



Lasери u modernoj znanosti i tehnologiji

Damir Aumiler
Institut za fiziku, Zagreb

Uvod

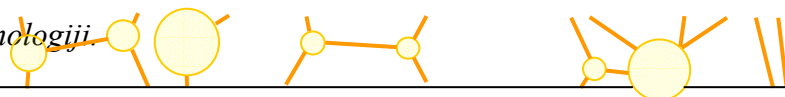
Otkriće lasera 1960. g. započelo je revoluciju kako u znanosti tako i u području tehnologije i znanstvene primjene. Danas, 45 godina kasnije, gotovo je nemoguće pronaći područje znanosti u kojem laser nije pronašao svoju ulogu. Laseri i laserska tehnologija postali su zasebno područje znanosti. Neke znanstvene grane, kao spektroskopija na primjer, otkrićem lasera doživjele su ponovni procvat. Kao koherentni monokromatski izvori svjetlosti, laseri predstavljaju svjetlosne izvore velike spektralne gustoće energije koja mnogostruko nadmašuje druge nekoherentne izvore. Stoga su postali nenadoknadivo znanstveno sredstvo u istraživanjima strukture atoma i molekula. Time su bitno pridonijeli razvoju atomske i molekulske fizike, koja je danas nezamisliva bez lasera, te kemije, molekularne biologije...

No znanost nije jedina profitirala otkrićem lasera. Kako su se razvijali novi tipovi lasera, a danas ih je gotovo i teško sve nabrojati, tako su se otkrivale i nove mogućnosti primjene. Od industrije, gdje se laser pokazao kao savršen alat za rezanje i bušenje, preko medicine (kirurgije, oftalmologije, dermatologije, estetske kirurgije), telekomunikacija, informatičke industrije, vojne industrije, zabavne industrije, itd. Laserom se danas podjednako uspješno reže metal, vrše korekcije oka, vode munje, čitaju CD-i i DVD-i, navode rakete, hlade atomi, ili jednostavno uklanjaju neželjene dlake s kože. U isto vrijeme dok se razvijaju laserski sistemi za istraživanje fuzije veličine tvornice, možemo se jednostavno uputiti do placa i kupiti laserski pointer za 10-tak kuna. Što je slijedeće – svjetlosne sablje iz Ratova zvijezda?!

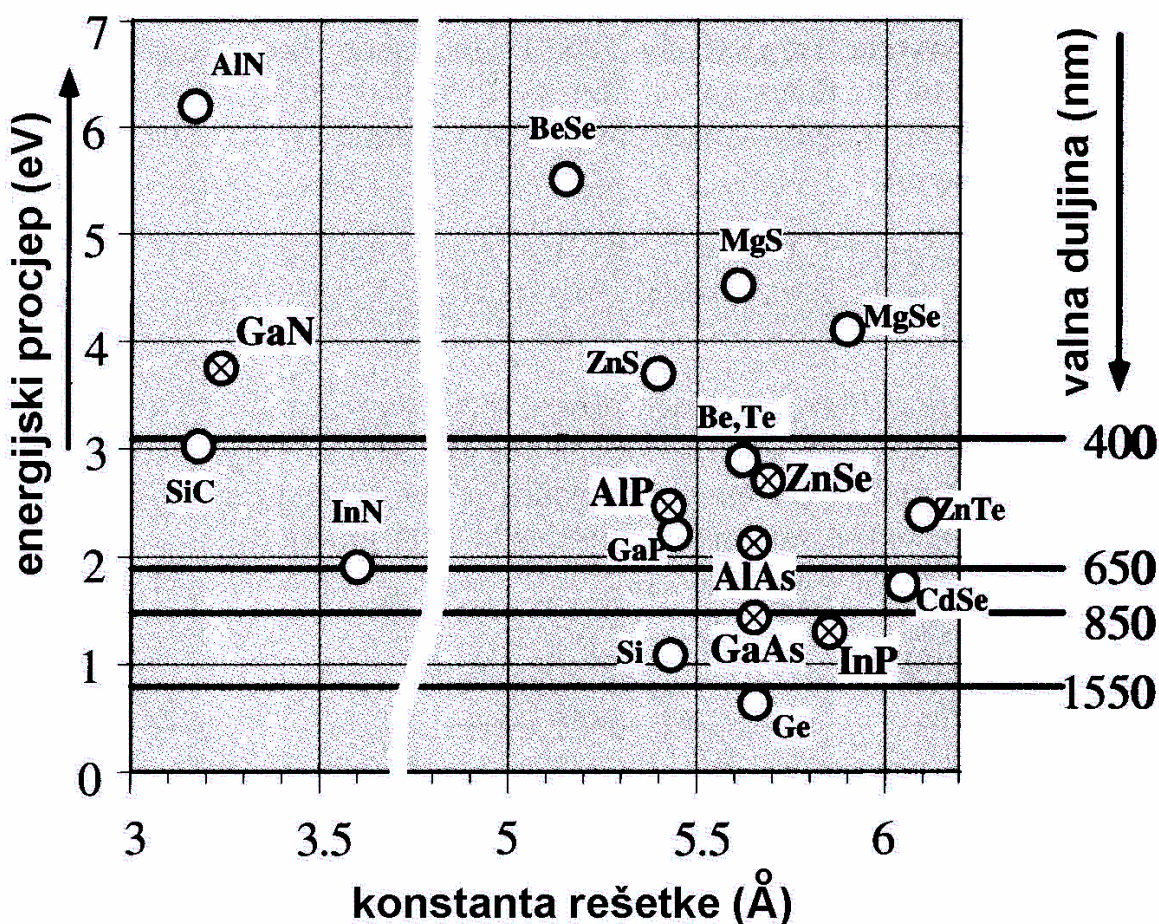
U ovom kratkom osvrtu koncentrirat ćemo se na dva gotovo oprečna tipa lasera. S jedne strane to su poluvodički laseri – najšire primijenjeni tip lasera u svakodnevnom životu. To su laseri uglavnom male snage i izrazito visoke spektralne razlučivosti. S druge strane, bit će govora o femtosekundnim laserskim sistemima koji generiraju najkraće i najsnažnije pulseve svjetlosti.

Poluvodički laseri

Iako prvi poluvodički laseri datiraju još iz '60-tih godina, trebalo je više od 20 godina da poluvodički laseri postanu komercijalan proizvod. Prve laserske diode funkcionirale su samo na kriogenim temperaturama. Danas su laserske diode jedan od najvažnijih opto-elektroničkih uređaja jer omogućuju direktnu transformaciju električne struje u koherentnu svjetlost.

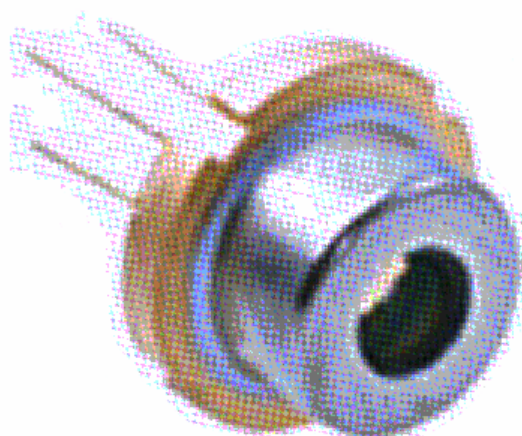
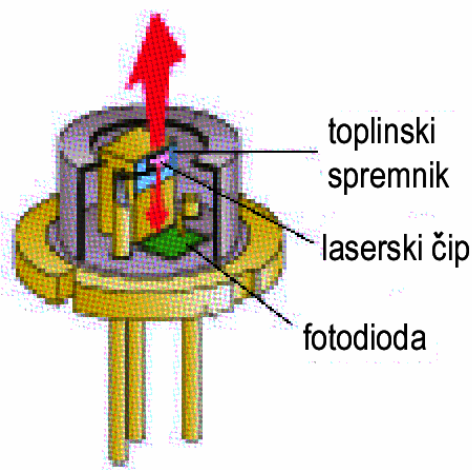


Srce svake laserske diode je spoj p- i n-dopiranog poluvodičkog materijala, na kojem dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina pri čemu se emitira svjetlost. Valna duljina emitirane svjetlosti određena je energijskim procjepom između valentne i vodljive vrpce. Na slici 1. prikazana su svojstva važnijih opto-elektroničkih poluvodiča kao funkcija konstante rešetke, koja je bitna za proizvodnju kristala. Činjenica da su konstante rešetke GaAs i AlAs pokazala se vrlo bitnom jer se energijski procjep (a time i valna duljina svjetlosti) može kontrolirati u širokom rasponu pomoću omjera miješanja x u $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{As}$ kristalima. InGaAsP kristal je također značajan zbog valne duljine $1.55\ \mu\text{m}$ koja se koristi u optičkim komunikacijama. Zanimljivo je da silicij, ekonomski najvažniji poluvodički materijal, nema bitnu ulogu u proizvodnji laserskih dioda.



Slika 4-1: Energijski procjep nekih važnijih poluvodičkih materijala. Materijali za koje je postignut laserski efekt označeni su križićem [1].

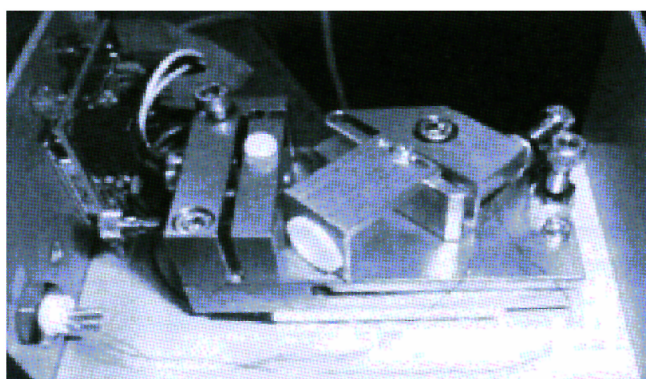
Kao zanimljivost treba navesti 1996. g. koja je ušla u povijest industrije poluvodičkih dioda. Naime, te je godine Shuji Nakamura predstavio svijetu prvu plavu lasersku diodu. Već dugo je postojao komercijalni interes za plavu svjetlost, jer se bez nje nije moglo proizvesti ekrane u boji bazirane na poluvodičima. Širom svijeta velika su sredstva uložena u istraživanje ZnSe, za koji se smatralo da ima najveće šanse za uspjeh. No Shuji Nakamura napravio je prvu plavu lasersku diodu na bazi GaN, koji se dotad smatrao potpuno neprikladnim! Svim znanstvenim predviđanjima unatoč, plave laserske diode postale su tržišno dostupne.



Slika 4-2: Laserska dioda

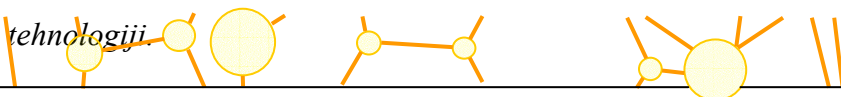
Najčešća upotreba laserskih dioda je u CD i DVD uređajima. Koriste se diode valne duljine oko 780 nm (CD) i 650 nm (DVD), snage od nekoliko mW do preko 100 mW. Laserske diode koriste se i u printerima, "bar code" čitačima, laserskim pointerima, optičkim komunikacijama, itd.

Diodni laseri u znanstvenoj primjeni koriste činjenicu da im je valna duljina samo okvirno definirana energijskim procjepom poluvodičkog elementa. U praksi se valna duljina može mijenjati unutar oko 10 nm i to promjenom temperature i struje kroz diodu. Prednost laserskih dioda je u njihovoj maloj spektralnoj širini koja je unutar 100 MHz (oko 0.0001 nm). Spektralne karakteristike dodatno su poboljšane u diodnim laserima s vanjskim rezonatorom. Vanjski rezonator uspostavlja se optičkom povratnom vezom između površine laserske diode i holografske optičke rešetke, čime se postižu spektralne širine reda 1 MHz (oko 0.000001 nm).

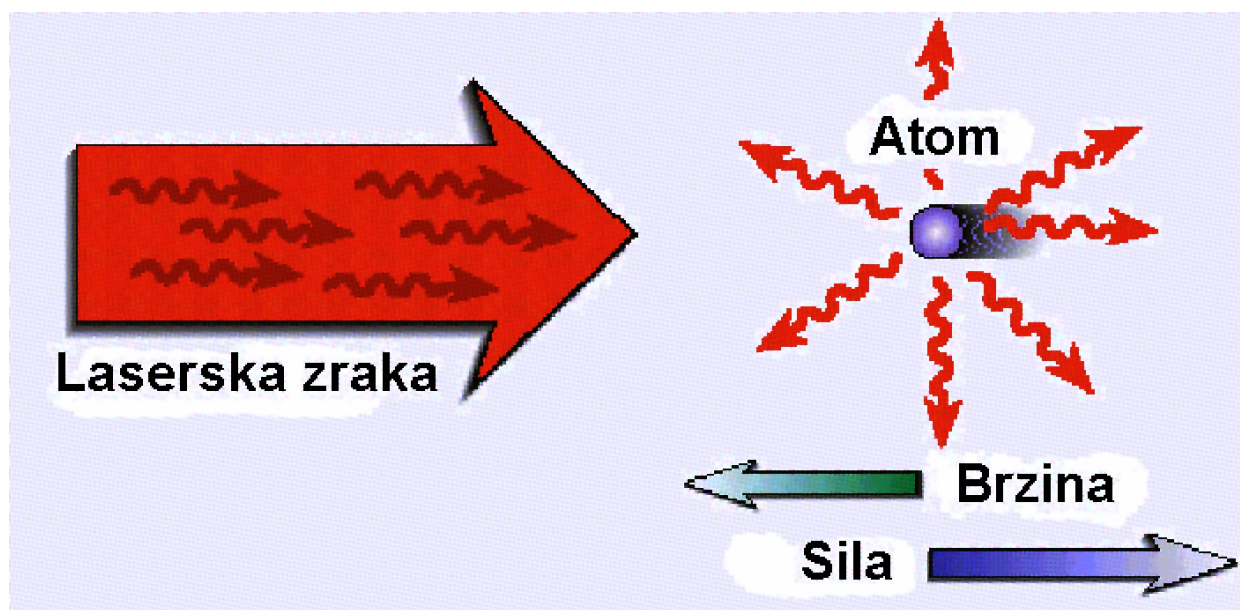


Slika 4-3: Diodni laser s vanjskim rezonatorom

Diodni laseri s vanjskim rezonatorom vrlo se uspješno koriste za lasersko hlađenje atoma. Naime, ugodu li se valna duljina lasera u crveno krilo atomske linije, svjetlost će apsorbirati samo oni atomi koji se gibaju prema laseru. To je posljedica Dopplerovog efekta, odnosno činjenice da atomi koji se gibaju prema laseru "vide" svjetlost lasera s plavim pomakom (pa jako apsorbiraju), dok atomi koji se gibaju od



lasera vide svjetlost lasera s crvenim pomakom (ne apsorbiraju svjetlost lasera). Apsorpcijom se atomi usporavaju (hlade), pa ako se ukrsti 6 takvih laserskih zraka u njihovom presjecištu može se postići da se atomi gotovo potpuno zaustave. Temperatura takvih atoma manja je od 1 K, odnosno bliska je apsolutnoj nuli! Uključivanjem magnetskog polja atomi se tada mogu zarobiti u tzv. magneto-optičke stupice ili dodatno hladiti tehnikom evaporativnog hlađenja. Na taj način postignute su temperature niže od 0.0000001 stupnja iznad apsolutne nule, što je rezultiralo otkrićem novog stanja materije – Bose-Einsteinovog kondenzata, za što su Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle i Carl E. Wieman dobili Nobelovu nagradu za fiziku 2001. godine [2].



Slika 4-4: Lasersko hlađenje atoma

Femtosekundni laseri

Ubrzo nakon otkrića lasera razvijene su i metode korištenja lasera za dobivanje laserskih pulseva svjetlosti. Još u '60-tim godinama razvijene su i obilato korištene i primijenjene tehnike generacije mikrosekundnih ($1 \mu\text{s} = 0.000001 \text{ s}$) i nanosekundnih ($1 \text{ ns} = 0.000000001 \text{ s}$) laserskih pulseva. Razvoj laserske fizike u '70-tim donio je proboj u pikosekundno ($1 \text{ ps} = 0.000000000001 \text{ s}$) područje, a posljednja dva desetljeća obilježila je pojava femtosekundnih ($1 \text{ fs} = 0.000000000000001 \text{ s}$) laserskih sistema. Primjena femtosekundnih laserskih pulseva dovela je posljednjih godina i do utemeljenja novog područja znanosti – attosekundne fizike ($1 \text{ as} = 0.000000000000000001 \text{ s}$) [3]. Otkud toliki interes i napor da se razviju tehnike za stvaranje sve kraćih i kraćih pulseva laserske svjetlosti?

Odgovor leži u mogućnosti promatranja i kontrole prirodnih procesa na ekstremno malim vremenskim skalama. Odnos jedne fs naprema jednoj sekundi je otprilike kao odnos pet minuta naprema starosti Zemlje! Za vrijeme jedne fs svjetlost

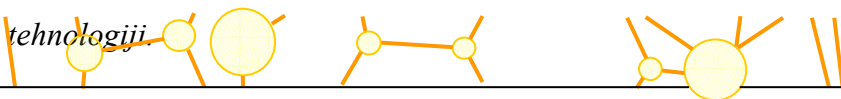


prevaleći udaljenost od nekoliko stotina nanometara, a femtosekundni laserski pulsevi su toliko kratki da ih ničime drugim ne možemo izmjeriti nego njima samima! Teško da nešto toliko kratko možemo iskoristiti u svakodnevnom životu, no fs vremenska skala je vrlo bitna u mikrosvijetu. Razni fundamentalni procesi u atomima i molekulama, kao i njihove međusobne interakcije, dešavaju se na vremenskoj skali manjoj od 1 ps. A upravo su ti procesi osnova i polazište za razumijevanje većine makroskopskih procesa ne samo u fizici, već i u kemiji i biologiji. Uzmimo molekule kao primjer: ovisno o potencijalima i masama atoma koji ih sačinjavaju, periodi molekulskih vibracija i rotacija spadaju u ps i fs područje. Kemijske reakcije također su primjer ultrabrze dinamike u svijetu molekula, za što je 1999. g. Ahmed H. Zewail dobio Nobelovu nagradu za kemiju "jer je pokazao da je moguće pomoću ultrabrze laserske tehnike vidjeti kako se atomi u molekuli gibaju za vrijeme kemijskih reakcija" [4].



Slika 4-5: Fotografija samoinduciranog svjetlosnog filameta u zraku nastalog infra-crvenim (800 nm) fs pulsom velike snage [5].

Osim vremenske razlučivosti, važnost femtosekundnih lasera leži i u mogućnosti postizanja vrlo velikih laserskih snaga. Tako primjerice puls energije 1 mJ trajanja 50 fs ima vršnu snagu po pulsu od 20 GW. Fokusanjem takvih pulseva u točku površine $100 \mu\text{m}^2$ postiže se intenzitet od $20 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, što odgovara jakosti električnog polja od 3 GV/cm (tipične jakosti električnog polja unutar atoma su reda 1 GV/cm). Također, razvijene su i metode koje omogućuju propagaciju ultrakratkih



pulseva na velikim udaljenostima bez distorzija, što otvara primjenu u prijenosu informacija, ali i omogućuje istraživanje Zemljine atmosfere. Naime, propagacijom fs pulseva velike snage (TW) kroz zrak dolazi do promjene indeksa loma zraka, što dovodi do samofokusiranja laserske zrake. Taj efekt (Kerr efekt) uravnotežuje difrakcija zbog ionizacije zraka. Kao rezultat nastaje filament svjetlosti, koji se ponekad naziva i "svjetlosni metak".

Literatura

- [1] Dieter Meschede: *Optics, Light and Lasers*, Wiley-Vch, Weinheim (2004).
- [2] W. Ketterle: *When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser*, Les Prix Nobel 2001, The Nobel Foundation, Stockholm (2002), Rev. Mod. Phys. **74**, 1131-1151 (2002).
- [3] Papadogiannis *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 4289 (1999).
- [4] Ahmed Zewail: *Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond Using Ultrafast Lasers*, Nobel Lectures, Chemistry 1996-2000, World Scientific Publishing Co., Singapur (2003).
- [5] projekt *Teramobile*, www.teramobile.org