

# Nekonvencionalna obrada materijala laserom

---

Živić, Josipa

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:137:856979>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-03**



Repository / Repozitorij:

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



Josipa Živić

Undergraduate thesis / Završni rad

2022.

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: University of

Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:137:035065>

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja:

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet



**Josipa Živić**

# **NEKONVENCIONALNA OBRADA MATERIJALA LASEROM**

Završni rad

Pula, svibanj 2022. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet

**Josipa Živić**

## **NEKONVENCIONALNA OBRADA MATERIJALA LASEROM**

Završni rad

**JMBAG:** 0303079769

**Studijski smjer:** Preddiplomski stručni studij proizvodnog strojarstva

**Predmet:** Alatni strojevi

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Strojarsvo

**Znanstvena grana:** Proizvodno strojarstvo

**Mentor:** pred. Sandi Buletić

Pula, svibanj 2022. godine

Sandi Buletić  
(Ime i prezime nastavnika)



Alatni strojevi  
(Predmet)

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

**Pristupnici Josipi Živić**

**MBS: 0303079769**

Studentici stručnog studija Tehničkog fakulteta, izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:

**NEKONVENCIONALNA OBRADA MATERIJALA LASEROM**

**Sadržaj zadatka:**

**Dati pregled lasera s posebnim naglaskom na obradu materijala. Objasniti princip rada lasera, parametre obrade te proizvodne tehnologije koje koriste laser. Usporediti sa konvencionalnim postupcima.**

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

(Ime i prezime studenta): **Josipa Živić**

(matični br.) : **0303079769**

(OIB): 06823041581

**Izvanredni student, proizvodno strojarstvo**  
(status, smjer)

**Datum:** 14.01.2022.

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



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisana Josipa Živić, kandidat za prvostupnika strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenju literaturu kao što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen 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

---

U Puli, rujan 2022.



## IZJAVA

o korištenju autorskog djela

Ja, Josipa Živić dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, ako nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „Nekonvencionalna obrada materijala laserom “ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, ako 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.

Potpis

---

U Puli, rujan 2022. godine

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
1.1. Hipoteza, predmet i problem istraživanja .....	1
1.2. Ciljevi istraživanja.....	1
1.3. Sadržaj i struktura rada .....	1
2. Općenito o laserima .....	2
2.1. Povijest lasera .....	3
2.2. Vrste lasera.....	5
2.2.1. Plinski laseri.....	6
2.2.2. Laseri s bojilima .....	7
2.2.3. Kemijski laseri.....	8
2.2.4. Laseri s parama metala .....	8
2.2.5. Laseri s čvrstom jezgrom .....	9
2.2.6. Poluvodički laseri .....	10
2.2.7. Nd laseri.....	11
2.2.8. <b>CO2</b> laser .....	12
2.2.9. Ostale vrste lasera .....	13
2.3. Postupak rezanja .....	14
2.3.1. Trostupanjski laser.....	15
2.3.2. Četverostupanjski laser.....	16
2.4. Parametri obrade .....	17
2.4.1. Parametri laserskog snopa .....	17
2.4.2. Parametri procesa .....	18
3. Prednosti i nedostaci .....	19
3.1. Prednosti korištenja lasera .....	19
3.2. Nedostaci .....	21
4. Usporedba rezanja metala plazmom s laserskim rezanjem.....	23
4.1. Plazma .....	23
4.1.1. Vrste rezanja plazmom .....	24
4.1.2. Postupci rezanja plazmom.....	24
4.1.3. Plinovi koji se koriste za rezanje plazmom .....	25
4.1.4. Sekundarni plinovi .....	26
4.1.5. Prednosti i nedostaci .....	28
4.2. Lasersko rezanje naspram plazma rezanja .....	28
4.2.1. Razlika u primjeni .....	29



4.2.2. Čimbenici koje treba uzeti u obzir prilikom biranja između rezanja plazmom i laserom.....	30
4.2.3. Eksperimentalni dio usporedbe rada lasera i plazme .....	31
5. Zaključak .....	34
6. Literatura .....	35

### **Popis slika:**

Slika 1. Theodore H. Maiman.....	4
Slika 2. Unutrašnjost lasera.....	4
Slika 3. Shema lasera.....	5
Slika 4. He-Ne laser.....	6
Slika 5. Spektar elektromagnetskog zračenja i područje valnih duljina vidljivog.....	9
Slika 6. Rubinski laser .....	10
Slika 7. Shematski prikaz Nd:YAG lasera.....	11
Slika 8. CO <sub>2</sub> laser.....	13
Slika 9. Proces nastajanja laserskog zračenja.....	14
Slika 10. Trostupanjski laser.....	16
Slika 11. Četverostupanjski laser.....	16
Slika 12. Mlaznica laserskog stroja.....	19
Slika 13. Preneseni i nepreneseni plazmeni luk rezanja.....	24
Slika 14. Laserski stroj INTELASER-3015.....	31
Slika 15. Pločica plazme ESAB.....	32
Slika 16. Plazma stroj ESAB TXB 10200.....	33
Slika 17. Izrezak iz troškovnika za plazma rezač.....	33

### **Popis tablica:**

Tablica 1. Prikaz ocjena za pojedine plazma rezove na određenim materijalima....	27
Tablica 2. Usporedba laserskog i plazma rezanja.....	29

# **1. Uvod**

## **1.1. Hipoteza, predmet i problem istraživanja**

Osnovna hipoteza rada je da je lasersko rezanje efikasnije, brže i zahtjeva manja ulaganja tokom korištenja uređaja, od plazma rezanja.

Predmet istraživanja rada je prikupljanje podataka kojim prikazujemo koji uređaj je efikasniji, kojim uređajem je lakše upravljati, koji od njih ima veći izbor materijala za rezanje. Laserski rezač može izvoditi rezanje, bušenje, graviranje, zavarivanje, dok plazma rezač samo rezanje metala. Razne operacije koje izvodi laserski rezač je velika prednost, dok je manji raspon debljina metala koji reže, velika mana. Problem istraživanja su ograničenja kod oba uređaja, jer svaki od njih može obrađivati određene materijale na određene načine.

## **1.2. Ciljevi istraživanja**

Ciljevi rada su opisati princip rada lasera i njegovu strukturu. Opisati postupke rezanja laserom, predstaviti prednosti i nedostatke. U eksperimentalnom dijelu opisati plazma rezanje, način rezanja plazmom koji je jedan od konvencionalnih postupaka s kojim uspoređujemo lasersko rezanje na brodskom limu debljine 10 mm. Predstavljanje prikupljenih podataka. Dobivene su jako dobre klase reza i plazmom i laserom. Uzorci izrezani plazmom uglavnom postižu drugu klasu hrapavosti i tolerancije okomitosti ili kutnosti, dok uzorci izrezani laserom postižu prvu klasu kvalitete reza.

## **1.3. Sadržaj i struktura rada**

Rad se sadrži od uvoda koji opisuje hipotezu, predmet istraživanja, ciljeve rada. Opće informacije o laserima, povijest lasera, vrste lasera i postupak rezanja prikazani su u drugom poglavlju. Treće poglavlje opisuje prednosti i nedostatke korištenja lasera. Vrste plazma rezanja i eksperimentalni dio su predstavljeni su u četvrtom dijelu završnog rada. U petom dijelu dati će se zaključak koji će prikazati ostvarene rezultate i u kojemu će biti dan kritički osvrt na postavljenu hipotezu i ciljeve.

## 2. Općenito o laserima

Naziv laser dolazi od skraćenice engleskih riječi:

**Light** (svjetlo),

**Amplification** (pojačanje),

**Stimulation** (stimuliranje),

**Emission of** (odašiljanje),

**Radiation** (zračenje).

U strojarstvu lasere najčešće susrećemo na području rezanja, bušenja, zavarivanja, itd., dok u svakodnevnom životu koristimo u laserskim miševima, skenerima bar kodova, itd.

Obrada laserom ovisi o količini skinutog materijala u jedinici vremena te o području primjene, također može ovisiti i o vrsti i dimenzijama materijala obratka, karakteristikama intenziteta laserske zrake u fokusu, geometrijskim veličinama laserske zrake, brzini pomoćnog kretanja, vrsti i pritisku pomoćnog plina, itd. Obrada materijala ovisi o fizičkim karakteristikama (koeficijentu temperaturne provodljivosti, specifičnom toplinskom kapacitetu, temperaturi topljenja, koeficijentu refleksije i dr.), te i o raznim drugim svojstvima materijala.

Laser može obrađivati sve materijale, ali ne podjednako efikasno. Postoje tri osnovna načina rezanja laserom koji se upotrebljavaju za rezanje metala, ali i drugih materijala:

- Lasersko rezanje taljenjem - se koristi za rezanje nekih neoksidirajućih materijala ili aktivnih metala kao što su nehrđajući čelik, titan, aluminij i njegove legure
- Lasersko rezanje kisikom – koristi se za lako oksidirane metalne materijale kao što su ugljični čelik, titanov čelik i toplinski obrađen čelik
- Lasersko rezanje isparavanjem – koristi se za rezanje vrlo tankih metalnih materijala i nemetalnih materijala (kao što su papir, tkanina, drvo, plastika i guma, itd.)

Zahvaljujući visokoj reznoj preciznosti laserskog snopa i čistoći pomoćnog plina koji se koristi, dobiveni rezovi su čisti, glatki, sjajni i geometrijski točni.

Ulaganje u nove tehnologije i primjena istih veoma je bitna za opstanak poduzeća na tržištu jer omogućava bržu proizvodnju i bolju kvalitetu proizvoda, a time i samu konkurentnost na tržištu. Jedan od nedostataka rezanja laserom su visoki investicijski troškovi, koji se mogu nadoknaditi bržom proizvodnjom i visokom kvalitetom radnog komada i visokom kvalitetom rezne površine što nam štedi sredstva koja bi morali uložiti u dodatnu obradu komada.

## **2.1. Povijest lasera**

„Malo je poznato da je Nikola Tesla 1893.g. konstruirao uređaj koji se sastojao od rubina na koji je usmjeravao električnu energiju, a ona se reflektirala od električne plohe natrag u rubin. Na taj način dobio je "svjetlosnu zraku tanku poput olovke". Očito, taj je uređaj bio napravio na načelu današnjeg lasera i Tesla je vjerojatno dobio laserski snop svjetlosti. „

Izvor: Knjiga "Nikola Tesla Istraživač, Izumitelj i Genij",

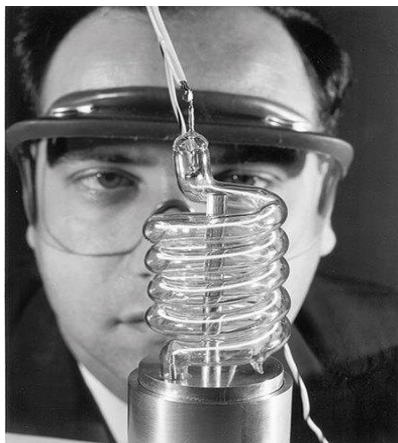
Autori: Rudež, Muljebić, Petković, Paar, Androić

1917. godine Albert Einstein u svom radu „On the Quantum Theory of Radiation“ predvidio je izum lasera i njegove preteče MASER-a (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), te dao teorijski koncept. Maser uređaj koji radi na isti princip kao i laser, ali na drugom frekvencijskom području. Laser je izvor elektromagnetskih valova u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra, dok je maser izvor mikrovalova.

Induciranu stimuliranu emisiju predvidio je u svojim radovima već 1917. A. Einstein. Takvu emisiju u vidljivom području teorijski su obradili A. L. Schawlow, C. H. Townes i A. M. Prohorov 1958.

1960. godine napravljen je prvi laser koji je emitirao svjetlost valne duljine 694 nm u pulsnom režimu, a lasersku emisiju postigao je stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom. Theodore H. Maiman zaposlen na Huges Research Laboratorije Malibu, California je pomoću bljeskalice obasjavao crveni kristal rubina, čije plohe su bile posrebrene i čime je izazvao lasersku emisiju u crvenom dijelu spektra na 694 nm.

Slika 1. prikazuje Theodore H. Maiman kako pomoću bljeskalice obasjavao crveni kristal rubina.

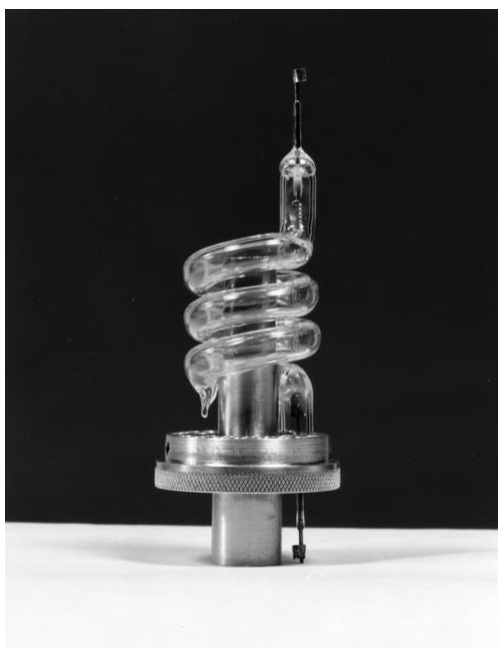


Slika 1. Theodore H. Maiman

Izvor: [https://ethw.org/Theodore\\_Maiman\\_and\\_the\\_Laser](https://ethw.org/Theodore_Maiman_and_the_Laser)

Da bi došlo do stvaranja laserske emisije potrebna su osnovna tri elementa: aktivni medij (rubinski kristal), rezonatorsku šupljinu s dva rubna zrcala (posrebrene plohe kristala) u kojoj se odvija laserska emisija i lasersku pumpu (bljeskalica) koja daje energiju koja pokreće sam laserski efekt. T. Mauman je objedinio sve potrebne komponente u svom uređaju.

Na slici 2. prikazana je unutrašnjost lasera.



Slika 2. Unutrašnjost lasera

Izvor: <https://repository.aip.org/islandora/object/nbla%3A288497>

Laseri kao tehnologija razvijaju se do danas i to u različite svrhe te nalaze primjenu u mnogim djelatnostima kao što su medicina, telekomunikacije, meteorologija, astronomija, građevinarstvo, vojna industrija te druge grane industrije.

## 2.2. Vrste lasera

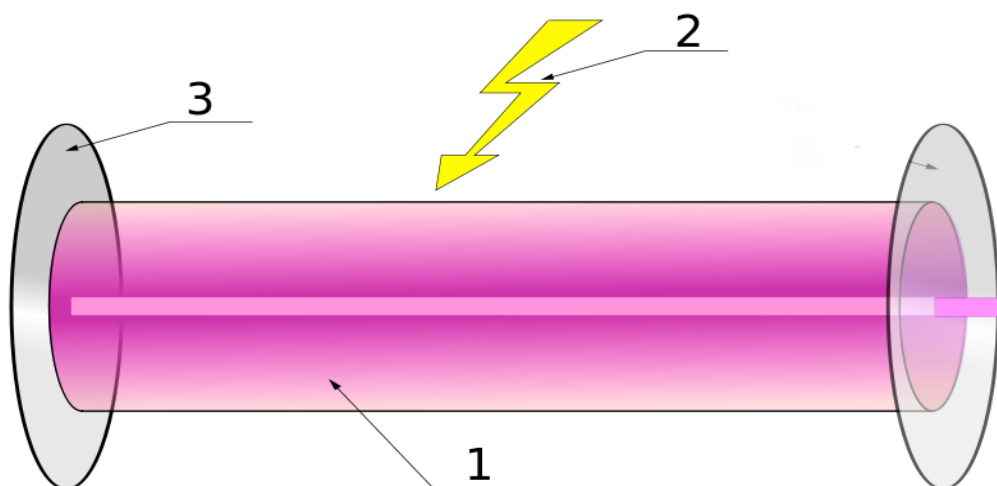
"Laser" označava pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Drugim riječima, laser proizvodi svjetlost stimulirajući oslobađanje fotona, odnosno svjetlosnih čestica. Za to su laseru potrebna tri osnovna dijela:

Laserski medij [1]: izvor atoma koji se pobuđuju i emitiraju svjetlost određene valne duljine. Medij može biti plinoviti, tekući ili kruti.

Izvor energije [2]: prima ili pumpa atome u mediju lasera u pobuđeno stanje.

Ogledala [3]: puno ogledalo i polu posrebrano ogledalo. Zrcala dopuštaju emitiranu svjetlost da se odbija naprijed-nazad unutar šupljine laserskog medija i na kraju da pobjegne prema van.

Na slici 3. prikazana je unutrašnjost lasera.



Slika 3. Shema lasera

Izvor: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Laser.svg>

Sav proces je o pohranjivanju i oslobađanju energije. Izvor energije ubrizgava energiju u medij lasera. Energija pobuđuje elektrone, koji se kreću na više razine

energije. Kada se elektroni opuštaju, emitiraju fotone. Fotoni se kreću naprijed-natrag između zrcala, pobuđujući druge elektrone dok se kreću. To proizvodi snažno, fokusirano svjetlo.

**Laserska pumpa** je dio sustava koji osigurava energiju za rad lasera. Reakcija koju ima može biti električno pražnjenje naboja, bljeskalica, svjetlo s drugog lasera, elektrolučna svjetiljka, kemijska reakcija ili eksplozivno sredstvo. Uz lasersku pumpu, laserski medij je jedno od osnovnih dijelova lasera, ono određuje na kojoj će valnoj duljini raditi laser, te određuje svojstva lasera. Aktivna sredina u mediju može biti u tekućem, plinovitom i čvrstom stanju.

**Rezonantna šupljina** predstavlja dva paralelno postavljena zrcala. Fotoni koji nastaju spontanom emisijom u laserskom mediju emitiraju se u svim smjerovima, ali samo oni koji su emitirani u smjeru zrcala će se reflektirati između ta dva zrcala i biti zarobljeni u laserskoj šupljini. Neke vrste lasera:

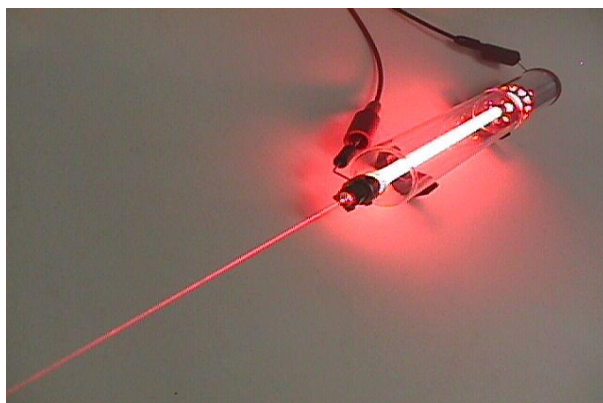
### 2.2.1. Plinski laseri

Plinski laseri se dodatno mogu podijeliti na ionske, atomske, kemijske i molekularne. Kao što im i samo ime kaže, plinskim laserima radni medije je u plinovitom stanju te pod određenim tlakom i smješten je u laserskoj cijevi. Električnim pražnjenjem kroz plin u cijevi ostvaruje se pobuđivanje atoma.

Najzastupljeniji u ovoj skupini su  $CO_2$  laser, He-Ne (helij-neon) laser i argon laser.

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

Na slici 4. prikazan je He-Ne laser.



## Slika 4. He-Ne laser

Izvor: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HeNe\\_Laser\\_Levels.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HeNe_Laser_Levels.svg)

U pravilu mnogi od ovih plinskih lasera koriste se u svakodnevnom životu. Nalazimo ih u industriji, prvenstveno metalurgiji, u medicini, gdje se koriste pri operativnim zahvatima. Prednosti naspram ostalih tipova lasera su relativno jednostavne izvedbe, netoksičnost laserskog medija i isplativost. Uporaba je različita, neki nemaju gotovo nikakvu primjenu, neki se koriste u istraživanjima, dok se neki koriste u medicini.

### 2.2.2. Laseri s bojilima

Bojila su najsvestranija i jedna od najuspješnijih laserskih izvora danas, poznata su zbog svog značajnog doprinosa fizici, kemiji, biologiji i drugim poljima. Prva laserska boja objavljena je 1966. Razvijeno je nekoliko različitih vrsta anorganskih lasera koji emitiraju u ultraljubičastom, vidljivom ili infracrvenom području elektromagnetskog polja.

Iako su anorganski laseri jeftiniji i robusniji uređaji, imaju neke nedostatke.

U laseru za boje, organske boje se koriste kao aktivni medij. Organske boje su obojene tvari koje imaju sposobnost davanja boje tekućinama, krutinama i plinovima. Primjeri molekula organske boje su rodamin 6G, kumarin, oksazin, antracen, itd. Iako su molekule organske boje vrlo velike, samo je mali dio molekule koji se sastoji od izmjenične strukture jednostruke i dvostruke veze ugljika s ugljikom (zvan kromofor) koristi kao aktivni ili laserski medij u laseru. Laserske boje otapaju se u otapalima kao što su voda, benzen, metanol, toluen, aceton, itd. Omjer molekule organske boje prema otapalu je oko 1:10000 ili više, tako da je svaka molekula boje okružena molekulama otapala.

Većina lasera radi uz pomoć nekog oblika fluorescencije. Molekulu pumpate u pobuđeni stanje fotonima (ili neka od drugih metoda) i molekula gubi dio energije kroz fonone ili dugovalne fotone. Ali na kraju se može stimulirati foton nešto veće valne duljine od fotona pumpe. Laser za bojenje koristi molekule koje imaju toliko mogućnosti rotacije, vibracije i elektroničkog prijelaza da postoji kontinuum valnih duljina koje mogu izaći, u rasponu od oko 100 nanometara. To znači da se laser za



bojenje može podesiti na određenu željenu valnu duljinu pomoću rešetke, prizme i optički etalona.

Laseri s bojama imaju nisko pojačanje i vrlo kratke vremenske konstante. Kao rezultat toga, Q-switching ne radi tako dobro kao u drugim laserima. Mnoge primjene za lasere s bojom sada su ispunjene optičkim parametarskim oscilatorima i Ramanovim raspršenjem, koji kroz nelinearnu optiku mogu učinkovitije i s manje nereda proizvesti podesive valne duljine.

### **2.2.3. Kemijski laseri**

Kemijski laseri, umjesto da pumpaju pojačani medij s drugim fotonima, pumpaju pojačani medij kemijskom reakcijom između dva ili više reaktanata. Imaju puno prednosti u performansama u odnosu na lasere s električnim pumpanjem, ali budući da se neobične kemikalije koriste i pretvaraju u druge kemikalije, ovo nije baš obnovljiva metoda izrade laserske zrake. Sposobni su postići velike snage u kontinuiranom radu. Koriste se u industriji za bušenje i rezanje. Razvijeno je nekoliko vrsta kemijskih lasera:

- HF laser (vodik - fluorid laser),
- DF laser (deuterij - fluorid laser),
- COIL laser (kemijski kisik-jod laser),
- Agil laser (sve plinske faze joda).

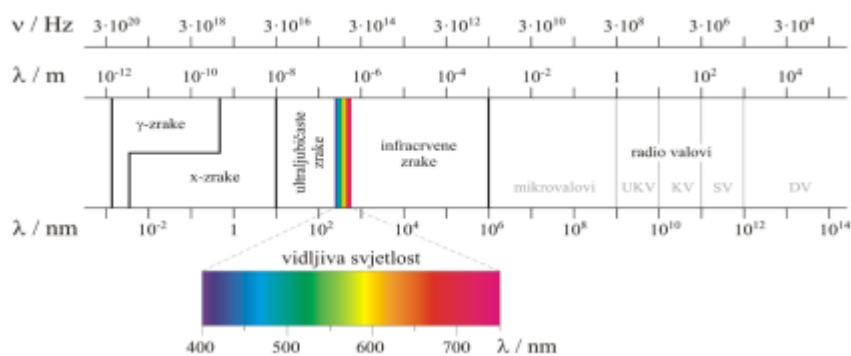
### **2.2.4. Laseri s parama metala**

Laseri na metalnu paru su vrsta plinskih lasera koji koriste metalnu paru kao medij za pojačanje lasera. Točnije, laserski aktivni agensi su atomi metala, ili ponekad metalni ioni. Metalnu paru često sadrži kvarcna cijev koja na krajevima ima elektrode, laserska zrcala i optičke prozore.

Za razliku od drugih plinskih lasera, njihov medij za pojačanje nije spreman za rad na sobnoj temperaturi, potrebno je stvoriti znatno povišene temperature isparavanjem korištenog metala, ili ponekad metalnog spoja. Isparavanjem se obično postiže intenzivnim lučnim pražnjenjem. Ponekad se primjenjuju dva strujna impulsa, pri čemu prvi stvara metalnu paru, a drugi jače pobuđuje atome metala tako da laserski rad postaje moguć. U nekim slučajevima, pobuđena energija pobuđenog plemenitog plina (npr. helij u metastabilnom stanju) prenosi se na metalnu paru.

Dostupne valne duljine emisije lasera na metalnu paru kreću se od infracrvenih do ultraljubičastih. Neki laseri na pare metala, posebno pare alkalnih metala, se optički pumpaju.

Na slici 5. prikazan je spektar elektromagnetskog zračenja i područje valnih duljina vidljivog.



Slika 5. Spektar elektromagnetskog zračenja i područje valnih duljina vidljivog

Izvor: [https://www.periodni.com/gallery/spektar\\_elektromagnetskog\\_zracenja.png](https://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png)

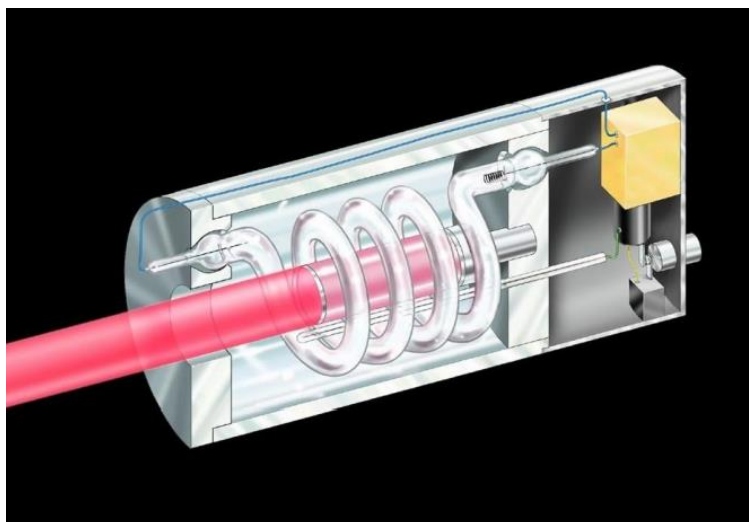
Kadmij, živa, selenij, srebrno, bakar i zlato su često korišteni metali. Ponegdje se dodaje helij kao pufer. Manje su zastupljeni zbog visoke toksičnosti nekih metala.

### 2.2.5. Laseri s čvrstom jezgrom

Rubinski laser (prvi napravljeni laser) jedan je od dvadesetak vrsta laserskog čvrstog stanja. Kao aktivni medij koristi se kristalni štapić sintetskog rubina.  $Al_2O_3$  s atomima kroma u obliku  $Cr^{3+}$ , čine aluminijev oksid odnosno rubin. Za pobuđivanje laserskog medija koriste se plinske lampe punjene ksenonom. Prvi rubinski laser je imao ksenonsku bljeskalicu u obliku spirale, omotane oko štapića rubina.

Karakterizira ih velika raznolikost i u ovu se skupinu može svrstati najveći broj lasera. Kao vanjski izvor ne koristi se električna energija ili toplina, već su većinom „pokrenuti“ svjetlošću. Ta svjetlost je iz izvora laserskih dioda ili nekih lampi, ovisno o laserskom mediju.

Slika 6. prikazuje rubinski laser, jedan od lasera s čvrstom jezgrom.



Slika 6, Rubinski laser

Izvor: <http://www.daenotes.com/electronics/microwave-radar/ruby-lazer>

### 2.2.6. Poluvodički laseri

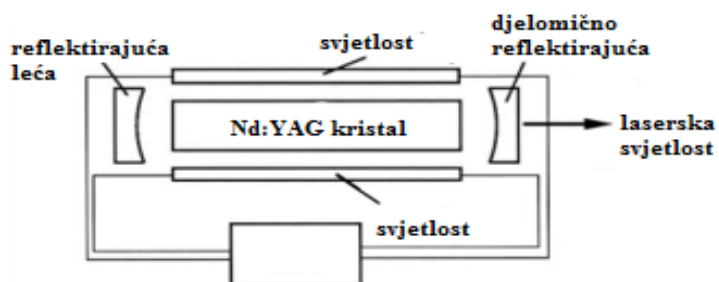
Poluvodički ili diodni laser je mali kristal proizveden sa jako velikom točnošću i podijeljen u dva osnovna područja, od kojih svaki ima svoja električna svojstva. Na n-strani poluvodiča nalazi se višak elektrona i taj višak predstavlja nosioce struje, dok se na p-strani nalazi višak šupljina koji predstavlja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

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

### 2.2.7. Nd laseri

Nd:YAG je akronim za itrij-aluminij-granat (YAG-  $Y_3Al_5O_{12}$ ). Atomi neodimija su slične veličine kao i atomi itrija, Nd:YAG je četverostupanjski laser, koji emitira infracrveno zračenje valne duljine 1064 nm. Može se prilagoditi i valnim duljinama 940, 1120, 1320, i 1440 nm. Nd:YAG na valnim duljinama 730-760 nm i 790-820 nm, za pobuđivanje koristi kriptonska bljeskalica, za razliku od ostalih lasera, gdje se koriste ksenonska bljeskalica, koja daje više svjetlosti.

Na slici 7. vidljiv je Shematski prikaz Nd:YAG lasera.



Slika 7. Shematski prikaz Nd:YAG lasera

Izvor: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level1/ch05/html/Image437.jpg>

Osim za obrade metala i rezanje, Nd:YAG se jako često koristi za kozmetičku energiju jer ima svojstvo maksimalne apsorpcije energije od strane cilja (kose ili lezije) uz minimalnu apsorpciju okolnih struktura kože. Konvencionalni fiberoptički snopovi lako se prenose. Nd:YAG lasersko zračenje je velike snage, primjenjuje se u kontinuiranom ili impulsnom načinu rada. Tamno tkivo lakše apsorbira zračenje. Plava ili crna pigmentacija pospješuje apsorpciju, dok blijede boje pospješuju njegovu penetraciju. 61,62 Nd:YAG zračenje prodire u tkiva do dubine od 2 do 6 mm i osigurava dobru homeostazu za krvne žile promjera do 0,5 cm. Međutim, dubina prodiranja je manja od one  $CO_2$  lasera. Gustoća snage ispod površine tkiva ovisi o boji površine, što otežava prodiranje zrake kod Nd:YAG lasera, više nego kod  $CO_2$  lasera. Nd laser radi na istom principu kao i Nd:YAG laser, a razlika u karakteristikama potiče od razlika u strukturi aktivne sredine.

Prednost lasera je u tome što se zračenje može prenositi kroz snopove optičkih vlakana, koji generiraju slobodno pokrenuti impulsni snop energije. Ovaj pulsirajući

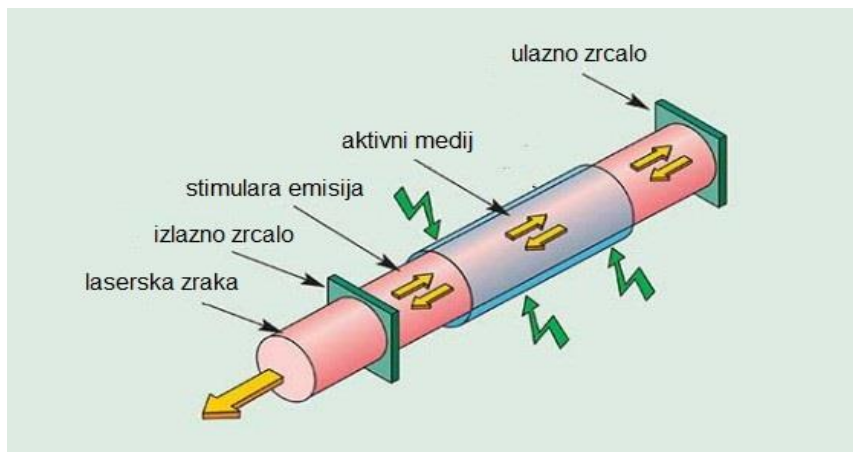
mehanizam je sofisticiraniji, a potencijal za prodiranje topline je veći nego kod diodnog lasera. Valna duljina od 1064 nm slabo se apsorbira u vodi, ali se lako apsorbira u pigmente tkiva kao što su hemoglobin i melanin. Nd:YAG laser učinkovit je u stvaranju koagulacije i hemostaze, ali zbog dubine prodiranja do 4 mm ima najveći potencijal za oštećenje mekih i tvrdih tkiva, kao i površine implantanata. Energija se isporučuje kroz karbonizirani vrh od vlakana, kao kod diodnog lasera te je maksimalna vršna snaga koju emitira Nd:YAG mnogo veća nego za diodu i stoga može prodrijeti u karbonizirane krhotine na vrhu lasera.

### **2.2.8. $CO_2$ laser**

$CO_2$  laser je jedan od najranijih plinskih lasera. Razvio ga je C. Kumar N. Patel 1964., i danas je jedan od najkorisnijih lasera. S velikom snagom  $CO_2$  laseri se mogu koristiti za aplikacije koje zahtijevaju preciznost, masovnu proizvodnju i što je najvažnije, personalizaciju.  $CO_2$  laserski graveri i rezači vrlo su precizni i mogu se koristiti za izradu dizajna, ukrasa i slično na gotovo bilo kojem materijalu, uključujući drvo, plastiku, metal i papir.

U  $CO_2$  laserskom rezaču svjetlo se proizvodi kada struja prolazi kroz cijev napunjenom plinom sa zrcalima na oba kraja. Jedno ogledalo je potpuno reflektirajuće, dok drugo propušta svjetlost. Ova zrcala usmjeravaju lasersku zraku u materijal koji treba rezati. Plin je najčešće mješavina ugljičnog dioksida, dušika, vodika i helija. Svaka svjetlost koju proizvede  $CO_2$  laser iznimno je moćna u usporedbi s normalnom svjetlošću. To je zbog zrcala koja zatvaraju cijev za plinove. Ova zrcala reflektiraju većinu svjetlosti koja putuje kroz cijev i uzrokuje povećanje intenziteta svjetlosnih valova. Svjetlost prolazi kroz djelomično reflektirajuće zrcalo samo kada postane dovoljno svjetlo. Budući da je svjetlost lasera infracrvena, ljudskom oku je nevidljiva. Također ima vrlo dugu valnu duljinu. Može rezati razne materijale, uključujući tkaninu, drvo, metal, staklo i papir. Intenzivna toplina ovog svjetla isparava materijal koji će se rezati, ostavljajući točnu, glatku završnu obradu. Ovisno o izgledu koji želite na svom materijalu ili na materijalu koji režete, gravirate, postavke brzine i snage mogu se smanjiti i povećati.

Na slici 8. prikazan je  $CO_2$  laser.



Slika 8.  $CO_2$  laser

Izvor: [https://www.photonics.com/Articles/COSUB2 SUB Lasers\\_The Industrial Workhorse/a25155](https://www.photonics.com/Articles/COSUB2_SUB_Lasers_The_Industrial_Workhorse/a25155)

$CO_2$  laserski rezači pružaju jedan od najpovoljnijih oblika rezanja dostupnih danas. Kada trebate nešto precizno izrezati ili dodati visoko detaljne umjetničke radove na različite podloge, razmislite o korištenju stroja za lasersko rezanje.

Kod rezanja laserom koriste se tri vrste lasera. Nd laseri i Nd:YAG laseri su slični, a razlikuju se po primjeni. Nd:YAG laser se koristi za velike snage kod bušenja i graviranja, s velikim brojem ponavljanja. Nd laser se koristi za bušenje, gdje je potrebna velika snaga, ali s malo ponavljanja. Svi ovi laseri se mogu koristiti kod zavarivanja.  $CO_2$  laser pogodan je za rezanje, graviranje i bušenje.

### 2.2.9. Ostale vrste lasera

U ostale vrste lasera ubrajamo:

- Nuklearano pumpan laser – radna duljina vala je kao i kod plinskih lasera, laserska pumpa je nuklearna fisija, primjenjuje se u istraživanjima.
- Raman laser – 1000-2000 nm valne duljine za verziju s vlaknom, kao lasersku pumpu uglavnom je Yb-staklo laser, pokriva kompletnu primjenu 1000-2000 nm.
- „Nikal“-samarij laser - X zrake sa 7,3 nm-skom valnom duljinom, vruća samarijeva plazma stvorena s „vulkan“ laserom je pumpa, primijenjen je prvi pokus s efikasno zasićenom operacijom na sub-10 nm X-zrake.
- Plinsko dinamički laser - radnu duljinu sačinjava nekoliko linija oko 10500 nm; ostale frekvencije moguće s drugim mješavinama plinova. Laserska pumpa je

adijabatska ekspanzija mješavine dušika i ugljičnog dioksida, koristi se u vojne svrhe.

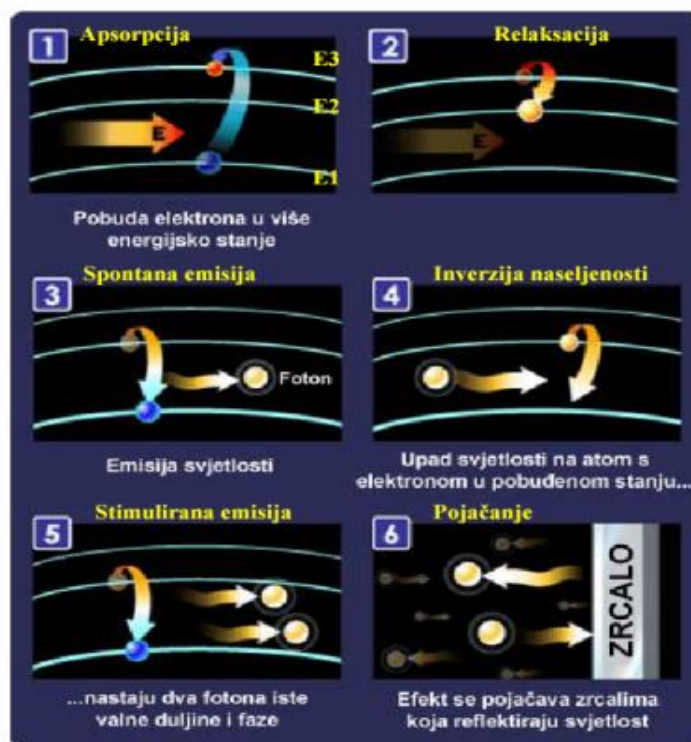
- Laseri sa slobodnim elektronima – širokopolasni raspon valnih dužina (0.1 nm-nekoliko mm), lasersku pumpu čini relativna elektronska zraka. Primjena u medicini, istraživanju zemljine atmosfere, znanost o materijalima.

### 2.3. Postupak rezanja

Da bismo razumjeli kako radi laser prvo moramo ukratko proučiti atome, molekule i kvantnu mehaniku. Atomi izgrađuju sve tvari oko nas, a sastoje se od jezgre (protoni i neutroni) i elektronskog omotača (elektroni). Kako se atomi neprestano gibaju (vibriraju, rotiraju i sl.) oni mogu biti u različitim stupnjevima pobuđenosti koje su izazvale različite energije (svjetlosna, električna, toplinska).

Svaka orbitala može primiti najviše dva elektrona i karakterizirana je određenom energijom. Prilikom prelaska elektrona iz orbitale veće energije,  $E_2$ , u orbitalu manje energije,  $E_1$ , dolazi emisije zračenja, odnosno emisije fotona čija je energija jednaka  $E_2 - E_1$ . S druge strane, elektron može prijeći iz orbitale manje energije u orbitalu veće energije jedino ako pri tome apsorbira jedan kvant (paketa) zračenja ili foton.

Na slici 9. prikazan je proces nastajanja laserskog zračenja.



Slika 9. Proces nastajanja laserskog zračenja

Izvor: [http://eskola.hfd.hr/clanci/50\\_godina\\_lasera\\_Natasa\\_Vujcic.pdf](http://eskola.hfd.hr/clanci/50_godina_lasera_Natasa_Vujcic.pdf)

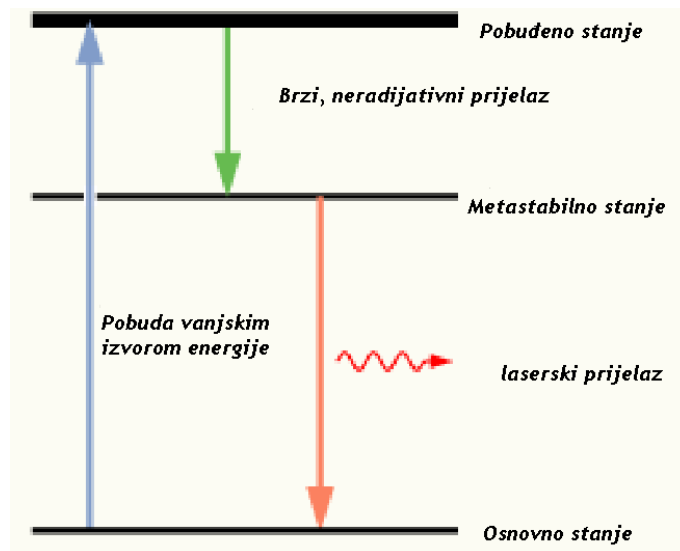
Jednostavan prikaz (Slika 9.) će olakšati razumijevanje laserskog efekta. Da bi atomi mogli iz osnovnog stanja prijeći u pobuđeno stanje, moraju apsorbirati energiju (Slika 9-1). Jednom kada atom zaposjedne pobuđeno stanje, on se nastoji relaksirati u njemu energetski povoljnija niža energetska stanja (Slika 9-2), pri čemu emitira kvant elektromagnetskog zračenja- foton (Slika 9-3). Ukoliko na atom u pobuđenom stanju naiđe foton čija energija odgovara energetskej razlici pobuđenog i osnovnog stanja (Slika 9-4), atom se relaksira u osnovno stanje, ali pri tome zrači foton koji ima istu valnu duljinu (istu frekvenciju) i istu fazu kao i upadni foton (Slika 9-5). Ovaj proces se lavinski nastavlja kroz medij, pri čemu zrcalo visoke refleksivnosti vraća gotovo sve koherentne fotone natrag u medij (Slika 9-6) pa govorimo o pojačanju svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja.

### **2.3.1. Trostupanjski laser**

Na početku se većina atoma nalazi u osnovnom stanju energije (E1). Potom se događa pobuda zbog koje atomi prelaze iz osnovnog stanja (E1) u pobuđeno stanje, odnosno na višu energetske razinu (E3). Tamo se atomi zadržavaju od prilike  $10^{-8}$  s i zatim prelaze (bez zračenja) na razinu (E2) koja je metastabilna. Većina atoma ostaje u tome stanju jer je vrijeme života metastabilne razine relativno dugo ( $10^{-3}$  s). Kada se postigne dovoljno snažna pobuda da nakon nekog vremena više od 50% atoma bude u metastabilnoj razini (E2) tada se kaže da je postignuta inverzija napučenosti razine E2 i razine E1. Kada se događa prijelaz sa razine E2 na E1 nastaje laserska svjetlost (slika 5). Nedostatak ovog sustava je taj što donja razina laserskog prijelaza nije prazna, a to se rješava povećanjem broja energetskih razina na četiri razine.

Slika 10. Prikazuje sustav s tri razine.



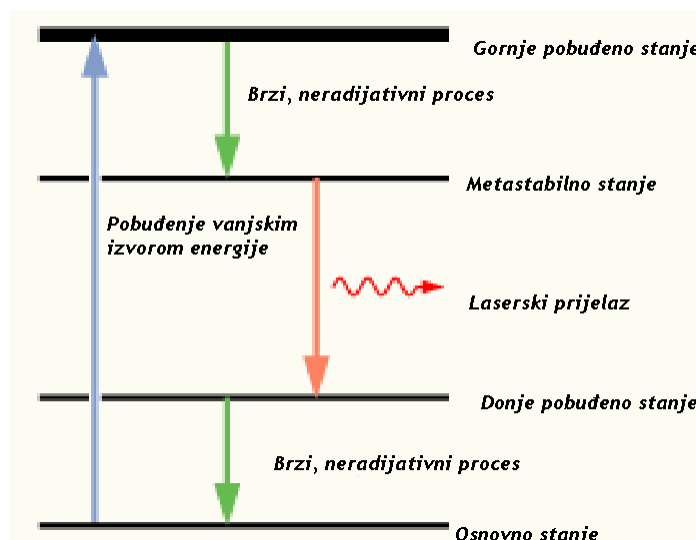


Slika 10. Trostupanjski laser

Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Trostupanjski\\_laser.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Trostupanjski_laser.png)

### 2.3.2. Četverostupanjski laser

Kao što se vidi na slici 11. sustav s četiri razine ima iznad osnovnog stanja (E1) dodatni energetski nivo (E2). Između razina E3 i E2 postiže se inverzija napučenosti. Kako bi se olakšalo održavanje inverzije napučenosti dodatni energetski nivo E2 mora imati kratko vrijeme života, odnosno donji energetski nivo laserskog prijelaza mora se vrlo brzo prazniti. Zbog toga u sustavu s četiri energetske razine nisu potrebne toliko velike snage pumpanja kao kod sustava s tri energetske razine. Ovakav princip se primjenjuje kod lasera koji rade u kontinuiranom radu jer je lasersko djelovanje moguće i kada se većina atoma nalazi u osnovnom stanju (E1).



Slika 11. Četverostupanjski laser

Izvor:[https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Cetverostupanjski\\_laser.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Cetverostupanjski_laser.png)

## 2.4. Parametri obrade

Kvaliteta rezanja laserom uvelike ovisi o parametrima kako lasera koji se upotrebljava za rezanje, tako i materijala koji se reže. Ključni parametri za kvalitetnu obradu laserom:

Parametri laserskog snopa

Parametri procesa

Parametri materijala

### 2.4.1. Parametri laserskog snopa

Potrebno je zadovoljiti sve parametre kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta laserskog reza. Polarizacija zrake, kvaliteta laserske zrake, intenzitet i snaga, spadaju u parametre laserskog snopa prilikom rezanja laserom, a ubrajamo još i valnu duljinu zrake.

Polarizacija laserske zrake je posebno važan parametar za  $CO_2$  lasersko rezanje. Prilikom laserskog rezanja polarizacija može biti slučajna, eliptična, kružna ili linearna. Osim valne duljine, refleksija tijekom rezanja ovisi i o polarizaciji zrake, odnosno optičkim svojstvima metala koji se reže.

Kvaliteta laserske zrake ovisi o raspodjeli energije snopa po poprečnom presjeku metala koji se reže. Visokokvalitetna laserska zraka je ona koja cilja na mala područja i osigurava visoke temperature grijanja pri velikim brzinama rezanja.

Snaga laserske zrake odnosi se na ukupnu energiju koju emitira laserska zraka do mjesta rezanja u sekundi. Intenzitet i snaga mogu utjecati na brzinu rezanja ni uzrokovati nepotrebno zagrijavanje metala koji se reže.

Na refleksiju prilikom rezanja utječe valna duljina laserske zrake. Zbog mogućeg oštećenja glave lasera potrebno je izbjegavati refleksiju. Izgled refleksije ovisi o svojstvima metala koja mu omogućuju da apsorbira lasersku zraku.

#### **2.4.2. Parametri procesa**

Parametri procesa laserskog rezanja uključuju karakteristike čijom optimizaciju utječe na kvalitetu laserskog rezanja. Operater je zadužen za neke od procesa rezanja koji se mogu kontrolirati, dok se oni drugi ne mogu kontrolirati.

Vrsta laserske zrake je jedan od važnih parametara koji utječu na kvalitetu reza. Isti se intenzitet može postići kontinuiranim ili impulsnim zračenjem, no oblici laserske zrake imaju različite primjene. Pulsirajuća laserska zraka upotrebljava se za rezanje manjih komponenata za bolje rezove.

Prilikom laserskog rezanja žarišna duljina leće ovisi o materijalu koji se reže. Leće manje žarišne duljine upotrebljavaju se za rezanje tanjih materijala debljine do 4 mm. Leće većih žarišnih duljina koriste se kod metala čija žarišna duljina mora biti najmanje od polovica debljine materijala.

Brzina rezanja ovisi o energiji snopa usmjerene na metal i energije koja se koristi za izvođenje rezanja, kao i energiji koju metal apsorbira. Kako se brzina rezanja povećava, raste i učinkovitost laserskog rezanja metala i obrnuto. Kako bi se dobio najbolji omjer brzine i efektivnosti vrlo je važno optimizirati brzinu rezanja.

Plin ima više funkcija u procesu laserskog rezanja. Upotreba inertnog plina kao što je dušik potiskuje rastaljeni metal kao neizbježan proizvod rezanja. Dok korištenje kisika utječe na egzotermnu reakciju. Osim toga, korišteni plin podržava stvaranje zraka i hladi metal koji se reže.

Mlaznica dovodi plin do metala koji treba rezati. Dizajn mlaznice određuje oblik i kvalitetu reza. Veličine mlaznice se kreću od 0,8 mm do 3 mm, a udaljenost mlaznice od metala koji se reže utječe na izvedbu i kvalitetu reza.

Na slici 12. prikazana je mlaznica laserskog stroja.



Slika 12. Mlaznica laserskog stroja

Izvor: <https://www.laser-ing.hr/blog/najvazniji-parametri-kvalitete-rezanja-laserom/>

Krajnja kvaliteta laserskog reza ovisi o vrsti i o kvaliteti materijala koji se reže. Lasersko rezanje se upotrebljava za rezanje metala, ali i za druge različite materijale. Za rezanje metala zahtijeva upotrebu laserske zrake veće snage, dok rezanje ostalih materijala zahtijeva zrake manjih intenziteta.

Kvaliteta laserskog rezanja ovisi o vlastitim svojstvima materijala da provodi toplinsku energiju. Laserske zrake veće snage potrebne su kod rezanja metala koji nemaju dobra toplinska svojstva. Veliku pozornost treba pridati materijalima koji reflektiraju lasersku zraku, jer može doći do komplikacija prilikom procesa laserskog rezanja.

Slojevi boje koji se koriste protiv korozije, mogu dodatno otežati lasersko rezanje. Korozija i masna i onečišćena površina također mogu utjecati na kvalitetu reza.

### **3. Prednosti i nedostaci**

Razvojem tehnologije numeričkog upravljanja i poboljšavanjem glave laserskog reza, točnost rezanja povećala se na čak minimalnih 0,02 mm. Osim očitih prednosti povezanih s ovom vrstom obrade, postoje i nedostaci.

#### **3.1. Prednosti korištenja lasera**

Laserska obrada ima mnoge prednosti, a ima i nekoliko manjih nedostataka. Neke od prednosti uključuju i to što može rezati sve materijale i ne zahtijeva alate.

#### **Visoka točnost i preciznost**

Preciznost kojom laser reže materijale je visoka, a to je isporukom fokusiranog snopa svjetlosti. Laser je snažan i malen, ali preciznost s kojom topi i isparava materijale je neusporediva. U većini slučajeva, raspon tolerancije lasera je od 0,003 mm do 0,006 mm.

Razina tolerancije plazma rezača je oko 0,02 mm, što je više nego kod laserskog rezanja. Isto tako, drugi alati za rezanje imaju toleranciju od 1 do 3 mm i više. Pretpostavimo da postoji potreba za strojem visoke preciznosti i točnosti tijekom proizvodnih procesa. U tom slučaju, alat za odabir obično su laserski rezači. Stoga zrakoplovna industrija koja zahtijeva strogu razinu tolerancije koristi lasere za rezanje i obradu.

### **Niska cijena i pristupačnost**

Ekonomičnost laserske obrade u odnosu na druge strojeve istog kalibra, jedna je od prednosti laserske tehnologije. Nema potrebe za izradom prilagođenog alata s tehnologijom laserskog rezanja. Također nije potrebno modificirati uređaj za bilo koji projekt jer nisu potrebni dodatni alati za rezanje. Nema habanja površine jer nema fizičkog kontakta. Troškovi održavanja su manji od ostalih tehnologija obrade jer mehanički dijelova laserskog rezača nema puno. Trošak rada stroja također je manji u usporedbi s tradicionalnim alatima za proizvodnju.

### **Koristi se za visoko složene obrade**

Mnogi poslovi koji mogu biti previše složeni za druge tehnologije, jednostavni su za lasere. Laserska tehnologija može raditi na najtanjem rubu materijala. Iako područje obrade može doživjeti neznatno izobličenje ili iskrivljenje, mogu se brzo proizvesti složene geometrije pomoću laserskog rezača. Razina tolerancije laserskog rezanja je široka i može primiti veliki broj materijala.

### **Veća iskorištenost materijala uz manje otpada**

Korištenjem laserskog rezača materijala, samo će mala količina materijala otići u otpad. Time se lasersko rezanje izdvaja od ostalih strojeva. Uz laserski rezač, proizvođači mogu maksimalno iskoristiti materijale. Troškovi proizvodnje također se smanjuju zbog veće iskorištenosti resursa i manje otpadnog materijala.

## **Prevenција štete**

Još jedna od prednosti laserske obrade je izbjegavanje oštećenja, čak i na najužim materijalima. Mnogi ljudi skloni su vjerovati u dezinformacije o uređaju da je savijanje ili oštećenje materijala neizbježno. Popularno uvjerenje ima pretpostavku da se u procesu laserske obrade koristi visoka toplina. Treba imati na umu da toplina utječe na malu površinu materijala i ne utječe na toleranciju.

## **Niska potrošnja energije**

U stvarnosti je potrebna velika snaga da bismo obavljali obrade laserom. Međutim, laserski rezači bez drugih pomičnih dijelova smanjuju potrošnju energije, tako da strojevi s pokretnim dijelovima obično troše više energije. Također, vrijeme koje je potrebno za lasersku obradu materijala je vrlo brzo. To pomaže uštedjeti vrijeme i snagu. Kada dođe do smanjenja potrošnje energije, smanjuju se i troškovi rada.

## **Ostale prednosti**

Korištenje  $CO_2$  laserskog rezača ima nekoliko prednosti.

Bez kontaktni proces – Zraka fizički ne dodiruje materijal s kojim radi; umjesto toga uzrokuje topljenje materijala zbog intenzivne topline. To uzrokuje minimalnu štetu na materijalu i stroju.

Sigurnija metoda - Lasersko rezanje je mnogo sigurnije od drugih oblika rezanja jer se ne koristi oštrica. Sama greda je zapečaćena u tijesnoj kutiji za svjetlo.

Mnoge primjene – Lasersko rezanje nije samo za proizvodne procese – može se koristiti i u medicinskom sektoru, kao i u umjetnosti.

### **3.2. Nedostaci**

Laserska zraka je vrlo osjetljiva za rukovanje u procesu rezanja. Mala pogreška u podešavanju udaljenosti i temperature može dovesti do gorenja ili promjene boje metala. Jedan je od nedostataka korištenja lasera, u nastavku objašnjavamo poneke od:

#### **Isparavanje nekih materijala**

Rezanjem materijale kao što je plastika, dolazi do isparavanja. Ovo je značajan nedostatak laserskog rezanja. Iako se ovaj nedostatak može riješiti, profesionalni

operateri strojeva mogu lako upravljati nedostatkom. Profesionalci mijenjaju neke od rasporeda uređaja kako bi spriječili ovaj problem. Međutim, cijena aktualizacije ovih promjena danas je vrlo visoka.

### **Neophodni tehnički stručnjaci**

Potreban je profesionalni operater da koristi sve značajke stroja. Ako uređaj nije ispravno postavljen, to će utjecati na materijale i uzrokovati značajnija oštećenja laserskog rezanja. Angažiranje operativnog stručnjaka je bitno, a to dolazi s puno troškova jer postoji ograničenje dostupnosti kvalificiranih stručnjaka.

### **Ograničenje debljine metala**

Iako je lasersko rezanje kompatibilno s gotovo svim materijalima, uključujući i limove poželjno je koristiti drugi sustav za rezanje debelih metala. Najdeblje ploče možete odrediti iz raspoloživog stroja, što također zahtijeva prisutnost stručnjaka. Najopsežniji raspon koji većina proizvodnih tvrtki koristi je u prosjeku 15 do 20 mm.

### **Prethodni troškovi**

Ako želite nabaviti stroj za lasersko rezanje, možda ćete uložiti veliku svotu novca. Rezanje laserom kada uspoređujemo s rezanjem plazmom, košta gotovo dva puta više. Početni ulog za nabavku stroja je vrlo visok, iako je kasnija zarada nakon isplate stroja velika.

### **Nastanak štetnih para i plinova**

Ranije smo spomenuli da je lasersko rezanje kompatibilno s raznim materijalima, no to ima i lošu stranu. Svaki materijal koji će se otopiti tijekom termičkog rezanja dovodi do stvaranja plinova i štetnih para. Proizvodnja otrovnih plinova obično se događa kada je materijal s kojim radite plastika.

## 4. Usporedba rezanja metala plazmom s laserskim rezanjem

### 4.1. Plazma

Početakom 1960-ih inženjeri su došli do novog otkrića. Shvatili su da mogu povećati temperaturu ubrzavanjem protoka plina i smanjenjem otvora za ispuštanje. Novi sustav mogao bi doseći višu temperaturu od bilo kojeg drugog komercijalnog zavarivača. Zapravo na ovim visokim temperaturama alat više nije djelovao kao zavarivač. Umjesto toga, radio je poput pile, režući čvrste materijale. Uvođenje plazma luka revolucioniralo je brzinu, točnost i vrste rezova koje su proizvođači mogli napraviti u svim vrstama metala. Danas se plazma rezanje smatra učinkovitijom metodom, rezanja metala od tradicionalnih metoda. Omogućuje rezanje raznih vrsta metala kao što su aluminij, bakar i čelik. Velika prednost je što su današnji plazma rezači CNC upravljani.

Elementi koji se upotrebljavaju za plazma rezanje, mogli bi se svrstati u par skupina, ovisno o funkciji koju imaju:

- Sustav ventilacije,
- izvor energije,
- plinovi,
- radni stol,
- plazma rezač.

Plazma, tj. mlaz plazme dobiva se tlačenjem određenog plina kroz električni luk.

Energija počinje razbijati molekule, te se atomi počinju dijeliti. Atomi se prirodno sastoje od protona i neutrona u jezgri, okruženi elektronima. U plazmi su elektroni odvojeni od jezgre. Nakon što toplinska energija oslobodi elektrone od atoma, elektroni se počinju brzo kretati. Elektroni su negativno nabijeni i ostavljaju pozitivno nabijenu jezgru. Pozitivno nabijene jezgre se nazivaju ioni. Kada se brzo krećući elektroni sudare s drugim elektronima i ionima, oslobađaju puno energije, ova energija daje plazmi jedinstveni status i snagu rezanja.

Plazma rezanje se često koristi u industrijama poput brodogradnje, strojarstva, te u proizvodnji metalnih konstrukcija, komunalnih usluga, itd. Također, plazma rezači se često koriste u privatnim radionicama. Uz njegovu pomoć brzo i učinkovito se može



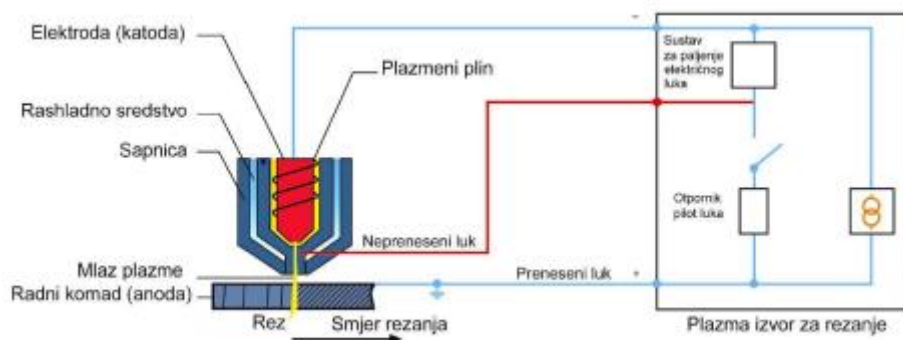
rezati svaki vodljivi materijal, kao i neki nevodljivi materijali – drvo, kamen, plastika. Tehnologija plazma rezanja omogućuje rezanje lima i cijevi, savijanje rezova ili izradu dijelova. Rad se izvodi pomoću visoko temperaturnog plazma luka.

#### 4.1.1. Vrste rezanja plazmom

Rezanje plazmom može biti na jedan od dva načina kao što je to: neprenesenim lukom i prenesenim lukom. Svaki od navedenih načina ima svoje specifičnosti i primjenjuju se u odnosu na situaciju.

1. Neprenesenim lukom – radni dio nije uključen u strujni krug plamenika, te se bez ikakve opasnosti može ručno rezati. Ovaj način ima manji učinak i bez obzira na to moguće je rezanje materijala koji nisu električki provodljivi.
2. Prenesenim lukom – vrlo visoka učinkovitost rezanja, primjenjuje se u strojnom rezanju jer se teško prilagođava ručnom rezanju jer se mora održavati ujednačena dužina luka.

Na slici 13. prikazan je preneseni i nepreneseni plazmeni luk rezanja.



Slika 13. Preneseni i nepreneseni plazmeni luk rezanja

Izvor: <https://repository.ffri.uniri.hr/islandora/object/ffri:844/preview>

#### 4.1.2. Postupci rezanja plazmom

Od samog začetka plazma rezanja ovaj se postupak razvija i unapređuje od 1950. godine pa sve do danas. Plazma rezanje sve se više razvija, te sa sobom donosi nove postupke rezanja i tehnike koje se paralelno razvijaju. Kako je razvijeno više postupaka rezanja plazmom, tako svaki od postupak ima svoje karakteristike tj. nedostatke i prednosti. Postupci, tj. tehnike rezanja plazmom dijele se na sljedeće:

1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima (standardna plazma). Ovakav postupak zahtjeva samo jedan plin koji ima funkciju rezanja i hlađenja. Kako je ovaj način rezanja vrlo jednostavan tako većina ručnih rezača radi upravo na ovakav način. Postupak se koristi kod rezanja metala čija je maksimalna debljina 16 milimetara.
2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin) u atmosferskim uvjetima ili u vodi. Ovakav postupak rezanja koristi se za podvodno plazma rezanje jer njegova specifična sapnica koja se koristi za dovod rotirajućeg plina ima ulogu zaštite istog tog plina od utjecaja okoline koji mogu biti štetni. Zaštita plina daje mogućnost rezanja u brodogradnji i na svim plazma rezanjima pod vodom.
3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka. Kod ovog postupka rezanje se odvija uporabom injektirane vode, a za stvaranje plazme koristi se samo jedan plin. Kada se voda ubrizgava to se čini vrtložno, tj. radijalno. Spomenutim načinom sužava se luk čime se povećava gustoća plazme. Spomenuta voda ima za funkciju i hlađenje.

#### **4.1.3. Plinovi koji se koriste za rezanje plazmom**

##### **Zrak**

- Koristi se za dobivanje bolje kvalitete i brže rezanje, na materijalima koji se baziraju na željezu ili ugljiku.
- Zračna plazma obično se koristi zrak kao sekundarni plin.
- Prihvatljiv vijek trajanje potrošnog materijala.
- Kvaliteta reza je prihvatljivija za većini materijala, iako na nekima od njim postoji mogućnost od pojave oksidacije koja se najčešće javlja na nehrđajućem čeliku i aluminiju. Preporučuje se korištenje samo čistog i suhog zraka.

##### **Dušik**

- Ne smije sadržavati kisik zbog oksidacije katode.
- Ima izvrsnu kvalitetu reza na aluminiju i nehrđajućem čeliku.
- Zahtjeva veći napon električne struje kod prelaska u plazma stanje, ali zato mu je sadržaj energije velik.
- Vijek trajanja potrošnog materijala je izvrstan.

- Učinkovitiji od zraka.

## **Kisik**

- Poboljšano trajanje potrošnih materijala, do nedavno je uvijek dodatnih materijala bio u granicama prihvatljivosti.
- Omogućuje veliku brzinu rezanja.
- Završna površina je glatka u minimizira skupljanje nitrida na površinama reza.
- Preporučuje se za rezanje ne željeznih metala.

## **Vodik**

- Zbog poboljšanja kvalitete reza na nehrđajućim čelicima i aluminiju, vodik koristi se za dualne plinske sustave.
- Deblji materijali se režu visoko kvalitetno i s velikim brzinama.
- Preporučeno je korištenje mješavine 65% argona i 35% vodika.
- Ar/H<sub>2</sub> kombinaciju je nepotrebno koristiti za tanje obojene materijale jer sličnu kvalitetu reza mogu postići i jeftiniji plinovi.
- Preporučuje se za obojene materijale 12 mm i više, te za korištenje na nehrđajućem čeliku debljine 19 mm i više.

### **4.1.4. Sekundarni plinovi**

#### **CO<sub>2</sub>**

- Prikladan za obojene i neobojene materijale.
- Koristi se kod dušične plazme ili Ar/H<sub>2</sub> plazme.
- Obradak se hladi brže i povećava djelotvornost procesa.
- Smanjuje isparivanje kada se koristi Ar/H<sub>2</sub> plazma.

#### **Zrak**

- Poboljšava kvalitetu rezanja nekih željeznih materijala.
- Sekundarni zrak se koristi kada se radi s plazmom sa zrakom kao reznim plinom, te ponekada i s plazmom s dušikom kao reznim plinom.
- Niski operativni troškovi.

Izbor plina za rezanje plazmom

Plin za rezanje je bitno odrediti jer svaki materijali ima svoja svojstva zbog koji plin mora biti odgovarajući.

Plin	Debljina materijala (mm)	Materijal		
		Aluminij	Ugljični čelik	Nehrđajući čelik
Plazmeni plin:zrak	< 12	3	5	3
Zaštitni plin: zrak	≥12	2	5	2
Plazmeni plin: dušik	< 12	5	5	5
Zaštitni plin: <i>CO<sub>2</sub></i> ili zrak		5	5	5
Plazmeni plin: <i>Ar/H<sub>2</sub></i>	<6	1	1	1
Zaštitni plin: <i>CO<sub>2</sub></i> ili zrak	Od 6-30	5	1	3
	≥ 30	5	1	5

Tablica 1. Prikaz ocjena za pojedine plazma rezove na određenim materijalima

Aluminij: zrak kao plazmeni plin ima prihvatljivu kvalitetu reza i visoku produktivnost, razlikuje se od mješavine *Ar/H<sub>2</sub>* kao plazmeni plin po boljoj kvaliteti reza.

Kod ugljičnih čelika kisik kao plazmeni plin, istaknuo se kao bolji radi visoke produktivnosti i rezne površine bez onečišćenja nitridima, dok zrak kao plin također sadržava visoku produktivnost dok zastaje u onečišćenju čak i po površini reza.

*Ar H<sub>2</sub>/ Ar H<sub>2</sub>N<sub>2</sub>* mješavina kao plazmeni plin u Cr-Ni čelicima ima vrlo čistu površinu reza, ali zrak kao plin obrađuje s visokom produktivnosti, prihvatljivom kvalitetom reza i potrebna naknadna obrada kod zavarivanja.

#### 4.1.5. Prednosti i nedostaci

**Prednosti** je to što se rezanje plazmom uporabom plina može vršiti pod vodom.

**Nedostatak** je što u kasnijem razdoblju, troši više rezne mlaznice, a cijena je vrlo visoka. Princip rezanja plazmom određuje štetnu prašinu i lučno svjetlo koje se proizvodi tijekom procesa rezanja. Međutim, podvodno rezanje plazmom koristi se za izbjegavanje ovog nedostatka.

#### 4.2. Lasersko rezanje naspram plazma rezanja

Usporedba laserskog stroja za rezanje i stroja za rezanje plazmom je sljedeća:

1. Stroj za lasersko rezanje ima veću brzinu rezanja: brzina može doseći 10 m/min što je mnogo brže od plazma rezača.
2. Laserska zraka je fokusirana na male svjetlosne točke, utor za rezanje lasera je uzak. Utor za rezanje plazma stroja je nešto veći od onoga na stroju za lasersko rezanje.
3. Stroj za lasersko rezanje ne oštećuje obradak, dok stroj za rezanje plazma ima oštećenje ploče. Pogotovo tijekom procesa rezanja, kada gorionik i mlaznica stroja za plazma rezanje imaju najveću temperaturu, to uzrokuje očite nedostatke na ploči.
4. Laserski rezač ima visoku preciznost: točnost pozicioniranja stroja za lasersko rezanje je 0,05 mm, a točnost ponovnog pozicioniranja je 0,02 mm, ali zahtijeva veće uvjete radnog okruženja. Iako točnost obrade stroja za plazma rezanje nije jednaka onoj kao kod stroja za lasersko rezanja, on ima niske zahtijeva za radnim okruženjem i snažnu mobilnost, ima širok raspon rezanja i zahtijeva niže vještine operatera od stroja za lasersko rezanja.
5. Rezna površina laserskog stroja za rezanje je glatka, bez ivica, dobre kvalitete rezanja, rezanje je bez kontakta. Područje reznog ruba zahvaćeno toplinom je vrlo malo i gotovo da nema toplinske deformacije obratka, čime se potpuno izbjegava okrenut rub prilikom probijanja i striženja materijala. Općenito, rezni rub ne treba sekundarnu obradu, ali je debljina ploče ograničena, a cijena obrade je visoka. Međutim, stroj za plazma rezanje može rezati čeličnu ploču od 6-40 mm s različitim modelima i snagom. Trošak obrade relativno mali.

U Tablici 2. prikazana je Usporedba laserskog i plazma rezanja.

		<b>Lasersko rezanje (<math>CO_2</math> laser 4kW)</b>	<b>Plazma rezanje (<math>O_2</math> plazma 230 A)</b>
Materijali koji se mogu rezati:		<p>Metal: ugljični čelik, nisko legirani čelik, nehrđajući čelik, visoko legirani čelik, aluminij, legura bakra itd.</p> <p>Nemetalni: keramika, plastika, guma, drvo, koža, tkanina, itd.</p>	<p>Visoko legirani čelik kao što je ugljični čelik i ne hrđajući čelik.</p> <p>Ostali nemetalni materijali visoke viskoznosti (guma, fil, itd.), lomljivi materijali (keramika, staklo, itd.) ne mogu se prerađivati</p>
Maks. debljina rezanja		25 mm (meki čelik)	150 mm
Brzina rezanja (mm/min)	Debljina	>10000	Ne mogu rezati!
	<1		
	2	7000	Ne mogu rezati!
	6	3000	3700
	12	1800	2700
	25	500	1200
	50	Ne mogu rezati!	250
	>100	Ne mogu rezati!	-----
Širina utora		Suziti	Vrlo široka
		Oko 0,6 mm za rezanje mekog čelika od 16 mm	Oko 0,5 mm za rezanje mekog čelika do 16 mm
Preciznost veličine rezanja (odsječena deformacija)		Vrlo dobro	Normalno
		Pogreška $\pm 0,15$ mm	Greška 0,5-1mm

Tablica 2. Usporedba laserskog i plazma rezanja

#### 4.2.1. Razlika u primjeni

Plazma rezanje se koristi za rezanje svih vrsta metala. Međutim, najbolje je za rezanje ploča srednje debljine.

Ovisno o snazi, laser se može koristiti za rezanje lima debljine 30-40 mm. Materijali za rezanje su također široki, uključujući metal, nemetal, staklo, keramiku, gumu, PVC, kožu, organsko staklo, tekstil, itd.

Stoga, plazmini rezni materijali imaju manji raspon izbora u usporedbi s laserskim rezanje sa širim rasponom. Za rezanje tankih limova, lasersko rezanje radi bolji posao od rezanja plazmom. Strojevi koriste plazma rezanje tamo gdje je potrebno sljedeće: mala deformacija, mala površina zahvaćena toplinom, uski utor za rezanje i velika brzina rezanja.

Laser se, s druge strane, koristi tamo gdje je potrebno sljedeće: vrlo visoka preciznost, visoki smjer, visoki intenzitet, veća brzina, bez naknadne obrade.

#### **4.2.2. Čimbenici koje treba uzeti u obzir prilikom biranja između rezanja plazmom i laserom**

**Materijali** su bitni čimbenici jer ako želimo rezati metal, gumu, drvo, plastiku, PVC, kožu, organsko staklo i tekstil, trebali bi ste se odlučiti za lasersko rezanje. S druge strane, ako trebate rezati bilo koju vrstu metala, uglavnom ploče srednje debljine, prava metoda je plazma rezanje.

**Troškove** trebamo uzeti u obzir jer besmisleno je birati određeni postupak ako ne odgovara vašem proračunu. Plazma rezanje je jeftinije, stoga je prikladno ako tražite jeftiniju metodu rezanja.

**Proces rezanja** gdje obje tehnologije imaju ograničenje je kod izvođenja različitih 3D pozicija rezanja. Uz napredovanje tehnologije u današnje vrijeme se mogu izvoditi složene operacije, pomoću laserskog rezača možemo izvoditi rezanje, graviranje, bušenje. Naime plazma rezač podržava samo rezanje metala. Laser i plazma mogu rezati sve vrste metala, za zaštitu leća kod lasera trebaju se odraditi određene pripreme prije rezanja visoko reflektivnih metala.

**Upotreba** je bitna stavka kod izbora opreme. Plazma rezači zahtijevaju češća čišćenja i uklanjanje ostataka, potrebno je osigurati pravilno prozračivanje prostora, za razliku od laserskog gdje je ta potreba znatno manja. Za lasersku tehnologiju gotovo da nije ni potrebna zaštitna sredstva, naravno postoji iznimka kod rezanja plastike, potrebno je nositi zaštitnu masku zbog metala koji lako isparuju, što također vrijedi i za plazma rezanje.

### 4.2.3. Eksperimentalni dio usporedbe rada lasera i plazme

U eksperimentalnom dijelu prenosim podatke za laser koje sam prikupila u firmi DRAGON BAJUN d.o.o. u Barbanu, te podaci za plazmu prikupljeni su u tvrtki ULJANIK Brodogradnja 1856. d.o.o.

Lasersko rezanje izvršeno je na stroju HUGONG INTELASER 3015, kojem je brzina rezanja 4,6 m/min, a snaga mu je 12 kW, dok je brzina rezanja kod plazma rezača 3,5 m/min, snaga 16 kVA (cca 15 kW), vrsta ESAB TXB 10200. Za rezanje korišten je brodski lim, debljine 10 mm. Oba uređaja koristi kisik kao plin za rezanje, plin za trasiranje kod plazme je argon, laseru nema plin ali mu je potrebno infracrveno svjetlo.

Na slici 14. prikazan je Laserski stroj INTELASER-3015.



Slika 14. Laserski stroj INTELASER-3015

Izvor: Autor

Na slici je laser u Barbanu, koji ima prosječnu dnevnu potrošnju struje za 8 sati rada cca. 40 kWh, dok plazma ima prosječnu potrošnju za isto to vrijeme cca. 50 kWh. Prosječna potrošnja plina na plazma rezaču je 13,7 kg kisika (cijena cca. 10 kn/kg), dok laser troši samo 4 kg kisika.

Sljedeće slike prikazuje plazma rezač koji za svoje potrošne dijelove kao što su sapnice, glave, gorionik u mjesec dana troši od prilike i do 10.000 kn, a i zahtijeva



dodatno hlađenje lima koji se reže, uranjanjem u vodu, a za održavanje lasera je potrebno 2.000 kn u mjesec dana i nije mu potrebna voda za dodatno hlađenje i ima kvalitetan rez, bez skošenja i troške. Okvirna cijena za ovakav laserski uređaj je prema riječima uvoznika, tvrtke DRAGON BAJUN d.o.o. je cca 500.000 €, cijene za nabavu stroja variraju u odnosu na potrebne dodatke koje stroj zahtijeva.

Na slici 15. prikazana je pločica plazme ESAB.



Slika 15. pločica plazme ESAB

Izvor: Autor

Kvaliteta kod ovakvog plazma rezača nije najbolja, jer ne može rezati okomito te postoji lagano skošenje, i ima ograničenje pri izradi malih rupa i malih radijusa. Male rupe su nepravilne, i dobivaju ovalni oblik.

Na slici 16. prikazana je Plazma stroj ESAB TXB 10200.



Slika 16. Plazma stroj ESAB TXB 10200

Izvor: Autor

Cijena jednog ovakvog plazma rezača je 400.000 €, troškovnik smo dobili u ULJANIK Brodogradnji, prikazan na slici

Na slici 17. prikazan je izrezak iz troškovnika za plazma rezač.



## Quote 305-22-0035-1

Quote Date / Date of Expiry  
**06.07.2022 / 04.10.2022**  
Salesman  
**Nicusor Ene**  
Phone Number  
**+40 723 179343**  
Email  
**nicusor.ene@esab.se**

---

<b>Grand Total</b>	<b>396.116 €</b>
--------------------	------------------

Slika 17. Izrezak iz troškovnika za plazma rezač

Izvor: Troškovnik iz ULJANIK Brodogradnje

## 5. Zaključak

Radom „Nekonvencionalna obrada materijala laserom“ potvrđena je hipoteza da je lasersko rezanje efikasnije, brže i zahtjeva manja ulaganja tokom korištenja uređaja u usporedbi s plazma rezanjem.

Ciljevi istraživanja rada su razlike u načinu rada, plazma rezači koriste mješavinu plinova s električnim lukom, dok laserski rezači koriste fokusirani snop svjetlosti za izvođenje procesa rezanja. Kvaliteta laserskih rezača nudi mnogo veću razinu preciznosti u usporedbi s plazma rezačima. Plazma rezači su ograničeni na rezanje, ali mogu rezati sve vrste metala, dok laserski rezači mogu rezati, gravirati i zavarivati, ali ne sve materijale. Laserski rezači općenito mogu rezati metal brže od plazma rezača i troše manje energije, što ih čini ekološki prihvatljivom opcijom rezanja metala. Laserski rezači općenito ne mogu rezati materijale tako debele kao što može plazma, a obično mogu rezati materijale debljine do 25 mm. Plazma može rezati metale debljine do 80 mm.

Cilj eksperimentalnog dijela rada je bio odrediti parametre kojima se postiže zadovoljavajuća kvaliteta reza, efikasnost, brzina. Iako konačni odgovor koji uređaj je bolji, ovisi o materijalima koji se obrađuju, vrsti rezova koji su potrebni i proračunu. Uz sve navedeno potrebno je pogledati konkretne aspekte procesa rezanja, uporabu i investiranje. Prilikom rezanja debelih limova, kvalitetniji laseri rade čak bolje i od plazma rezača. Laser ima velike prednosti kod kvalitete samog reza, bolja preciznost rezanja, niži troškovi obrade, ekološka obrada uz smanjenu potrošnju materijala i električne energije. Brzina laserskog rezanja može doseći i do tri puta veću nego plazma rezač.

## 6. Literatura

Dunder M. – Strojarska tehnologija 1 i 2, podloga s predavanja , Filozofski fakultet u Rijeci, Politehnika (2017.)

Udiljak, T.: „Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica“ ,FSB, Zagreb, 2016.

Milikić, D.: „Nekonvencionalni postupci obrade“, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2002.

P.W. Atkins: Physical Chemistry; 5th ed.,Oxford etc.,Oxford University Press, 2009.

### WEB izvori

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Obrada\\_metala](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obrada_metala)

[https://ethw.org/Theodore\\_Maiman\\_and\\_the\\_Laser](https://ethw.org/Theodore_Maiman_and_the_Laser)

<https://pdfcoffee.com/plinski-laseri-seminarski-rad-pdf-free.html>

<https://pdfcoffee.com/laser-iii-iii-pdf-free.html>

<https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/dye-lasers>

<https://hr.unansea.com/poluvodicki-laseri-vrste-uredjaja-operativni-princip-koristenje>

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Popis\\_osnovnih\\_vrsta\\_lasera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Popis_osnovnih_vrsta_lasera)

<https://www.laser-ing.hr/>

<https://www.troteclaser.com/hr/>

<http://ba.yunchtitanium.com/news/differences-and-comparisons-of-laser-cutting-29698080.html>

<https://weldingtroop.com/what-is-the-difference-between-a-laser-cutter-and-a-plasma-cutter/>

## **SAŽETAK**

Postupci obrade laserom imaju vrlo rasprostranjenu upotrebu i veliku primjenu u svim segmentima gospodarstva. Značajne promijene kontinuirano se usavršavaju kako bi odgovarale tržištu novih materijala i proizvoda. Laseri se smatraju jednim od najvećih izuma u 20. st. Ova metoda obrade materijala bilježi porast u industrijskoj proizvodnji, zbog fleksibilne i brže obrade, smanjenih troškova materijala, povećanja fleksibilnosti proizvodnje i dobivanja visokokvalitetnih proizvoda, te mnogo drugih prednosti koje pruža.

**Ključne riječi:** laser, plazma, obrada metala, rezanje

## **SUMMARY**

Laser processing procedures are widely used in all segments of the economy. Significant changes are continuously refined to match the market of new materials and products. Lasers are considered one of the greatest inventions of the 20th century.

This method of material processing is increasing in industrial production, due to flexible and fast processing, reduced material costs, increased production flexibility and obtaining high-quality products, and many other advantages it provides.

**Keywords:** laser, plasma, metal processing, cutting