

**50 godina lasera -  
otkriće koje je promijenilo  
znanost, ali i svijet**



**Nataša Vujić**

**Zagreb 2010.**

Ove godine slavimo 50 godina od otkrića lasera, uređaja bez kojeg bi svijet kojeg poznajemo bio nezamisliv. Svaki put kada gledate vaš omiljeni film na DVD-u, igrate igrice na *Playstation-u*, spajate se na internet da bi „surfali“ ili čekate na blagajni u supermarketu, niste ni svjesni da je vaš život dotaknuo laser. Ono što se još prije pedeset godina nije moglo ni naslutiti, sada je postala naša realnost, svakodnevnica koju možemo zahvaliti otkriću lasera.

Otkriće prvog lasera, znanstvenici su opisali kao 'rješenje koje traži problem'. Kada je dugogodišnji napor znanstvenika da proizvedu intenzivnu zraku svjetlosti, uskog spektra točno određene valne duljine konačno urodio plodom, rješenje je ubrzo predstavljeno znanstvenoj i široj javnosti. To novo otkriće vrlo brzo je našlo svoje mjesto u znanstvenim laboratorijima, tehnološkim i medicinskim centrima, gdje su znanstvenici i inženjeri našli načina da pomoću laserske svjetlosti rasvijetle i razjasne niz drugih nepoznanica. Svoju važnu poziciju u znanosti i tehnologiji laser je sačuvao do današnjih dana. Otkriće lasera pripisuje se Theodoru Maimanu (Slika 1), kojem je uspjelo proizvesti prvu lasersku zraku u Hughes Research Laboratoriju u Kaliforniji, 16. svibnja 1960. godine. T. Maiman je pomoću bljeskalice obasjavao crveni kristal rubina, čije su plohe bile posrebrene i čime je izazvao lasersku emisiju u crvenom dijelu spektra na 694 nm. Na taj način, objedinio je u svom uređaju (Slika 2) osnovna tri elementa koji su potrebna da bi došlo do stvaranja laserske emisije: aktivni medij



*Slika 1. Theodore Maiman gleda u kristal rubina, koji je postao centralni dio njegovog budućeg lasera.  
Preuzeto: PhysicsWorld*



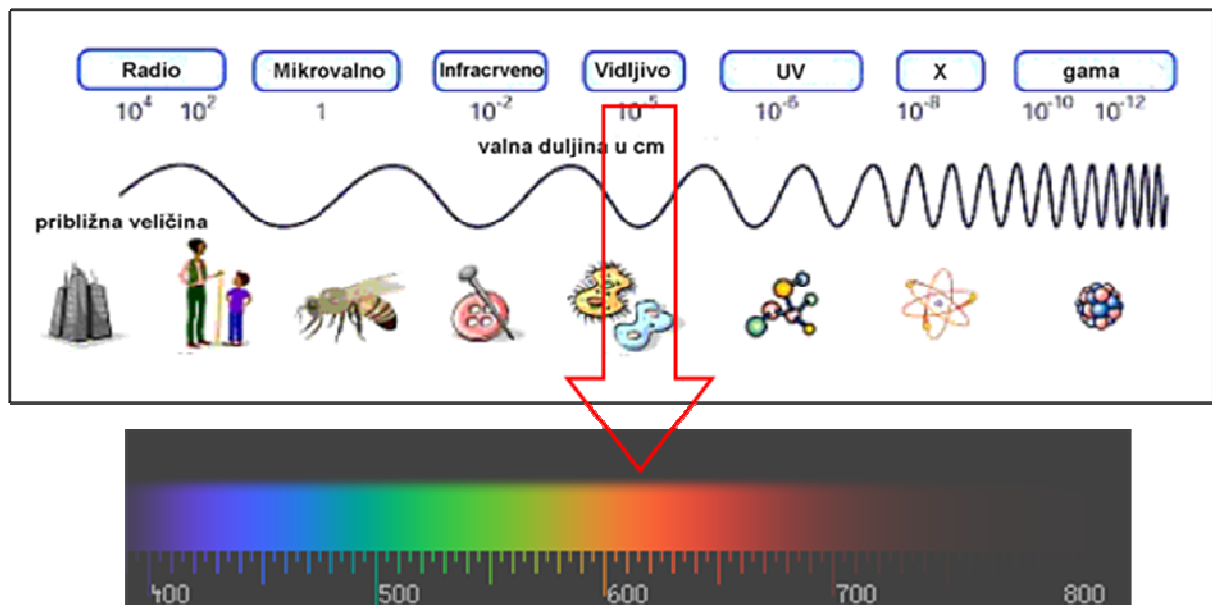
*Slika 2. Maimanov laser  
Izvor: Izložba Fifty Years of Lasers, National  
Museum of American History, Washington, DC*

(rubinski kristal), rezonatorsku šupljinu s dva rubna zrcala (posrebrene plohe kristala) u kojoj se odvija laserska emisija i lasersku pumpu (bljeskalica) koja daje energiju koja pokreće sam laserski efekt. T. Maiman, tada tridesetdvoгодиšnjak, nije mogao ni naslutiti da će njegov izum postati tako važan istraživački instrument, ali i uređaj koji će se duboko usaditi u ljudsku svakodnevicu. Zapravo, možemo reći da je laser postao jedan od najpoznatijih i najpriznatijih izuma fizike. Laserima možemo hladiti atome, slati informacije, korigirati vid, izoštravati astronomske slike dalekog svemira, testirati jednu jedinu molekulu DNA, dobivati čistu energiju fuzijom. Koliko je važno otkriće lasera, govori podatak da je u proteklih 50 godina čak 14 Nobelovih nagrada iz područja prirodnih znanosti podijeljeno za ona znanstvena otkrića koja su direktno povezana uz lasere! Osim fascinantnog i nezanemarivog utjecaja lasera na znanost, laseri i popratne industrije i tehnologije važna su gospodarska grana, čija se vrijednost mjeri u trilijunima dolara (trilijun =1000 milijardi). Najznačajniji utjecaj laseri imaju u telekomunikacijskoj industriji (4 trilijuna), biotehnologiji i zdravstvu (2.5 trilijuna) te u prijevozu (1 trilijun). Američka nacionalna akademija za inženjerstvo prepoznala je kombinaciju lasera i optičkih vlakana, koja je revolucionalizirala komunikacije, kao jedan od dvadeset najvažnijih inženjerskih dosega 20. Stoljeća.

T. Maiman nije gubio vrijeme, pa je svoje otkriće htio objaviti u časopisu *Physical Review Letters*, ali su ga urednici časopisa odbili, s obrazloženjem da su već ionako zatrpani s mnoštvom znanstvenih članaka o maserima, koje možemo smatrati pretečama lasera. Takva reakcija uredništva ovog, i danas uglednog časopisa, samo pokazuje da, ponekad, veliki izumi nailaze na nerazumijevanje i neprepoznavanje znanstvene sredine. Sam Maiman se nije dao pokolebati, te je svoj rad poslao u još selektivniji časopis *Nature*, koji je prihvatio članak i objavio ga 6. kolovoza iste godine pod naslovom *Stimulated optical radiation in ruby*. U tom radu Maiman nigdje ne spominje da je uistinu vidio crvenu usku zraku laserskog zračenja, jer uređaj svojom izvedbom to i ne omogućava, ali izvještava o svjetlosti čiji je spektar analizirao i pritom opazio začuđujuće uzak raspon frekvencija. Takvo otkriće-pojavu uskog spektra u vidljivom području predvidjeli su nešto ranije u teorijskom radu Ch.H.Townes i A. Schawlov, a isti efekt uočen je ranije u maserima, u mikrovalnom području. Maimanov suvremenik i konkurent Ch. Townes se u svom popularnom članku *The first laser* koji je izašao u sklopu izdanja *A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World* osvrće na Maimanovo otkriće i njegovu publikaciju u *Nature*-u riječima: *'Maimanov članak je toliko kratak, s toliko snažnih implikacija da vjerujem da se može smatrati jednim od najjezgrovitijih predivnih radova u Nature-u objavljenih u proteklom stoljeću'*. Nedugo nakon prve publikacije o laserskom zračenju, znanstvenici Maimanove grupe u Hughes Research Laboratories i znanstvenici iz

Bell Laboratories u New Jerseyu mogli su svjedočiti i diviti se crvenoj laserskoj svjetlosti koja je obasjavala zidove njihovih laboratorija. Laserska svjetlost kakvu danas poznajemo bila je rođena!

Laser je akronim od engleskih riječi *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, što u prijevodu znači: pojačavanje svjetlosti kroz potaknuto odašiljanje (emitiranje) zračenja. Naziv laser predložio je G. Gould još 1959. u svom konferencijskom radu *The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, s namjerom da se na sufiks *aser* dodaje prikladan prefiks, ovisno o uređaju koji bi zračio elektromagnetske valove u određenom dijelu spektra. Posjetimo se, u to vrijeme su već postojali maseri koji su radili u mikrovalnom području. Ukoliko bi se isti efekt opazio u području x-zraka onda bi se takav uređaj zvao xaser, u ultraljubičastom području uvaser, itd. Laser se odnosi na pojačanje svjetlosti u vidljivom dijelu spektra, dakle na valnim duljinama od 380 do 750 nm (Slika 3).

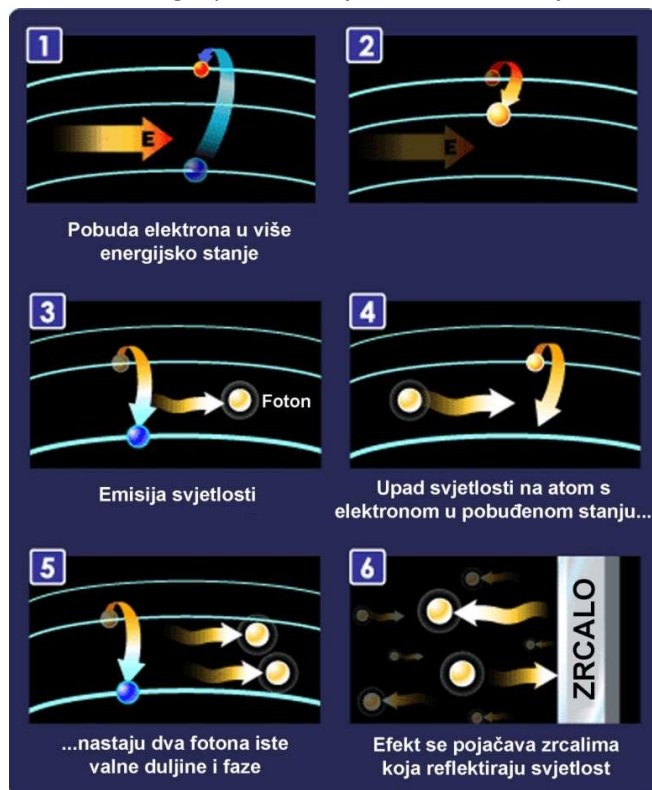


Slika 3. Elektromagnetski spektar valova i vidljivo područje

Iste godine, samo malo kasnije, iranski fizičar A. Javan zajedno s amerikancima W.R. Bennetom i D. Herriotom načinili su prvi plinski laser koristeći plinove helij i neon (He-Ne laser) kao aktivne medije. Javain je za to otkriće 1993. godine odlikovan nagradom Albert Einstein. 1962. godine R. N. Hall demonstrirao je rad prvog diodnog lasera na bazi galij-arsenida, koji je emitirao u bliskom infracrvenom području na 850 nm. Razvoj poluvodičke tehnologije omogućio je kontinuirani rast i unaprjeđivanje ovog tehnološki važnog otkrića, koji nam je omogućio jeftine, stabilne lasere u gotovo

cijelom dijelu vidljivog spektra. O velikoj uporabnoj važnosti diodnih lasera govori i podatak da je u 2004. godini prodano 733 milijuna diodnih lasera.

Da bismo razumjeli kako rade laseri, moramo zaviriti u mikroskopski svijet atoma i molekula i pomoći se kvantnom mehanikom. Atomi imaju osnovno i pobuđena energetska stanja, koja su kvantizirana i koja mogu zaposjedati ukoliko izvana dobiju energiju u obliku kvanta energije (Slika 4). Također, osnovni procesi bitni za nastanak laserske svjetlosti: inverzija naseljenosti, spontana i stimulirana emisija procesi su koji se dešavaju na nivou atoma i molekula. Procese spontane i stimulirane emisije predvidio je i teorijski objasnio A. Einstein u svom radu 1917., u kojem kaže da se izolirani atom u pobuđenom stanju može vratiti u osnovno stanje emitirajući foton. Taj proces je nazvao spontana emisija, koja predstavlja osnovu za ostale radijacijske procese, kao što su apsorpcija i stimulirana emisija. Atom će apsorbirati samo onaj foton koji ima odgovarajuću valnu duljinu, pri čemu će foton nestati, a atom će završiti u pobuđenom stanju, stvarajući preduvjet za spontanu emisiju. Nadalje, teorija predviđa da svjetlost (fotoni) dok putuje kroz materiju može izazvati emitiranje još više svjetlosti. Einstein je postulirao da fotoni, koji su bozoni, mogu putovati zajedno kroz materiju i da su pri tome u istom stanju. Ukoliko imamo na nekom mjestu veliki broj atoma s značajnim viškom energije (atoma u pobuđenom stanju koji su postigli inverziju naseljenosti), oni će početi spontano emitirati fotone u svim smjerovima. Takvo zračenje zovemo nekoherentno zračenje. Međutim, ukoliko na takve atome pošaljemo usmjerene fotone točno određene valne duljine i točno određene faze, prisutnost tih fotona natjerat će atome da emitiraju fotone ranije i to na način da se i emitirani fotoni kreću u istom smjeru, s istom valnom duljinom (frekvencijom) i istom fazom kao i upadni fotoni. Takvo zračenje zovemo koherentnim zračenjem, koje nastaje kao posljedica

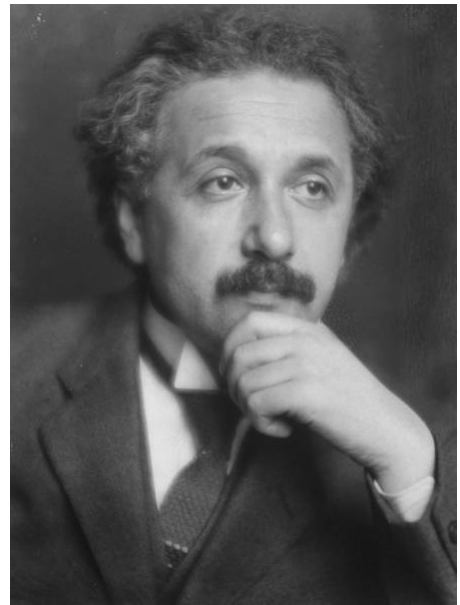


Slika 4. Objašnjenje rada lasera

stimulirane emisije. Ukoliko se tako usmjereni fotoni kreću kroz ostale pobuđene atome, dolazi do lavinskog efekta i sve više i više koherentnih fotona putuje kroz medij.

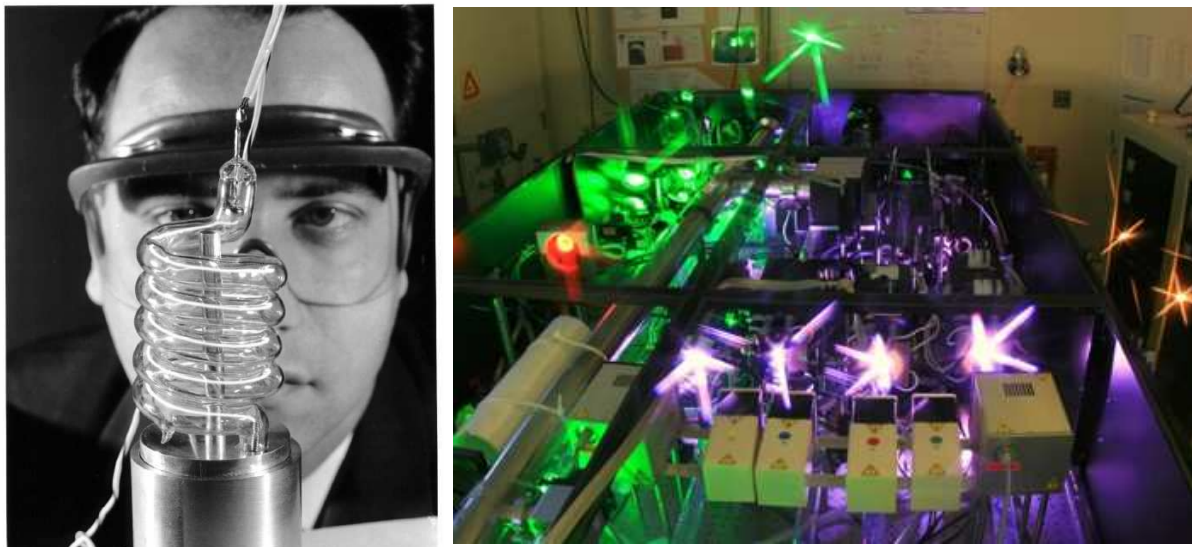
Jednostavan prikaz (Slika 4) će nam olakšati razumijevanje laserskog efekta. Da bi atomi mogli iz osnovnog stanja prijeći u pobuđeno stanje, moraju apsorbirati energiju (Slika 4-1). Jednom kada atom zaposjedne pobuđeno stanje, on se nastoji relaksirati u njemu energetski povoljnija niža energetska stanja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

Dakle, možemo reći da, iako Einstein (Slika 5) nije otkrio laser, on ga je svakako predvidio! Još je 1916. godine u pismu prijatelju napisao: "*A splendid light has dawned on me about the absorption and emission of radiation...*". Bilo je to punih 44 godine prije otkrića lasera.



*Slika 5. Portret Alberta Einsteina iz 1921. kojeg je za časopis LIFE napravio E. O. Hoppe. Izvor: Wikipedia*

Od trenutka kad je laser otkriven, pa do danas, razvijen je veliki broj različitih tipova lasera (Slika 6), koji se međusobno razlikuju ovisno o vrsti aktivnog medija koji se koristi za laseriranje (plinski laseri, laseri s organskim bojama, egzimerski laseri, laseri iz porodice čvrstog stanja, poluvodički laseri), ovisno o načinu rada (kontinuirani i pulsni laseri), ovisno o načinu pumpanja (optički ili električki), te ovisno o snagama (mW- PW).



Slika 6. Prvi laser (lijevo) i suvremeni laserski sustav (desno)

Preuzeto: PhysicsWorld

Proizvodnja različitih tipova lasera, njihovo tehnološko usavršavanje i povezivanje s optikom i elektronikom otvorilo je posve nova područja znanosti i tehnologije. Istovremeno, mnoge grane ljudske djelatnosti prepoznale su važnost laserskih tehnologija, što je dovelo do primjene lasera u industriji, u medicini i stomatologiji, u telekomunikacijama, ali i u energetici.

Nepunih 15 godina od otkrića, He-Ne laseri i diodni laser postali su osnova za bar-kod čitače, uređaje koji registriraju crno-bijeli uzorak (kod) na način da se laser reflektira od površine koda. Signal nastao refleksijom digitalizira se i pohranjuje u računalu. Svaki proizvod identificira se prema svom jedinstvenom proizvodnom kodu (eng. *Universal Product Code- UPC*). Na taj se način automatizirao rad s podacima o proizvodu u trgovinama, velikim supermarketima i skladištima. Ideja o takvom sustavu postojala je još 1930. godine, ali je zaživjela tek 1974., zahvaljujući laserima. Prvi proizvod čiji je bar-kod laserski skeniran na blagajni jednog supermarketa u Ohio-u bio je paketić Wrigley's žvakaćih guma. Danas se ovi uređaji koriste u

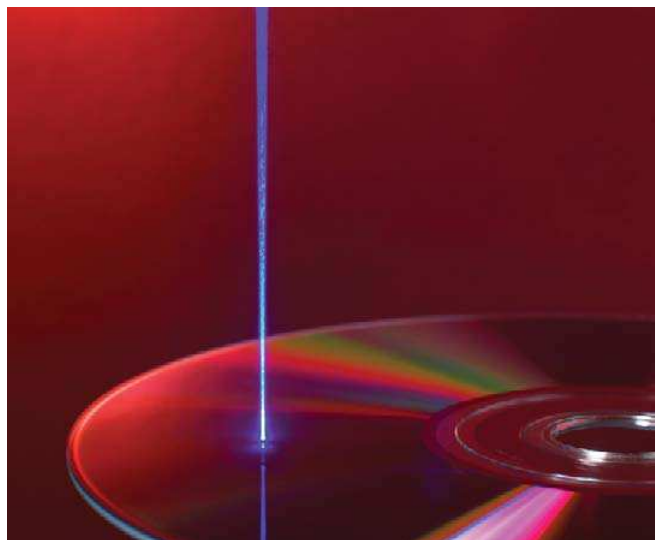


Slika 7. 2D bar-kod budućnosti.

Preuzeto: Barcodesolutions.com.au

cijelom svijetu, milijardu puta dnevno, pri čemu se ušteda za kupce, prodavače i proizvođače može mjeriti u milijardama dolara. Tehnološka novost vezana uz bar-kod čitače su tzv. 2D barkodovi (Slika 7) koji bi se mogli čitati s mobitelima, pri čemu bi kupac u supermarketu mobitelom skenirao proizvod koji ga interesira, a podaci o proizvodu (sastav, cijena, kuponi pa čak i recepti) bi stigli na zaslon njegovog mobitela. Možemo reći da je tehnologija bar-kod čitača napredovala od početaka vezanih za Wrigley's paketiće.

Osim što nam štede vrijeme u redovima supermarketa, laseri nas već nepunih 20 godina zabavljaju, prenoseći nam zvuk visoke kvalitete upravo zahvaljujući karakterističnom svojstvu usmjerenosti laserske zrake. Na taj način, moguće je prenijeti zvučni signal u digitalni i, obratno, digitalni signal u zvučni signal visoke kvalitete. Krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća, Sony i Philips započeli su razvijati nosače zvukova na kojima je zvučni signal digitalno kodiran na plastični disk (Compact disc-CD) polumjera 12 cm. Digitalni zapis (*bit*) odgovara mikrometarskim udubinama (*pits*) jetkanim u površinu plastičnog nosača zvuka, koja se reproducira tako da laserska zraka prelazi preko tako izbrazdane površine diska i bilježi promjene u refleksiji zrake. Uvjet interferencije za svjetlost koja se reflektira s udubina (*pits*) je drugačiji nego na izbočinama (*lands*), pa će na nekim dijelovima diska doći do refleksije (signal 1), a na nekima će refleksija izostati (signal 0). Na taj način prenosi se informacija zapisana na disku. Prvi album izdan u CD formatu bio je album *52nd Street* rock glazbenika Billy Joel-a. Sredinom devedesetih kapacitet CD diska od 74 minute glazbe znatno je povećan uvođenjem tzv. digitalnih video diskova (DVD) koji su imali toliki kapacitet da su mogli zaprimiti cijeli film. 2009. godine Blu-ray diskovi (BD) (Slika 8) postavili su novi standard s kapacitetom od 50 GB, što je omogućilo pohranjivanje video zapisa visoke rezolucije. Osnovna razlika između ova tri različita formata je valna duljina lasera potrebna za zapis informacije na disk. Ona iznosi 780 nm za CD, 650 nm za DVD i 405 nm za BD. Naime, što je valna duljina kraća, to je i difrakcijski limit za lasersku zraku

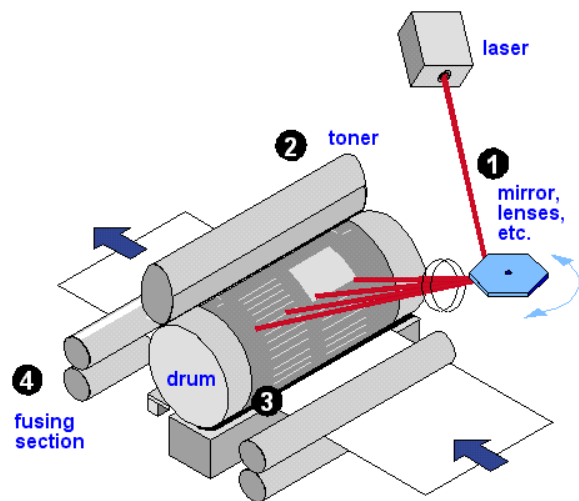


Slika 8. Blu-ray disk.  
Preuzeto: PhysicsWorld



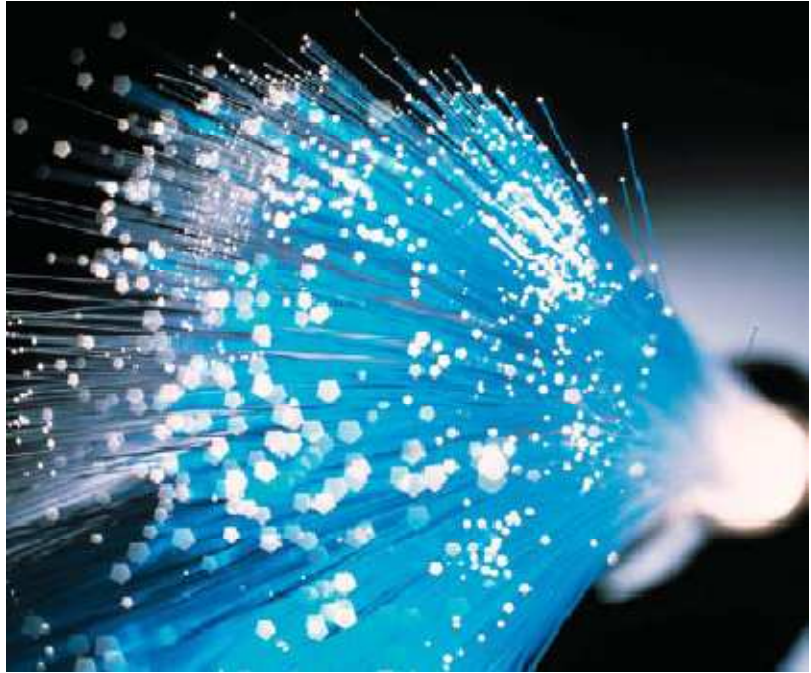
manji, što omogućava gušće pakiranje podataka na fizičkom prostoru diska. Tako, npr., valne duljine lasera od 780 nm, omogućavaju kapacitet od 0.68 GB, dok je uzdužni razmak između izbočina diska 1.6  $\mu\text{m}$ . Kapacitet za valnu duljinu 650 nm je 4.7 GB, uz uzdužni razmak između izbočina diska 0.74  $\mu\text{m}$ . *Blu-ray* diskovi imaju kapacitet 25 GB, a mali difrakcijski limit omogućava vrlo gusto pakiranje podataka na disk, pa je uzdužni razmak između izbočina kod *Blu-ray* diska svega 0.32  $\mu\text{m}$ .

Još je jedan uređaj baziran na laserskoj tehnologiji našao svoje mjesto u svakodnevnom životu, a to je laserski pisar (Slika 9). Odgovor na pitanje kako laserska zraka iscrtava tekst zapravo je bazirana na osnovnim fizikalnim principima, koji su primijenjeni na jedan sasvim novi, inovativan način. Osnovni princip je statički elektricitet, kojeg laserski pisari koriste kao privremeno ljepilo za koje se lijepi tinta u obliku praha. Osnovni dio svakog laserskog pisara, uz sam laser, je laserski bubanj, koji služi kao fotoreceptor. Bubanj je načinjen od visoko fotovodljivog materijala, koji se izbija kada ga se obasja laserskom zrakom, pa na mjestu koje je obasjala zraka nastaje negativan naboj. U početku ciklusa, bubanj je pozitivno nabijen i kako se okreće oko vlastite osi, laserska zraka ga obasjava duž plohe njegova cilindra i 'iscrtava' slova i slike načinjene od električnih naboja, stvarajući elektrostatske slike. Nakon što se na površini bubnja načini željeni uzorak, daljnjom rotacijom bubnja, bubanj se zasipa s pozitivno nabijenim tonerom- finim prahom, koji se lijepi (zbog elektrostatske sile) na ona mjesta na bubnju koja su negativno nabijena. Potom se bubanj valja preko papira, koji se giba ispod bubnja istom translacijskom brzinom kojom rotira bubanj. Papir je prethodno negativno nabijen i to većom količinom negativnog naboja, tako da (opet zbog elektrostatske sile) na sebe zalijepi samo tintu (pozitivno nabijenu), pa se otisak elektrostatske slike prenosi na stvaran otisak tinte na papiru. Konačno, pisar propušta papir kroz valjke, koji zahvaljujući visokoj temperaturi fiksiraju tintu za papir. Pri tome, naravno, zagriju i papir, pa su zbog toga ispisane stranice uvijek vruće kada izlaze iz pisara. Na sličnom principu rade i suvremeni fotokopirni uređaji. Naravno da cijeli proces iscrtavanja elektrostatske slike na bubnju mora biti precizan, pa svaki pisar, uz laserski izvor, posjeduje i sustav leća i rotirajućih zrcala, koji upravljaju horizontalnim kretanjem laserske zrake duž bubnja. Laser dobiva informacije o zapisu iz računala, preko kontrolne jedinice, tako da dok zraka



Slika 9. Unutrašnjost laserskog pisara.

iscrtava jednu liniju u vremenu tako da laser emitira puls svjetlosti kada točka koja čini sliku treba biti otisnuta, a kada treba ostaviti prazninu u zapisu, laser ne emitira pulsove svjetlosti. Osnovna prednost laserskih pisača u odnosu na *ink-jet* pisače su brzina ispisa, zbog brzog iscrtavanja laserske zrake po površini bubnja, i kvaliteta ispisa, što je posljedica male divergencije profila laserske zrake.

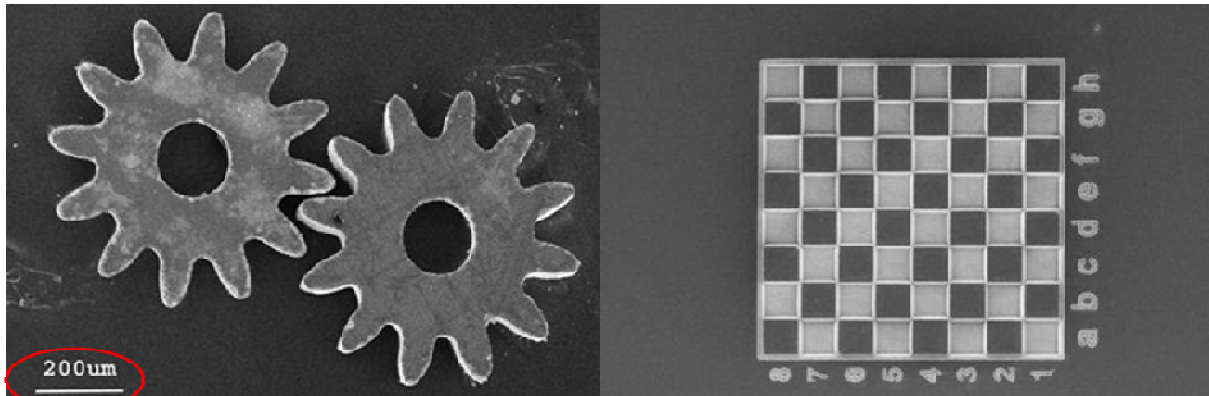


Slika 10. Optička vlakna.  
Preuzeto: PhysicsWorld

„Kao što je već prije rečeno, laser je postao dominantan uređaj u telekomunikacijama. Pomoću lasera se povezuju milijuni umreženih računala, prebacujući binarni kod računala u svjetlosni signal, koji se praktički bez ikakvih gubitaka prenosi optičkim kablovima na velike udaljenosti i to brzinom od nekoliko terabajta u sekundi (TBps). Optičke kablove čini snop optičkih vlakana (Slika 10). Telekomunikacijske kompanije počele su instalirati optička vlakna u svoju infrastrukturu još krajem 70-tih godina prošlog stoljeća, a prvi transatlantski optički kabel, dugačak nekoliko desetaka tisuća kilometara, povezao je SAD i Europu 1988. godine. Danas je cijeli svijet umrežen u globalnu mrežu (*world wide web*), a cijeli sustav pokreću jeftine i pouzdane laserske diode. Možemo reći da su laseri postali integratori svjetskih (tele)komunikacija. Osim toga, važno je istaknuti da veliki dio današnje mikroelektroničke industrije počiva na laserskim tehnologijama, koje se koriste za izradu mikroprocesora postupkom fotolitografije.

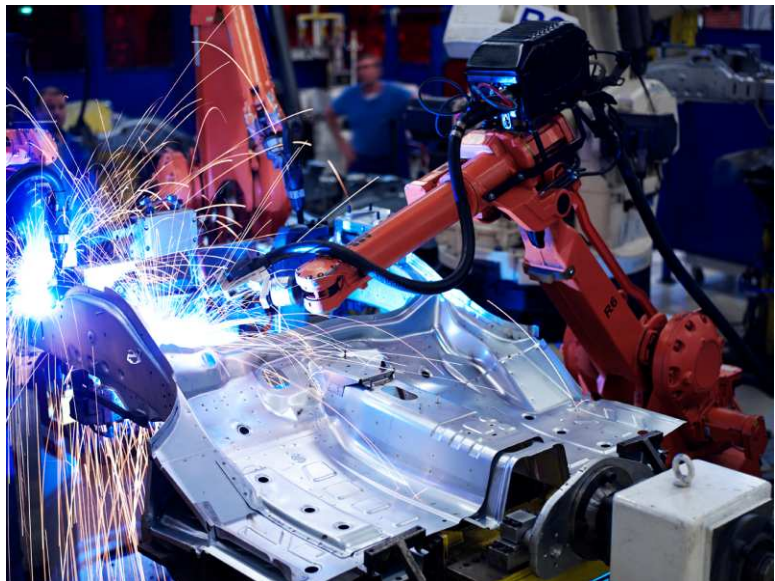
Razvoj pulsnih lasera s kratkim vremenskim trajanjem pulsova omogućio je pohranjivanje energije lasera u kratkom vremenskom razdoblju, što znači da vršne snage takvih pulsova mogu biti enormno velike. Danas se proizvode laseri snage veće od  $10^{15}$  W (PW). Visoki intenziteti pulsnih lasera omogućili su primjenu lasera u obradi materijala, npr. za rezanje i bušenje materijala. S obzirom na kratko trajanje pulsova, tj. na kratko vrijeme interakcije medija s pulsom, laserska obrada materijala

ne vodi do taljenja i deponiranja rastaljenog materijala na rubovima reza, već se materijal trenutno isparava i ostavlja čiste rubove na rezu ili rupi (Slika 11) čak i za oblike čije su dimenzije nekoliko desetaka mikrona. S obzirom da se laserska zraka može kompjuterski navoditi, oblici i položaji usjeka, rezova i bušotina, njihove dimenzije i gustoća u materijalu koji se oblikuje se mogu unaprijed planirati, što vodi do automatizacije proizvodnje i nevjerojatne preciznosti izrade.



Slika 11. Obrada materijala laserskom zrakom na mikrometaskoj skali. Šahovska ploča je dimenzija 1 x 1 mm.

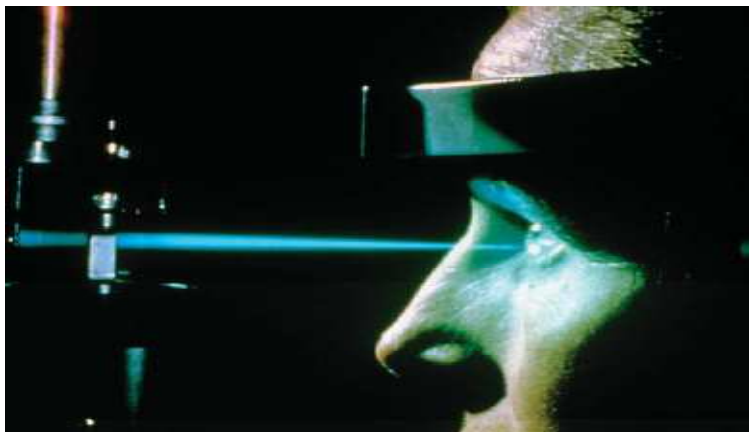
Danas se ta svojstva koriste u autoindustriji (Slika 12) i avioindustriji, na primjer za rezanje dijelova karoserije, bušenje rupa u injektoru goriva, označavanje brojeva karoserije, izrade motora mlažnjaka i električnih turbina, jer se pokazalo da laserski precizno izbušene rupe omogućavaju bolje hlađenje motora, čime im povećavaju efikasnost. Laseri se koriste i u proizvodnji solarnih ćelija, za preciznu obradu rubova tankoslojnih solarnih ćelija, pri čemu poboljšavaju učinkovitost ćelije.



Slika 12. Automatizirano zavarivanje automobilske karoserije.

Izvor: <http://www.psa-peugeot-citroen-press.co.uk>

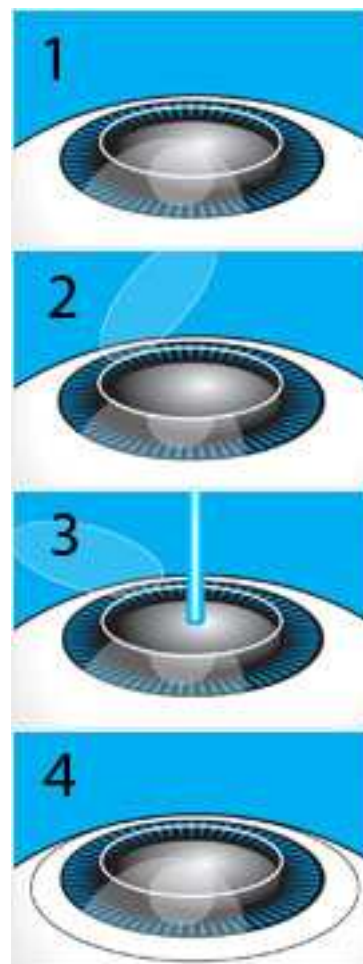
Ablativna svojstva lasera koriste se i u medicini i stomatologiji. Još 1961. godine u Medicinskom centru Sveučilišta Columbia u Sjedinjenim državama izvedena je prva laserska operacija, pri čemu su liječnici, pomoću rubinskog lasera, uklonili retinalni tumor.



Slika 13. Laserska operacija oka.  
Preuzeto: PhysicsWorld

Svojstvo laserske zrake da ulazi u oko, a da ga ne ošteti, i danas se značajno koristi u oftalmologiji. U

tu svrhu koriste se različiti tipovi lasera, ovisno o valnoj duljini, snazi i načinu emisije, pri čemu mogu, primjerice, ablatirati površinu, raditi rezove, a da su pri tome minimalno invazivni (Slika 13). Jedan od značajnijih, sada već standardnih, zahvata u oftalmologiji je postupak uklanjanja dioptrije kombinacijom femtosekundnih i egzimerskih lasera. Taj postupak se zove LASIK (*Laser-Assisted in situ Keratomileusis*), u kojem laserska zraka ispravlja oblik rožnice. Od 2007. godine do danas izvedeno je 17 milijuna zahvata ovog tipa. U Hrvatskoj je prva operacija skidanja dioptrije izvedena 1998. godine, a od siječnja 2007. izvodi se i LASIK metoda, koja je vrlo efikasan postupak za skidanje dioptrije osobama s malom, srednjom ili visokom dioptrijom. Cijeli postupak je bezbolan, traje svega 10 minuta i može se istodobno operirati oba oka. Na Slici 14 prikazan je postupak LASIK-a. Prvo se u oko nakapaju kapi anestezika koje umire oko, te se računalno navođenim femtosekundnim laserom izreže sloj rožnice (Slika 14-1), koji se nježno savije na stranu (Slika 14-2), otkrivajući unutarnje retinalno tkivo oka. Ovakav način reza je puno precizniji i manje agresivan od reza mikrokeratomom (specijalnim kirurškim nožem), te ubrzava postoperativni period. Potom se snažnim egzimerskim laserom modelira rožnica oka (Slika 14-3), tako da, računalno vođeni i kontrolirani pulsovi laserske svjetlosti,



Slika 14. LASIK postupak.  
Preuzeto:  
<http://hr.opticaexpress.co>

ablatiraju površinu rožnice precizno joj mijenjajući oblik na mikronskoj skali. Na taj način se uspješno ispravlja kratkovidnost, dalekovidnost i astigmatizam. Nakon postupka, liječnik nježno vraća zaštitni poklopac rožnice (Slika 14-4), koji brzo i sigurno zacjeljuje. Značajno poboljšanje vida obično se uočava već isti dan, svega nekoliko sati nakon postupka, tako da se većina pacijenata može vratiti svojim svakodnevnim aktivnostima već nakon 48 sati od operacije. Eventualne nuspojave su preosjetljivost oka na svjetlost, te osjećaj 'pijeska u očima', ali i one vrlo brzo nestaju. Na ovaj način mogu se ukloniti dioptrije od +5 do -10, kao i cilindri (do 5 cilindara). Cijena ovakvog tretmana u privatnim poliklinikama je 5 000 kn po oku.

Laseri se koriste i u dermatologiji i kozmetici, pri čemu se laserima tretiraju maligni i benigni tumori, korigiraju ožiljci od akni i ozljeda te uklanjanju neželjene tetovaže. Kod uklanjanja tetovaža (Slika 15) koriste se svojstva pulsnih lasera visokog intenziteta ( $\text{CO}_2$  laseri), koji mogu

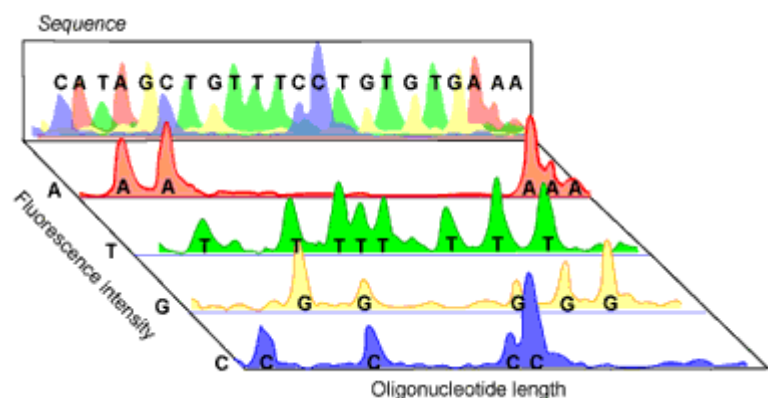


Slika 15. Postupak laserskog uklanjanja tetovaže.

relativno bezbolno prodrijeti u potkožno tkivo gdje je smješten pigment boje koju želimo ukloniti. Laserska svjetlost selektivno se apsorbira u pigmentu, pri čemu se pigment zagrijava i dolazi do pucanja čestica pigmenta, koje postaju toliko male da ih naše tijelo, putem imunološkog sustava izlučuje iz organizma. Laser, zbog točno određene valne duljine, selektivno uništava pigment boje tetovaže, pri čemu ne uništava okolno, zdravo tkivo. Naravno da takav postupak ipak nije posve bezbolan i da ipak ima svoje mane. Osjet koji izaziva pulsni laser na dijelu kože kojeg se tretira laserom, jednak je osjećaju peckanja kojeg možete osjetiti ukoliko vas poprska vruće ulje. Kako crni pigment apsorbira sve valne duljine, puno je lakše skinuti crnu tetovažu, nego onu u boji koja selektivno apsorbira valne duljine. Obično, prije samog postupka, liječnik dermatolog tretira taj dio kože nekom analgetskom kremom, da bi se umanjio osjećaj peckanja, te umanjila bol koja može

nastati zbog površinskog kapilarnog krvarenja. Neposredno prije laserskog tretmana, ukloni se sloj kreme, a laserskom se zrakom direktno tretira dio kože prekriven tetovažom. To traje svega nekoliko minuta. Postupak se najčešće mora ponoviti kroz nekoliko tjedana, jer je toliko potrebno da se pigment izluči iz organizma i da se koža oporavi. Oporavak je individualan, uz primjenu antibakterijskih masti i pripravaka, koji onemogućavaju upalne procese. Naravno da i ovaj zahvat ima svoje nuspojave, a to su najčešće hipopigmentacija ili pak hiperpigmentacija dijela tijela na kojem je prije bila tetovaža, te moguće infekcije i ožiljci. Sve ovo nam samo govori da, iako je postupak tetoviranja bolan i zahtjeva vrijeme i novac, postupak skidanja tetovaže je još zahtjevniji i skuplji.

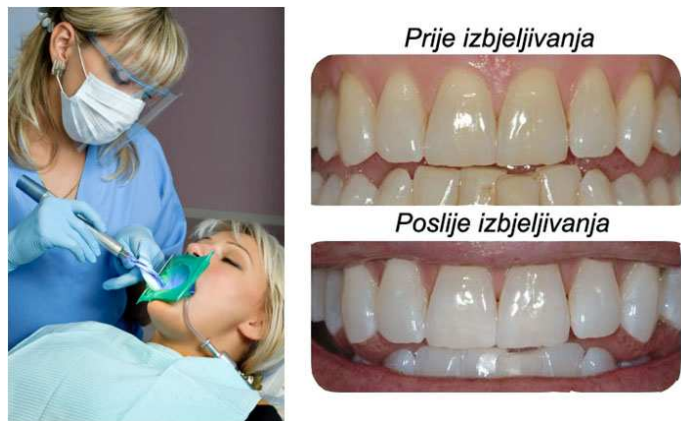
Laseri se također koriste u neurokirurgiji, za tretiranje teško dostupnih malignih stanica na mozgu, pri čemu se one mogu tretirati laserima, uz pomoć optičkih vlakana. Također, laserima se mogu tretirati oštećeni ili začepljeni jajovodi, ali se mogu koristiti i u fizijatriji, za liječenje hernije diskova kralježnice, pri čemu laserska svjetlost ima terapijska svojstva i pomaže kod umanjivanja boli. Ovaj postupak je već postao toliko standardan da se godišnje pola milijuna stanovnika SAD podvrgava laserskoj terapiji kralježnice. Laseri imaju i važnu ulogu u sekvenciranju ljudskog genoma, tj. čitanja i dešifriranja parova baza koji čine genom, a upotreba lasera ubrzala je taj postupak milijun puta! DNA, koja je nositelj genetske informacije, obilježi se fluorescirajućom tvari, i to tako da se svaka baza obilježi specifičnom oznakom baze, čime nastaje dd-NTP (dideoksi nukleotida), koja pod utjecajem laserske zrake daje fluorescenciju specifičnu za danu bazu. Fluorescentni signal i njegov intenzitet bilježi se na trodimenzionalnom grafu- elektroferogramu (Slika 16). Svaka boja odgovara jednoj bazi (npr. plava odgovara citozinu), otkrivajući položaj pojedine baze u oligonukleotidnom lancu. Još 1975. godine, dok se laseri nisu koristili u ove svrhe, za očitavanje kompletnog ljudskog genoma bilo bi potrebno 4000 godina, dok se danas, kompletni humani genom može očitati u jednom danu. Brzo očitavanje, zasnovano na laseru, otvorilo je mogućnosti personaliziranog medicinskog tretmana svakog



Slika 16. Elektroferogram nakon završenog sekvencioniranja.  
Izvor: <http://www.scq.ubc.ca>

pacijenta i individualizaciju terapijskog postupka.

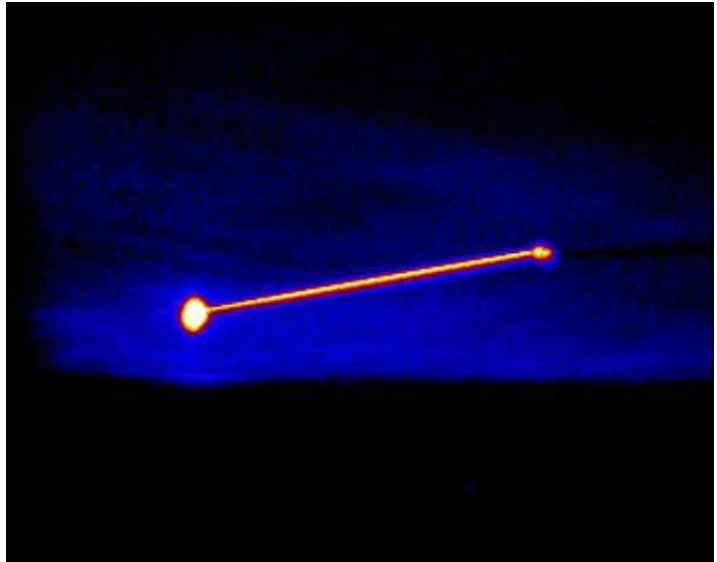
Laseri se već godinama, od 1994., intenzivno koriste i u stomatologiji, za uklanjanje zubnih naslaga te pripremanje zuba za punjenje ispunama, te za učvršćivanje ispuna jednom kada se umetnu u pripremljeni zub. Laseri se koriste i za preoblikovanje desni i otklanjanje bakterija prilikom čišćenja zubnih kanala. Ponekad, laseri se mogu koristiti u oralnoj kirurgiji za uklanjanje komadića tkiva (biopsija) za koje se sumnja da su zahvaćeni malignim stanicama. Važnu ulogu imaju i u estetskoj stomatologiji, za izbjeljivanje zubi. U svakom od ovih zahvata, laseri svoju energiju prenose na zubno tkivo ili desni. Kada ih koristimo u kirurgiji, koriste se kao instrumenti kojima se reže ili vaporizira tkivo s kojim dolazi u kontakt. Kad se koristi kao učvršćivač zubnih ispuna, laser pomaže učvršćivanje punila zahvaljujući fotokemijskim reakcijama koje ubrzavaju proces vezanja punila sa zubom. Kada se koristi za izbjeljivanje zuba, laser se koristi kao izvor topline i ubrzava proces izbjeljivanja, te mu povećava efikasnost. Za izbjeljivanje zuba (Slika 17) koriste se specijalni gelovi koji sadržavaju do 35% peroksida i koji se nanose na zdrave zube. Osoba s oštećenjima zubne cakline i desni ne može se podvrgnuti takvom postupku. Nakon što se gel nanese na zubnu caklinu, tretira se intenzivnom laserskom svjetlošću, koja aktivira peroksid kojim se uklanjaju mrlje od kave, nikotina i drugih obojenih namirnica sa zubne cakline. U samo sat vremena, zubi mogu postati svjetliji od četiri do šest nijansi. Ovaj se postupak izvodi isključivo pod nadzorom stomatologa, u specijaliziranim ovlaštenim stomatološkim ordinacijama. U zadnje vrijeme, femtosekundni laseri koriste se za bušenje dentina, što smanjuje neugodan osjećaj boli koji se javlja kod mehaničkog bušenja zuba zubarskom bušilicom.



Slika 17. Lasersko izbjeljivanje zuba.

Kao i svaki koristan izum čovječanstva, laseri su postali metom interesa određenih skupina, koje su nastojale iskoristiti lasere u nehumane svrhe. Za vrijeme hladnog rata, američki vojni program radio je na razvoju snažnih *hi-tech* lasera koji bi se koristili u vojne svrhe. Pentagon je tražio rješenja čak i prije Maimanovog otkrića, ali pokušaj stvaranja moćnog laserskog oružja razumnih dimenzija nije se pokazao uspješnim. Pojava kilovatnih CO<sub>2</sub> lasera u 70-im godinama i, kasnije, *mid-IR* kemijskih pulsni

lasera megavatnih snaga također se pokazala nepraktičnim za korištenje na terenu. Razlog više je i to što se infracrveno zračenje dobro apsorbira u atmosferi, pa su takvi laseri potpuno neefikasni do trenutka kad dođu do mete. Američki predsjednik R. Reagan predložio je, u sklopu anti-ICBM strateške obrambene inicijative (*Intercontinental Ballistic Missiles*- međukontinentalni balistički projektili), stvaranje prikladnog laserskog oružja koje bi emitiralo X-zrake kojim bi se uništavali neprijateljski projektili. Taj projekt, koji je trebao biti dio više milijardi dolara teškog antibalističkog programa, djelovao je široj javnosti, kao i znanstvenoj zajednici, pomalo poput znanstvene fantastike. Kraj hladnoratovskog razdoblja, koji je završilo raspadom SSSR-a, značio je završetak utrke u laserskom naoružavanju i jedino što je od cijele priče preostalo je izgradnja zrakoplovnih (*airborne*) lasera (Slika 18). Dobra vijest je da se, zahvaljujući izdašnoj novčanoj pomoći, razvila laserska tehnologija koju i danas koristimo u industriji. Airborne laseri, čiji je domet nekoliko stotina kilometara, služe za detektiranje i razaranje neprijateljskih projektila, uz precizno navođenje raketa kojim se uništavaju projektili. Čine ga šest infracrvenih detektora i četiri lasera, od kojih je najsnažniji laser, tzv. *Killer*, kemijski laser (deuterij-fluorid laser) visoko-fokusirane snage od nekoliko MW.



Slika 18. Infracrvena slika dobivena za vrijeme testiranja zrakoplovnog lasera prilikom uništavanja kratkodosežne neprijateljske mete, 11. veljače 2010.

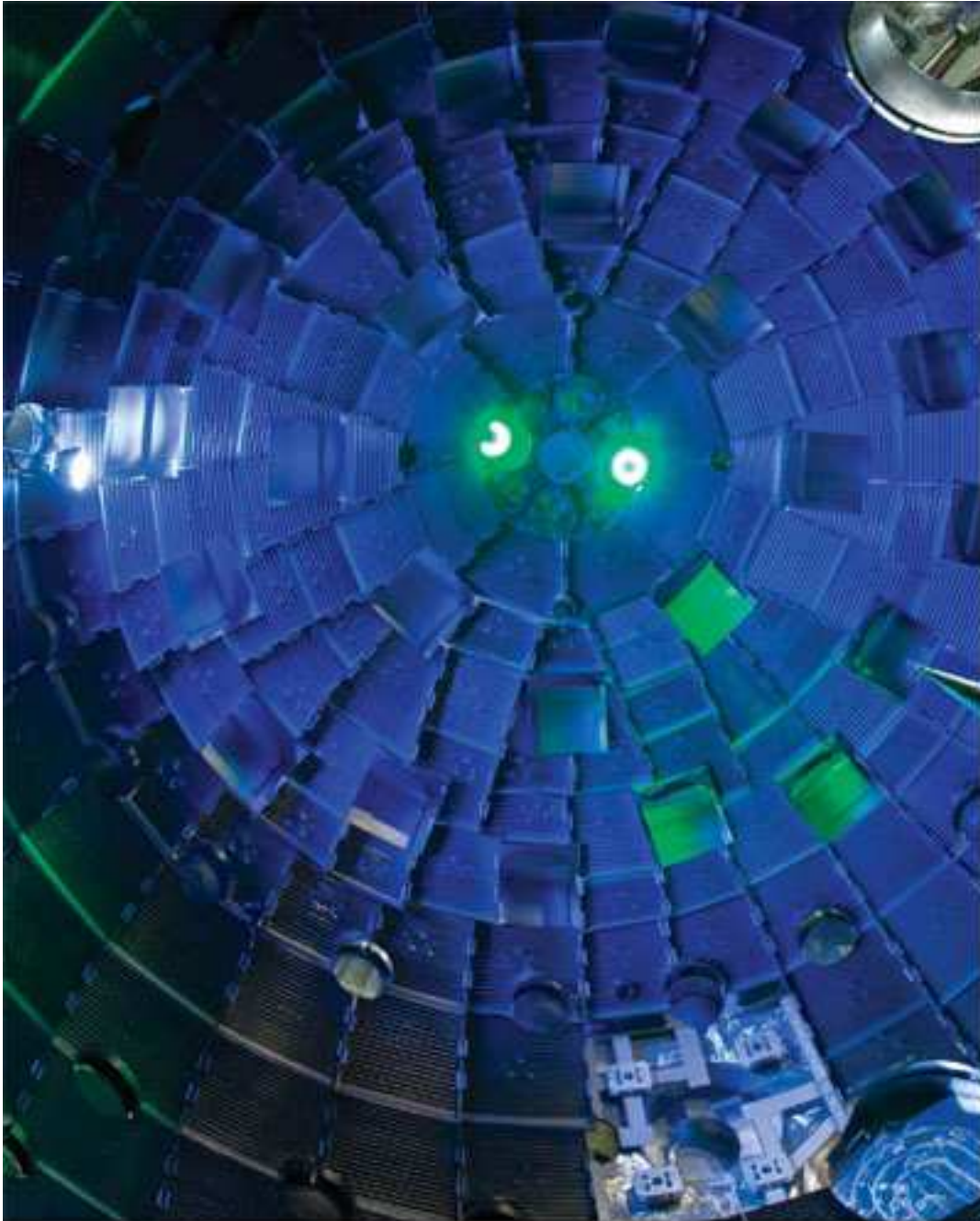
Izvor: Missile Defense Agency's



Slika 19. Sustav lasera u NIF-u.  
Preuzeto: PhysicsWorld



Ovih dana ostvaruje se još jedan plemeniti cilj primijenjene znanosti, a to je dobivanje čiste energije laserskom fuzijom. U Natinal Ignition Facility (NIF) u Lawrence Livermore National Laboratory u Kaliforniji u završnoj je fazi projekt kojim bi se fuzijom deuterija i tricija dobivao helij i čista energija, simuliranjem uvjeta koji postoje u središtu zvijezda, kakvo je Sunce. Naime, NIF-ov projekt uključuje 192 ultraljubičaste laserske zrake, dobivene iz laserskog sustava smještenog u objektu veličine stadiona na deset katova, koji su dizajnirani tako da isporuče kratak laserski puls snage pet stotina



*Slika 20. Pogled na unutrašnjost fuzijske komore u NIF.*

*Preuzeto: PhysicsWorld*

teravata ( $1\text{TW} = 10^{12}\text{ W}$ ) u područje milimetarskih dimenzija, u kojem bi se nalazila ampula s deuterijem i tricijem. Nakon šezdeset godina napora i različitih pristupa, znanstvenici su napokon pronašli način da fuzijom proizvedu dosad neviđenu količinu energije. Uspjeh tog projekta značio bi bezgranični izvor čiste energije, koji bi opravdao dosadašnje troškove samog projekta, koji su iznosili otprilike 3.5 milijardi dolara. NIF možemo smatrati dosad najvećim svjetski laserom (Slika 19), koji se sastoji od 8000 velikih i 30 000 manjih optičkih jedinica. Svaki od 192 lasera imaju energiju od 1.8 MJ, ukupne snage 500 TW. Ta snaga je oko 40 puta veća od prosječne potrošnje cijelog svijeta i nekoliko puta veća od snage zračenja koje sa Sunca dođe na Zemlju. Naravno, ta se silna snaga isporučuje u vrlo kratkom vremenu, u trajanju od svega nekoliko nanosekundi.

Laseri (Slika 20), međusobno postavljeni u radijus od 10 metara fokusirani su na svega 1 milimetar u promjeru, stvarajući udarni val s tlakovima od nekoliko desetaka milijuna atmosfera. Takav snažni udarni val doveo bi do implozije ampule s gorivom, tjerajući atome deuterija i tricija da se sudare u fuzijskom procesu. Sam rezervoar goriva- ampula punjena izotopima vodika treba biti savršenog oblika i glatke površine (Slika 21), jer svaka nesavršenost, zbog

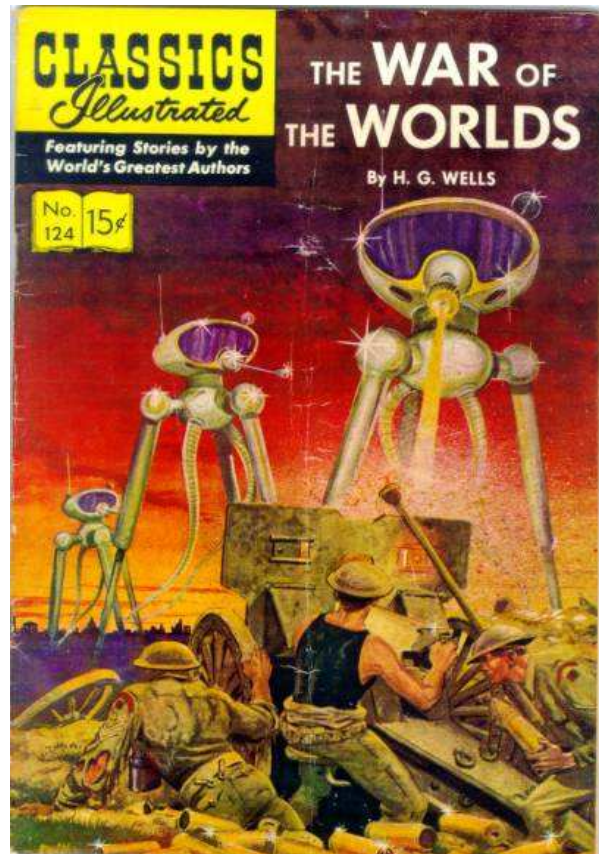


Slika 21. Ampula s gorivom.  
Preuzeto: PhysicsWorld

nejednolikog prijenosa energije na plohu, može eksponencijalno povećati mogućnost nepoželjnog ishoda implozije. Osnovna ideja cijelog projekta bila je stvaranje samoodržive fuzijske reakcije koja bi bila rješenje jednog od najvažnijih civilizacijskih pitanja- kako naći i iskoristavati siguran i ekološki održiv izvor energije. Ljudi iz NIF-a smatraju da će imati odgovor na to pitanje u naredne dvije godine.

Kao što se može vidjeti iz mnogobrojnih navedenih primjera, laseri imaju snažan utjecaj na svakodnevni život i znanost. Prirodne znanosti- fizika, kemija i biologija, bile bi nezamislive bez lasera. Najznačajnija otkrića u posljednjih 50 godina, od masera, preko Bose- Einsteinovog kondenzata u fizici, adaptivne optike u astronomiji, femtokemije, te nelinearne mikroskopije u biologiji, samo su dio znanstvene priče koju nam priča laser. Čak ni najmaštovitiji pisci znanstvene fantastike nisu mogli predvidjeti da će Maimanovo otkriće tako duboko promijeniti i unaprijediti čovječanstvo.

Još 1898. godine H. G. Wells u svojoj pripovijesti 'Rat svjetova' (Slika 22) piše o Marsovcima koji razaraju Zemlju 'nevidljivim, neizbježnim mačevima topline' (cit. *It was sweeping round swiftly and steadily, this flaming death, this invisible, inevitable sword of heat. I perceived it coming towards me by the flashing bushes it touched, and was too astounded and stupefied to stir. I heard the crackle of fire in the sand pits and the sudden squeal of a horse that was as suddenly stilled. Then it was as if an invisible yet intensely heated finger were drawn through the heather between me and the Martians, and all along a curving line beyond the sand pits the dark ground smoked and crackled.*). Vidimo da svime, osim imenom, Wells opisuje lasersku zraku velike, razorne snage. U filmu iz 1951. godine 'Dan kad je Zemlja stala', moćni robot Gort imao je jako oružje na svojoj strani- laserski pogled.



Slika 22. Naslovnica 'Rat Svjetova' iz serije Classic Illustrated.

Čak i nakon otkrića lasera, pisci i scenaristi nisu prestajali pisati o laserima. 1964. godine, u filmu *Goldfinger* (Slika 23) postoji scena u kojoj je Sean Connery, koji glumi Jamesa Bonda, zavezan za zlatni stol po kojem prolazi laserska zraka, otapajući zlato na svom putu i opasno se približavajući



Slika 23. Prizor iz filma 'Goldfinger' iz serijala filmova o James Bondu

Bondovim preponama, scena mučenja koja je možda predvidjela da ćemo jednog dana zaista laserima rezati kovine.



Slika 23. Instalacija Photon999 ispred Gugenheimova muzeja u Bilbao-u



Slika 24. Najava za koncert Pink Floyda

Osim u filmu, laseri se pojavljuju i kao dio glazbenih spektakala i tehno-partija. Primjerice, koncerti Pink Floyda (Slika 24) poznati su po svojim laserskim efektima (light-show). Osim u šoubiznisu, laser se pojavljuju kao dio moderne kulture. Japanski umjetnik Yamagata postavio je na Gugenheimov muzej u Bilbaou instalaciju 'Photon999', povezavši lasere s umjetnošću (Slika 25).

I za sam kraj, još jedan neobičan podatak. Svojstva lasera i laserskog zračenja ostavila su svoj utjecaj i na jezične forme. Pretraživanjem opsežne *Lexis-Nexis* akademske baze podataka, koja objedinjuje podatke iz tisuće časopisa, elektroničkih medija i drugih izvora, u zadnje dvije godine daje oko 400 referenci za fraze koje u sebi sadrže pojam laser. Tako se, npr. fraza '*laser-like focus*' toliko puta pojavljuje da je postala klišej, '*laser-like precision*' postala je sinonim za preciznost, '*laser-like clarity*' za iznimnu jasnoću, dok izraz '*laser-like stare*' znači da vas netko gleda ljutito i s neodobravanjem. Obično se takav pogled pripisuje političarima, ukoliko im se postavi neugodno pitanje.