



SVEUČILIŠNI STUDIJSKI  
CENTAR ZA  
STRUČNE STUDIJE

Kopilica 5  
Split, 21000

<http://www.oss.unist.hr>

**Poluvodički laseri**

*Marko Biskupović  
Split, travanj 2011*

## Sadržaj

---

Predgovor.....	5
Uvod.....	6
Povijesni osvrt.....	7
QED i Kvantna optika .....	11
Fizika lasera.....	19
Konstrukcija i vrste lasera.....	27
Poluvodički laseri.....	45
Primjena i sigurnost lasera.....	55
Budućnost laserske tehnologije i zaključak.....	60
Dodatak I.....	61
Dodatak II.....	65

## **Povjesni osvrt**

Ovdje ćemo govoriti o otkriću lasera, kao i o osobama najzaslužnijim za to postignuće, također bit će riječi o razvoju poluvodičkih lasera i njihovom usavršavanju.

## **QED i Kvantna optika**

U ovom poglavlju bavit ćemo se fundamentalnim teoretskim principima koji omogućuju ne samo rad već i korištenje laserske tehnologije.

## **Fizika lasera**

Da bismo mogli upoznati konstrukciju lasera prvo se moramo upoznati sa osnovnim fizikalnim principima nastajanja koherentnog zračenja kao i osnovnim modovima rada lasera.

## **Konstrukcija i vrste lasera**

Ovdje ćemo zaviriti ispod površine lasera, upoznati njegove osnovne dijelove kao i način na koji njihova međusobna interakcija omogućuje rad lasera, također dat ćemo pregled različitih laserskih tehnologija koje se danas koriste.

## **Poluvodički laseri**

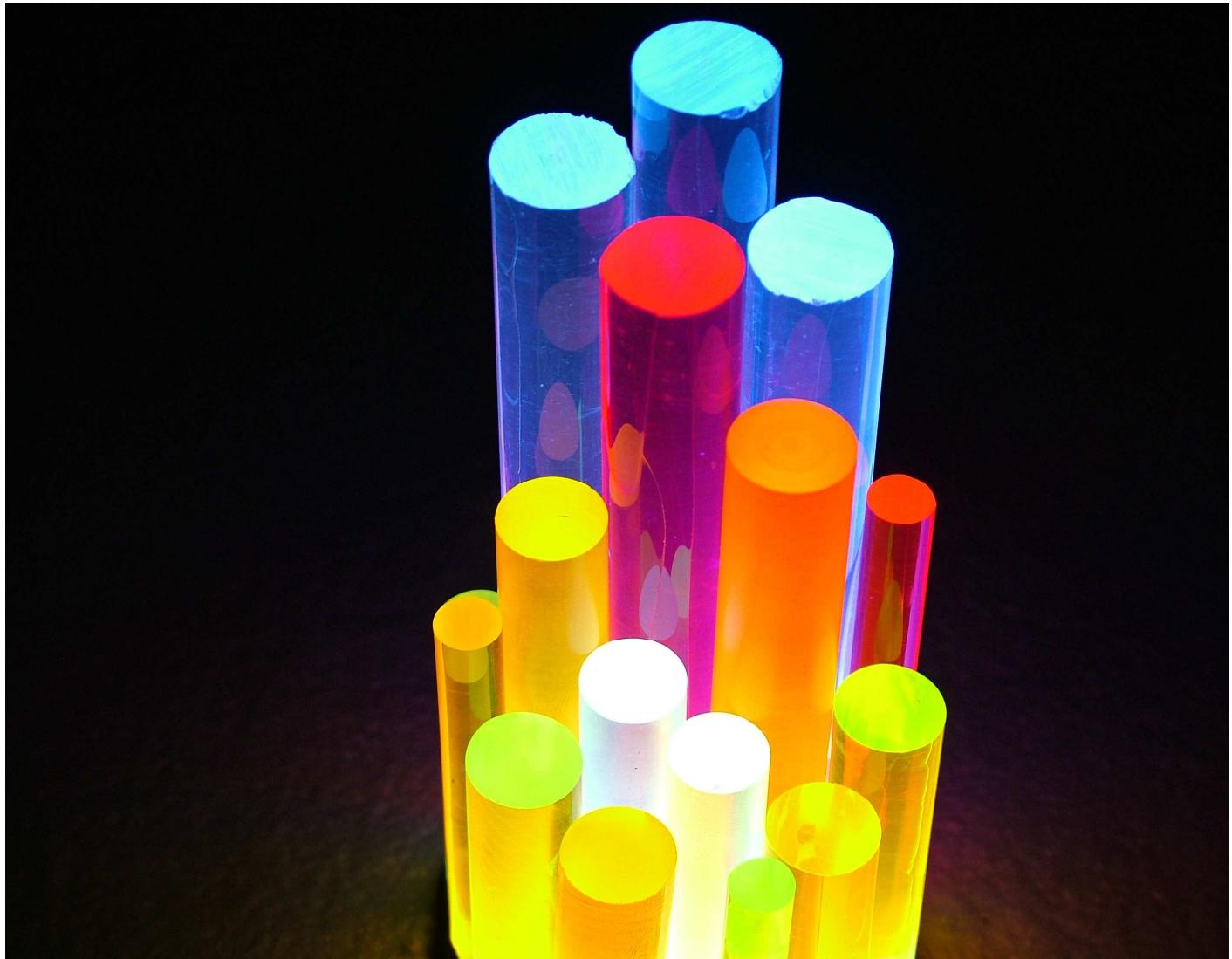
Ovdje smo posebno izdvojili jako značajnu i zastupljenu familiju poluvodičkih lasera, te ćemo se upoznati sa njihovim principima rada, kao i sa raznim izvedbama.

## **Primjena i sigurnost lasera**

Laseri imaju jako široko područje primjene od industrije, telekomunikacija, medicine do različitih istraživanja i znanstvenih radova. Upoznat ćemo se sa njihovom primjenom, a posebno primjenom poluvodičkih lasera. Također ćemo reći par riječi o sigurnosti pri rukovanju sa laserima.

## **Budućnost laserske tehnologije i zaključak**

Koherentno zračenje već sada je jedna od osnova naše tehnologije i taj trend će se ubuduće još povećavati.

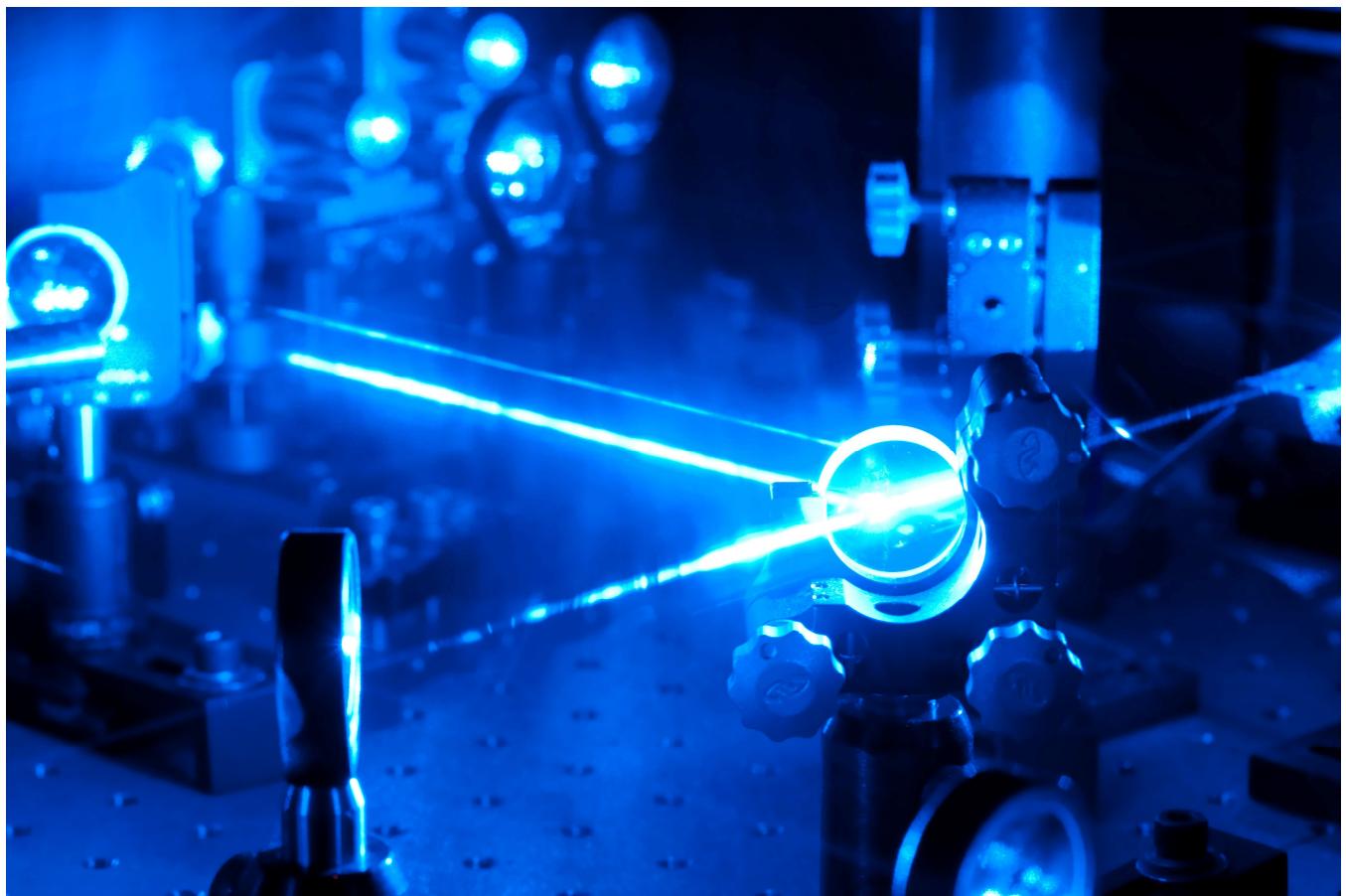


Slika 1.01 LEC (Light Emitting Converter) , polimer šipke pretvaraju koherentno svjetlo jedne valne duljine u drugu.

# Predgovor

Ovaj dokument osmišljen je kao seminarski rad u sklopu kolegija “Elektronički elementi” i bavi se problematikom lasera, a posebno poluvodičkih laserskih izvora. Ovaj rad je napisan tako da pojasni osnovne principe rada, razvoja i primjene laserskih uređaja i oslanja se na znanja iz područja optoelektroničkih sustava, gdje laserski sustavi predstavljaju ključan i nezaobilazan element. Uložen je poseban trud da se ovo veoma složeno multidisciplinsko područje koje uključuje kvantnu fiziku, elektroniku i optiku učini razumljivim i nadasve zanimljivim. Autor je također uzeo za pravo da napravi određena odstupanja i korekcije od zadane forme pisanja ovakvih radova kada je procijenio da bi njihova striktna primjena dodatno zakomplicirala i učinila ovaj rad nepreglednijim i teže razumljivim.

S dužnim poštovanjem,  
Marko Biskupović  
Split, travanj 2011



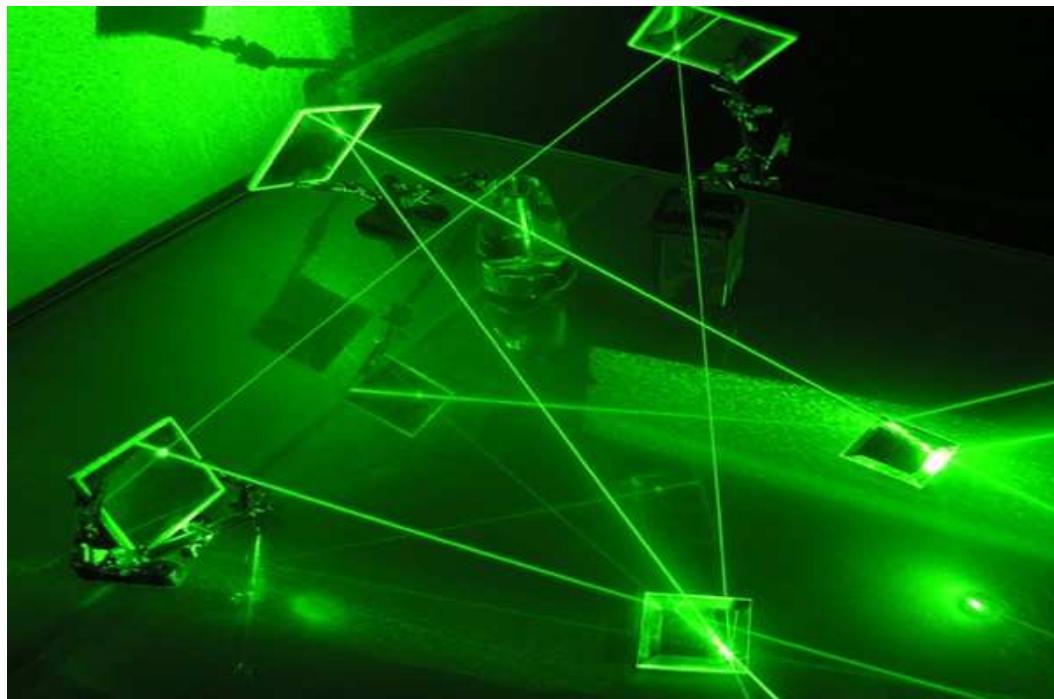
Slika 1.02 445nm optički laser sa koliminacijskom optikom

# Uvod

Laser je uređaj koji emitira elektromagnetsko zračenje kroz proces optičke amplifikacije bazirane na stimuliranoj emisiji fotona. Akronim LASER znači “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Emitirani elektromagnetski val posjeduju svojstva prostorne i vremenske koherencije koju je nemoguće postići drugim tehnologijama. Iako se u skraćenici laser spominje riječ “light” koja znači svjetlost laseri mogu imati područje rada ili radnu valnu duljinu koja može biti veća ili manja od vidljivog dijela spektra (400-700nm), pa tako razlikujemo *mikrovalne lasere (Maser-e), infracrvene lasere, optičke lasere, ultravioletne lasere i X-ray lasere.*

Prostorna koherencija se očituje vrlo uskom zrakom koja je difrakcijski limitirana i naziva se još i Gaussova zraka jer se njen trasverzalno električno polje i intenzitet mogu jako dobro aproksimirati Gaussovom funkcijom čiji graf izgleda kao simetrična zvonasta krivulja koja brzo opada i relativno je strma. Laserska zraka može biti fokusirana u vrlo usku točku time postižući vrlo veliki intenzitet po jedinici površine ili može biti modulirana u zraku vrlo male divergencije kako bi zraka ostala koherentna na relativno velikim udaljenostima. Vremenska ili longitudinalna koherencija podrazumijeva polarizirani val na jednoj frekvenciji čija faza je nepromijenjena duž relativno velike udaljenosti ( duljina koherencije), snopa. Svjetlost proizvedena termalnim, kemijskim ili nekim drugim nekoherentnim postupkom (np. žarulja, neonka, LED dioda...) ima trenutnu amplitudu i fazu koja oscilira nasumično u odnosu na vrijeme i poziciju i zato ima malu duljinu koherencije.

Prvo ćemo se upoznati sa povijesnim razvojem laserske tehnologije, sa posebnim osvrtom na poluvodičku tehnologiju. Nakon toga ćemo objasniti fizikalne principe koje omogućavaju njegov rad, zatim ćemo zaviriti ispod površine i proučiti mehanički dizajn i različite izvedbe i modove rada lasera. Zadnji dio ovog rada bavit će se mogućnostima primjene i razvoja sustava temeljenim na laserskoj, uglavnom poluvodičkoj tehnologiji, te sigurnosti pri radu sa laserima. Poseban dodatak bit će simulacija drivera za laserske diode u programu Multisim, kao i simulaciju konkretne poluvodičke laserske diode u CAD programskom paketu SiLENSe tvrtke “STR Group”.



Slika 1.03 532nm zeleni laser sa zrcalima

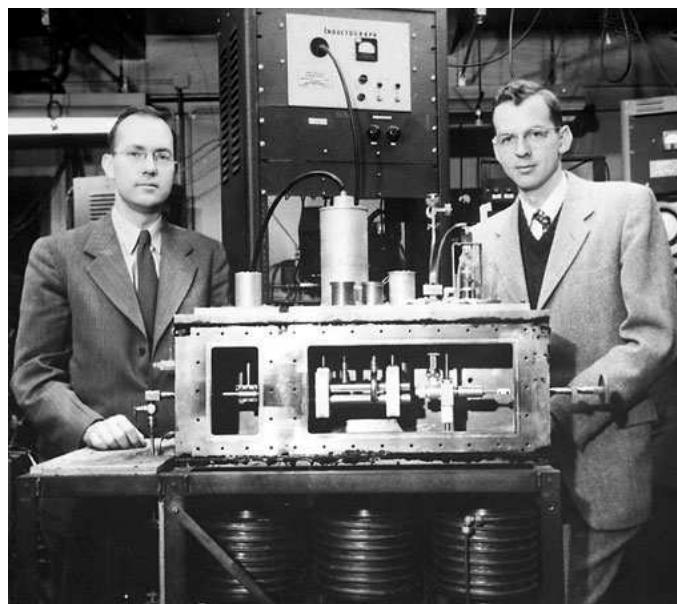
# Povijesni osvrt

*A splendid light has dawned on me...*

Albert Einstein

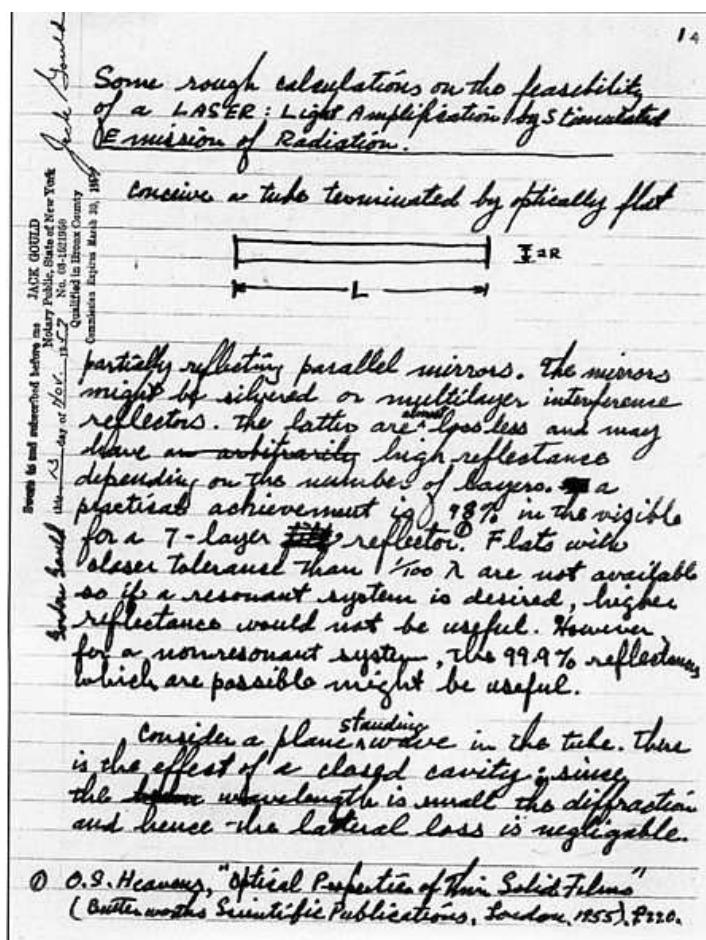
Teoretske osnove koherentnog elektromagnetskog zračenja postavio je 1917 Albert Einstein u svom znanstvenom radu “*Zur Quantentheorie der Strahlung*” (O kvantnoj teoriji radijacije) koji predstavlja izvod iz Max Planck-ovog zakona radijacije. U tom radu Einstein predlaže tri moguća procesa koja se dešavaju prilikom formiranja atomskih spektralnih linija. Oni se nazivaju **spontana emisija, stimulirana emisija i absorpcija**. Ove pojave povezane su Einstein-ovim koeficijentima koji predstavljaju vjerojatnost da se neki od ovih procesa dogode. 1928 Rudolf W. Ladenburg, također njemački atomski fizičar dokazuje postojanje fenomena stimulirane emisije i negativne absorpcije fotona. Valentin A. Fabrikant prvi predviđa upotrebu stimulirane emisije za amplifikaciju valova. Godine 1947 američki fizičari Willis E. Lamb i R. C. Rutherford pronalaze stimuliranu emisiju u vodikovu spektru i prezentiraju prvu demonstraciju stimulirane emisije. Francuski fizičar i nobelovac Alfred Kastler 1950 predlaže metodu optičkog pumpanja za postizanje stimulirane emisije elektromagnetskog zračenja. Ovim su stvoreni svi teoretski preduvjeti za konstrukciju prvog laser-a.

Prvi izvor koherentnog zračenja nije bio u vidljivom dijelu spektra, nego je radio u području mikrovalova, (mnogo veće valne duljine), i dobio je ime **maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)**. Konstruirao ga je 1953 američki fizičar Charles Hard Townes na sveučilištu Columbia University. Uređaj je koristio stimuliranu emisiju u struji pobuđenih molekula amonijaka i proizvodio amplifikaciju mikrovalova na frekvenciji od 24 GHz. Townes-ov maser nije mogao dati kontinuirano zračenje na izlazu “continuous wave (CW)”, nego je radio u kratkim pulzovima. U međuvremenu u SSSR-u ruski fizičari Nikolay Basov i Aleksandr Prokhorov su nezavisno radili na kvantnim oscilatorima i riješili problem kontinuiranog zračenja koristeći više od dvije energetske razine. Time se postiže oslobođanje stimulirane emisije između pobuđenog stanja i nekog nižeg pobuđenog stanja, umjesto zemaljskog (osnovnog) stanja i uvelike olakšava održavanje populacijske inverzije koja je jako bitna za kontinuirani rad. 1964 Townes, Basov i Prokhorov dijele Nobelovu nagradu za fiziku “za fundamentalni rad u području kvantne elektronike koji je doveo do konstruiranja oscilatora i amplifikatora baziranih na maser-laser principu”.



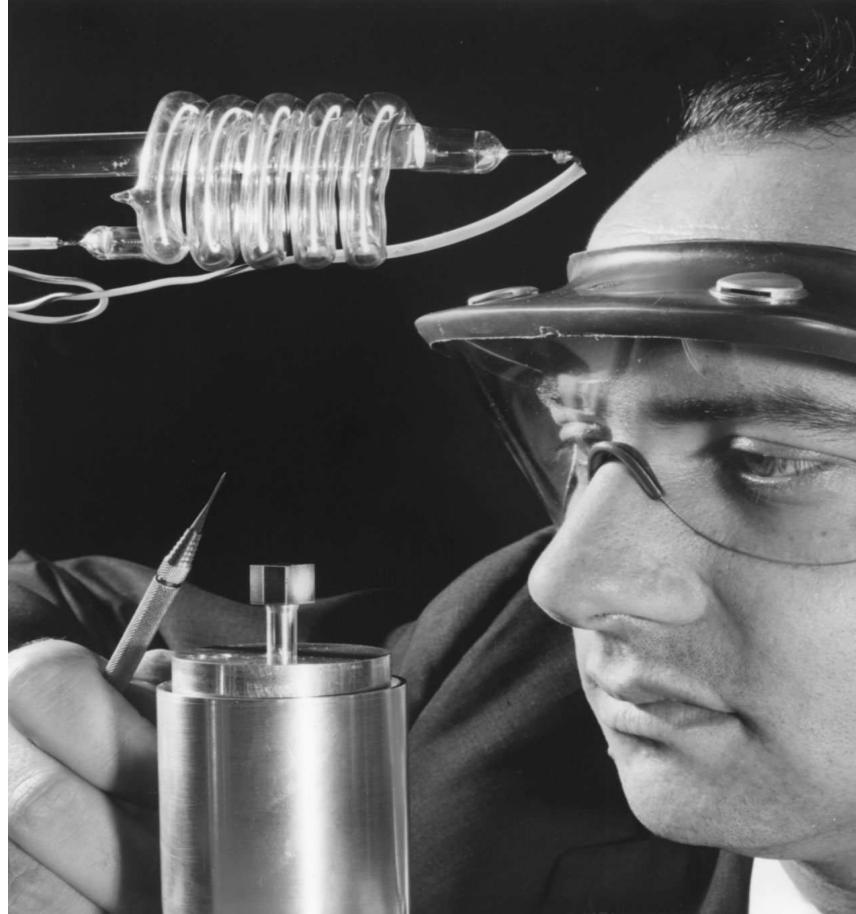
Slika 1.04 Townes, Gordon i prvi maser

Godine 1957 Townes i Arthur Leonard Schawlow, tada radeći za **Bell Laboratories** počinju razmatrati infracrvene lasere, ubrzo napuštaju tu ideju i koncentriraju se na područje vidljivog spektra. Koncept je u početku nazvan "optički maser" i 1958 Bell Laboratories patentiraju teoretski princip rada takvog uređaja. Istodobno na sveučilištu Columbia postdiplomski student Gordon Gould je radio na doktorskoj disertaciji vezanoj za energetske razine pobuđenog "talijuma". Nakon što su se Gordon i Townes susreli i razgovarali o stimuliranoj emisiji, Gordon dolazi na ideju korištenja otvorenog rezonatora (kasnije ključne komponente u konstrukciji lasera). Do sličnih spoznaja dolazi i Prokhorov u Moskvi. Na konferenciji 1959 Gordon prvi predlaže akronim LASER umjesto "optički maser", predlaže moguće primjene takvog uređaja u spektroskopiji, interferometriji, nuklearnoj fuziji, ali kad je pokušao patentirati takav uređaj američki ured za patente odbija njegovu aplikaciju i patent dodjeljuje Bell Laboratories-u. Nakon duge sudske parnice tek 1987 sud dodjeljuje Gordon-u patent za optički pumpane laserske uređaje.



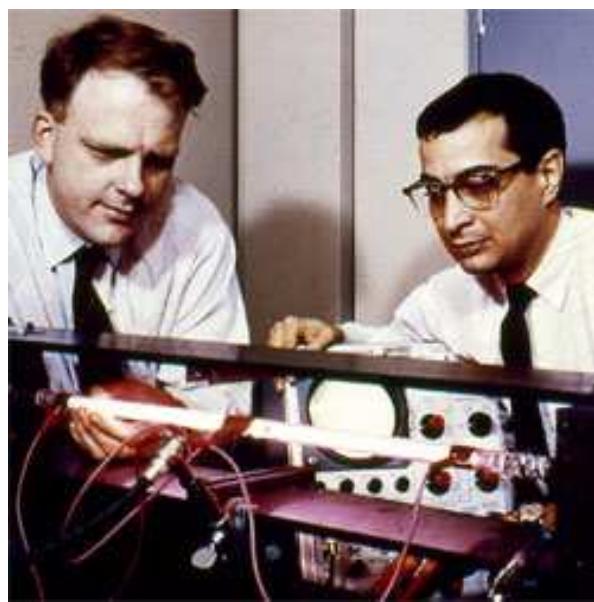
Slika 1.05 Gordonove bilješke gdje se prvi put spominje riječ LASER

Rad na teoretskim osnovama laser-a pokrenuo je pravu utruku između raznih laboratorijskih u SAD-u u konstrukciji prvog uređaja. Prvi laser konstruira Theodore H. Maiman 1960 u laboratoriju za razvoj aeronautičke kompanije "Hughes Aircraft", ispred timova na sveučilištu Columbia i Bell Laboratories-a. Prvi laser koristio je jako intenzivnu neonku i sintetički kristal rubina te emitirao crveno svjetlo valne duljine 694nm, ali kao i prvi maser nije imao mogućnost kontinuiranog emitiranja (CW), nego je radio u pulsnom modu.



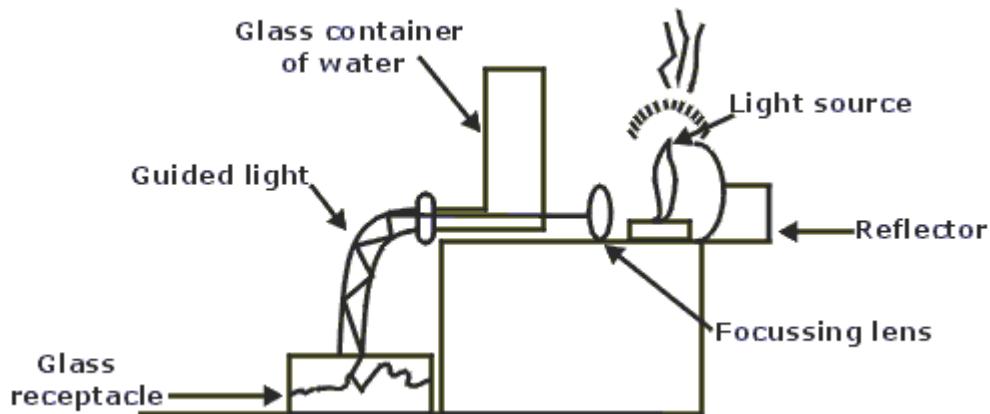
Slika 1.06 Theodore Maiman i prvi laser

Kasnije 1960 iranski fizičar Ali Javan i njegovi američki kolege William R. Bennett te Donald Herriott konstruiraju prvi plinski laser koristeći helij i neon (HeNe laser) koji je operirao u IR djelu spektra i imao mogućnost kontinuirane emisije (CW).



Slika 1.07 Javan, Bennett i prvi plinski laser

Javan također prvi predlaže poluvodički laser koji prvi konstruirao 1962 Robert N. Hall na bazi galium arsenida (GaAs) koji je radio na 850nm bliskom infracrvenom dijelu (Near IR) spektra. Ovi prvi poluvodički laseri mogli su raditi samo u CW modu ako su hlađeni tekućim dušikom na 77 K.



Slika 1.08 shema prvog diodnog lasera

Tijekom 60-tih godina korištena je tehnika nanošenja LPE ( liquid phase epitaxy) pri konstrukciji poluvodičkih lasera. Tehnika se sastoji u nanošenju rastaljenog tekućeg sloja poluvodiča na kruti poluvodič drugog tipa. Kontrolom hlađenja moguće je vrlo precizno nanošenje tankog filma poluvodiča i posebno je pogodna za galij-arsenid (GaAs) legure. Tehnologija je tijekom 70-tih zamijenjena mnogo preciznijom tehnikom MBE (molecular beam epitaxy), i MOVPE (metalorganic vapour phase epitaxy), obje metode su varijacija isparavanja jednog sloja poluvodiča i nanošenja isparenih čestica na podlogu drugog sloja u vakumu.

Diodni laseri tog vremena radili su na gustoći protoka struje od  $1000 \text{ A/cm}^2$  na 77 K i bili sposobni kontinuirano emitirati, ali ako bi bili korišteni na sobnoj temperaturi (oko 300 K) gustoće struje bi porasle i do  $100000 \text{ A/cm}^2$  i uništile poluvodič. Prvi diodni laseri bili su homospojne legure tj. spojevi istih materjala ali sa različitim vrstama nečistoća, donorskim i akceptorskim (npr. PN-spoj). Dodavanjem aluminija (AlGaAs) napravljene su prve heterospojne legure poluvodiča. Heterospojni poluvodiči imaju različite energetske razine i različit index refrakcije. Ovakve strukture prepoznao je njemački fizičar Herbert Kroemer zato jer one imaju nekoliko jedinstvenih prednosti kod nekih elektroničkih i optoelektroničkih uređaja uključujući i diodne lasere. Jedno od njihovih svojstava je da značajno smanjuju graničnu gustoću struje kroz poluvodič. Prve heterospojne diode bile su jednostrane heterospojne laserske diode koristeći aluminij (AlGaAs) i LPE tehniku legiranja. Gustoča struje kod ovih lasera pala je na  $10000 \text{ A/cm}^2$  na sobnoj temperaturi te su mogli raditi u pulsnom modu. Godine 1970 veliki ruski fizičar i nobelovac Zhores Alferov prvi uvodi tehniku dvostrane heterospojne legure i pravi prvi diodni laser koji je sposoran raditi na sobnoj temperaturi u kontinuiranom CW modu.

Poluvodički laseri danas se masovno proizvode u velikom broju valnih duljina i imaju vrlo širok spektar primjene. Najrasprostranjenija su vrsta lasera, npr. 2004 napravljeno je 733 milijuna diodnih lasera i samo 131000 svih ostalih tipova. Koriste se od čitača/snimača optičkih medija i bar kodova do vojnih laserskih daljinomjera i sustava laserskog navođenja, u medicinske svrhe itd. Da bi mogli proučiti principe rada i unutarnju strukturu raznih lasera prvo moramo objasniti osnovne fizikalne principe koji omogućavanju njihov rad i time se bavi naše sljedeće poglavljje.

# QED i Kvantna optika

*That theory is worthless. It isn't even wrong!*

Wolfgang Pauli

## **QED:**

QED ili "Quantum electrodynamics" (kvantna elektrodinamika) je relativistička kvantna teorija poja u elektromagnetizmu. U suštini ona opisuje na fundamentalnoj razini interakciju između nositelja elektromagnetske sile fotona i materije. To je prva teorija u kojoj je postignuto potpuno slaganje kvantne mehanike i Einstein-ove specijalne teorije relativnosti. QED matematički opisuje sve fenomene električki nabijenih čestica putom razmjene fotona i predstavlja kvantnu nadogradnju klasične Maxwell-ove teorije elektromagnetizma, opisujući sve vrste interakcija materije i EM-sile. Richard Feynman, jedan od najvećih teoretskih fizičara 20. stoljeća nazvao ju je „draguljem cijele fizike“ zbog njezine ekstremne preciznosti i predviđanja svojstava kao što su anomalije magnetskog momenta elementarnih čestica, Lambov pomak (veoma mala razlika između energetskih razina u orbitalama atoma vodika) i sličnih promatranih pojava koje ni jedna prijašnja teorija nije mogla objasniti. Slaganje teoretskih predviđanja i eksperimanata iznosi fenomenalnih jedan dio u milijardu ( $10^{-9}$ ) kod mjerena dipolnog momenta čestica i čini QED eksperimentalno najtočnije potvrđenom teorijom do sad.

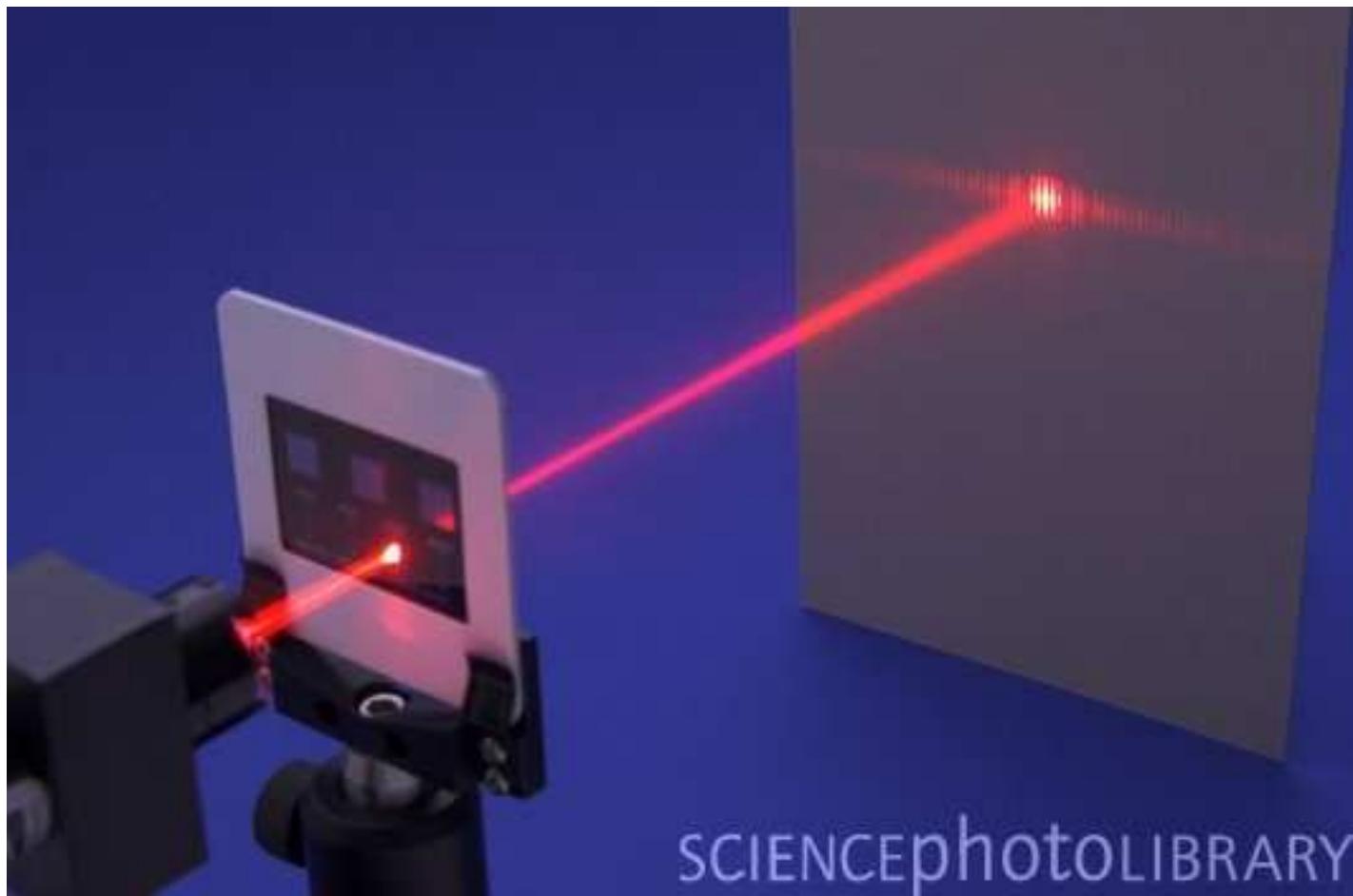
Prvu formulaciju kvantne teorije koja opisuje zračenje i materiju dao je engleski fizičar Paul Dirac 20. godina prošlog stoljeća. Dirac je opisao kvantizaciju elektromagnetskog polja kao skup harmoničkih oscilatora sa virtualnim fotonima koji djeluju kao nosioc razmjene između čestica privlačeći ih ili odbijajući ovisno o predznaku naboja. Heisenberg, Pauli, i Oppenheimer pokušali su matematički formalizirati Dirac-ovu ideju ali su nailazili na zapreke u vidu nerješivih beskonačnosti prouzrokovanih interakcijom elektrona sa samim sobom. Dolaskom II svjetskog rata većina fizičara okreće se nuklearnoj fizici i drugim poljima koji su od većeg ratnog značaja. 1947. g. američki fizičar Willis Lamb pomno analizira energetska stanja vodikovog atoma i pokazuje da postoji određeno razdvajanje energetskih stanja tj. postoje u biti dva stanja tamo gdje se mislilo da postoji samo jedno. Ta pojava je nazvana Lambov pomak. Tadašnje teorije nisu predviđale ovaj pomak i njegovo puko "ad hock" uvrštavanje u teoriju davalо je beskonačan rezultat za pomak. Labov pomak ukazao je na nedostatke tadašnje formulacije kvantne teorije i otvorio potrebu za novom sveobuhvatnijom teorijom. Prvu indikaciju mogućeg rješenja dao je njemački fizičar Hans Bethe koji je napisao prvi nerelativistički račun pomaka vodikovih linija koje je izmjerio Lamb. Koristio je metodu renormalizacije, gdje se neka beskonačnost poništava drugom da bi ostala specifična vrijednost. Iako je rješenje sustava jednadžbi davalо vrijednosti koje su koegzistentne sa specijalnom teorijom relativnosti, pojedini elementi sustava to nisu bili. Početkom 1950-tih Tomonaga, Julian Schwinger, i Richard Feynman pronalaze sustav jednadžbi koji su individualno koegzistentne sa relativnošću, očišćene od svih beskonačnosti i imaju odličnu korelaciju sa eksperimentima. Rezultat je postao poznat kao QED i Tomonaga, Schwinger i Feynman dijele Nobelovu nagradu za fiziku 1965g. Morali su čekati toliko dugo zato što poznati danski fizičar Niels Bohr koji je sjedio u odboru za dodjelu Nobelove nagrade nije volio QED i tek nakon njegove smrti 1962g. teorija je došla na razmatranje. Tomonaga i Schwinger uzeli su strogo matematički pristup dok je Feynman adaptirao mnogo lakše razumljiv grafički pristup. Feynman je opisao gibanje čestica kroz prostor-vrijeme sa dijagramima koji se njemu u čast nazivaju "Feynmanovi dijagrami" koji na vizualan način analiziraju interakcije fotona i materije. U nastavku ćemo pobliže opisati mehanizam rada teorije kako ju je zamislio Feynman.

Elektromagnetsko polje je interakcija električki nabijenih čestica, dok foton služi kao nosioc sile. Esencijalni dio QED-a je interakcija između fotona i elektrona, zato što su sve interakcije fotona i drugih nabijenih čestica analogne tome.

Interakcije između fotona i elektrona mogu biti razmatrane kao tri vjerovatnosti.

1. Vjerovatnost da foton putuje od točke A do B.
2. Vjerovatnost da elektron putuje od toče A do B
3. Vjerovatnost da će elektron emitirati ili apsorbirati foton

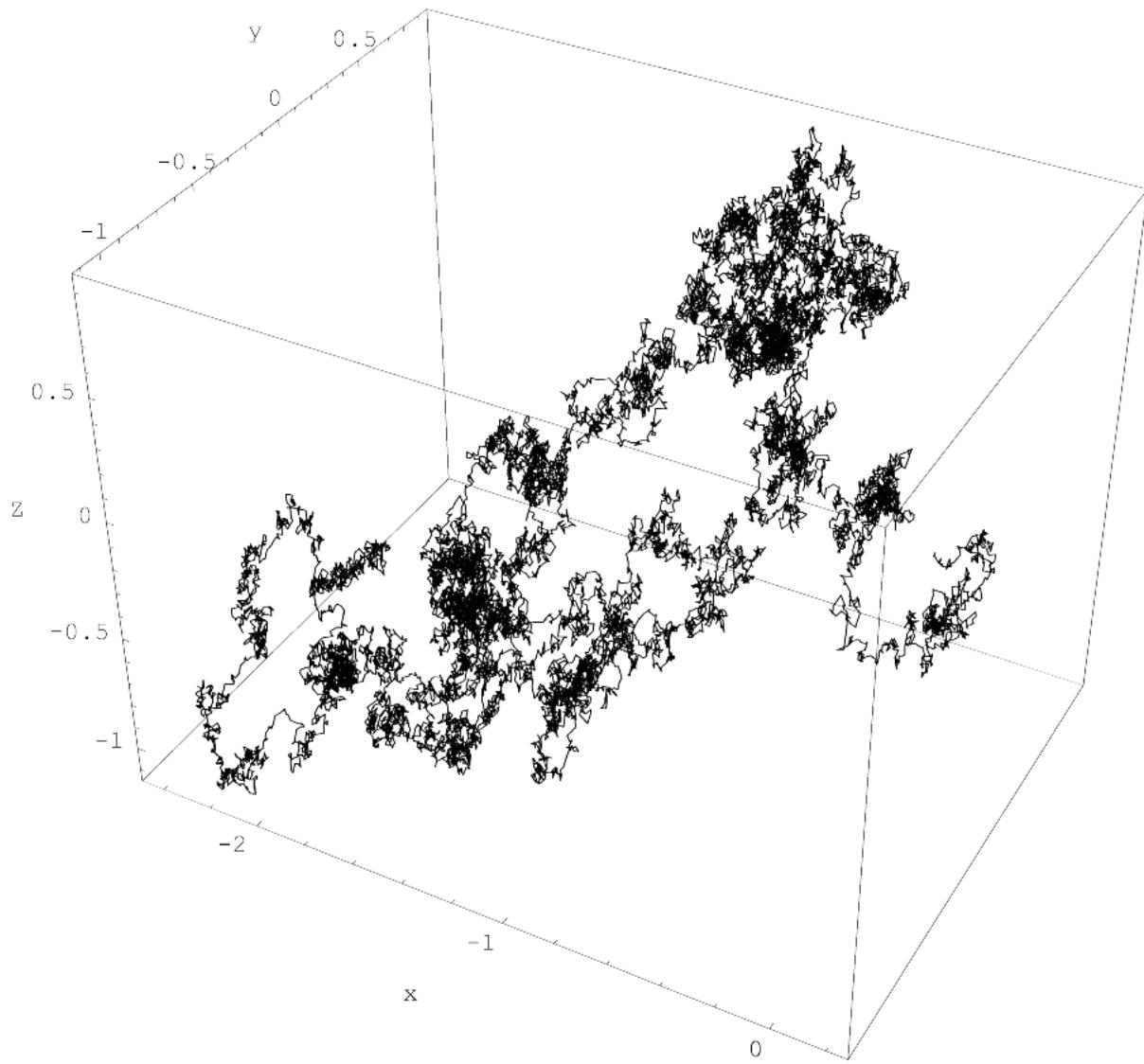
Ako znamo ove vjerovatnosti možemo izračunati sve interakcije. Iako ovo u početku djeluje jednostavno, stvari postaju mnogo zanimljivije. Na prvi pogled možemo pretpostaviti da fotoni ili elektroni putuju od toče A do B po ravnoj liniji, ali Feynman kaže da moramo uzeti u obzir sve moguće puteve od A do B ma kako oni zvučali neracionalno i neintuitivno i izračunati sumu njihovih vjerovatnosti. Ovo je aplikacija nečega što kvantni fizičari zovu "totalitarni teorem" tj. sve što nije izričito zabranjeno je neminovno ili sve što se može dogoditi, dogodit će se u nekoj vjerovatnosti. Feynman je to opisao riječima "elektron radi što god hoće, kreće se u bilo kojem smjeru, bilo kojom brzinom, naprijed i natrag kroz vrijeme i kad sumiraš sve amplitude dobiješ rezultat gdje se on stvarno nalazi, barem u većini slučajeva". Ovo se još naziva integral puta ili "suma preko povijesti", u ovom kontekstu povijest znači bilo koji od mogućih puteva elektrona. Ovakav način interpretacije ima smisla svakome tko je upoznat sa paradoksom "eksperimenta interferencije sa dva proreza", najpoznatijeg eksperimenta u kvantnoj fizici. Uzmimo da imamo neki detektor fotona (np. CCD senzor) i zastor u kojemu postoje dva tanka proresa ispred detektora. Ako ispaljujemo fotone jedan po jedan prema zastoru, detektirat ćemo interferencijski uzorak, neupitni indikator valne prirode svjetlosti tj. kao da je svaki foton prošao kroz oba proresa istodobno i interferirao sa samim sobom. Ako imamo 4 proresa imat ćemo 4 moguća puta , ako imamo 8 proresa imat ćemo 8 mogućih putova, ako maknemo kompletan zastor imat ćemo beskonačno mogućih puteva da foton dođe do detektora tj. beskonačno proresa. Ako sumiramo vjerovatnosti svih puteva dobijemo rezultat da se foton gibao od izvora do detektora po ravnoj liniji tj. najkraćim putem.



SCIENCEphotOLIBRARY

Slika 2.01 Karakteristični patern interferencije u eksperimentu sa 2 proresa

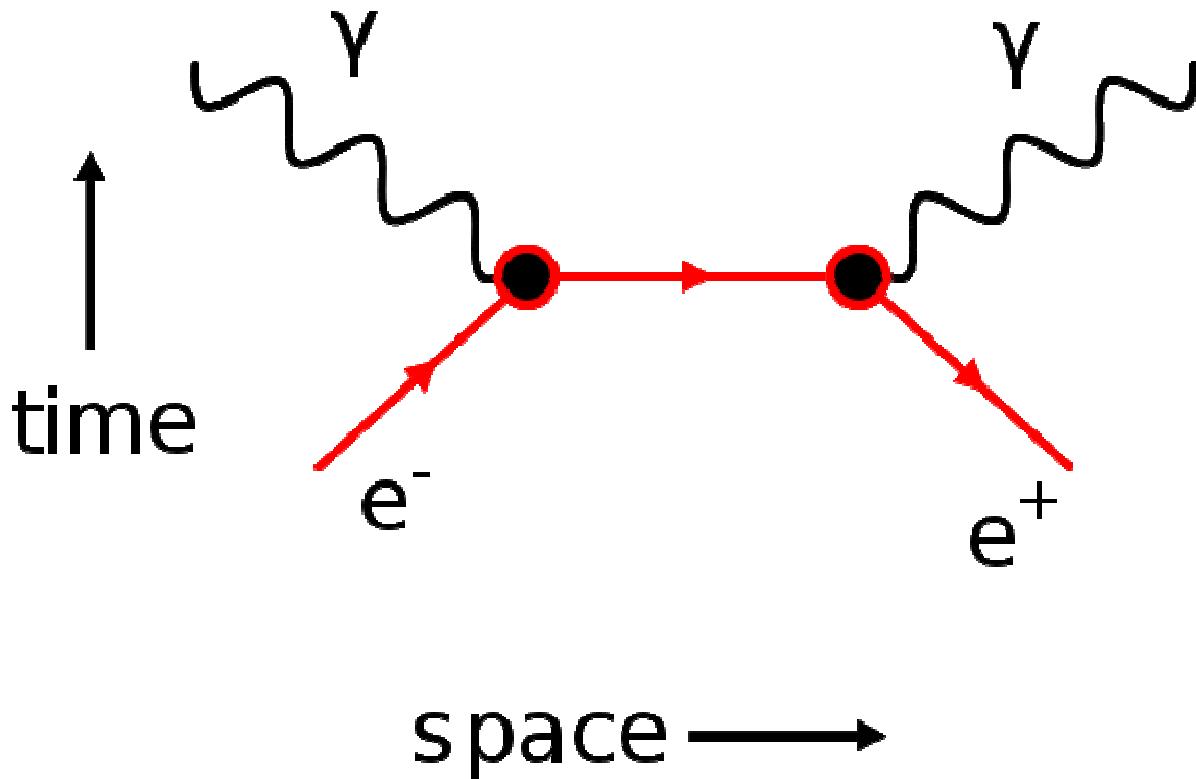
Ovaj koncept predstavlja alternativu Schroedingerevoj jednadžbi i Kopenhagenskoj interpretaciji kvantne mehanike (njen tvorac je Niels Bohr). Umjesto da foton, elektron ili neki drugi kvantni sustav promatramo kao probabilističku valnu-funkciju tj. da oni ne postoje dok nisu detektirani ili izmjereni, "suma preko povijesti" kaže da oni postoje svugdje, duž svih mogućih puteva, a izmjerena vrijednost nije ništa drugo nego suma svih tih putova.



Slika 2.02 jedan od beskonačno mnogo jednakovjerojatnih putova fotona u Feyman-ovoj interpretaciji kvantne mehanike

Dirac-ov orginalni rad iz 1929 opisuje interakcije između fotona i elektrona, ali se rezultati nisu dobro slagali sa eksperimentima. 1948 Schwinger shvaća da je problem u tome što elektron može emitirati ili apsorbirati foton istovremeno dok je u interakciji sa nekim drugim fotonom. Nakon mukotrpog rada rezultati su počeli konvergirati sa eksperimentalnim mjeranjem. Moderni rezultati se slažu sa mjerenjima na deset decimalnih mjesta. To je ekvivalentno mjerenu udaljenosti između Europe i Amerike sa greškom manjom od širine kose.

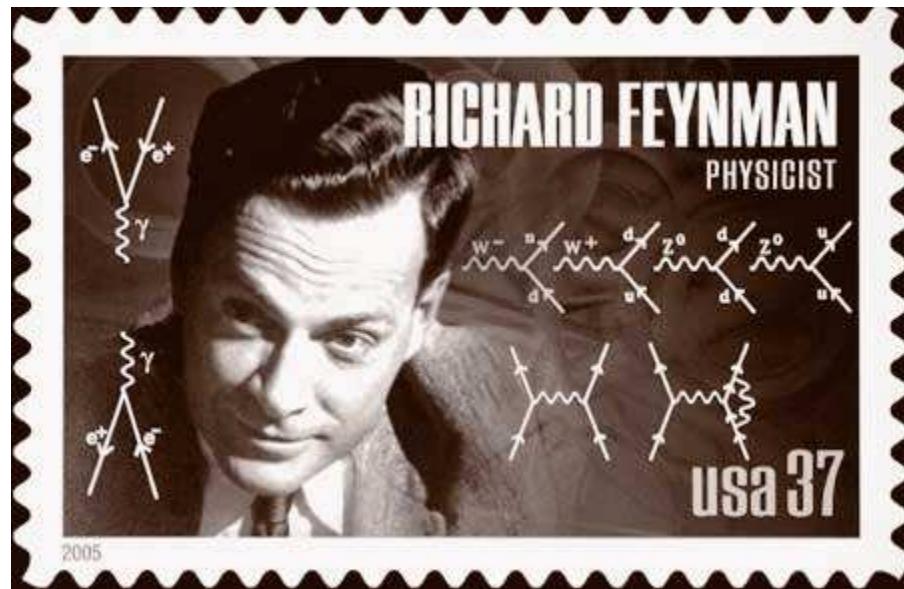
Postoje razne varijacije kvantnih interakcija, nap. visokoenergetski gama-ray foton može se spontano pretvoriti u elektron-pozitron par. Feynman je opisao ovaj proces vrlo elegantno iako pomalo bizarno. Pokazao je da je elektron-pozitron produkcija ekvivalentna sudaru fotona i elektrona koji šalje elektron unatrag kroz vrijeme i primjenjuje logiku dvostrukе negacije naboja tj. naboј elektrona postaje pozitivan. Po Feynman-ovoј interpretaciji pozitron (antimaterijska verzija elektrona) nije ništa drugo nego elektron koji putuje unatrag kroz vrijeme. Pozitron putujući unatrag kroz vrijeme nailazi ponovo na gama-ray foton koji ga baca unaprijed kroz vrijeme i postaje ponovo isti elektron sa početka priče.



Slika 2.03 Feynman-ov diagram elektron-pozitron aninhalačije

Feynman je shvatio da u prirodi nepostoje izolirani elektroni. Dali bi elektromagnetizam uopće postojao ako bi bila samo jedna nabijena čestica u cijelom svemiru? Očito je da moraju postojati druge nabijene čestice koje razmjenjuju fotone između sebe tako stvarajući elektromagnetsku silu. Feynman je primjetio da na fundamentalnoj razini fizički procesi neprave razlike u smjeru protoka vremena. Video sudara dvaju čestica ima smisla bez obzira dali ga gledali normalno ili premotavali unatrag, iz samog gledanja videa nemoguće je reći u kojem smjeru je on pušten. To nije slučaj za neki makroskopski sustav, naprimjer topljenje kocke šećera u vodi, ukoliko nam netko pusti takav video unatrag to ćemo odmah primijetiti jer rastopljeni šećer se spontano nikad ne formira u kocku sam od sebe. Stanje šećera u kocki ima veoma malu entropiju, dok rastopljeni šećer ima relativno veliku. Ta razlika u entropijama tj. prijelaz iz stanja manje entropije ka većoj je ono što mi opažamo kao protok i smjer vremena. Sve fundamentalne teorije u fizici kao teorija relativnosti i kvantna mehanika su vremenski simetrične. Maxwell-ove jednadžbe koje opisuju elektromagnetizam su također vremenski simetrične, što znači da video tih interakcija radi jednakо dobro unaprijed i unatrag, jedino se mijenja predznak naboja kao i kod gama-ray sudara sa elektronom u gornjem primjeru. Prema Einstein-ovoј teoriji relativnosti

vrijeme se usporava za objekt koji se približava brzini svjetlosti. Budući da svjetlost putuje brzinom svjetlosti vrijeme ne postoji za svjetlost. Sa točke gledišta fotona bilo koje razmatranje vremena je beznačajno, kao što je i beznačajno i razmatranje smjera protoka vremena. Koncept da elektron emitira fotone unazad i unaprijed kroz vrijeme predstavlja temelje QED-a. Njezine metode su toliko moćne da predstavljaju teoretske osnove za veliki broj znanstvenih grana od elektrotehnike, optike, kemije, termodinamike itd. Njome je moguće fundamentalno objasniti gotovo svaki promatrani fenomen na makrorazini, osim onih što uključuju gravitaciju.



Slika 2.04 poštanska marka sa likom Richarda Feynmana i njegovih dijagrama QED interakcija

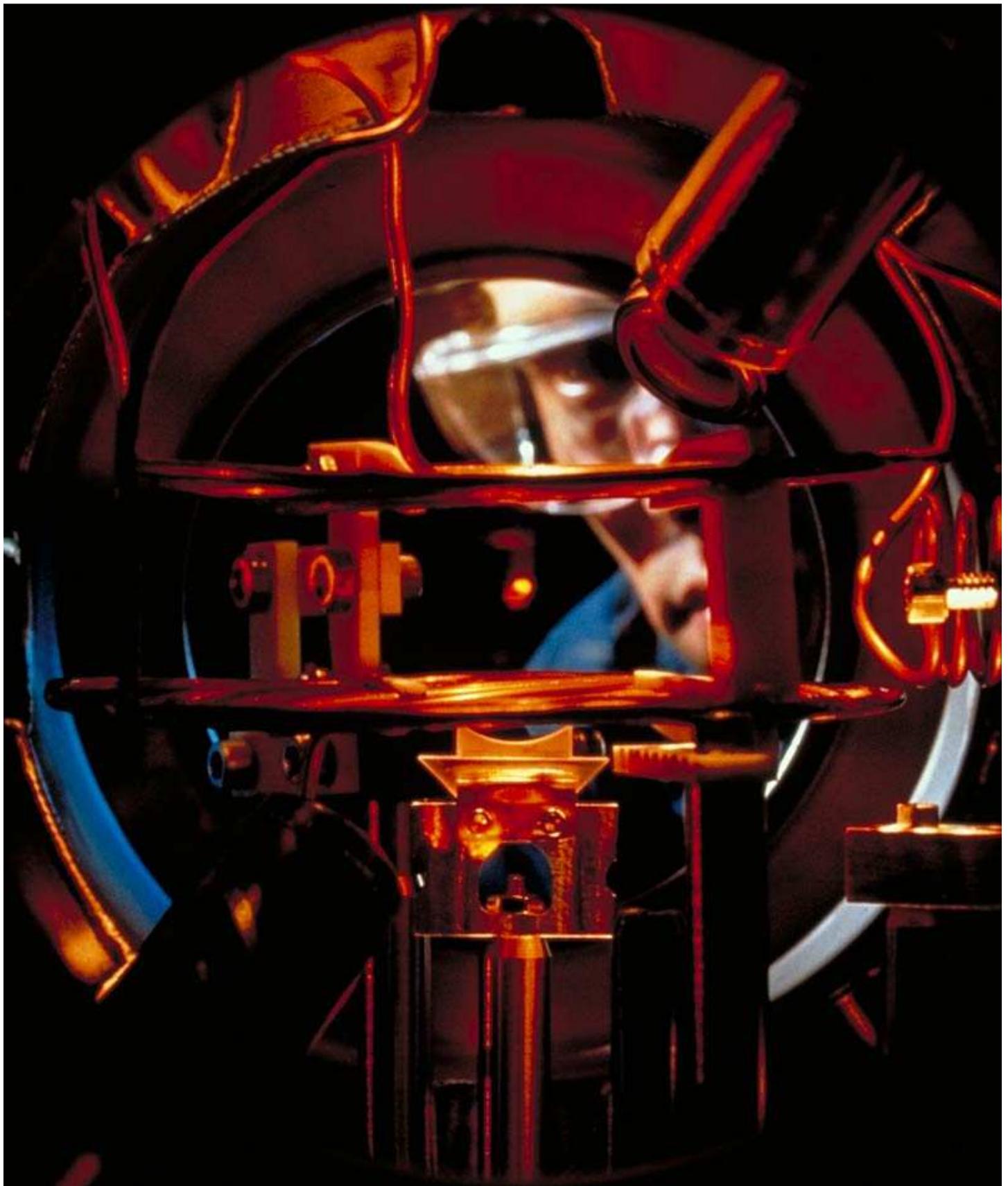
## Kvantna optika:

Kvantna optika je grana fizike koja se bavi aplikacijom kvantne mehanike na svjetlost i njenom interakcijom s materijom. Svjetlo se sastoji od čestica koje nazivamo fotonima i zato je inherentno zrnasto (kvantizirano). Za razliku od klasične optike koja promatra valnu prirodu svjetlosti, kvanta optika razmatra njezinu čestičnu stranu. Prve indikacije da svjetlost može biti kvantizirana dolaze od njemačkog fizičara Max Planck-a 1899 kada je on prvi uspio modelirati zračenje crnog tijela i tako pokrenuo jednu od najvećih revolucija u fizici.

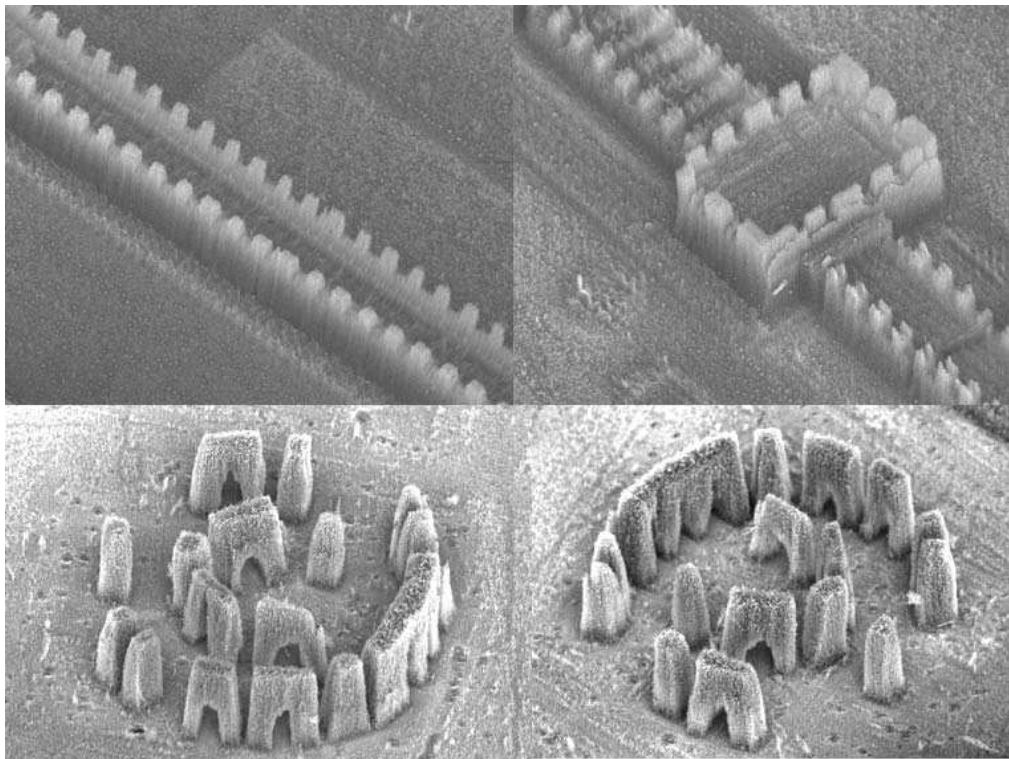
Prepostavljajući da je zračenje kvantizirano Niels Bohr pokazuje da su atomi isto kvantizirani u smislu da mogu emitirati samo diskrete količine energije. Razumijevanje interakcija između zračenja i materije ne samo da čini osnovu kvantne optike nego je krucijalno za razvoj cijele kvantne mehanike. 1960-tih godina laserska znanost tj. istraživanje principa, dizajna i aplikacije ovih uređaja postaje važno polje u fizici i dio kvantne teorije koji proučava svojstva svjetlosti dodiva na značaju.

Kako je laserska znanost zahtjevala dobre teoretske temelje i ima jako široku primjenu, zanimanje za kvantu optiku značajno je poraslo. Sljedeći Dirac-ov rad na kvantnoj teoriji polja George Sudarshan, Roy J. Glauber, i Leonard Mandel apliciraju kvantu teoriju na elektromagnetsko polje 50-tih i 60-tih godina prošlog stoljeća da bi dobili detaljan uvid u efekt fotodetekcije i statistike svjetla (stupnja koherencije). To dovodi do uvođenja koherentnog stanja kao kvantnog objašnjenja laserskih uređaja i spoznaje da se neka energetska stanja svjetlosti ne mogu opisati klasičnim valovima. 1977 američki fizičar H. Jeff Kimble demonstrira prvi izvor svjetla koji zahtjeva kvantno objašnjenje, jedan atom koji emitira jedan po jedan foton. Ovo je prvi nepobitan dokaz da se svjetlo sastoji od čestica tj. fotona. Ubrzo je predloženo još jedno kvantno stanje svjetlosti tzv. „komprimirana svjetlost“ ili „squeezed light“. U kvantnoj teoriji komprimirano koherentno stanje sustava je posljedica zasićenja Heisenberg-ovog principa neodređenosti u Hilbert-ovom prostoru. Princip neodređenosti je jedan od osnovnih postulata kvantne mehanike i kaže da točne vrijednosti nekog kvantnog sustava kao što su točna pozicija i moment neke čestice ili točna jakost nekog polja u točno određenom trenutku nikad ne možemo precizno odrediti tj. što neku veličinu preciznije izmjerimo druga će biti netočnija. Bitno je shvatiti da ovo nema nikakve veze sa našom sposobnosti i tehnologijom da točno izmjerimo neku vrijednost, nego je ovo svojstvo samog sustava, tj. sistem ne može biti definiran tako da istodobno ima singularne vrijednosti za pojedinu svojstva kao što su pozicija i brzina, termini koji su sasvim uobičajeni kad opisujemo neki klasični sustav. Hilbert-ov prostor je n-dimenzionalni fazni ili konfiguracijski prostor koji omogućava matematičku analizu evolucije nekog sustava. Ima široku primjenu kod rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, u kvantnoj teoriji, kod fourijerove analize itd.

Razvoj kratkih i ultrakratkih laserskih pulseva, postignutih sa "Q switching" i "modelocking" tehnikama koje će biti pojašnjene u sljedećim poglavljima otvorio je put proučavanju neizmjerno brzih "ultrabrzih" pojava. Aplikacije kao što je spektroskopija i mehanička svojstva svjetlosti i materije su proučavana. To je dovelo do mogućnosti levitiranja atoma ili čak malih bioloških uzoraka u "optičkoj zamci" (optical trap), ili "optičkim škarama" (optical tweezers) pomoću laserske zrake. Dopplerovo ili lasersko hlađenje nužno je za formiranje Bose-Einstein-ovog kondenzata, tj. neke materije npr. razrijeđenog plina rubidijevih atoma ohlađene jako blizu apsolutne nule. Laserskim hlađenjem postignute su temperature od  $170\text{ nK}$  ili  $170 \times 10^{-9}\text{ K}$ . Kvantna optika također ima primjenu u demonstraciji kvantne korelacije među česticama, kvantne teleportacije, kvantnih optičkih vrata (quantum logic gates) esencijalnog elementa u konstrukciji kvantnih računala, konstruiranju pulsnih lasera koji rade u području atosekunde, ili  $10^{-18}\text{ s}$  (za usporedbu atosekunda se odnosi prema sekundi, kao što se sekunda odnosi prema 31.71 milijardi godina) omogućavajući proučavanje superbrzih pojava u prirodi sa neviđenom vremenskom rezolucijom, manipuliranju pojedinim atomima, proizvodnji „koherentnih apsorbera“, (Coherent perfect absorber, CPA) anti-laserskih uređaja koji apsorbiraju 99.99% koherentne laserske svjetlosti i pretvaraju je u neki drugi oblik energije kao toplinsku ili električnu.



Slika 2.05 oblak natrijevih atoma (svjetla točka u sredini) lebdi u optičkoj zamci ohlađen na  $43\mu\text{K}$



Slika 2.06 Kineski zid i Stonehenge kreirani pomoću lasera i optičkih škara od karbonskih nanocijevi (CNT), razmak između kamenja Stonehenge-a je oko 5nm.

### **Koncepti kvantne optike:**

Prema kvantnoj teoriji, svjetlo ne može biti promatrano samo kao elektromagnetski val nego također kao tok čestica, fotona koji putuju brzinom C (brzinom svjetlosti) u vakumu. Te čestice nisu kao klasične biljarske kuglice i sl. nego kvantni entiteti opisani svojom valnom funkcijom. Svaka čestica nosi samo jedan kvant energije koji je jednak umnošku frekvencije i Plankove konstante ( $hf$ ). Postulat o kvantizaciju svjetlosti kojeg je prvi otkrio Max Planck 1899, potvrdio Einstein 1905 svojim radom o fotoelektričnom efektu, navodi fizičare na ideju populacijske inverzije i mogućnostima lasera. Ovakva primjena statističke mehanike, dijela fizike koji se bavi teorijom vjerojatnosti, populacijskim jednadžbama, proučavanjem termodinamičkih sustava sačinjenih od velikog broja čestica itd. je fundamentalan dio kvantne optike. Svjetlost je opisana u smislu operatora polja ili stvaranja i aninhalacije fotona, tj. jezikom kvantne elektrodinamike (QED) koju smo razmatrali ranije. Često razmatrano stanje polja svjetlosti je koherentno stanje. Ovim stanjem možemo opisati izlaz monofrekvenčnog lasersa, iznad laserskog praga pokazuje tzv. Poissonovu statistiku broja fotona (Poissonova distribucija je diskretna distribucija vjerojatnosti koja predviđa broj nekih događaja u fiksnom vremenskom intervalu). Pomoću nekih nelinearnih interakcija koherentno stanje može biti transformirano u "komprimirano koherentno stanje" koje može imati "super" ili "sub" Poissonovu statistiku fotona. Svjetlost može biti komprimirana po fazi ili po amplitudi i koristi se za poboljšavanje rezultata preciznih mjerjenja u npr. Interferometriji ili detektorima gravitacijskih valova.

Pošto atome možemo prikazati pomoću kvantno mehaničkih oscilatora sa diskretnim energetskim spektrom, a tranzicija među stanjima posljedica je apsorpcije ili emisije svjetlosti. Snaga oscilatora ovisi o broju kvantnih stanja. Koherentno zračenje možemo promatrati kao amplifikaciju kvantnih efekata na makrorazini, što nam omogućuje razvoj tehnologija koje bi bile nezamislive bez dobrog poznavanja kvantne optike, koja ne samo da omogućuje razvoj lasera nego nam govori i što sve možemo s njima i napraviti.

# Fizika lasera

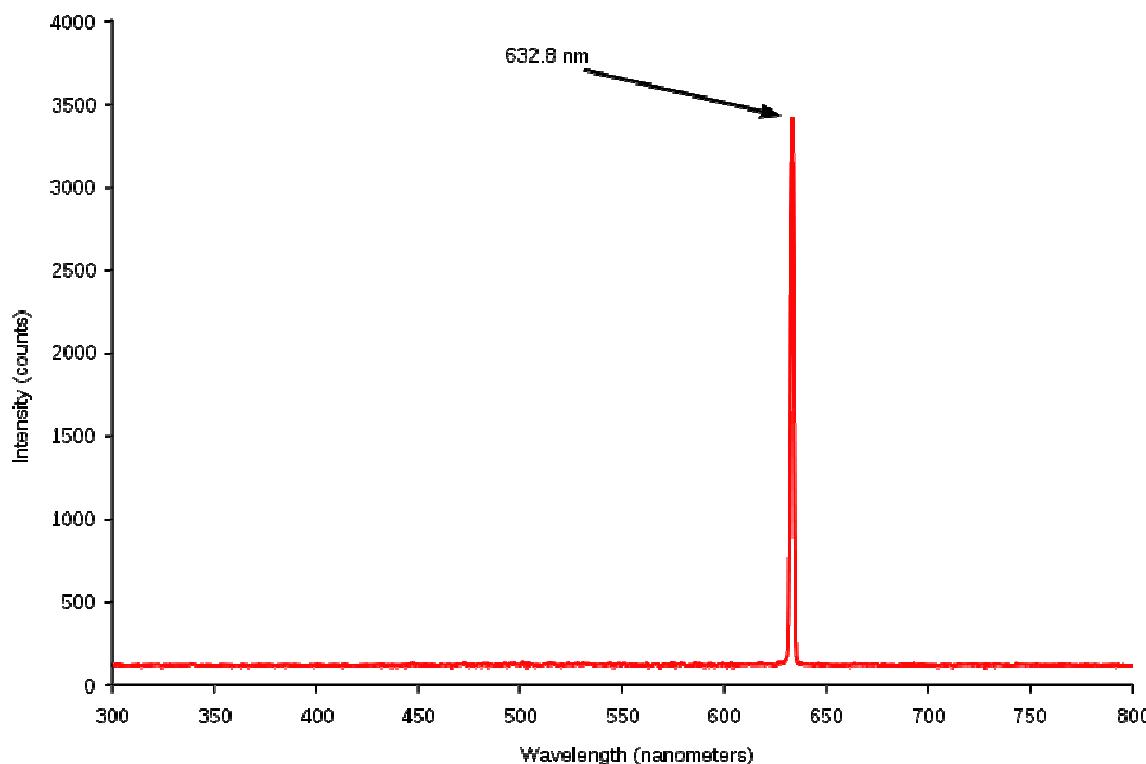
*There are no physicists in the hottest parts of hell, because the existence of a 'hottest part' implies a temperature difference, and any marginally competent physicist would immediately use this to run a heat engine and make some other part of hell comfortably cool.*

Richard Davisson

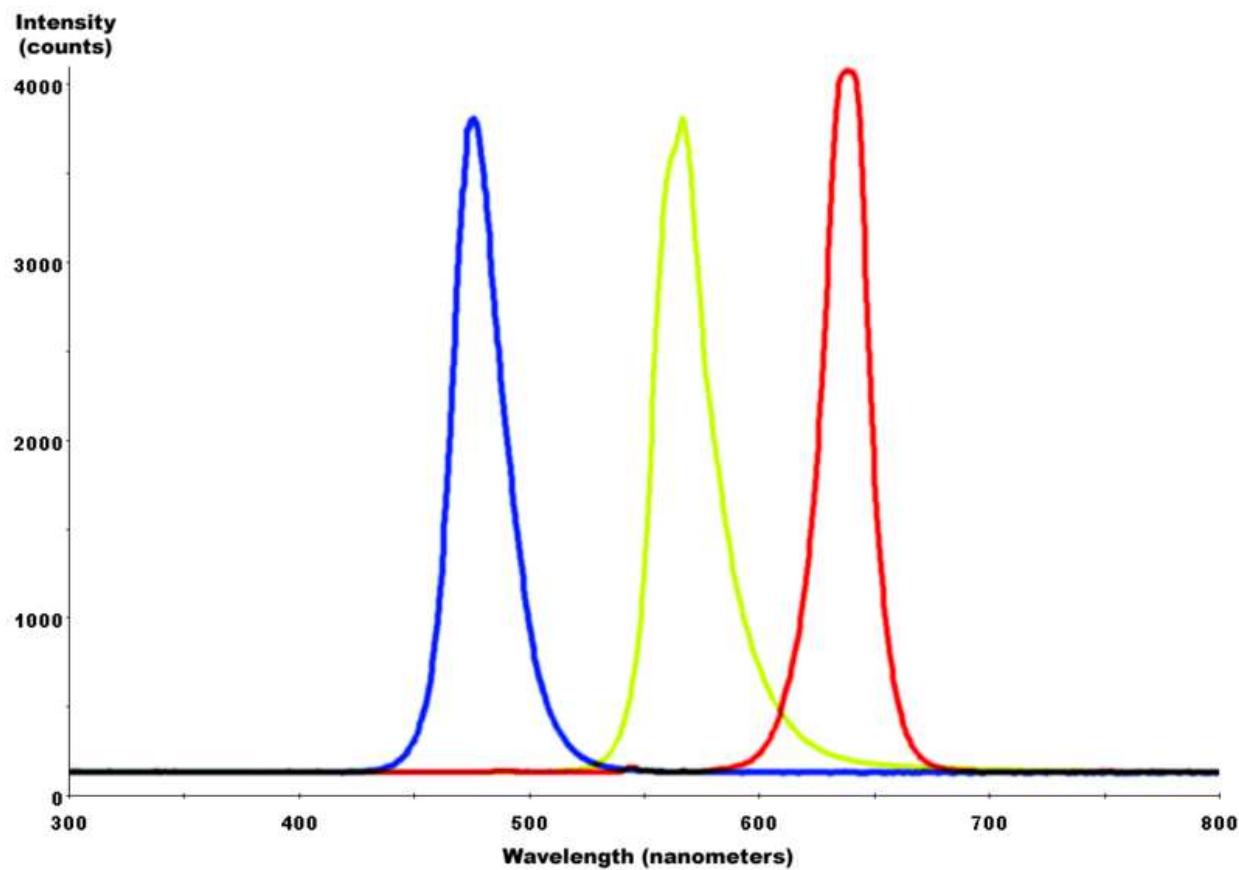
## Principi rada:

Aktivni medij lasera je materijal kontrolirane čistoće, veličine, koncentracije i oblika, koji amplificira lasersku zraku kroz proces "stimulirane emisije". Može biti u bilo kojem agregatnom stanju kao što je plin, tekućina, krute tvari ili čak plazma. Aktivni medij apsorbira upumpnu energiju, što dovodi neke elektrone u visoko energetsko ili pobuđeno kvantno stanje. Čestice mogu međudjelovati sa svjetlom apsorbirajući ili emitirajući fotone. Ta emisija može biti spontana ili stimulirana. Ukoliko je emisija stimulirana foton je emitiran u istom pravcu kao i zračenje koje prirodno prolazi kroz sustav. Kada broj čestica u nekom pobuđenom stanju pređe broj čestica u nekom nižem pobuđenom stanju nastupa populacijska inverzija i količina stimulirane emisije koja prolazi je veća od količine apsorpcije u mediju, pa kažemo da je svjetlo amplificirano. Ovakav naprava zove se optički amplifikator, a kad ga stavimo unutar rezonantne optičke šupljine dobijemo laser.

Svjetlost dobivena stimuliranim emisijom vrlo je slična početnom signalu po pitanju valne duljine, faze i polarizacije. To daje laseru njegovu karakterističnu koherenciju, omogućava da održi jedinstvenu polarizaciju, kao i monokromatska svojstva koja su određena dizajnom optičke šupljine.



Slika 3.01 frekvencijski spektar HeNe lasera

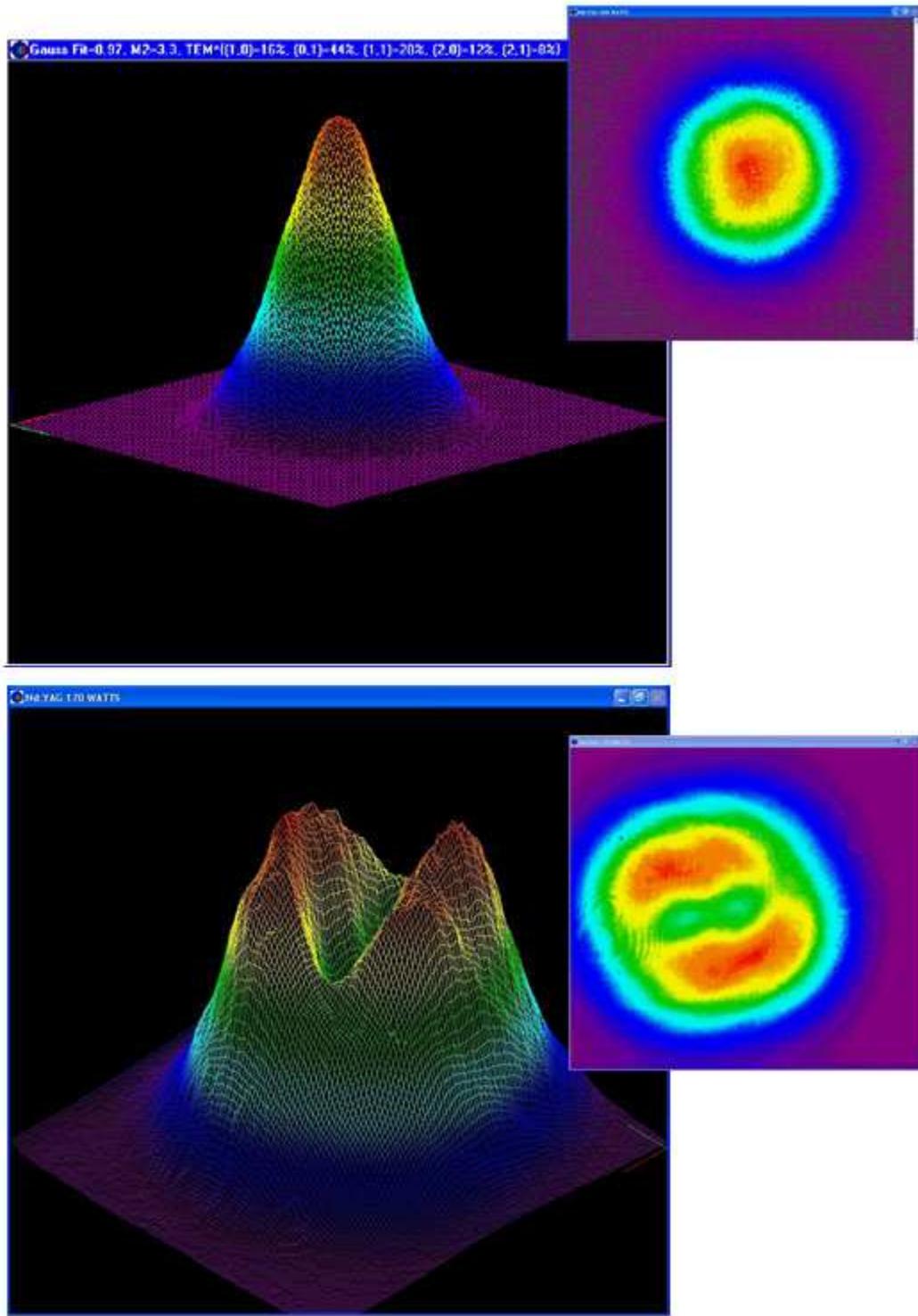


Skika 3.02 frekvencijski spektar LED dioda

Na slikama 3.01 i 3.02 vidimo razliku u spektrima između lasera i LED diode . Raspon valnih duljina na kojima emitira laser je reda veličine 0.002nm i spektralna čistoća je 10 000 puta bolja nego kod LED diode, što znači da je gotova sva energija lasera koncentrirana na vrlo uskom frekventnom području.

Optički rezonator se još ponekad naziva optička šupljina, ali to nije najtočniji naziv jer laseri koriste otvorene rezonatore umjesto doslovnih šupljina koje se koriste pri mikrovalnim frekvencijama kod maser-a. Rezonator se obično sastoji od dva zrcala između kojih koherentna zraka putuje u oba smjera reflektirajući se između zrcala i fotoni uzastopno prolaze kroz aktivni medij prije nego su emitirani kroz izlaznu apreturu ili su izgubljeni zbog difrakcije i apsorpcije. Ako je amplifikacija u aktivnom mediju veća od gubitaka u rezonatoru snaga recirkulirajuće zrake može se povećavati eksponencijalno. Budući da stanje stimulirane emisije vraća atom iz pobuđenog stanja u osnovno stanje time se reducira pojačanje aktivnog medija. Pojačavajući snagu zrake neto dobit se smanjiva i dolazi do saturacije aktivnog medija. U laserima sa kontinuiranim zračenjem (CW) balans između snage pumpanja i saturacije medija te gubitaka u šupljini dovodi laser u ravnotežno stanje i održava konstantnu snagu snopa, te definira operativnu točku lasera. Ako je snaga pumpanja premala aktivni medij nikad neće moći nadvladati gubitke u rezonatoru i laserska zraka neće biti proizvedena. Minimalna snaga pumpanja potrebna za formiranje koherentne zrake zove se "lasing threshold" Aktivni medij će amplificirati sve fotone koji prođu kroz njega, ali samo fotoni koji su u prostornom modu sa rezonatorom će proći kroz njega više puta i primiti značajnu amplifikaciju.

Zraka na izlazu iz lasera kada putuje kroz prazni prostor (ili neki homogeni medij), za razliku kad putuje nekim valovodom (nap. optičkim vlaknom) može biti aproksimirana kao Gaussova zraka u većini lasera, takve zrake imaju minimalnu divergenciju. Neki laseri velikih snaga mogu biti multimodni čiji se poprečni modovi aproksimiraju Hermite-Gaussian ili Laguerre-Gaussian funkcijama.



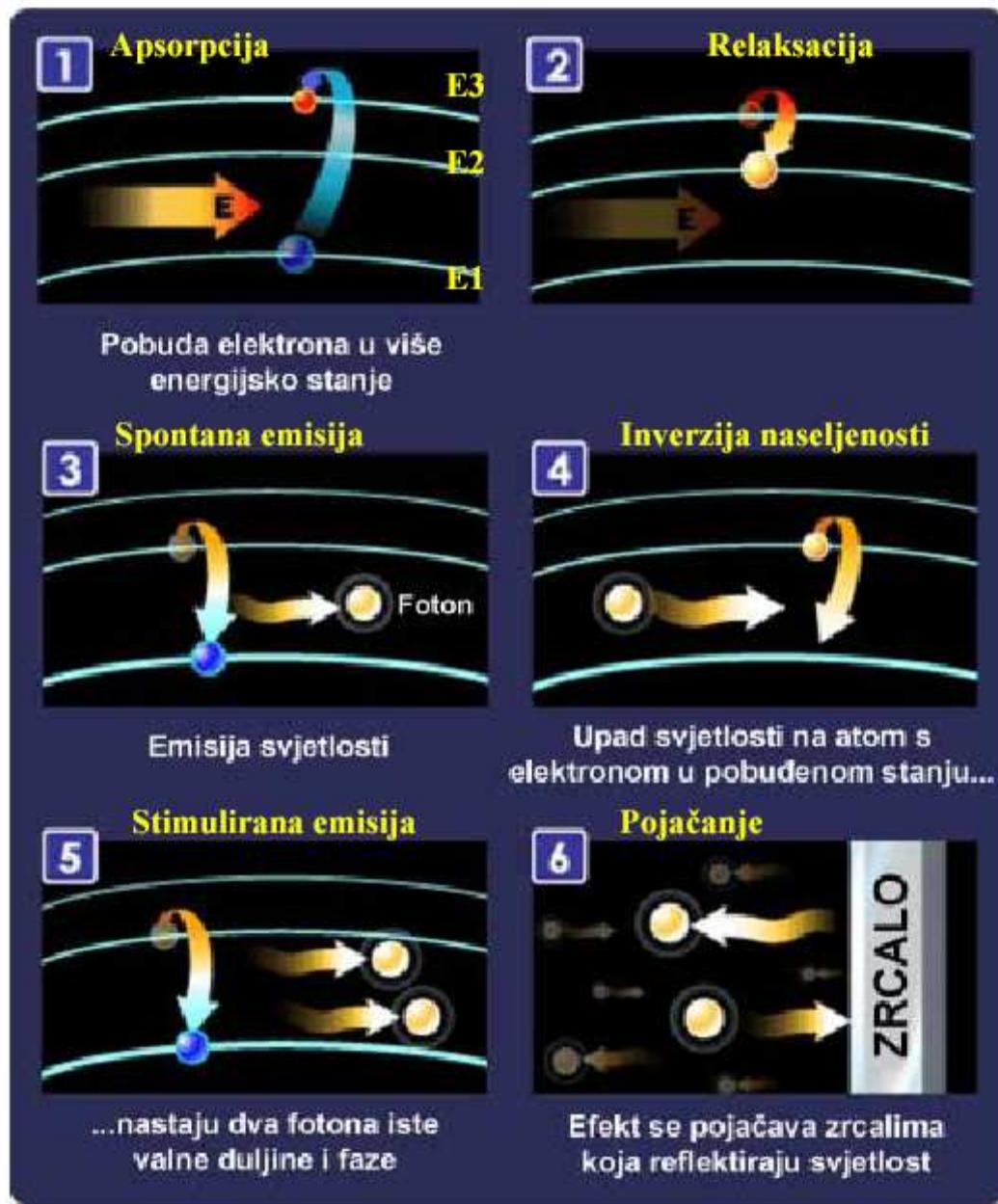
Slika 3.03 3D diagram Gaussove zrake jednog Nd:YAG lasera, kada radi na snazi od 100 W, Gaussov profil je gotovo idealan (gornja slika), kada mu snagu povećamo na 170 W zraka se razdvaja u dvije i počinje divergirati (donja slika)

U blizinu fokusa zraka je odlično koliminirana, valni frontovi su planarni bez ikakve divergencije. Međutim zbog difrakcije takva kvaliteta zrake održiva je jedino unutar Rayleigh-ove dužine (u laserskoj optici Rayleigh-ova dužina je udaljenost od apreture do točke za koju se površina presjeka zrake duplo poveća). Laserska zraka obično divergira pod kutom koji je inverzan sa dijametrom zrake, kako zahtijeva difrakcijska teorija. Tako će se zraka emitirana iz nekog prosječnog HeNe lasera raširiti na oko 500 km za udaljenost od Zemlje do Mjeseca. Poluvodički laseri prilikom izlaska iz kristala već imaju veliku divergenciju, ali se ta divergirana zraka može

koliminirati putem optičkih leća. To je moguće zato što je lasersko svjetlo prostorno i vremenski koherentno zračenje, koje nije moguće replicirati bilo kojim standardnim oblikom svjetla.

### Nastajanje laserskog zračenja:

Sada ćemo malo pobliže opisati proces nastajanja laserskog snopa.



Slika 3.04 slikoviti prikaz procesa nastajanja laserskog zračenja

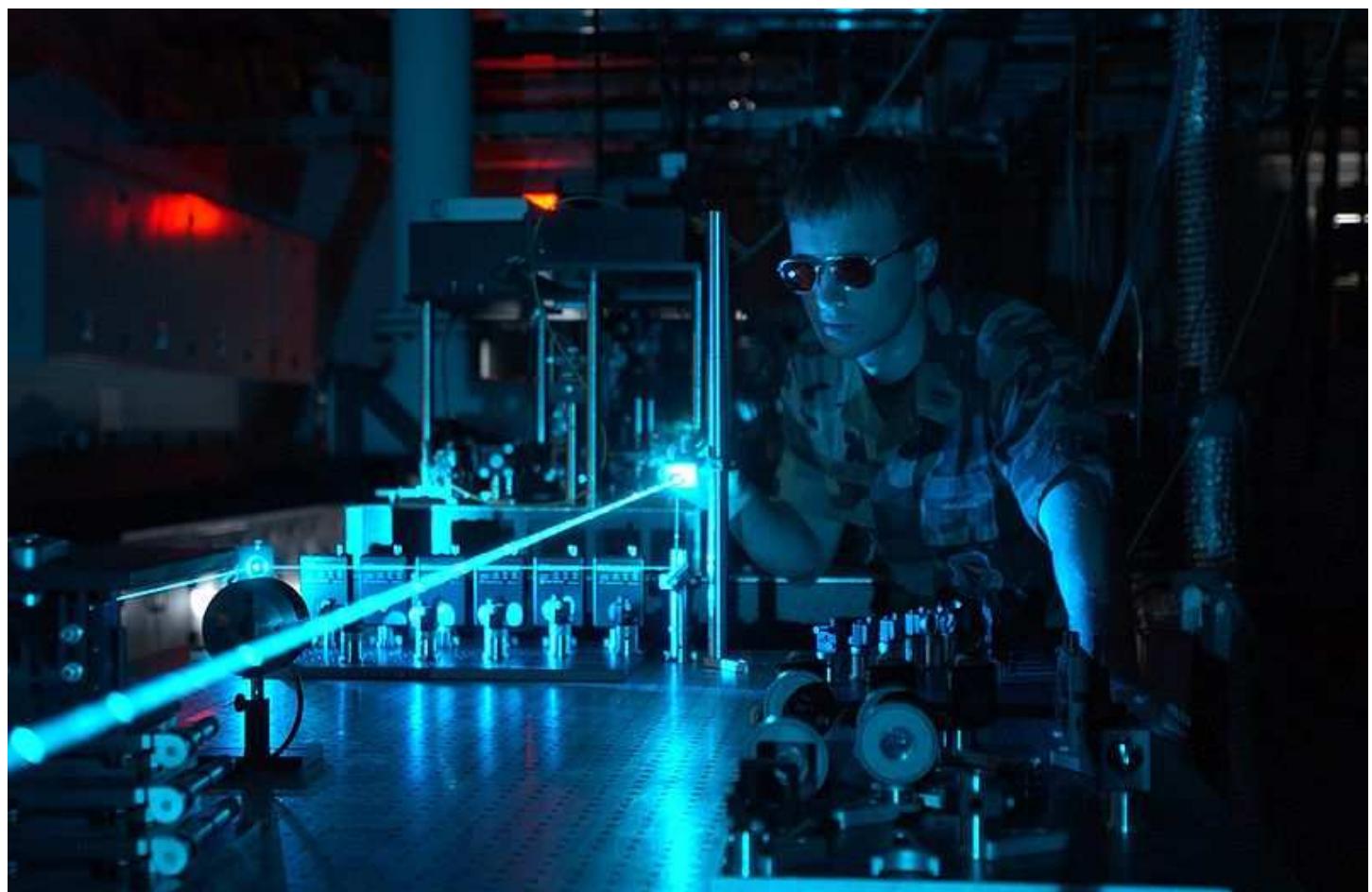
Elektronski omotač atoma sastoji se od elektrona koji u stabilnom stanju kruži po svojim orbitalama. Svaka orbitala može primiti točno određen broj elektrona i karakterizirana je određenom energijom. Prilikom prelaska elektrona iz orbitale veće energije E2, u orbitalu manje energije E1, dolazi do emisije zračenja ili emisije foton-a čija je energija jednaka  $E_2 - E_1$ . Elektron isto tako može prijeći iz orbitale manje energije u orbitalu veće energije jedino ako pri tome apsorbira jedan foton. Promatramo atom koji je u stabilnom stanju i posjeduje jedan elektron koji kruži oko jezgre po orbitali energije E1 (osnovno energetsko stanje). Na takav atom upada foton kojeg emitira optička pumpa i budući da je taj foton upravo odgovarajuće energije dolazi do njegove apsorpcije i naš elektron se prebacuje u nestabilno (pobuđeno) stanje E3. Energetsko stanje E3 živi jako kratko, što znači

da elektron u vrlo kratkom vremenu ( $\approx$ ns) prebacuje u energetski niže stanje E2 koje ujedno i stabilnije stanje (živi duže,  $\approx$ ms). Ovaj se proces zove relaksacija jer se kod njega ne mora nužno emitirati foton, već se energija može izgubiti i neradijativnim procesima. Nakon određenog vremena elektron prelazi u osnovno stanje emisijom fotona. Emitirani foton putuje po rezonatoru (koji se sastoji od dva zrcala) i na jednom se zrcalu reflektira natrag. Kad ponovo dođe do našeg atoma zatekne ga u pobuđenom stanju jer je on u međuvremenu primio novi foton od optičke pumpe. Neravnotežno stanje u atomu u kojem je populacija nekog pobuđenog stanja veća od populacije nekog osnovnog stanja naziva se populacijska inverzija. Populacijska inverzija je nužan uvjet za generiranje laserske emisije. U uvjetima populacijske inverzije stimulirana emisija nadjača spontanu emisiju i pri tome dolazi do pojačanja intenziteta svjetlosti, odnosno laserske emisije. Fotoni nastali procesom stimulirane emisije potpuno su identični i to je uzrok koherentnosti laserskog zračenja.

### **Modovi rada lasera:**

#### **1. Kontinuirano zračenje (CW)**

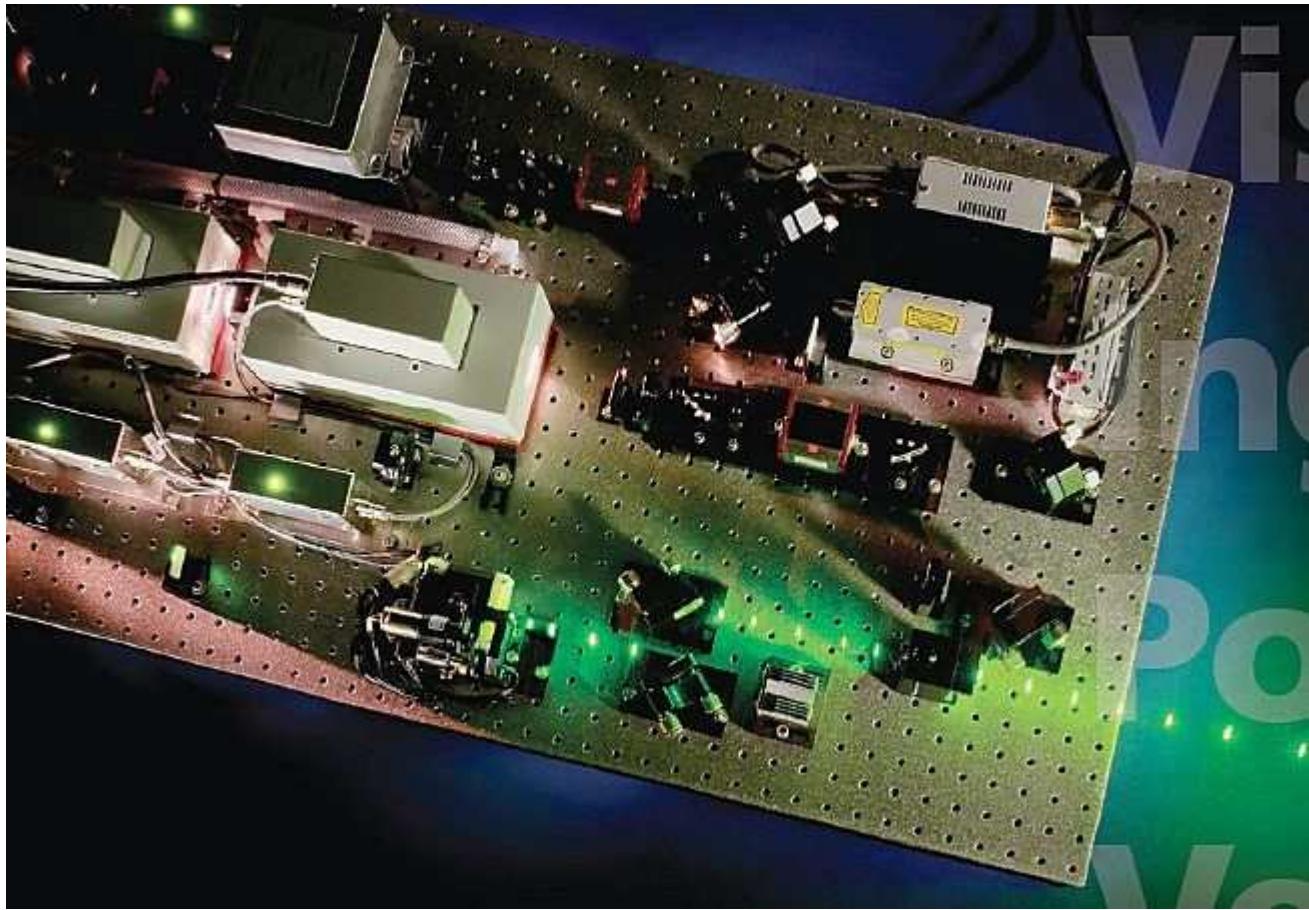
Lasere čija je izlazna snaga kontinuirana tokom vremena zovemo CW (continuous wave) laserima. Ovi tipovi lasera su najzastupljeniji u upotrebi. Za operaciju u kontinuiranom modu važno je da populacijska inverzija bude konstantno osvježavana optičkom pumpom. Za neke aktivne medije ovo je nemoguće, a u nekim laserima zahtjevalo bi pumpanje vrlo velikom kontinuiranom snagom koja bi uništila laser zbog velike termalne disipacije. Takvi laseri ne mogu raditi u CW modu.



Slika 3.05 473nm CW laser

## 2. Pulsno zračenje

Pulsna operacija lasera odnosi se na sve lasere koji nisu CW tj. ovi laseri zrače u pulsevima u nekom vremenskom intervalu, sa nekim stupnjem ponavljanja pulseva. Ovo obuhvaća visok raspon tehnologija i primjena. Neki laseri su pulsni samo zato što ne mogu raditi u kontinuiranom mode. Neke aplikacije zahtijevaju vrlo velike količine energije u vrlo malom vremenskom intervalu. Pulsni laseri mogu imati veću trenutnu snagu od ekvivalentnih CW lasera jer razmak između pulseva kad laser ne radi pridonosi boljoj disipaciji topline i hlađenju. Pulsni laseri zrače kroz nešto širi frekvencijski spektar od CW lasera.



Slika3.06 prilagodljivi Nd:YAG pulsni laser duljine pulsa 50 ns - 50  $\mu$ s, frekvencije ponavljanja 100Hz

## 3. Q-switching laseri

Posebna vrsta pulsnih lasera. Ovi laseri su optimizirani za vrlo velike vršne snage, reda veličine MW ili GW. Ovi laseri imaju mnogo veću pauzu između pulseva ali imaju mnogo veće energije pojedinog pulsa i veću duljinu trajanja pulsa. Ovo se postiže ugradnjom nekog varijabilnog prigušnika unutar optičkog rezonatora. Kad je prigušnik funkcionalan svjetlo ne može napustiti aktivni medij i zračenje ne može početi. Prigušenje unutar optičkog rezonatora odgovara smanjenju Q-faktora ili faktora dobrote u rezonatoru. Visoki Q-faktor znači da postoje mali gubici tokom perioda dok fotoni osciliraju u rezonatoru. Varijabilni prigušnik se naziva Q-switch (Q-prekidač). U početku laserski medij se optički pumpa dok je Q-switch podešen da sprječi povratnu vezu fotona u aktivnom mediju čineći tako optički rezonator sa niskim Q-faktorom. Ovo dovodi do populacijske inverzije, ali lasersko zračenje se ne može dogoditi budući da nema povratne veze od strane rezonatora. Budući da stupanj stimulirane emisije ovisi o količini fotona koji ulaze u medij količina energije uskladištene u aktivnom mediju se povećava dok god radi optička pumpa. Kao posljedica gubitaka zbog spontane emisije i apsorpcije nakon nekog vremena uskladištена energija će dostići svoj maksimalni nivo i kažemo da je aktivni medij zasićen. U tom trenutku Q-switch rapidno mijenja stanje niskog Q-faktora u visoki dopuštajući povratnu

vezu i proces optičke amplifikacije. Zbog velike količine energije pohranjene u aktivnom mediju, intenzitet zračenja u rezonatoru povećava se vrlo brzo, što dovodi do naglog emitiranja zračenja u obliku pulsa vrlo visokog intenziteta. Postoje verzije sa aktivnom i pasivnim Q-prekidačem. Kod aktivnog Q-prekidača prigušnica je kontrolirana izvana i može biti u vidu mehaničkog zastora, rotirajućih zrcala i prizmi koje se postavljaju unutar rezonatora i mogu biti kontrolirani izvana električnim impulsom. Intervali između pulseva tako mogu biti direktno kontrolirani i promjena stanja Q-faktora je relativno brza. Kod pasivnih Q-prekidača prigušnica je napravljena od materijala čija transmisija se povećava kada intenzitet zračenja pređe neki određen prag. Materijal može biti ionski dopiran kristal kao Cr:YAG (kristal dopiran cerijem) Q-prekidač koji se koristi kod Nd:YAG lasera, ili pasivni poluvodički uređaj. Ove pasivne prigušnice imaju velike početne gubitke, ali ipak kad se količina uskladištene energije poveća propuštaju lasersko zračenje. Zanimljiva posljedica kod pasivnih prigušnica je da reagiraju sve brže što je veća snaga lasera budući da veći intenzitet brže dovodi do zasićenja i brže poboljšava Q-faktor. To dovodi prigušnicu u stanje niskih gubitaka i omogućuje efikasno emitiranje pulseva. Nakon pulsa prigušnica se vraća u početno stanje brže nego aktivni medij i cijeli ciklus se ponavlja. Mana ovakve izvedbe je to što se intervali pulseva mogu kontrolirati samo indirektno varirajući snagu pumpanja što nije idealno rješenje, a prednost je jednostavnost izrade.

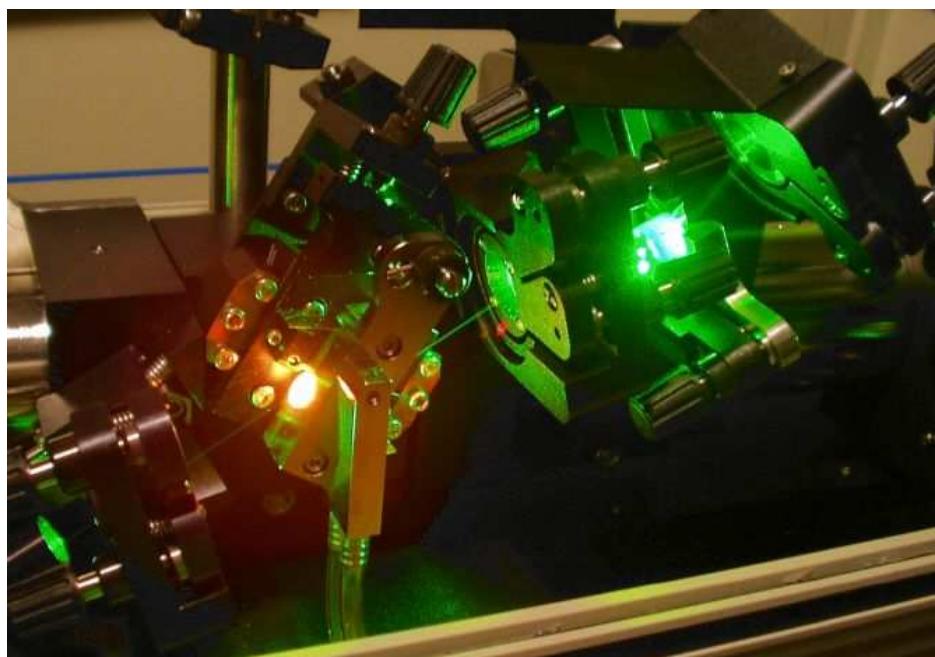
Ako je prosječna snaga Q-switch lasera 1W, vršna snaga jednog pulsa može biti mnogo kW, to ih čini posebno zanimljivim tamo gdje se traži veliki trenutni intenzitet u nanosekundnim pulsevima kao što je rezanje metala u industriji, skidanje tetovaža sa kože, mikrograviranje, a mogu se koristiti i kao laserski daljinomjeri tako što mjere vrijeme koje je potrebno da se jedan puls reflektira od nekog objekta.



Slika 3.07 NOVA Q-switch laser u Lawrence Livermore laboratoriju najsnažniji je laser trenutno, oslobađa gotovo 500 TW po jednom pulsu od 4ns i služi za istraživanje nuklearne fuzije.

#### 4. Mode-locking laseri

Ovo je također posebna vrsta pulsnih lasera. Mode-locking je tehnika u kvantnoj optici kojom se može konstruirati laser sposoban emitirati pulseve ekstremno kratkog trajanja, reda veličine pikosekunde ( $10^{-12}$  s) ili femtosekunde ( $10^{-15}$  s). Ovi pulsevi se ponavljaju u intervalu koji je potreban fotonu da napravi jedan puni period u rezonatoru. Zbog Fourier-ova limita (poznatog i kao energetsko-vremenska neodređenost) puls tako kratke temporalne duljine ima vrlo raširen spektar za razliku od ostalih lasera. To također znači da njegov aktivni medij mora imati frekvencijski pojas dovoljno širok da amplificira sve te frekvencije. Primjer takvog materijala je sintetički uzgojen kristal safira dopiran titanijumom (Ti:sapphire) koji ima vrlo širok frekvencijski raspon i može se koristiti za proizvodnju pulseva koji traju nekoliko femtosekundi. Tehnika na kojoj rade ovi laseri sastoji se od uvođenja fiksнog faznог odnosa između modova rezonantne šupljine. Tada kažemo da je laser fazno-zaključan ili modno-zaključan. Interferencija koja tako nastaje omogućuje emitiranje laserskog zračenje u vidu niza veoma kratkih pulseva. U praksi ima mnogo dizajnerskih rješenja koja utječu na performanse Mode-locking lasera. Najutjecajnija je sveukupna disperzija optičkog rezonatora, koja može biti kontrolirana prizmama ili zrcalima smještenim u optičkoj šupljini, kao i optičke nelinearnosti. Najkraći mogući puls se postiže sa multim stupnjem disperzije (bez nelinearnosti) ili sa malim stupnjem negativne disperzije. Najkraći pulsevi danas se proizvode kombinacijom Ti:sapphire aktivnog medija i tzv. Kerr-ove leće i iznose do 5 fs (femtosekundi). Neke napredne tehnike kao što je visoka harmonička generacija amplificiranih femtosekundnih pulseva mogu proizvesti pulseve u trajanju 100 as (atosekunda,  $10^{-18}$  s) u ekstremnom ultravioletnom dijelu spektra (<30 nm). Ovakvi laseri se danas koriste za proučavanje dinamike elektrona. Femtosekundni laseri emitiraju zračenje koje traje nekoliko fs. 1 fs je vrijeme potrebno svjetlosti da pređe put od svega 0.3 μm. Dakle 1 fs je vrlo kratak laserski puls i potpuno je nezamislivo da se sa tako kratkim laserskim pulsevima može išta raditi, no s obzirom na trajanje pulsa koje se nalazi na vremenskoj skali vibracija i rotacija molekula ovakvi laseri se prvenstveno upotrebljavaju za istraživanje vremenske dinamike molekula, te za kontroliranje, karakterizaciju i navođenje kemijskih spojeva. Osim kratkoće pulsa ove lasere karakterizira i velika snaga emitiranog zračenja po pulsu. Tako npr. puls koji traje oko 50 fs, energije 1 mJ ima prosječnu snagu oko 20 GW. Ovo svojstvo fs lasera omogućava niz novih primjena kao što su laserska ablacija (proces izbacivanja materijala s površine neke čvrste mete pod utjecajem laserskog zračenja, laserom vođeni izboji i generiranje viših harmonika (stvaranje svjetlosti koja se sastoji od frekvencija koje su višekratnici frekvencije fs pulsa). U optoelektronici se fs laseri upotrebljavaju za konstrukciju nelinearnih laserskih mikroskopa vrlo velike prostorne rezolucije. Također se koriste u očnoj kirurgiji za skidanje dioptrije i drugih anomalija.



Slika 3.08 Ti:sapphire fs laser

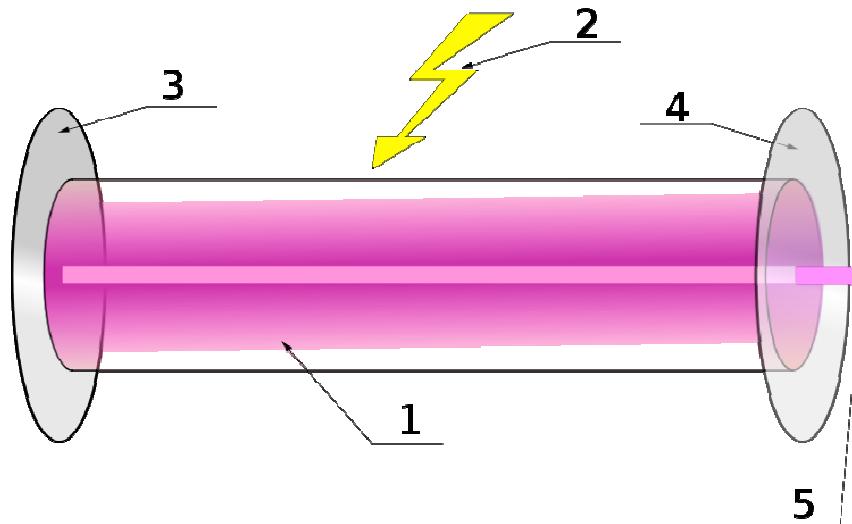
# Konstrukcija i vrste lasera

*The shift from incoherence to coherence can bring dramatic effects: a 60-watt light bulb whose light waves could be made coherent as a laser, would have the power to bore a hole through the sun--from 90 million miles away*

William A. Tiller

## **Konstrukcijske osnove:**

Laser se sastoji od aktivnog medija unutar optičkog rezonatora vrlo visoke reflektivnosti, kao i nekog oblika dovođenja energije do medija. Aktivni medij je materijal koji posjeduje svojstva koja omogućavaju amplifikaciju svjetlosti pomoću stimulirane emisije. U svojoj najendostavnijoj izvedbi rezonator se sastoji od dva zrcala postavljena tako da se svjetlost uzastopno reflektira između njih, svaki put prolazeći kroz aktivni medij. Tipično jedno od zrcala je djelomično transparentno i naziva se izlazni coupler kroz koji se emitira laserski snop. Svijetlo koje prolazi kroz aktivni medij je amplificirano, a zrcala služe da uzastopno reflektiraju fotone kroz medij. Svakim prolaskom preko aktivnog medija energija fotona se povećava. Proces dovođenja energije potrebne za rad medija se zove pumpanje. Energija može biti u obliku električne struje ili nekog izvora svjetlosti kao što je neonka, reflektori, razni oblici žarulja ili čak neki drugi laser. Većina praktičnih izvedbi lasera sadrži druge optičke elemente koji određuju valnu duljinu lasera, oblik i fokusiranje zrake itd.



Slika 4.01 shema osnovnog lasera

- 1.aktivni medij
- 2.izvor energije pumpanja
3. visoko reflektivno zrcalo
4. djelomično propusno zrcalo, coupler
5. laserski snop

## **Laserska pumpa:**

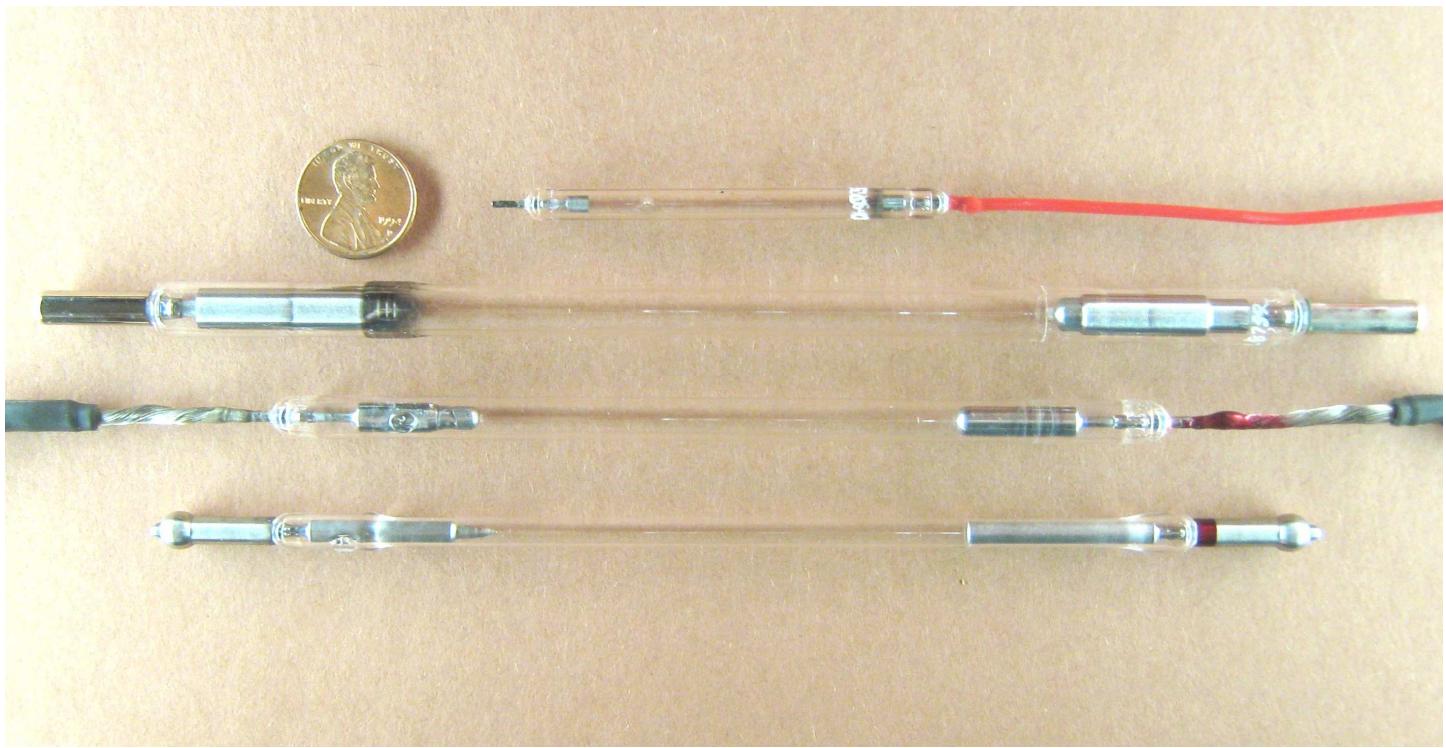
Pumpanje lasera je postupak dovođenja energije iz vanjskog izvora do aktivnog medija lasera. Energija se apsorbira u mediju i proizvodi pobuđena stanja u njegovim atomima. Kada broj čestica u pobuđenom stanju pređe broj čestica u osnovnom stanju ili nekom nižem pobuđenom stanju dešava se populacijska inverzija. U takvom stanju mehanizam stimulirane emisije nastupa i medij djeluje kao optički amplifikator. Snaga pumpe mora biti veća od laserskog praga konkretnog lasera. Energija pumpe je obično u obliku električne energije ili nekog izvora svjetlosti, ali mogu se koristiti i egzotičniji izvori energije kao što su kemijske ili čak nuklearne reakcije. U dalnjem tekstu ćemo se pobliže upoznati sa nekim izvedbama pumpe.

## **Optičko pumpanje**

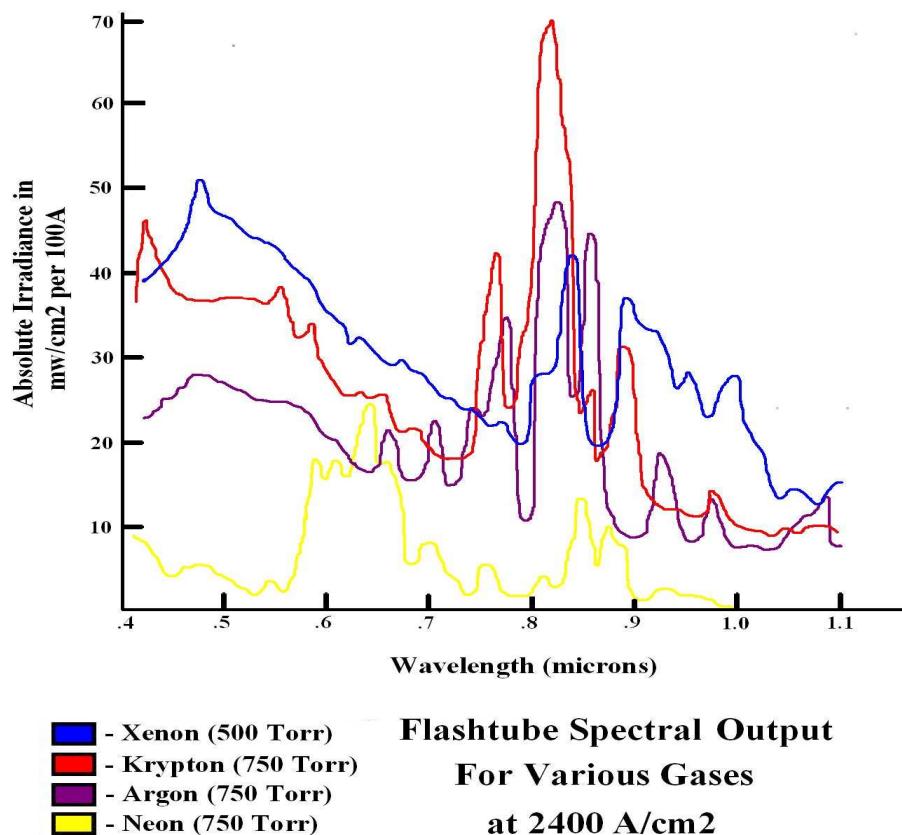
Optičko pumpanje je proces u kojemu se neka svjetlost koristi za pumpanje elektrona iz niže energetske razine u atomu na višu. To je prva izvedba laserske pumpe i danas je zatupljena u konstrukciji lasera.

## **Flash-lampa:**

Flash lampe su najstariji energetski izvor za lasere. Koriste se kod "solid-state" i "dye" (bojanih) pulsnih lasera. Mana im je to što proizvode svjetlo širokog spektra tako da se većina energije izgubi kao toplina u mediju. Također imaju relativno kratak vijek trajanja. Kvarcne lampe se najčešće koriste u laserima i mogu raditi na temperaturama do 900 °C. Kod lasera većih snaga zahtijevaju vodeno hlađenje. Voda mora hladiti ne samo aktivni dio lampe nego i njene električne kontakte u staklu. Lampe sa vodenim hlađenjem su obično proizvedene sa staklom skupljenim oko elektrode da bi se omogućilo direktno hlađenje wolframove niti. Radni vijek lampe ovisi prvenstveno o režimima u kojima radi. Niske energije mogu dovesti do prskanja, koje može izbiti materijal sa katode i nanijeti ga na staklo i zacrniti lampu. Visoke energije uzrokuju ablaciju koja ne samo da može zamagliti lampu, nego je strukturno slabi i otpušta kisik. Trajanje pulsa isto tako može utjecati na radni vijek. Vrlo dugački pulsevi mogu skinuti veliku količinu materijala sa katode i nanjeti ga uokolo. Kod vrlo kratkih pulseva mora se paziti da luk bude centriran u lampi, daleko od stakla da bi se spriječila ablacija. Često se koristi "pre-flash", tehnika da se milisekundu prije glavnog izboja pusti mali izboj da bi zagrijao plin radi bržeg odziva glavnog fash-a. Izlazni spektar ovih lampi uglavnom ovisi o gustoći struje. Nakon što se ustanovi "eksplozivna energija" (količina energije koja će uništiti lampu u nekoliko bliceva) određuje se radna količina energije i kalibrira se izlazni spektar koji može biti od infracrvenog do ultravioletnog dijela. Niske gustoće struje (rezultat visokog napona i male jakosti struje) proizvode široki spektar u bliskom infra-crvenom području i koristi se za pumpanje IR lasera kao što su Nd:YAG i Er:YAG (neodimij i erbij yttrium-aluminium-garnet). Veće gustoće struje šire spektralne linije do točke kada se one počinju preklapati i proizvodi se kontinuirana emisija. Veće valne duljine dostižu level zasićenja na nižim gustoćama struje nego kratke valne duljine, tako da se porastom struje emitirano zračenje pomiče prema vidljivom dijelu spektra što je bolje za pumpanje lasera u vidljivom dijelu spektra. Pri još većim gustoćama struje lampa će emitirati zračenje crnog tijela u ultravioletnom dijelu spektra. Kao plin se koristi uglavnom kseon zbog svoje efikasnosti, ali kod neodimijskih lasera se koristi kripton zato što se u near-IR području spektralne linije kriptona bolje poklapaju sa apsorpcijskim linijama neodimija i dajući kriptonu veću propusnost iako je ukupna snaga manja tako da je moguće postići dvostruko veću izlaznu snagu nego sa kseonom.



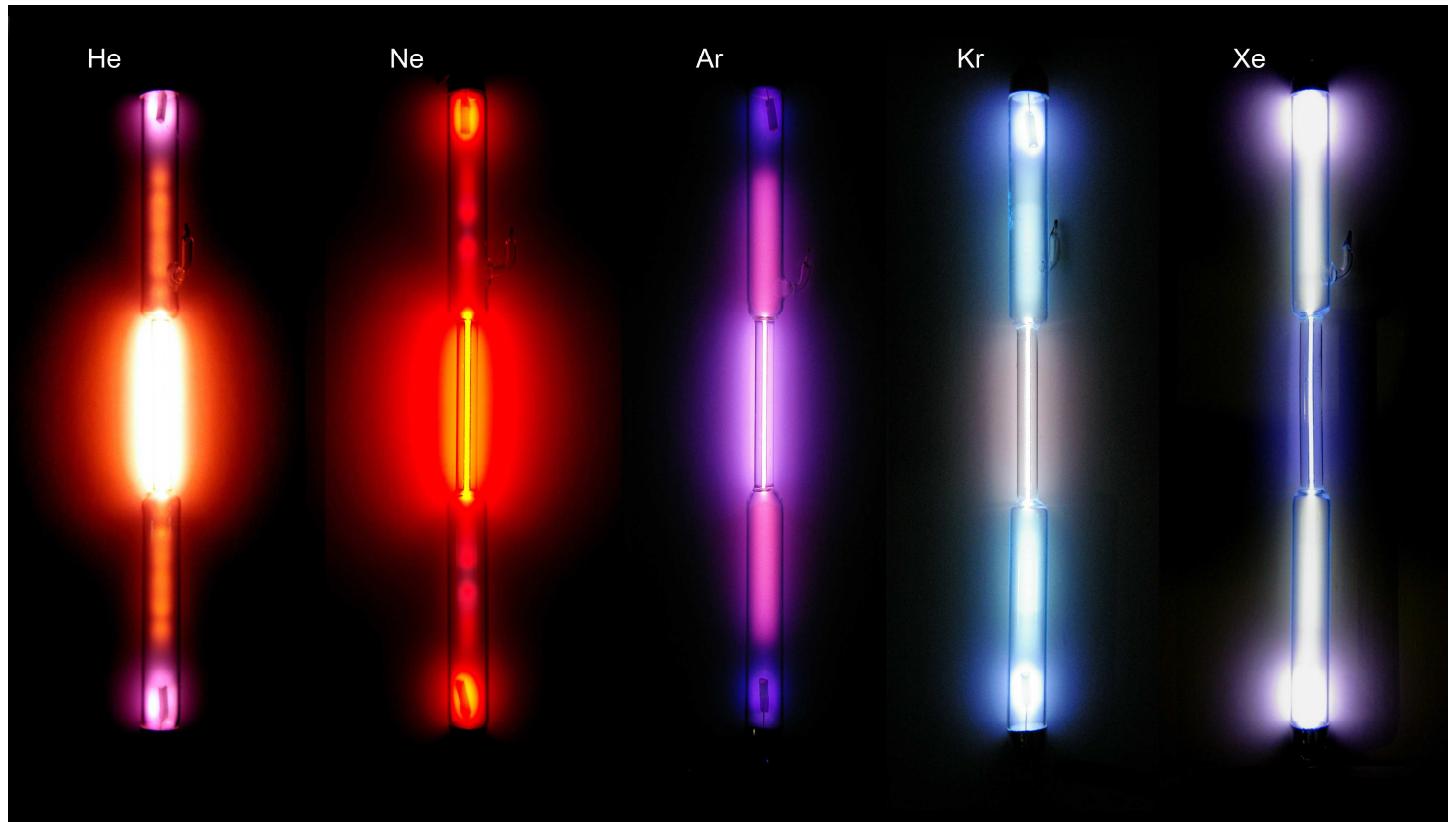
Slika 4.02 lampe za lasersko pumpanje, prve tri su kseonske a zadnja je kriptonska



Slika 4.03 spektralni odziv flash-lampi za različite plamenite plinove

### **Lučna lampa:**

Lučne lampe se koriste kod medija koji mogu dati kontinuiranu emisiju (CW laseri) i mogu biti različitih veličina i snage. Tipične lučne lampe rade na naponima dovoljno velikim da održe razine struje na kojima je lampa projektirana da radi, i one se kreću od 10 – 50 A. Ove lampe zahtijevaju kontrolni mehanizam za paljenje. Paljenje se odvija u tri faze. U prvoj fazi visokonaponski izboj iz transformatora stvara iskru između elektroda, ali impedancija je prevelika da bi glavno napajanje preuzele. Zatim slijedi faza pojačanog napona “boost voltage” gdje se dovodi napon na lampu koji je veći od pada napona između elektroda, dok se plin ne ugrije do stanja plazme. Kad se impedancija spusti glavno napajanje preuzima i napon se stabilizira. Ove lampe također zahtijevaju vodeno hlađenje i to direktno hlađenje golih elektroda. To zahtjeva korištenje destilirane vode kojoj je otpor najmanje  $200\text{ k}\Omega$ , da bi se spriječili kratki spojevi i korodiranje elektroda uslijed elektrolize. Voda mora cirkulirati brzinom 4-10 l/min. Kao plin mogu se koristiti svi plemeniti plinovi i lampa emitira spektralne linije specifične za te elemente. Spektralni izlaz lučnih lampi ovisi o plinu i sličan je flash-lampama koje rade na niskim gustoćama struje. Izlaz je najveće snage za near-IR dio spektra.



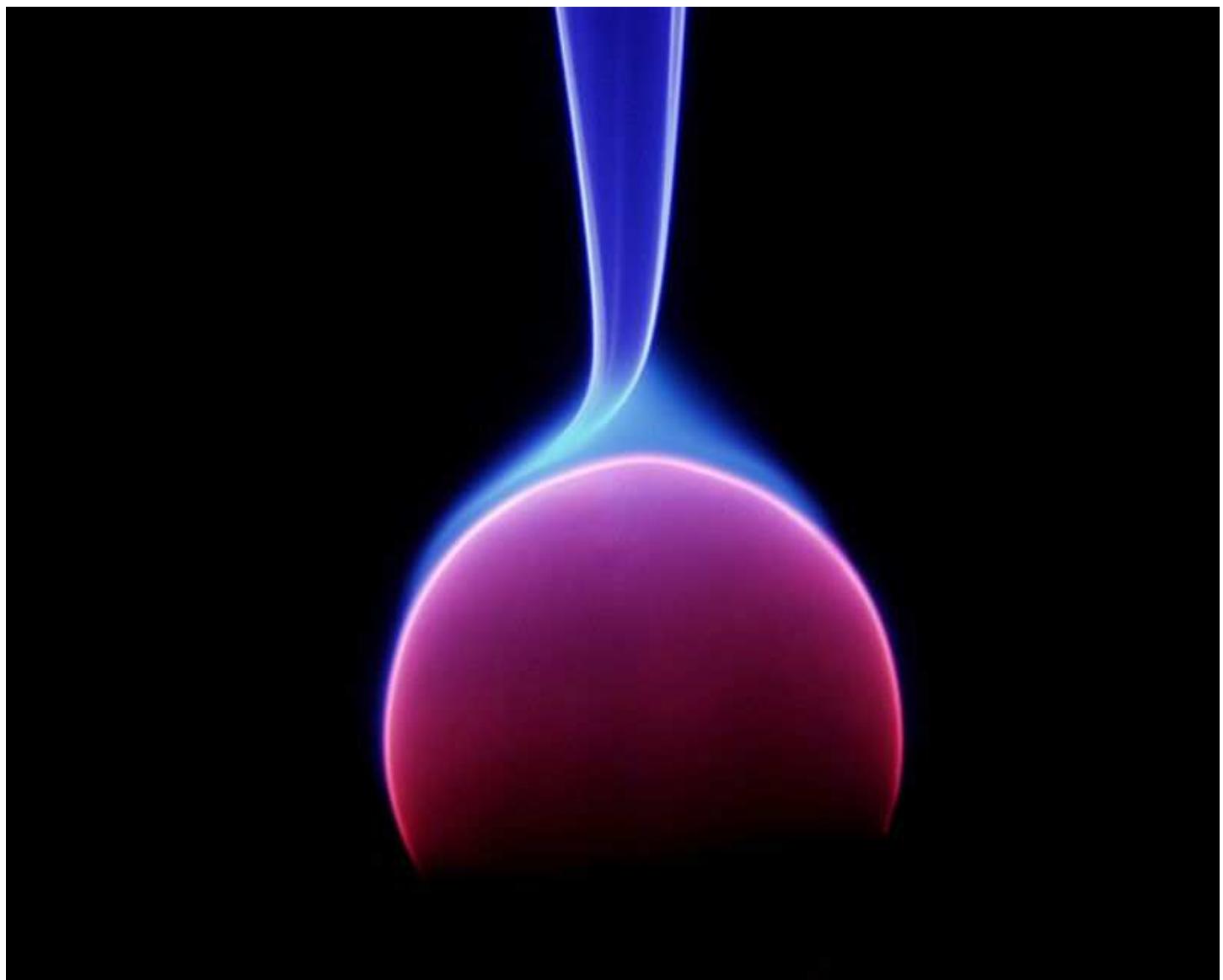
Slika 4.04 lučne lampe sa svim plemenitim plinovima

#### **Eksterni laserski izvor:**

Laser odgovarajućeg tipa može se koristiti za pumpanje drugog lasera. Uski spektar lasera omogućuje mnogo efikasniji transfer energije od lampi. Kao pumpe najčešće se koriste poluvodički diodni laseri jer su vrlo jednostavni i kompaktni. Koriste se izvedbe sa prstenastim laserima u kojima svjetlost može propagirati u smjeru kazaljke na satu i obrnuto. Prstenasti laseri koriste tri ili više zrcala da bi reflektirali svjetlo u kružni tok. Tako se izbjegavaju stojni valovi i poboljšava efikasnost.

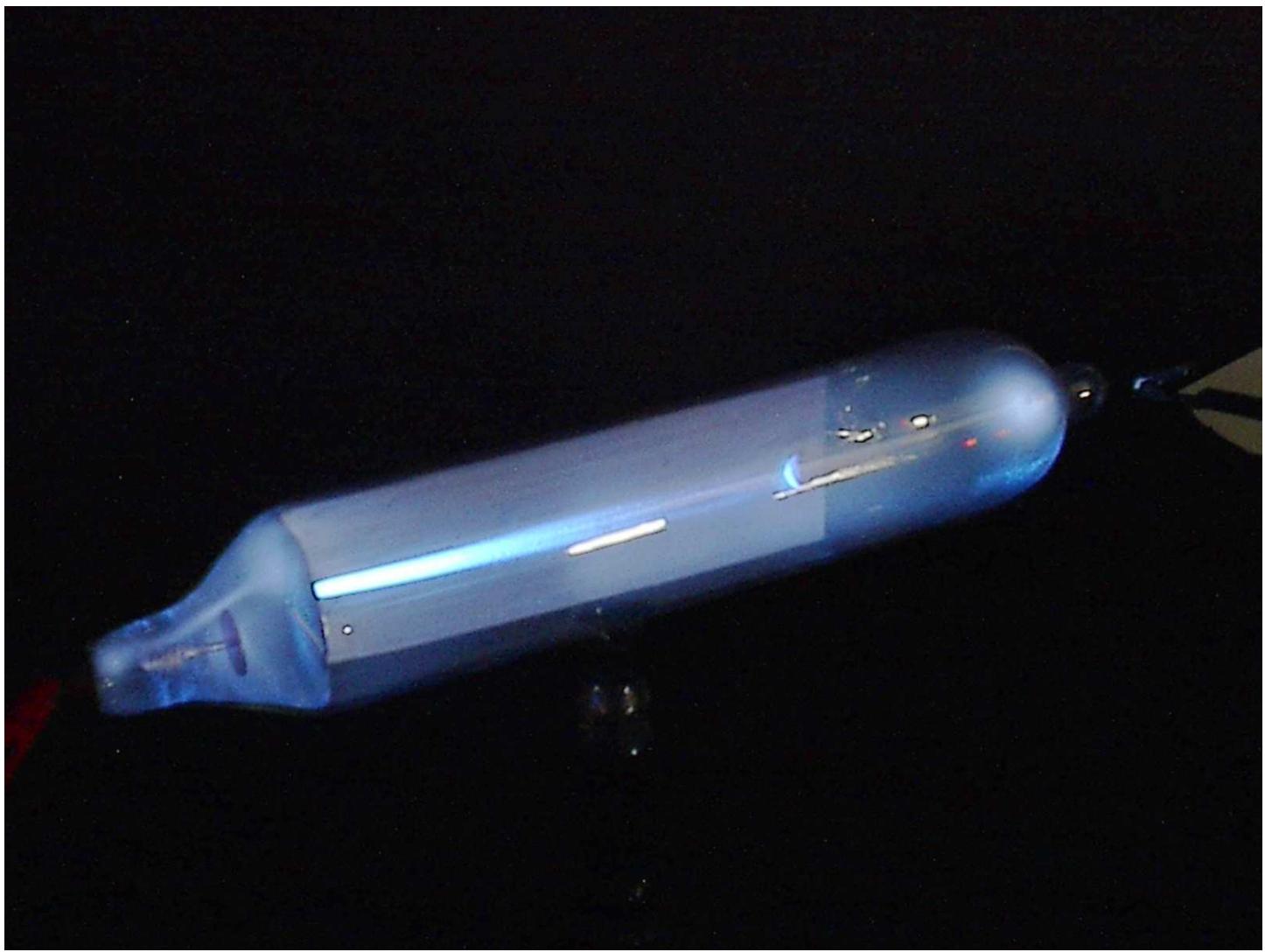
#### **Električno pumpanje:**

Pumpanje aktivnog medija moguće je vršiti pomoću električne energije i to na više načina. Kod plinskih lasera koristi se metoda električne plazme (hladne plazme). Naprimjer u HeNe laseru elektroni iz plazme sudaraju se sa atomima helija i pobuđuju ih. Pobuđeni atomi helija zatim se sudaraju sa atomima neon-a, prenoseći energiju. To dovodi do populacijske inverzije atoma neon-a.



Slika 4.05 izboj električne plazme sa kuglaste elektrode

Istosmjerna električna struja (npr. iz baterija ili sa ispravljača) se obično koristi za pumpanje poluvodičkih kristalnih lasera i laserskih dioda. Moguće je i koristiti i snop elektrona na sličan način kao i kod katodnih cijevi (CRT) i ta se tehnika koristi za pumpanje "Free-electron lasers" (FEL).

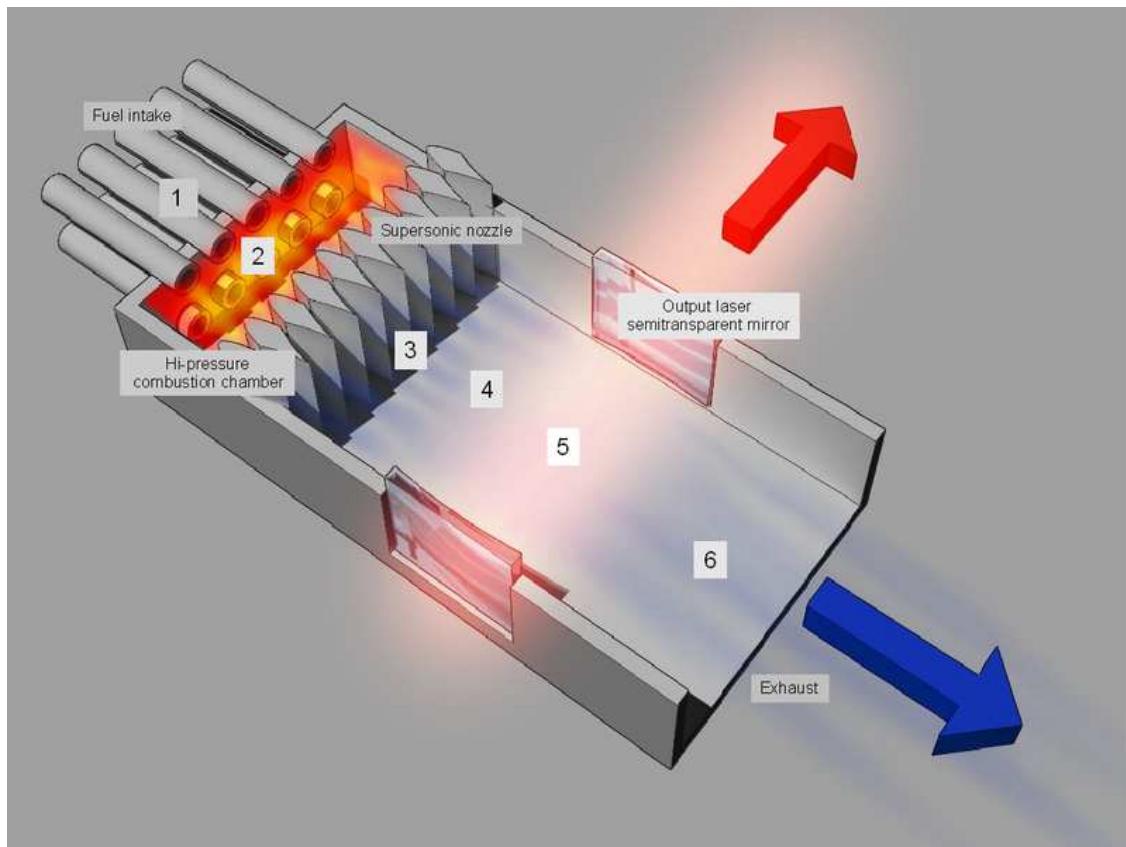


Slika 4.06 elektronska zraka u katodnoj cijevi

#### Pumpanje dinamičkim plinom:

Laseri sa dinamičkim plinom "Gas dynamic lasers" (GDL) koriste supersonični protok plina kao što je karbon dioksid ( $\text{CO}_2$ ) za pobudu atoma preko praga. Plin je pod tlakom i zagrijan na 1400 K. Zatim plin naglo eksplandira kroz specijalne mlaznice i tlak pada rapidno. Eksplanzija se događa na supersoničnim brzinama (oko 4 maha). Vrući plin ima mnogo molekula u višem pobuđenom stanju, dok ih je mnogo više u nižem stanju. Rapidna eksplanzija uzrokuje adijabatsko hlađenje koje smanjuje temperaturu na oko 300 K. Hlađenje plina uzrokuje da molekule koje su u višem i nižem pobuđenom stanju izjednače i vrate u osnovno stanje koje odgovara nižim temperaturama. To ima za posljedicu da se molekule koje su u nižem pobuđenom stanju vrate veoma brzo, dok one u višim stanjima trebaju puno više vremena. Budući da značajan postotak molekula ostaje u pobuđenom stanju dolazi do populacijske inverzije. CW laserski izboji i do 100 kW su postignuti ovom metodom. Slična metoda supersonične eksplanzije koristi se za adijabatsko hlađenje karbon monoksid lasersa (CO-laser), koji se dodatno pumpa ili kroz kemijsku reakciju, električnom strujom ili radio frekvencijski (RF).

Adijabatsko hlađenje zamjenjuje komplikirano i skupo hlađenje tekućim dušikom, povećavajući efikasnost CO<sub>2</sub> lasera. Laseri ovog tipa mogu proizvoditi snage od nekoliko GW, sa efikasnosti od 60% što je za lasere posebno ovako velikih snaga odlična vrijednost. Zbog svoje efikasnosti i velike snage u obliku CW zračenja često se koriste u vojne svrhe i istraživanja.



Slika 4.07 shema dinamičkog plinskog lasera

1. vrući plin na ulazu
2. plin se širi kroz supersonične mlaznice i temperatura pada
3. plin prolazi kroz posebne otvore tako da se samo niža vibracijska stanja smiruju i dolazi do inverzije
4. takav plin prolazi kroz sustav zrcala gdje se dešava stimulirana emisija
5. plin se vraća u stanje termalne ravnoteže
6. plin se izbacuje iz komore kako bi novi ciklus mogao početi

#### Ostale tehnike pumpanja:

Kemijske reakcije koriste se za pumpanje kemijskih lasera, i također mogu stvarati velike snage.

Nuklearna fisija se koristi za pumpanje egzotičnih "Nuclear pumped laser" (NPL) lasera. Aktivni medij je obložen sa izotopom urana (U-235) i izložen visokom fluksu brzih neutrona u jezgri reaktora. Fisijski fragmenti urana stvaraju pobuđenu plazmu koja potom stvara populacijsku inverziju u mediju (neki plemeniti plin).

X-ray laser moguće je čak pumpati detonacijom nuklearnog oružja. Aktivni medij se pumpa sa visokoenergetskim X-ray fotonima velike gustoće koji se pojavljuju u nekoliko prvih nanosekunda nuklearne eksplozije. U tim početnim trenucima gustoća fotona može se uspoređivati sa običnom čvrstom materijom. Aktivni medij tada emitira puls koherentnih X zraka u smjeru paralelno sa dugom osi aktivnog medija. Kalkulacije pokazuju da se cijeli proces odvija brže nego što nuklearna detonacija uništi laser.

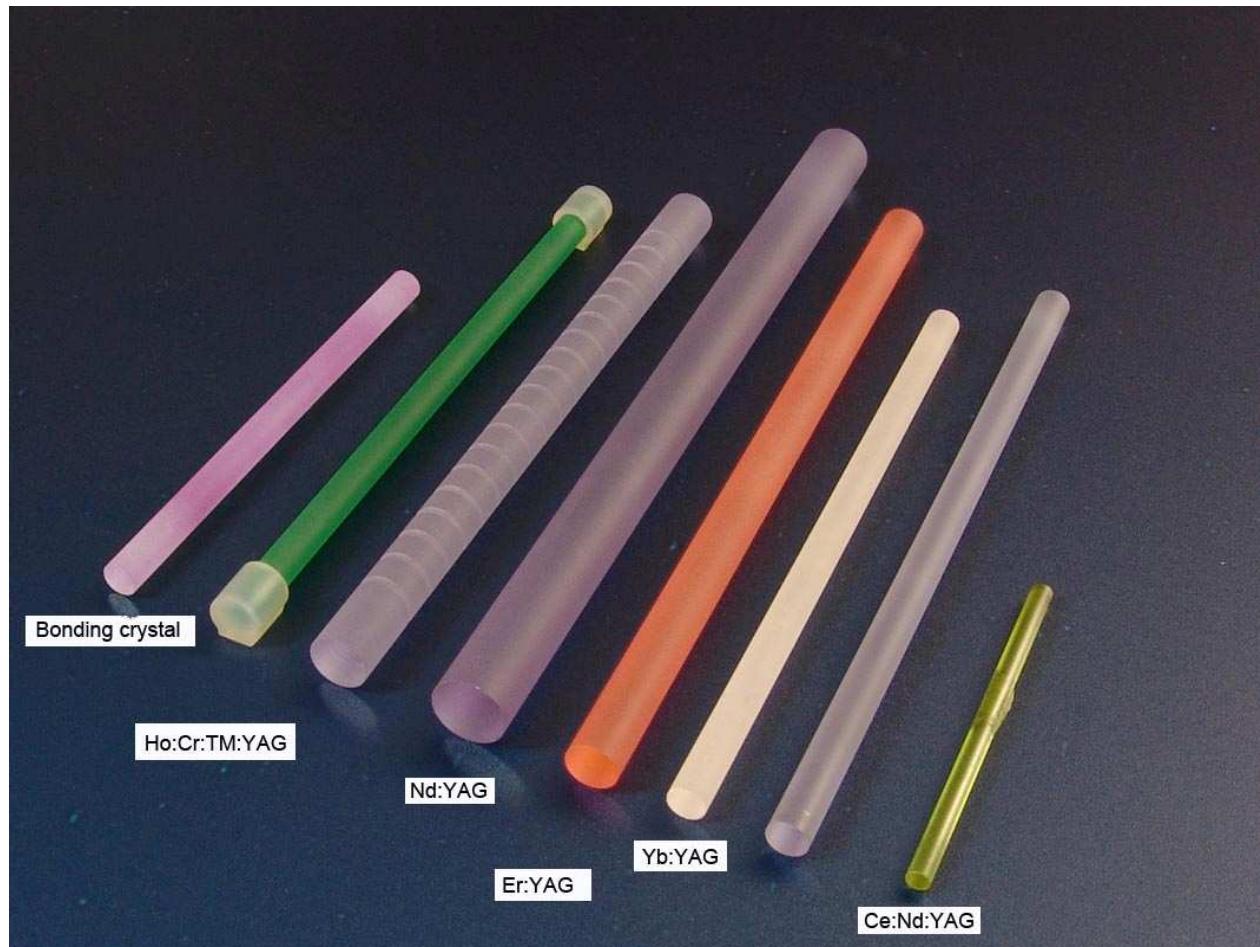
## Aktivni medij:

Aktivni laserski medij je izvor optičke amplifikacije lasera. Ova amplifikacija proizlazi iz stimulirane emisije elektrona ili tranzicije atoma i molekula iz veće energetske razine ka nižoj.

Kao medij mogu se koristiti:

- Određeni kristali obično presvučeni slojem rijetkih iona metala (neodimij, iterbij, erbium) ili tranzicijskih metala (titanium, krom). Kao kristali najčešće se koriste „yttrium aluminium garnet“ (YAG), „yttrium orthovanadate“ ( $\text{YVO}_4$ ), safir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), rubin ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ ).
- Razna stakla (silikatna, fosfatna) presvučena ionima matala.
- Razni plinovi, mješavina helija i neona ( $\text{HeNe}$ ), dušik, argon, karbon monoksid i karbon dioksid ( $\text{CO}$  i  $\text{CO}_2$ ), metalne pare.
- Poluvodiči, galium-arsenid (GaAs), indium-galij-arsenid (InGaAs), galium-nitrat (GaN)
- Obojane tekućine u koje se koriste u obojanim “dye” laserima

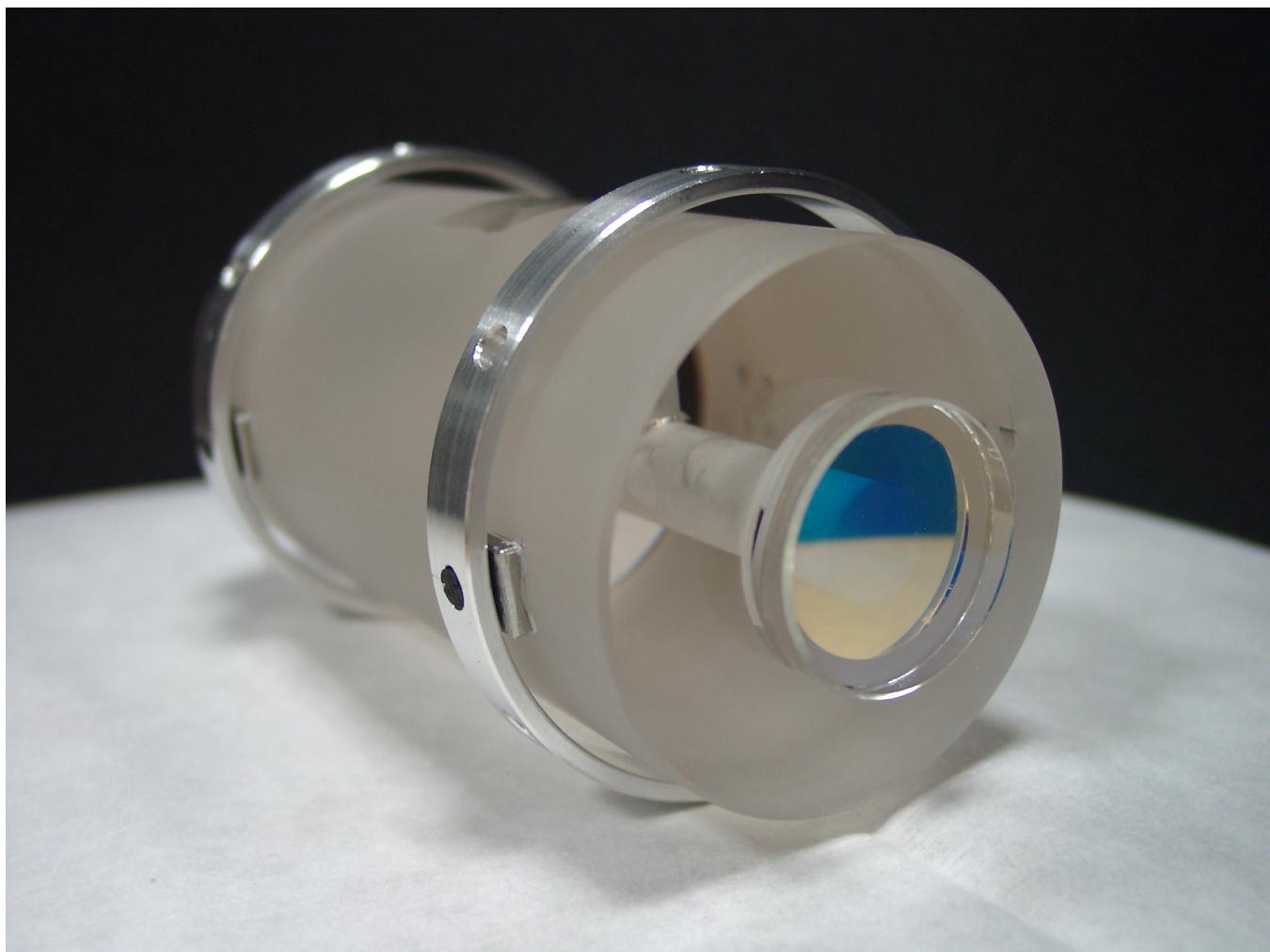
Da bi proizvodili koherentno zračenje aktivni mediji moraju biti u netermalnoj distribuciji energije koja se naziva populacijska inverzija. To se postiže nekim vanjskim izvorom energije postupkom laserskog pumpanja.



Slika 4.08 aktivne kristalne šipke u raznim solid-state laserima

### **Optički rezonator:**

Optička šupljina ili optički rezonator je sustav zrcala koje proizvode stojne valove za elektromagnetsko zračenje. Rezonatori su jedna od glavnih komponenti lasera, oni okružuju aktivni medij i pomažu stvaranje povratne veze nužne za amplifikaciju laserskog svjetla. Također se koriste kod optičkih oscilatora i interferometara. Svjetlo koje je zarobljeno u šupljini reflektira se mnogo puta i proizvodi stojne valove za određene rezonantne frekvencije. Paterni koje proizvode stojni valovi nazivaju se još i modovi. Longitudinalni modovi razlikuju se samo po frekvenciji a transverzalni modovi imaju drugačiji intenzitet preko presjeka zrake. Rezonatori se razlikuju po fokalnoj duljini i razmaku zrcala. Geometrija rezonatora mora biti takva da zraka bude stabilna, njome se određuje širina snopa i fokus ne smije biti unutar šupljine. Optički rezonatori su dizajnirani tako da imaju velik Q-faktor (faktor dobrote), zraka će se reflektirati veliki broj puta sa malom atenuacijom. Optički elementi kao što su leće smještene unutar šupljine mogu utjecati na stabilnost modova. Dodatno kod većine aktivnih medija termalne i druge nehomogenosti uzrokuju varijabilnost snopa, što se mora uzeti u obzir prilikom dizajniranja šupljine. Praktične izvedbe mogu imati više od dva zrcala, konfiguracije sa tri ili četiri zrcala su uobičajene čineći tzv. presavijenu šupljinu. Isto tako česte su izvedbe gdje parom zakriviljenih zrcala formira još jedan konfokalni dio, dok je ostatak šupljine kvazi-kolimiran sa ravnim zrcalima. Oblik laserske zrake ovisi o tipu rezonatora. Zraka proizvedena stabilnim "paraxial" rezonatorom može biti jako dobro aproksimirana Gaussovom funkcijom. Generalno zraka može biti opisana kao superpozicija transverzalnih modova. Točni opis takve zrake zahtjeva proširenje preko nekih kompletnih, ortogonalnih funkcija preko dvije dimenzije kao što su "Hermite" polinomi ili "Ince" polinomi. Nestabilni laserski rezonatori proizvode fraktalnu zraku.



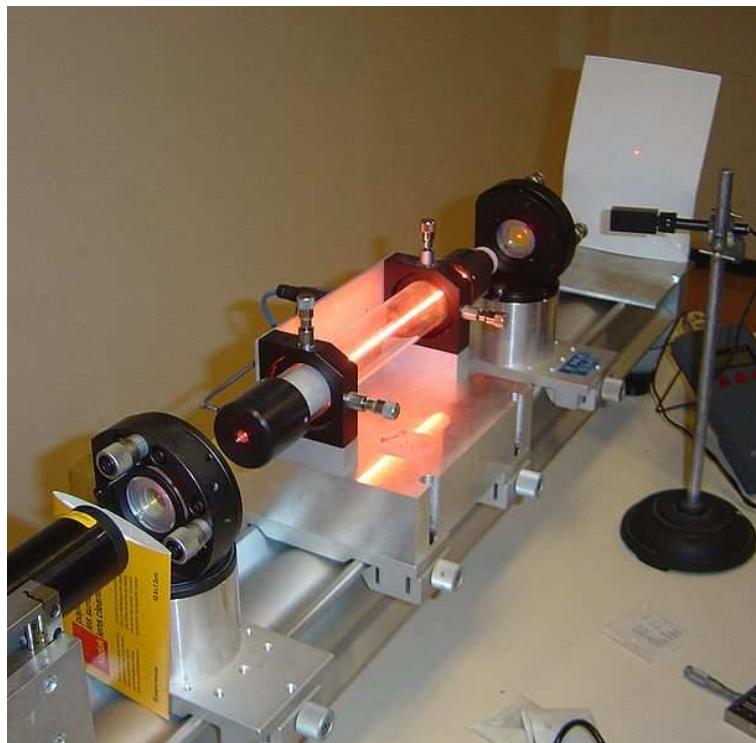
Slika 4.09 ultrastabilni optički laserski rezonator.

## **Tipovi lasera:**

### **Plinski laseri:**

To su laseri čiji se aktivni medij sastoji od nekog plina. Obično su pumpani električnom strujom koja prolazi kroz plin. Ovo su bili prvi CW laseri i prvi laseri koji uspješno pretvaraju električnu energiju u laserski snop.

- Helij-neon (HeNe) laser može oscilirati preko 160 različitih valnih duljina. To se može podešavati mjenajući spektralni odziv zrcala ili koristeći disperzivni element (Littrow-ova prizma) u šupljini. Jedinice koje rade na 633nm vrlo su popularne u laboratorijima zbog njihove niske cijene i velike kvalitete zrake.
- Karbon dioksid ( $\text{CO}_2$ ) laseri mogu emitirati stotine kW na  $9.6 \mu\text{m}$  i  $10.6 \mu\text{m}$ . Često se koriste u industriji za varenje i rezanje. Njihova efikasnost je preko 10%.
- Karbon monoksid (CO) laseri imaju potencijal za vrlo velike snage, ali upotreba ovih lasera limitirana je velikom toksičnošću CO plina. Operatori moraju biti zaštićeni od ovog smrtonosnog plina i vrlo je korozivan za mnoge materijale. Mogu imati snagu i do nekoliko GW i veliku efikasnost ali zbog svoje komplikiranosti uglavnom se koriste samo u vojne svrhe i istraživanja.
- Argon-ion (Ar-ion) laseri emitiraju svjetlo u rasponu od 351-528 nm. Spada u skupinu ionskih lasera i mogu imati snagu od nekoliko mW do nekoliko desetaka W. Koristi se u medicini, litografiji i za pumpanje drugih lasera.
- N-TEA laser “transversely-excited atmospheric-pressure laser” jednostavna pulsna verzija dušikovog lasera. Radi na atmosferskom tlaku, bez skupih vakumskih sistema i emitira u UV području od 337.1nm. Koristi se u velikoj mjeri za graviranje loga, datuma itd. na ambalaži artikala.
- Metal-ion laseri rade u dubokom UV području. Najviše se koriste helij-srebro (HeAr-224nm) i neon-bakar (NeCu-248nm). Koriste se uglavnom u istraživanju.

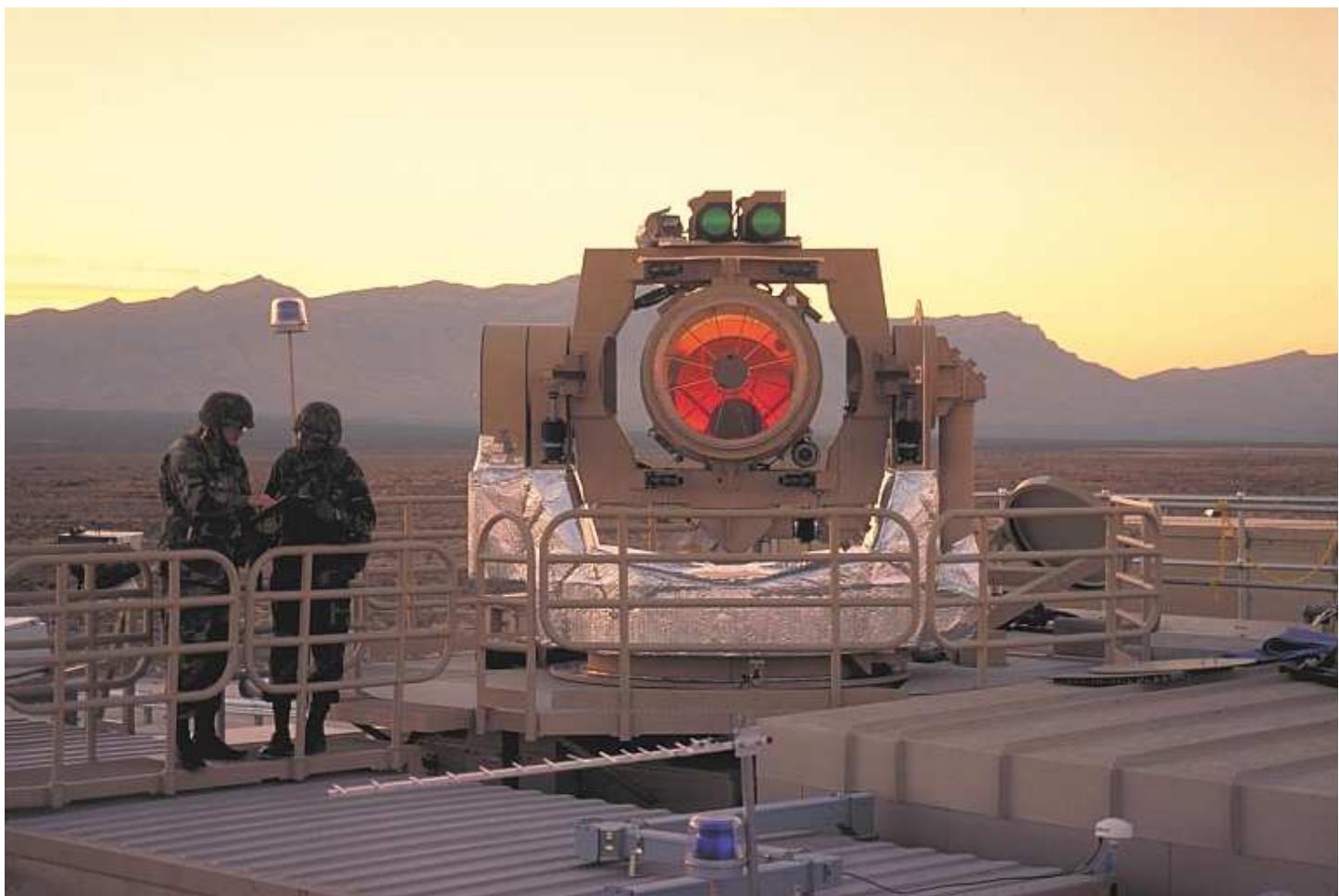


Slika 4.10 HeNe laser

### Kemijski laseri:

Ovi laseri sviju energiju dobivaju od kemijskih reakcija. Mogu imati CW emisije i do nekoliko MW. Interesantni su uglavnom za vojne svrhe ali i u teškoj industriji za bušenje i rezanje.

- Chemical oxygen iodine laser (COIL) laser emitira u IR području  $1.315 \mu\text{m}$ . Može imati CW snagu i do nekoliko MW. Razvijen je od strane američke vojske.
- All gas-phase iodine laser (AGIL). Poboljšana verzija COIL-a. Također radi na  $1.315 \mu\text{m}$ , ali koristi reakciju klora i hidrozinske kiseline. Glavna prednost AGIL-a je što su sve kemikalije u plinovitom obliku i zauzimaju manji volumen, izvedba je jednostavnija.
- Hydrogen fluoride (HF) laser. Radi u IR području od  $2.7$ - $2.9 \mu\text{m}$  i ima CW snagu u području MW. Mana ovih lasera je što se ova valna duljina apsorbira u atmosferi jako brzo i smanjuje se efikasnost. Da bi se otklonio ovaj nedostatak umjesto vodika koristi se deuterij i takve lasere zovemo DF laserima. Rade u valnom području od  $3.8 \mu\text{m}$  koje je mnogo bolje za korištenje unutar atmosfere.



Slika 4.11 THEL (Tactical High-Energy Laser), vojni DF laser snage reda veličine MW, prvi laser kojim je uspješno demonstrirano uništenje balističkih raketa u letu.

### Excimer laseri:

Ovo je posebna vrsta plinskih lasera u kojima je aktivni medij „excimer“. To su molekule koje mogu postojati samo ako je jedan atom u pobuđenom stanju. Nakon što takav atom preda energiju fotonu i spusti se u osnovno stanje molekula više ne može postojati i dezintegrira se. Ovaj fenomen drastično reducira populaciju niskih energetskih stanja i značajno pridonosi populacijskoj inverziji. Kao medij se koriste molekule plemenitih plinova. Plemeniti plinovi su kemijski inertni i mogu stvarati molekule samo u pobuđenom „excimer“ stanju. Ovi laseri tipično zrače u ultrarvioletnom dijelu (UV) spektra, i isključivo su pulsni laseri. Interval između pulseva može biti 100Hz – 8kHz, a trajanje pulsa 10 – 200 ns, snage se uglavnom kreću oko 100 mW. Najčešće izvedbe su argon-fluorin (ArF-192nm), kripton-klor (KrCl-222nm), kripton-fluorin (KrF-248nm), kseon-klor (XeCl-308nm) i kseon-fluorin (XeF-351nm). Koriste se uglavnom u mikroelektronici za proizvodnju integriranih krugova i u očnoj kirurgiji.



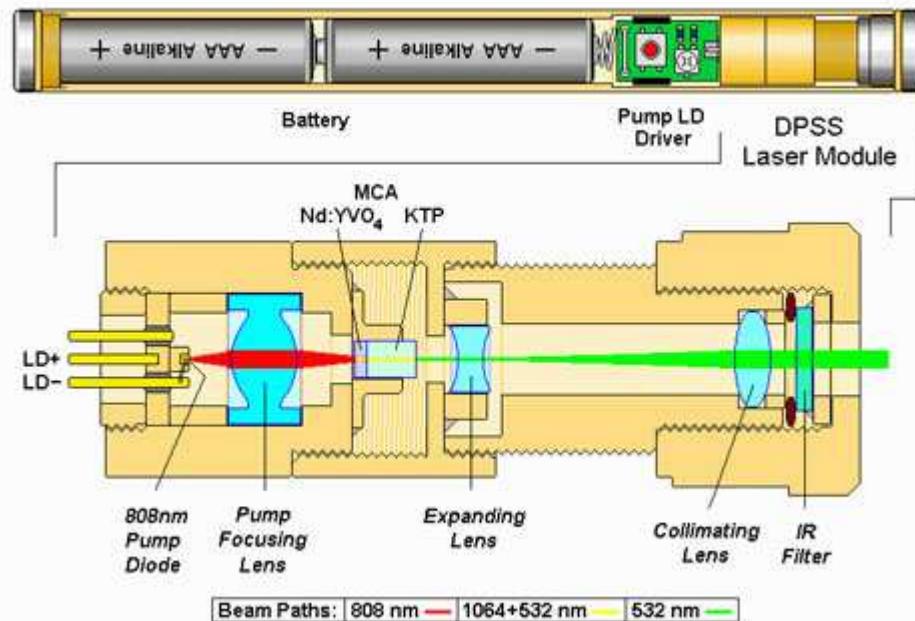
Slika 4.12 KrF 248nm excimer laser za mikroelektroniku

### Solid-state laseri:

Ovi laseri koriste kristalne ili staklene šipke koje su presvučene ionima koji osiguravaju potrebna energetska stanja. Prvi konstruiran laser napravljen je od rubina ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ ). Populacijska inverzija se održava u premazu, npr. krom ili neodimij. Ovi materijali su pumpani optički raznim lampama ili nekim drugim laserom, koristeći kraće valne duljine nego one na kojima laser emitira. Treba reći da se termin "solid-state" u laserskoj tehnici referira na kristale ili stakla, a ne na poluvodiče kao što je to u elektronici. Kao premaz "dopant" se najčešće koristi neodimij u kombinaciji sa raznim kristalima kao što su "yttrium orthovanadate" ( $\text{Nd:YVO}_4$ ), "yttrium lithium fluoride" ( $\text{Nd:YLF}$ ), i "yttrium aluminium garnet" ( $\text{Nd:YAG}$ ). Svi ovi laseri mogu emitirati velikom snagom u infracrvenom dijelu spektra (IR), na 1064nm. Koriste se uglavnom za rezanje, varenje, graviranje metala i raznih materijala u industriji. U istraživanju se koriste najčešće za spektroskopiju. Ovi laseri mogu veoma jednostavno multiplicirati radnu frekvenciju dva, tri ili četiri puta u tzv. DPSS "diode pumped solid state" verziji. Pod drugim, trećim i četvrtim harmonikom proizvode redom 532nm, 355nm i 266nm.

Ova tehnologija se dosta koristi kod laserskih pokazivača, osobito zelena na 532nm. Kao premazi još se koriste iterbij, holmij, talijum i erbium (sve rijetki ioni). Iterbijski laseri tipično rade u IR području 1020-1050 nm. Vrlo su efikasni i imaju veliku snagu. Koriste se uglavnom u pulsnim laserima. Holmij YAG laseri rade na 2097nm valnoj duljini koja se jako dobro apsorbira u organskim tkivima i koriste se u kirurgiji i medicini. Titanijski Ti:sapphire laseri koriste se u spektroskopiji i kao ultrabrzi pulsnii laseri u "mode-locked" verziji.

Termalna ograničenja solid-state lasera proizlaze od optičkih lampi i lasera koji se koriste za pumpanje ovih lasera. Ova toplina u kombinaciji sa velikim termalno-optičkim koeficijentom ( $dn/dT$ ) može smanjiti kvantnu efikasnost. Rješenje je pronađeno u tzv. "disk" laserima koji koriste geometriju aktivnog medija gdje je debljina medija mnogo manja nego promjer zrake lasera koji služi za pumpanje. Ovo omogućava mnogo ravnomjerniji termalni gradijent i poboljšava hlađenje.



Slika 4.13 poprečni presjek i pripadajući dijelovi zelenog laserskog pokazivača (532 nm).

Izvor je laserska dioda na 808 nm kojom se pumpa Nd:YVO<sub>4</sub> solid-state aktivni medij i na izlazu dobijemo 532nm zeleno svjetlo.

### Fiber laseri:

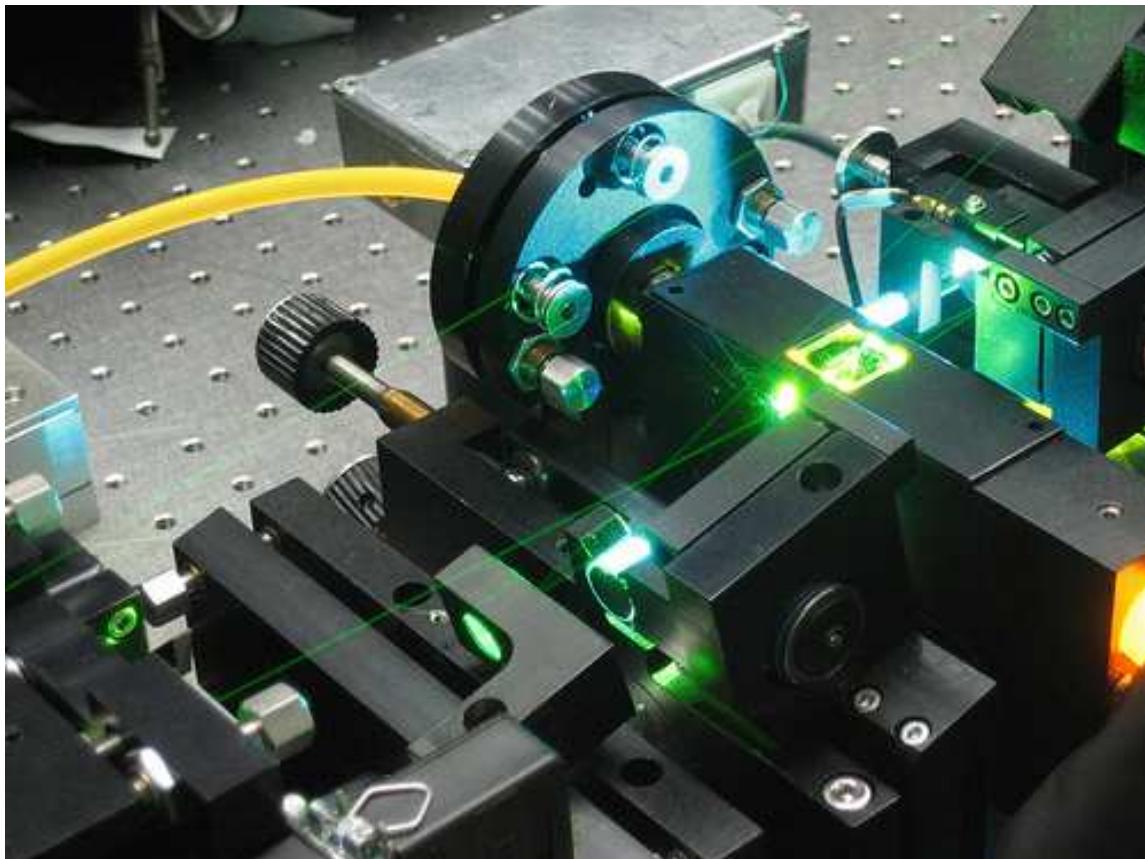
Posebna vrsta solid-state lasera gdje se kao aktivni medij koristi optičko vlakno dopirano rijetkim elementima kao što su erbij, iterbij, neodimij, talij itd. Optička vlakna imaju veliki omjer površine i volumena i to omogućava efikasno hlađenje. Dodatno valovodna svojstava optičkih vlakana reduciraju termalne distorzije zrake. Česte su izvedbe sa duplo obloženim vlaknom. Ovakvo vlakno sastoji se od jezgre te unutarnje i vanjske obloge. Indeksi ova tri koncentrična sloja su odabrani tako da jezgra služi kao jednomodno vlakno za emisiju laserske zrake, a obloge služe za pumpanje lasera. Ovo omogućuje pumpi da prenese veliku količinu snage u unutarnji aktivni dio duž cijelog vlakna. Glavni nedostatak ovakvih lasera je da intenzitet svijetla u vlaknu ne smije biti toliko jak da lokalno električno polje ne uvede optičke nelinearnosti i uništi vlakno. Ovakvi laseri su iznimno efikasni jer optičko vlakno koje čini aktivni medij može biti dugo kilometrima i smotano da zauzima mali prostor. Duljinom vlakna moguće je jako precizno ugađati snagu ovakvih lasera. Ovakvi laseri koriste se uglavnom u telekomunikacijama, spektroskopiji i za procesuiranje raznih materijala.



Slika 4.14 namotaji fiber lasera

### Dye organski laseri:

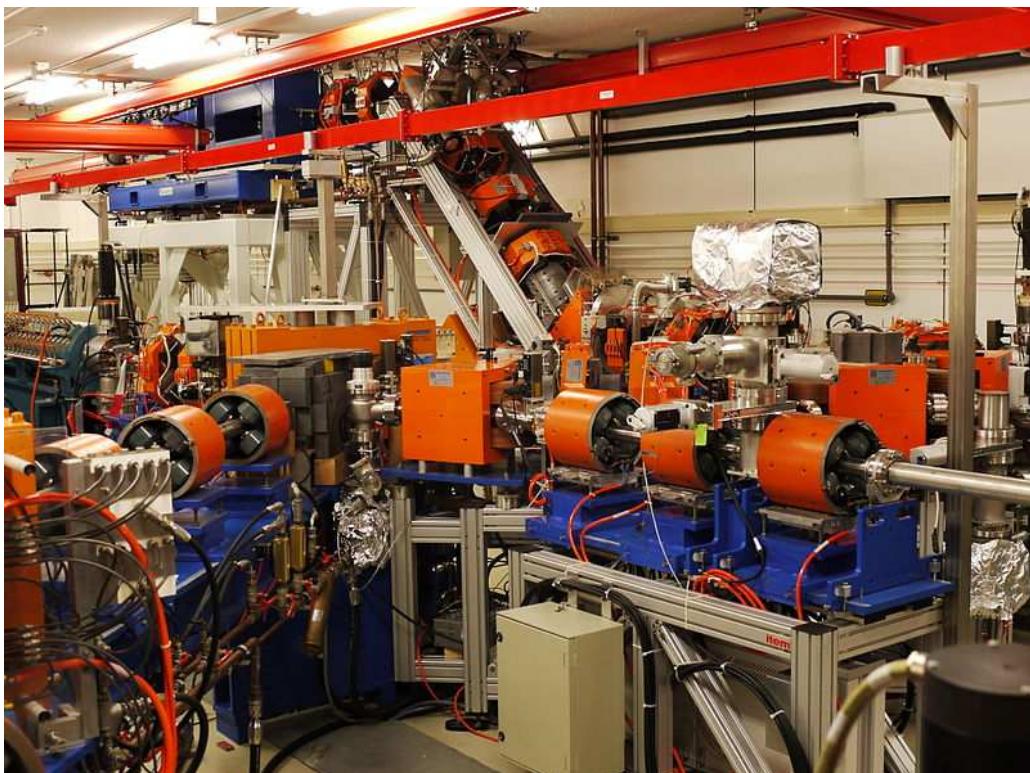
Ovi laseri koriste organsku boju kao aktivni medij, obično u tekućem stanju. U usporedbi sa plinskim ili kristalnim medijima boja se može koristiti za veći raspon valnih duljina. Široki raspon radnih frekvencija čini ih posebno pogodnima za podečavajuće “tunable” lasere i pulsne lasere. Također boja se može promijeniti i tako generirati druge valne duljine sa istim laserom. Uz tekućine mogu se koristiti i neki čvrsti materijali pa takve lasere nazivamo “solid state dye lasers” SSDL. Boje u ovim laserima sadrže velike organske molekule koje floresciraju kad su izložene određenoj frekvenciji svjetla. Ulazno svjetlo pobuđuje molekule koje emitiraju stimuliranu emisiju dok god su u inicijalno stvorenoj „singlet“ konfiguraciji, (posebna konfiguracija kvantnih stanja kad su dva ili više kvantnih sustava npr. elektrona u korelaciji, tj. dijele istu valnu-funkciju iako mogu biti prostorno udaljeni jedan od drugoga) . U ovom stanju molekule emitiraju svjetlo kroz florescenciju i tekuća boja propušta tu valnu duljinu. Unutar mikrosekunde molekule prelaze u „triplet“ (spin triplet je set od tri kvantna stanja sistema, svaki sa spinom  $S=1$ ). Sistem se može sastojati od jedne masivne spin 1 čestice kao W ili Z bozon, ili kao sistem više čestica totalnog spina 1). U triplet stanju svjetlo se emitira pomoću fosforencije i molekule počinju apsorbirati lasersku valnu duljinu čineći boju neprozirnom. Dye laseri koji se pumpaju eksternim laserom mogu usmjeriti dovoljno energije odgovarajuće valne duljine u tekući aktivni medij sa razmjerno malom količinom ulazne energije ali cijela solucija mora biti cirkulirana velikom brzinom da bi se triplet molekule makle sa puta zrake eksternog lasera koji služi za pumpanje. Budući da organske boje degradiraju pod utjecajem svjetla, solucija mora biti cirkulirana iz velikog rezervoara u staklenu posudu ili biti raspršena u obliku pare sa posebnim mlaznicama. Tekuće boje su vrlo dobri aktivni mediji, zraka mora napraviti samo nekoliko prolaza kroz boju da bi se dobila velika snaga. Ova visoka amplifikacija također dovodi do velikih gubitaka jer svaka refleksija od staklenih stijenki reducira dostupnu količinu energije. Kao organske solucije koriste se rhodamine, fluorescein, coumarin, stilbene, umbelliferone, tetracene, malachite green, koje su vrlo toksične i zapaljive i potrebna je opreznost pri radu sa ovim laserima. Snage ovih lasera mogu biti i do nekoliko kW. Koriste se u medicini (dermatologiji), spektroskopiji, proizvodnji i istrarživanju.



Slika 4.15 rhodamine dye laser emitira na 556 nm

### Free-electron laseri:

Free-electron laseri ili FEL dijele ista optička svojstva kao i ostali konvencionalni laseri kao što je stvaranje koherentnog elektromagnetskog zračenja, ali koriste potpuno drugačije formiranja zrake od svih ostalih lasera. Za razliku od plinskih, tekućih, kristalnih ili poluvodičkih lasera u kojima su pobuđeni elektroni vezani u atomima ili molekulama, FEL koristi relativistički elektronski snop koji putuje gotovo brzinom svjetlosti (99% C) kao aktivni medij koja se kreće kroz magnetsko polje (zato se i zovu laseri sa slobodnim elektronima). Taj snop prolazi kroz FEL oscilator, periodično magnetsko polje koje proizvodi sustav magneta sa altnirajućim polovima. Ovaj sustav magneta se još naziva i undulator zato jer tjeru elektrone u snopu da slijede sinusoidnu putanju. Akceleracija elektrona duž ovog puta rezultira ispuštanjem fotona (sinkrona radijacija). Budući da je gibanje elektrona već u fazi sa svjetlom koje je već emitirano, polja se koherentno zbrajaju. Valna duljina ovih lasera može se precizno ugadati regulirajući energiju elektronskog snopa ili snagu magnetskog polja. Ovakvi laseri imaju najveće radno područje i mogu zračiti duž skoro cijelog EM spektra, počevši sa mikrovalovima preko infracrvenog, vidljivog, ultravioletnog pa sve od rengenskog X dijela spektra. Ovakvi laseri zahtijevaju korištenje linearnih ili ciklotronskih akceleratora elektrona i zraka elektrona mora biti u potpunom vakumu što ih čini iznimno komplikiranim i skupima te se koriste uglavnom za istraživanja po raznim institutima i za razvoj vojnih tehnologija.



Slika 4.16 FEL linearni akcelerator elektrona

### Poluvodički laseri:

Ovi laseri biti će posebno obrađeni u zasebnom poglavljju.

Lasing Medium	Laser Type	Wavelength	Lexel Model
<b>FAR INFRARED</b>			
Er:Glass	Solid State	1540 nm	
<b>NEAR INFRARED</b>			
Cr:Forsterite	Solid State	1150-1350 nm	
HeNe	Gas	1152 nm	
Argon	Gas-Ion	1090 nm	85/95 Argon
Nd:YAP	Solid State	1080 nm	
Nd:YAG	Solid State	1064 nm	
Nd:Glass	Solid State	1060 nm	
Nd:YLF	Solid State	1053 nm	
Nd:YLF	Solid State	1047 nm	
InGaAs	Semiconductor	980 nm	
Krypton	Gas-Ion	799.3 nm	85/95 Krypton
Cr:LiSAF	Solid State	780-1060 nm	
GaAs/GaAlAs	Semiconductor	780-905 nm	
Krypton	Gas-Ion	752.5 nm	85/95 Krypton
Ti:Sapphire	Solid State	700-1000 nm	
<b>VISIBLE</b>			
Ruby	Solid State	694 nm	
Krypton	Gas-Ion	676.4 nm	85/95 Krypton
Krypton	Gas-Ion	647.1 nm	85/95 Krypton, ColorPro III/III-HP, BeamPro R
InGaAlP	Semiconductor	635-660 nm	
HeNe	Gas	633 nm	
Ruby	Solid State	628 nm	
HeNe	Gas	612 nm	
HeNe	Gas	594 nm	
Cu	Metal vapor	578 nm	
Krypton	Gas-Ion	568.2 nm	85/95 Krypton, ColorPro III/III-HP, BeamPro R
HeNe	Gas	543 nm	
DPSS	Semiconductor	532 nm	
Krypton	Gas-Ion	530.9 nm	85/95 Krypton, ColorPro III/III-HP, BeamPro R
Argon	Gas-Ion	514.5 nm	85/95 Argon, ColorPro III/III-HP, BeamPro V/X
Cu	Metal vapor	511 nm	

Argon	Gas-Ion	501.7 nm	85/95 Argon, ColorPro III/III-HP, BeamPro V/X
Argon	Gas-Ion	496.5 nm	85/95 Argon, ColorPro III/III-HP, BeamPro V/X
Argon	Gas-Ion	488.0 nm	85/95 Argon, ColorPro III/III-HP, BeamPro V/X
Argon	Gas-Ion	476.5 nm	85/95 Argon, ColorPro III/III-HP, BeamPro V/X
Argon	Gas-Ion	457.9 nm	85/95 Argon, ColorPro III/III-HP, BeamPro V/X
HeCd	Gas-Ion	442 nm	
N2+	Gas	428 nm	
Krypton	Gas-Ion	416 nm	

### NEAR ULTRAVIOLET

Argon	Gas-Ion	364 nm (UV-A)	85/95 Argon special order optics
XeF	Gas (excimer)	351 nm (UV-A)	
N2	Gas	337 nm (UV-A)	
XeCl	Gas (excimer)	308 nm (UV-B)	

### FAR ULTRAVIOLET

Krypton SHG	Gas-Ion/BBO crystal	284 nm (UV-B)	95-SHG-284
Argon SHG	Gas-Ion/BBO crystal	264 nm (UV-C)	85-SHG, 95-SHG-257/257X special order
Argon SHG	Gas-Ion/BBO crystal	257 nm (UV-C)	85-SHG, 95-SHG-257/257X
Argon SHG	Gas-Ion/BBO crystal	250 nm (UV-C)	95-SHG-257/257X special order
Argon SHG	Gas-Ion/BBO crystal	248 nm (UV-C)	85-SHG, 95-SHG-244/244X special order
KrF	Gas (excimer)	248 nm (UV-C)	
Argon SHG	Gas-Ion/BBO crystal	244 nm (UV-C)	85-SH

Tablica 4.01 popis komercijalnih lasera po valnim duljinama tvrtke LEXEL

# Poluvodički laseri

*If you take a bale of hay and tie it to the tail of a mule and then strike a match and set the bale of hay on fire, and if you then compare the energy expended shortly thereafter by the mule with the energy expended by yourself in the striking of the match, you will understand the concept of amplification*

William B. Shockley

Poluvodički (diodni) laseri su laseri gdje se kao aktivni medij koristi poluvodič sličan onome kod LED dioda. Najčešći tip laserske diode formiran je pomoću PN-spoja i napajan električnom strujom.

## Teoretski principi rada:

Laserska dioda se proizvodi legiranjem površine vrlo tankog kristalnog vafera. Kristal se legira tako da se difuzijom proizvede P i N područje, jedno poviše drugoga, što rezultira PN-spojem ili diodom. Propusna polarizacija PN-spoja laserske diode uzrokuje da dva nosioca naboja elektroni i šupljine budu injektirane sa suprotnih strana PN-spoja. Šupljine su injektirane sa P-strane, a elektroni sa N-strane prema potencijalnoj barijeri. Barijera je dio poluvodiča koje okružuje sam PN-spoj i nastaje zbog razlike u električnom potencijalu kad su P i N strane u fizičkom kontaktu. Zbog injekcije naboja koja napaja većinu diodnih lasera oni se još često zovu "injekcijske laserske diode" (IDL). Iako su diodni laseri poluvodički uređaji što se u engleskom jeziku često naziva "solid-state" ovdje se taj termin treba izbjegavati da ne bi došlo do zabune sa solid-state laserima koji ne koriste poluvodiče za svoj rad nego kristale kao rubin, safir, stakla itd.

Postoji još jedna metoda pumpanja poluvodičkih lasera osim električne struje i to je optičko pumpanje. Ovi laseri zovu se OPSL ("Optically Pumped Semiconductor Lasers") i koriste poluvodič kao aktivni medij, pumpan sa drugim laserom (najčešće IDL laserskom diodom). OPSL laseri imaju nekoliko prednosti pred diodnim laserima, širi raspon valnih duljina i slobodni su od nekih interferencijskih pojava na elektrodama poluvodiča.

Kad se elektron i šupljina nađu na istom mjestu mogu se rekombinirati ili aninhalirati što rezultira spontanom emisijom tj. elektron može okupirati energetsko stanje šupljine, pritom emitirajući foton energije koja odgovara razlici između energetskih stanja elektrona i šupljine. Spontana emisija daje laserskoj diodi koja se još nalazi ispod laserskog praga svojstva kao i LED diodi. Spontana emisija je nužna da bi se inicirale laserske oscilacije, ali postaje jedan od izvora neefikasnosti i nepoželjna je kad laserska dioda emitira koherentno zračenje.

Razlika između laserske diode koja emitira fotone i obične poluvodičke diode koja emitira fonone (fononi su u poluvodičkoj fizici pandan fotonima, to je u biti oblik vibracija preko kojih se emitira ili apsorbira energiju u nosiocima naboja, dolaze od grčke riječi "phone" što znači zvuk, zato jer fononi velikih valnih duljina izazivaju pojavu zvuka) leži u korištenju druge vrste poluvodiča, onog čija fizička i atomska svojstva omogućavaju emisiju fotona. Ovi poluvodiči još se nazivaju "direct bendgap" (bendgap je zabranjen pojas energije) poluvodičima. Silicij i germanij koji su jednoelementarni poluvodiči imaju pojas zabranjenih energija koji nije kompatibilan sa emisijom fotona i taj pojas se ne smatra direktnim. Ostali materijali tzv. složeni poluvodiči imaju skoro identične kristalne strukture kao i silicij ili germanij, ali koriste naizmjenične metode preslagivanja dvije vrste atoma kao kod šahovske ploče da bi razbili simetriju. Tranzicije između materijala u takvom alternirajućem paternu stvara direktni zabranjeni pojas energija. Galium-arsenid (GaAs), indijum-fosfat (InP), galijum-antimond (GaSb) i galijum-nitrat (GaN) su primjeri tih složenih poluvodičkih materijala koji mogu emitirati svjetlo.

U nedostatku stimulirane emisije (laserske emisije) elektroni i šupljine mogu koegzistirati jedno određeno vrijeme jedni blizu drugih bez da se rekombiniraju (to se naziva vrijeme rekombinacije i tipično traje nekoliko nanosekundi). Tada obližnji foton koji ima energiju jednaku rekombinacijskoj energiji može izazvati rekombinaciju putem stimulirane emisije. Ta pojava generira novi foton iste frekvencije, koji putuje u istom smjeru, sa identičnom polarizacijom i fazom kao i početni foton. To znači da stimulirana emisija uzrokuje pojačanje u optičkom valu (određene valne duljine) u injektiranom području i ta se amplifikacija pojačava kako se povećava broj elektrona i šupljina. Spontana i stimulirana emisija je mnogo efikasnija u poluvodičima sa direktnim zabranjenim pojasom nego kod običnih poluvodiča, zato se silicij ne koristi pri konstrukciji laserskih dioda.

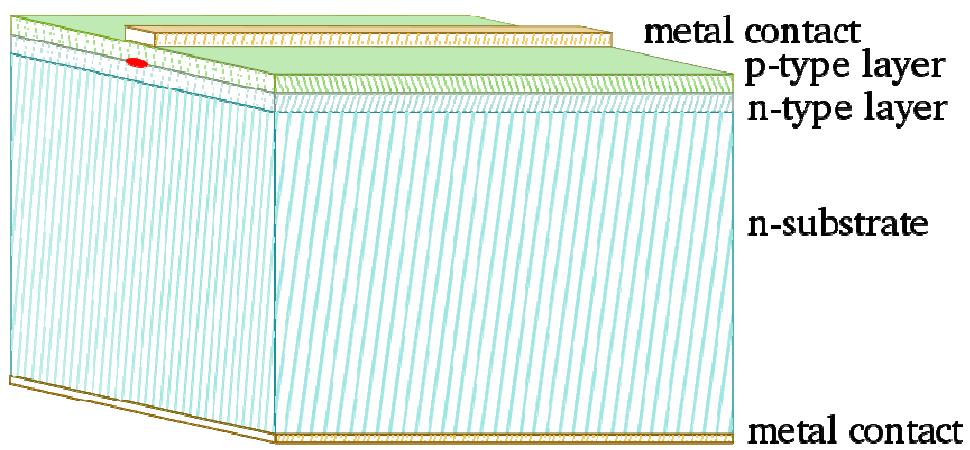
Kao i kod ostalih lasera aktivni poluvodički medij je okružen optičkim rezonatorom da bi se formirao laser. U najednostavnijoj izvedbi optički vod je smješten na površini kristala, takav da je svjetlo ograničeno na relativno usku liniju. Dva kraja kristala su obrađena tako da bi se dobili savršeno glatki paralelni rubovi koji čine tzv. Fabry-Pérot rezonator. Fotoni će biti emitirani u taj rezonator i biti reflektirani nekoliko puta kroz aktivni medij prije nego budu emitirani u obliku laserske zrake. Dakle kako svjetlosni valovi putuju kroz šupljinu oni bivaju amplificirani od strane stimulirane emisije, ali nešto svjetla se također gubi zbog apsorpcije i loše refleksije u rezonatoru, ukoliko imamo više amplifikacije nego gubitaka dioda emitira lasersko svjetlo.

Neka važna svojstva laserske diode su određena sa geometrijom optičke šupljine. Generalno svjetlost je u vertikalnom smjeru sadržana u vrlo uskom sloju, i struktura podržava samo jedan optički mod u smjeru okomitom na smjer sloja. U lateralnom smjeru ako je valovod širok u usporedbi sa valnom duljinom svjetla, tada valovod može podržavati više lateralnih optičkih modova i ovi laseri se zovu "multi-mode laseri". Ovakvi "multi-mod" laseri su adekvatni kad nam treba relativno velika snaga na uštrb precizne uske difrakcijski limitirane zrake, kao kod laserskog printanja, pumpanja drugih lasera itd.

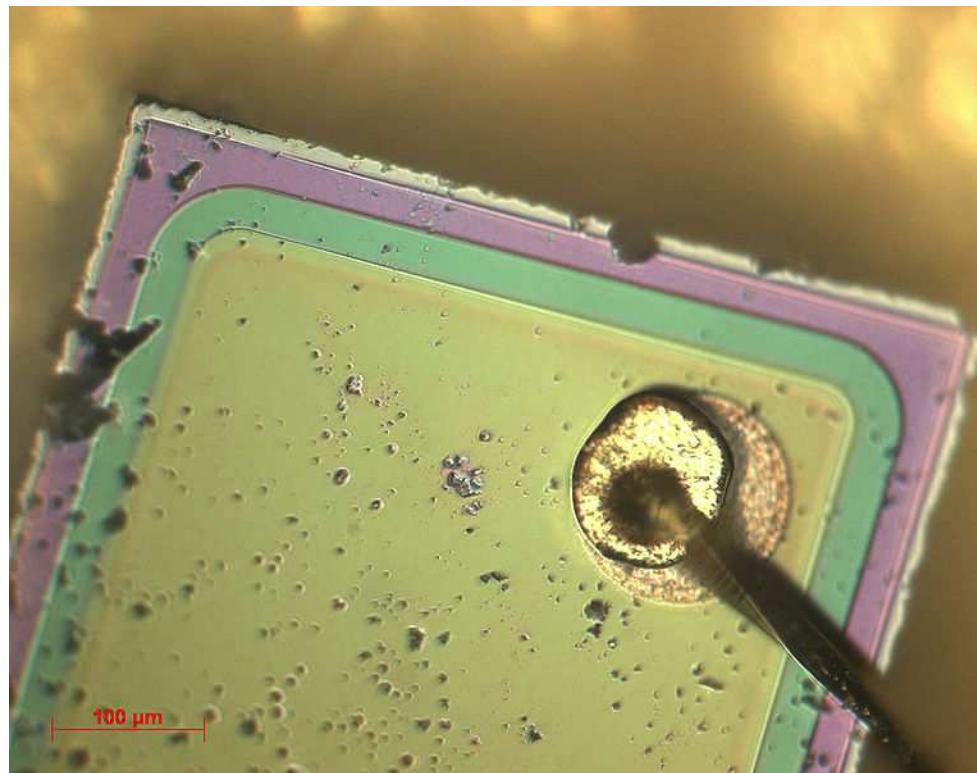
U aplikacijama gdje trebamo malu fokusiranu zraku, valovod mora biti uzak, reda veličine optičke valne duljine. Na ovaj način samo jedan lateralni mod je podržan i emitirana zraka je difrakcijski limitirana. Takve zrake se koriste kod optičkih medija (CD,DVD-RW), laserske pokazivače, optička vlakna itd.

Valna duljina na kojoj se emitira je funkcija direktnih zabranjenih pojaseva na poluvodiču i modova u optičkom rezonatoru. Generalno najveća amplifikacija će se dogoditi za fotone koji imaju energiju malo iznad pojasa zabranjene energije. Neki diodni laseri, uglavnom oni koji rade u vidljivom spektru rade na jednoj valnoj duljini, ali ta valna duljina je nestabilna i mijenja se zahvaljujući fluktuacijama jakosti struje i temperature.

Zbog difracije zraka divergira (širi se) rapidno nakon što napusti diodu. Mora se koristiti optička leća da bi se dobila koliminirana zraka kao kod npr. laserskog pokazivača. Ako se zahtjeva kružna zraka koriste se cilindrične leće. za lasere koji koriste simetrične leće zraka je eliptičnog oblika zbog razliku u vertikalnoj i lateralnoj divergenciji. To se može vidjeti kod običnog crvenog laserskog pokazivača. Jednostavna dioda ovdje opisana više se ne koristi, a napretkom tehnologije poboljšana je na mnogo načina, od kojih ćemo neke pobliže razmotriti.



Slika 5.01 fizička struktura jednostavne IDL diode

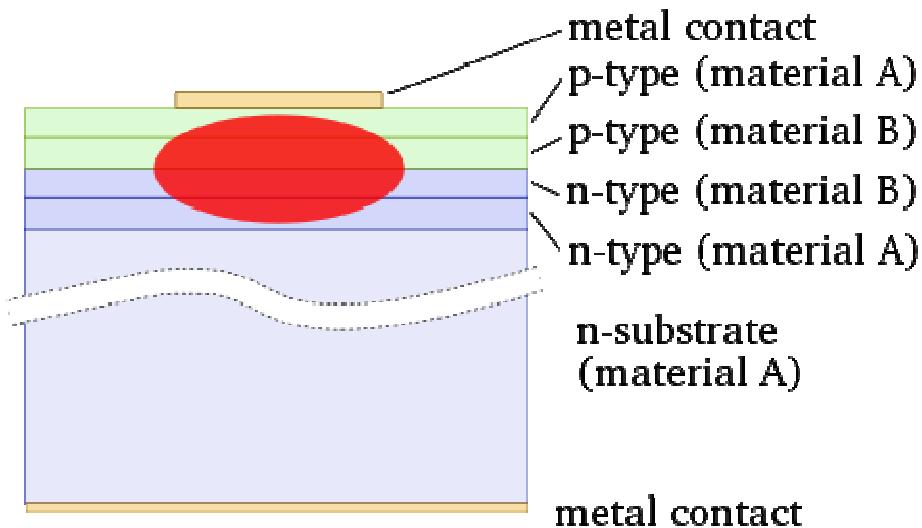


Slika 5.02 mikrofotografija laserske diode iz CD-ROM uređaja, vidljivi su P i N slojevi različitih boja

## **Tipovi poluvodičkih dioda:**

### **Duble heterostructure laser:**

U ovim uređajima sloj materijala sa malim zabranjenim pojasom je smješten između dva sloja sa velikim zabranjenim pojasom "bendgap". Kao materijali često se koriste galij-arsenid (GaAs) sa aluminij-galij-arsenidom ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ). Svaki sloj između različitih materijala se zove heterostruktura, pa od tuda dolazi i naziv "dupla heterostruktura" ili DH-laser. Laserska dioda opisana prije može se smatrati homospojnim laserom. Prednost ove dvostrukre izvedbe je u tome što je aktivno područje (područje u kojem slobodni elektroni i šupljine mogu postojati simultano) ograničen na tanak središnji sloj. To znači da mnogo više elektron-šupljina parova sudjeluje u amplifikaciji, tj. jako malo ih je ostalo na periferiji. Uz to svjetlo se reflektira od heterospoja i ono je također ograničeno na područje gdje se dešava amplifikacija. Sve to dovodi do mnogo bolje efikasnosti ovakvih laserskih dioda u usporedbi sa osnovnim, referentnim tipom.

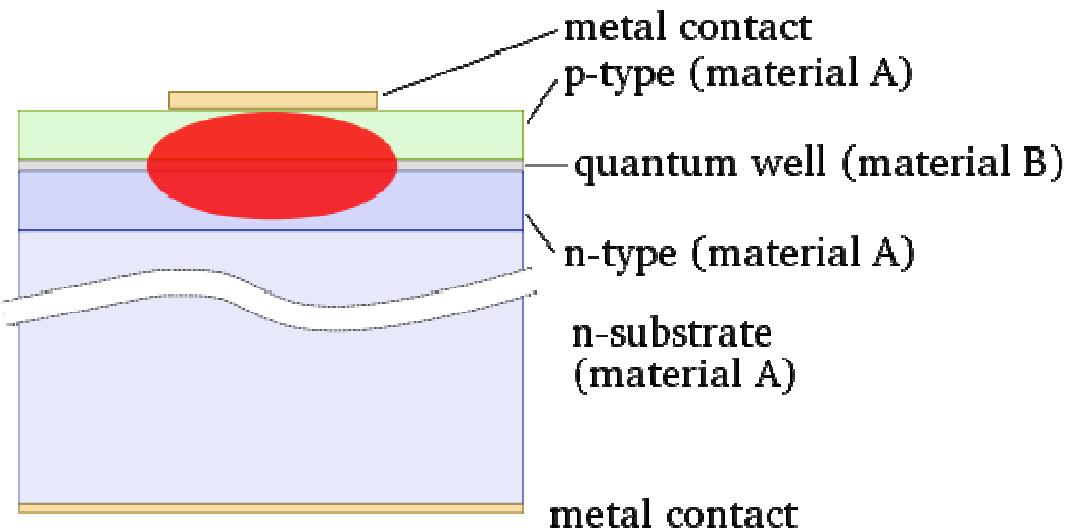


Slika 5.03 diagram poprečnog presjeka DH-lasera

### **Quantum well lasers:**

Ovi poluvodički laseri za svoj rad koriste efekt tzv. kvantnog potencijalnog bunara ili kvantnog ograničenja. Potencijalni bunar je područje koje okružuje lokalni minimum potencijalne energije. Energija zarobljena u potencijalnom bunaru ne može se pretvarati u druge oblike energije (npr. kinetičku energiju u slučaju gravitacijskog potencijalnog bunara), zato što sustav ima najmanju moguću energiju u odnosu na okolinu i entropija sustava se ne povećava. Valne duljine svijetla emitirane iz ovakvog lasera određene su i širinom aktivnog područja a ne samo svojstvima zabranjenog pojasa poluvodičkih materijala. To znači da se pomoću "quantum well" lasera mogu emitirati mnogo kraće valne duljine nego kod običnih diodnih lasera te su također efikasniji. Širina aktivnog medija je 10-50 nm da bi se postigla separacija kvantnih stanja elektrona zarobljenih u sloju, a valna duljina može se mijenjati mijenjanjem širine aktivnog sloja. Quantum well laseri zahtijevaju manje elektrona i šupljina da bi postigli prag potreban za koherentnu emisiju što automatski znači da rade sa manjim strujama, izloženi su manjim temperaturnim gubicima itd. u odnosu na konvencionalne poluvodičke lasere. Također budući da je kvantna efikasnost (omjer izlaznih fotona i ulaznih elektrona) uglavnom limitirana

optičkom apsorpcijom od strane elektrona i šupljina, smanjivanjem njihova broja značajno se smanjuje i problem apsorpcije. Da bi se kopenzirala mala širina aktivnih slojeva može se koristiti više identičnih aktivnih slojeva i takvi se laseri zovu "multi quantum well" laseri.

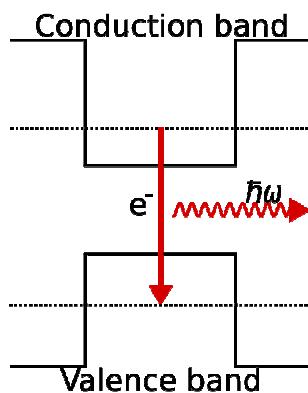


Slika 5.04 poprečni presjek "quantum well" lasera

#### Quantum cascade laser:

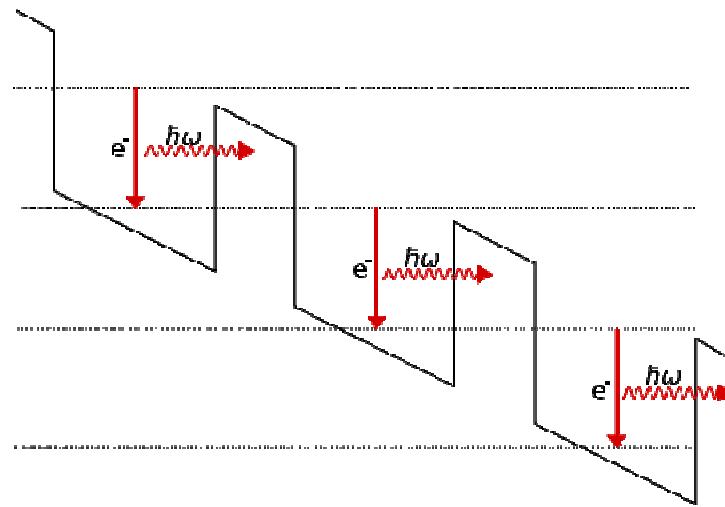
Kvantni kaskadni laseri (QCL) su poluvodički laseri koji emitiraju u srednjem i dalekom IR dijelu spektra i prvi su put demonstrirani u Bell laboratorijima 1994. Za razliku od tipičnih poluvodičkih lasera koji koji emitiraju elektromagnetsko zračenje kroz proces rekombinacije elektrona i šupljina kod QCL lasera emisija se postiže pomoću tzv. intersubband tranzicija u ponavljajućim redovima „multiple quantum well“ heterostruktura.

U nekom poluvodičkom kristalu elektroni mogu zauzimati prostor u jednom od dva energetska stanja tj. u valentnom ili vodljivom pojasu. Ta dva pojasa su razdvojena pojasom zabranjenih energija u kojemu nema dozvoljenih energetskih stanja koja bi elektron mogao poprimiti. Konvencionalne poluvodičke diode generiraju svjetlo emitiranjem jednog fotona kada se visokoenergetski elektron iz vodljivog pojsa rekombinira sa šupljinom u valentnom pojasu. Energija fotona, a time i valna duljina emitiranja su određene svojstvima (širinom) tog zabranjenog pojsa. Ovaj mehanizam se naziva „interband“ tranzicija.



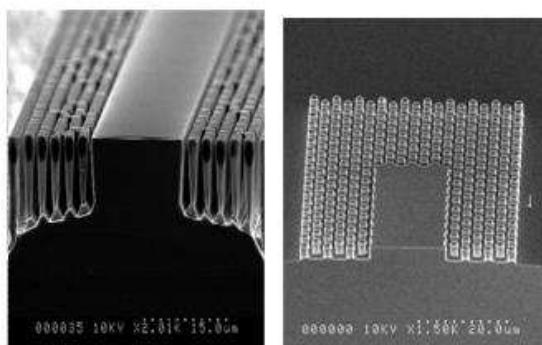
Slika 5.05 interband tranzicija u konvencionalnom diodnom laseru

QCL laseri ne koriste monolitni poluvodički materijal u svojem aktivnom mediju. Umjesto toga oni se sastoje od periodičnih serija tankih slojeva varirajućih materijala tvoreći superlaticu (periodična struktura dva ili više materijala. Tipična širina jednog sloja je nekoliko nanometara). Superlatica uvodi varirajući električni potencijal preko duljine uređaja, što znači da postoji varirajuća vjerovatnost da elektroni okupiraju drukčije položaje duž aktivnog medija. Ovo stanje se još naziva jednodimenzionalno quantum well ograničavanje i dovodi do razdvajanja pojaseva dozvoljenih energija na više diskretnih energetskih podpojaseva. Mijenjanjem širine između slojeva moguće je postići populacijsku inverziju između dva podpojasa što je nužno za postizanje laserske emisije. Budući da je pozicija energetskih pojaseva primarno određena širinom sloja, a ne korištenim materijalima moguće je ugadati valnu duljinu QCL – lasera duž širokog dijela spektra. Dodatno u običnim poluvodičkim diodama elektroni i supljine se aninhaliraju nakon rekombinacije i više ne sudjeluju u generiranju fotona, dok kod unipolarnih QCL lasera elektron koji je napravio intersubband tranziciju i emitirao foton u jednom periodu superlatice može tunelirati u sljedeći niži sloj i ponovo emitirati foton. Taj se postupak može kaskadno ponavljati i od tuda dolazi i naziv ovih lasera.



Slika 5.06 intersubband tranzicija u QCL laserima

Relativno velika izlazna snaga, dosta široko valno područje i mogućnost rada na sobnim temperaturama čine ove lasere vrlo korisne u spektroskopiji, kao što je mjerjenje plinova i ekoloških zagađivača u atmosferi, u konstrukciji laserskog radara (LIDAR), raznim industrijskim kontrolnim procesima, u diagnostičkoj medicini, kao i proučavanju plazme. QCL spektroskopija pruža mogućnost identificiranja i kvantificiranja kompleksnih teških molekula koje se nalaze u toksičnim kemikalijama, eksplozivima i drogama. Također u području od 3 do 5  $\mu\text{m}$  (tzv. atmosferski prozor) može se koristiti kao bežična alternativa optičkim vlaknima za broadband internet i mreže.

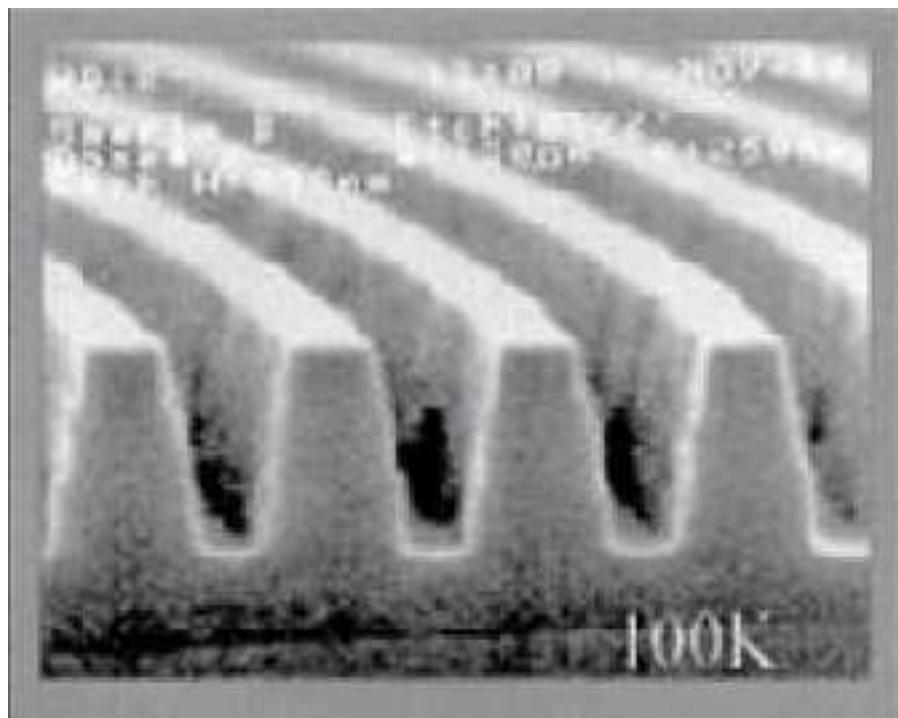


SEM pictures of a QCLs including photonic bandgaps for improved mode confinement

Slika 5.07 SEM (scanning electron microscop) mikrofotografija QCL lasera

### Distributed feedback lasers:

Kod lasera sa distributivnom povratnom vezom (DFB) aktivno područje je strukturirano kao difrakcijska rešetka koja razdvaja svjetlo u nekoliko zraka koje putuju u različitim smjerovima. Struktura dovodi do pojave jednodimenzionalne interferencijske rešetke, a rešetka osigurava optičku povratnu vezu. DFB laserske diode ne koriste dva diskretna zrcala kao optički rezonator (najčešća izvedba kod ostalih poluvodičkih lasera) nego samo jedno, a drugo je zamijenjeno rešetkom koja služi kao selektivni element valne duljine i omogućuje povratnu vezu reflektirajući svjetlo ponovo u šupljinu da bi se formirao rezonator. Rešetka je konstruirana tako da reflektira samo usko frekvencijsko područje i tako proizvodi samo jedan longitudinalni mod. Promjenom temperature mijenja se nagib rešetke zbog ovisnosti refraktivnog indeksa o temperaturi. Ova ovisnost je posljedica promjene u energetskim pojasevima poluvodiča zbog temperaturne i termalne ekspanzije. Promjena refrakcijskog indeksa dovodi do promjene radne valne duljine lasera i tako dobivamo promjenjivi laser "Tunable Diode Laser" (TDL). Valna duljina mijenja se za 6 nm pri promjeni temperature od 50 K. Promjenom struje napajanja moguće je ugađati ovakve lasere zato jer promjena jakosti struje uzrokuje promjenu temperature unutar uređaja. DFB laseri se koriste u optičkim komunikacijama gdje je tjunabilni laserski signal jako poželjan, kao i u spektroskopiji, posebno detekciji plinova.



Slika 5.08 strukturalna rešetka DFL lasera (SEM microfotografija)

## VCSEL:

“Vertical-cavity surface-emitting laser” VCSEL (laser sa vertikalnom šupljinom) je tip poluvodičkog lasera kod kojega je laserska emisija okomita na gornju površinu, za razliku od konvencionalnih In-plane lasera koji emitiraju iz šupljine izdubljene u vaferu. Postoji nekoliko prednosti VCSEL-a u odnosu na obične planarne diodne lasere. Planarni laseri ne mogu biti testirani za vrijeme proizvodnje i ako se dogodi greška u proizvodnji uslijed loših kontakata ili niske kvalitete uzgoja materijala, proizvodno vrijeme i materijal su izgubljeni. VCSEL laseri mogu biti testirani tijekom proizvodnje kako bi se provjerila kvaliteta materijala i procesuiranje. Dodatno pošto ovi laseri emitiraju zraku okomito na aktivni medij, suprotno od planarnih koji je emitiraju paralelno deseci tisuća VCSEL-a mogu biti procesuirani simultano na Galij-arsenid vaferu. Sve to pridonosi smanjenju troškova proizvodnje pojedinog primjerka i boljoj kontroli kvalitete.

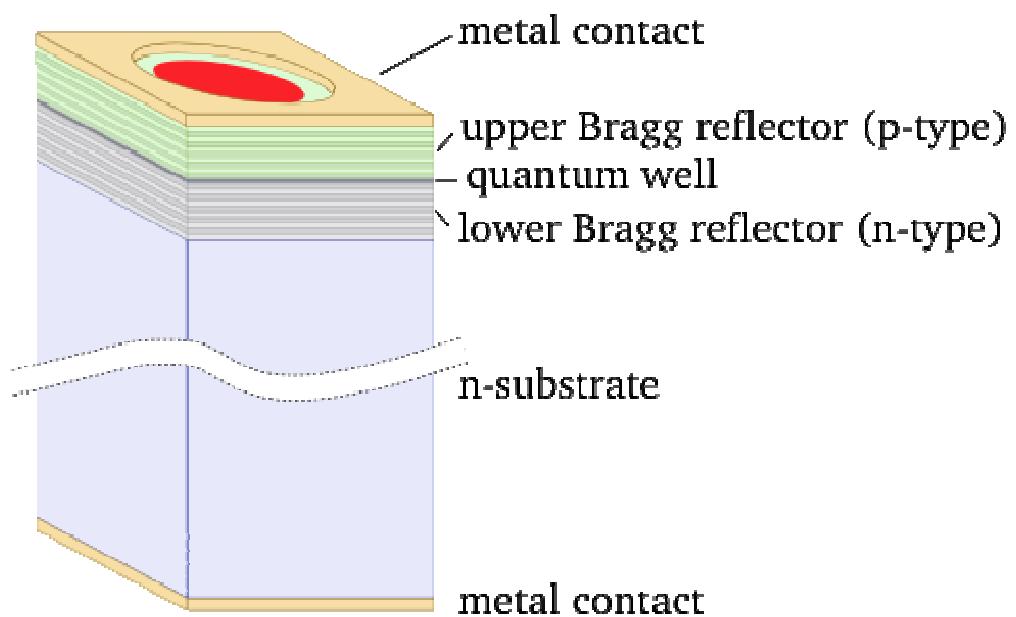
Rezonator se sastoji od dva distribuirana Bragg reflektorska (DBR, reflektor koji se koristi u optičkim vlaknima i poluvodičkim laserima) zrcala paralelna sa površinom vafera, dok se aktivni medij sastoji od jednog ili više kvantnih bunara (quantum wells). Planarna DBR zrcala se sastoje od slojeva sa alternirajućim visokim i niskim indeksom refrakcije. Svaki sloj ima širinu koja je jednaka četvrtini valne duljine lasera sa faktorom refleksije poviše 99%. Visoko reflektirajuća zrcala su potrebna kod ovih lasera da bi se kompenzirala mala aksijalna duljina aktivnog medija. Obično je gornje zrcalo dopirano sa P materijalom, a donje sa N tipom čineći tako PN-spoj. Kod nekih posebnih izvedbi VCSEL-a P i N slojevi mogu biti smješteni između zrcala zahtjevajući složeniji tehnološki proces izvođenja električnog kontakta do aktivnog medija, ali eliminirajući električne gubitke u DBR strukturi. Aktivni dio VCSEL-a može također biti pumpan eksternim izvorom svjetlosti umjesto električnom strujom, obično drugim laserom kraće valne duljine.

VCSEL-i za valne duljine od 650nm do 1300nm su bazirani na galij-arsenid (GaAs) vaferu sa DBR-om na bazi aluminij-galij-arsenida (AlGaAs). GaAs-AlGaA kombinacija se koristi zato što je konstanta kristalne rešetke (udaljenost između pojedinih celija u kristalnoj rešetki) za ove materijale varira vrlo malo kako se mijenja kompozicija, dopuštajući višestruke epitaksijalne slojeve kristalnih rešetki na GaAs podlozi. Refrakcijski indeks AlGaAs-a se povećava kako se povećava udio aluminija smanjujući tako broj slojeva DBR reflektora u usporedbi sa ostalim izvedbama. Osim toga kod visokih koncentracija aluminija stvara se aluminij-oksid koji se može koristiti za redukciju struje kroz VCSEL, omogućavajući niže struje praga. Dvije glavne metode ograničavanja struje kroz VCSEL su ion-implementirani VCSEL i oksid VCSEL.

U početku 1990-tih telekomunikacijske kompanije koristile su uglavnom ionske VCSEL-e. Ioni (uglavnom vodikovi ioni H<sup>+</sup>) su implementirani u VCSEL strukturu svugdje osim kod apreture VCSEL-a, uništavajući strukturu kristalne rešetke i tako inhibirajući struju. Krajem 1990-tih postoji trend prelaska na oksid VCSEL. U njima se struja regulira oksidacijom materijala oko apreture. Oksidira se sloj aluminija unutar VCSEL-a. Postoji i kombinacija ove dvije metode. U početku je postojala zabrinutost za strukturalnu čvrstoću oksidiranog sloja zbog naprezanja i defekata u materijalu, no nakon mnogo testiranja oksid VCSEL diode su se pokazale dovoljno robusnima.

Zato što VCSEL diode emitiraju sa gornje površine poluvodičkog čipa, mogu biti testirani već na vaferu, prije nego budu izrezani u pojedine uređaje. To također omagućava da budu napravljeni ne samo u jednodimenzionalnim nego i u dvodimenzionalnim poljima. Relativno velika apertura VCSEL-a, u usporedbi sa planarno emitirajućim poluvodičkim laserima omogućava manju divergenciju snopa što ih čini posebno efikasnima u kombinaciji sa optičkim kabelom. Visoko reflektirajuća zrcala smanjuju struju praga što također rezultira manjom potrošnjom uz nešto manju snagu od ekvivalentnih planarnih dioda. Također demonstrirani su VCSEL uređaji od 1300nm do 2000nm sa aktivnom medijem od indij-fosfata (InP). Laseri koji zrače na 1300nm su posebno zanimljivi u telekomunikacijama zato što optička vlakna bazirana na siliciju najmanje disipiraju tu valnu duljinu.

VCSEL laseri se najviše koriste pri prijenosu podataka putem optičkog vlakna i kod prijenosa analognog broadband signala, također imaju veliku primjenu u apsorpcijskoj spektroskopiji, laserskim printerima, kompjuterskim miševima, biološkoj analizi tkiva u medicini, pumpanju drugih lasera, IR iluminaciji za vojne svrhe itd. Zbog relativno male cijene i masovne proizvodnje imaju jako široku primjenu.



Slika 5.09 dijagram jednostavne VCSEL strukture

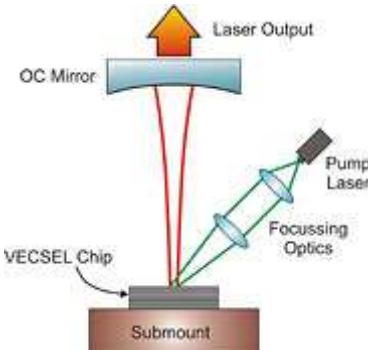


Slika 5.10 razne izvedbe VCSEL lasera u kućištima

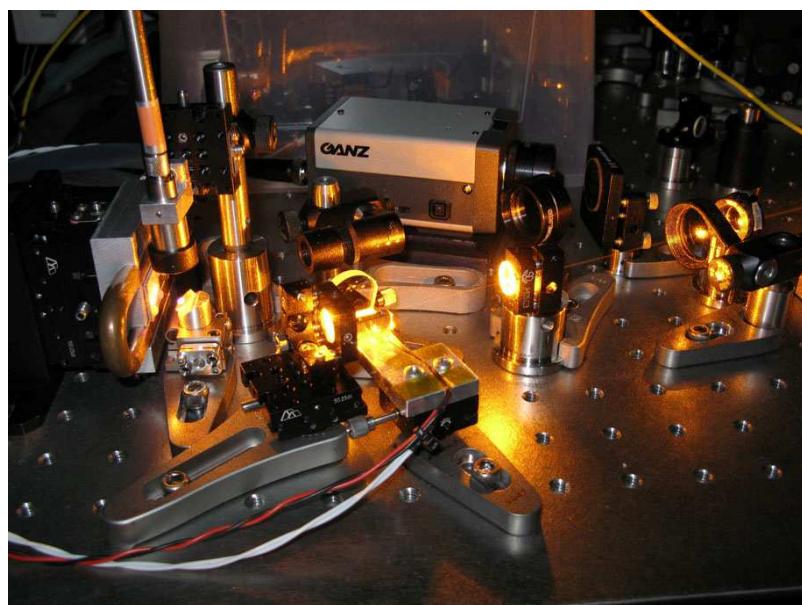
## VECSEL:

„Vertical-external-cavity surface-emitting-laser” (laseri sa eksternom vertikalnom šupljinom) su jako slični VCSEL laserima. Jedina razlika je u tome što VECSEL diode imaju oba reflektirajuća zrcala kao dio unutarnje strukture poluvodiča dok je kod VECSEL lasera jedno zrcalo strukturalno izvan poluvodiča. Kao rezultat toga šupljina ima slobodan prostor i razmak između diode i eksternog zrcala je tipično oko 1cm. Ovakvi uređaji pogodni su za optičko pumpanje i mogu proizvoditi vrlo intenzivno zračenje relativno velike snage za poluvodičke lasere. Oni postupno zamjenjuju konvencionalne solid-state lasere (Nd:YAG) kao i plinske ( $\text{CO}_2$ ) lasere u industrijskoj obradi materijala. Također se koriste u bliskom IR dijelu spektralnog zakona za lasersko hlađenje, spektroskopiju, a istražuje se njihova primjena u telekomunikacijama.

Jedna od najznačajnijih karakteristika ovih lasera je mala širina poluvodičkog aktivnog medija koja je obično manja od 100 nm, dok se kod konvencionalnih planarnih lasera ta širina kreće od 250  $\mu\text{m}$  do 2 mm. To pridonosi značajnom smanjenju nelinearnosti u aktivnom mediju, rezultat je jednomodna zraka velikog poprečnog presjeka koja se ne može dobiti konvencionalnim diodama. Kod VECSEL-a eksterno zrcalo omogućuje većem dijelu poluvodiča da sudjeluje u emitiranju zračenja u jednom modu, što ima za posljedicu veliku snagu. Dok VCSEL-i emitiraju uglavnom u miliwatnom području, ovi laseri mogu bez problema imati snagu od 50 W pa i više. Za razliku od većine poluvodičkih lasera koji se pumpaju električnom energijom ovi laseri se obično pumpaju sa nekim drugim laserima.



Slika 5.11 princip rada VECSEL poluvodičkog lasera, vidljivo je da je jedno zrcalo eksterno te da se koristi optička pumpa drugog lasera



Slika 5.12 VECSEL emitira na 589 nm u žutom dijelu spektra

# Primjena i sigurnost lasera

*This is just an experiment that proves Maxwell was right - we just have these mysterious electromagnetic waves that we cannot see with the naked eye. I don't think they will have any use whatsoever.*

Rudolf Hertz

## Primjena lasera:

Postoji jako puno znanstvenih, vojnih, medicinskih, komercijalnih aplikacija u kojima je laserska tehnologija nezamjenjiva. Koherencija, monokromatibilnost, mogućnost postizanja velike izlazne snage su svojstva koja omogućavaju vrlo veliku i široku primjenu lasera.

U znanosti koriste se u raznim tehnikama interferometrije i spektroskopije, proučavanju nelinearne optike, detekciji raznih plinova i kemikalija, holografiji, fotokemiji, laserskom hlađenju i proučavanju fizike ultrahladne materije. Koriste se u atomskim satovima, imaju primjenu u adaptivnoj optici (posebna aktivna zrcala npr. u teleskopu koja mogu metodom rezonancije poništiti atmosfersku degradaciju i zamućenje astronomskih fotografija) i u konstrukciji raznih vrsta modernih mikroskopa kao i u mnogim drugim područjima znanosti.

Laseri također imaju veliku primjenu u medicini, kao što su očna kirurgija, laserski scalpeli, dermatologija, liječenje raznih tumora itd.

Na polju vojne tehnologije najveća primjena je za sada u sustavima laserski navođenih bombi, projektila i raketa kao i za dizajnaciju raznih ciljeva te precizno mjerjenje udaljenosti do mete. Sa laserima visoke rezolucije (LIDAR) moguće je zamijeniti neke vrste radara za detekciju i navođenje. U zadnje vrijeme se sve više radi na polju aktivnih laserskih oružja vrlo velike snage sposobnima uništiti velike ciljeve poput interkontinentalnih raketa i satelita u zemljinoj orbiti. Laseri su posebno pogodni za ove aplikacije zbog svoje iznimne preciznosti, brzine i mogućnosti fokusiranja velike količine energije na malom prostoru.

Kada govorimo o primjeni lasera komercijalna upotreba je daleko najzastupljenija i najraširenija. Gotovo da nema industrijskih i proizvodnih grana privrede koje nemaju neku korist od upotrebe lasera. Od rezanja čeličnih limova do proizvodnje sofisticiranih mikroprocesora laseri su nezamjenjiv alat. U teškoj industriji koriste se uglavnom plinski laseri velikih snaga u CW modu za rezanje, zavarivanje, taljenje, razne obrade materijala itd. Laseri su neizostavan dio u telekomunikacijskim tehnologijama za prijenos podataka kroz optička vlakna i zrak. U elektronici se koriste za zapisivanje i čitanje podataka sa optičkih medija (CD, DVD - RW), lasersko printanje, skeniranje bar-kodova, laserskih kompjutorskih miševa, razne vrste laserskih senzora kao što su žiroskopi ili akcelerometri. Također se koriste mnogo u automatizaciji, proizvodnji vizualnih efekata, pokazivačima itd.

Sada ćemo se pobliže upoznati sa primjenom poluvodičkih laseru.

## Primjena poluvodičkih laseru:

Laserske diode pronašle su upotrebu u telekomunikacijama zato što ih je relativno jednostavno modulirati i upariti sa svjetlovodnim kablovima. Koriste se u raznim mjernim uređajima kao što su mjerači udaljenosti, čitači bar-kodova i sl. Laseri koji zrače u vidljivom dijelu spektra najčešće u crvenom i zelenom se koriste kao razni pokazivači. Laserske diode velike i male snage koriste se u tiskarskoj industriji za skeniranje teksta i slika i za graviranje tiskarskih ploča. IR i crvene laserske diode su uobičajene u raznim CD i DVD uređajima, a plavi i violetni laseri se koriste kod Blu-ray uređaja. Ovi laseri se također koriste u laserskoj apsorpcijskoj

spektrometriji (LSA) za praćenje plinova u atmosferi itd. Poluvodički laseri velike snage sve se više upotrebljavaju u industrijske svrhe kao što je toplinsko tretiranje, varenje raznih materijala, rezanje i površinska obrada materijala. Dosta je raširena upotreba ovih lasera za pumpanje drugih lasera većih snaga.

Aplikacije laserskih dioda mogu se kategorizirati na razne načine. Iako se u nekim primjenama one mogu zamijeniti većim solid-state kristalnim laserima, mala proizvodna cijena i masovna proizvodnja čini ih najoptimalnijim izborom za komercijalnu upotrebu. Diodni laseri mogu biti korišteni za razne svrhe budući da svjetlo ima mnogo različitih svojstava (snaga, valna duljina emitiranja, spektralna čistoća, optičke karakteristike snopa, polarizacija itd.).

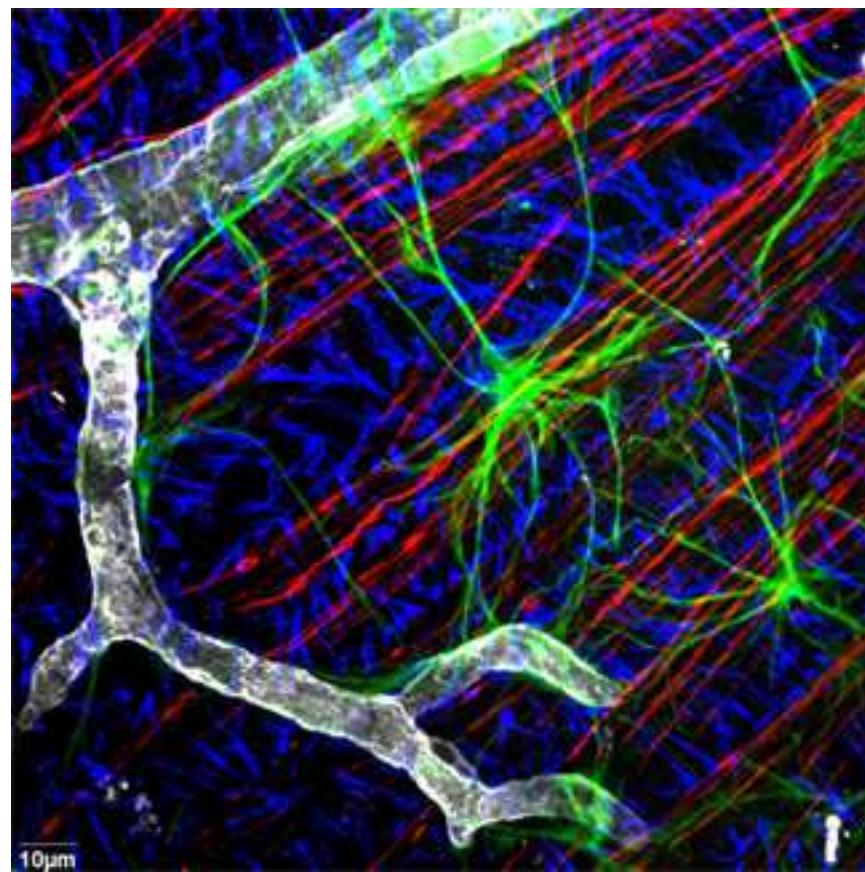
Mnoge aplikacije poluvodičkih lasera imaju korist od same snage i energije snopa. Tu spadaju laserski printeri, „bar-code“ čitači, skeneri, razni iluminatori i dizajnatori, optički zapis podataka, razni tipovi kirurgija u medicini, industrijska obrada itd.

Aplikacije koje koriste koherentnu prirodu diodnih lasera su interferometrijsko mjerjenje udaljenosti, holografija, koherentne komunikacije i koherentna kontrola kemijskih reakcija.

Primjene kao što su modulacija signala u telekomunikacijama, spektroskopski senzori, mjerjenje udaljenosti, generacija radio-frekvencija u terahercnom području, konstrukcija atomskih satova, kvantna kriptografija, razni frekvencijski množitelji i konverteri itd. baziraju se na spektralnoj čistoći lasera.

Sada ćemo dati prikaz standardnih valnih duljina diodnih lasera i njihovu primjenu.

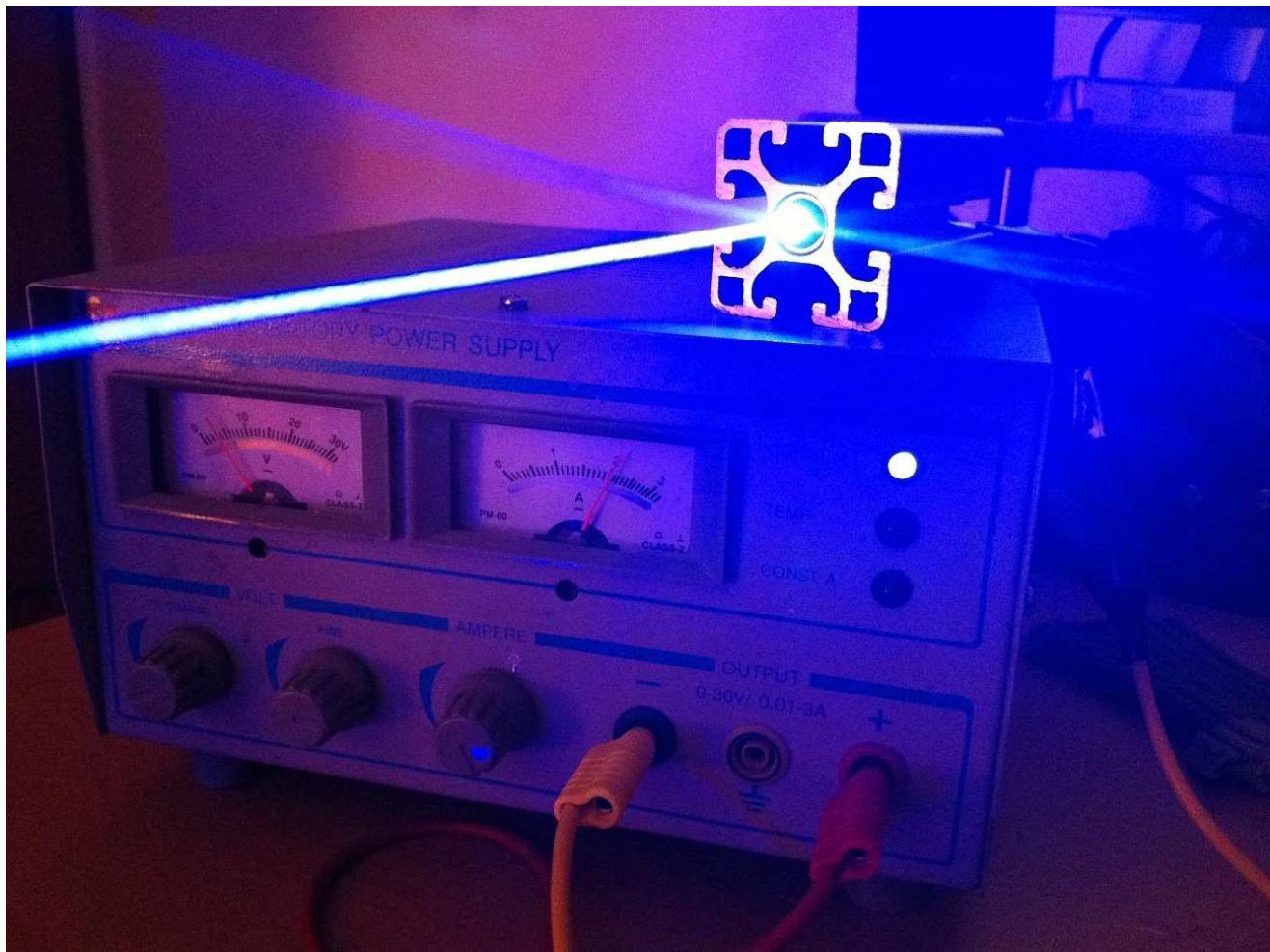
- **375 nm** – InGaN, pobuđenje fluorescentnih otopina u fluorescentnoj mikroskopiji
- **405 nm** – InGaN, plavo-violetni laser u Blue-ray uređajima
- **445 nm** – InGaN, duboko plavi multimodni laser ugrađen u novu generaciju zidnih projektorâ
- **473 nm** – svjetlo plavi laserski pokazivači, DPSS sistem
- **485 nm** – pobuđivanje GFP (green fluorescent protein) i drugih fluorescentnih bojila
- **510 nm** – zelena dioda za laserske projektoare
- **532 nm** – AlGaAs zeleni laserski pokazivači, frekvencijski duplirani od 1064 nm, DPSS
- **593 nm** – žuto – narančasti laserski pokazivači, DPSS
- **635 nm** – AlGaInP svjetlo crveni kvalitetni laserski pokazivači
- **640 nm** – crveni pokazivači velike sjajnosti, DPSS
- **657 nm** – AlGaInP DVD-RW uređaji
- **670 nm** – AlGaInP jeftini crveni laserski pokazivači
- **760 nm** – AlGaInP senzori plina: O<sub>2</sub>
- **785 nm** – GaAlAs CD-ROM uređaji
- **808 nm** – GaAlAs laserske pumpe za pumpanje solid-state lasera (npr. Nd:YAG)
- **848 nm** – laserski miš
- **980 nm** – InGaAs laserske pumpe za pumpanje Yb:YAG lasera
- **1064 nm** – AlGaAs svjetlovodne telekomunikacije
- **1310 nm** – InGaAsP svjetlovodne telekomunikacije
- **1480 nm** – InGaAsP pumpe za optičke lasere
- **1512 nm** – InGaAsP senzori plina: NH<sub>3</sub>
- **1550 nm** – InGaAsP svjetlovodne telekomunikacije
- **1625 nm** – InGaAsP svjetlovodne telekomunikacije
- **1654 nm** – InGaAsP senzori plina: CH<sub>4</sub>
- **1877 nm** – GaSbAs senzori plina: H<sub>2</sub>O
- **2004 nm** – GaSbAs senzori plina: CO<sub>2</sub>
- **2330 nm** – GaSbAs senzori plina: CO
- **2680 nm** – GaSbAs senzori plina: CO<sub>2</sub>



Slika 6.01 floresscencija biološkog tkiva pod utjecajem 405 nm violetnog laserskog mikroskopa



Slika 6.02 IR diodni laseri za svjetlovodne telekomunikacije



Slika 6.03 445 nm diodni laser snage 1W, sa aluminijskim hladnjakom

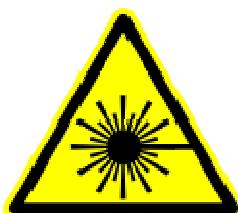
## **Sigurnost pri radu sa laserima:**

Laserska sigurnost obuhvaća dizajn, korištenje i implementaciju lasera kako bi se minimizirao rizik od ozljeda, posebno ozljeda oka. Budući da čak i mala količina laserskog svijetla može izazvati trajne ozljede oka, prodaja i korištenje lasera je podložena posebnim međunarodnim i regulativama pojedinih zemalja. Laseri srednjih i velikih snaga su potencijalno opasni zato jer mogu vrlo brzo izazvati teške ozljede na očnoj mrežnici uzrokujući trajni gubitak vida, a mogu izazvati teške opekomine na ljudskoj koži. Prema regulativama laseri su podijeljeni u klase ovisno o njihovoј snazi i valnoj duljini. Danas je prihvaćeno da čak i laseri malih snaga od nekoliko miliwati mogu biti štetni za vid bilo da je oko izloženo direktno samoj zraci ili zbog refleksije laserske svjetlosti od neke reflektirajuće površine. Valne duljine koje rožnica i očna leća dobro fokusiraju naročito su opasne i mogu izazvati ozljede u djeliću sekunde.

Po svojoj opasnosti laseri su podijeljeni u sljedeće kategorije:

- **Class 1** – ovi laseri su potpuno sigurni, ili zato što su vrlo male snage i rade na valnim duljinama koje ne izazivaju oštećenja oka ili zato što su potpuno zatvoreni u kućištu npr. CD-playeri
- **Class 1M** – kod ovih lasera također ne postoji opasnost od ozljede ukoliko laserski snop naknadno ne fokusiramo pomoću nekih optičkih leća i povećala. Ovi laseri proizvode zrake velikog dijametra i divergencije koja nije opasna ukoliko je ne fokusiramo i suzimo
- **Class 2** – ovi laseri se također smatraju sigurnima jer je efekt treptaja oka dovoljan da ograniči izljenost na maksimalno 0.25 s. Ova klasifikacija se odnosi samo na lasere koji rade u vidljivom dijelu spektra (400 – 700 nm). Snage ovakvih lasera ne smiju biti veće od 1 mW. Veliki broj laserskih pokazivača spada u ovu kategoriju.
- **Class 2M** – za ovu kategoriju refleks treptaja može sprječiti ozljedu ukoliko se ne koriste dodatne leće.
- **Class 3R** – maksimalna snaga ovih lasera ne smije prelaziti 5 mW. Direktna izloženost laserskoj zraci od nekoliko sekundi može izazvati opekomine u oku i druga oštećenja ovisno o valnoj duljini
- **Class 3B** – laseri mogu izazvati trajna oštećenja oka za manje od sekunde direktnе izloženosti. Nošenje zaštitnih naočala je obavezno pri radu s ovim laserima. Maksimalna snaga ovih lasera je 0.5 W.
- **Class 4** – laseri uključuju sve lasere snage veće od klase 3B. Mogu izazvati trajna i ozbiljna oštećena vida i bez direktnog gledanja u zraku, moguće su opeklane na koži i postoji ozbiljan rizik od požara jer ovi laseri mogu veoma brzo zapaliti razne materijale.

Ova klasifikacija se uglavnom odnosi na CW lasere. Kod pulsnih lasera situacija je mnogo složenija, energija i trajanje pulsa imaju veliku ulogu kod pulsnih lasera, npr. čak i laseri snage manje od 1mW mogu dovesti do ozbiljnih oštećenja oka ukoliko je ta snaga koncentrirana unutar nekoliko  $\mu$ s. CW IR laser valne duljine 1.4  $\mu$ m i veće smatraju se sigurnima za oči zato što molekule vode unutar oka apsorbiraju ove valne duljine i atenuiraju snagu tako da do mrežnice dođe samo mali postotak cijelokupne snage.



Slika 6.04 znak upozorenja na lasersku radijaciju

# Budućnost laserske tehnologije i zaključak

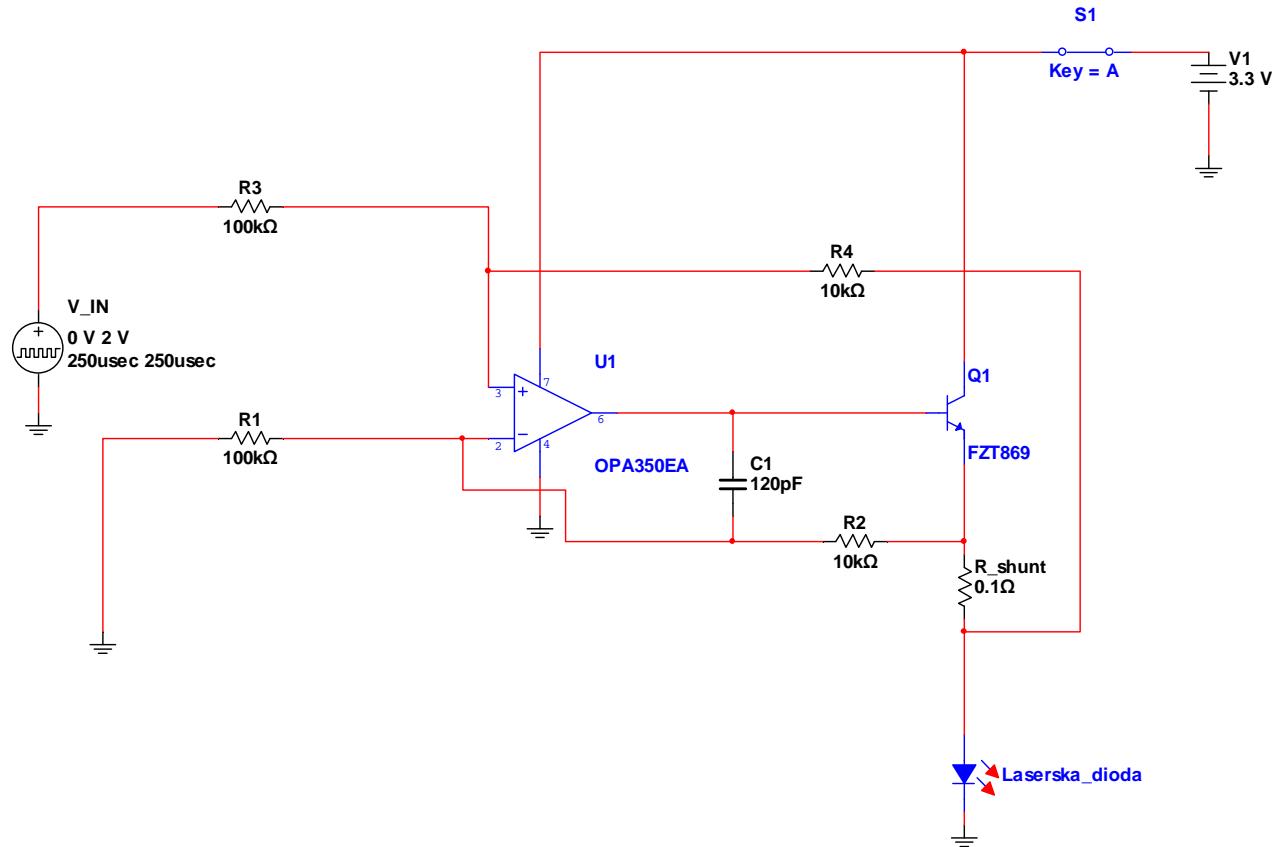
*I have had my results for a long time, but I do not yet know how I am arrive at them*

Karl Friedrich Gauss

Laseri i laserska tehnologija su napredovali jako mnogo u proteklih 40-tak godina, ali što nosi budućnost na tom polju? Postoji priča da je netko poslije izuma lasera na jednoj konferenciji rekao "upravo smo izumili koherentni i monokromatski izvor svjetla koji može generirati intenzivnu svjetlosnu zraku!", našto je netko rekao "Sjajno! I.....što da radimo s njim?" Laser je u početku smatran solucijom u potrazi za problemom. Danas se ovi uređaji mogu naći u većini kućanstava, barem u CD-playerima i računalima. Mnoge industrijske grane i proizvodni procesi, mnoga znanstvena istraživanja bila bi potpuno nezamisliva i neizvediva bez njih. Budućnost ovih uređaja je sigurno zajamčena. Laseri imaju jedinstvena svojstva koja ih čine jedinim rješenjem za mnoge tehnološke izazove narednih godina i desetljeća. Do sada smo vidjeli samo vrh ledenog brijege kod aplikacije u telekomunikacijama, optičke bežične broadbend komunikacije imaju potencijal revolucionarizirati ne samo internet nego i naš način korištenja, omogućavajući nezamislive brzine protoka podataka svakom pojedinom korisniku. Kako se minijaturizacija sve više približava nanotehnologiji, bilo da se radi o molekularnoj elektronici ili nanostrukturalnim računalima konekcije će biti sastavljene od svjetla koje samo laseri mogu omogućiti. Napredak u holografiji omogućit će pravu revoluciju u načinu prezentiranja i tehnologiji monitora i pokazivača. Polako ali sigurno sve više prelazimo iz doba elektrona u vrijeme fotona. Laseri su postali neizostavni alat u raznim granama znanosti kao što je kemija ili medicina i taj će se trend sve više povećavati. No najveći problem čovječanstva u narednim godinama neće biti računala i telekomunikacije , najveći problem bit će energija ili točnije njen nedostatak. Laseri predstavljaju ključni element u razvoju fuzijskih izvora energije, jedinih izvora koji imaju potencijal u potpunosti zamijeniti našu ovisnost o fosilnim gorivima i fizijskoj nuklearnoj energiji. U ovom radu smo se samo dotakli jako kompleksnog područja kao što su laseri, njihovi principi i njihove primjene i pokušali na jedan razumljiv način dočarati njihova svojstva i sve ono što ih čini jedinstvenima. Kakve god izgledale buduće tehnologije možemo smatrati sigurnim da će koherentna svjetlost biti njen važan, a možda i esencijalni dio.

# Dodatak I

## Simulacija drivera za poluvodičke lasere u Multisimu



Slika 7.01 shema drivera za laserske diode u multisimu

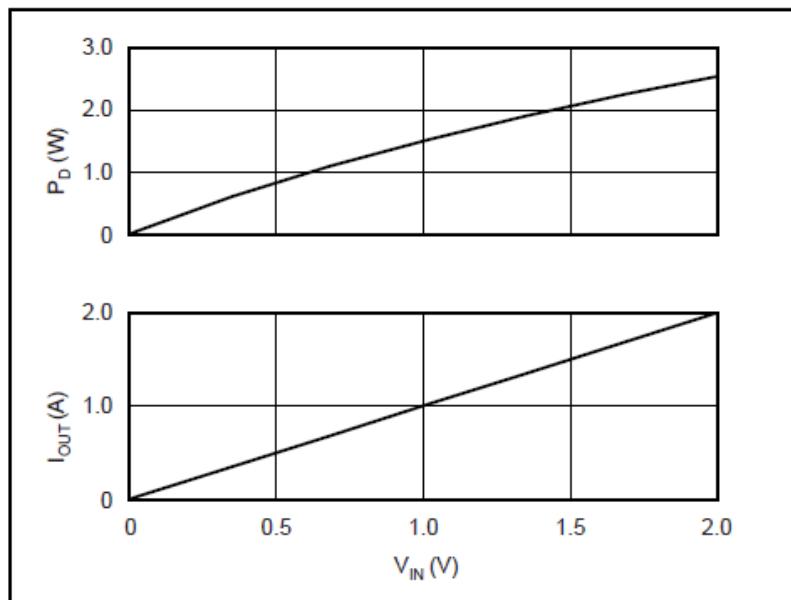
U programskom paketu Multisim napraviti ćemo simulaciju drivera koji ima svrhu osiguravati konstantnu jakost struje potrebne za rad laserske diode i stvaranje populacijske inverzije u poluvodiču. Ovaj naponski kontroliran strujni izvor služi za pumpanje poluvodičkog lasera. Laserska dioda je predstavljena u simulaciji crvenom LED diodom zato što programski paket Multisim ne podržava direktno laserske diode, ali to nema utjecaja na rad sklopa. Ovakvi jednostavnji linearni driveri predstavljaju bolje i stabilnije rješenje od prekidnih PWM (Pulse-width modulation) sklopova za kontrolu snage koji se danas često koriste u raznim uređajima. Ključne komponente ovog drivera čini pojačalo CMOS OPA350 (Texas Instruments) koje može raditi na napajanju od samo 2.5V i visokokvalitetni NPN bipolarni tranzistor FZT869 odličnih performansi kao strujno pojačalo (moguće su konstantne kolektorske struje od 7 A i vršne struje od 20 A) u SOT-223 pakiranju prilagođenom za disipaciju temperature. Izlazna struja se kontrolira ulaznim naponom V\_IN koji može biti iz analognog naponskog izvora ili sa naponskog izlaza DAC-a (digitalno-analognog konvertera). Pomoću otpornika skalarni

faktor je namješten tako da 1V na ulazu daje 1A na izlazu. Skalarni faktor V\_IN/I\_OUT može biti podešen na druge vrijednosti mijenjajući odgovarajuće otpornike po relaciji.

$$\frac{V_{IN}}{I_{OUT}} = \frac{R3}{R4} * R_{SHUNT}$$

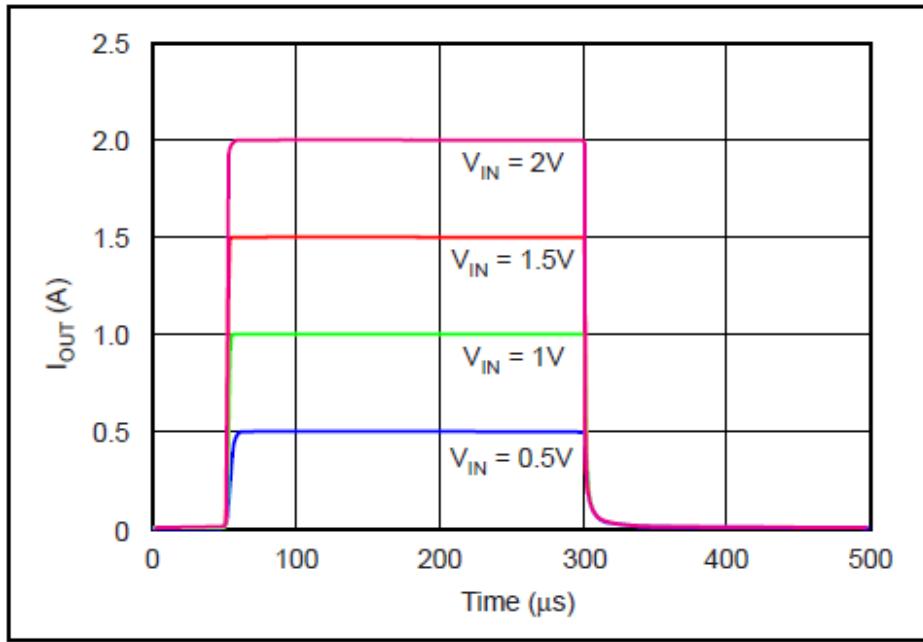
R1=R3 i R2=R4

Kao V\_IN služi nam pulsni izvor napona od 0 do 2V.



Slika 7.02 gornji dijagram prikazuje disipaciju snage tranzistora Q1, a donji pokazuje ovisnost izlazne struje o ulaznom naponu pri naponu napajanja od 3.3V

Iz dijagrama disipacije snage vidimo da tranzistor Q1 disipira samo 1.5W za izlaznu struju kolektora od 1A pri naponu napajanja od 3.3V, što je unutar mogućnosti SOT-223 kućišta da disipira tu toplinu.



Slika 7.03 odziv izlazne struje  $I_{OUT}$  za tranzitne napone na ulazu  $V_{IN}$

Uočavamo da ukoliko ulazni napon povećavamo stepenasto od 0.5V do 2V odziv struje na izlazu je gotovo trenutačan i na rastućem i na padajućem rubu.

Promjenom „shunt“ otpornika ili faktora skaliranja potrebno je promijeniti i kompenzacijski kondenzator C1. Tranzistor Q1 ima betu preko 300 i pojačalo OPA350 može omogućiti velike kolektorske struje koje dovodimo na lasersku diodu koja je u ovom našem slučaju ograničena na 2A. Ovakva vrsta strujnog kontrolera vrlo je pogodna za stabilan i siguran rad poluvodičkih lasera.

# Dodatak II

## Simulacija UV laserske diode u SiLENSe programskom paketu

### 1. Uvod:

Potražnja za UV laserskim diodama (LD) uvelike je porasla zadnjih godina zbog Blue-ray optičkih uređaja velike gustoće zapisa podataka, visokorezolucijskih printer, spektroskopije i procesuiranja materijala i sl. Zbog tehnoloških razloga LD heterostrukture su asimetrične, tj. P-sloj je tanji od N-sloja. Zajedno sa varijacijama indeksa refleksije to rezultira optičkim ograničenjima koje utječu na struju praga laserske diode. Dodatni problem stvara curenje elektrona u P-sloju heterostrukture što postaje nezanemarivo na velikim gustoćama struje koje su tipične za rad ovakvih lasera.

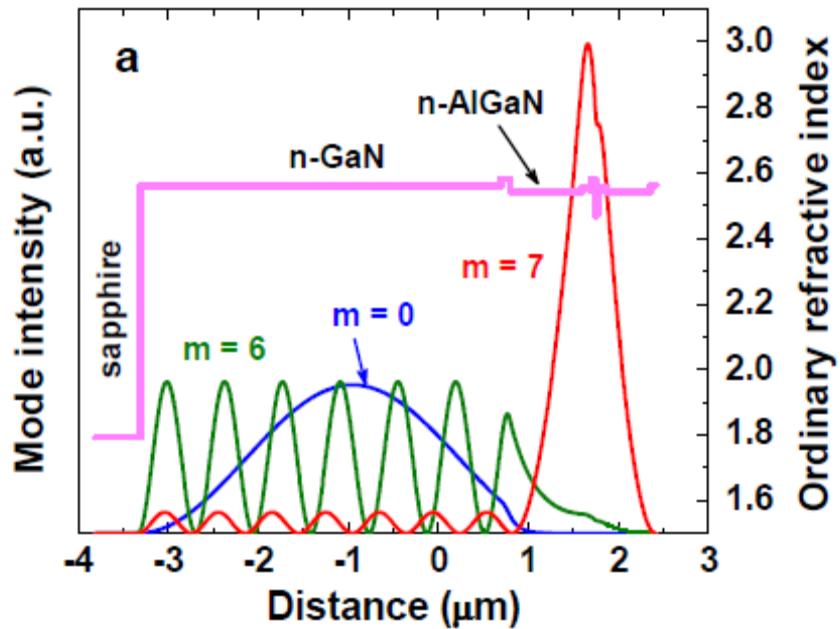
### 2. Struktura laserske diode:

LD struktura je uzgojena na safirnoj podlozi i njen aktivni dio se sastoji od pet 3.5 nanometarskih InGaN kvantnih bunara, „quantum wells“ (QW) razdvojenih sa 7 nm InAlGaN barijerama. Ovakve laserske diode sadrže vrlo velike trostrukve varijacije struje praga unatoč ekstremno niskom postotku InN u QW aktivnom mediju. Simulacija rada laserske diode izvedena je u programu SiLENSe uzimajući u obzir transport nosioca u heterostrukturi i propagiranje EM valova. Modelirani su TE i TM modovi rada (TE-mod „Transverse Electric“ mod bez električnog polja u smjeru zračenja, TM-mod, „Transverse Magnetic“ mod bez magnetskog polja u smjeru zračenja).

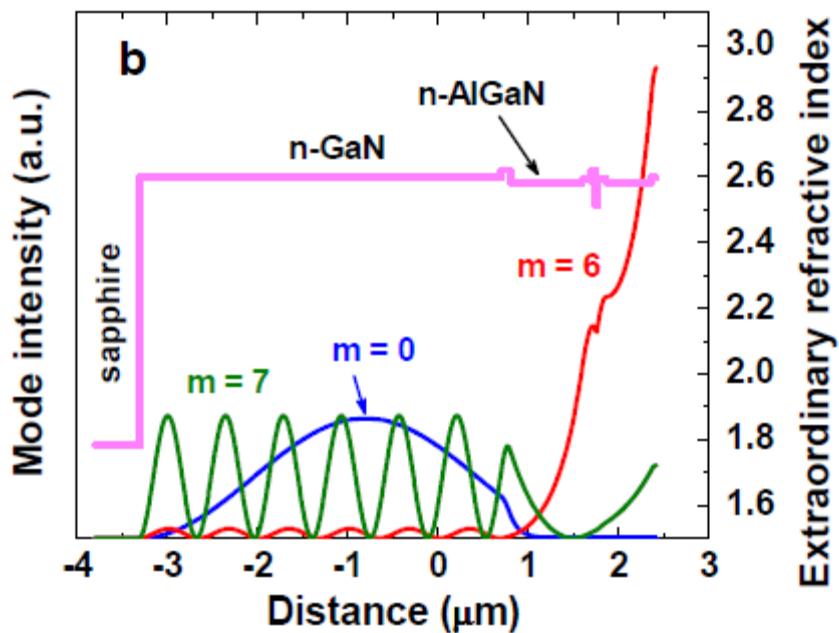
Da bi uzeli u obzir široki opseg spektralne disperzije optičkih svojstava materijala korištena je sljedeća aproksimacija:

$$\epsilon(E) = \epsilon_{\infty} + A \frac{i\Gamma E}{(E_g - i\Gamma)(E - E_g + i\Gamma)} + B \frac{E_1^2}{E_1^2 - E^2 - i\gamma E}$$

Gdje je E energija fotona, Eg je poluvodička barijera, E1 je energija koja odgovara glavnom vrhu u karakteristikama gustoće optičkih stanja,  $\epsilon_{\infty}$  je dielektrična konstanta, koeficijenti A, B,  $\gamma$  i  $\Gamma$  su empirijski unijeti u podatke i opisuju dielektrične funkcije GaN, AlN i InN poluvodičkih legura.

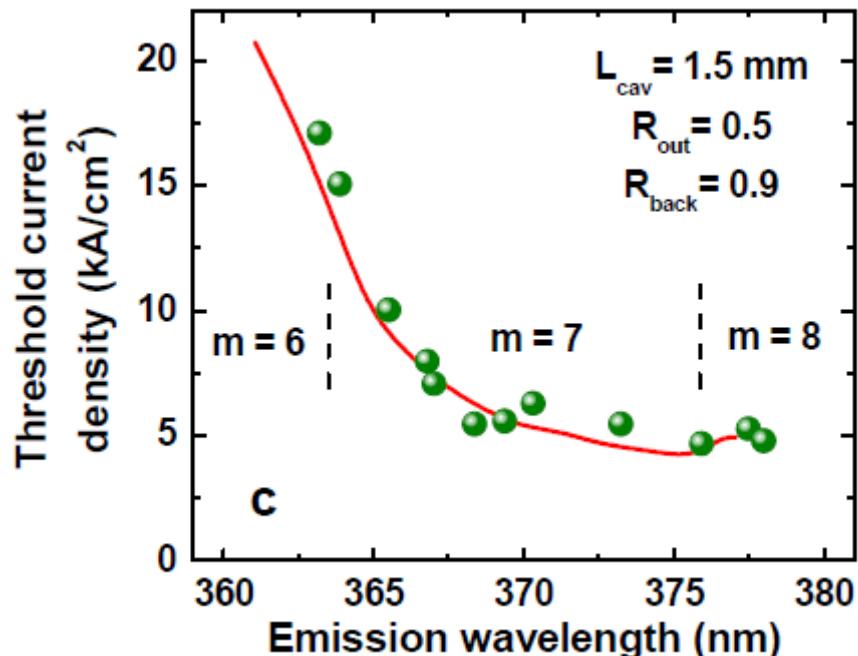


Slika 8.01 distribucija intenziteta TE-moda na 370nm



Slika 8.02 distribucija intenziteta TM-moda na 370nm

Ova simulacija pokazuje više od stotinu lateralnih valovodnih modova može postojati u LD heterostrukturi. Zbog strukturalne asimetrije i malih varijacija indeksa refrakcije u rezonatoru većina modova je lokalizirana ili prodire duboko u N-GaN kontaktni sloj. Samo TE-mod sedmog reda ( $m=7$ ) ima maksimalni optički faktor ograničenja (OCF) na emisijskoj valnoj duljini od 370 nm. Ovaj mod nije kompletno zatvoren u rezonatoru nego oscilira u kontaktnom sloju. Neki TM-modovi mogu biti lokalizirani u metalnoj elektrodi na vrhu heterostrukture zbog specifičnih uvjeta na granici između metala i poluvodiča. Također povećanje udjela InN u QW strukturi sa 0.2% na 2.7% rezultira prebacivanjem lateralnih TE-modova što dovodi do velike varijacije OCF faktora sa 1.1% na 2.3%. što utječe na struju praga LD heterostrukture. TM-modovi imaju manji OCF faktor i nedostigu prag oscilacija. OCF određenog moda može biti optimiziran za odgovarajuću valnu duljinu podešavanjem debljine kontaktnog sloja.



Slika 8.03 gustoće struje praga po emisijskim valnim duljinama, zelene kuglice su izmjereni podaci, a crvena linija je simulacijski model, isprekidane crtice označavaju valne duljine gdje različiti TE-modovi dostižu maksimalni OCF.

### 3. Zaključak:

Ovdje smo promatrali performanse UV (370nm) laserskih dioda. Modeliranje elektromagnetskog polja predviđa postojanje mnogih lateralnih modova od kojih je većina zatvorena između safirne podloge i metalne P-elektrode, tako da se ne nalaze u rezonatoru heterostrukture. Zbog ovoga OCF moda koji prvi dostiže prag postaje osjetljiv na varijacije emisijske valne duljine, ali može biti optimiziran podešavanjem debljine n-GaN kontaktnog sloja koji je prvi uzgojen na podlozi. Curenje elektrona i spektralna ovisnost OCF-a su glavni faktori koji utječu na iznos struje praga. Dobro slaganje između teoretskih predviđanja i mjerena koje vidimo iz slike 8.03 kazuju nam da je simulacija efektivni alat u optimizaciji LD heterostrukture.

## Izvori:

### Web:

<http://www.rp-photonics.com/categories.html>  
<http://www.repairfaq.org/sam/laserfaq.htm#faqtoc>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)  
<http://www.vectorsite.net/tpqm.html>  
<http://www.str-soft.com/products/SiLENSe/>  
<http://www.attoworld.de/>  
<http://www.ilxlightwave.com/navpgs/app-tech-notes-white-papers.html>

### Publikacije:

„Laseri u znanosti i tehnologiji“ – Ticijana Ban, Institut za fiziku, Zagreb ožujak 2008

„Optoelectronics circuit collection“ – Neil Albaugh, application report Texas Instruments. Septembar 2001

„Effects of electron and optical confinement on performance of UV laser diodes“ – Bulashevich, Ramm, Karpov, St.Petersburg, Russia 2008

### Knjige:

„Semiconductor Disk Lasers“ - Oleg G. Okhotnikov, septembar 2009

„Optical Coherence and Quantum Optics“ - Mandel L. , Wolf E. 1995