

# Uporaba lasera u znanosti i tehnologiji

---

**Mišić, Adrian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:008010>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-17**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Adrian Mišić

## Uporaba lasera u znanosti i tehnologiji

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Zagreb, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidat Adrian Mišić  
Predao je izrađen završni rad dana: 27. rujna 2022.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu  
prof. dr. sc. Mirela Leskovic, Fakultet kemijskog inženjerstva i  
tehnologije, Sveučilište u Zagrebu  
prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Fakultet kemijskog inženjerstva i  
tehnologije, Sveučilište u Zagrebu

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred  
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 30. rujna 2022.

## Sažetak

U ovom radu prikazan je način rada lasera te njegova primjena u znanosti i tehnologiji. Kroz fenomen stimulirane emisije pobliže je opisan utjecaj fotona na elektrone u atomu te su razloženi uvjeti koji dovode do ostvarenja inverzije napučenosti, fenomena koji je ključan za razumijevanje principa rada lasera. Opisane su ključne komponente lasera i njihovo djelovanje u sklopu sustava te je prikazana razlika u načinu rada kontinuiranog i pulsnog lasera. Navode se mnogobrojni primjeri uporabe lasera u znanosti i objašnjavaju načini djelovanja te se ističe prednost korištenja lasera pred drugim metodama. Opisani su i glavni industrijski laseri i režim rada te je prikazano područje njihove primjene. Prikazane su neke od važnijih primjena lasera u znanosti te je u kratkim crtama objašnjen način djelovanja u tim metodama.

Ključne riječi: laser, industrijski laser, laserska spektroskopija, rad lasera

## Abstract

In this paper, the mode of operation of the laser and its application in science and technology are presented. Through the phenomenon of stimulated emission, the influence of photons on electrons in an atom is described in more detail, and the conditions that lead to the realization of population inversion, a phenomenon that is crucial for understanding the principle of laser operation, are explained. The key components of the laser and their operation as part of the system are described, and the difference in the mode of operation of continuous and pulsed lasers is shown. Numerous examples of the use of lasers in science are given and methods of action are explained, and the advantage of using lasers over other methods is highlighted. The main industrial lasers and their mode of operation are also described, and the area of their application is shown. Some of the more important applications of lasers in science are presented, and the mode of action in these methods is briefly explained.

Key words: laser, industrial laser, laser spectroscopy, laser operation

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Povijest lasera.....	2
3. Načelo rada lasera .....	3
3.1. Energetske razine .....	3
3.2. Stimulirana emisija.....	5
3.3. Inverzija napučenosti.....	5
3.4. Sustavi s tri i četiri razine .....	6
4. Komponente lasera.....	8
4.1. Aktivni medij.....	8
4.2. Laserska pumpa.....	8
4.3. Optički rezonator.....	9
5. Režim rada.....	11
5.1. Kontinuirani laseri.....	11
5.2. Pulsni laseri .....	11
6. Primjena u znanosti .....	13
6.1. Laserska spektroskopija.....	13
6.1.1. Ramanova spektroskopija.....	14
6.1.2. Ultrabrza laserska spektroskopija.....	14
6.2. CLSM.....	15
6.3. TPEF.....	15
6.4. Lasersko hlađenje .....	15
6.5. Optička pinceta.....	16
7. Primjena u industriji .....	17
7.1. Industrijski laseri .....	18
7.1.1. Nd:YAG laser.....	18
7.1.2. CO <sub>2</sub> laser.....	18
7.1.3. Kisik-jod laser .....	19
7.2. Lasersko graviranje .....	20
7.3. Lasersko rezanje .....	20
7.4. Lasersko zavarivanje .....	23
7.5. Ablacija i bušenje .....	25
7.6. Aditivna proizvodnja.....	26
8. Zaključak.....	28
9. Literatura .....	29

## 1. Uvod

Riječ laser je akronim za „light amplification by the stimulated emission of radiation“, što bi prevedeno na hrvatski značilo „amplificiranje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja“. Laser je uređaj koji stvara monokromatsku koherentnu svjetlost u uskom snopu te je pomoću njega moguće stvoriti svjetlost različitih valnih duljina. Rad lasera se temelji na principu stimulirane emisije. Do te pojave dolazi u aktivnom mediju kada novonastali fotoni osciliraju između dva zrcala na krajevima aktivnog medija gdje se daljnja emisija stimulira pa se dio nastalih fotona propušta u obliku zrake svjetlosti. Od izuma prvog lasera razvijen je velik broj novih vrsta koji su svoju primjenu našli u brojnim područjima. Postoje brojni kriteriji po kojima se laseri dijele, a jedna od glavnih podjela je na plinske, tekući i krute, što ovisi o vrsti materijala u kojem dolazi do stimulirane emisije. Također ih je moguće podijeliti i prema izvoru pobude, pa poznajemo i optičke, kemijske i električne lasere. Laser proizvodi usku zraku svjetlosti velike snage čime pruža mogućnost prijenosa fotonske energije na velike udaljenosti te prijenos velikih količina energije uopće. S godinama je primjena lasera u industriji sve veća, koristi ga se za rezanje, zavarivanje, ablaciju, pa čak i depoziciju materijala. Primjenu je pronašao i u vojsci gdje ga je zbog velike koncentracije fotonske energije moguće koristiti kao oružje za uništavanje letjelica. Svojstvo monokromatske svjetlosti lasera ima veliku primjenu u znanosti, a pogotovo u kemiji gdje je potrebno zračenje točno poznate valne duljine za analizu tvari. Ostala svojstva laserske svjetlosti su omogućila nove metode mikroskopije kao CLSM i TPEF. Brojne su druge primjene, od nuklearne fizike do medicine, koje je omogućio ovaj, u suštini, jednostavni izum.

## 2. Povijest lasera

Temelj ideje lasera je postavio Albert Einstein 1917. godine kada je u svome radu „*Zur Quantentheorie der Strahlung*“ opisao stimuliranu emisiju, sposobnost fotona da potakne emitirano zračenje pobuđenog atoma pod uvjetom da prvotni foton ima istu energiju kao i foton koji bi se mogao emitirati. Navedeni fenomen je glavno načelo djelovanja lasera te su kroz narednih 40 godina brojni znanstvenici radili na tom području da bi 1954. god Charles Hard Townes u suradnji sa studentom James P. Gordonom i Herbert J. Zeigerom napravio prvi maser. To je uređaj koji se zasniva na istim temeljima kao i laser, međutim, amplificira mikrovalno, a ne vidljivo zračenje kao laser. Već kroz nekoliko godina Theodore H. Maiman u laboratoriju u Malibu, Kaliforniji konstruirao prvi laser. Emitirao je svjetlost valne duljine od 694 nm i sastojao se od kristala rubina kao aktivnog medija i ksenonske lampe kao laserske pumpe. Iste godine je Ali Javan konstruirao prvi plinski laser na bazi He-Ne te su nakon toga uslijedila brojna nova otkrića na ovom području.



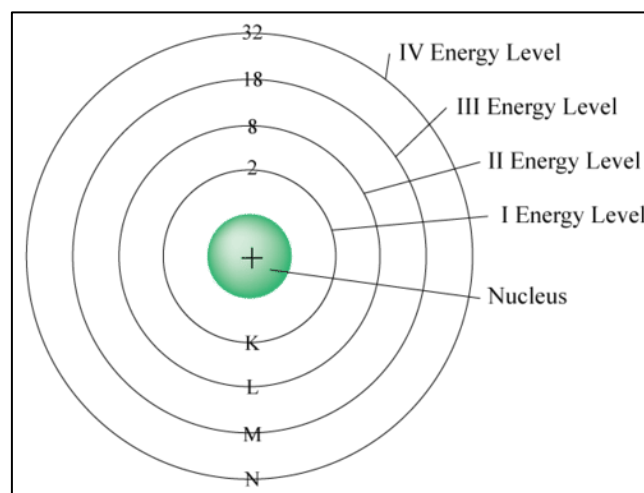
Slika 1. *Theodore Maiman* [6]

### 3. Načelo rada lasera

Princip rada lasera nije kompleksan te se može objasniti i dočarati kroz nekoliko koraka, što ćemo ovdje i prikazati, ali kada bismo željeli u potpunosti shvatiti i razumjeti načelo rada lasera, trebali bismo podublje ući u područje kvantne mehanike te ovaj rad proširiti za par stotina stranica. Za djelovanje lasera u suštini su bitni fenomen *stimulirane emisije* i stvaranje *inverzije napučenosti*, pojave koje se postižu pomoću različitih komponenti lasera koje ćemo u nastavku objasniti.

#### 3.1. Energetske razine

Kada atom ili molekula dobije energiju ona se odražava kroz kretanje, vibraciju i rotaciju atoma i molekula, ali ta energija može biti i preuzeta od strane elektrona. Prema pojednostavljenom modelu atoma možemo vidjeti da u atomu, a u molekulama još i više, postoje energetske razine koje mogu zauzeti elektroni (Slika 2.).

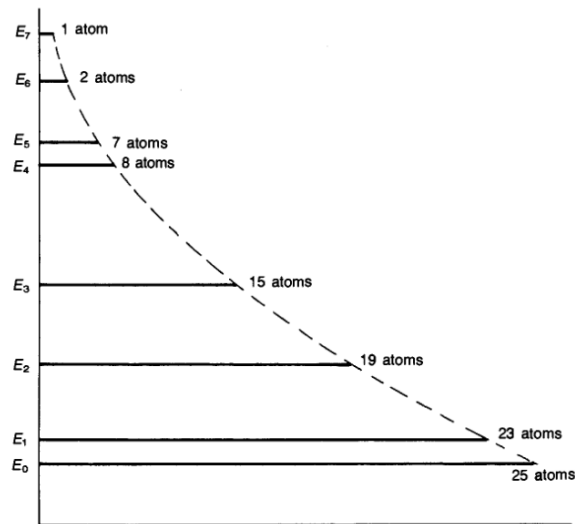


Slika 2. Pojednostavljeni model atoma s energetske razine [12]

Elektroni imaju težnju okupirati niže energetske razine pa se u tom smislu i raspoređuju, a njihovu raspodjelu možemo prikazati Maxwell-Boltzmannovom distribucijom. Maxwell-Boltzmannova funkcija je specifična za svaku temperaturu i prikazuje vjerojatnost pronalaska elektrona na određenoj energetskej razini pri stalnoj temperaturi " $T$ " (Slika 3.). U stvarnom slučaju ne možemo elektronu odrediti brzinu i mjesto već se on, dok promatrač ne uđe u interakciju s njim, nalazi na više mjesta i nema stalnu vrijednost energije. Zato elektron opisujemo kao oblak vjerojatnosti jer možemo prikazati samo vjerojatnost da elektron bude na određenom području i posjeduje određenu količinu energije. Kada postoji velika skupina

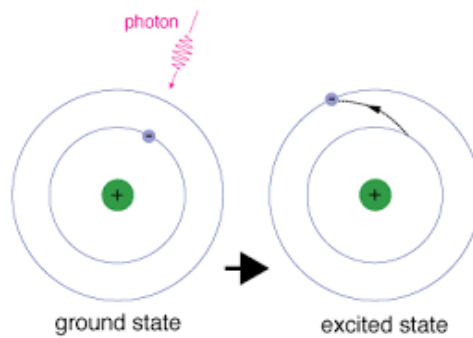


elektrona moguće je, zbog jednostavnosti, promatrati vjerojatnost pronalaska elektrona kao postotak elektrona od cijele skupine koji će se nalaziti na toj razini.



Slika 3. Maxwell-Boltzmannova funkcija, na apscisi vjerojatnost pronalaska elektrona a na ordinati energija razine [1]

Jedan od načina kako elektroni u atomima i molekulama mogu primiti energiju je preko elektromagnetskog zračenja, to jest fotona. Ako u atomu imamo energetske razine s energijama  $E_1$  i  $E_2$  i ako vrijedi da je  $E_1 < E_2$ , onda će za prelazak elektrona iz prve razine u drugu trebati uložiti energiju  $\Delta E$  u smislu da je  $\Delta E = E_2 - E_1$ . Zbog kvantne prirode, elektron će prijeći na drugu razinu samo ako primi energiju jednaku razlici dviju razina,  $\Delta E$ . Foton koji sadrži veću ili manju razinu energije neće imati interakciju s navedenim elektronom. U atomima i molekulama često postoji veći broj energetskih razina, a samim time i veći broj kombinacija i energetskih vrijednosti koje bi foton mogao imati kako bi prenio energiju elektronu. Kada atom posjeduje 5 energetskih razina moguće je da se ostvare skokovi elektrona i s  $E_1$  na  $E_5$  i s  $E_2$  na  $E_4$  itd.



Slika 4. Apsorpcija fotona [12]

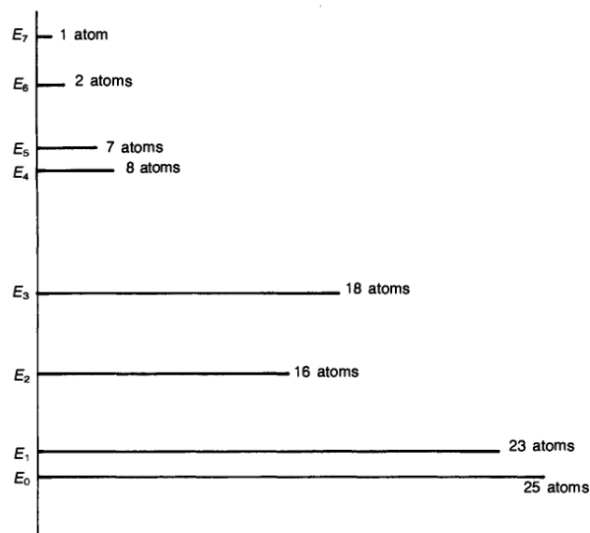
### 3.2. Stimulirana emisija

Kada atom primi energiju u obliku fotona i elektron prijeđe u višu energetska razinu tada kažemo da se atom nalazi u pobuđenom stanju. Takvo stanje je obično kratkog vijeka, traje od nekoliko nanosekundi do nekoliko milisekundi nakon čega se energija otpušta. Energija se može prenijeti na druge atome ili se može otpustiti u obliku elektromagnetskog zračenja, to jest u obliku fotona, pa u tom slučaju govorimo o spontanoj emisiji. Prilikom spontane emisije elektron će se vratiti na nižu energetska razinu i emitirani foton će imati energiju jednaku razlici više i niže energetske razine te će smjer nastalog fotona biti nasumičan. Kada atom koji je u pobuđenom stanju uđe u interakciju s drugim, novim fotonom koji ima istu energiju kao i foton koji bi atom mogao emitirati, dolazi do poticanja emisije fotona iz atoma. Foton koji je u interakciji s atomom neće biti apsorbiran, već će sama njegova prisutnost potaknuti emitiranje drugog fotona te tada govorimo o stimuliranoj emisiji. Novonastali foton će biti u fazi s fotonom koji je stimulirao emisiju te će imati isti smjer kretanja i frekvenciju. Treba napomenuti da je moguće da nadolazeći foton ne stimulira emisiju nego prenese energiju na drugi elektron koji će zbog toga isto prijeći u višu energetska razinu.

### 3.3. Inverzija napučenosti

Elektronu je potrebno dovesti energiju kako bi prešao u višu energetska razinu. S povećanjem temperature promijenit će se raspodjela elektrona prema razinama, ali će sustav i dalje biti u termičkoj ravnoteži, u smislu da će niže, stabilnije energetske razine biti više popunjene od onih viših, kako je prikazano na slici 3. Kako bi se ostvarila inverzija napučenosti potrebno je dovesti energiju specifične veličine kako bi se samo određena skupina elektrona prebacila u

više energetske stanje. Jedan od učestalijih načina za to je usmjeravanje elektrona određene brzine ili fotona određene frekvencije u aktivni medij. S kontinuiranim intenzivnim zračenjem moguće je konstantno pobuđivati elektrone na prelazak u više razine i tako postići neravnotežnu distribuciju. Na slici 5. je prikazan raspored elektrona prilikom inverzije napučenosti gdje je vidljivo da se na razini  $E_3$  nalazi veći broj elektrona nego na razini  $E_2$ . Prilikom prolaska fotona kroz aktivni medij cilj je da dođe do stimulirane emisije, ali određeni dio fotona neće potaknuti emisiju već će prenijeti energiju na elektrone koji će se prenijeti na višu energetske razine. Kako bi se pospješila stimulirana emisija nastoje se postići uvjeti u kojima se što veći broj elektrona nalazi na višoj energetskej razini, a što manji broj na nižoj. Vjerojatnost da foton stimulira emisiju, to jest da ne prenese elektron na više energetske stanje se može prikazati kao omjer broja elektrona u višoj razini naprema broja elektrona na nižoj razini.

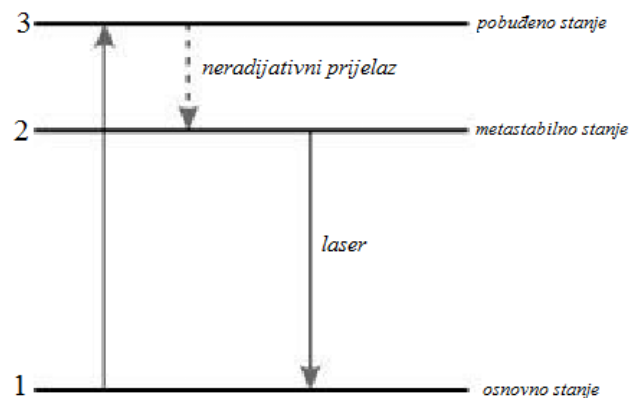


Slika 5. Inverzija napučenosti [1]

### 3.4. Sustavi s tri i četiri razine

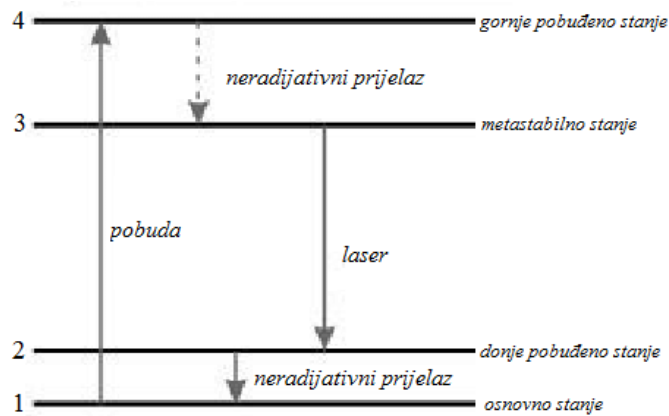
Kako bi došlo do pojave stimulirane emisije potrebno je da atom bude u pobuđenom stanju. S obzirom na kratkoću trajanja navedenog stanja, elektron se često vrati u osnovno stanje prije nego što se uopće ostvari interakcija s fotonom. Ovaj problem se rješava tako da stimuliranu emisiju činimo efikasnijom produžavanjem vremena pobuđenog stanja na načina da koristimo sustave s tri razine. To su sustavi u kojima osim osnovnog i pobuđenog stanja atoma postoji i metastabilno stanje. U kojem stanju će se atom nalaziti ovisit će o energetskej razini na kojoj

se elektron nalazi. Kada se dovodi energija u sustav elektroni prelaze u više energetske razine i sustav se nalazi u pobuđenom stanju, nakon čega elektroni ispuštaju energiju i prelaze na nižu energetske razine te tada kažemo da se sustav nalazi u metastabilnom stanju. Prilikom tog prijelaza energija ispuštena od strane elektrona je najčešće u obliku topline. Metastabilno stanje se naziva tako zbog vremena boravka elektrona na navedenoj energetskej razini, koje je znatno duže nego na pobuđenoj razini. Dulje vrijeme boravka u metastabilnom stanju znači veću inverziju napučenosti i veću vjerojatnost interakcije s nadolazećim fotonom.



Slika 6. Sustav s tri razine [1]

Sustav s četiri razine će imati i energetske razine donjeg pobuđenog stanja kako je prikazano na slici 7. U tom slučaju elektron prilikom stimulirane emisije prelazi na energetske razine donjeg pobuđenog stanja nakon čega će prijeći u osnovno stanje uz ispuštanje energije u obliku topline. Ovi sustavi su efikasniji jer je moguće postići veliku inverziju napučenosti i veća je vjerojatnost stimulirane emisije. Nadolazeći foton može stimulirati emisiju i doći će do prijelaza elektrona s razine 3 na razinu 2 ili može prenijeti energiju elektronu u razini 2 kako bi prešao na razinu 3. Ali ako izaberemo takav sustav u kojem je vrijeme bivanja elektrona u razini 2 jako kratko, onda će ta razina biti gotovo uvijek prazna. To će povećati vjerojatnost da dođe do stimulirane emisije. Što je duže vrijeme bivanja u metastabilnom stanju i kraće vrijeme bivanja u donjem pobuđenom stanju to će sustav biti efikasniji.



Slika 7. Sustav s četiri razine [1]

## 4. Komponente lasera

### 4.1. Aktivni medij

Medij koji se sastoji od atoma i molekula koje pobuđujemo se naziva aktivni medij. U njemu dolazi do stimulirane emisije i ovisno o vrsti atoma i molekula ovise i razlike energetske razine koje će definirati valnu duljinu. Mogu biti u plinovitom, tekućem i krutom stanju i sukladno njima biramo lasersku pumpu.

### 4.2. Laserska pumpa

Kako je već istaknuto, za stvaranje inverzije napučenosti potrebno je preko elektrona ili elektromagnetskog zračenja dovesti određenu količinu energije. Komponenta lasera koja je zadužena za to naziva se laserska pumpa. Mehanizam pumpanja kod plinskih lasera se provodi električnim izbijanjem gdje se u komori ispunjenoj aktivnim medijem, to jest plinom, dovodi visoki napon i dolazi do izbijanja elektrona. Slobodni elektroni prenose energiju preko sudara s atomom i tako ga pobuđuju. Drugi najučestaliji mehanizam pumpanja je preko izvora elektromagnetskog zračenja gdje svjetiljka zrači fotone određene valne duljine i tako pobuđuje aktivni medij. Prvi laser se sastojao od kristala rubina kao aktivnog medija i svjetiljke kao laserske pumpe. Valja napomenuti da postoji i kemijski mehanizam pumpanja gdje se za pobudu koristi energija kemijske veze. Takvi laseri imaju čestu primjenu u vojnoj industriji zbog svoje velike snage.

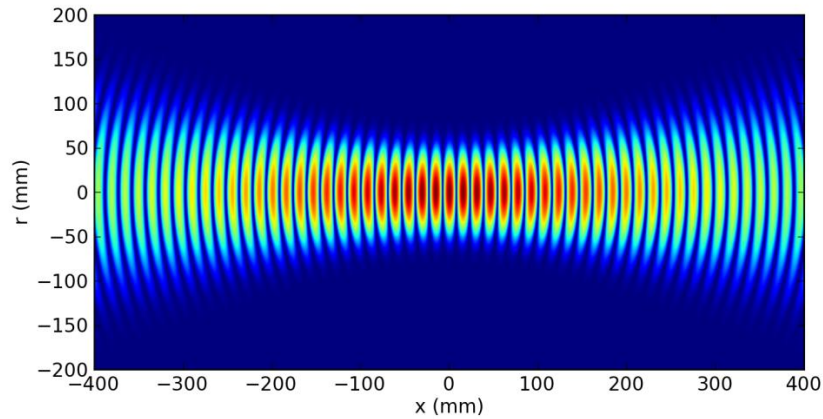
### 4.3. Optički rezonator

Zamislamo da je u aktivnom mediju stvorena inverzija napučenosti i jedan od atoma spontano emitira foton. Stvoreni foton će prilikom prolaska kroz aktivni medij stimulirati emitiranje drugih fotona i proces će se nastaviti u smislu lančane reakcije. Kada fotoni dođu do kraja aktivnog medija i napuste ga, količina nastalih fotona neće biti dovoljno velika i neće imati željeni učinak. Jedno rješenje ovog problema je da značajno povećamo aktivni medij tako da vrijeme prolaska fotona bude veće, ali takvo rješenje nije praktično. Drugo, puno praktičnije rješenje je ugradnja zrcala. Ako se na krajeve aktivnog medija postave zrcala, nastali fotoni se prilikom dolaska do kraja medija odbijaju nazad u medij te i dalje dolazi do stimulirane emisije pri čemu se proces nastavlja. Fotoni se odbijaju između dva zrcala i svakim prolaskom kroz medij stimuliraju još fotona, pa na ovaj način možemo stvoriti veliku količinu fotona pri čemu će zraka lasera imati značajno veći intenzitet. Rezonator se sastoji od dva zrcala između kojih je aktivni medij, s tim da je jedno zrcalo polupropusno kako bi dio zračenja mogao izaći i formirati zraku svjetlosti. Propusnost zrcala može iznositi od 1% do 50%, ovisno o vrsti lasera.



Slika 8. Prikaz optičkog rezonatora [13]

Ako želimo da se zračenje u sustavu amplificira te da bude koherentno i u fazi, moramo postaviti zrcala u takvom smislu da se valne fronte podudaraju. Zračenje koje nastaje u laseru unutar rezonatora se naziva Gaussov snop (ili Gaussova greda) i karakterizira ga valna fronta koja može biti opisana Gaussovom funkcijom. Ako želimo da dolazi do pojačanja zračenja, zrcala moraju biti projektirana u skladu sa zakrivljenošću zrake(valne fronte).



Slika 9. *Gaussov snop [14]*

Sada u sustavu dolazi do rezonancije i možemo reći da se formira stojni val koji ovisi o udaljenosti zrcala i valnoj dulji zračenja kako je opisano formulom.

$$N = \frac{l}{\lambda}$$

$N$  – broj valnih duljina

$l$  – udaljenost između zrcala

$\lambda$  – valna duljina

To znači da zrcala moraju biti postavljena na udaljenost koja je višekratnik valne duljine.

Ovaj zapisa možemo preformulirati:

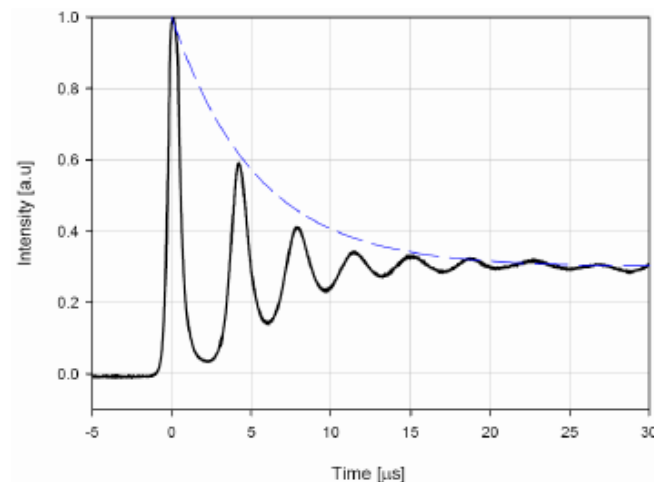
$$f = n \frac{c}{2l}$$

$f$  – frekvencija zračenja

Iz ovog zapisa vidimo da valna duljina laserske zrake zapravo ovisi o udaljenosti zrcala i može biti promjenjiva. Nastali stojni val unutar rezonatora će imati svoju frekvenciju, tako da dva različita lasera iste zrcalne udaljenosti mogu emitirati zračenje iste valne duljine.

## 5. Režim rada

Prilikom pokretanja lasera postiže se inverzija prenapučenosti koja prije emitiranja prvog fotona doseže svoj maksimum. Kada dođe do emitiranja nastali fotoni lančanom reakcijom iscrpe inverziju napučenosti te se stvara velika gustoća fotona. Kako je inverzija napučenosti smanjena, stimulirana emisija se otežava i dolazi do pada gustoće fotona. Kako se smanjuje broj fotona tako se smanjuje i proces stimulirane emisije pa je omogućeno da se ponovo uspostavi inverzija napučenosti. Ovakav oscilirajući proces se pojavljuje za vrijeme pokretanja lasera i brzo se stabilizira.



Slika 10. Početne oscilacije u intenzitetu zračenja lasera [15]

### 5.1. Kontinuirani laseri

Kontinuirani laser radi na već opisanom principu. Laserska pumpa stvara dovoljnu inverziju napučenosti koja stimuliranom emisijom dovodi do emitiranja fotona. Kada se laser pokrene nakon određenog vremena stabilizira se odnos između inverzije napučenosti i gustoće fotona nakon čega polupropusno zrcalo propušta zračenje kontinuiranog intenziteta. Snage kontinuiranih lasera često nisu velike i puno manje su od snaga od pulsnih lasera.

### 5.2. Pulsni laseri

Pulsni laser ne emitira zračenje kontinuiranog intenziteta. Njegov način rada se temelji na stvaranju impulsa značajno većeg intenziteta zračenja od njegove prosječne snage. Pulsni laser u kratkim vremenskim periodima emitira zračenje puno većeg intenziteta nego što bi ga emitirao u kontinuiranom načinu rada. Može se reći da energija nije raspoređena, već je



koncentrirana u malom vremenskom periodu. Sustav pulsnog lasera sadrži određene komponente čija je svrha prekidanje izlaska zračenja. Sustav se drži zatvorenim te se u određenim intervalima propušta zračenje. Jedna od najjednostavnijih metoda je *Q-switching*. Zasniva se na ideji stvaranja velike inverzije napučenosti i naglog emitiranja i pražnjenja. Jedno zrcalo lasera se zapriječi i lampa obasjava aktivni medij u kojemu stvara inverziju napučenosti, ne dolazi do pražnjenja jer fotoni ne mogu oscilirati između zrcala. Kada je ostvarena maksimalna inverzija napučenosti, ukloni se prepreka koja zagrađuje zrcalo i dolazi do oscilacije fotona između zrcala koji pokreću stimuliranu emisiju, inverzija napučenosti se iscrpi i dolazi do stvaranja velike gustoće fotona. Na slici 10. možemo vidjeti da je prvi skok intenziteta zračenja značajno veći od prosjeka. Ovim principom su dobiveni laseri koji mogu emitirati zračenje u impulsima koji su kratkog vremenskog vijeka, ali jako velike snage.

## 6. Primjena u znanosti

Laserska svjetlost je koherentna i monokromatska. Uz to snop laserske zrake može biti izrazito malog presjeka, što znači veliku preciznost i veliku koncentraciju energije. Sa svim ovim karakteristikama laser je našao brojna područja primjene u znanosti, posebno u metodama proučavanja kemijskih i bioloških sustava. Laser je u mnogim metodama zamijenio konvencionalni izvor svjetlosti, a napredak lasera je omogućio primjenu novih zanimljivih koncepata koje ćemo vidjeti u nastavku.

### 6.1. Laserska spektroskopija

Spektroskopija je područje znanosti koje se bavi proučavanjem spektra kao rezultata energetske stanja atoma i molekula ili spektra kao rezultat interakcije atoma i molekula. Mjeri se intenzitet i frekvencija zračenja, proučava se apsorpcija, emitiranje i raspršenje svjetlosti. Uređaji za spektroskopiju su suštinski jednostavni, sastoje se od dijela koji emitira zračenje i detektora zračenja koji bilježi promjenu zračenja nakon što je došlo do interakcije s uzorkom.

Kako bismo mogli proučavati određeni sustav i njegovu interakciju s elektromagnetskim zračenjem, potrebno je stvoriti točno definirano zračenje. U standardnim metodama se koriste posebne lampe užeg spektra gdje nastalo zračenje dodatno prolazi kroz optičke filtre kako bi se postigla što čistija i preciznija frekvencija svjetlosne zrake. U takvom sustavu lampu i optičke filtre je moguće zamijeniti s laserom podesive valne duljine. Kako je već spomenuto, valna duljina ovisi o dimenzijama oscilatora, ali nije uvijek moguće podesiti laser na široko frekvencijsko područje. Podesivi laseri su posebna vrsta lasera koja ima mogućnost podešavanja frekvencije, to jest valne duljine u rasponu većem od 50 nm te su zbog toga idealni za primjenu u spektroskopiji. Mogućnost kontinuirane promjene frekvencije daje saznanje o adsorpciji i emisije po cijelom ispitivanom području spektra pa je tako moguće dobiti precizne i detaljne informacije o ispitivanom sustavu.



Slika 11. Uređaj za lasersku spektroskopiju [16]

### 6.1.1. Ramanova spektroskopija

Ramanova spektroskopija je metoda ispitivanja energetske stanja u atomima i molekulama na temelju Ramanovog efekta. Prilikom obasjavanja plina ili tekućine s određenom svjetlošću dolazi do interakcija između fotona i čestice ispitivane tvari. Fotoni se odbijaju od čestice i dolazi do raspršenja, ali prilikom odbijanja moguće je da atomi i molekule fotonu predaju ili oduzmu dio energije. Razlika energija fotona prije i poslije interakcije je količina energije koju je čestica predala ili oduzela. Količina predane ili oduzete energije je jednaka određenim energetske stanja u čestici te tako možemo dobiti informacije o energetske stanja atoma i molekula. Za ovakvu metodu potrebna je monokromatska svjetlost kakvu je moguće proizvesti pomoću lasera jer je novonastalo zračenje koje se razlikuje u frekvenciji, to jest koje sadrži informaciju o energetske razinama, manje od 1%. Najčešće se koriste argon-ionski ili kripton-ionski laseri.

### 6.1.2. Ultrabrza laserska spektroskopija

U ovoj metodi spektroskopije se koriste ultrabrzi pulsni laseri kako bi se proučila dinamika jako brzih procesa koji se događaju na razini atoma i molekula. Primjenjuju se pulsni laseri koji mogu generirati pulseve u trajanju od 100 femtosekundi i manje. Najčešće se primjenjuju titan-safir laseri zbog sposobnosti da emitiraju takve jako kratke impulse. Metode kojima se postižu ultrakratki impulsi velikih snaga su kompleksne jer pri ekstremnijim uvjetima dolazi do novih problema kao termalnog opterećenja i ograničenja materijala, stoga ih ovdje nećemo opisivati. Dinamika procesa u atomima i molekulama na razini čestica je izrazito brza pa nam

moćnost stvaranja ultrakratkih impulsa omogućuje istraživanje mehanike određenih reakcija ili analizu intermedijara reakcije.

## **6.2. CLSM**

Konfokalni laserski skenirajući mikroskop je uređaj koji za razliku od klasičnog optičkog mikroskopa blokira svjetlo van fokusa i fokusira zraku na malo područje. Zračenje je moguće fokusirati na određenu dubinu pa se prolaskom preko uzorka pravi 2D slika. Mijenjanjem dubine fokusa moguće je napraviti više 2D slika i upariti ih kako bi dobili 3D mapu uzorka.

## **6.3. TPEF**

„Two foton excitation microscopy“ ili dvofotonska pobuđena mikroskopija je slična metoda kao CLSM, ali se temelji na drugačijem principu rada. Ova metoda omogućuje stvaranje mikroskopske 3D slike objekta, a to je moguće zbog određenih svojstva materije. Poznato je da foton mora imati energiju jednaku razlici energetske razine u atomu kako bi ušao u interakciju s elektronom, a ako foton ne sadrži dovoljno energije neće doći do interakcije. Pri većim intenzitetima moguće je da elektron prijeđe u više energetske stanje tako što primi energiju od dva ili više fotona čija je suma energija jednaka razlici tih energetske stanja. Takvu pojavu zovemo multifotonska apsorpcija i događa se samo u području velike gustoće fotona. Vjerojatnost za pojavu multifotonske apsorpcije opada s brojem fotona koji bi bili potrebni za apsorpciju, a kako do ove pojave dolazi samo pri velikim intenzitetima, najčešće se događa u području fokusa zrake gdje je gustoća fotona najveća. Poznavajući ovu pojavu moguće je koristiti laser pri analizi materijala na takvi način da koristimo zraku čija valna duljina neće biti apsorbirana, ali će u području fokusa intenzitet biti dovoljno velik da dođe do dvofotonske apsorpcije. Mijenjajući područje fokusa možemo selektivno birati područja u materijalu koja će apsorbirati zračenje i tako nam dati pobudu za daljnju analizu.

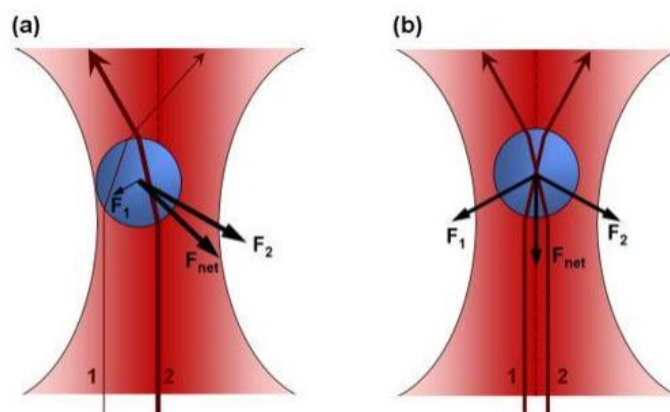
## **6.4. Lasersko hlađenje**

Moguće je koristiti lasersko zračenje i za postizanje ekstremno niskih temperatura. Da bi se to postiglo prvo je potrebno konvencionalnim metodama značajno ohladiti plin. Takav hladni plin se usmjerava kroz šupljinu kako bi se oblikovala atomska zraka to jest da bi se dobila

skupina atoma istog smjera kretanja. Laser se postavlja nasuprot šupljine tako da je zraka svjetlosti usmjerena suprotno od smjera kretanja atoma. Potrebno je naglasiti da foton, iako nema masu, ima količinu gibanja tako da će se u ovom slučaju fotoni sudarati s atomima koji se kreću u suprotnom smjeru, predavati im količinu gibanja i tako ih usporavati i smanjivati temperaturu plina na izlazu iz šupljine. Atom ulazi u interakciju s fotonom definirane energije pa je zbog toga potrebno lasersku zraku provoditi kroz magnetsko polje kako bi se dobio spektar valnih duljina fotona, to jest fotone različitih frekvencija. To se provodi kako bi fotoni mogli ući u interakciju s atomima različitih brzina. Ovom metodom će se plin ohladiti do 0,1 K ali je moguće još dodatno ohladiti plin pomoću lasera. Plin se koncentrira u mali prostor gdje se u smjesu usmjerava 6 lasera, svaki laser iz jednog smjera jedne osi. Laserske zrake su usmjerene u smjesu i zračenje je točno definirane valne duljine, takve da foton ima manju energiju od energije apsorpcije. Ako se atom kreće u smjeru laserske zrake doći će do Dopplerovog efekta, foton će imati nižu valnu duljinu u odnosu na taj atom i doći će do interakcije i usporavanja atoma. Ovom metodom je moguće ohladiti smjesu do temperatura od  $10^{-4}$  K. Hlađenje s laserima na toliko niskim temperaturama je omogućilo bolje shvaćanje materije u ekstremnim uvjetima i njegovih svojstava i preciznije izračune određenih konstanti na kojima se temelje brojni mjerni instrumenti.

## 6.5. Optička pinceta

Optička pinceta je uređaj koji koristi svjetlost kako bi pomicao i zarobio mikroskopske čestice. Rad optičke pincete se temelji na mogućnosti fotona da posjeduje količinu gibanja. Ako svjetlost prolazi kroz leću koja mijenja smjer svjetlosnog snopa onda se mijenja količina gibanja svjetlosti, što znači da se određena količina gibanja mora prenijeti na leću. Možemo reći da se fotoni prolaskom kroz leću odbijaju i tako je odguruju. Količina gibanja koju posjeduje foton je mala pa će i sila koja djeluje na leću biti mala. Ista pojava se događa kada se foton odbija od neke čestice. Optička pinceta se sastoji od lasera, dvije leće i detektora. Snop laserske svjetlosti se usmjerava na leću gdje se formira žarište kako je prikazano na slici 12.



Slika 12. Optička pinceta [17]

U središtu zrake je najveća gustoća fotona što znači da će u slučaju pomicanja čestice van središta interakcija s fotonima na jednoj strani biti veća. Interakcija s više fotona će uzrokovati veću silu na jednoj strani čestice kako je prikazano na Slici 12. pod a). Takva sila će djelovati u smislu vraćanja čestice u središte zrake i uspostave ravnoteže. Detektor mjeri razinu raspršenosti svjetlosti, to jest količinu svjetlosti koja je ušla u interakciju s česticom te se s tim podacima može odrediti položaj čestice u vrijednostima i manjim od 1 nm. Sila koja se javlja je u razini pikonjutna i ova metoda se koristi za pomicanje malih čestica. Koristi se za zarobljavanje pojedinačnih atoma i hvatanje proteina, enzima i virusa pri proučavanju. Često se na određenu česticu povezuje element( atom ili skupina) koja ima svojstvo takva da je moguće djelovati na nju pomoću fotona.

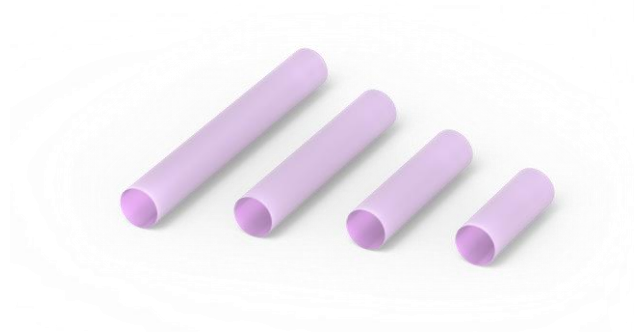
## 7. Primjena u industriji

Posebna svojstva laserske zrake i posebno njezine koncentriranosti u uskom području čine laser idealnim alatom za brojne postupke u industriji. Napredak na tom području je doveo do razvijanja lasera koji imaju snagu od nekoliko megawatta i više, što je već dovoljno za određene postupke obrade metala. Laserski alati ne dolaze u kontakt s materijalom pa je i trošenje alata znatno manje. Pulsni laseri zbog svoje velike snage mogu odstranjivati materijal pretvarajući ga u plazmu, a zbog iznimno kratkog vremena pulsa prijenos topline na ostatak materijala je beznačajan. Rezultat toga je velika preciznost i čistoća procesa. U industriji su najčešće pojavljuje nekoliko vrsta lasera koji su se pokazali idealnim za ovo područje.

## 7.1. Industrijski laseri

### 7.1.1. Nd:YAG laser

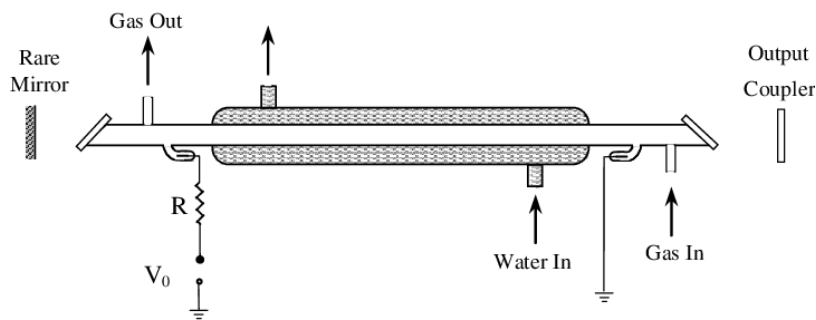
Nd:YAG je laser koji za kruti aktivni medij koristi Itrij Aluminijev granat dopiran s Neodimijem (oko 1%) koji zamjenjuje atome itrija u kristalnoj rešetci. Laser ima sustav od četiri razine i proizvodi zračenje u IR spektru valne duljine 1064 nm. Radi u kontinuiranom i pulsnom načinu rada. Komercijalno je najčešći laser s krutim aktivnim medijem, a zahtjevnija izrada laserske šipke ju čini najskupljim dijelom lasera. Itrij aluminijev granat ima veliku toplinsku vodljivost što ga čini pogodnim za velike snage koje se kreću u rasponu od 1 do 5 kW.



Slika 13. Nd:YAG kristalni štap [18]

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

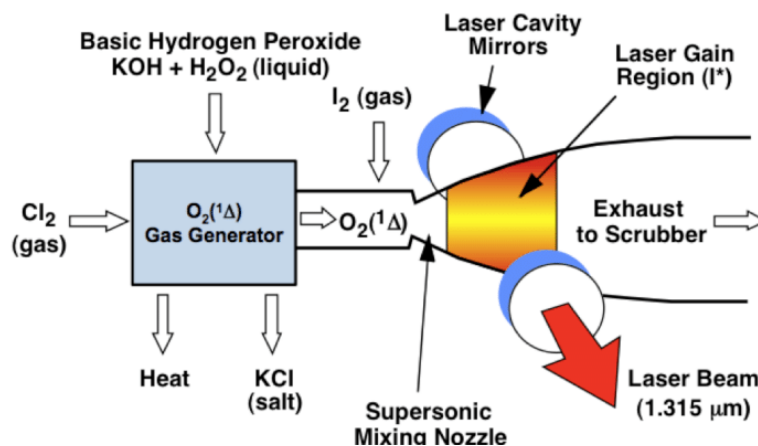
CO<sub>2</sub> laser koristi mješavinu ugljičnog dioksida, helija i dušika kao aktivni medij. Moguće je koristiti i čisti CO<sub>2</sub>, ali ova mješavina se pokazala kao najefikasnija. Pobuda se vrši preko električnog izbijanja ili RF zračenja. Dušik je pobuđen električnim izbijanjem u metastabilno stanje nakon čega predaje energiju atomima CO<sub>2</sub> u kojima dolazi do stimulirane emisije. Helij se koristi kako bi depopulirao donje pobuđeno stanje i za odvođenje topline. CO<sub>2</sub> laser ima dobru kvalitetu svjetlosnog snopa te je podesiv na više valnih duljina u rasponu 9 - 11 μm. Najčešće će komercijalne izvedbe imati zraku valne duljine od 10.6 μm, ali za mehaničku obradu češće će se koristiti druge valne duljine zbog bolje apsorpcije zračenja radnog komada. Zbog njegovih dobrih svojstava istraženo je i razvijeno više vrsta CO<sub>2</sub> lasera. Pokazao se kao efikasan sustav koji može postići oko 20% efikasnosti prilikom transformacije električne u optičku energiju. Zbog svega navedenoga CO<sub>2</sub> laseri su danas najzastupljeniji u industriji za obradu materijala i proizvode se sa snagama do 25 kW.



Slika 14. Shema CO<sub>2</sub> lasera [4]

### 7.1.3. Kisik-jod laser

COIL (*chemical Oxygen Iodine Laser*) ili *kisik-jod laser* je kemijski laser koji za pobudu koristi kemijsku reakciju. Sastoji se od vodene otopine KOH i H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, J<sub>2</sub> i plinovitog Cl<sub>2</sub>. Vodena otopina reagira s elementarnim klorom te se u reakciji ispušta energija i kisik koji se nalazi u pobuđenom stanju (singlet kisik). Plinoviti kisik se nalazi u metastabilnom stanju u kojem može biti oko 45 minuta, što mu daje dovoljno vremena da prenese energiju na atome joda, nakon čega u aktiviranom jodu dolazi do stimulirane emisije. Kemijskom reakcijom se dobiva visoka kvaliteta zračenja i velika snaga, hlađenje je olakšano zbog velikog protoka plinovitih produkata. Nastalo zračenje je valne duljine od 1315 nm što ga čini pogodnim za prijenos s optičkim kabelom. Zbog velike preciznosti i mogućnosti prijenosa zračenja optičkim kabelom kisik jod laser je našao primjenu i u industriji te se ove vrste lasera proizvode sa snagama u rasponu do 45 kW.

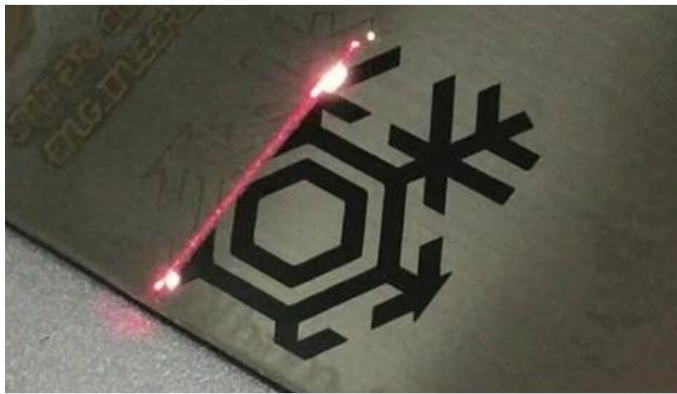


Slika 15. Shema kisik-jod lasera [18]



## 7.2. Lasersko graviranje

Iako nije napredna metoda i ne zahtijeva posebne laser, lasersko graviranje vrijedi spomenuti zbog njezine velike primjene u industriji jer se ova metoda pokazala vrlo efikasnom. Pulsni laser se može prilagoditi tako da proizvodi pulseve velike snage u jako kratkom vremenu. Takvo zračenje u interakciji s materijalom prenosi velike količine energije početnom sloju materijala i isparava ga ili čak pretvara u plazmu. Zbog jako kratkog trajanja pulsa energija se neće toplinski proširiti kroz ostatak materijala. Za graviranje koristimo laser tako da se s željenog materijala odstrani sloj određenog oblika dubine 100  $\mu\text{m}$  i manje. Laser mora biti prilagođen materijalu ovisno o njegovoj apsorpciji te materijal mora biti pogodan za ovaj proces. Velika prednost ove metode je što je beskontaktna i ne zahtijeva tintu, velike je preciznosti oznake i velike brzine procesa.

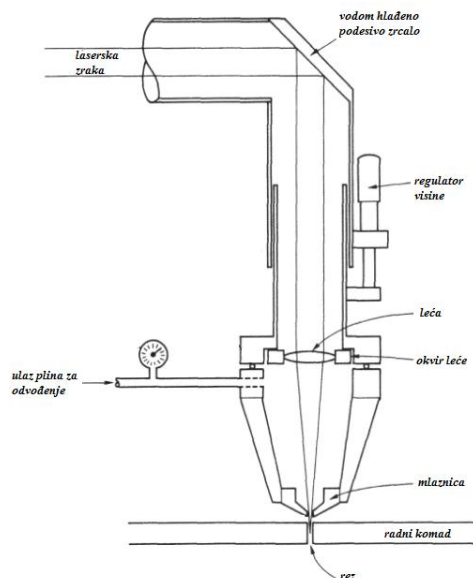


Slika 16. Lasersko graviranje [19]

## 7.3. Lasersko rezanje

Za lasersko rezanje se koriste  $\text{CO}_2$  i Nd:YAG laseri.  $\text{CO}_2$  laseri su ipak više zastupljeni pa je fokus u ovom dijelu više usmjeren na njih, iako je princip rada jako sličan.

Laser proizvodi IC zraku velikog intenziteta koja se fokusira lećom te se usmjerava na materijal koji se reže, zraka otapa materijal i stvara šupljinu promjera ne većeg od 0,5 mm. Uz lasersku zraku postoji i mlaznica kroz koju struji plin, njezina svrha je otpuhivanje otopljenog materijala kroz novonastalu šupljinu. Proces je kontinuiran i laserska zraka se pomiče pomoću zrcala.



Slika 17. Schema laserskog rezanja [3]

Ovo je samo jedna od izvedbi laserskog rezanja, način na koji se koristi laser ovisi o vrsti i debljini materijala. U slučaju netopljivosti materijala laser isparava materijal ili ga raspada do plinskih produkata nakon čega ga plin iz mlaznice uklanja. Rez je debljine 0,1 – 1 mm pa je moguće vrlo precizno rezanje, a brzina rezanja ovisi o vrsti i debljini materijala i snazi lasera. Laseri za rezanje su često skuplji od klasičnih metoda rezanja ali troškovi rada i održavanja su manji jer nema kontakta s materijalom koji se reže. Uz to nije potrebno mijenjati postavke lasera za rezanje različitih materijala, tako da je moguće rezati više različitih materijala bez značajnijeg podešavanja lasera. Ova metoda je i mnogo tiša i čišća od klasičnih metoda rezanja te element nakon rezanja vrlo često ne zahtijeva nikakvu dodatnu obradu.

*Rezanje polimera* – termoplasti se režu na već opisani način, dok se termoseti ne mogu topiti već se zagrijavanjem raspadaju. U slučaju termoseta mlaznica je i dalje prisutna za odvođenje produkata raspada. Ako dolazi do otapanja materijala kvaliteta reza će biti dobra ali će s donje strane radnog komada doći do mikroskopskog naboravanja metala. Kod termoplasta će zbog raspada materijala rez biti gladak i prekriven ugljikom koji nastaje kao produkt raspada. Koriste se CO<sub>2</sub> laseri snaga od 500 do 1500 W jer većina polimera ne apsorbira zračenje koje proizvodi Nd:YAG laser. Ispod je prikazana slika tablice brzine rezanja ovisno o vrsti i debljini ploče, a laseri snage 10 kW mogu rezati čelik i do 40 mm debljine.

Thickness (mm)	Acrylic (PMMA) (m min <sup>-1</sup> )	Polyethylene (m min <sup>-1</sup> )	Polypropylene (m min <sup>-1</sup> )	Nylon (m min <sup>-1</sup> )	ABS (m min <sup>-1</sup> )	Polycarbonate (m min <sup>-1</sup> )
1	35.0	11.0	17.0	20.0	21.0	21.0
2	15.0	4.0	7.0	8.0	8.2	8.2
3	8.0	2.2	4.0	4.8	5.0	5.0
4	5.5	1.5	2.8	3.5	3.6	3.6
5	4.5	1.2	2.0	2.6	2.7	2.7
6	3.5	1.0	1.6	2.0	2.1	2.1
7	3.0	0.8	1.3	1.6	1.7	1.7
8	2.3	0.6	1.1	1.2	1.3	1.3
9	1.9	0.5	0.9	1.0	1.1	1.1
10	1.5	0.4	0.7	0.8	0.9	0.9
12	1.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6

Slika 18. Tablica brzine rezanja CO<sub>2</sub> lasera od 500 W [3]

Potrebno je naglasiti da neki polimeri nisu pogodni za rezanje laserom, kao PVC jer dolazi do raspada i nastaje klorovodična kiselina koja je otrovna i izrazito korozivna.

*Rezanja keramike* – moguće je i rezanje keramike, ali ako se koristi metoda prikazana na slici 17. proces rezanja je dugotrajan i često je potrebno rezati jednostavne oblike pa se zbog toga koristi „scribing“ metoda. Ova metoda podrazumijeva stvaranje malih šupljina u liniji po kojoj je potrebno izrezati ploču. Šupljine stvaraju slabe točke pa prilikom mehaničkog opterećenja ploča puca tako da lom prati liniju. Ova metoda znatno ubrzava vrijeme rezanja jer nije potrebno topiti keramiku duž cijele linije pa brzine rezanja obično dosežu i do 20 m/min.

*Rezanje metala* – pokazalo se da prilikom rezanja čelika polovica energije dolazi od reakcije oksidacije željeza.



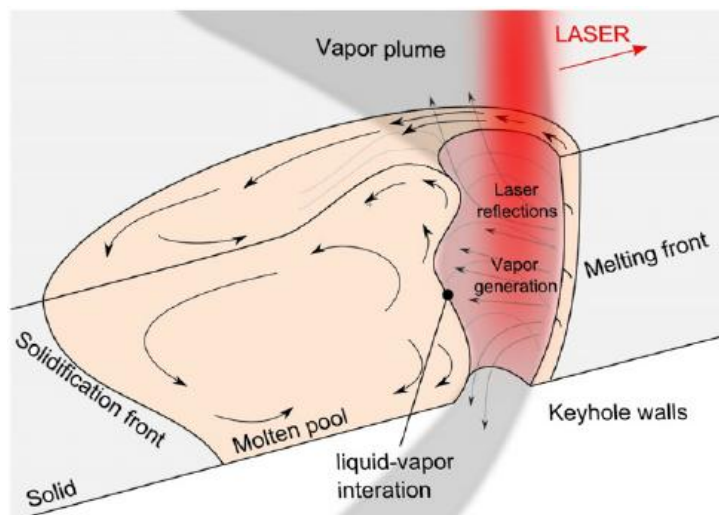
Plinovi koji se koriste za rezanje mogu se podijeliti na reaktivne i inertne ovisno o tome dolazi li do reakcije. U primjeni kisika prednost je bila dodatna energija dobivena iz reakcije pa su se mogli primjenjivati laseri manjih snaga, ali radi svojstava otopljenog produkta dolazilo bi do skrutnjavanja kapljica i neravne površine reza. S razvojem lasera većih snaga od 3 do 4 kW izgubila se potreba za korištenjem energije reakcije pa je dušik zamijenio kisik.

Rezanje u inertnoj atmosferi u kojoj ne dolazi do reakcije je omogućilo puno preciznije rezove.

CO<sub>2</sub> laseri su sve više u primjeni prvenstveno zbog ekonomičnih razloga. Zračenje Nd:YAG lasera je takvo da može prolaziti kroz optička vlakna što omogućuje lakše dovođenje zrake do radnog komada, te je moguće je koristiti staklene leće velike preciznosti za razliku od CO<sub>2</sub> lasera koji zahtjeva posebne infracrvene leće i ne može raditi u kombinaciji s optičkim kabelom. Isto tako zračenje Nd:YAG lasera se manje reflektira pa je lakša obrada visoko reflektirajućih materijala.

#### **7.4. Lasersko zavarivanje**

Zavarivanje je proces spajanja dvaju metala njihovim topljenjem ili topljenjem trećeg materijala na području spoja. Laser se koristi tako da se na području kontakta dvaju metala usmjerava zračenje koje zagrijava tanku površinu metala s kojim dolazi u kontakt. Zračenje nastalo CO<sub>2</sub> ili Nd:YAG laserom se značajno reflektira i samo 8-20% zračenja se konvertira u toplinsku energiju pa se takvi procesi ekonomski ne mogu mjeriti sa standardnim metodama zavarivanja te se primjenjuju u posebnim situacijama. Međutim, poznavajući fenomene i mehanizme procesa moguće je stvoriti uvijete prilikom kojih dolazi do stvaranja šupljine koja se naziva „ključanica“ koja je prikazana na slici 19. Prilikom zagrijavanja materijal se topi i isparava, u nekim slučajevima dolazi i do stvaranja plazme. Zračenje dolazi u interakciju s tim produktima i sveukupno se do 90% zračenja konvertira u toplinu. Zračenje koje upadne u šupljinu se prilikom reflektiranja odbija od stijenke i dodatno apsorbira, a metalne pare, otopljena masa i plazma isto upijaju zračenje te toplinu predaju metalu. Ova metoda se naziva zavarivanje protaljivanjem i potrebni su laseri većih snaga kako bi došlo do isparavanja i stvaranja plazme, ali je efikasnost procesa znatno veća.



Slika 19. zavarivanje protaljivanjem [20]

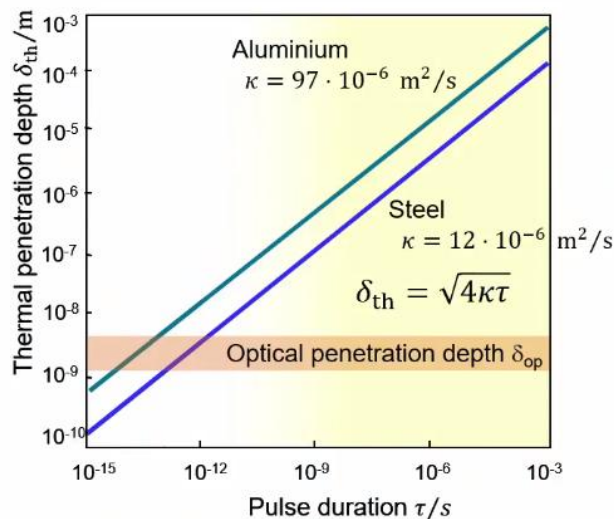
Ova metoda zavarivanja ima i efektivne gornje granice jer povećanjem snage lasera dolazi do stvaranja većeg područja plazme i metalnih para a samim time i većeg rasipanja topline na šire područje. Kao posljedicu toga povećavanjem snage lasera nećemo moći kontinuirano povećavati dubinu zavara i nastajat će širi varovi. To je i jedan od razloga za korištenje procesnih plinova na jednak način kao i u procesu laserskog rezanja. Inertni plinovi, kao argon i CO<sub>2</sub>, imaju ulogu sprječavanja oksidacije metala i smanjivanja oblaka plazme. Efikasnost i brzina zavarivanja će uvelike ovisiti o apsorpciji metala, tako bakar i aluminij imaju veću refleksiju pa je i obrada zahtjevnija.

Prednosti laserskog zavarivanja su preciznost i agilnost procesa, podrazumijevajući da je laser u većini slučajeva postavljen na robotsku ruku. Možda jedna od najbitnijih prednosti je sposobnost provođenja mikro zavarivanja. Zbog toga što nema kontakta između alata i radnog komada omogućena je velika preciznosti te je moguće spajati metalne dijelove na jako malim razinama. Snage lasera za zavarivanje mogu biti i do 25 kW.

Sveukupni trošak laserskog zavarivanja po dužini je prema analizama otprilike 50% jeftiniji od MIG metode. Uvedena su i razna unaprjeđenja s ciljem povećanja efikasnosti i poboljšanja u smislu dubine i brzine zavarivanja. Jedno od najbitnijih poboljšanja je tehnika dualnih fokusa, gdje se koriste dvije zrake u određenoj konfiguraciji te se tako s većom kontrolom i kvalitetnije može rasporediti prijenos energije na radni komad.

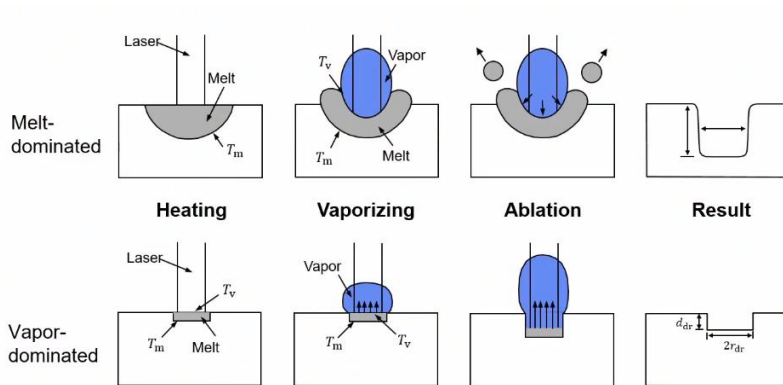
## 7.5. Ablacija i bušenje

Proces laserskog bušenja se temelji na ablaciji, što podrazumijeva trošenje površinskog sloja materijala, tako bušenje podrazumijeva kontinuiranu ablaciju određenog područja. Ablacija laserom, to jest fotoablacija, se provodi pulsnim laserom. Prilikom zračenja materijala energija koju prenosimo na radni komad se topline širi kroz materijal te može uzrokovati termalna naprezanje i mijenjanje geometrije radnog komada. Smanjenjem vremena zračenja skraćujemo i područje širenja topline tako da s izrazito kratkim pulsevima možemo značajno spriječiti širenje topline i bolje usmjeriti energiju na željeno područje. Na slici 20. je prikazana ovisnost termalne penetracije o vremenu trajanja pulsa za aluminij i čelik.



Slika 20. Ovisnost termalne penetracije o vremenu impulsa[3]

Pri jako kratkim pulsevima velikih intenziteta sva energija prenesena zračenjem se usmjerava na usko područje i ne rasipa se topline pa dolazi do otapanja i isparavanja materijala. Postoje dvije metode laserske ablacije, u jednom slučaju dolazi do otapanja i isparavanja materijala i nastali pritisak od stvorenih para istiskuje otopljeni materijal, drugi slučaj je korištenje impulsa velikog intenziteta kako bi došlo do trenutnog isparavanja materijala. U oba slučaja je prisutna i tekuća i plinska faza u većim i manjim razmjerima. Rezultat ablacije će ovisi i o metodi kojoj koristimo kao što vidimo na Slici 21.



Slika 21. Vrste laserske ablacije [3]

Kod bušenja se radi samo o kontinuiranoj ablaciji određenim mehanizmom. Postoji više tehnika bušenja pomoću lasera ovisno o tome kako se laserska zraka kreće i koji je režim rada lasera. Laser se uvelike koristi za bušenje i odstranjivanje površinskog sloja materijala, pogotovo tamo gdje je potrebna velika preciznost. Vrijeme trajanja impulsa je u intervalima od milisekundi do femtosekundi i moguće je praviti šupljine promjera i do 1  $\mu\text{m}$ . Laserom je značajno olakšano obrađivanje površinskog sloja materijala kompleksne geometrije.

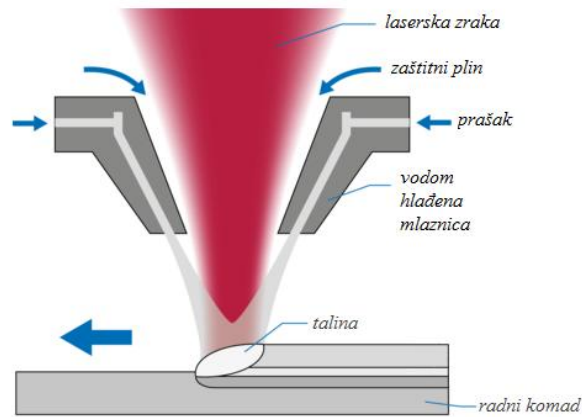


Slika 22. lasersko uklanjanje površinske hrđe s čelika [21]

## 7.6. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja podrazumijeva proizvodnju elemenata nanošenjem tankog sloja čestica, nanosi se veći broj slojeva kako bi dobili oblik željene debljine. Element koji se razvija podijeli se u veći broj slojeva te se sloj po sloj nanosi. Ova metoda omogućuje puno lakšu proizvodnju dijelova kompleksne geometrije. Postoji nekoliko metoda laserske aditivne proizvodnje, ali možda najbitnija je „metal laser deposition“ ili laserska depozicija metala. Ova metoda podrazumijeva da se uz lasersku zraku ubacuje metalni prašak koji se u laserskoj

zruci topi i deponira na radni komad. Uz lasersku zraku se upuhuje i zaštitni plin koji sprječava oksidaciju metala.



Slika 23. Laserska depozicija metala [20]

Ovaj proces se primjenjuje i za popravak određenih elemenata. Tako se trošenje lopatica turbina može popraviti s adicijom metala na potrošene krajeve. Laserska depozicija metala je relativno nov proces, ali ima brojne prednosti, od kompleksne geometrije i uštede materijala do mogućnosti brze izrade prototipa.



## 8. Zaključak

Iako je princip rada i način funkcioniranje lasera u smislu broja komponenti jednostavan, laser je jedan od najznačajnijih izuma u fizici. Laser se sastoji od aktivnog medija, pumpe i optičkog rezonatora. Ima sposobnost emitiranja zračenja različitih valnih duljina u pulsnom ili kontinuiranom načinu. U vrijeme otkrića lasera još nije bilo jasno vidljivo veliko područje primjene laserske tehnologije ali su kroz godine otkrivena brojna područja primjene u vojnoj industriji, medicini, telekomunikaciji i znanosti tako da možemo zaključiti da je velika prednost lasera u mogućnosti široke primjene u različitim područjima. Moderni laseri s velikom kvalitetom svjetlosne zrake i iznimnim snagama omogućuju primjenu na novim područjima. Primjena lasera u industriji je omogućila čišće i ekonomski isplativije procese, a zbog svoje visoke preciznosti i snage moderni laser je omogućio razvoj mikro-strojne obrade koja je vrlo zastupljena u računalnoj i vojnoj industriji. Njegova primjena u znanosti je od iznimnog značaja gdje se koristi za postizanje ekstremnih uvjeta u eksperimentima koji su omogućili nova saznanja na području fizike. Omogućio je bržu i precizniju analizu kemijskih i bioloških sustava. Istraživanja na području lasera se i dalje vode jer se njegovo područje primjene konstantno širi. Razmatrajući utjecaj lasera na različita područja ljudskog djelovanja u kojima ima značajnu ulogu jasno je da će laserska tehnologija biti široko korištena u budućnosti.

## 9. Literatura

1. C. Breck Hitz, James J. Ewing, Jeff Hecht - *Introduction to laser technology* (2004)
2. Jeff Hecht - *The laser guidebook-McGraw* (1999)
3. Colin E. Webb, Julian D. C. Jones - *Handbook of Laser Technology Applications* vol. 3 (2004), 1557-1693, 751-791
4. Colin E. Webb, Julian D. C. Jones - *Handbook of Laser Technology Applications* vol. 2 (2004), 751-791
5. Halina Abramczyk - *Introduction to Laser Spectroscopy* (2005)
6. Mario Bertolotti - *The history of the laser* (2005)
7. William M. Steen - *Laser Material Processing* (1996)
8. [https://blocklab.stanford.edu/optical\\_tweezers.html](https://blocklab.stanford.edu/optical_tweezers.html) (pristup 15. kolovoza 2022.)
9. <https://www.photometrics.com/learn/single-molecule-microscopy/optical-trapping> (pristup 18. Kolovoza 2022.)
10. [https://www.rp-photonics.com/laser\\_additive\\_manufacturing.html](https://www.rp-photonics.com/laser_additive_manufacturing.html) (pristup. 22. kolovoza 2022.)
11. John Ion - *Laser processing of engineering materials\_ principles, procedure and industrial application* (2005) 347-380
12. <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-chemistry-flexbook-2.0/section/5.12/primary/lesson/energy-level-ms-ps/> (pristup 12.kolovoza 2022.)
13. <https://physics.stackexchange.com/questions/351279/what-optical-resonator-configuration-produces-the-most-output-power-for-a-laser> (pristup 14.kolovoza 2022.)
14. <https://www.comsol.com/blogs/understanding-the-paraxial-gaussian-beam-formula/>
15. [https://www.rp-photonics.com/relaxation\\_oscillations.html](https://www.rp-photonics.com/relaxation_oscillations.html) (pristup 14.kolovoza 2022.)
16. Bruker.com (pristup 14.kolovoza 2022.)
17. [https://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Optical\\_Tweezers](https://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Optical_Tweezers) (pristup 15.kolovoza 2022.)
18. <https://directedlight.com/laser-components/catalog/nd-yag-rods/> (pristup 15.kolovoza 2022.)
19. <https://www.heatsign.com/stainless-steel-marking/> (pristup 15.kolovoza 2022.)
20. <https://www.laserline.com/en-int/keyhole-welding/> (pristup 16.kolovoza 2022.)
21. <https://www.laserflux.com/en/solutions/rust-removal/> (pristup 20.kolovoza 2022.)