

# Primjena laserskog zračenja u medicini

---

**Dobrota, Dora**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:938746>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Science](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet

# **Primjena laserskog zračenja u medicini**

Završni rad

Dora Dobrota

Split, srpanj 2023.

## Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet  
Odjel za fiziku  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

### Primjena laserskog zračenja u medicini

Dora Dobrota

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

#### Sažetak:

U ovom je radu na temelju literature i znanja iz opće, moderne i kvantne fizike te znanstvenih radova i članaka, opisan način rada, dijelovi i vrste lasera te konačno karakteristike i primjena laserskog zračenja, s posebnim naglaskom na primjenu u medicini. Laser je izvor visokokoherentne monokromatske usmjerene svjetlosti velikoga intenziteta. Ubrzo nakon njegovog izuma, laser je zbog specifičnih svojstava pronašao primjenu u raznim područjima života. Najraznovrsniju primjenu lasersko zračenje ima u području medicine. Primjerice s laserom se može susresti prilikom provođenja znanstvenih istraživanja, u dijagnostici, terapiji i kirurgiji. Zbog iznimne snage koju lasersko zračenje može imati, prilikom rukovanja njime potrebno je koristiti zaštitnu opremu.

**Ključne riječi:** svjetlost, energija, laser, primjena lasera u medicini, zaštita od zračenja

**Rad sadrži:** 27 stranica, 18 slika, 1 tablica, 28 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku

**Mentor:** doc. dr. sc. Ivana Weber

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Ivana Weber  
izv. prof. dr. sc. Bernarda Lovrinčević  
Josipa Šćurla, mag. phys.

**Rad prihvaćen:** 19. srpnja. 2023.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

## Basic documentation card

University of Split  
Faculty of Science  
Department of Physics  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

### Medical Application of Laser Radiation

Dora Dobrota

University undergraduate study programme Physics

#### Abstract:

This thesis is based on literature and knowledge from general, modern and quantum physics as well as scientific works and papers. The method of operation, parts, types of lasers and finally the characteristics and medical applications of laser radiation are described through thesis. A laser is a source of highly coherent monochromatic directional light of high intensity. Shortly after the invention of the laser, due to its specific properties, it found application in various areas of life. The most diverse application of laser radiation is found in the field of medicine. For example, lasers can be used in conducting scientific research, diagnostics, therapy, surgery, etc. Due to the extreme danger that laser radiation can have it is necessary to use appropriate protective equipment when handling it.

**Keywords:** light, energy, laser, application of lasers in medicine, radiation protection

**Thesis consists of:** 27 pages, 18 figures, 1 tables, 28 references. Original language: Croatian.

**Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Ivana Weber

**Reviewers:** Assist. Prof. Dr. Ivana Weber  
Assoc.. Prof. Bernarda Lovrinčević  
Josipa Šćurla, M. Phys

**Thesis accepted:** July 19, 2023

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Povijest lasera .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Osnovno o laseru .....</b>	<b>4</b>
3.1	Način rada lasera.....	4
3.2	Procesi potrebni za nastanak laserske svjetlosti .....	5
3.3	Energijske razine .....	9
3.4	Dijelovi lasera.....	11
3.5	Podjela lasera .....	13
3.6	Parametri laserskog zračenja .....	13
<b>4</b>	<b>Primjena lasera u medicini .....</b>	<b>17</b>
4.1	Općenita primjena lasera .....	17
4.2	Lasersko zračenje u medicini.....	18
<b>5</b>	<b>Uvjeti i mjere zaštite od optičkog zračenja.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Zaključak.....</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>26</b>

# 1 Uvod

Laser (akr. od eng. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane emisije zračenje*) je izvor visokokoherentne monokromatske usmjerene svjetlosti velikoga intenziteta. Zračenje nastaje kada atomi naprave prijelaz iz jednog energijskog nivoa u drugi, odnosno događa se emisija fotona koju proizvodi atom ili molekula kada na njega djeluje drugi foton.[1, 2]

Osnovni dijelovi lasera su optički rezonator, aktivni medij i laserska pumpa. Svojstva koja čine glavnu razliku između „obične“ (primjerice svjetlost nastala pomoću žarulje) i laserske svjetlosti jesu koherentnost, monokromatičnost i usmjerenost koje posjeduju laserska zraka. Laseri se dijele prema agregatnom stanju aktivne tvari na kojoj se laserski efekt događa (plinski, tekući i čvrsti laser), prema načinu pobude (optički pumpanim, pumpanim sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju, ozračivanjem snopovima čestica visoke energije i kemijskim relacijama) i prema načinu rada (kontinuirani i impulsni).

Lasersko zračenje primjenjuje se u industriji, vojsci, medicini i mnogim drugim granama svakodnevnog života (printer, DVD, CD itd.). Zbog svojih specifičnih svojstava ima mogućnost fokusiranja na točku jako malog promjera što rezultira velikom gustoćom unesene energije. Laserska energija iznimno je jaka, stoga neopreznim korištenjem tog zračenja možemo vrlo lako izazvati opekline i druga tjelesna oštećenja. Ako je riječ o jakim laserima, poput onih koji se primjenjuju u medicini i industriji, obvezno je prilikom rukovanja njime koristiti prilagođenu zaštitnu opremu.

## 2 Povijest lasera

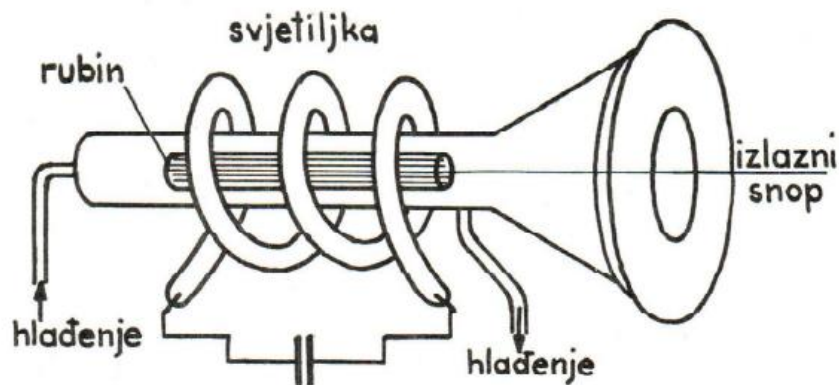
1917. godine Albert Einstein u svom je radu o kvantnoj mehanici zračenja pokazao kako Planckov zakon zračenja crnog tijela u termičkoj ravnoteži proizlazi iz međudjelovanja spontane i stimulirane emisije te apsorpcije zračenja. On je otkrio stimuliranu emisiju fotona na kojoj se temelji djelovanje lasera. Kod sustava u termičkoj ravnoteži vjerojatnost nastanka stimulirane emisije zanemariva je u usporedbi s ostala dva procesa. Stoga je bilo potrebno pronaći teorijske i eksperimentalne osnove za pojačanje zračenja nastalog procesom stimulirane emisije. Rješenja su tražili mnogi znanstvenici (J. Weber i C. H. Townes, A. L. Schawlow, N. G. Basov itd.). [3] Prvi uređaj koji koristi stimuliranu emisiju zračenja bio je plinski amonijski maser, izumljen 1954. godine od strane Townesa. MASER (eng. „*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“) je generator pomoću kojeg se stimuliranom emisijom zračenja pojačavaju mikrovalovi. Istraživanja i mogućnosti vezane uz maser širile su se i na valove optičkog područja. Iz navedene teorijske osnove proizlazi prvi LASER koji emitira svjetlost u vidljivom dijelu spektra. Izumio ga je Theodore H. Maiman (Slika 2.1) 1960. godine, tako što je bljeskalicom obasjavao crveni kristal rubina i na taj način dobio lasersku emisiju u crvenom dijelu spektra (694 nm).



*Slika 2.1 Theodore H. Maiman sa kristalom rubina - centralnim dijelom prvog lasera.  
(slika preuzeta s [2])*

Tako je unutar jednog uređaja spojio osnovne elemente potrebne za nastanak laserske emisije: aktivni medij (kristal rubina), rezonantnu šupljinu s dva rubna zrcala (posrebrene plohe kristala) i lasersku pumpu (svjetlost/bljeskalica). Vrlo brzo nakon otkrića rubinskog lasera (Slika 2.2), izumljeni su plinski (1961), poluvodički (1962) i tekući (1963) laseri. Otkriće i razvoj lasera zasnovano je na zakonima kvantne teorije zračenja. Pomoću tih zakona može se objasniti glavni proces u aktivnom materijalu lasera, a to je stimulirana emisija. [3, 4]

Odmah nakon što je izumljen, laser je postao jedan od najpriznatijih i najpoznatijih otkrića fizike. Zbog snage i tehnologije koja je u njemu sadržana, pronašao je primjenu u raznim područjima života.



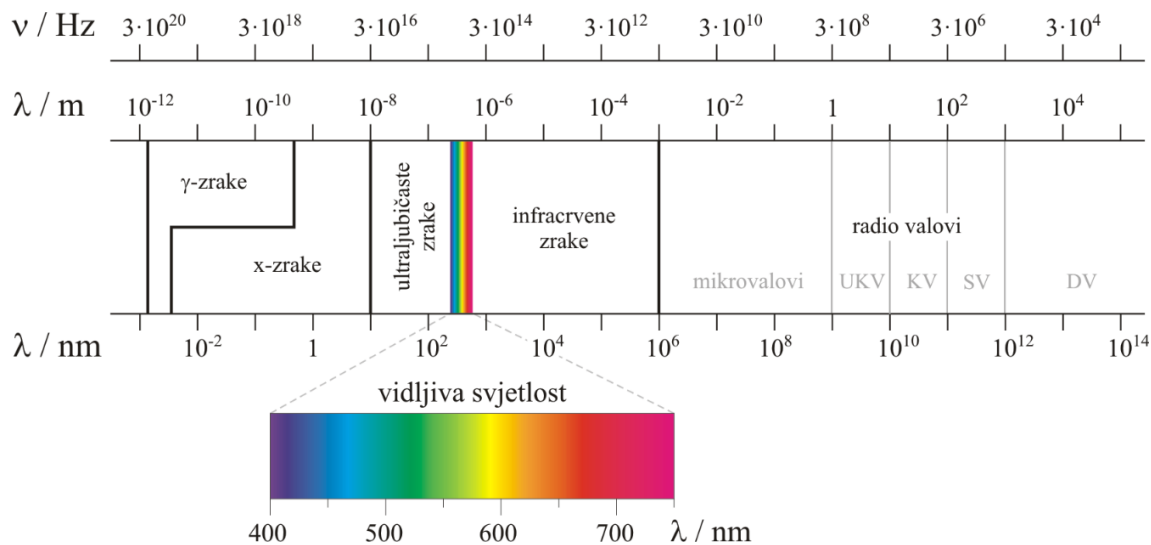
*Slika 2.2 Rubinski laser. (slika preuzeta s <https://hrcak.srce.hr/file/249461> [5])*



### 3 Osnovno o laseru

#### 3.1 Način rada lasera

Za bolje razumijevanje rada lasera potrebno je reći nešto više o svjetlosti, fotonima i atomima. Svjetlost se u fizici definira kao elektromagnetsko zračenje (spektar prikazan na Slici 3.1) vidljivo ljudskom oku.



*Slika 3.1 Spektar elektromagnetskog zračenja (slika preuzeta s*

*[https://www.periodni.com/gallery/spektar\\_elektromagnetskog\\_zracenja.png](https://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png) [6])*

Osim što se širi kao transverzalni elektromagnetski val, svjetlost se može opisati i preko fundamentalnih čestica, fotona, koje se u vakuumu gibaju brzinom  $(3 \cdot 10^8) \frac{m}{s}$ . Foton, čestica bez mase, kvant je elektromagnetskog zračenja. Kada se foton kreće ima energiju određenu frekvencijom osciliranja:  $E = h \cdot f$ , pri čemu je  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} Js$  Planckova konstanta i  $f$  frekvencija vala.

Prema Bohrovu modelu, atomi se sastoje od pozitivno nabijene jezgre i negativnog elektronskog omotača. Elektroni se gibaju oko jezgre atoma po orbitama (luskama), koje se nalaze na različitim udaljenostima od same jezgre te imaju točno određeni energijski nivo. [7] Gibajući se po točno određenim (dozvoljenim) stazama, pri čemu atom ni ne zrači ni ne apsorbira zračenje, kažemo se da se elektron nalazi u stacionarnom stanju. Prilikom skokovitog prelaska iz jednog u drugi energijski nivo, dolazi do zračenja ili apsorpcije elektromagnetskih valova u kvantima.

Kada elektron prelazi iz energijskog stanja  $E_2$  u  $E_1$ , frekvencija nastalog zračenja određena je razlikom energije koju je elektron imao u ta dva različita stanja:  $E_2 - E_1 = h \cdot f$ . Atomi mogu emitirati i apsorbirati zračenje u ultraljubičastom, vidljivom i infracrvenom dijelu spektra. Različite vrste energije (svjetlosna, električna, toplinska) uzrokuju gibanja atoma (vibracije, rotacije i sl.) zbog čega se elektroni onda mogu nalaziti na različitim stupnjevima pobuđenosti. [3, 8, 9]

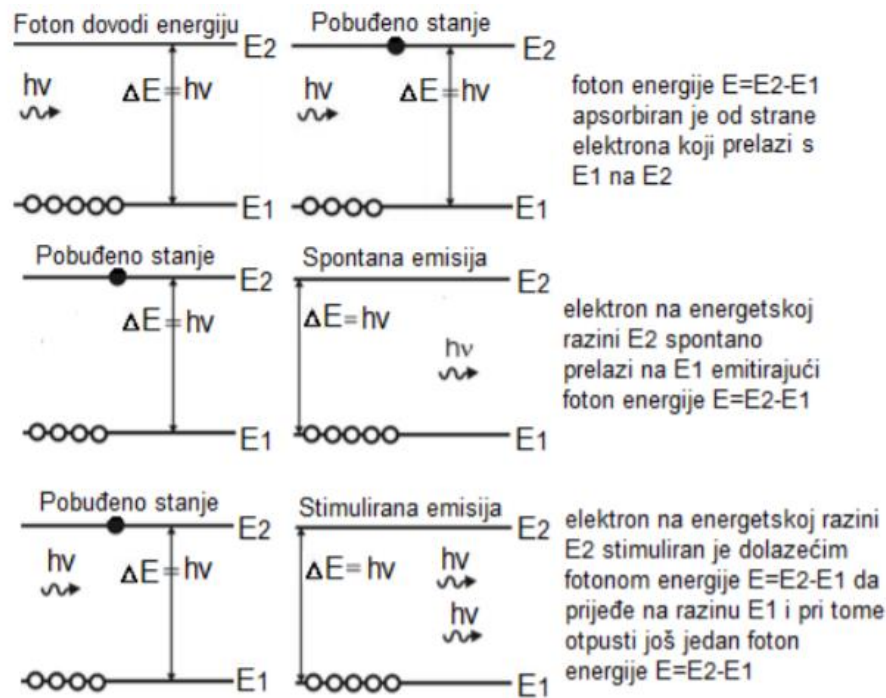
### **3.2 Procesi potrebni za nastanak laserske svjetlosti**

Glavni procesi pri nastanku laserske svjetlosti su apsorpcija, spontana emisija, stimulirana emisija i inverzija naseljenosti. Pobuđivanje je popraćeno apsorpcijom fotona, spontano zračenje emisijom fotona i stimulirano zračenje emisijom fotona iste frekvencije i faze, što je prikazano na Slici 3.2. Uvjeti emisije fotona jesu da laserski medij mora sadržavati energijske nivoe i da se većina atoma i/ili molekula nađe u pobuđenom stanju.

Apsorpcija - proces u kojem atom apsorbira foton čija je energija jednaka energiji potrebnoj za prelazak atoma u više energijsko stanje (pobuđeno stanje). Energija fotona jednaka je razlici energija atoma u višoj i nižoj energijskoj razini.

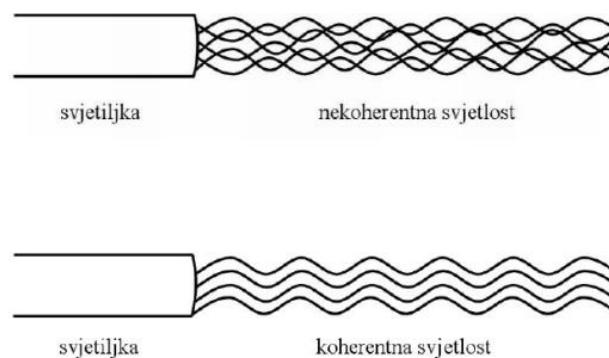
Spontana emisija (bez vanjskog utjecaja) - proces u kojem atom iz višeg energijskog nivoa spontano prelazi u nižu energijsku razinu. Tijekom ovog procesa dolazi do otpuštanja fotona energije jednake razlici energijskih nivoa.

Stimulirana emisija (utjecaj vanjskog fotona) - drugi foton jednake energije kao prvi potiče atom na prelazak u osnovno stanje za vrijeme čega se emitira dodatni foton. Taj emitiran foton jednak je vanjskom fotonu (ista energija, faza, polarizacija i smjer kretanja). [3, 5, 9]



**Slika 3.2** Ukratko objašnjen proces nastanka laserske svjetlosti (slika preuzeta s [http://repositorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%202016\\_Zavr%20Prediplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%202016_Zavr%20Prediplomski.pdf) [10])

Apsorpcijom fotona atomi prelaze iz osnovnog u pobuđeno stanje. Za vrijeme spontane emisije elektromagnetskog zračenja, svaki atom koji dođe u pobuđeno stanje spontano emitira foton. Fotoni nastali spontanom zračenjem međusobno su neusklađeni, tj. zračenje je nekoherentno (obična svjetlost). Za dobiti koherentni izvor svjetlosti, potrebno je podesiti sustav atoma tako da upadno elektromagnetsko zračenje izaziva pretežno stimuliranu emisiju (Slika 3.3).

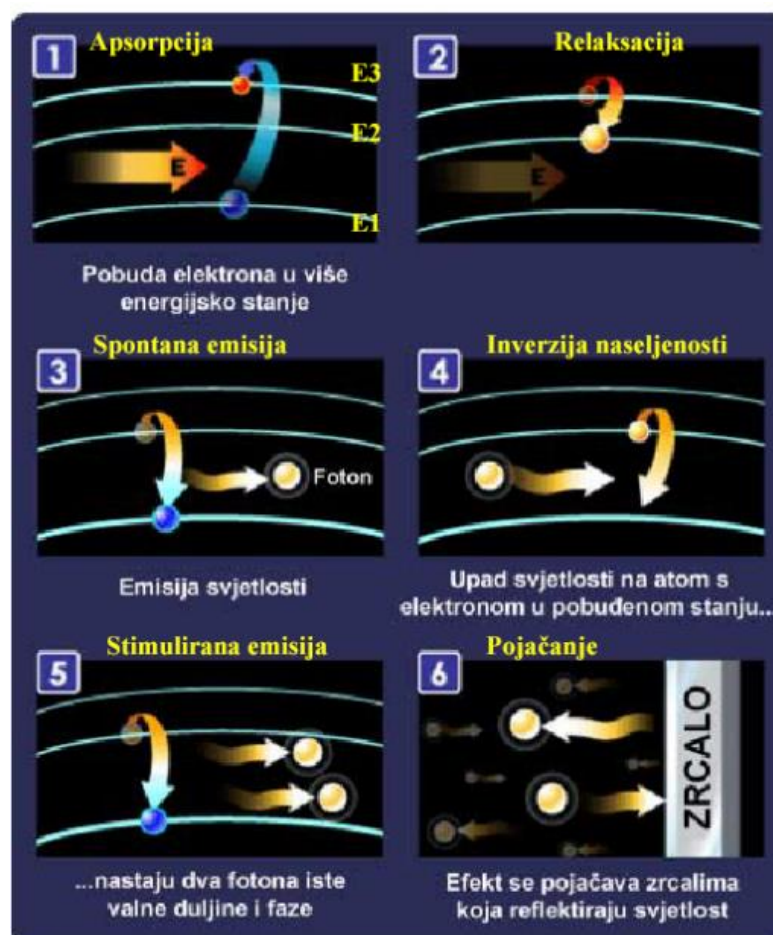


**Slika 3.3** Obična svjetiljka - nekoherentna svjetlost, laser – koherentna svjetlost

(slika preuzeta s

[http://repositorij.fsb.hr/2263/1/16\\_05\\_2013\\_16\\_04\\_2013\\_diplomski\\_vedran\\_nikl.pdf](http://repositorij.fsb.hr/2263/1/16_05_2013_16_04_2013_diplomski_vedran_nikl.pdf) [11])

Proces stimulirane emisije može nastati kada velik broj atoma u jednom trenutku pobudimo u isto pobuđeno stanje. Jedan se atom u pobuđenom stanju nalazi vrlo kratko (srednje vrijeme života  $10^{-6} - 10^{-9}$ s) i nakon toga spontano prelazi u niže energijsko stanje pri čemu emitira foton. Neka se taj foton giba u smjeru uzduž niza atoma i naleti na drugi atom u pobuđenom stanju. Naletom fotona izaziva se skok drugog atoma iz pobuđenog u niže stanje, uz emisiju fotona koji ima jednaka svojstva (energiju, koherentnost i smjer) kao upadni foton. Oba fotona nastavljaju usklađeno gibanje i nalijeću na treći atom koji je u pobuđenom stanju. Nalet dvaju usklađenih fotona izaziva skok tog trećeg atoma iz pobuđenog u niže stanje, uz emisiju fotona koji ima jednaka svojstva kao dva upadna fotona itd. Pri svakom sljedećem naletu usklađenih fotona na neki sljedeći atom u pobuđenom stanju opet nastaje stimulirana emisija i broj usklađenih fotona u snopu povećava se svaki put za jedan. Tako nastaje koherentno i monokromatsko elektromagnetsko zračenje visoke snage koje se zove lasersko zračenje (slika 3.4) [12]



**Slika 3.4** Slikovni prikaz nastanka laserskog zračenja (slika preuzeta s [https://hpd.hr/eskola-fizika/susreti/Laseri\\_Ticijana\\_Ban.pdf](https://hpd.hr/eskola-fizika/susreti/Laseri_Ticijana_Ban.pdf)) [13]

Najveći problem prilikom izrade laserskog uređaja bilo je stvaranje aktivne sredine u kojoj će broj pobuđenih atoma biti veći od broja atoma u osnovnom stanju. Takvo stanje naziva se inverzija (gustoća) naseljenosti, a postupak da se to stanje postigne naziva se „pumpanje“ (pobuđivanje). Dakle, ako se na jednom mjestu nalazi velik broj atoma koji su postigli inverziju naseljenosti (velik višak energije), onda oni spontano emitiraju fotone u raznim smjerovima. Kada bi se poslali fotoni nekih određenih valnih duljina i faza na spomenute atome, oni bi emitirali fotone iste te valne duljine, faze i smjera kretanja kao i poslani fotoni. Inverzija naseljenosti postiže se kada je broj atoma u pobuđenom stanju ( $N_2$ ) veći od broja atoma u osnovnom stanju ( $N_1$ ),  $N_2 > N_1$ . Laserska se svjetlost može proizvesti tek kada stimulirana emisija dominira nad spontanom emisijom i apsorpcijom. Takvo stanje, tj. dominacija se može postići inverzijom naseljenosti atoma u radnom tijelu. [3]

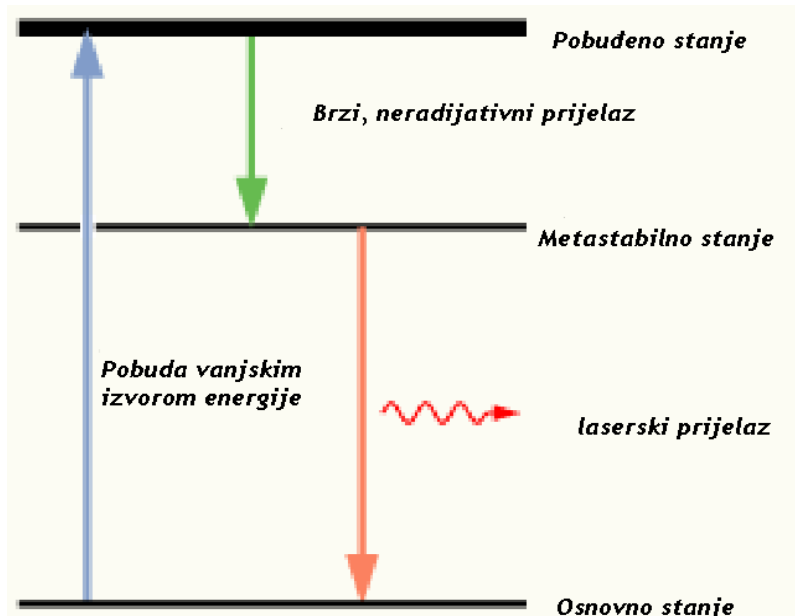
Iz statističkog je razmatranja poznato kako Boltzmannova raspodjela definira odnos broja atoma na dva promatrana nivoa, tj. zbog prijelaza iz pobuđenog u osnovno stanje dolazi do kvantnog skoka odnosno emisije fotona čija energija odgovara razlici energijskih razina:

$$N_2 = N_1 e^{-\frac{hf}{kT}}, \quad (3.1)$$

pri čemu je  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} Js$  Planckova konstanta,  $f$  frekvencija vala,  $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$  predstavlja Boltzmanovu konstantu i  $T$  termodinamičku temperaturu, energija  $hf = E_2 - E_1$ , a  $kT$  je kinetička energija. [2, 9]

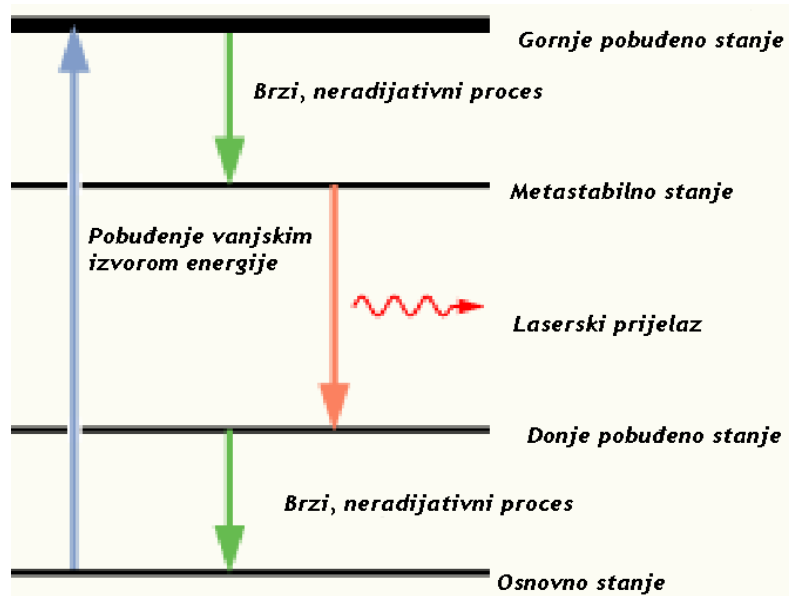
### 3.3 Energijske razine

Aktivni sustav - nosioci laserske akcije obično funkcioniraju na sistemu od tri ili četiri nivoa. Ukoliko imamo sustav s tri energijske razine (Slika 3.5) onda se na početku većina atoma nalazi u osnovnom stanju energije  $E_1$ . Zbog utjecaja vanjskog izvora energije dolazi do pobude zbog koje atomi prelaze iz osnovnog stanja na višu energijsku razinu odnosno u pobuđeno stanje  $E_3$ . Nakon što se atomi tamo kratko zadrže oni prelaze na metastabilnu razinu  $E_2$ . Prilikom postizanja dovoljno snažne pobude koja uzrokuje da se više od pola atoma nalazi u razini  $E_2$  može se reći da je postignuta inverzija napučenosti razina  $E_1$  i  $E_2$ . Pri prijelazu iz razine  $E_2$  u  $E_1$  nastaje laserska svjetlost, tj. atomi se vraćaju u osnovno stanje i emitiraju se fotoni.



*Slika 3.5 Inverzija naseljenosti i nastanak laserske zrake u sustavu s 3 energijske razine (slika preuzeta s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Trostupanjski\\_laser.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Trostupanjski_laser.png) [14])*

S obzirom na to da je kod sustava s tri razine nedostatak što donja razina laserskog prijelaza nije prazna, poželjniji je sustav s četiri razine (Slika 3.6). On ima iznad osnovnog stanja  $E_1$  dodatni energijski nivo  $E_2$ . Između  $E_3$  i  $E_2$  postiže se inverzija naseljenosti. Za ostvarenje populacijske inverzije u ovom sustavu potrebna je manja energija nego u sustavu s tri nivoa, budući da se ovdje inverzija ostvaruje u odnosu na nivo 2 a ne na nivo 1 (osnovni), koji je uvijek naseljen. [4]

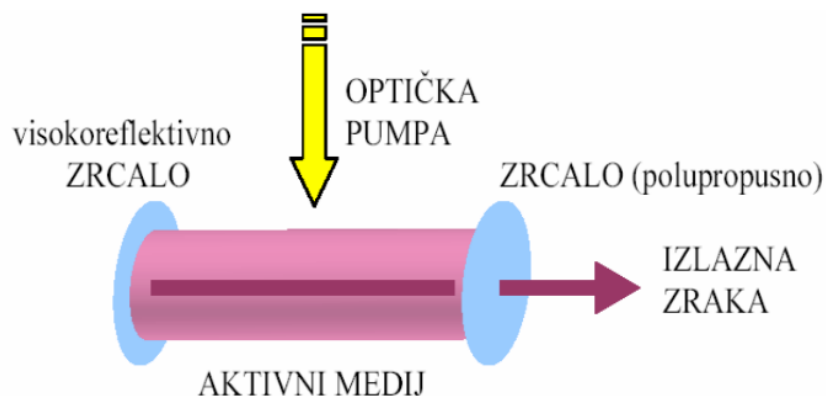


**Slika 3.6** Inverzija naseljenosti i nastanak laserske zrake u sustavu s 4 energetske razine (slika preuzeta s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Cetverostupanjski\\_laser.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Cetverostupanjski_laser.png) [15])

### 3.4 Dijelovi lasera

Svaki laser sastoji se od sustava za pobudu, aktivnog medija i rezonantnog sustava. Dakle, na početku je aktivni medij u nepobuđenom stanju. Do inverzije naseljenosti dolazi zbog vanjskog podražaja, tj. „pumpanjem“ velikog broja atoma u pobuđeno stanje. Spontana emisija nastaje kada jedan od atoma padne u osnovno stanje i onda on kasnije može izazvati stimuliranu emisiju. Želi li se postići pojačanje svjetlosti, broj atoma u pobuđenom stanju mora biti dominantan. Važno je postaviti aktivni medij u sustav koji sprječava brzo napuštanje fotona. To se postiže dodavanjem dva paralelno postavljena ogledala (reflektirajuće i polupropusno). Ovakav sustav predstavlja rezonator u kome se uspostavljaju optičke oscilacije odgovarajuće frekvencije.

Dakle, glavni dijelovi lasera su optička ili laserska pumpa, optički rezonator, aktivni medij, i izlazna laserska zraka. (Slika 3.7)



**Slika 3.7** Shematski prikaz osnovnih dijelova lasera (slika preuzeta s [https://hpd.hr/eskola-fizika/susreti/Laseri\\_Ticijana\\_Ban.pdf](https://hpd.hr/eskola-fizika/susreti/Laseri_Ticijana_Ban.pdf) [13])

Optička ili laserska pumpa osigurava energiju potrebnu za rad lasera. Energija može biti u raznim oblicima kao što su električno pražnjenje naboja, kemijska reakcija, svjetlo drugog lasera i slično. Optički rezonator sastavljen je od dva paralelno postavljena ogledala od kojih je jedno potpuno reflektirajuće a drugo polupropusno. Ovaj sustav reflektirajućeg i polureflektirajućeg ogledala precizno usmjerava i formira laserski snop. Visoko reflektirajuće zrcalo služi za ponovno vraćanje emitiranih fotona u aktivnu sredinu gdje dolazi do reakcije pobuđivanja. Polupropusno zrcalo dio fotona vraća u aktivnu sredinu gdje se proces pobuđivanja nastavlja, dok drugi dio fotona prolazi kroz staklo i tvori lasersku zraku.



Aktivni ili laserski medij određuje svojstva samog lasera i na kojoj će valnoj duljini on raditi. U njemu sa svakim prolazom fotona dolazi do pojačavanja laserske svjetlosti.

Izlazna laserska zraka (Slika 3.8) je koherentna, usmjerena i monokromatska. Izlazni fotoni imaju jednake frekvencije, faze i polarizaciju, tj. gibanje im je usklađeno. Zbog ovog svojstva val laserske svjetlosti izgleda kao pravac tj. nije sastavljen od maksimuma i minimuma kao valovi drugih oblika svjetlosti. Konačno se može reći kako je laserska zraka gotovo savršeno usmjerena, uska, jaka i koncentrirana. [9]



*Slika 3.8 Laserske zrake raznih boja i vidljivih svojstava*

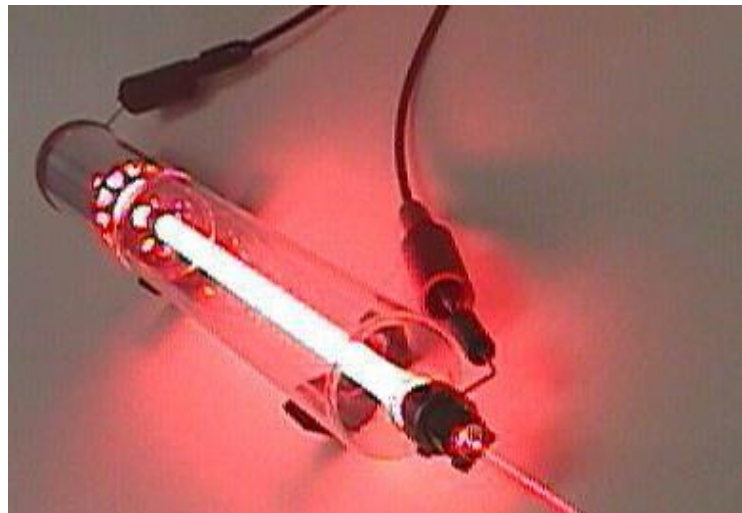
*(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b9/LASER.jpg/300px-LASER.jpg>)*

[16]

### 3.5 Podjela lasera

Razvoj lasera tekao je vrlo brzo pa danas postoje različite vrste lasera. Osnovne fizikalne podjele lasera su po agregatnom stanju aktivne tvari, prema načinu pobude i prema načinu rada. Kad se pravi podjela lasera prema agregatnom stanju tvari na kojoj se laserski efekt događa, onda je riječ o plinskim, tekućim i čvrstim laserima. Postoji još i poluvodički ili diodni laser (mali kristal) koji emitiraju kontinuirano zračenje malih snaga.

Kod plinskih lasera (Slika 3.9), koji mogu biti ionski, atomski, kemijski i molekularni, električnim pražnjenjem kroz plin u cijevi dolazi do pobuđivanja atoma. Najčešći plinski laseri su CO<sub>2</sub>, He-Ne i argonski laser.



*Slika 3.9 Plinski laser (slika preuzeta s <https://electricianprof.ru/hr/tools/gas-laser-operation-mode-see-what-gas-laser-in-other-dictionaries/> [17])*

Kod čvrstih lasera aktivni medij može biti kristal (ioni ili molekule raspoređeni u obliku kristalne rešetke) ili amorfno tijelo (atomi, ioni ili molekule raspoređeni nasumično). Primjeri čvrstog lasera su rubinski (Slika 2.2.) i Nd:YAG laser (ima krutu jezgru i sastoji se od štapića itrij-aluminij-granata (YAG) sa atomima neodimija (Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)).

Kod tekućih lasera, kao aktivni medij koriste se tekućine. Poželjno je odabrati materijal (organske tekućine) koji u tekućoj fazi pokazuje jaku emisivnost. Spektar emisije tekućih lasera poprilično je širok, stoga se nazivaju i obojeni (eng. *dye*) laseri.

Dijele li se laseri prema načinu pobuđivanja, onda je riječ o optički pumpanim, pumpanim sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju, ozračivanjem snopovima čestica visoke energije i kemijskim relacijama. Kod optičkog pumpanja, sredstvo mora biti prozirno (npr. vakuum i plazma) kako bi se vidjelo širenje svjetlosti. Laserima ponekad nije potrebna nikakva vanjska pobuda za postizanje inverzije napučenosti, na primjer u slučaju pobude kemijskom reakcijom. To je primjer lasera koji imaju plinoviti medij sastavljen od dvije ili više kemijskih aktivnih komponenti. Kemijska reakcija sama izaziva pobuđivanje.

Laseri se mogu podijeliti još i prema načinu rada, tj. na pulsirajuće i kontinuirane. Pulsirajući laseri rade isprekidano, tj. jedno emitiranje laserske zrake može trajati 1 fs ili as ( $1 \text{ s} = 10^{15} \text{ fs} = 10^{18} \text{ as}$ ). Kontinuirani laseri rade bez prekida, na način da su cijelo vrijeme pokrenuti istom energijom. Snaga pulsirajuće laserske zrake veća je od one nastale kontinuiranim laserom, zbog čega se on manje zagrijava. [9, 18]

### 3.6 Parametri laserskog zračenja

Iako se lasersko zračenje definira kao snop paralelnih, monokromatskih, koherentnih zraka, u praksi nema u potpunosti izražene sve navedene osobine. Snop neznatno divergira, ima elemente drugih valnih duljina i nekoherenciju. Laseri se stalno usavršavaju kako bi se što više približili idealnim svojstvima laserskog zračenja, kao i da bi se prilagodili specifičnim primjenama. Laserska zraka, koliko god snažna, rijetko se koristi u svom osnovnom obliku. Ponekad se sustavom leća divergira na željenu površinu, a još se češće leće koriste za fokusiranje laserske zrake. Fokusiranjem snopa laserskih zraka, njegova se snaga može izvanredno povećati. Paralelnost, monokromatičnost i koherentnost laserskih zraka omogućavaju da se one fokusiraju na vrlo malu točku čiji se promjer približava veličini valnih duljina laserskih zraka. Primjerice, za rubinski laser, minimalni promjer fokusne točke je 0,7 mikrometara. Što je manja valna duljina laserske zrake, to se ona može fokusirati na manju točku. Drugi faktor koji utječe na promjer fokusne točke je žarišna duljina. Što je ona manja, to će promjer fokusne točke biti manji. Izlazna snaga laserskog zračenja uvjetovana je konstrukcijom lasera i izražava se u vatima (W). Fokusiranjem laserskih zraka u točki dobije se velika gustoća snage ili intenzitet ( $W/cm^2$ ). Kod gustoće snage reda ( $10^6 - 10^8$ )  $W/cm^2$ , koja se postiže u nekim industrijskim primjenama lasera, temperatura na površini predmeta na koji je fokusiran laserski snop dostiže nekoliko tisuća stupnjeva.

Budući da je fokusna točka okrugla, za određivanje gustoće snage u točki koristi se formula (DiBartolomeo, 1981):

$$\text{Gustoća snage } \left( \frac{W}{cm^2} \right) = \frac{\text{Snaga } (W)}{\text{Dijametar}^2 (mm)}. \quad (3.2)$$

Dakle, gustoća snage direktno je proporcionalna snazi lasera, a obrnuto proporcionalna kvadratu promjera fokusne točke.

Laseri s kraćom valnom duljinom, čije se zrake mogu fokusirati na manju fokusnu točku postižu, pri istoj izlaznoj snazi, puno veću gustoću snage na mjestu djelovanja u usporedbi s laserima veće valne duljine. Energija laserskog zračenja izražava se u džulima (J). Energija od 1 J je snaga od 1 W manifestirana u 1 sekundi, tj.  $J = W \cdot s$ . Fokusiranjem laserskog zračenja povećava se i gustoća energije koja se izražava u  $J/cm^2$ . Ukupna energija koju prima objekt laserskog zračenja, proizvod je snage zračenja, dužine vremena zračenja i površine koja se zrači, pri čemu su prva dva parametra u direktnoj, a treći u obrnutoj proporcionalnosti. Ovaj izvedeni parametar ukupne primljene energije laserskog zračenja može se nazvati i dozom

zračenja. On ima značaja pri proučavanju nekih bioloških efekata laserskog zračenja. Svi opisani parametri laserskog zračenja određuju efekte primjene lasera i moraju se jasno precizirati prije nego se laser primjeni u praktičnom radu. Dakle, mora biti definirana: izlazna snaga lasera, veličina fokusne točke ( $\text{cm}^2$ ), gustoća snage ili intenzitet, dužina vremena zračenja (sekunda), energija zračenja i doza zračenja. Pored navedenih parametara, za razumijevanje efekta laserskog zračenja bitan je i režim rada lasera (kontinuirani ili impulsni). Manji utjecaj imaju struktura i boja materijala na koji se djeluje laserskim zračenjem. Različite boje objekta zračenja selektivno apsorbiraju laserske zrake određenih valnih duljina, a različite strukture specifično reagiraju na lasersko zračenje. Upravo su ti faktori posebno važni na području primjene lasera u biološkim istraživanjima i kliničkoj medicini. [3]

## 4 Primjena lasera u medicini

### 4.1 Općenita primjena lasera

Ubrzo nakon izuma lasera njegova je svjetlost zbog svojih specifičnih svojstava pronašla primjenu u raznim područjima, primjerice u elektrotehničkoj, strojarскоj i tekstilnoj industriji, u telekomunikaciji, medicini, vojnoj tehnici itd. Njihovo je tehnološko usavršavanje početkom 21. stoljeća otvorilo nova područja znanosti i visoke tehnologije. Dakle, uvodi se u industriju (kao univerzalno oruđe za obradu materijala), u mjerne tehnike, ekologiju, vojnu tehnologiju (za uništavanje udaljenih objekata i obilježavanje ciljeva itd., npr. satelit), holografsku tehniku (metoda rekonstrukcije slike), informacijsku tehnologiju (za prijenos signala u CD-uređajima, laserski printeri), spektroskopiju (kao intenzivni izvori monokromatskog svjetla) itd.

He-Ne i diodni laseri osnova su za barkod čitače, uređaje koji registriraju crno-bijeli kod na način da se lasersko svjetlo reflektira od površine koda. Nastali signal digitalizira se i pohranjuje u računalu. Umrežena računala povezuju se također pomoću lasera na način da binarni kod računala prebacuju u svjetlosni signal, koji se praktički bez ikakvih gubitaka jako brzo prenosi optičkim kablovima na velike udaljenosti. Optičke kablove čini snop optičkih vlakana (Slika 4.1).



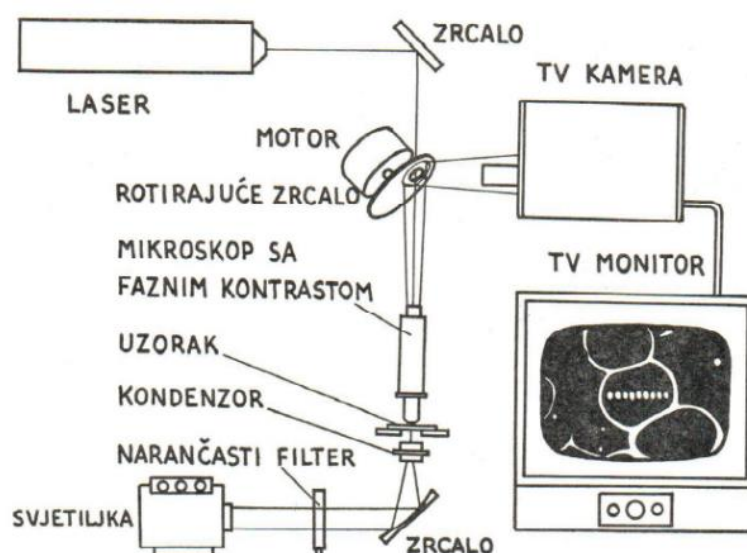
*Slika 4.1 Optička vlakna (slika preuzeta s <https://www.leinuotechnology.com/bs/technical-post--fiber-fabric-for-medical-applications-852.html> [19])*

Pulsirajući se laseri zbog visokih intenziteta koriste u obradi materijala, npr. za bušenje i rezanje (autoindustrija,...). S obzirom na to da je djelovanje pulseva na medij kratkotrajno, ne može doći do taljenja ili uništenja prilikom laserske obrade materijala. [12]

## 4.2 Lasersko zračenje u medicini

Koherentno se elektromagnetsko zračenje ne javlja spontano u prirodi te predstavlja potencijalnu opasnost za biološka tkiva s nepredvidljivim posljedicama. Laserska zraka ima neke negativne fizičke, biofizičke i biokemijske posljedice na živo tkivo. Gustoća energije važan je faktor te određuje hoće li biološko djelovanje laserskog zračenja biti destruktivno (štetno) ili biostimulirajuće. Destruktivna djelovanja laserskog zračenja postižu se visokim gustoćama energije fokusiranih laserskih zraka, dok se za biostimulirajuća djelovanja koriste defokusirane laserske zrake niske snage i male gustoće energije.

Znanstvena istraživanja, dijagnostika, terapija i kirurgija glavna su područja primjene laserskog zračenja u medicini. Laserska mikroskopija objasnila je mnoge procese u stanici. Pomoću lasera moguće je proučavati fiziološka svojstva živih stanica, proces nastanka patoloških promjena te prouzrokovati uništenje tih promjena. Djelovanje laserskog zračenja na biološko tkivo (složeno, heterogeno i podložno biokemijskim procesima) drugačije je nego u slučaju djelovanja na neživu materiju. Voda koja se nalazi unutar svakog živog tkiva utječe na indeks loma i toplinsku vodljivost zračenja. Ostala fizikalna svojstva tkiva utječu na apsorpciju, transmisiju i refleksiju laserskog snopa. Biološka istraživanja odnose se najviše na ispitivanje strukture stanica kako bi se napravila analiza staničnih funkcija. Laserskom mikropunturom moguće je eksperimentalno ispitivanje strukture stanica, npr. mitohondrija stanica srčanog mišića, kromosoma stanica plućnog tkiva, jezgri iz stanica raka i drugih. Laser može služiti i kao mikroskalpel (Slika 4.2), tj. on emitira pulsirajuću koherentnu svjetlost koja onda u obliku snažnog i fokusiranog snopa uzrokuje rez (promjera:  $(0,5-1) \mu$ ) na živoj stanici.



*Slika 4.2 Laser u ulozi mikroskopa (slika preuzeta s <https://hrcak.srce.hr/file/249461> [5])*

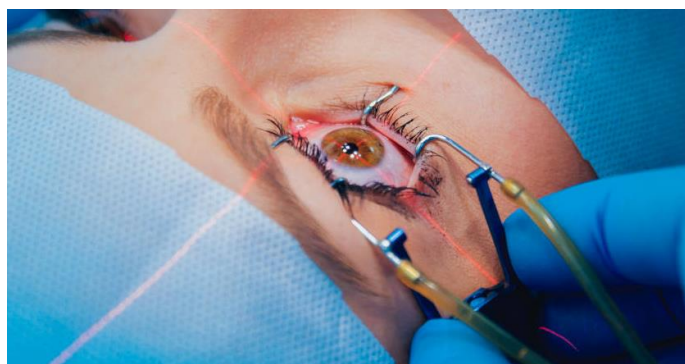


Dakle, laserski snop zbog usmjerenosti i snage samog zračenja, može služiti u kirurgiji kao „beskrvni nož“. Neke od prednosti korištenja lasera u ovoj ulozi jesu te što prilikom operacije instrument, tj. laser ne dodiruje biološko tkivo, područje koje se operira je suho (beskrvno), operativni zahvat je apsolutno sterilan, intervencija je vrlo precizna i lokoalizirana zbog čega se stvara minimalan ožiljak pa je zacjeljivanje rane brzo. [3, 5] Jako je česta upotreba lasera i u neurokirurgiji i ginekologiji zbog toga što optička vlakna lasera mogu doprijeti do teško dostupnih mjesta.

Monokromatičnost i veliki intenzitet snopa uzrokuju uništavanje dijelova stanice koje apsorbiraju zračenje. Ako se stanice selektivno oboje određenom bojom, može se postići i selektivno uništenje stanica. Dakle, postoji različita osjetljivost na lasersko zračenje pojedinih stanica živčanog tkiva, kao i veća osjetljivost pigmentiranog od nepigmentiranog tkiva.

Neki od primjera primjene laserskog zračenja su i laserska fluorescentna mikroskopija (bronhoskopija), laserski mikroskopski maseni analizator (brza analiza koncentracije metala u mikroskopskim uzorcima) i laserska citometrija (brojanje ćelija u jako kratkom vremenu). Dopplerov efekt kod laserskog zračenja omogućava dobru dijagnostiku cirkulirajućih poremećaja. Dopplerov pomak frekvencije u optičkom spektrogramu čestice koja se kreće, direktno je razmjern brzini kretanja te čestice, pa omogućava mjerenje cirkulacije krvi.

S obzirom na veliku osjetljivost oka na lasersko zračenje, laser se često koristi u oftalmološkoj kirurgiji. Dakle, kratkovidnost i dalekovidnost liječe se obradom očne leće laserom (Slika 4.3). Optički sistem fokusira laserski snop na pigmentirani epitel mrežnice koji ga lako apsorbira. Do zagrijavanja i koagulacije tkiva dolazi zbog fokusiranja snopa, tj. laser je tada u ulozi fotokoagulatora. Energija laserskih koagulatora varira između 0,1 i 0,7 J, a vrijeme izloženosti vrlo je kratko (npr. bljesak od 1 milisekunde dovoljan je za odlupljenje i spajanje mrežnice sa svojom podlogom, žilnicom). Promjer snopa na mrežnici može biti vrlo malen, oko 1 mm, a rukovanje je jednostavno. Kao izvori upotrebljavaju se rubinski i neodim-staklo laseri.



*Slika 4.3 Lasersko uklanjanje dioptrije (slika preuzeta s*

*<https://x7n3m4d6.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2013/09/Laserska-operacija-oka.jpg> [20])*



U terapiji boli koriste se laseri male snage. Valna duljina laserskog zračenja koja se pri tome koristi kreće se u rasponu od 600 do 1000 nm. U tom je spektru najbolja penetracija kroz kožu te lasersko zračenje ima pozitivne učinke na oštećeno tkivo, tj. stvara biostimulativno efekte koji potiču brže saniranje i regeneraciju oštećenih tkiva. Liječenje se postiže na način da lasersko zračenje povećava dotok energije i kisika u stanice, smanjuje upalne procese i edeme, a time i smanjuje bol. Za postizanje biostimulativnog djelovanja, oštećeno tkivo mora primiti odgovarajuću količinu energije po jediničnoj površini (1-2 J/cm<sup>2</sup> pri akutnim stanjima i 4-8 J/cm<sup>2</sup> kod kroničnih stanja). Dakle, kod primjene lasera u liječenju boli, potrebno je poznavati učinke pojedinih valnih duljina laserskog svjetla, kao i snagu elektrode koja je potrebna da bi se odgovarajuća količina energije isporučila na pravo mjesto. [21]

Lasери se koriste i u stomatologiji za izbjeljivanje (Slika 4.4), uklanjanje zubnih naslaga, pripremanje zuba za punjenje ispunama te za učvršćivanje ispuna.



*Slika 4.4 Lasersko izbjeljivanje zuba (slika preuzeta s [https://assets.website-files.com/6127805462f49cba3393ec71/624bfecfff776c1726282f5\\_bijeljenje-zuba-2-p-1080.jpeg](https://assets.website-files.com/6127805462f49cba3393ec71/624bfecfff776c1726282f5_bijeljenje-zuba-2-p-1080.jpeg) [22])*

Dokazani su učinci laserskog zračenja na brže zarastanje rana i sanacija na koži, stoga se laseri koriste u kozmetici i dermatologiji. Lasersko zračenje korigira ožiljke od akni i ozljeda te uklanja tetovaže. Kod uklanjanja neželjenih tetovaža (Slika 4.5) koriste se svojstva pulsirajućih lasera visokog intenziteta, koji mogu relativno bezbolno prodrijeti pod kožu gdje je smješten pigment boje koju želimo ukloniti. Laserima se još tretiraju i maligni i benigni tumori na koži. [23]



**Slika 4.5** Lasersko uklanjanje tetovaža (slika preuzeta s <https://www.krenizdravo.hr/wp-content/uploads/2020/01/lasersko-uklanjanje-tetovaza-1.jpg?x18533> [24])

## 5 Uvjeti i mjere zaštite od optičkog zračenja

S obzirom na to da laser stvara usmjereni snop koji je puno intenzivniji od svjetlosnih zraka nastalih prirodnim izvorom svjetlosti, potrebno je spomenuti kako se prilikom samog korištenja lasera potrebno jako dobro zaštititi. Zbog fotosjetljivog sloja (mrežnice) koje u sebi sadrži, oko je najosjetljivije na fokusiranu lasersku svjetlost. Može biti poprilično štetan i za ostala tkiva i općenito zdravlje čovjeka. Kako bi se spriječile posljedice, prilikom korištenja lasera, potrebno je pridržavati se određenih pravila:

1. Držati razmak.
2. Nositi naočale i maske koje štite od laserskog zračenja.
3. Ne upotrebljavati fokusirajući ručni držač (optičko vlakno) kao pokazivač.
4. Odložiti fokusirajući ručni držač vlakna na sigurno mjesto kada se ne koristi.
5. Ne usmjeravati lasersku zraku na kirurške instrumente.
6. Ne usmjeravati lasersku zraku na zapaljive materijale.
7. Uređaj prebaciti u način rada mirovanja (eng. *Stand-by*) kad god je moguće.

Djelovanje laserskog zračenja ovisi o vrsti tkiva, načinu dovođenja svjetlosti te o snazi i valnoj duljini. Kad je riječ o manjim energijama i snazi, utjecaji su bezopasni. Ako se energija i snaga svjetlosti povećavaju dolazi i do pretvaranja zračenja u toplinu, koja dovodi do povećanja temperature tkiva što može uzrokovati razaranje i koagulaciju bjelancevina.

Laseri su klasificirani po nivou zdravstvenog rizika (Tablica 6.1.), prema standardu Međunarodne elektrotehničke komisije (eng. *International Electrotechnical Commission – IEC*).

Pravilnik o temeljnim zahtjevima za uređaje koji proizvode optičko zračenje te uvjetima i mjerama zaštite od optičkog zračenja (NN 3/2020) koji je donijelo Ministarstvo zdravstva RH klase u Prilogu III. ovako pojašnjava sigurnosne klase lasera:

**Laserske klase 1** jest izvor koherentnog optičkog zračenja čije je zračenje neopasno pri svim uvjetima rada i upotrebe.

**Laserske klase 1M** jest izvor koherentnog optičkog zračenja koji proizvodi divergentan snop i čije je zračenje neopasno ako nije fokusirano odnosno ne promatra se kroz fokusirajuću optiku, kao što su primjerice mikroskopi i teleskopi.

**Laserske klase 2** jest izvor vidljivog koherentnog zračenja čije je zračenje neopasno u svim uvjetima slučajnog izlaganja kada je izlaganje zračenju ograničeno refleksnim treptajem oka odnosno kraće od 0,25 s. Lasersko zračenje koje se promatra duže od 0,25 s može biti štetno.

**Laser klase 2M** jest izvor vidljivog koherentnog zračenja čije je zračenje neopasno u uvjetima slučajnog izlaganja kraćeg od 0,25 s, ali može biti štetno i u uvjetima slučajnog izlaganja kraćeg od 0,25 s ako se promatra kroz fokusirajuću optiku.

**Laser klase 3R** jest izvor koherentnog zračenja koje je potencijalno opasno, ali s manjim rizikom oštećenja. Snaga vidljivih kontinuiranih lasera klase 3R je ograničena na maksimalno 5 mW, a za druge valne duljine i impulsno zračenje vrijede druge granične vrijednosti.

**Laser klase 3B** jest izvor koherentnog zračenja koje je opasno pri izravnom izlaganju oka ili kože. Difuzno reflektirano zračenje nije opasno. U radu s laserom mora se koristiti zaštitna oprema, a uređaji moraju imati paljenje na ključ i internu sigurnosnu blokadu.

**Laser klase 4** jest izvor koherentnog zračenja koje je vrlo opasno i može izazvati opekotine, požar ili oštećenja materijala. Difuzno reflektirano zračenje je također opasno i može proizvesti iste učinke. U radu s laserom se mora koristiti odgovarajuća zaštitna oprema i primjenjivati propisane sigurnosne mjere, a uređaji moraju imati paljenje na ključ i internu sigurnosnu blokadu.

**Tablica 5.1** Klasifikacija laserskih uređaja po nivou zdravstvenog rizika (tablica preuzeta s [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/128/44128730.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/128/44128730.pdf?r=1&r=1) [25, 26])

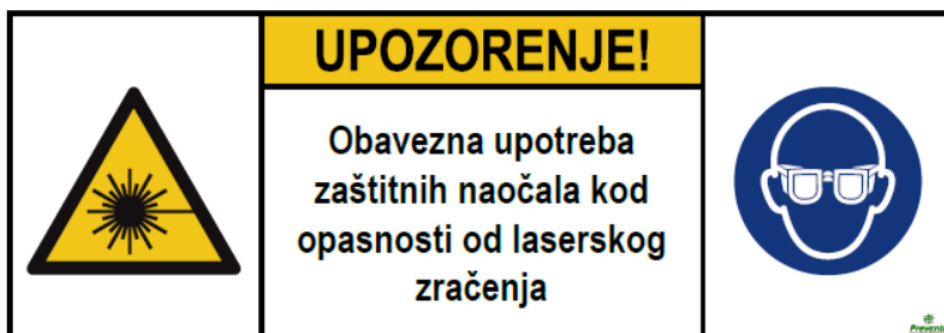
KLASA	BEZOPASNO	OPASNO
1	Produženo promatranje direktnog laserskog snopa	
1M	Promatranje laserskog snopa golim okom	Promatranje kroz optički instrument
2	Slučajni upad direktnog laserskog snopa, čak i kroz optički instrument	Namjerno promatranje laserskog snopa (duže od 0,25s)
2M	Slučajni upad direktnog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

Kako bismo se zaštitili od laserskog zračenja potrebno mu je smanjiti intenzitet do bezopasnog nivoa. Rad s laserskim uređajima treba biti automatiziran, a sve što se nalazi u prostoriji gdje se koristi laser mora biti od materijala koji ne reflektira lasersko zračenje. Prostor mora imati dobru ventilaciju i mora biti osigurana zaštita od opasnosti od visokog napona i požara. Potrebne su još i zaštitne naočale za oči (Slika 5.1) te rukavice, odijela i maske za zaštitu ostatka tijela. Postoje naočale za zaštitu od laserskog zračenja u području spektra od (180- 1 000 000) nm i od (400- 700) nm. U Hrvatskoj su te naočale propisane normom HRN EN 207:2010.



*Slika 5.1 Zaštitne naočale za oči (slika preuzeta s <https://burza.com.hr/oglas/zastitne-naocale-za-rad-sa-laserom/49742> [27])*

Osobe koje rade s laserom moraju biti educirane o mjerama zaštite za pojedine lasere te znati prepoznati svaki kvar, odnosno nepravilan rad lasera kako bi spriječile povećanu i nekontroliranu izloženost laserskom zračenju. Zbog velike izloženosti, oni koje rade s laserima moraju biti pod redovitim liječničkim nadzorom te u slučaju nesreće odmah obaviti izvanredni liječnički pregled. Znak za opasnost od laserskog zračenja je jednostranični trokut crnog ruba, unutar kojega se nalazi simbol, također crne boje, a ispunjena trokuta je žute boje (Slika 5.2 ). [25, 28]



*Slika 5.2 Upozorenje opasnosti od laserskog zračenja (slika preuzeta s <https://preventa.hr/zastita-na-rad-u-pit/stetna-zracenja> [28])*

## 6 Zaključak

S obzirom na brzinu napretka i širinu primjene laserskog zračenja, može se reći kako je laser jedan od najvažnijih fizičkih izuma dvadesetog stoljeća i zbog toga je veoma zastupljen u području fizike i ostalih prirodnih znanosti.

Postoje različiti parametri laserskog zračenja te o tome ovisi gdje i na koji način se može upotrebljavati. Dakle, parametri laserskog zračenja kao što su izlazna snaga zračenja, veličina fokusne točke, gustoća snage ili intenzitet, valna duljina ili frekvencija nastalih laserskih zraka, režim rada lasera, dužina vremena zračenja, energija zračenja i doza zračenja, određuju učinke primjene lasera.

Primjena lasera je zbog navedenih parametara i specifičnih svojstava koja laserska zraka posjeduje (koherentnost, monokromatičnost i usmjerenost) zaista raznolika. Primjerice, u dijagnostici, terapiji i kirurgiji koriste se različite vrste lasera koji proizvode lasersko zračenje različitih svojstava ovisno o tome što se i na koji način njima treba ozračiti.

Iako se laseri već sad upotrebljavaju u jako puno različitih područja medicine, zasigurno ima još prostora za neka nova medicinsko-biološka otkrića. Otkrivanjem i usavršavanjem svih performanci lasera, povećavaju se mogućnosti za provođenje još preciznijih zahvata i učinkovitijih terapija koje se mogu provesti upravo pomoću laserskog zračenja. Kako je riječ o zračenju koje može biti štetno za vid, kožu i dr., potrebno je zaštititi se i dozirati njegovu primjenu kako pozitivne efekte ne bi zasjenili oni negativni.

## 7 Literatura

- [1] URL: <http://struna.ihjj.hr/naziv/laser/9369/#naziV> (14.7.2023.)
- [2] Tony Hey i Patrick Walters, *The New Quantum Universe*, Cambridge University Press, 2003.
- [3] Momčilo Mitrović, Mirza Džinić, *Laser u medicini*, Medicinska knjiga, Beograd, Zagreb, 1983.
- [4] Mario Bertolotti, *The history of the laser*, Institute of Physics Pub, 2005
- [5] Dragica Winterhalter i D. Broz, *Laser u medicini i biologiji*, Zagreb, 1972., URL: <https://hrcak.srce.hr/file/249461> (14.7.2023.)
- [6] *Kemijski rječnik*, URL:  
[https://www.periodni.com/gallery/spektar\\_elektromagnetskog\\_zracenja.png](https://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png) (14.7.2023.)
- [7] URL:<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/b620a7a7-15bd-4095-a187-910c8de1dd4d/modeli-atoma-povijesni-razvoj.html> (14.7.2023.)
- [8] URL: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/b620a7a7-15bd-4095-a187-910c8de1dd4d/bohrov-model-i-spektar-zracenja-vodikovog-atoma.html> (18.7.2023.)
- [9] C. Breck Hitz, James J. Ewing, Jeff Hecht, *Introduction to laser technology*, Wiley, 2012.
- [10] Adrian Antolić, *Zavarivanje laserom*, Završni rad, Zagreb, 2016.  
URL:[http://repositorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%C4%87\\_2016\\_Zavr%C5%A1ni\\_Preddiplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%C4%87_2016_Zavr%C5%A1ni_Preddiplomski.pdf) (14.7.2023.)
- [11] Vedran Nikl, *Analiza korekcije rezultata mjerenja dubine brazde na interferometrijskom mikroskopu epival - interphako*, Diplomski rad Zagreb, 2013.  
URL:[http://repositorij.fsb.hr/2263/1/16\\_05\\_2013\\_16\\_04\\_2013\\_diplomski\\_vedran\\_nikl.pdf](http://repositorij.fsb.hr/2263/1/16_05_2013_16_04_2013_diplomski_vedran_nikl.pdf) (14.7.2023.)
- [12] V. Paar, *Udžbenik za 4. razred gimnazije*, Školska knjiga, Zagreb, 2004.
- [13] Ticijana Ban, *Laseri u znanosti i tehnologiji*, Zagreb, 2008.  
URL: [https://hpd.hr/eskola-fizika/susreti/Laseri\\_Ticijana\\_Ban.pdf](https://hpd.hr/eskola-fizika/susreti/Laseri_Ticijana_Ban.pdf) (14.7.2023.)
- [14] URL:[https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Trostupanjski\\_laser.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Trostupanjski_laser.png) (14.7.2023.)

[15] URL:[https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Cetverostupanjski\\_laser.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datoteka:Cetverostupanjski_laser.png) (14.7.2023.)

[16]

URL:<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b9/LASER.jpg/300px-LASER.jpg> (14.7.2023.)

[17] URL:<https://electricianprof.ru/hr/tools/gas-laser-operation-mode-see-what-gas-laser-in-other-dictionaries/> (14.7.2023.)

[18] URL: <https://www.znanje.org/i/i22/02s/LASERI/podjela%20lasera.htm> (14.7.2023.)

[19] URL:<https://www.leinuotechnology.com/bs/technical-post--fiber-fabric-for-medical-applications-852.html> (14.7.2023.)

[20] URL:<https://x7n3m4d6.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2013/09/Laserska-operacija-oka.jpg> (14.7.2023.)

[21] Ivan Šklebar, Tomislav Šklebar, Sanja Berić Lerotić, *Patofiziološke osnove i indikacijsko područje primjene lasera male snage u liječenju akutne i kronične boli*, Zagreb, 2020. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/372896> (14.7.2023.)

[22] URL:

[https://assets.website-files.com/6127805462f49cba3393ec71/624bfecffff776c1726282f5\\_bijeljenje-zuba-2-p-1080.jpeg](https://assets.website-files.com/6127805462f49cba3393ec71/624bfecffff776c1726282f5_bijeljenje-zuba-2-p-1080.jpeg) (14.7.2023.)

[23] Nataša Vujičić, 50 godina lasera- otkriće koje je promijenilo znanost, ali i svijet, Zagreb 2010.

URL: [https://hpd.hr/eskola-fizika/clanci/50\\_godina\\_lasera\\_Natasa\\_Vujicic.pdf](https://hpd.hr/eskola-fizika/clanci/50_godina_lasera_Natasa_Vujicic.pdf) (14.7.2023.)

[24] URL:<https://www.krenizdravo.hr/wp-content/uploads/2020/01/lasersko-uklanjanje-tetovaza-1.jpg?x18533> (14.7.2023.)

[25]

URL:[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/128/44128730.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/128/44128730.pdf?r=1&r=1) (14.7.2023.)

[26] Ministarstvo zdravstva, *Pravilnik o temeljnim zahtjevima za uređaje koji proizvode optičko zračenje te uvjetima i mjerama zaštite od optičkog zračenja*. URL: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_01\\_3\\_45.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_01_3_45.html) (14.7.2023.)

[27] URL:<https://burza.com.hr/oglas/zastitne-naocale-za-rad-sa-laserom/49742> (14.7.2023.)

[28] URL: <https://preventa.hr/zastita-na-radu-upit/stetna-zracenja> (14.7.2023.)