

Svjetska godina fizike – 2005

9.12.2005. HAZU

RAZRED ZA MATEMATIČKE, FIZIČKE I KEMIJSKE ZNANOSTI

Laseri i primjene

Goran Pichler

Institut za fiziku

Bijenička cesta 46, 10000 Zagreb

pichler@ifs.hr, <http://Projekt2.ifs.hr>

Uvod

Ima dosta fizičara koji među najvažnije i najoriginalnije rade Alberta Einsteina ubrajaju rade iz 1905 i 1917 godine u kojima se razvija korpuskularna teorija svjetlosti s uvođenjem procesa stimulirane emisije (Školska knjiga, 2005, Anderson, stranica). Trebalo je nekoliko desetljeća kako bi se teorijska zamisao pretočila u novovjeku izum dvadesetog stoljeća –laser (light emission by stimulated emission of radiation). Već 45 godina traje razvoj laserske tehnike i tehnologije. Još se uvijek pojavljuju nove vrste lasera i nove vrste primjene.

U osnovama lasera svakako treba uvrstiti rad kojeg je Albert Einstein objavio u Annalen der. Physik, **17**, 132 (1905) pod naslovom: O heurističkom pogledu na stvaranje i konverziju svjetlosti. U tom radu Einstein tumači pojave kao što su fotoelektrički efekt, Stokesovo pravilo i ionizaciju atoma ultraljubičastim zračenjem pomoću hipoteze da je svjetlost kvantizirana i da svim navedenim procesima uvijek sudjeluje kvant svjetlosti u svojoj cjelini. Sam heuristički postupak uobičajeno predstavlja postupak znanstvenog istraživanja kod koga se služimo nedokazanom tvrdnjom. Eksperimenti su ipak nedvojbeno pokazali da je hipoteza o kvantima svjetlosti itekako valjana. Nakon dvanaest godina daljnog istraživanja Einstein, je pored svih drugih revolucionarnih doprinosa, posebno u teoriji relativnosti, objavio rad u *Physikalische Zeitschrift* **18**, 121 (1917) pod naslovom: O kvantnoj teoriji zračenja. U tom radu su razmatrani osnovni procesi vezani uz međudjelovanje zračenja i materije, kao što su apsorpcija i spontana emisija zračenja. Najznačajnija novost bilo je uvođenje pojma stimulirane emisije zračenja, što je bilo itekako nužno kako bi se mogao izvesti zakon zračenja crnog tijela u termodinamičkoj ravnoteži. Kada se danas čita taj rad vidi se sva dubina i dalekosežnost opisivanja kvanta svjetlosti, posebno vezana uz prijenos impulsa kvanta svjetlosti na atome, što se danas može shvatiti kao preteča mogućnosti hlađenja atoma laserom. Dakle, iz jedne sasvim legitimne pobude Einstein je uveo pojam stimulirane emisije, ali teško je zamisliti da je on ili bilo tko drugo još za dugo vremena

razmišlja o praktičnoj upotrebi ovog osnovnog procesa međudjelovanja materije i svjetlosti. Po mišljenju Artura Schawlowa (Nobelova nagrada 1997 godine) spremnost tehnologije u prvoj polovici dvadesetog stoljeća nije dovoljna za poduhvat ostvarenja laserskog uređaja. Takav uređaj napravio je Theodore Harold Maiman (1927-2007) uz popratni članak u časopisu Nature 1960 godine (broj 4736, stranice 493-494) na svega dvije stranice pod naslovom: Stimulirano optičko zračenje u rubinu. Gotovo u isto vrijeme prijavio je i patent pod naslovom Rubinski laserski sistem.

Nobelovac Arthur Schawlow je u jednom razgovoru pokušao objasniti veliki vremenski raspon između 1917 i 1960, kada je Theodor Maiman izradio prvi rubinski laser. On smatra kako je tehnologija izrade zrcala s refleksivnošću iznad 98 % postala moguća tek svojevrsnom perfekcijom višeslojnih tankih filmova s izmjeničnim indeksom loma. Linearni laserski rezonatori omogućuju da stimulirana emisija, na znatno dužem putu, postigne veliki kvantni prinos foton. Zrcala visoke reflektivnosti omogućuju da se taj prinos umnogostrući pa izlazne snage lasera postižu nevjerljivne intenzitete i monokromatičnost. To je u znatnoj mjeri pojednostaljeno kod lasera na optička vlakna u kojima je aktivno sredstvo smješteno u samu jezgru optičkog vlakna, a optičko pumpanje se vrši kroz omotač većeg indeksa loma.

Početak lasera

Rubinski laser sa uskim snopom i spektralnim sastavom od dvije komponente na valnoj duljini od 694,3 nm nije imao tako široku primjenu iz nekoliko razloga. Prvo bio je pulsnog karaktera i ne dovoljno dobre monokromatičnosti. Jedan od najranijih i najšire populariziranih lasera bio je He-Ne laser, pri čijem radu atomska fizika električnih izboja dolazi do punog zamaha. To je ujedno bio i prvi laser s postojanim intenzitetom, vrlo uočljive crvene boje (632,8 nm) s kojim se moglo krenuti u u mnoštvo pravaca fundamentalnog i primjenjenog istraživanja. Ideja da se atomi helija selektivno pobuđuju u metastabilne atomske razine, koje kao spremišta energije, sudarnim prijenosom energije, neprestano održavaju naseljavanje bliskih visokopobuđenih razina atoma neon-a. Sa tih razina se onda slijevaju lavine fotona u niža energijska stanja. Dva paralelna zrcala omogućuju da se formira rezonator unutar kojeg se omogućava nagomilavanje istovrsnih fotona od kojih jedan manji dio prolazi kroz jedno od zrcala. Vrlo slična ideja o rezervoaru energije protegnula se na helij-kadmij laser (442 nm i 325 nm) i svakako na CO₂ laser, na valnoj duljini od 10,6 μm, gdje ulogu spremnika energije preuzimaju molekule dušika pobuđene u dugoživuće prvo pobuđeno vibracijsko stanje. Dušikov laser na valnoj duljini od 337 nm, kojeg je zaista bilo relativno lako izraditi u laboratoriju ili kod kuće, omogućio je široko rasprostiranje laserske

spektroskopije, jer se koristio kao optička pumpa za kompaktne lasere s organskim bojama, kojima se valna duljina mogla neprekidno mijenjati unutar određenog spektralnog intervala.

Osim linearnih rezonatora posebno se ističu razne vrste prstenastih rezonatora, naročito Sagnacov prstenasti rezonator, i u najnovije vrijeme posebno se ističu mikrorezonatori s nizom fantastičnih svojstava.

Od svih do danas pronađenih vrsta lasera samo je nekoliko postiglo zavidnu tehnološku i tehničku zrelost u istraživanjima i primjeni, posebice u medicini.

Najvažnije vrste lasera

Postoje razne podjele lasera i laserskih sistema na plinske, tekuće i lasere na čvrstim tijelima. Plinski laseri opet mogu biti u uvjetima ioniziranog plina ili plazme. Nadalje laseri rade kontinuirano ili pulsno, a ti pulsevi opet mogu trajati kratko ili ultra kratko, a sa svakim novim tehničkim ili tehnološkim detaljem otvara se pregršt do tada neslučenih primjena.

S diskretnom valnom duljinom imamo He–Ne, He–Cd, Ar⁺ i Kr⁺ lasere, Nd:YAG, CO₂, CO, N₂, rubinski laser, eksimerski lasere (XeCl, ArF, KrF), Cu (CuBr) i Au lasere, te kemijski laser kada se pomiješaju H₂ i F₂ reaktivni plinovi.

S promjenjivom valnom duljinom imamo dye laser (organske boje), Ti:safir laser, aleksandritni laser, poluvodičke laserske diode. Optički parametarski oscilator (OPO) i neke druge laserske naprave omogućuju koherentnu generaciju promjenjive valne duljine i sve se više koriste u laserskoj fizici i tehnici.

Spomenimo nekoliko najvažnijih vrsta lasera, koji se i danas intenzivno razvijaju.

Rentgenski laseri

Kada se najsnažniji laseri energije od 1 J po pulsu, a repeticije pulseva od 100 Hz upere na metu od metala dolazi da isparavanja ioniziranog materijala i njegove daljnje pobude u visoko pobuđena stanja. Neka su od tih stanja u visokoioniziranim ionima znatno više naseljena nego neka puno niža stanja u istom ionu. Kod takvih trenutnih uvjeta postignuta inverzija naseljenosti dovodi do laserske akcije u rentgenskom području elektromagnetskog spektra. Valne duljine ispod 100 Angstrema već su dostignute i tehnika se dalje razvija priličnom brzinom. Na primjer na valnoj duljini od 13.9 nm postiže se snaga od 0.1 mW uz 30 % efikasnosti konverzije i trajanje pulsa manje od jedne piko sekunde. Nastojanja da se kratkotrajnim električnim izbojem u uskoj kapilari dobije rentgenski laser s „mekanim“ fotonima uspješno su obavljena prije više od deset godina na Državnom Sveučilištu u

Coloradu. Daljnja istraživanja s kapilarnim izbojima možda će omogućiti relativno jeftinu verziju rentgenskog lasera za primjenu u kemijskoj katalizi.

Petavatni laseri (fuzija, akceleratori čestica)

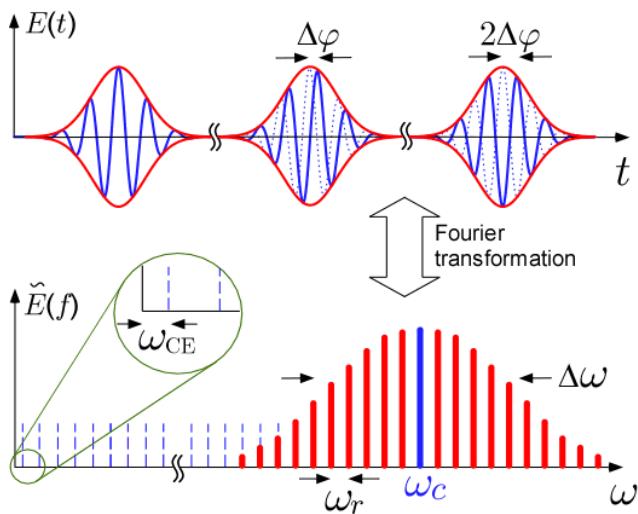
Trenutno se na nekoliko mesta grade, ili su već dovršeni, izuzetno moći laserski sistemi, koji će nadjačati sve dosadašnje lasere. Postoji sasvim opravdana mogućnost da će se s tim laserskim sistemima ostvariti kontrolirana laserska fuzija. Još bolje će se moći u posebnim izvedbama izraditi laserski akceleratori elementarnih čestica, čime će se moći vršiti neki eksperimenti posve novog karaktera u usporedbi s dosadašnjim akceleratorima.

Najsnažniji laseri danas su najbolnija tema, jer se od njih i najviše očekuje, posebno kada se ima u vidu kontrolirana laserska fuzija, koja zapravo još nije postignuta u praktičnom smislu.

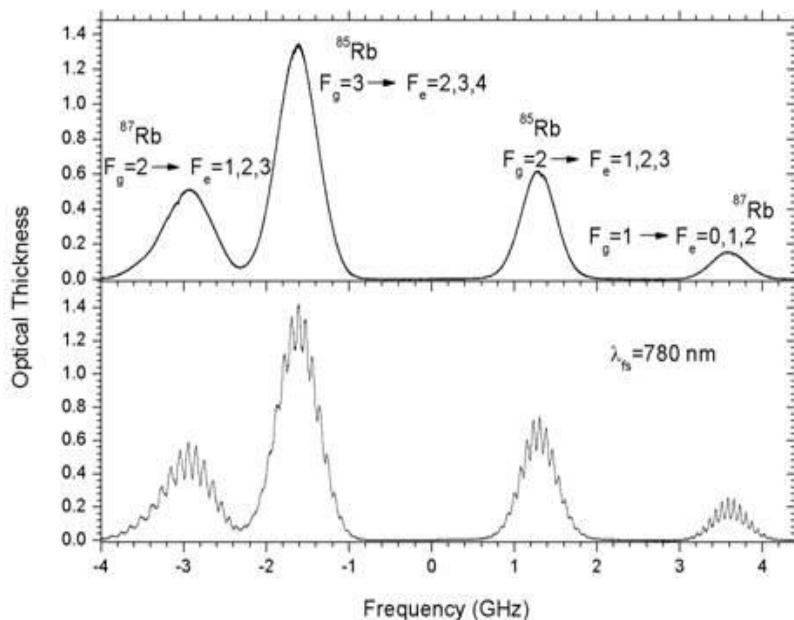
Ultrabrizi laseri

Unutar laserskog rezonatora može opstojati više stojnih valova različitih frekvencija (modovi ili načini titranja elektromagnetskih valova). Kada se svi modovi unutar optičkog rezonatora sinhroniziraju (mode-locking) nastaju ultrakratki pulsevi. Sinhronizacijom otprilike 10^5 - 10^6 modova nastaje ultrakratki puls trajanja od oko 100 femtosekundi, te spektralne širine oko 10 nm.

Nobelovu nagradu za 2005. godinu dobili su John Hall i Theodor Haensch, za visoki doprinos u preciznim mjeranjima gdje su primjenili femtosekundni laserski frekventni češlj. U vremenskom prikazu frekventni češlj se sastoji od niza kratkih titraja posve jednake anvelope, no unutar anvelope električno polje titra višom frekvencijom, a faza tog titranja se mijenja od pulsa do pulsa. Ta uzastopna promjena faze je konstantna i u frekventnom prikazu tog optičkog češlja imamo sve aktivne laserske modove. Medusobna udaljenost tih modova je

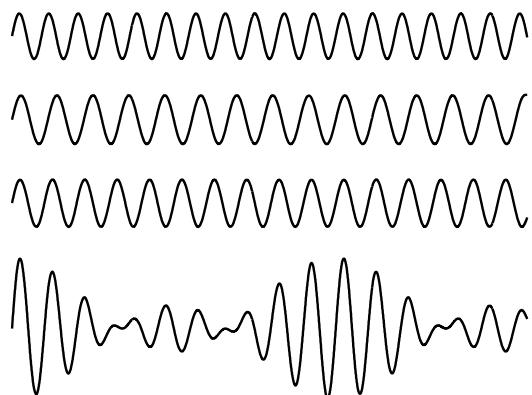


Postojana i iznosi $c/2L$, gdje je c brzina svjetlosti, a L razmak između zrcala rezonatora. $2L$ je put koji foton prolaze pri jednom obilasku rezonatora. Na Institutu za fiziku u Zagrebu dijelovi tog frekventnog češlja opaženi su na jedinstven način tako da se djelovanje optičkog frekventnog češlja putem optičkog pumpanja odrazilo na raspodjelu brzina, što se rječito vidi na slici dolje. Gornji dio slike prikazuje hiperfinu strukturu rubidijevih izotopa 85 i 87 s uobičajenim kompozitnim Dopplerovim profilom, a donji dio slike prikazuje „nazubljene“ profile rezonantnih spektralnih linija. Razmak između šiljaka točno odgovara razmaku laserskih modova u tom spketalnom području valne duljine od 780 nm.



Ultraprecizna mjerena s optičkim frekventnim češljem

Nastajanje kratkih pulseva prikazano je na slici dolje, gdje su zbrojena samo tri moda lasera, kada se dobije udar svakih $2L/c$ sekundi. Kao da foton u svim modovima zajedno vrše ophodnju laserskog rezonatora i svaki puta kada nahrube na jedno od zrcala s nešto manjom refleksivnošću izlaze van kao niz pulseva u vremenu.



Kod frekventnog češlja najvažnije je bilo odrediti takozvanu offset frekvenciju, što je vrlo uspješno učinjeno početkom 21 stoljeća, što je u krajnjoj liniji dovelo do podjele polovine Nobelove nagrade između upornih laserskih istraživača John Hall-a i Ted Haensch-a. Bilo koja frekvencija u tom intervalu može se izraziti slijedećom relacijom:

$$f = nf_r + f_o$$

gdje je n cijeli broj, a f_o ima vrijednost između nule i f_r . Dvostruko veća frekvencija (na drugom kraju oktave) dana je s izrazom:

$$F = 2f = 2nf_r + f_o.$$

Ako se sada frekvencija f udvostruči pomoću posebnog nelinearnog kristala (kakav se, na primjer, koristi u zelenim laserskim pokazivačima) dobiva se:

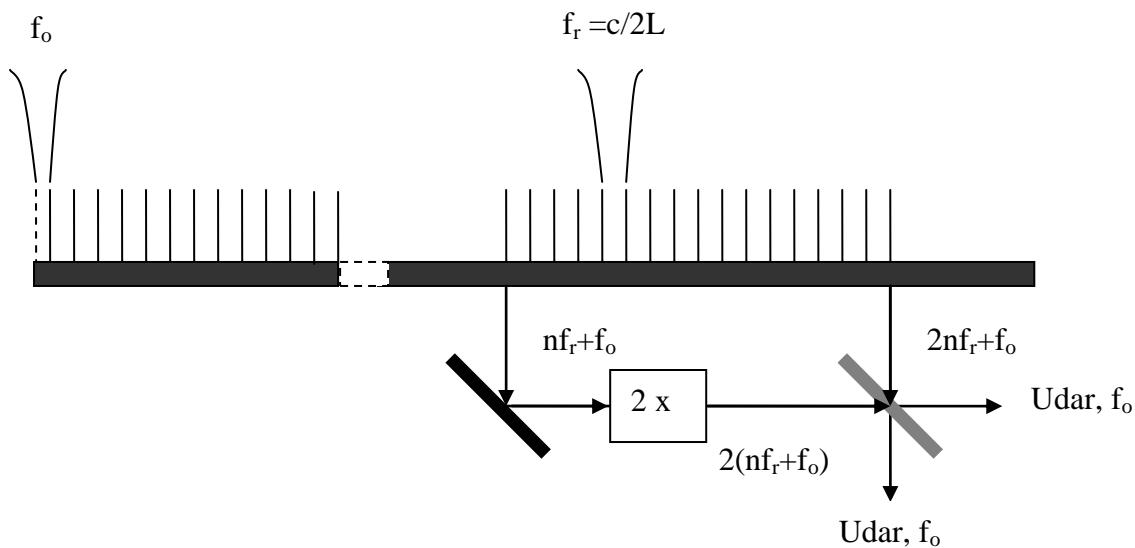
$$2f = 2nf_r + 2f_o$$

Kada se F i $2f$ pomiješaju u određenom mikrovalnom elektroničkom uređaju, mogu se na izlazu dobiti razlike frekvencija F i $2f$:

$$2f - F = 2nf_r + 2f_o - 2nf_r - f_o = f_o$$

i time se vrlo precizno određuje mala veličina f_o . Bilo koja frekvencija se sada može s vrlo visokom točnošću odrediti, korištenjem sličnog uređaja za miješanje raznih frekvencija. Kada se sve usporedi s najtočnijim frekvencijama cezijevog atomskog sata, postiže se jednostavna povezanost mikrovalnog i vidljivog spektralnog područja s istom točnošću, koja time dosiže fantastičnih 15 znamenaka. Današnja je potreba da ta točnost bude i za još dodatnih tri reda veličine veća.

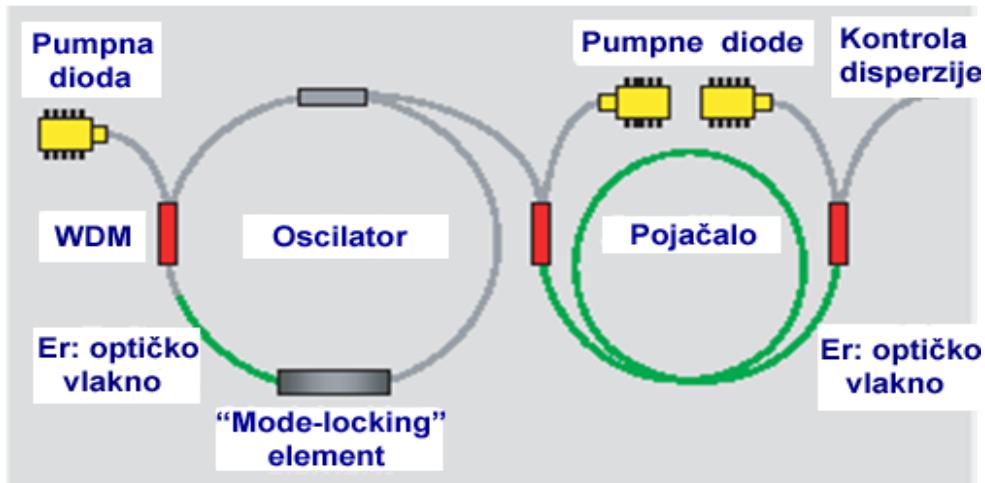
:



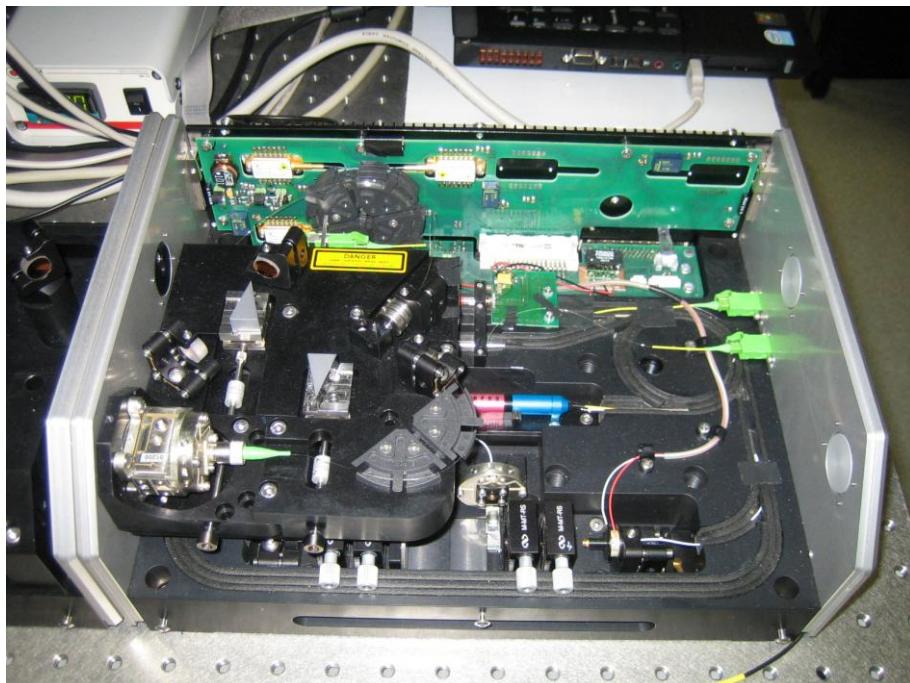
Shematski prikaz femtosekundnog lasera na optička vlakna

Laseri na optička vlakna

Za razliku od običnih lasera kod kojih su optički rezonatori linearne u jednoj, dvije ili tri dimenzije s mehaničkim i optičkim elementima poraspoređenim u prostoru i fino podesivim pomoću vrlo preciznih mikrometarskih vijaka, laseri na optička vlakna izvedeni su, gotovo u potpunosti, u jednoj dimenziji. Poluvodički laser koristi se kao optička pumpa čija se bujica fotona uvodi u staklasti omotač optičkog vlakna većeg indeksa loma. Ti fotoni lako prodiru u jezgru optičkog vlakna koja je izrađena od posebnog stakla dopiranog erbijem, neodimijem ili nekim drugim elementom koji se može optički pumpati uz uspostavu inverzije naseljenosti na nekim laserskim spektralnim prijelazima. Jedan takav složeni laser prikazan je shematski na slici dolje, a odmah ispod je i slika takvog jednog lasera koji se koristi na Institutu za fiziku u Zagrebu. Takav laser ima tri poluvodičke laserske pumpe, od kojih jedna služi za pumpanje oscilatorskog kruga, a druge dvije laserske diode optički pumpaju lasersko pojačalo, a sve na valnoj duljini od 1.5 mikrona.



Shematski prikaz složenog lasera na optička vlakna



TOPTICA laser na optička vlakna

Optičke telekomunikacije

Optička vlakna pružaju velike mogućnosti u prijenosu informacija na daljinu, koja zapravo obuhvaća cijelu Zemljinu kuglu, prolazi oceanskim dnom i provlači se pored postojećih telefonskih kablova. Valne duljine od 1,3 i 1,5 mikrometara najčešće se primjenjuju. Jedna ima najmanje gubitaka, a druga najmanje iskrivljava signale na većim udaljenostima. Pulsni laseri s modulacijama kraćim od pikosekunde mogu ultrabrzno oblikovati poruke u digitalnom obliku. Možda je najvažnije da se mogu slati mnogobrojne

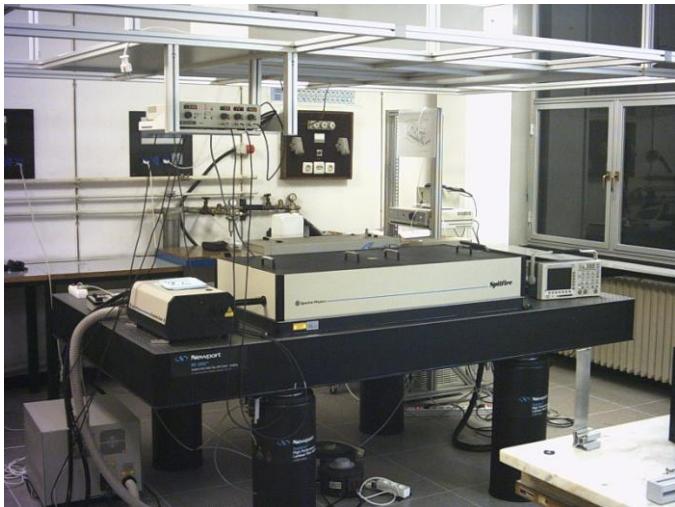
poruke istovremeno, bez ikakvih međusobnih smetnji. Multipleksnost prijenosa informacija optičkim kablovima po nekoliko valnih duljina, njihovo stapanje i razdvajanje razvilo se do neslućenih visina.

Postavlja se pitanje, da li se poruke mogu slati s velikom sigurnošću da ih nitko neće moći prisluškivati. I tu se razvila nevjerljiva laserska tehnika, koja se osniva na najdubljim osnovama kvantne mehanike. Optičke telekomunikacije su možda najživlje područje razvoja laserske tehnike svakako povezane s čudesnim svojstvima optičkih vlakana najrazličitije vrste.

Atosekundni laseri

Atosekundni laseri predstavljaju posve novi laserski sistem u kojem je sinhronizacija na poseban način generiranih viših harmonika od najveće važnosti. Broj tih viših harmonika može dosezati i nekoliko stotina višekratnika osnovne frekvencije pobudnog lasera, pa se proteže prema visokim frekvencijama elektromagnetskog zračenja sve do rentgenskog područja. Početkom devedesetih godina prošlog stoljeća nekoliko je grupa proučavalo generaciju viših harmonika. Osnovna se laserska zraka fokusira na atome i pri tome se događa trenutna višefotonska ionizacija bilo direktno bilo procesom tuneliranja, kada električno polje ubrzano raste prema vršnim vrijednostima u središtu gigantskog pulsa. Nakon vršne vrijednosti polje brzo promijeni svoj smjer i izbačeni elektron se vraća prema ishodnom ionu nevjerljivo ubrzanim u električnom polju velikih vrijednosti. Takav elektron ponovno se veže za matični ion i stvara se opet neutralan atom. No netom prije konačnog zahvata elektron oslobođa ogromnu energiju u obliku koherentnih elektromagnetskih valova frekvencije f , $2f$, $3f$, ... Nf . Superpozicija svih tih valova izuzetno širokog intervala frekvencija sintetizira ultrakratki puls s trajanjem od svega nekoliko stotina atosekundi.

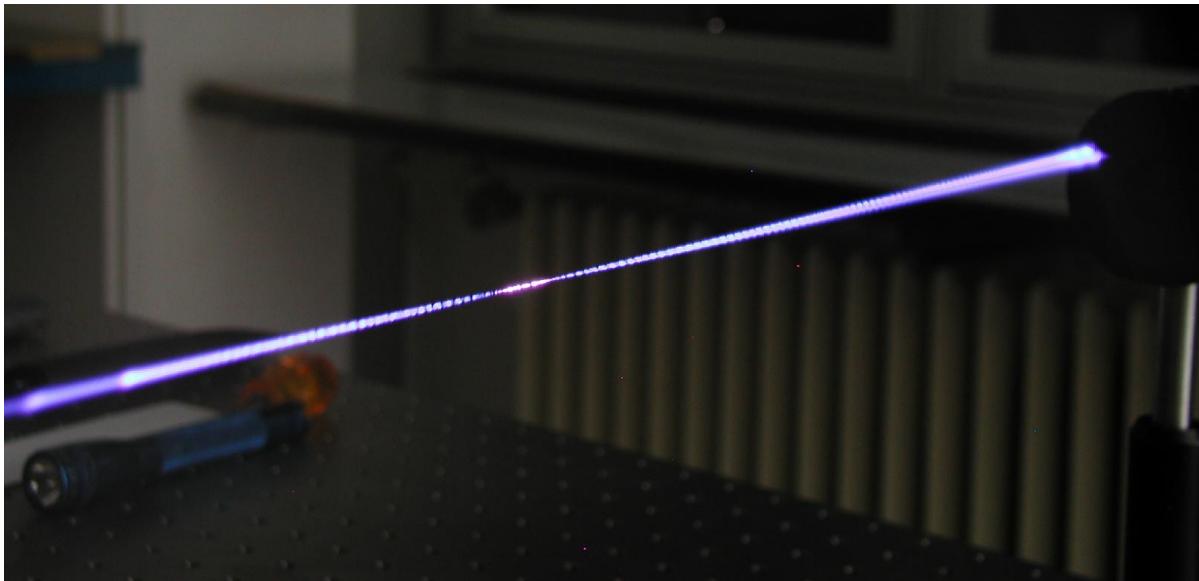
Prirodno je zapitati se čemu bi tako kratki pulsovi uopće mogli služiti. No odgovor su dali sami istraživači već 2002 i 2003 godine, kada su visoko specijaliziranim eksperimentima ušli u trag dinamici elektrona u tzv. Augerovom efektu. To znači da su uspjeli u vremenu pratiti kako jedan vezani elektron predaje svoju energiju drugom vezanom elektronu pri čemu dolazi do ionizacije atoma. Napredak novih tehnika stvaranja visokih harmonika zajedno s njihovom harmonijskom sintezom predstavlja plodnu tlo za burni razvoj atosekundne fizike.



Femtosekundni laserski sistem od oscilatora i pojačala na Institutu za fiziku u Zagrebu



Millennia-Tsunami sistem za sinhronizaciju laserskih modova u femtosekndne pulseve



Kada femtosekundni laserski snop iz laserskog pojačala od 10 GW obasja brzo pomicući papir dobije se slika pojedinačnih pulseva razmakačih jednu mili sekundu

Lasersko oružje

Nije tajna upotrebe lasera u vojne svrhe. Naravno, za djelovanje laserskog efekta na daljinu smeta atmosfera u kojoj ima vodene pare i ugljičnog dioksida, pored ogromne količine dušika i kisika. Prostiranje snžnih laserskih snopova, pogotovo ako su kolimirani u uske prostorne „kapilare“, nailazi na prepreke koje stvara laserski snop sam. Na određenim mjestima gustoća fotona prelazi prag za višefotonsku ionizaciju, što pokreće stvaranje lavine ioniziranih filamenata, koji raspršuju laserski snop i poništavanju njegovu razornu moć na daljinu. Posve druga je situacija izvan dosega atmosfere Zemlje, gdje se definitivno mogu voditi takozvani „Zvjezdani ratovi“. Na Zemlji laseri će se više upotrijebljavati kao upozorenje da je određeni objekt pod iluminacijom lasera, kada bi mogao uslijediti „pravi“ napad bilo klasičnim oružjem ili ipak sa snažnjim laserom (možda s nekog umjetnog satelita u Svemiru).

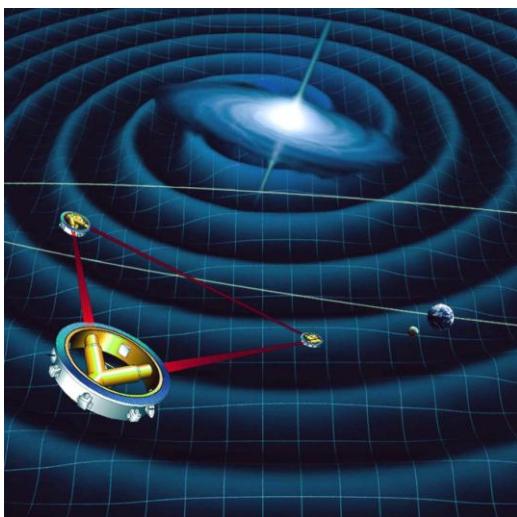
Michelsonov interferometar s ultrastabilinim laserima za detekciju gravitacionih valova

Gravitacijski valovi su velika zagonetka današnje fizike, a da li će eksperiment na Zemlji ili u bliskom svemiru njih zaista otkriti ostaje nam dočekati u bliskoj budućnosti. Nekoliko istraživačkih grupa izradilo je ogromne Michelsonove interferometre sa zrcalima obješenim u zrakopraznom prostoru. Gravitacijski valovi koji nastaju, na primjer, vrtnjom dvojnog sistema gigantskih zvijezda, mijenjaju prostor-vremenski kontinuum i tako brzinom svjetlosti dolaze i na Zemlju. Okomiti krakovi Interferometra različito će reagirati na

promjene prostora i to bi se moglo opaziti, premda se zahtjeva točnost od $1:10^{21}$. Hoće li biti dovoljno entuzijazma i finansijske potpore za potpuno izvođenje ovih poduhvata vidjet će se kroz nekoliko godina.



Krakovi Michelsonovog interferometra dosežu nekoliko kilometara



Planira se opservatorij za gravitacijske valove u Svemiru

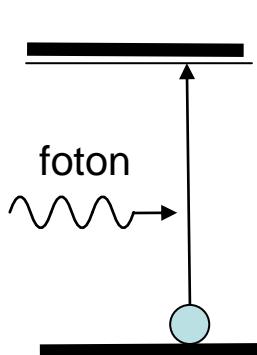
Hlađenje atoma laserom i stvaranje ultrahladnih molekula

Prijenos impulsa fotona na atom i neposredna posljedica laserom hlađeni atomi zadržani u magnetskoj boci, zapravo je također bila predskazana u radu Alberta Einsteina iz 1917. godine.

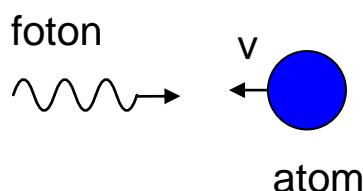
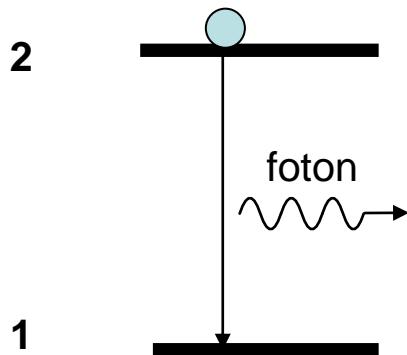
Najniže postignute temperature su spuštene nešto ispod 1 nK (nano Kelvina!), što zaista praktički odgovara apsolutnoj nuli (-273°C). Materija na tim temperaturama poprima sasvim novi oblik i počinje se u makroskopskom smislu očitovati ponašanje atoma cjelobrojnog spina – Bozona odnosno polu cjelobrojnog spina – Fermiona. Bozoni imaju svojstvo da mogu obitavati u jednom istom stanju, dok to kod Fermiona ne dolazi u obzir

zbog Paulijevog principa. Na temperaturama od svega nekoliko desetaka nK atomi-Bozoni se „urušavaju“ u isto makroskopsko kvantno-mehaničko stanje, koje je određeno „magnetskom bocom“. To stanje opisuje se kao Bose-Einsteinova kondenzacija. Kada se promatra hlađenje metodom isparavanja dva oblaka ultrahladnih atoma litija, gdje u jednom obliku imamo Bozone satavljene samo od ^7Li atoma, a u drugom obliku imamo Fermione od ^6Li atoma, onda se makroskopski opaža sažimanje oblaka ultrahladnih ^7Li atoma, dok je to u ultrahladnom obliku sazdanom od ^6Li atoma spriječeno Paulijevim principom blokiranja. Ovakva karakteristika fermionskog oblika privukla je brojne istraživačke grupe, koje su nastojale upariti po dva ^6Li atoma u Cooperove parove, koji time postaju Bozoni, pa se s takvim oblikom može postići Bose-Einsteinova kondenzacija. Takav prijelaz između BEC i BCS stanja materije, je i danas jedan od najzanimljivijih problema atomske i molekularne fizike.

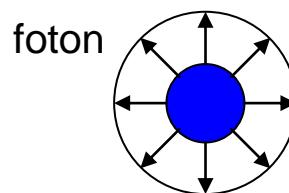
Apsorpcija



Spontana emisija

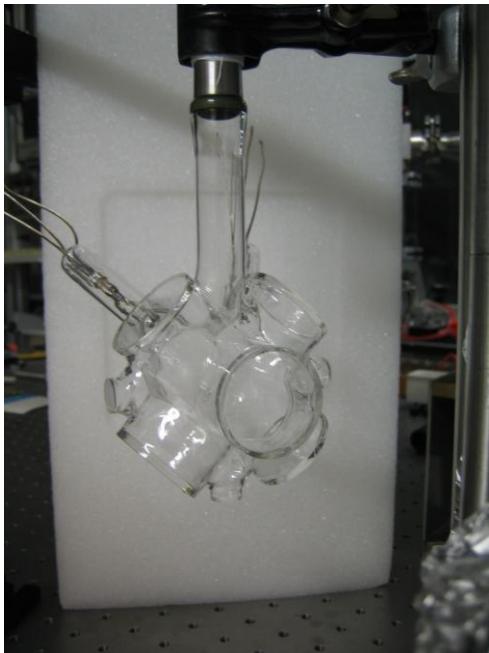


Prijenos impulsa fotona na atom

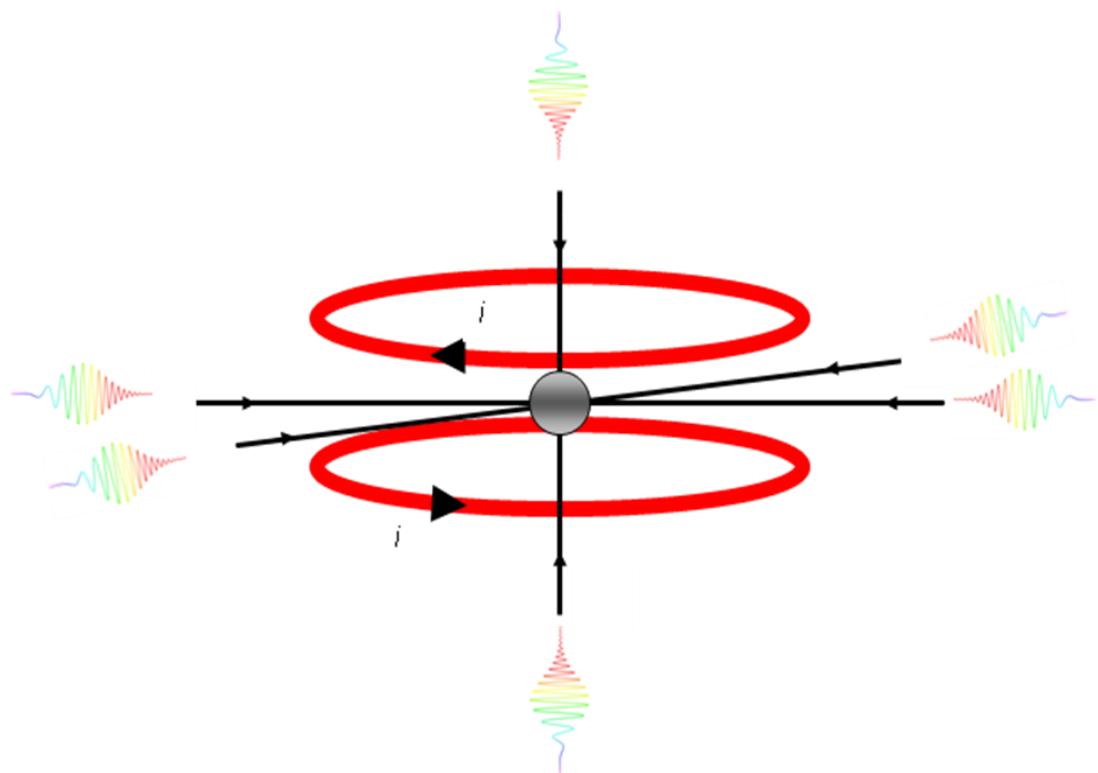


Atom se usporava: $v - \Delta v$

Naizmjenična apsorpcija i spontana emisija omogućuje smanjivanje brzine atoma za Δv . Ovisno o manjoj ili većoj energiji apsorbiranog fotona može doći u tom ulančanom procesu do usporavanja ili do ubrzavanja atoma.



Staklena kiveta za lasersko hlađenje atoma rubidija



Shema hlađenja atoma s femtosekundnim laserskim pulzvima.

Fotokemija – koherentna kontrola kemijskih reakcija i strukture molekula.

Jedan posve novi trend u fotokemiji i fotofizici pojavio se u devedesetim godinama prošlog stoljeća, kada sed postavilo pitanje optimalne koherentne kontrole kemijskih reakcija.

Kod toga je dotadašnja primjena ultrabrzih femtosekundnih lasera bila neposredno izlaganje smjese plinova uz očekivani rezultat fotokemijske promjene. Budući da ultrakratki pulsovi imaju vrlo široki spektralni sastav, zbog Heisenbergovih relacija neodređenosti za energiju i vrijeme, A. M. Weiner je došao na ideju da oblikuje laserske pulseve tako da u frekventnoj domeni djeluje na amplitudu i faze pojedinih spketalnih komponenata koristeći prostorni svjetlosni modulator. Shema tog uređaja prikazana je na slici, gdje laserski snop prvo upada na optičku rešetku, koja se nalazi na fokalnoj udaljenosti cilindrične leće, koja prvi ogib pralaleno usmjerava na prostorni svjetlosni modulator. Taj je napravljen od niza piksela s tekućim kristalima, kojima se indeks loma (za faznu modulaciju) može kontinuirano mijenjati podešavanjem odgovarajućeg napona na svakom pikselu. Kako na svaki piksel dolazi različita boja razložene svjetlosti, tako se i razlika u fazi susjednih boja može proizvoljno podesiti. Kako indeks loma uzrokuje različitu brzinu svjetlosti kroz sređstvo, to znači da se različite boje koje prolaze kroz različite piksele prostiru različitim brzinama. Nakon izlaska iz prostornog modulatora svjetlosti snopovi se ponovno fokusiraju na drugu optičku rešetku i odatle se ogiblju svi u istom smjeru. Taj novi snop svjetlosti ima posve drugačiju vremensku ovisnost i kažemo da smo obavili vremensko oblikovanje pulsa (pulse shaping) laserske svjetlosti. Od najveće važnosti je mogućnost da se indeks loma svakog piksela može nezavisno podesiti, što omogućuje praćenje konačnog rezultata eksperimenta u ovisnosti o raspodjeli indeksa loma po pikselima. Ovdje nam se otvara nova mogućnost pronalaženja optimalne raspodjele indeksa loma za najbolju vrijednost eksperimenta. U tu svrhu se koristi genetički ili evolucijski algoritam promjene raspodjele indeksa loma po pikselima, što nakon desetak i više generacija rezultira u optimalnoj vrijednosti tražene varijable u eksperimentu.

Lasersko utjecanje na hranu

Jednog će se dana djelovanjem femtosekundnih lasera posebno oblikovanih pulseva moći utjecati na poticanje povoljnijeg stvaranja antioksidanata prisutnih u različitim prehrabbenim artiklima. Razni vitamini, bioflavonoidi, karotenoidi i slično mogli bi se poticati odgovarajućim laserskim zračenjem proizvesti u količinama, koje bi u tjelesnom metabolizmu u znatnoj mjeri uklonili poguban utjecaj oksidanata.

Laerska mikroskopija

Optička mikroskopija je uz pomoć lasera doživjela nekoliko zamjetnih poboljšanja. Kao prvo treba spomenuti konfokalnu mikroskopiju koja skenira uzorak u sve tri dimenzije,

koristeći fluorescenciju nekoliko vrsta lasera različitih valnih duljina za pobudu molekula u uzorku. Pri tome molekule same mogu biti izazvane na fluorescenciju, ili se uzorku dodaju razne organske boje koje se nakupljaju u određenim djelovima uzorka. Uz brojne pogodnosti ovakove skenirajuće mikroskopije, ima i nedostataka, koji se barem dijelom mogu ukloniti pomoću multifotonske mikroskopije. Kod te metode se koriste organske boje koje za pobudu na fluorescenciju koriste dva ili tri istovrsna fotona. Kako u tom slučaju fluorescencija u vidljivom području spektra dolazi iz sasvim uskog fokusa lasera, tada skeniranje dovodi do stvaranja posve oštре slike. Naravno za multifotonu mikroskopiju najčešće se koriste femtosekundni laseri s Ti:safir kristalima, premda u novije vrijeme Er.YAG dopirana optička vlakna predstavljaju najpogodniji izbor. Multifotonska i konfokalna mikroskopija su danas možda najvažniji oblici tehnika za istraživanje živih stanica. Uz njih se intenzivno razvija mikroskopija s četverovalnim miješanjem. Kod svega toga obilno se koriste laserske pincete za uhvat i stabilizaciju mikroobjekata, laserske škare za presjecanje proteinskih ili DNK molekula na određenim lokacijama.

Medicina

Rezanje kostiju pulsnim CO₂ laserom vrlo uspješno se provodi u laboratorijima Prof. P. Heringa na Sveučilištu u Duesseldorfu. Računalom vođeni fokusirani laserski snop može obrezati koštano tkivo bilo kojeg oblika traga rezanja, kao što je, na primjer, prikazano na slici dolje. Kada se grudni koš prereže na takav način, kosti se relativno lako razdvoje i nakon bypass postupka mogu se opet sastaviti, a zarastanje je znatno brže i bezbolnije. Nadajmo se da će takva operacija uskoro postati rutinska u cijelom svijetu.



Femtosekundnim laserima mogu se izvoditi sve operacije kao i s laserima znatno dužih pulseva, ali se mehanizam interakcije kod rezanja, ablacijske ili zavarivanja materijala bitno razlikuje od ranije upotrebe lasera. Na primjer rezanje metalnih ploča nanosekundnim laserom ostavlja grubi trag uslijed toplinskog zagrijavanja, dok upotreba femtosekundnog lasera ne ostavlja termalne tragove, jer je interakcija s materijalom izuzetno brza i svodi se na efikasnu ionizaciju atoma ili molekula i ablacijsku materijala. Osim rezanja, moguće je i bušenje mikro i nano rupica u raznim tankim slojevima, koji opet imaju fantastična svojstva pri prolazu

laserske svjetlosti kroz takve male rupice. Odmah se nameće ideja o primjeni femtosekundnih lasera u stomatologiji

Krajem 2007 godine objavljeno je kako se djelovanjem posebnog femtosekundnog lasera, niskog intenziteta, može se postići inaktivacija virusa, čime se otvara mogućnost kontrole mikroorganizama u tijelu. Vjeruje se da laser uzrokuje stimuliranje Raman aktivnih vibracijskih titranja. Uzorci virusa obasjavani su nizovima femtosekundnih pulseva, trajanja od 80 femto sekundi, prosječne snage od 40 mW tijekom deset sati. Pri tome su stanice u okruženju ostale nepromijenjene. Takva selektivnost ne može se postići dosadašnjim metodama, a najvažnije je da se odgovor imunog sistema ne pojavljuje, jer je inaktivacija virusa mikromehanička.

Stomatologija

Posve je prirodna neposredna primjena raznolikih lasera u stomatologiji. Prvenstveno je zanimljivo djelovanje snažnijih lasera na zubnu caklinu i dentin. Istraživači su *in vitro* proučavali djelovanje kontinuiranih i pulsnih lasera na bušenje ili rezanje zubnog materijala. Nd:laser ili Er:YAG laser primjenjeni su najčešće za djelovanje na zubnu caklinu. Promatrane su promjene čak uz pomoć elektronskog mikroskopa. Značajno je kako se djelovanje femtosekundnog lasera na caklinu i dentin u potpunosti istaklo nasuprot nanosekundnih pulsnih lasera ili lasera kontinuiranog djelovanja. Priroda ultrabrzog procesa ablacije cakline omogućila je izuzetno oštре rubove izbušenog zuba. Na žalost, femtosekundni laseri su još uvijek isuviše skupi za širu upotrebu u stomatologiji.

Nasuprot tome laserska fotopolimerizacija kompozitnih materijala pokazala je krajem prošlog stoljeća znatno povećanje stupnja polimerizacije (Meniga phd), pa čak i smanjenje stezanja polimeriziranih ispuna uz neznatno povišenje temperature prilikom fotopolimerizacije (Zrinka, Alena). Pojava plavih supersjajnih svjetlećih dioda u prethodnoj dekadi zasjenila je široku upotrebu plavih lasera, pa je danas posve uobičajeno u stomatološkim ordinacijama susretati vidjeti raznolike modele fotopolimerizatora sa svjetlećim diodama. Situacija se donekle mijenja jer plavi i ljubičasti laseri također postaju sve jeftiniji i posve je moguće očekivati njihovu široku primjenu u fotopolimerizaciji. To se još u detalje mora istražiti i usavršiti, posebno aspekt sigurnosti pri radu s plavim laserom.

Digitalni mini laboratorijski s integriranim mikro-laserima.

Mikrofluidika u kombinaciji s majušnim ali moćnim laserima omogućuje fotokemijske analize i sinteze, koje se još nedavno nisu mogle ni zamisliti. Laboratory on the chip je jedna od najnovijih razvojnih namjera svjetskih laboratorijskih. Vrlo izazovna i uzbudljiva nastojanja

da se do nedavno veliki laboratiriji mogu gotovo u potpunosti zamjeniti mikro dimenzijama smještenim na malom prostoru. Razvoj nano tehnologije i hibridnih metamaterijala omogućiti će izradu posebnih senzora i analizatora. Kod mnogih takovih mikro laboratorijskih nastojati će se izvesti poptuna medicinska dijagnoza za prvi pristup pacijentima. Mnoge funkcije mikrochip laboratorijskih moguće su i naročitom primjenom mikrolasera. To je jedno posve novo područje, koje se sve brže razvija, a koristi mikro rezonatore, koji mogu znatno obogatiti svojstva lasera, posebno vezano uz ostvarenje malenih femtosekundnih lasera velike repeticije i širokog spektra optičkog frekventnog češlja. Takvi laseri će omogućiti simultanu analizu kemijskih sastojaka u izuzetno kratkom vremenu, a sve lokalizirano na mjestu gdje potrebno izvesti analizu. Time će se uštedjeti na vremenu i materijalu, a također i na utrošenoj energiji. Sinteza i fotosinteza novih molekula i novih materijala će koristiti bioložima kod proučavanja složenih procesa u živim stanicama. Naravno i medicina će profitirati mogućnostima dijagnoze na licu mjesta, a primjena u industriji i kontroli okoline će također uvelike dobiti na efikasnosti djelovanja. Veličina mikro laboratorijskih kreće se od par kvadratnih milimetara do svega nekoliko kvadratnih centimetara. Znalačka upotreba MEMS-a (Mikro Elektro Mehanički Sustavi) biti će primjenjena u budućim Lab-on-a-Chip napravama.

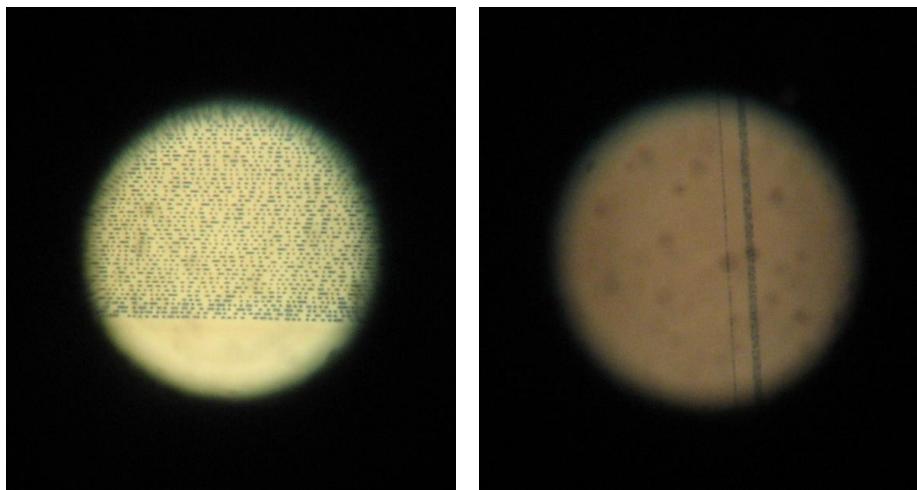
CD, DVD, blue-ray ili HVD



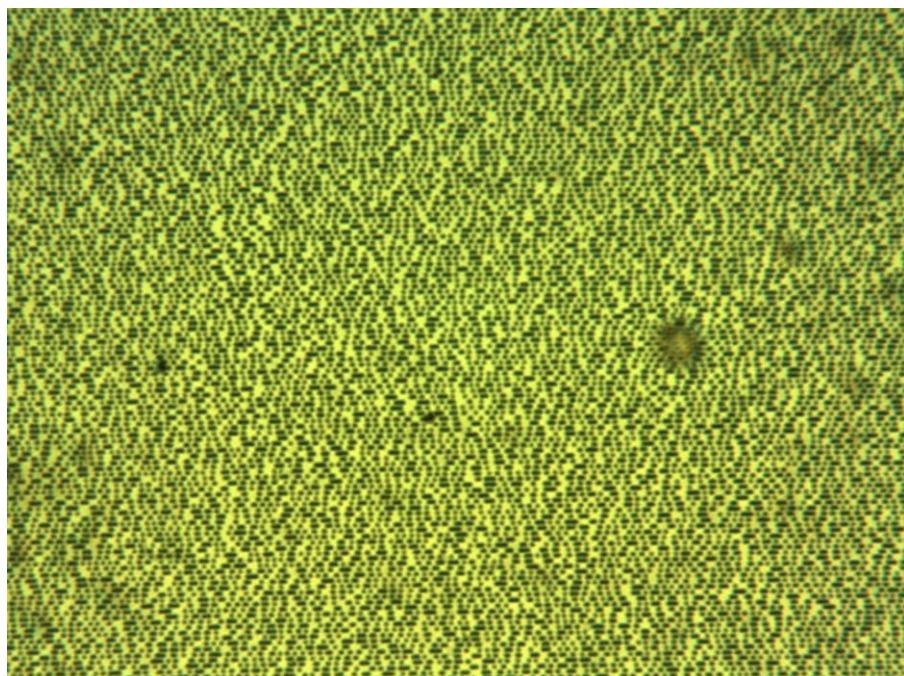
Osim što se gomila količina informacija može pospremiti na optičke diskove, moguće je s njima izvesti nekoliko zanimljivih pokusa iz klasične optike. Ako se običan crveni laserski pointer uperi na brazde kompaktnog optičkog diska odbijesak će biti nevjerojata. Osim neposredne refleksije, koja se odvija po poznatom Newtonovom zakonu refleksije pojaviti će se ogibni maksimumi s jedne i druge strane takozvane nulte laserske zrake. Ja sam

ih s crvenim laserom izbrojio oko pet sa svake strane. Kada se umjesto crvenog isti pokus izvede sa zelenim laserom broj ogibnih maksimuma se još poveća. S plavim laserskim pointerom se broj ogibnih maksimuma još više poveća, tako da su po cijelom prostoru poput gigantske lepeze. Zadržimo li sve ove laserske pointere a umjesto običnog CD-a uzmemu DVD optički disk, tada se događa vrlo zamjetna promjena ogibne slike. Broj ogibnih maksimuma se smanji u izvedbi pokusa s bilo kojom valnom duljinom laserskog pointerja. To svakako dolazi otud što je gustoća zapisa spirala gušća kod DVD-a nego u slučaju CD-a. Nedavno su se pojavili HD-DVD ili blue-ray DVD (BD) optički diskovi. Kod njih je gustoća spiralnog zapisa toliko gusto raspoređena da se s crvenim laserskim pointerom uopće ne može proizvesti niti prvi ogibni maksimum. Taj se pojavljuje tek kod zelenog, plavog odnosno ljubičastog laserskog pointerja. Naravno kod svih ovih demonstracija u pozadini leži jednadžba optičke rešetke gdje valna duljina i sinus kuta ogiba stoje u vrlo čvrstoj relaciji.

Natjecanje između HD-DVD-a i blue-ray DVD-a završeno je 2008. godine u Las Vegasu, kada je Toshiba najavila svoje odustajanje od daljnje utrke u razvoju i primjeni HD DVD formata. Ova pobjeda Sonyeve opcije ne označava kraj zanimljive utrke u razvoju novih tehnologija optičkih memorija, jer se sada intenzivno razvija HVD (Holographic Versatile Disc), s kapacitetom do 3.9 TB (Terabajta) što je za oko 160 puta više nego najnoviji BD. Trenutna tehnologija optičke pohrane podataka snima 1 bit po pulsu, a HVD alijansa se nada unaprijediti efikasnost do 60.000 bita po pulsu. **Holografski višenamjenski disk (Holodisk ili HVD)** je napredna optička disk tehnologija koja je u fazi istraživanja i koja će povećati mogućnost smještaja raznovrsnih podataka, bolje i od Blu-ray optičkog disk sistema. Koristi se tehnika zvana kolinearna holografija. Visoka gustoća je moguća približavanjem tragova kod snimanja: 100 GB kod odvajanja od 18 mikrometara, 200 GB kod odvajanja od 13 mikrona, 500GB kod odvajanja od 8 mikrona i maksimalni smještaj 3.9 TB za širinu traga od 3 mikrometra na disku od 12 cm. Sistem koristi dva lasera, jedan zeleni laser valne duljine od 532 nm i izlazne snage od 1 wata, što je ogromna snaga za običnog korisnika. Drugi laser je crvene boje valne duljine od 650 nm i koristi se kao referentni snop.



Pogled na dio CD-a i DVD-a kroz mikroskop uz povećanje od 500 puta



Pogled na CD kroz mikroskop uz povećanje od 500 puta

Optički satovi i precizna mjerena

Današnji optički satovi obećavaju točnost od $1:10^{17}$, što znači gubitak ili dobitak jedne sekunde na milijardu godina. Vrijeme je uvjek zanimalo sve ljude, a u fizici zauzima posebno mjesto precizno mjerjenje intervala vremena. To igra fundamentalnu ulogu u teoriji relativnosti, kako onoj specijalnoj tako i u općoj varijanti, što ima veliki utjecaj razvoju kozmologije. Precizni optički satovi igraju najvažniju ulogu u satelitskoj navigaciji i određivanju položaja ljudi i objekata na Zemljinoj kugli (GPS). Jednako je važno i mjerjenje promjene konstante fine strukture u vremenu što zasada iznosi $(-1.6 \pm 2.3) \cdot 10^{-17}/\text{godina}$, pa

zasada možemo reći da je to zaista konstanta. Ipak istraživači se nadaju da će točnost optičkih satova ubrzo doseći $1:10^{18}$, a tada će se možda moći uočiti i neke fine promjene u fundamentalnim konstantama u fizici. Vjeruje se da će tu visoku točnost doseći optički satovi na bazi iona aluminija.

Zaključak

Kada su pitali Faradaya kakvu svrhu i upotrebnu vrijednost imaju njegova istraživanja u elektrici i magnetizmu odgovorio je da nezna, ali da je sasvim moguće da će se jednom od toga ubirati porez! Na početku se smatralo da je laser rješenje u potrazi za problemom - "a solution in search of a problem", no danas je problema sve više, a laser je još uvijek dobrodošlo rješenje za mnoge od tih novih problema. Porodici već postojećih lasera svake godine se priključuje nekoliko novih vrsta lasera koji će zasigurno omogućiti nove i neslućene primjene u mnogobrojnim ljudskim djelatnostima. Nove mogućnosti primjene lasera će se i dalje pojavljivati, posebno u područjima od najveće važnosti za budućnost čovječanstva. To je prvenstveno zdravlje čovjeka i osiguranje njegovih potreba za energijom. Ipak, možda će to biti vezano uz uspjeh razvoja kvantnog računanja s femtosekundnim laserima i hibridnim nanonapravama izrađenim femtosekundnim laserima. Također ne smiju se zaboraviti optičke komunikacije s ultrabrzim laserom koje će produžiti ovu zanimljivu evoluciju lasera i njegovih primjena.



Einstein je otišao s obzorja svjetske godine fizike, ali cjelokupna ostavština te živopisne godine živi među nama i dalje u nastojanju da se približavanje fizike novim naraštajima učini što lakšim, uzbudljivijim i razumljivijim.