveučilišna avenija 4.  
R I J E K A

**Povjerenstvo za završne i diplomske ispite**

U Rijeci, .6.2015.

**ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupnik:** Lovre Cimera  
**Zadatak:** Zavarivanja laserom

**Rješenjem zadatka potrebno je obuhvatiti sljedeće:**

1. Uvodni dio - Osnovni pojmovi o laseru
2. Proučiti i opisati nastanak laserske zrake
3. Razraditi dijelove lasera kao optičkog uređaja za rezanje materijala
4. Karakteristike postupka zavarivanja laserom
5. Zaključak

U završnom se radu obvezno treba pridržavati **Uputa za izradu završnog rada sveučilišnog dodiplomskog studija.**

**Zadatak uručen pristupniku:** .6.2015.  
**Rok predaje završnog rada:** .9.2015.  
**Datum predaje završnog rada:** \_\_\_\_\_

**PREDSJEDNIK POVJERENSTVA**  
**ZA ZAVRŠNE ISPITE:**

**Prof.dr.sc. Zvonimir Kolumbić**

**ZADATAK ZADAO:**

**Prof.dr.sc. Marko Dunder**

## **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam Završni rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Filozofskom fakultetu u Rijeci odsjeku za Politehniku, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora prof.dr.sc. Marka Dundera, kome se srdačno zahvaljujem.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima, obitelji i djevojci koji su mi kroz cijelo vrijeme mog školovanja bili najveća podrška.

Lovre Cimera

---

## POPIS OZNAKA

TEM	Transverzalni elektromagnetni mod	
$E$	Energija	[J]
$h$	Planckova konstanta	$6.626 * 10^{-34}$ [J s]
$\nu$	Frekvencija svjetlosnog izvora	[Hz]
$\lambda$	valna duljina	[ $\mu\text{m}$ ]
$c$	Brzina svjetlosti u vakuumu	$3 * 10^8$ [m/s]
$(E_2 - E_1)$	Razlika energetske stanja u atomu	[eV]
$I_x$	Snaga zračenja na površini materijala	[W/cm <sup>2</sup> ]
$I_0$	Snaga na izlazu iz lasera	[W]
$\alpha$	Koeficijent apsorpcije laserskog zračenja	
$x$	Rastojanje površine od izlaznog ogledala	[mm]
$\theta$	Kut širenja laserskog snopa	[°]
$d$	Radijus početnog snopa	[mm]
$P_{sr}$	Srednja snaga lasera koja pada na radni predmet	[W]
$P$	Snaga laserskog zračenja	[W]
$L$	Udaljenost lasera od radnog predmeta	[mm]
$f$	Žarišna duljina leće	[mm]
$d_F$	Promjer žarišne točke	[mm]
$z$	Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala	[mm]
$q$	Gustoća snage na površini radnog komada	[W/cm <sup>2</sup> ]
$A_s$	Površina presjeka snopa na površini materijala	[cm <sup>2</sup> ]
$v$	Brzina zavarivanja	[cm/min]

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Elektromagnetni spektar

Slika 2.1. 1) Spontana emisija, 2) Stimulirana emisija

Slika 2.2. Inverzija naseljenosti

Slika 2.3. Shema lasera s tri energetska stanja

Slika 2.4. Shema lasera s četiri energetska stanja

Slika 2.5. Bijela svjetlost u odnosu na monakromatsku svjetlost

Slika 2.6. Koherentna i nekoherentna svjetlost

Slika 2.7. Primjer fokusiranja svjetlosti zarulje i laserske svjetlosti

Slika 2.8. Valne duljine lasera

Slika 2.9. Shematski prikaz divergencije laserskog snopa

Slika 2.10. Neki od najčešće korištenih TEM-ova

Slika 2.11. Vođenje laserskog snopa optičkim vlaknom (kabelom)

Slika 2.12. Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala

Slika 2.13. Fokusiranje laserskog snopa

Slika 3.1. Shematski prikaz osnovnih dijelova lasera

Slika 3.2. Rezonatorski sistem

Slika 4.1. Shematski prikaz plinskog lasera

Slika 4.2. Shematski prikaz cijevi ionskog lasera

Slika 4.3. Shematski prikaz Nd:YAG lasera

Slika 5.1. Tehnike laserskog zavarivanja

Slika 5.2. Princip laserskog zavarivanja

Slika 5.3. Izgled zavarenog spoja izvedenog laserom

Slika 5.4. Zavarivanje s CO<sub>2</sub> laserom sa zaštitnim plinom argonom i helijem

Slika 5.5. Cijev promjera  $\Phi$  9 mm kao uređaj za dovod zaštitnog plina

Slika 5.6. Prstenasti uređaj za dovod zaštitnog plina

Slika 5.7. Koaksijalna mlaznica kao uređaj za dovod zaštitnog plina

Slika 5.8. Dijagram koji prikazuje odnos dubine zavarivanja i snage CO<sub>2</sub> lasera pri zadanoj brzini zavarivanja

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Neke valne duljine laserskog zračenja koje se primjenjuju



## SADRŽAJ

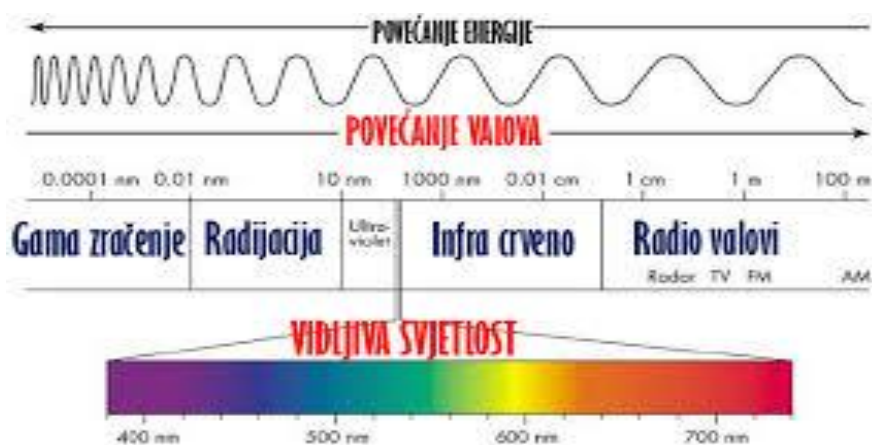
IZJAVA.....	I
POPIS OZNAKA .....	II
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
1. UVOD .....	1
2. NASTANAK LASERSKE ZRAKE .....	3
2.1. Svojstva laserske svjetlosti .....	6
2.2. Parametri laserske svjetlosti .....	7
2.2.1. Valna duljina .....	7
2.2.2. Usmjerenost snopa .....	9
2.2.3. Mod lasera.....	10
2.2.4. Reflektivnost i apsorpcija .....	10
2.3. Prijenos laserskog snopa.....	11
2.4. Fokuseranje laserske svjetlosti .....	12
3. DIJELOVI LASERA.....	14
4. VRSTE LASERA.....	16
4.1. Laseri prema načinu rada.....	16
4.1.1. Laseri s kontinuiranim izlazom (cw) .....	16
4.1.2. Pulsni laseri (pw) .....	16
4.2. Laseri prema agregatnom stanju optičkog pojačala .....	16
4.2.1. Plinski laseri.....	16
4.2.1.1. Atomi laseri .....	17
4.2.1.2. Ar <sup>+</sup> ion laser.....	17
4.2.1.3. Molekularni laseri .....	18
4.2.1.4. Kemijski laseri.....	19
4.2.2. Laseri čvrstog stanja.....	19
4.2.2.1. Rubinski laser .....	19
4.2.2.2. Stakleno neodimijski laseri .....	20
4.2.2.3. Granatni laseri .....	20
4.2.3. Tekući laseri.....	20
4.3. Laseri u industriji.....	20
4.3.1. Nd:YAG laseri .....	20
4.3.2. CO <sub>2</sub> laseri.....	22
5. LASERSKO ZAVARIVANJE .....	23

5.1. Principi laserskog zavarivanja i njegove karakteristike .....	23
5.2. Parametri laserskog zavarivanja .....	26
5.3. Zaštitni plin.....	26
5.3.1. Vrste plinova:.....	27
5.3.2. Utjecaj zaštitnog plina na otpuhivanje plazme .....	28
5.3.3. Uređaji za dovod zaštitnog plina.....	29
5.4. Snaga i brzina laserskog zavarivanja.....	30
5.5. Priprema materijala za zavarivanje.....	31
5.6. Zavarljivost materijala.....	31
6. ZAKLJUČAK .....	33
6. LITERATURA.....	34

## 1. UVOD

Značenje riječi LASER potječe od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja.

Albert Einstein je u svom radu „On the Quantum Theory of Radiation“ 1917. godine dao teorijski koncept i predvidio izum lasera i njegove preteče masera. Maser je uređaj koji radi na isti način kao i laser, ali u drugom frekvencijskom području. Maser je izvor mikrovalova, dok je laser izvor elektromagnetnih valova. Ukupni elektromagnetni spektar proteže se od radio valova (valne duljine  $10^4 - 10^2$  cm) do gama zračenja (valne duljine  $10^{-10} - 10^{-12}$  cm). Elektromagnetni spektar prikazan je na slici 1.1.



Slika 1.1. Elektromagnetni spektar [1]

Prvi laser konstruirao je 1960. godine Theodore H. Maiman. Lasersku emisiju postigao je stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom, a 1961. godine osmišljeni su i laseri na smjesi He i Ne. Naredna istraživanja svodila su se na razvoj lasera velike snage i širu primjenu u optici, kemiji i sl.

[2]

Danas je laser prisutan u svim granama industrije od mikroelektronike do brodogradnje. Ovom tehnikom moguće je zavarivati skoro sve vrste metala kao i plastične mase.

Zavarivanje laserom nalazi primjenu kod :

- laganih i tankostijenih dijelova i konstrukcija, ali i za dijelove većih debljina,
- dijelova osjetljivih na unos velike količine topline,
- dijelova obrađenih na mjeru bez naknadne obrade.

Tehnologija zavarivanja laserom je jednostavna i točna, lako je prilagodljiva i nema direktnog kontakta između alata i obratka.

Kod zavarivanja laserom u metaloprerađivačkoj industriji najčešće se koriste CO<sub>2</sub> i Nd:YAG koji su dobili ime prema vrsti aktivnog medija. [3]

Prednosti su :

- Visoka gustoća snage odnosno mali unos topline;
- Uske zone utjecaja topline;
- Male deformacije radnog komada;
- Velika brzina zavarivanja;
- Visoka kvaliteta spoja;
- Visoka fleksibilnost;
- Jednostavna automatizacija i primjena robota;

Nedostaci su :

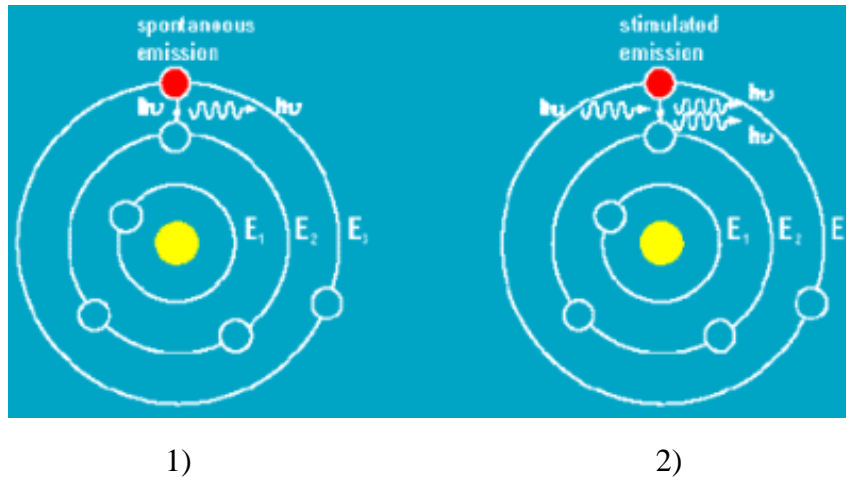
- visoki investicijski troškovi,
- složena tehnika stezanja radnih komada,
- Posebni sigurnosni zahtjevi,
- Laserski izvor nije prijenosan.

[2]

## 2. NASTANAK LASERSKE ZRAKE

Laser je generator posebne svjetlosti, određene snage i valne duljine.

Emisija te svjetlosti može biti spontana ili stimulirana [3], što je prikazano slikom 2.1.



Slika 2.1. 1) Spontana emisija, 2) Stimulirana emisija [4]

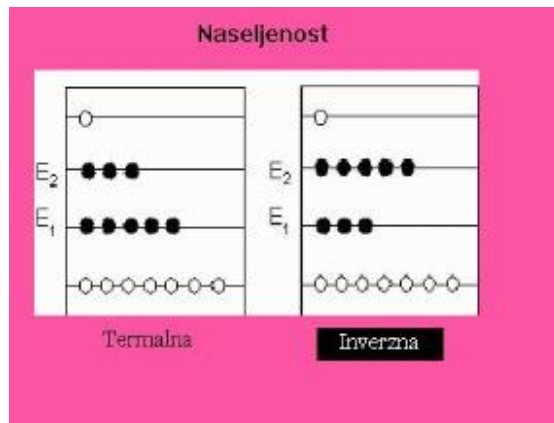
Prema Bohrovom modelu atoma elektroni u atomu su raspoređeni na više različitih energetske stanja. Pri prijelazu elektrona iz jednog stanja u drugo može doći do emisije ili apsorpcije fotona. Bohrov model predviđa postojanje samo spontane emisije fotona.

Kada je atom u pobuđenom stanju, elektroni koji su prešli na više energetske stanje, zbog težnje svakog sustava za zauzimanjem minimuma energije, brzo prelaze natrag na niže energetske stanje. Pri tom prijelazu emitiraju foton koji čini bijelu svjetlost, nju karakteriziraju različiti pravci, faze i valne duljine.

Einstein je u svom članku o kvantnoj teoriji zračenja 1917. uveo pretpostavku o mogućnosti stimulirane emisije.

Stimulirana emisija je proces koji se događa kada je atom u pobuđenom stanju, te elektron prelazi sa višeg na niže energetske stanje potaknut nazočnošću fotona koji ima energiju jednaku razlici dva energetska stanja između kojih se događa prijelaz. Pri tome atom emitira foton iste energije i pravca kao što je i upadni foton.

Da bi došlo do stimulirane emisije potrebno je postići inverziju naseljenosti (slika 2.2.): naseljenost gornjeg energetske stanja mora biti veća od naseljenosti donjeg energetske stanja.



Slika 2.2. Inverzija naseljenosti [4]

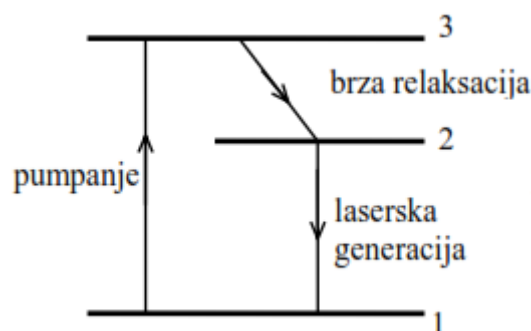
Inverzija naseljenosti postiže se pobuđivanjem atoma pomoću vanjskog izvora energije. Tada je veća vjerojatnost da će nadolazeći foton inducirati emisiju nego da će biti apsorbiran. Rezultat je pojačanje u svjetlosti, odnosno povećani broj fotona s energijom prijelaza.

Postoji mnogo rasporeda energetske stanja koji mogu osigurati lasersko djelovanje.

#### *Laser s tri energetska stanja*

Laserska svjetlost nastaje pri prijelazu sa stanja  $E_2$  na  $E_1$  koje je ujedno i osnovno stanje. S  $E_1$  stanja atomi se pumpaju na visokopobuđeno  $E_3$  stanje na kojem se zadržavaju u prosjeku  $10^{-8}$  sekundi. Pri tome apsorbiraju jedan kvant zračenja ili foton. Potom prelaze na stanje  $E_2$  koje je metastabilno, budući da je njegovo vrijeme relativno dugo ( $\cong 10^{-3}$  s) mnogo atoma ostaje u tom stanju.

Ako je pumpanje dovoljno snažno, nakon jednog pulsa pumpanja više od 50% atoma će biti u stanju  $E_2$ . Pri prelasku sa stanja  $E_2$  na stanje  $E_1$  odvija se zračenje fotona odnosno nastaje laserska svjetlost, što je prokazano na slici 2.3.

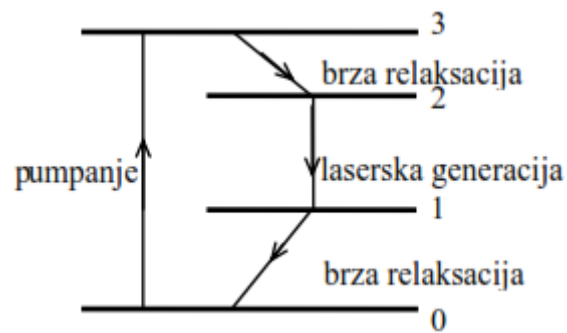


Slika 2.3. Shema lasera s tri energetska stanja [5]

### Laser s četiri energetska stanja

Dodatno energetska stanje ima veoma kratko vrijeme života, odnosno donje stanje laserskog prijelaza se veoma brzo prazni što olakšava održavanje inverzne naseljenosti. Zbog toga nisu potrebne velike snage pumpanja kao kod lasera s tri energetska stanja. Kod ovakvih sustava moguće je zračenje fotona, odnosno lasersko djelovanje i kad je većina atoma u osnovnom stanju, što je prikazano na slici 2.4.

[4]



Slika 2.4. Shema lasera s četiri energetska stanja [5]

Fotoni koji se emitiraju predstavljaju elektromagnetni val određene dužine, putanje i smjera. Oni se kreću od izvora svjetlosti i prenose točno određeni i nedjeljivi iznos energije ( $E$ ), koja se može izračunati kao:

$$E = h * \nu$$

gdje je:

- $h$  – Planckova konstanta ( $h = 6.626 * 10^{-34} \text{ J s}$ ),
- $\nu$  – frekvencija svjetlosnog izvora [Hz]

Energija fotona odgovara razlici energija dva energetska stanja, a njihova valna duljina određuje se na osnovu energije kao:

$$\lambda = \frac{c}{(E_2 - E_1) * h} = \frac{1.2398}{(E_2 - E_1)}$$

gdje je:

- $\lambda$  – valna duljina ( $\mu\text{m}$ ),
- $c$  – brzina svjetlosti,
- $h$  – Planckova konstanta,
- $(E_2 - E_1)$  – razlika energije stanja (eV).

[3]

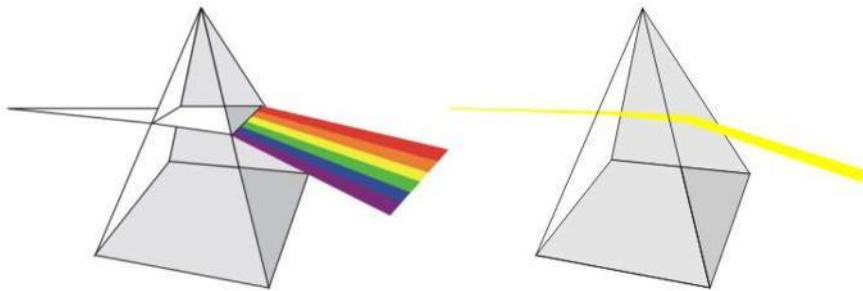
## 2.1. Svojstva laserske svjetlosti

Svjetlost je transversalni elektromagnetni val karakteriziran vremenski promjenljivim električnim i magnetnim poljima.

Laserska svjetlost ima slijedeća svojstva :

- Monokromatska – jedna valna duljina
- Koherentna – valovi su iste faze
- Usmjerena – mala divergencija

*Monokromatska* svjetlost podrazumijeva postojanje jedne valne duljine odnosno jedne boje, dok se bijela svjetlosti pri prolasku kroz prizmu razlaže na više boja, kao što vidimo na slici 2.5.



Slika 2.5. Bijela svjetlost u odnosu na monokromatsku svjetlost [6]

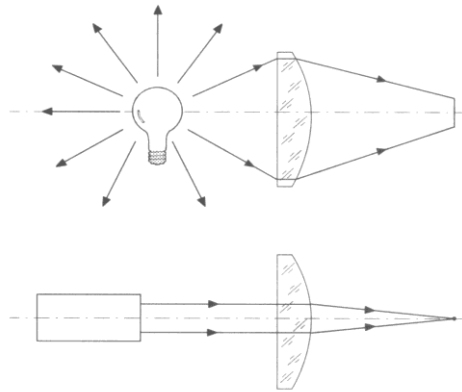
*Koherentna* svjetlosti podrazumijeva zračenje sa povezanim valovima koji su istog smjera, razlika u fazi između valova je konstantna te se energija vala može fokusirati u jednoj točki, što vidimo na slici 2.6.



Slika 2.6. Koherentna i nekoherentna svjetlost [7]



*Usmjerenost* laserskih zraka je moguća jer su one gusto koncentrirane. Stoga ih je moguće usmjeriti na velike udaljenosti bez rasipanja u većoj mjeri. Zbog tih svojstava lasersku svjetlost možemo fokusirati na točku malog promjera ( $< 1 \text{ mm}$ ) što je nemoguće kod prirodne svjetlosti. To možemo vidjeti na slici 2.7.



Slika 2.7. Primjer fokusiranja svjetlosti zarulje i laserske svjetlosti [6]

[3]

## 2.2. Parametri laserske svjetlosti

Osnovni parametri laserske svjetlosti:

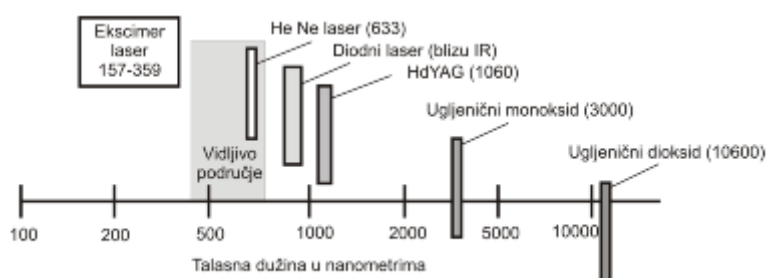
- valna duljina,
- usmjerenost snopa,
- mod lasera,
- reflektivnost i apsorpcija.

### 2.2.1. Valna duljina

Valna duljina lasera određena je razlikom energetske stanja aktivnog laserskog medija (plinski, tekući, čvrsti). Veličina valne duljine zračenja ima veliki utjecaj na efikasnost obrade materijala. Istraživanja su pokazala da prijenos energije na obrađivani materijal raste sa smanjenjem valne duljine. Također, neki materijali se mogu obrađivati samo sa određenom valnom duljinom. Valne duljine nekih lasera možemo vidjeti na slici 2.8. i u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Neke valne duljine laserskog zračenja koje se primjenjuju [3]

Tip lasera	Talasne dužine [ $\mu\text{m}$ ]
ArF	0,193
KrCl	0,222
KrF	0,248
Nd:WAG qd	0,266
XeBr	0,282
XeCl	0,308
XeF	0,351
Rubinski	0,694
Nd:YAG	1,06
CO <sub>2</sub>	10,6



Slika 2.8. Valne duljine lasera [3]

Laserska svjetlost se prolaskom kroz atmosferu apsorbira i rasijava (vodena para i ugljikov dioksid), te gubitak snage laserskog zračenja može biti i do 20 % po 1 metru. Primjenom Beer-Lambertovog zakona apsorpcije elektromagnetnih valova možemo odrediti gubitak snage laserskog zračenja:

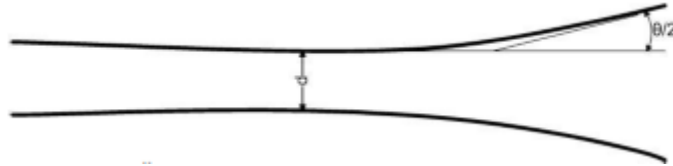
$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}$$

gdje je:

- $I_x$  – snaga zračenja na površini materijala,
- $I_0$  – snaga na izlazu iz lasera,
- $\alpha$  – koeficijent apsorpcije,
- $x$  – rastojanje površine od izlaznog ogledala.

### 2.2.2. Usmjerenost snopa

Laserske zrake su gusto koncentrirane, stoga ih je moguće usmjeriti na velike udaljenosti bez rasipanja u većoj mjeri. Laserski snop ima oblik cilindra radijusa ( $d$ ), koji se sa udaljenošću od izvora lagano povećava (divergencija), što vidimo na slici 2.9.



Slika 2.9. Shematski prikaz divergencije laserskog snopa [3]

Širina laserskog snopa definiše se uglom širenja, a ovisi o valnoj duljini:

$$\Theta = \frac{4\lambda}{\pi d}$$

gdje je:

- $\Theta$  - kut širenja,
- $d$  – radijus početnog snopa,
- $\lambda$  – valna duljina laserskog zračenja.

Širenje laserskog snopa je važno jer o njemu ovisi veza između osnovnih laserskih parametara, udaljenosti materijala i gustoća snage koja pada na radni predmet, a data je izrazom:

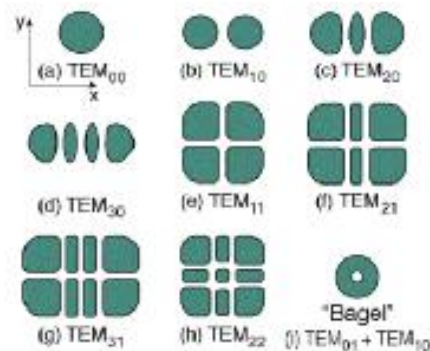
$$P_{sr} = 1.27P / d^2 + (L\lambda / d)^2$$

gdje je:

- $P_{sr}$  – srednja snaga koja pada na radni predmet,
- $P$  – snaga laserskog zračenja,
- $L$  – udaljenost od radnog predmeta.

### 2.2.3. Mod lasera

Transverzalni elektromagnetni valovi označavaju se oznakom:  $TEM_{pqr}$ . Uobičajeno je da su stranice  $A=B$  jednake i uzduž  $x$  i  $y$  osi pa je  $xy$  ravnina transverzalna ravnina. Treća stranica  $C$  je duž  $z$  osi koja se zove longitudinalna os. Najniža vrsta transverzalnih elektromagnetnih stojnih valova u rezonatoru označava se s  $TEM_{00}$  i nazivaju se longitudinalni modovi. Uz longitudinalne modove razlikujemo još i transverzalne modove. Longitudinalni modovi su odgovorni za širinu linije i koherenciju emitirane svjetlosti, dok su transverzalni modovi odgovorni za promjer, usmjerenost (divergencija) laserskog snopa i raspodjela energije u ravnini okomitoj na smjer širenja snopa.



Slika 2.10. Neki od najčešće korištenih TEM-ova [7]

Poželjno je da laser daje mod  $TEM_{00}$  zbog dobrog profila intenziteta, male divergencije snopa i mogućnosti dobrog fokusiranja.

[7]

### 2.2.4. Reflektivnost i apsorpcija

Općenito se za sve metale može reći da imaju visok postotak refleksije laserskog zračenja, valnih duljina od 1.06 do 10.6  $\mu\text{m}$ , pri sobnoj temperaturi. Što je veća valna duljina to je viši postotak refleksije. Okvirno, za valne duljine preko 5  $\mu\text{m}$  reflektivnost iznosi preko 90%. Naravno sve ovisi i o vrsti materijala.

Koeficijent apsorpcije također ovisi o vrsti materijala, no postoje određeni načini na koje se ona može povećati.

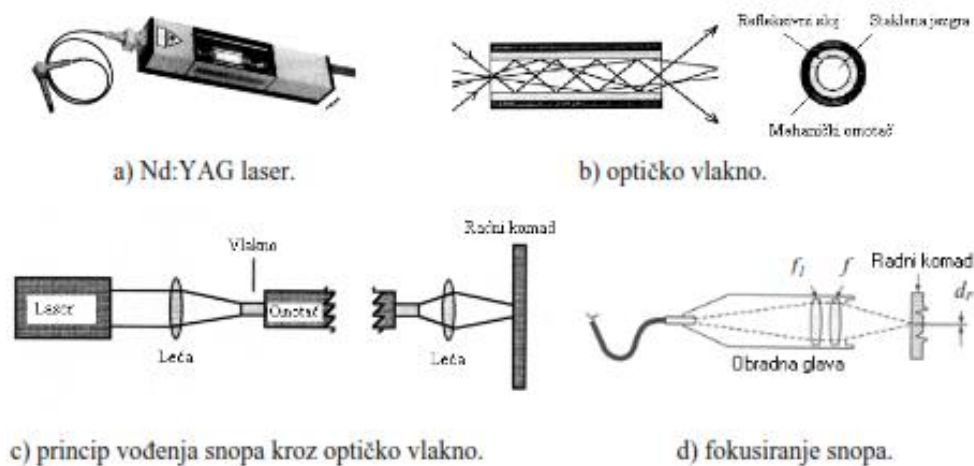
Kod apsorpcije je ustanovljeno da ona raste sa rastom temperature osnovnog materijala. Za povećanje apsorpcije i smanjenje reflektivnosti moguće je formirati površinske prevlake koje moraju ispunjavati određene zahtjeve. Kvaliteta površine materijala također utječe na apsorpciju, odnosno hrapava površina ima veći koeficijent apsorpcije u odnosu na glatku površinu.

### 2.3. Prijenos laserskog snopa

Laserski snop nastao u rezonatoru može se voditi do radnog komada na dva načina:

- Sustavom zrcala i leća (CO<sub>2</sub> i Nd:YAG)
- Optičkim vlaknima (Nd:YAG)

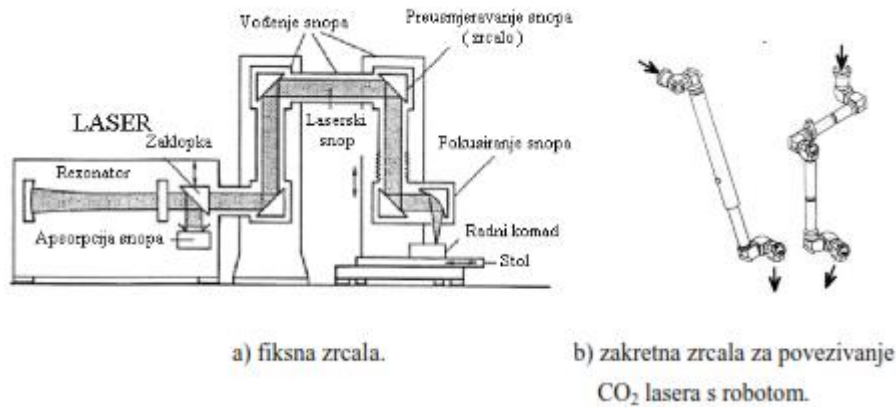
Laserski snop iz Nd:YAG lasera provodi se kroz fleksibilni optički kabel sa staklenom jezgrom promjera 0,4 do 1 mm. Oko jezgre se nalazi visokoreflektivni omotač, a oko njega se nalazi mehanički omotač koji štiti jezgru. Svjetlost se reflektira od visokoreflektivnog omotača duž optičkog kabela, koji može biti dužine i do 200 m. Na kraju se nalazi obradna glava u kojoj je smještena optika za fokusiranje snopa na površinu radnog komada. Obradna glava može biti pričvršćena na ruku robota ili na CNC stroj koji obavlja gibanje po zadanoj putanji. Slika 2.11.



Slika 2.11. Vođenje laserskog snopa optičkim vlaknom (kabelom) [8]

Laserski snop kad CO<sub>2</sub> lasera mora se voditi sustavom zrcala (slika 2.12), jer staklena jezgra optičkog kabela nije propusna za svjetlost njegove valne duljine, već se ona apsorbira u staklu. Materijal jezgre optičkog vlakna koji bi bio propusan za snop CO<sub>2</sub> lasera još nije pronađen.

Relativno gibanje između snopa i radnog komada mora biti numerički uprvaljano, a pritom se može gibati snop, radni komad ili oba.



Slika 2.12. Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala [8]

## 2.4. Fokusiranje laserske svjetlosti

Osnovni parametri laserskog snopa:

- žarišna duljina leće,  $f$ , mm,
- promjer žarišne točke,  $d_F$ , mm,
- položaj žarišta u odnosu na površinu materijala,  $z$ , mm.

Za postizanje gustoće snage potrebne za obradu materijala, potrebno je fokusirati laserski snop koji dolazi iz rezonatora. Snop se fokusira pomoću leća ili zrcala na kružnu površinu žarišta promjera 0,2 do 1 mm. Žarišna duljina leće određuje promjer fokusirane zrake u žarištu. Manja duljina daje manji promjer. Gustoća snage na površini radnog komada može se izračunati kao:

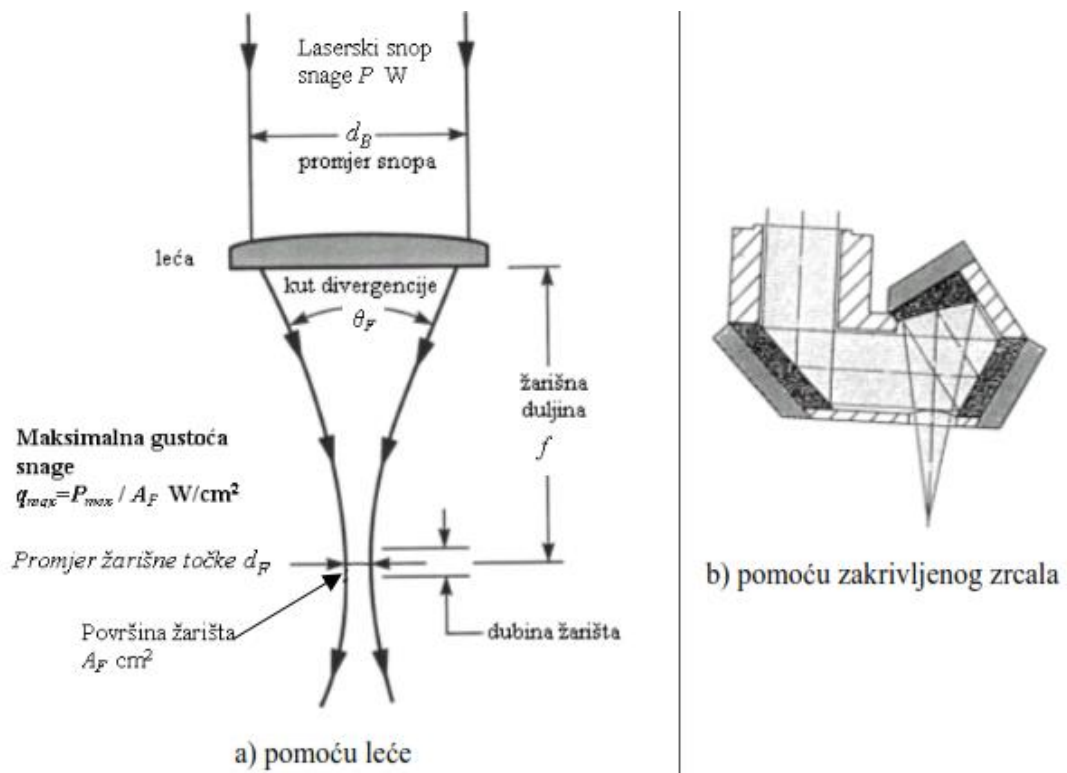
$$q = \frac{P}{A_s} \quad [W/cm^2]$$

gdje je:

- $q$  – gustoća snage na površini radnog komada,  $W/cm^2$ ,
- $P$  – snaga lasera,  $W$ ,
- $A_s$  – površina presjeka snopa na površini materijala,  $cm^2$ .

[8]

Najveća gustoća snage postiže se u žarištu, gdje je promjer laserskog snopa najmanji.

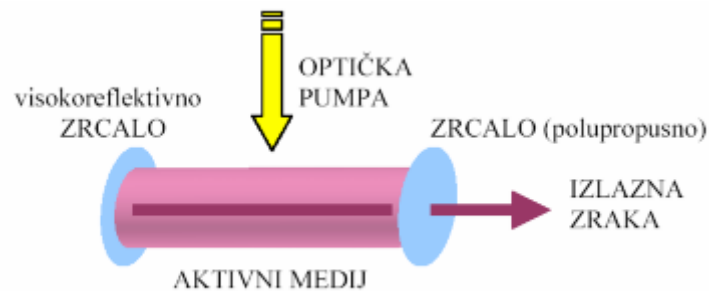


Slika 2.13. Fokusiranje laserskog snopa [8]

### 3. DIJELOVI LASERA

Laser se sastoji od tri glavna dijela, što je prikazano slikom 3.1.

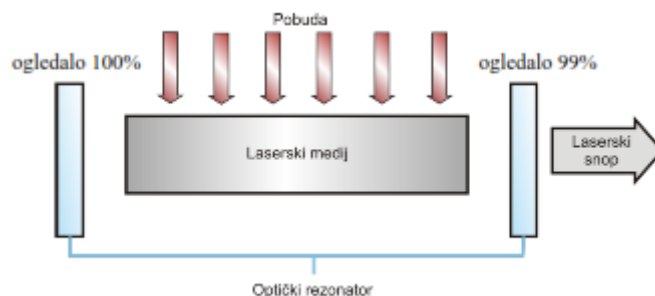
1. Optičko pojačalo
2. Optički rezonator
3. Energetska pobuda sustava



Slika 3.1. Shematski prikaz osnovnih dijelova lasera [2]

1) **Optičko pojačalo** je medij u kojem se pojačava laserska svjetlost pri svakom prolazu. Aktivni medij nalazi se između dva ogledala. Pobuđivanjem pomoću vanjskog izvora energije u njemu se postiže inverzija naseljenosti između gornjeg i donjeg energetskog stanja čiji prijelaz daje laserski snop.

2) **Optički rezonator** sastoji se od dva paralelna skoro ravna zrcala, kao što vidimo na slici 3.2.



Slika 3.2. Rezonatorski sistem [3]

Jedno zrcalo ima reflektivnost što bliže 100% i ima ulogu da vrati stvorene fotone u aktivnu sredinu kako bi nastavili proces pobude. Reflektivnost drugog zrcala je nešto manja od 100% kako bi se dio svjetlosti vratio u aktivnu sredinu, a drugi dio izlazio van i tako tvorilo laserski snop.



Samo ona svjetlost koja putuje skoro okomito na zrcalnu ravninu ostaje unutar rezonatora i ima priliku da bude pojačana. Da bi takva svjetlost konstruktivno interferirala mora biti zadovoljen uvjet da je duljina rezonatora jednaka cjelobrojnom umnošku polovice valne duljine svjetlosti.

3) **Energetska pobuda sustava** stvara inverznu naseljenost u aktivnoj sredini. Kao energetska pobuda medija može poslužiti apsorpcija fotona, sudari između elektrona ili iona i aktivnih molekula odnosno atoma koji emitiraju lasersko svjetlo, sudari između samih aktivnih atoma odnosno molekula, rekombinacija slobodnih elektrona, rekombinacija nositelja naboja u poluvodiču, kemijska reakcija koja stvara pobuđene molekule ili atome.

Postoje različite metode pobude s obzirom na vrstu lasera: optičko pobuđivanje, električno pražnjenje, pobuđivanje kemijskom reakcijom i plinsko pobuđivanje.

[4]

## **4. VRSTE LASERA**

Postoji više podjela lasera ovisno o svojstvima koja se promatraju:

1. Prema načinu rada: kontinuirani i pulsni.
2. Prema agregatnom stanju optičkog pojačala: laseri čvrstog stanja, plinski i tekući.
3. Prema načinu pobude: optički, sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju, ozračivanjem snopovima čestica visoke energije, kemijskim reakcijama.

Za svaki laser možemo koristiti sve metode pobude, ali neće biti jednako efikasne. Za efikasan način pobuđivanja treba uskladiti izbor aktivne tvari i načina pobude.

### **4.1. Laseri prema načinu rada**

#### **4.1.1. Laseri s kontinuiranim izlazom (cw)**

Kod cw lasera optičko pojačalo se nalazi između dva paralelno postavljena zrcala. Jedno zrcalo je 100% reflektirajuće, a drugo propušta određenu količinu svjetla. Snop se unutar rezonatora reflektira, raste gustoća energije zračenja i nakon postizanja uvjeta za lasersku emisiju snop izlazi kroz zrcalo koje je djelomično propusno.

[9]

#### **4.1.2. Pulsni laseri (pw)**

Kod pulsnih lasera moguće je koristiti potpuno nepropusna zrcala, od kojih se jedno periodički pomiče izvan optičkog puta lasera. Kada je zrcalo na svom mjestu, ono zarobljava lasersku zraku unutar rezonatora gdje se ona pojačava. Kada se zrcalo pomakne, iz lasera izlazi kratki puls intenzivnog laserskog zračenja. Pulsni laseri mogu postići jako velike snage u pojedinim pulsevima, iako je prosječna snaga lasera relativno mala.

Danas se mogu napraviti laseri koji odašilju 20-50 pulseva u sekundi, a pojedini pulsevi traju oko jedne femtosekunde.

[10]

### **4.2. Laseri prema agregatnom stanju optičkog pojačala**

#### **4.2.1. Plinski laseri**

Plinski laseri se mogu podijeliti na: atomske (He-Ne, Cs, ...), ionske (Ar, Kr), molekularne (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), kemijske (samostalni).

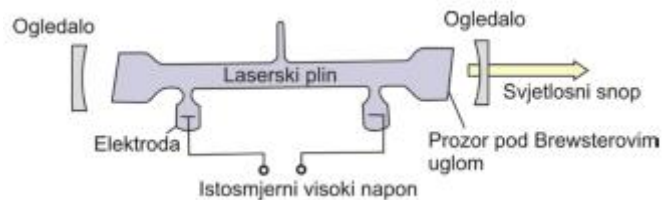
## Plinski izboj

Za rad lasera potrebno je stvoriti veliki broj pobuđenih atoma i postići inverznu naseljenost. Zbog male gustoće plina, ne može se očekivati velika gustoća pobuđenih čestica. Izlazne energije plinskih lasera općenito su manje nego kod čvrstih lasera. Za povećanje izlazne energije potrebna je primjena novih metoda pobude te rad pri visokom pritisku plina. Za pobudu plinovitog sredstva vrlo pogodan način pobude su sudari s elektronima u plinskom izboju. Prolaskom struje dovoljne jakosti kroz plin dolazi do sudara elektrona s atomima ili molekulama. Karakteristike ove metode su visok stupanj monokromatičnosti i koherentnosti, zbog male gustoće čestica i prostorne homogenosti plina.

### 4.2.1.1. Atomski laseri

- He-Ne laser

Aktivno sredstvo je mješavina plina helija i neona (uobičajeno 10:1). Pobuda se postiže visokim naponom od 10kV. Atomi He pobuđuju se u sudaru s elektronima (el. struja) unutar cijevi, što možemo vidjeti na slici 4.1. Zatim u sudaru s atomima Ne predaju snagu te na taj način atomi Ne dolaze u stanje inverzne naseljenosti.

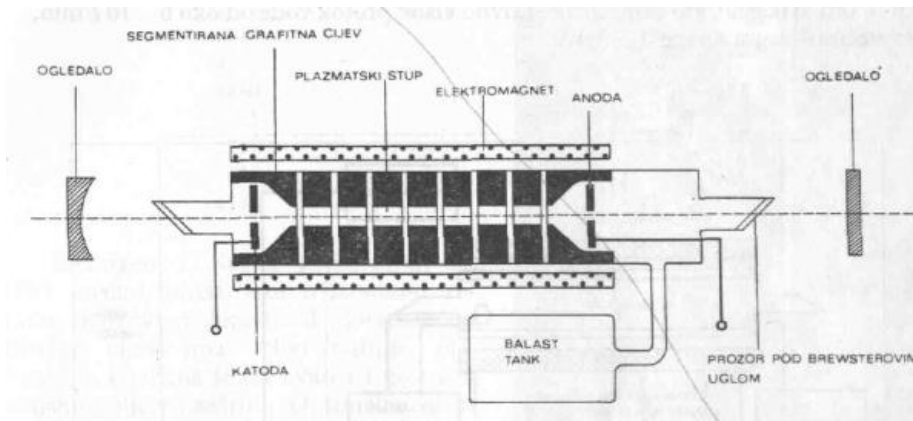


Slika 4.1. Shematski prikaz plinskog lasera [3]

Prednost ove metode je u mogućnosti upotrebe kemijski aktivnih plinova i izbjegavanje negativnih efekata svojstvenih istosmjernom pražnjenju.

### 4.2.1.2. Ar<sup>+</sup>ion laser

Kao optičko sredstvo koristi se plazma koja se sastoji od iona i elektrona dobivenih električnim izbojem. Neutralni atom najprije se ionizira u direktnom sudaru s elektronom, a nakon toga se tako dobiveni pozitivni ion u sudarima s elektronima pobuđuje na više energetske razine. Laser može operirati na 8 vidljivih linija između 457.9 nm i 514.5 nm u plavo-zelenom dijelu spektra.



Slika 4.2. Shematski prikaz cijevi ionskog lasera [11]

Karakterizira ga puls visokog napona (oko 8 kV DC) koji ionizira plin. Plin se održava ioniziranim pomoću istosmjerne struje od 45 A i napona od 600 V uzduž izbojne cijevi koja je obično napravljena od materijala s malom termičkom vodljivošću (BaO, grafit), možemo je vidjeti na slici 4.2. Cijev je konstruirana od metalnih dijelova u kratkim sekvencama čija dužina onemogućava stvaranje kratkog spoja za izboj.

[9]

#### 4.2.1.3. Molekularni laseri

Laserska akcija također počinje izbojem u plinu, elektroni visoke energije sudaraju se sa molekulama plina i pobuđuju ih na viša energetska stanja. Energijski spektar molekula mnogo je složeniji od spektra atomskih plinova. Energija koju primi molekula može biti raspodijeljena na elektronsku, vibracijsku, rotacijsku i translacijsku.

Elektronska pobuda uključuje promjene u prostornoj raspodjeli elektrona koji povezuju atome u molekuli zajedno. Energija potrebna za pobudu je dosta velika i uključuje frekvencije iz vidljivog i ultravioletnog dijela spektra, pa će i emisija pripadati tom području. U vibracijskoj pobudi, atomi u molekuli vibriraju jedan u odnosu na drugoga. Potrebna je manja energija za pobudu, a može se postići sa energijom koja odgovara frekvenciji u infracrvenom području spektra. Rotacijska pobuda uključuje rotaciju cijele molekule. Ulazna i izlazna energija je niža i uključuje frekvencije iz mikrovalnog područja. Translacijska pobuda, u kojoj se cijela molekula kreće s jednog mjesta na drugo, je uvijek povezana s toplinom. Valna funkcija molekule je produkt triju funkcija: elektronske, vibracijske i translacijske.

#### **4.2.1.4. Kemijski laseri**

Kod kemijskih lasera emisija nastaje zbog neravnoteže u raspodjeli kemijske energije između reagirajućih komponenata. Budući da su reagirajuće komponente u plinovitom stanju kemijski laseri se svrstavaju u plinske lasere.

Prednost kemijskih lasera je što se pobuda dobiva samom kemijskom reakcijom bez vanjskog djelovanja. Reakcija počinje miješanjem komponenata no moguće je reakciju započeti pomoću iskre. Reakcijom oslobođena energija prouzrokuje vibraciju nastalih molekula.

Energijski kvantni prijelazi su između rotacijsko vibracijskih razina.

Kemijski laseri mogu postići jako veliku izlaznu snagu u kontinuiranom načinu rada zato se najviše istražuju za vojnu primjenu.

[11]

#### **4.2.2. Laseri čvrstog stanja**

*Čvrsta tijela* su građena od atoma, iona i molekula. Ako su pravilno raspoređeni u prostoru tako da tvore kristalnu rešetku onda govorimo o kristalu, odnosno kristalnoj strukturi. Međutim, ako ispunjavaju prostor bez ikakvog reda, nepravilno, govorimo o amorfnom tijelu. Takav slučaj je kod stakala i polimera.

Laseri čvrstog stanja, kao aktivni medij u kojem se pojačava laserska svjetlost, koriste kristale ili stakla. Kristali i stakla apsorbiraju svjetlost, ali najčešće ju ne emitiraju već energiju predaju rešetci. Da bi se ostvarila emisija dodaju se primjese iona plemenitih ili prijelaznih metala od 0,001% na više (neodibija, kroma, itd.) Emisija potječe od ugrađenih iona.

Energijska pobuda svih lasera čvrstog stanja je svjetlosna. Izvori te svjetlosti su:

- Bljeskalice ili svjetiljke,
- Laserske diode

[12]

##### **4.2.2.1. Rubinski laser**

Jedan od najpoznatijih lasera, ujedno i prvi konstruirani laser sa čvrstim tijelom. Kao aktivni medij koristi se kristalna šipka sintetski proizvedenog rubina. Rubin je zapravo aluminijev oksid  $Al_2O_3$  koji sadrži 0,05 težinskih postotaka  $Cr_2O_3$  što mu daje ružičastu boju. Povećanjem koncentracije kromovih iona boja kristala mijenja se u crvenu, a valna duljina emisije s 694,3 nm na 704,1 nm. Rubinska šipka mora biti homogena, bez defekata, a rubne površine rezane i optički polirane, pod kutom od  $60^\circ$  ili  $90^\circ$  prema kristalografskoj osi. To je od izuzetne važnosti za ostvarenje laserkog djelovanja, jer stimulirana emisija najbolje teče u takvoj geometriji aktivnog sistema. Za pobudu aktivnog medija obično se koristi ksenonska bljeskalica.

#### **4.2.2.2. Stakleno neodimijski laseri**

Daju impulse vrlo velike snage, energije i kratkog trajanja. Staklo kao laserski medij je vrlo pogodno jer je njegova proizvodnja jeftina, ima izotropna svojstva, dugotrajno je i lako obradivo. Mogu mu se dodati velike količine primjese. Indeks loma je u rasponu od 1,5 do 2,1. Mogu se postići impulsi s energijom većom od 5 kJ u trajanju od 3 ms.

#### **4.2.2.3. Granatni laseri**

Kao laserski medij upotrebljava se itrij-aluminij-granat, obogaćen neodimijom s oznakom YAIG ili YAG, te itrij-galij-granat (YGaG). YAG ima dobra mehanička svojstva, dobru termičku vodljivost i lako je obradiv. Za pobudu aktivnog medija koriste se volfram halogene svjetiljke, one su jeftine i dugotrajne. Daju kontinuirano zračenje i snagu od nekoliko kW. Rade na valnoj duljini od 1,016  $\mu\text{m}$ .

[3]

#### **4.2.3. Tekući laseri**

Kao aktivni medij koristi se otopina, smještena u staklenoj cjevčici. Koriste se anorganske i organske otopine. S praktičkog aspekta, tekućine pokazuju velike prednosti, jer dozvoljavaju izmjenu koncentracije aktivnih iona, a problemi vezani uz defekte uopće ne postoje. Također one omogućuju jednostavnije hlađenje, cirkulacijom aktivnog medija. Međutim, imaju malu gustoću i malu koncentraciju aktivnih iona. Slaba strana tekućeg laserskog medija je njegov veliki koeficijent termičke ekspanzije i promjena indeksa loma u vezi s njim. Termičke promjene i strujanje tekućine izazivaju nehomogenosti u indeksu loma i smanjuju kvalitetu lasera. [11]

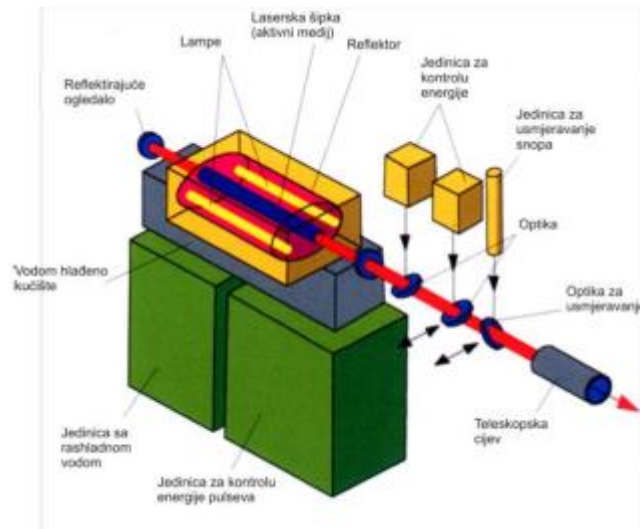
### **4.3. Laseri u industriji**

Razvoj lasera utjecao je na njegovu sve veću primjenu u industriji. Najznačajniji laseri za industrijsku primjenu su Nd:YAG čvrsti laser i CO<sub>2</sub> plinski laser.

#### **4.3.1. Nd:YAG laseri**

Koristi kruti aktivni medij koji je prema sastavu kristal granat u ovom slučaju Itrij-Aluminij-Granat, kod kojeg je približno 1% atoma Itrija zamijenjeno atomima neodimija.

Neodimij je laserski aktivan element. Snaga ovih komercijalno dostupnih lasera kreće se u rasponu od 0,1 do 3,0 kW. Iako inače imaju manju snagu od CO<sub>2</sub> lasera, vršna snaga im može biti i preko 10 kW.



Slika 4.3. Shematski prikaz Nd:YAG lasera [3]

Prednost Nd:YAG lasera je što emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ( $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ). Svjetlost te valne duljine ne prolazi kroz zrcalo, već se potpuno reflektira. Zbog te činjenice sistem vođenja laserskog snopa ostvaren je pomoću optičkog kabela, kroz čiju unutrašnjost se vodi laserski snop.

U reflektoru se nalazi aktivni medij (laserska šipka) i dvije lampe za pobudu. Reflektor, skupa sa laserskom šipkom i lampama je uronjen u rashladnu vodu koja služi za hlađenje laserske šipke radi prevencije deformacija, kao što vidimo na slici 4.3.

Jedinica za kontrolu energije i impulsa generira impulse zahtijevane amplitude na pobudnim lampama, koje ih pretvaraju u bijelu svjetlost te pobuđuju laserski medij. To izaziva impulse laserske svjetlosti u obliku otpuštenih fotona iz atoma neodimija, jednake valne duljine kao i impulsi pobude.

Prema načinu rada, Nd:YAG laseri su najčešće pulsni laseri. Postoje i kontinuirani, ali oni se ne koriste u tehnici zavarivanja. Trajanje pulsa pri zavarivanju je 0,5 do 20 ms, a frekvencija pulsa je od 5 do 500 Hz. Nd:YAG laseri koriste se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti, te u mikromehanici. Laseri snage preko 1 kW primjenjuju se za zavarivanje i rezanje limova do 6 mm debljine. Također veoma su pogodni za automatizaciju procesa.

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

CO<sub>2</sub> laser je plinski molekularni laser. Na komercijalnom tržištu mogu se naći CO<sub>2</sub> laseri snage od 0,5 do 30 kW. Za zavarivanje se koriste laseri snage od 2 do 5 kW.

CO<sub>2</sub> laseri su robusniji, kompleksniji i imaju veću snagu od Nd:YAG lasera. Mogu biti uzdužne i poprečne konstrukcije. CO<sub>2</sub> laseri s uzdužnim tokom aktivnog medija rade na modovima TEM<sub>00</sub> i TEM<sub>01</sub> i imaju snagu 5 kW, a poprečni imaju snagu od 5 do 50 kW.

Kao aktivni medij koristi se ugljikov dioksid kojemu su dodane određene količine helija i dušika. Helij i dušik služe za pojačavanje otpuštanja fotona i propuštanje samo željenih valnih duljina. Kod CO<sub>2</sub> lasera najčešće se koristi valna duljina od 10,6 μm, dakle emisija je u infracrvenom području. Mogu raditi u kontinuiranom i pulsnom načinu rada.

Pritisak u cijevima se kontrolira vakuumskom pumpom, a konstantan pritisak je važan za pravilno električno pražnjenje. Električnim pražnjenjem se pobuđuje aktivni medij. Cirkulacija aktivnog medija uz pomoć cirkulacijske pumpe i dovođenje svježeg aktivnog medija je bitno iz razloga što se prilikom emisije laserskog snopa stvaraju neželjeni kemijski spojevi koji ograničavaju lasersku emisiju.

[3]



## 5. LASERSKO ZAVARIVANJE

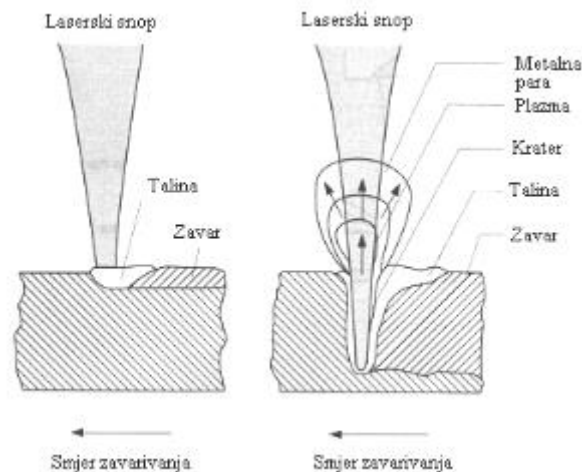
Zavarivanje laserom izvodi se u atmosferi zaštitnog plina (Ar, He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ili mješavina). Laserska emisija svjetlosti djeluje koncentrirano i uzrokuje velike brzine zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Brzina zavarivanja može biti od 1 do 10 m/min, a unos toplote na mjesto zavara i deformacija materijala je relativno mala. Laserski snop može biti kontinuirani (cw) i pulsni (pw), ovisno o zahtjevima konstrukcije, materijalu, tipu i geometriji spoja. U kontinuiranom načinu rada emitira se laserska zraka kontinuirane, relativno niže, snage tokom čitavog procesa. U pulsnom načinu rada moguće je ostvariti vrlo veliku snagu u kratkim vremenskim intervalima.

Tehnika zavarivanja laserom primjenjuje se kod konstrukcija visoke vrijednosti, što zahtjeva automatizaciju i robotizaciju procesa.

### 5.1. Principi laserskog zavarivanja i njegove karakteristike

Lasersko zavarivanje svodi se na dvije osnovne tehnike, što je prikazano slikom 5.1:

- zavarivanje taljenjem,
- zavarivanje protaljivanjem – tehnika ključanice.



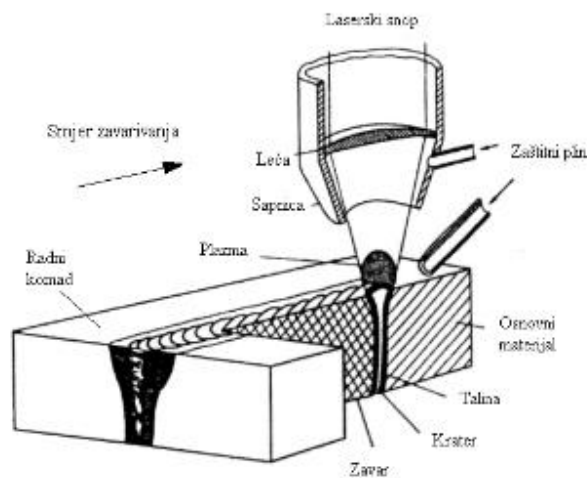
a) zavarivanje taljenjem    b) zavarivanje protaljivanjem

Slika 5.1. Tehnike laserskog zavarivanja [8]

Zavarivanje taljenjem izvodi se s malom gustoćom snage snopa. Za svaki materijal postoji prag gustoće snage iznad kojeg počinje zavarivanje protaljivanjem, taj prag je reda veličine  $10^6 \text{ W/cm}^2$ .

Kod zavarivanja protaljivanjem, energija laserskog snopa fokusirana je u jednoj točki, relativno male površine, na liniji spoja. Na početku se veći dio energije reflektira od površine radnog komada, a manji dio koji se apsorbira zagrijava površinu i uzrokuje stvaranje metalnih para. Metalne pare u početku procesa pojačavaju apsorpciju energije jer su vrlo dobri provodioci topline. S rastom gustoće energije na više od  $10^6 \text{ W/cm}^2$ , rapidno raste i odnošenje čestica metala isparavanjem. To omogućava stvaranje rupe oblika ključanice na mjestu fokusiranja laserskog snopa. Kako se rupa produbljuje tako sve više energije prodire u metal, zbog čega nastaje sve veća količina metalne pare. Pod pritiskom metalne pare formira se cilindar rastaljenog metala na zidovima ključanice, čime se sprječava da rastaljeni metal zatvori ključanicu prije vremena.

[8]



Slika 5.2. Princip laserskog zavarivanja [8]

Kod pulsnih lasera (pw) rastaljeni metal se kreće prema centru ključanice i kristalizira se. A kod kontinuiranih lasera (cw) rastaljeni metal, pod utjecajem površinskih napona, stvara mali val na prednjoj strani laserskog snopa. Kako se laserski snop kreće, tako se val premješta, sa lijeve i desne strane laserskog snopa, iza njega i lagano popunjava otvor ključanice.

Rastaljeni metal se lagano kristalizira istiskujući već formirane kapi na površinu zavaru, te ona dobija oblik slova V sa vrhom iza laserskog snopa, kao što vidimo na slici 5.3.

[3]



Slika 5.3. Izgled zavarenog spoja izvedenog laserom [3]

Proces nastanka ključanice počinje pri gustoćama energije od  $10^5 \text{ W/cm}^2$ . Kako proces odmiče tako povećavamo gustoću energije jer u suprotnom bi dobili širok ali plitak zavar. Za zavarivanje tankih materijala, na primjer metalnih folija, potrebna nam je gustoća energije ispod  $10^5 \text{ W/cm}^2$ . Za zavarivanje metalnih materijala konvencionalnih debljina potreban nam je dublji zavar, odnosno gustoća energije od  $10^6$  do  $10^7 \text{ W/cm}^2$ . Pri gustoćama energije većim od  $10^8 \text{ W/cm}^2$  dolazi do povećanog isparavanja metala, što nije poželjno.

Lasersko zavarivanje materijala debljine do 15 mm, u usporedbi s većinom elektrolučnih postupaka, ima niz prednosti: zavarivanje se izvodi sa znatno većim brzinama, zbog čega traje kraće, izvodi se u jednom prolazu i nema potrebe za dodatnim materijalom.

Reflektivnost materijala ovisi o vrsti materijala, temperaturi, valnoj duljini i gustoći snage laserskog snopa. Početna reflektivnost metala na sobnoj temperaturi je oko 90%, odnosno apsorbira se samo oko 10% energije. Pri zavarivanju protaljivanjem rastaljeni metal apsorbira znatno više energije, oko 80-90%. Nastanak kratera popraćen je nastankom plazme. Plazma je ionizirana mješavina isparenog metala i zaštitnog plina. Ona ima veći koeficijent apsorpcije od rastaljenog materijala, te predaje toplinu radnom komadu reemitiranjem apsorbiranog laserskog zračenja. Pri zavarivanju s većom gustoćom snage stvara se oblak plazme između kratera i laserskog snopa, te se snop djelomično apsorbira na oblaku plazme. Ukoliko je apsorpcija snopa na oblaku plazme velika može doći do nestajanja kratera.

Glavne razlike između zavarivanja taljenjem i zavarivanja protaljivanjem:

#### Zavarivanje taljenjem

- gustoća snage  $q < 10^6 \text{ W/cm}^2$ ,
- nema efekta protaljivanja,
- penetracija ovisi o dovođenju topline u radni komad,
- zavarivanje se provodi mehanizmom taljenja (kao i kod konvencionalnih postupaka zavarivanja),
- zavari su široki i plosnati, omjer penetracije i širine manji od jedan.

#### Zavarivanje protaljivanjem

- gustoća snage prelazi kritični prag ( $q > 10^6 \text{ W/cm}^2$ ),
- dolazi do toplinskog zastoja, povećanja količine taline i djelomičnog isparavanja materijala, potiskivanja taline u stranu uslijed tlaka metalnih para i nastanka kratera,
- povećanjem gustoće snage raste tlak metalne pare, javlja se štrcanje taline,
- krater omogućuje prodiranje laserskog snopa duboko u materijal – povećanje apsorpcije ( $\sim 90\%$ ) uslijed višestruke refleksije zračenja u krateru,

- oblik i dinamika kratera slična je ključanici,
- uski i duboki zavari,
- omjer penetracije i širine zavara iznosi 1 do 5.

[8]

## 5.2. Parametri laserskog zavarivanja

Da bi dobili kvalitetan zavareni spoj kod laserskog zavarivanja potrebno je osigurati dovoljan unos energije u materijal i optimizirati parametre.

Osnovni parametri za upravljanje procesom zavarivanja su:

- snaga lasera,  $P$ ,  $W$ ,
- brzina zavarivanja,  $v$ ,  $cm/min$ ,
- zaštitni plin, (vrsta, protok, dovod – koaksijalno ili sa strane),
- parametri laserskog snopa, (žarišna duljina leće, promjer žarišne točke, položaj žarišta u odnosu na površinu materijala).

U cilju postizanja tražene kvalitete zavara potrebno je provesti niz pokusa da bi optimizirali sve parametre zavara.

Za postupak laserskog zavarivanja upotrebljavaju se razni senzori, a najviše za kontrolu položaja žarišta i vođenje laserskog snopa, jer vrlo mali pomaci mogu bitno utjecati na kvalitetu zavarenog spoja. Na volumen i kemijski sastav zavara može se utjecati dodatnim materijalom u obliku žice ili praška.

## 5.3. Zaštitni plin

Uloga zaštitnog plina kod laserskog zavarivanja je velika, ponajprije zbog zaštite taline od atmosferskih plinova isto kao što je to slučaj kod elektrolučnih postupaka. Također, pored zaštite taline od utjecaja atmosfere, zaštitni plin je potreban za poboljšanje estetskog izgleda i mehaničkih svojstava zavara, zaštitu kratera (ključanice) otpuhivanjem plazme te zaštitu optike za fokusiranje od para i štrcanja. Ova uloga je jednaka kod  $CO_2$  i Nd:YAG laserskog zavarivanja, s izuzetkom otpuhivanja plazme.

Tipični zaštitni plinovi su Ar, He,  $N_2$ ,  $CO_2$  i njihove mješavine. Izbor zaštitnog plina ovisi o valnoj duljini lasera, vrsti materijala, unesenoj energiji i dovodu plina. Zaštitni plin mora se dovoditi na lice zavara, a preporuča se i na korijensku stranu kod zavarivanja s potpunom penetracijom. Za velike brzine zavarivanja potrebna je produžena zaštita iza laserskog snopa.

Protok plina ima veliku ulogu. Ako je neodgovarajući može izazvati turbulencije, lošu kvalitetu zavara i oštećenje optike zbog štrcanja. Kod dobre plinske zaštite, dobiva se metalno svijetla površina zavara.

Utjecaj zaštitnog plina na proces zavarivanja definiraju:

- vrsta plina (čisti ili mješavina),
- protok plina,
- način dovođenja plina.

### 5.3.1. Vrste plinova:

#### Inertni plinovi

Helij i argon su inertni plinovi koji pružaju odličnu zaštitu od oksidacije. Helij ima visoku energiju ionizacije, malu atomsku masu i visoku toplinsku vodljivost zbog čega je najbolji plin za kontrolu plazme. Što je veća energija ionizacije plina to je bolji prijenos energije. Nedostatak helija je što je puno skuplji od argona.

Argon ne reagira s laserskim snopom. Koristi se pri zavarivanju tankih materijala gdje svojom prisutnošću u otvoru ključanice štiti talinu od oksidacije i prijevremenog ohlađivanja.

Argon, helij i njihove mješavine upotrebljavaju se za zavarivanje ugljičnih čelika, visokolegiranih čelika, aluminijskih i njegovih legura te titana i njegovih legura.

#### Aktivni plinovi

Dušik, ugljikov dioksid i kisik su aktivni plinovi, oni se također koriste kao zaštitni plinovi, prije svega jer su jeftiniji od inertnih plinova. Upotrebom aktivnih plinova dolazi do povećanja brzine zavarivanja, posebno kod malog dodatka kisika od 1 do 2 %. Razlog tome je smanjena površinska napetost taline zbog oksidacije, koja uzrokuje povećanje apsorpcije te dodatna energija uslijed egzotermne reakcije.

Kod zavarivanja dušikom i ugljikovim dioksidom kao zaštitnim plinovima dolazi do značajnog ulaska dušika i kisika u zavar. Ulazak dušika uzrokuje povećanje tvrdoće i poroznosti zavara, te smanjenje deformabilnosti.

Ugljikov dioksid vrlo brzo reagira s laserskim snopom pri čemu se formira veoma snažan oblak plazme koji može vratiti snop na fokusnu leću i tako je oštetiti. Zbog toga nije preporučljiv za lasere koji rade kontinuirano, već se koristi kod pulsnih CO<sub>2</sub> lasera jer je vrijeme trajanja pulsa prekratko za formiranje plazme.

Dušik ima dobru efikasnost u sprječavanju nastanka plazme, ali utječe na proces kristalizacije rastaljenog materijala. Međutim, i kao takav zadovoljava zahtjeve kvalitete zavarenog spoja.

Mješavine plinova imaju određene prednosti i nedostatke, a neke od najčešće korištenih kombinacija su:

- helij – argon,
- helij – dušik,
- argon – ugljikov dioksid.

[3] [8]

### 5.3.2. Utjecaj zaštitnog plina na otpuhivanje plazme

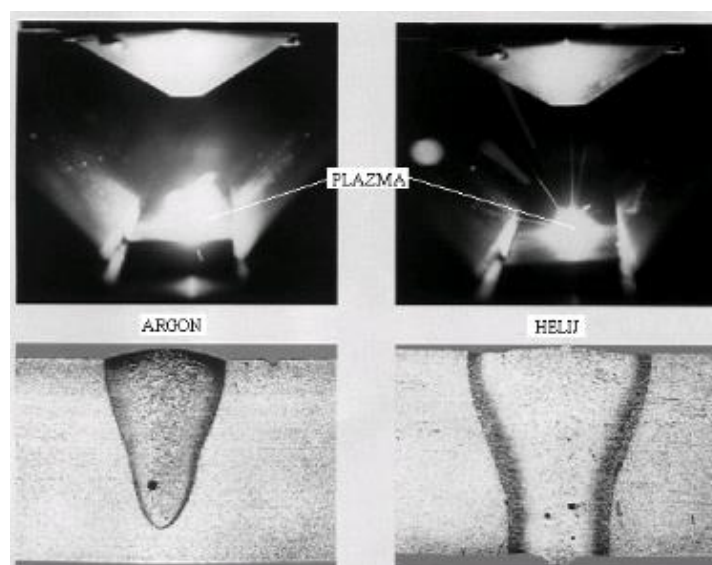
Kod CO<sub>2</sub> lasera razlikujemo radni i zaštitni plin. Najčešće je to jedan plin koji ima dvije uloge. Uloga plina je održavanje stabilnosti procesa (održavanje kratera) kontrolom plazme.

Plazma je ionizirana mješavina isparenog metala i radnog plina. Ona najlakše nastaje kada je energija ionizacije niska, a atomska masa plina visoka.

Helij je najotporniji na nastajanje plazme, iza njega slijede dušik pa argon. Najmanje otporan na nastanak plazme je ugljikov dioksid. Plinske mješavine ponašaju se ovisno o udjelu komponenti.

Za CO<sub>2</sub> lasere snaga manjih od 2 kW i brzina zavarivanja većih od 100 cm/min, nastajanje plazme nije veliko pa se može kontrolirati čistim argonom ili mješavinom argona i helija. Kod zavarivanja debljih limova s visokim snagama i malim brzinama, nastajanje plazme je pojačano pa se za kontrolu plazme koristi čisti helij.

Pri zavarivanju s CO<sub>2</sub> laserom, kod pojačanog nastajanja plazme, s helijem kao zaštitnim plinom postiže se veća penetracija i veći poprečni presjek zavara nego s argonom, što možemo vidjeti na slici 5.4.



Slika 5.4. Zavarivanje s CO<sub>2</sub> laserom sa zaštitnim plinom argonom i helijem [8]

Može se uočiti da je oblak plazme iznad zavara s argonom veći pa je i apsorpcija zračenja na oblaku plazme veća. Stoga je i penetracija kod argona manja, što smanjuje efikasnost procesa.

Kod Nd:YAG lasera, zbog različite valne duljine od CO<sub>2</sub> lasera, nastanak plazme je zanemariv. U pravilu se koriste plinovi argon i dušik za zaštitu od oksidacije, a kod posebnih primjena još se upotrebljavaju i helij, ugljikov dioksid te mješavine plinova.

[8]

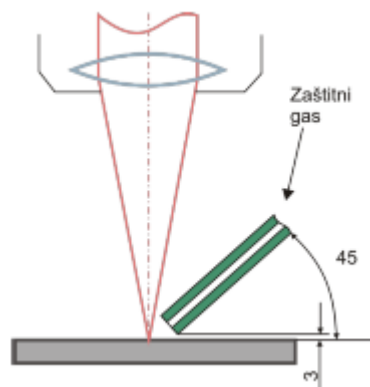
### 5.3.3. Uređaji za dovod zaštitnog plina

Važnu ulogu ima dovod plina na mjesto zavarivanja. Za svaku primjenu potrebno je optimirati vrstu, protok i dovod zaštitnog plina. Ako je protok plina premali na površini zavara pojavljuju se oksidi i obojenja.

Za sprječavanje oksidacije na površini dovoljan je protok plina od 10 do 20 l/min kroz sapnicu promjera 6 do 10 mm.

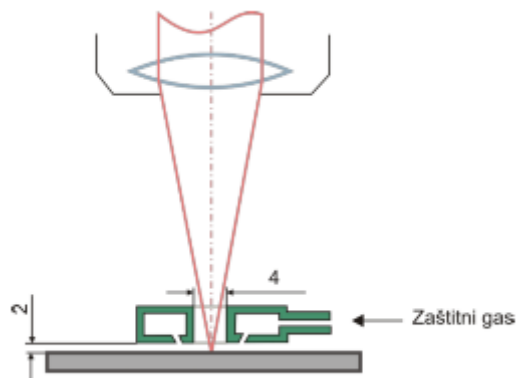
Oblik i konstrukcija uređaja ovisi o mogućnostima pristupa spoju kao i mogućnostima samog laserskog sistema.

Kod Nd:YAG lasera može se koristiti jednostavna cijev za dovod zaštitnog plina koja je najčešće izrađena od bakra (slika 5.5.). Ovaj sistem je jednostavan, a ima relativno dobro pozicioniranje.



Slika 5.5. Cijev promjera  $\Phi$  9 mm kao uređaj za dovod zaštitnog plina [3]

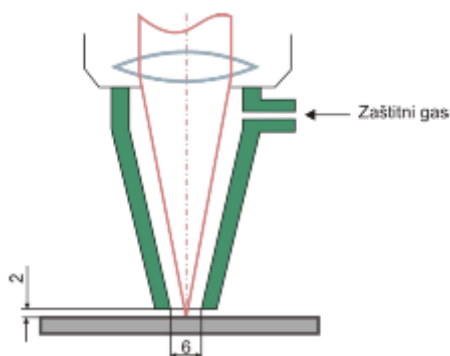
Također se može koristiti uređaj prstenastog oblika čiji se otvor postavlja aksijalno s laserskim snopom (slika 5.6.).



Slika 5.6. Prstenasti uređaj za dovod zaštitnog plina [3]

Zaštitni plin struji kroz otvore na donjem dijelu prstena te osigurava dobru zaštitu zavora.

Kod automatiziranog i robotiziranog zavarivanja najviše se koristi koaksijalna mlaznica (slika 5.7.), koja ima najpraktičniji i najefikasniji uređaj za dovod zaštitnog plina. Najčešće se koristi kod CO<sub>2</sub> lasera čija snaga ne prelazi 5 kW.



Slika 5.7. Koaksijalna mlaznica kao uređaj za dovod zaštitnog plina [3]

Efikasna je za zavarivanje materijala debljine do 4 mm i brzine zavarivanja do 1 m/min.

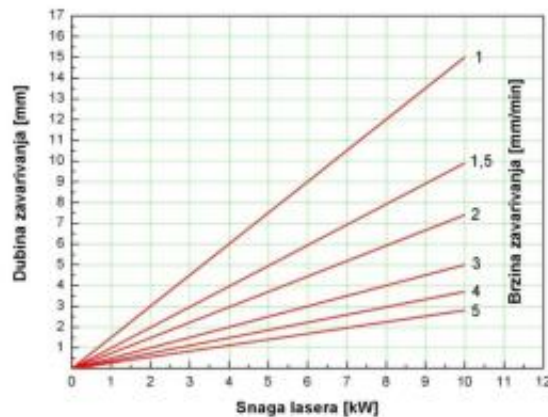
[3] [8]

#### 5.4. Snaga i brzina laserskog zavarivanja

Dva vrlo bitna faktora koja utječu na kvalitetu zavarenog spoja. Njihov utjecaj se teško može objasniti kod lasera koji rade pulsним načinom, zbog toga što količinu unesene energije ne određuje samo broj impulsa već i vrijeme trajanja te frekvencija ponavljanja istih. Dok se utjecaj snage i brzine zavarivanja, kod lasera koji rade kontinuirano, može mnogo lakše objasniti. Naprimjer, najčešće korišteni CO<sub>2</sub> laseri pri brzinama zavarivanja od 1 m/min



zavaruju materijale debljine do 1,5 mm za svaki kilovat snage lasera. Porastom brzine zavarivanja međusobna zavisnost nabrojanih faktora se mijenja, kao što vidimo na slici 5.8.



Slika 5.8. Dijagram koji prikazuje odnos dubine zavarivanja i snage CO<sub>2</sub> lasera pri zadanoj brzini zavarivanja [3]

## 5.5. Priprema materijala za zavarivanje

Prije početka zavarivanja potrebno je očistiti mjesto spoja od masnoća, boja, prljavštine i drugih čestica koji uzrokuju oksidiranje materijala. Nakon toga trebaju se ukloniti sva sredstva za odmašćivanje. Kod sučeljenih spojeva važno je da površine budu glatke i strojno obrađene u većini slučajeva.

[3]

## 5.6. Zavarljivost materijala

Zavarljivost je jako važan pojam u zavarivačkoj tehnologiji, a odnosi se na osnovni i dodatni materijal. Također, odnosi se i na zavarivani proizvod ili strukturu, parametre, režim i postupak zavarivanja. Zavarljivost je vrlo složeno svojstvo koje nije jednostavno točno odrediti. Možemo ga definirati kao sposobnost materijala da se pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj, koji će svojstvima udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku primjene.

Za dobru zavarljivost potrebno je osigurati:

- zadovoljavajuću žilavost osnovnog materijala,
- kemijski sastav od kojeg neće doći do pojave krhkosti materijala nakon hlađenja,
- što manji postotak ugljika jer utječe na porast zakaljivosti, tvrdoće i krhkosti,
- čelik dobiven u Siemens – Martinovim pećima (velika čistoća čelika).

Zavarljivost može biti:

- Dobra, ako se može zavarivati bez posebnih predradnji i mjera opreza.
- Slaba, ako su potrebne specijalne predradnje i mjere opreza.
- Jako slaba, ako nije moguće izvesti ekonomski prihvatljivo zavarivanje.

[13]

Proučavanje zavarljivosti materijala uključuje:

- identifikaciju osnovnih problema zavarljivosti,
- definiranje kvalitete spoja,
- razvoj metoda za prepoznavanje grešaka,
- identifikaciju strukturnih mehaničkih i fraktografskih svojstava,
- definiranje i legalizacija kriterija prihvatljivosti.

U skladu s tim vrše se i istraživanja zavarljivosti materijala pri laserskom zavarivanju . Utvrđeno je da se skoro svi metalni materijali te neke vrste plastičnih masa mogu laserski zavarivati.

Najčešće korišteni konstrukcijski materijali su čelici. Oni dobro apsorbiraju laserku svjetlost te se mogu dobro zavarivati sa CO<sub>2</sub> i Nd:YAG laserima.

Kod laserskog zavarivanja mehaničke osobine zavara su bolje od mehaničkih osobina osnovnog materijala. Zatezna čvrstoća materijala zavara može biti i do dva puta veća od zatezne čvrstoće osnovnog materijala. Zavari imaju dobru i estetski zadovoljavajuću geometriju.

[3]

## 6. ZAKLJUČAK

Tehnika laserskog zavarivanja je jednostavna i točna, lako je prilagodljiva i nema direktan kontakt sa obratkom. Postiže se kvalitetan zavar, visoka fleksibilnost i produktivnost te jednostavna automatizacija i robotizacija procesa.

Zbog visoke gustoće snage kod laserskog zavarivanja postižu se velike brzine zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Brzina zavarivanja može biti i do 10 m/min, a unos topline na mjesto zavara i deformacija materijala je relativno mala što ga čini idealnim za zavarivanje tankostijenih i laganijih konstrukcija te komada obrađenih na mjeru.

Zbog velike brzine ohlađivanja, kod zavarivanja čelika, dolazi do velikog porasta tvrdoće u području zavarenog spoja. Bez obzira na jako očvrnuće u odnosu na osnovni materijal, to ne djeluje bezuvjetno negativno na mehanička svojstva zavara. To je posljedica uske zone utjecaja topline, malih dimenzija zavara i sitnozrnate mikrostrukture. Time se lasersko zavarivanje značajno razlikuje od konvencionalnih postupaka zavarivanja.

Iako se lasersko zavarivanje danas može upotrebljavati za skoro sve metale i neke plastične mase postoji još puno prostora za napredak. Povećanje saznanja o svojstvima spojeva zavarenih laserom predstavlja važan doprinos sveobuhvatnom kvalificiranju postupka laserskog zavarivanja za nove primjene u različitim područjima.

## 6. LITERATURA

- [1] <https://matrixworldhr.files.wordpress.com/2012/04/em-zrac48denje.jpg> pregledano 25.06.2015.
- [2] Ticijana Ban: *Lasери u znanosti i tehnologiji*, Institut za fiziku, Zagreb, 2008.
- [3] I. Karabegović; S. Pašić; D. Bajić. *Nove tehnologije u procesima zavarivanja (Razvoj i primjena)*, Mašinski fakultet Mostar, BIH, 2013.
- [4] Hrvoje Skenderović: *Lasери, fotonski snopovi*, Institut za fiziku, Zagreb, 1999.
- [5] Dejan Milošević: *OSNOVE LASERSKE FIZIKE*, Prirodno matematički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, 2012.
- [6] [https://www.google.hr/imghp?hl=hr&tab=wi&ei=tybqVYnJBYe\\_ywOtpywCQ&ved=0CA8Qqi4oAQ](https://www.google.hr/imghp?hl=hr&tab=wi&ei=tybqVYnJBYe_ywOtpywCQ&ved=0CA8Qqi4oAQ), pregledano 16.07.2015
- [7] L. Bistrič: *Fizika lasera 2. dio*, Element, Zagreb, 2001.
- [8] Branko Bauer: *Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje*, Zagreb, 2006.
- [9] L. Bistrič: *Fizika lasera 3. dio*, Element, Zagreb, 2001.
- [10] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser>, pregledano 31.07.2015.
- [11] <http://www.znanje.org/i/i22/02s/LASERI/plinski.htm>, pregledano 06.08.2015.
- [12] L. Bistrič: *Fizika lasera 4. dio*, Element, Zagreb, 2001.
- [13] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarljivost> pregledano 23.08.2015