

OPTIČNA PINCETA IN USTVARJANJE ULTRAKRATKIH OPTIČNIH SUNKOV VISOKIH INTENZITET, NOBELOVA NAGRADA ZA FIZIKO 2018

NATAN OSTERMAN

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani
Institut »Jožef Stefan«

PACS: 01.75.+m, 42.55.f, 42.60.v, 42.62.b

Artur Ashkin, Gérard Mourou in Donna Strickland so dobitniki Nobelove nagrade za fiziko 2018 za svoje prelomne izume v fiziki laserjev. V prvi polovici članka je orisana zgodovinska pot do sodobne optične pincete, njeno delovanje in uporaba pri raziskavah, v drugi polovici pa opišemo metodo CPA (»chirped pulse amplification«) za ustvarjanje ultrakratkih optičnih sunkov visokih intenzitet ter navedemo uporabo in trenutne rekorde sodobnih sunkovnih laserskih sistemov.

OPTICAL TWEEZERS AND GENERATION OF HIGH-INTENSITY, ULTRA-SHORT OPTICAL PULSES, NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2018

Artur Ashkin, Gérard Mourou and Donna Strickland were awarded the 2018 Nobel Prize in Physics for their groundbreaking inventions in laser physics. A historical pathway to the modern optical tweezers, its operation and use in research are outlined in the first part of the article, whereas in the second part we describe the chirped pulse amplification technique for creation of high-intensity, ultra-short optical pulses, as well as the use and current records of modern pulsed laser systems.

Nobelovo nagrado za fiziko leta 2018 so prejeli trije eksperimentalni fiziki za svoje »prelomne izume v fiziki laserjev«. Arthur Ashkin je dobil polovico nagrade za iznajdbo optične pincete in njene uporabe v bioloških sistemih, drugo polovico pa sta si razdelila Gérard Mourou in Donna Strickland za izum metode za ustvarjanje ultrakratkih optičnih sunkov visokih intenzitet [10].

Ashkin je bil rojen leta 1922 v New Yorku, leta 1952 pa je doktoriral iz jedrske fizike na Univerzi Cornell. Po doktoratu se je zaposlil v Bell Laboratories, kjer je ostal vse do upokojitve leta 1992. Nobelovo nagrado je prejel pri starosti 96 let in s tem postal najstarejši prejemnik v zgodovini nagrade. Kot zanimivost naj omenimo, da je Ashkin že deveti prejemnik Nobelove nagrade iz Bell Labs.

Gérard Mourou, rojen 1944 v Albertvillu, Francija, je doktoriral leta 1973 na univerzi Paris VI. Po doktoratu je svojo raziskovalno pot najprej

nadaljeval v Združenih državah Amerike, najprej na Univerzi Rochester, nato na Univerzi v Michiganu, leta 2004 pa se je vrnil v Francijo na ENSTA-Ecole Polytechnique v Parizu.

Donna Strickland, rojena 1959 v Guelphu, Kanada, je po diplomi iz inženirske fizike leta 1981 začela z doktoratom na Univerzi Rochester pod mentorstvom Mourouja. Še kot doktorska študentka je z mentorjem leta 1985 objavila svoj prvi znanstveni članek, za katerega je 33 let pozneje prejela Nobelovo nagrado. Po doktoratu leta 1989 je delala v Nacionalnem raziskovalnem svetu Kanade, v laboratoriju Lawrence Livermore, na univerzi Princeton, dokler se leta 1997 ni ustalila na Univerzi v Waterlooju v Kanadi.

Optična pinceta

Že v začetku 17. stoletja je astronom Kepler predlagal svetlobni tlak kot vzrok, da repi kometov vedno kažejo stran od Sonca. Svetlobni tlak je teoretično pokazal Maxwell leta 1873, v začetku 20. stoletja pa je bilo to eksperimentalno potrjeno. Pri tem je šlo za izjemo šibke tlake, saj virov svetlobe visoke intenzitete (tj. gostote energijskega toka) ni bilo na voljo. To je omogočil šele izum laserjev v 60. letih prejšnjega stoletja. Artur Ashkin je leta 1970 močno fokusiran laserski snop Gaussovega intenzitetnega profila usmeril na majhne dielektrične delce (npr. steklene mikrokroglice v zraku ali vodi) in opazil pričakovano pospeševanje delcev v smeri širjenja svetlobe zaradi t. i. *sipalne sile* oz. fotonskega tlaka [1]. Hkrati je ugotovil, da delce z lomnim količnikom, večjim od okolice, v prečni smeri glede na smer širjenja snopa t. i. *gradientna sila* vleče v smeri gradienta intenzitete, torej proti središču snopa. Da je delec lahko ujel na mestu, stran od sten eksperimentalne celice (žargonsko rečemo temu ujetje v 3 dimenzijah oz. 3D-ujetje), je moral zato uporabiti dva natančno poravnana laserska snopa, ki sta se širila v nasprotnih smereh. Sipalni sili obeh snopov sta se odšteli, gradientna sila pa je delec držala v gorišču snopov. Z enim samim laserskim snopom je bilo delce moč 3D ujeti samo s pomočjo gravitacije – če je bil primerno močan žarek usmerjen navpično navzgor, je gravitacija uravnotežila sipalno silo in delci so lahko optično levitirali.

Ashkin je področje raziskoval naprej in leta 1986 s sodelavci izdelal prvo enožarkovno optično past, s katero je v vodi lahko ujel dielektrične delce

velikosti od nekaj deset nanometrov do nekaj deset mikrometrov [3]. S premikanjem lege gorišča snopa so lahko premikali tudi v past ujet delec, zato je naprava kmalu dobila ime optična pinceta. Pri njej se laserski snop tipično Gaussovega intenzitetnega profila močno fokusira skozi mikroskopski objektiv z veliko numerično aperturo ($NA = n \sin \theta$, kjer je n lomni količnik okoliškega medija, θ pa kot pri vrhu stožca svetlobe, ki izhaja iz objektiva; tipična NA pri optični pinceti je okoli 1), zaradi česar na delec deluje močna gradientna sila, usmerjena proti gorišču snopa. Če je ta večja od sipalne sile, je delec stabilno ujet v 3D.

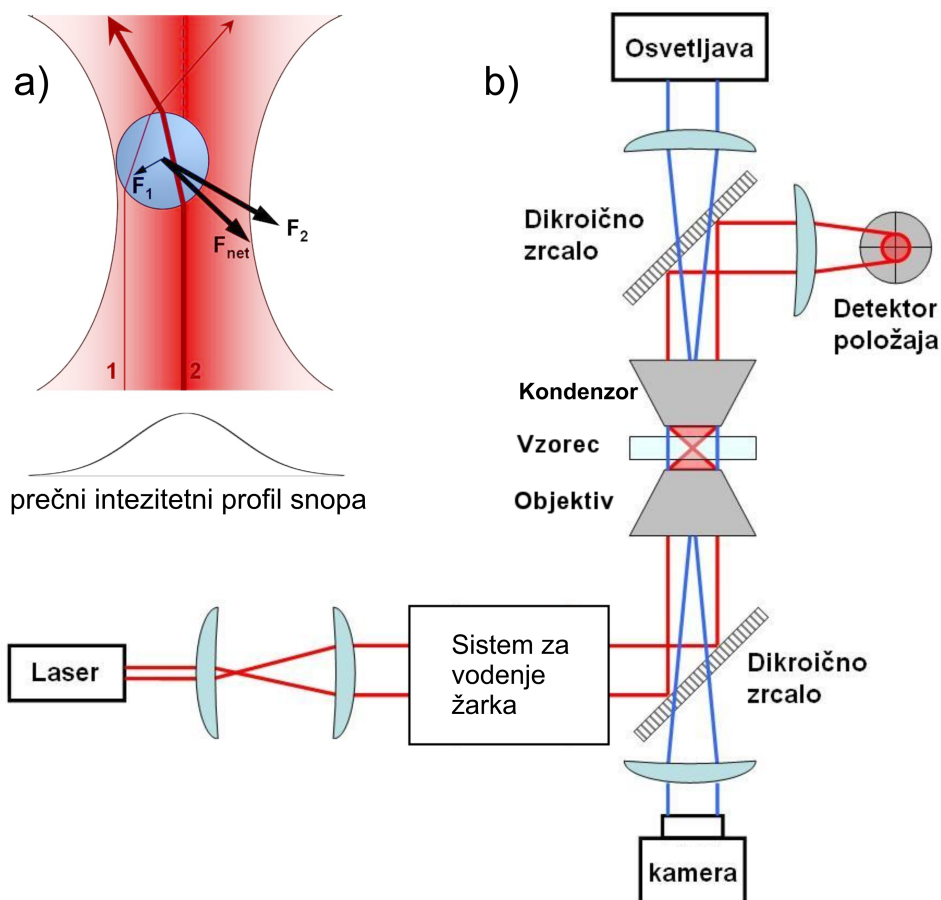
Poenostavljena shema optičnih sil na delec v optični pasti v približku geometrijske optike je prikazana na sliki 1a), kjer sta narisana dva žarka pri potovanju skozi dielektrično kroglico. Če se ta nahaja npr. levo od optične osi laserskega snopa, se centralni žarek z največjo intenziteto po dvojnem lomu odkloni v levo. Žarku se pri tem spremeni gibalna količina, zato na kroglico deluje sila v nasprotni smeri, torej proti optični osi.

Na splošno je gradientna sila posledica energije dielektrične snovi v električnem polju. Izračun sile je za poljubno velikost delca zahteven, če pa je delec znatno manjši od valovne dolžine laserske svetlobe (Rayleighov režim), ga lahko obravnavamo kot induciran električni dipol v električnem polju $\vec{E}$. Če zapišemo Lorentzovo silo $\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ na dipol $\vec{p} = \alpha \vec{E}$, pri čemer je α polarizabilnost delca, ki je odvisna od volumna delca ter lomnih količnikov delca in okolice, lahko z uporabo vektorske analize in ene izmed Maxwellovih enačb gradientno silo zapišemo kot $\vec{F} = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2$. Sila kaže v smeri gradienta intenzitete, torej proti gorišču laserskega snopa. Iz te enačbe je očitno, zakaj je za optično past potreben močno fokusiran žarek.

Uporaba optične pincete

Skupina pod vodstvom Stevena Chuja je optično pinceto uporabila za lovljenje in hlajenje atomov¹, Arthur Ashkin pa je hitro ugotovil, da je pinceta s svojo brezkontaktno naravo izjemno orodje za manipulacijo v bioloških sistemih. Za čim manjšo absorpcijo laserske svetlobe v vodi je začel uporabljati infrardeč laser in z njim najprej demonstriral lovljenje in manipulacijo

¹Za te prelomne eksperimente, pri katerih je sodeloval tudi Ashkin, je del Nobelove nagrade za fiziko leta 1997 dobil samo Chu, kar je bilo za mnoge kontroveržno.



Slika 1. Optična pinceta. a) Princip delovanja v geometrijski optiki. Žarkom, ki vpadajo s spodnje strani, se po dvojnem lomu spremeni smer in s tem gibalna količina. Prikazana sta obosni žarek (1) in centralni žarek (2) z največjo intenziteto ter sili F_1 in F_2 , ki delujeta na delec zaradi spremembe njunih smeri. Rezultanta sil F_{net} deluje proti gorišču snopa. b) Tipična eksperimentalna postavitve. Laserski snop se razširi, usmeri s sistemom za vodenje, nato pa z objektivom fokusira v ravnini vzorca, da nastane optična past. Lego delcev se določa s kamero ali s kvadrantno fotodiodo. Prirejeno po [9].

virusov in živih celic [2], nato pa pokazal tudi manipulacijo znotrajceličnih komponent.

Na začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja so v mnogih laboratorijih po svetu zgradili svoje optične pincete predvsem za raziskave bioloških sistemov. Pinceta namreč ne omogoča samo manipulacije, temveč tudi merjenje sil, ki delujejo na delec v optični pasti. Izkazuje se, da je velikost gradientne

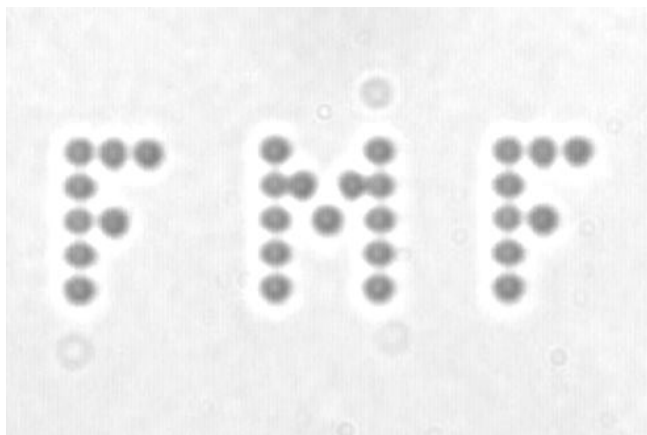
sile kar sorazmerna z odmikom delca od središča pasti, torej velja Hookov zakon $\vec{F} = -k\vec{x}$. Lego delca $\vec{x}$ se določi s kamero ali kvadrantno fotodiodo, za kvantitativno določitev sile pa je treba poznati še trdoto »vzmeti« k , kar dosežemo s predhodno kalibracijo optične pasti. S pinceto je mogoče meriti sile v območju od 0,1 pN do nekaj 100 pN, kar je ravno območje, v katerem je mnogo relevantnih sil v mikrobiologiji in biokemiji.

Za merjenje sil na nivoju posameznih (bio-)molekul, je treba te najprej pritrditi na ustrezne »opore«. To so po navadi steklene ali polistirenske mikrokroglice, katerih površino se ustrezno kemijsko pripravi, da se nanje veže želen tip molekul. Ta tehnika je npr. omogočila raziskave molekulskih motorjev, molekul, ki pretvarjajo kemijsko energijo v mehansko delo in so ključne za vse aktivno premikanje živih organizmov, od subceličnega nivoja do premikanja celotnega organizma. Na kroglico je tako mogoče vezati molekulo kinezina, motornega proteina, ki vleče tovor znotraj evkariontskih celic. Če se tako kroglico z optično pinceto prestavi do mikrotubula (znotrajcelični polimer, ki je neke vrste celična »cesta«), se kinezin pripne na mikrotubul in začne korakati, kar lahko opazimo kot diskretno premikanje kroglice. S pinceto je moč vleči kroglico tudi v nasprotno smer in tako ugotoviti, s kolikšno silo lahko omenjeni motorni protein vleče tovor.

Danes se optična pinceta uporablja predvsem za proučevanje posameznih biomolekul (npr. določanje odvisnosti sila-razteg pri DNK, RNK, polimerih pod različnimi pogoji), študije biomolekulskih procesov (npr. meritev adhezije med dvema bakterijama; opazovanje korakanja polimeraze RNK, ki v procesu transkripcije kopira DNK v mRNK), mikrorheologijo – merjenje mehanskih lastnosti mehkih snovi na mikronivoju, daleč najpogostejša uporaba pincete pa je natančna manipulacija in razvrščanje mikroobjektov.

Eksperimentalna postavitve

Shema tipične eksperimentalne postavitve optične pincete je prikazana na sliki 1b). Laserski snop se najprej razširi, nato pa se mu s sistemom za vodenje žarka spremeni smer. Preko dikroičnega zrcala, ki odbije lasersko, prepusti pa vidno svetlobo, se ga usmeri na objektiv. Ta snop sfokusira, kar v ravnini vzorca generira optično past, v katero se ujame delec, ki ima lomni količnik večji od okolice. Prepuščena laserska svetloba, ki jo zbere



Slika 2. Mikroskopska slika množice mikrometrskih polistirenskih kroglic v vodi, ki so ujetе v optičnih pasteh [8].

kondenzorska leča, preko dikroičnega zrcala potuje na detektor položaja, tipično je to kvadrantna fotodioda (QPD). Ker ujet delec deluje kot mala leča, njegovi premiki zunaj gorišča laserskega snopa spreminjajo razmerja svetlobe na segmentih QPD, iz česar je mogoče dobiti relativno lego delca glede na center optične pasti in iz tega izračunati silo na delec. Za mikroskopijo vzorca je potrebno opisanim elementom dodati samo še osvetlitev in kamero.

Mnogo eksperimentov zahteva uporabo več hkratnih optičnih pasti, kar se doseže z deljenjem laserskega snopa. Pri holografski optični pinceti računalniško ustvarjen hologram na prostorskemu modulatorju svetlobe (angl. spatial light modulator) vhodni snop razdeli v več snopov, ki imajo gorišča v poljubnih točkah, ki niso omejene na eno samo ravnino (tako je npr. mogoče ujeti mikrodelce v oglišča navidezne kocke). Druga vrsta deljenja snopa pa je časovno deljenje, pri katerem je snop za kratek čas usmerjen v prvo točko, nato v drugo, tretjo ... potem pa se zaporedje ponovi. Če je trajanje celotnega zaporedja kratko v primerjavi z difuzijskim časom ujetih delcev, nastane več kvazistatičnih optičnih pasti. Snop je mogoče usmerjati z ogledali (galvoskenjerji), kar je počasna in nenatančna varianta, ali pa z akusto-optičnimi deflektorji (AOD), ki omogočajo preklapljanje lege gorišča žarka s frekvenco reda 100 kHz in subnanometrsko natančnostjo. Na sliki 2 je prikazan rezultat takšne mikromanipulacije delcev: množica poli-

stirenskih kroglic v vodi, od katerih je vsaka ujeta v svojo optično past. V trenutku, ko pasti izklopimo, kroglice prosto difundirajo po tekočini, zato napis v nekaj sekundah izgine. Video posnetek si lahko ogledate na strani [8].

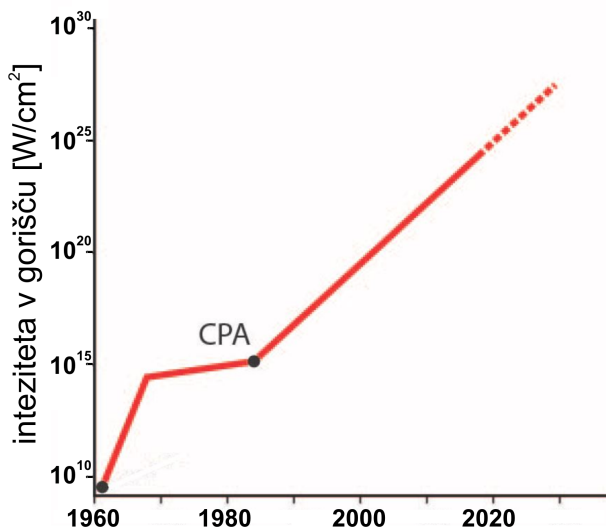
Optična pinceta v Sloveniji

V devetdesetih letih prejšnjega stoletja je bila optična pinceta še precej eksotičen znanstveni instrument, zato si je vsaka raziskovalna skupina morala pinceto zgraditi sama, kar je bilo časovno precej potratno. Okoli leta 2000 so se posledično na trgu pojavile prve komercialne pincete za resno uporabo. Približno ob istem času sta na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani raziskovalca dr. Igor Poberaj in dr. Dušan Babič dobila idejo, prostor in potrebna denarna sredstva za postavitev prve optične pincete v tem delu Evrope. Leta 2003 je njuna pinceta, ki se je raztezala na 3 m^2 optične mize in bila sestavljena iz IR-laserja (Nd-YAG, $\lambda=1064\text{ nm}$, $P=2\text{ W}$), sistema za vodenje in časovno deljenje snopa z AOD ter Zeissovega invertnega optičnega mikroskopa, prvič ujela mikrometrске steklene kroglice v vodi. Obiskovalci laboratorija so bili navdušeni nad delovanjem pincete, prav poseben interes pa so kazali za sistem za vodenje, zato sta leta 2004 omenjena raziskovalca ustanovila podjetje Aresis, d. o. o. in takoj uspešno prodala tak sistem. Kmalu so se pojavile tudi želje po izvedbi celotne optične pincete po sistemu »na ključ«, zato je podjetje razvilo tudi to in po desetletju in pol razvoja Aresis trenutno proizvaja in trži ene izmed najboljših optičnih pincet na svetu.

Zaradi omenjenih okoliščin imamo v Sloveniji kar nekaj optičnih pincet, ki jih uspešno uporabljamo. Dve pinceti sta v Laboratoriju za eksperimentalno fiziko mehke snovi na FMF, tri pincete na Odseku za fiziko trdne snovi Instituta Jožef Stefan in dve pinceti na Inštitutu za biofiziko Medicinske fakultete UL.

Metoda za ustvarjanje ultrakratkih laserskih sunkov visokih intenzitet

Theodore Maiman je leta 1960 demonstriral prvi laser. To je bil rubinski laser, ki je ob vsakem blisku črpalne bliskavice oddal približno milisekundo



Slika 3. Povečevanje intenzitete laserskih sunkov skozi čas.

trajajoč sunek rdeče svetlobe z valovno dolžino 694,3 nm. Od te točke je razvoj laserjev potekal v dveh smereh. Na eni strani je bila prisotna želja po frekvenčno ostrem kontinuiranem izvoru svetlobe, ki je potreben pri raznovrstnih meritvah (metrologija, spektroskopija), na drugem pa po kratkih in močnih laserskih sunkih. Slednje sta omogočili iznajdbi preklopa kvalitete laserskega resonatorja (angl. Q-switching) [6] in uklepanja faz (angl. Mode-locking) [5, 4].

V prvem desetletju laserja je energija sunka iz fazno uklenjenega laserskega oscilatorja z začetne vrednosti 1 nJ z razvojem laserskih ojačevalnikov narasla za pet velikostnih redov (slika 3), hiter razvoj pa se je po letu 1970 občutno upočasnili. Kratki sunki z že relativno nizko energijo imajo velike vršne intenzitete², kar poškoduje material ojačevalnika in druge optične komponente. Do poškodb pride zlasti zaradi nelinearnih procesov v

²Intenziteta oz. gostota svetlobnega toka $j = \frac{1}{2}nc_0\epsilon_0|E_0|^2$ je sorazmerna kvadratu amplitude jakosti električnega polja E_0 , hitrosti svetlobe v vakuumu c_0 , lomnemu količniku medija n in dielektrični konstanti ϵ_0 . Intenziteti svetlobnega toka s Sonca na Zemljinem površju $j = 1 \text{ kW/m}^2$ v praznem prostoru tako ustreza jakost električnega polja $E_0 = 868 \text{ V/m}$, laserju moči 1 W, sfokusiranemu na površino $1 \text{ }\mu\text{m}^2$, ustreza jakost $E_0 = 2,7 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

snovi, npr. samofokusiranja snopa zaradi Kerrovega pojava pri intenzitetah svetlobe okoli GW/cm^2 .

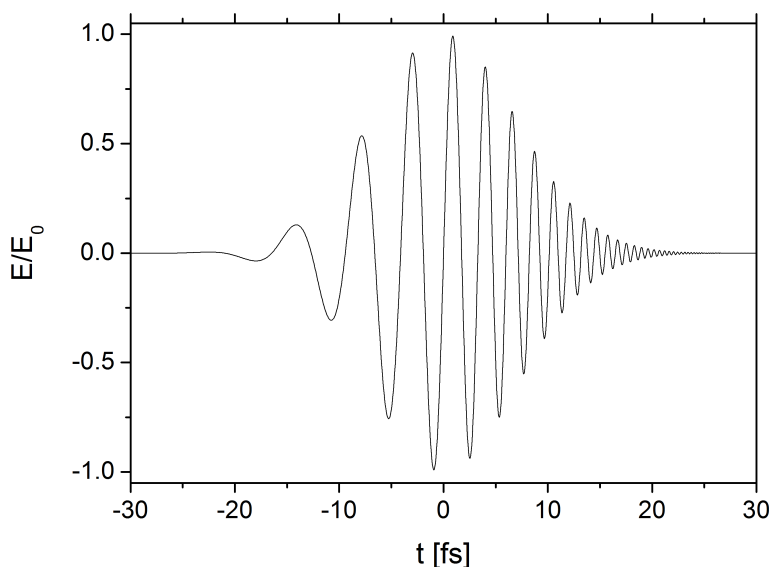
Visokoenergijske sunke z intenziteto pod pragom poškodb so v sedemdesetih in osemdesetih letih prejšnjega stoletja lahko dosegli le s povečevanjem premera laserskega snopa. Za to so bili potrebni veliki ojačevalniki, kar je laserske sisteme naredilo ogromne, drage in so zaradi počasnega ohlajanja ojačevalnikov omogočali zelo nizko frekvenco ponavljanja sunkov. Kot ekstremen primer lahko omenimo laboratorij Lawrence Livermore (Kalifornija, ZDA), kjer so na koncu sedemdesetih let prejšnjega stoletja začeli graditi laser Nova. Sestavljalo ga je deset 180 m dolgih žarkovnih linij s premerom ojačevalnikov približno pol metra in je nekajkrat na dan lahko ustvaril sunek dolžine 2 ns z energijo 100 kJ.

Tehnika CPA

Nov zagon razvoju kratkih laserskih sunkov visokih intenzitet sta leta 1985 omogočila Donna Strickland in Gérard Mourou z uporabo tehnike CPA (angl. chirped pulse amplification). Inspiracijo sta dobila iz radarske tehnologije, kjer so CPA uporabljali že od šestdesetih let. Zamisel je preprosta in elegantna: ultrakratek sunek se najprej razširi v času za nekaj velikostnih redov, s čimer se ustrezno zmanjša vršna intenziteta. Sunek se nato ojača, v zadnji fazi pa se sunek stisne nazaj na začetno dolžino, kar posledično prinese zelo veliko intenziteto.

Raziskovalca sta 150 ps trajajoč laserski sunek z energijo reda nJ iz fazno uklenjenega Nd:YAG laserja poslala po 1,4 km dolgem optičnem vlaknu. Zaradi normalne disperzije v vlaknu se je nizkofrekvenčni (rdeči) del sunka širil hitreje od visokofrekvenčnega (modrega) dela. Na izhodu iz vlakna sta posledično dobila 300 ps dolg čivk (angl. chirp), sunek, pri katerem se je – tako kot pri čivkanju ptičev – frekvenca spreminjala s časom (slika 4). V drugem koraku sta čivk ojačila v regenerativnem ojačevalniku Nd:steklo, da sta dosegla energijo 1 mJ, nato pa ga s kompresorjem z dvojno mrežico časovno stisnila na 2 ps.

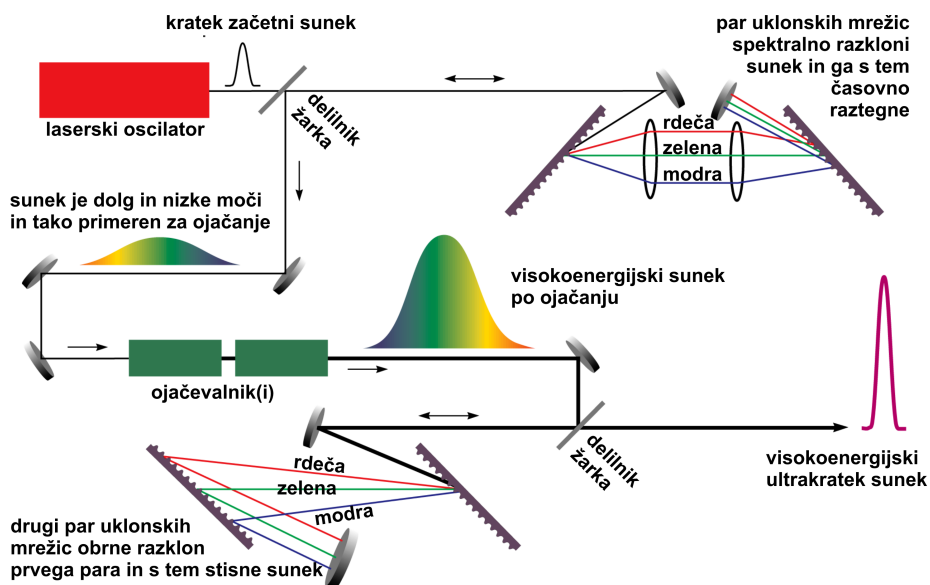
Dolgo optično vlakno za transformacijo kratkega sunka v dolg čivk ni zelo praktično, zato ga je kmalu nadomestil par uklonskih mrežic. Z njim so leta 1987 demonstrirali razteg sunka trajanja 85 fs na 85 ps in skrčitev



Slika 4. Časovna odvisnost relativne jakosti električnega polja pri 20 fs dolgem čivku.

nazaj na začetno dolžino [7] ter pri tem poudarili, da bo to v prihodnosti omogočilo laserske moči v območju petawattov. Takšna – danes standardna – konfiguracija CPA je prikazana na sliki 5. Ultrakratek sunek iz laserskega oscilatorja preko polarizacijskega delilnika žarka najprej potuje na prvi par uklonskih mrežic, ki sta postavljeni v obliki črke Λ . Na prvi mrežici se žarek razkloni, optika ga usmeri na drugo mrežico, ki deluje ravno obratno – različno usmerjene frekvenčne komponente spet skombinira v en žarek. Ta se v zrcalu odbije naravnost nazaj, tako da se proces razklona in kombinacije še enkrat ponovi. Pri potovanju sunka skozi tako postavljen par mrežic prepotuje rdeča svetloba manjšo pot od modre svetlobe, kar glede na to, da je hitrost širjenja svetlobe po praznem prostoru neodvisna od valovne dolžine, pomeni, da nizkofrekvenčne komponente (rdeči del spektra) v času prehitijo visokofrekvenčne komponente (modri del spektra). Rezultat je čivk, po času trajanja τ_c lahko do 10.000-krat daljši od vhodnega svetlobnega sunka.

Polarizacijski delilnik žarka čivk odbije in ga usmeri skozi enega ali več ojačevalnikov (Ti:safir, Nd:steklo ali optično parametrično ojačevanje v nelinearnem kristalu), pri čemer se mu energija poveča, a seveda tako,



Slika 5. Ustvarjanje ultrakratkih visokoenergijskih sunkov z metodo CPA.

da njegova vršna intenziteta j_c ostane pod pragom poškodbe ojačevalnikov. Ojačan črvk je na koncu pod kotom usmerjen na drugi par uklonskih mrežic, ki sta tokrat postavljeni vzporedno. Žarek se na prvi mrežici razkloni, druga mrežica pa komponente z različnimi frekvenčnimi komponentami usmeri tako, da padajo pravokotno na ogledalo. Posledično posamezne komponente potujejo nazaj po natanko istih poteh in se zato na prvi mrežici skombinirajo nazaj v en žarek. Pri opisanem procesu prepotujejo dolgovalovne komponente daljšo pot od kratkovalovnih, kar pomeni, da bi modri del spektra rdečega prehiteval v času, če bi na ta par mrežic prišel sunek, ki bi imel vse komponente sočasne. Pri tehniki CPA pa imamo opravka s črvkom, v katerem rdeči del spektra prehiteva modrega, zato se lahko z ustrezno nastavitvijo mrežic to prehitevanje kompenzira, tako da so vse komponente spet sočasne. Rezultat je ultrakratek sunek dolžine τ_p z vršno intenziteto $j_p = j_c \tau_c / \tau_p$.

Uporaba kratkih laserskih sunkov visokih intenzitet

Tehnika CPA je omogočila gradnjo kompaktnih laserskih sistemov z ultrakratkimi sunki velikih moči. Danes je moč direktno ustvarjati laserske sunke dolžine nekaj fs, kar je tako kratek čas, da v njem električno polje le nekajkrat zaniha. Kar se tiče moči, so bili sunki moči 1 PW prvič doseženi leta 1999, danes pa je na svetu že več kot 50 laserjev take moči. Trenutni rekord je 1 ps trajajoč sunek energije 2 kJ, torej moči 2 PW. Pri Pragi v okviru evropskega projekta Extreme Light Infrastructure gradijo laser 4 Aton z energijo sunkov 2 kJ in dolžino pod 150 fs, kar pomeni, da bo moč sunkov 10 PW. Laser bo lahko »ustrelil« en sunek na minuto. Načrtovana vršna intenziteta fokusiranega sunka reda velikosti 10^{23} W/cm² ustreza jakosti električnega polja 10^{14} V/m – za primerjavo, to je kar 200-krat več od električnega polja v vodikovem atomu pri Bohrovem radiju. Če je jakost električnega polja svetlobe primerljiva z jakostjo polja, ki v atomu veže elektrone, nastopi t. i. režim »močnega polja« atomske fizike. V tem režimu lahko atom ionizira s hkratno absorpcijo več fotonov, zato izbiti elektron odleti z ogromno kinetično energijo.

Sistemi na osnovi laserjev s CPA se uporabljajo tudi za ustvarjanje višjih harmonikov. Na ta način lahko ustvarimo sunke, krajše od 1 fs, kar omogoča raziskave dinamike elektronov znotraj atomov in molekul, ki poteka na attosekundni časovni skali. Laserska svetloba zelo visoke intenzitete lahko ustvari plazemski val za pospeševanje elektronov do velikih energij na kratkih razdaljah. V laboratoriju Lawrence Berkeley (ZDA) so s sunkom moči 0,3 PW pospešili elektrone do energije 4,2 GeV na razdalji 9 cm. V klasičnih linearnih pospeševalnikih, v katerih elektrone pospešuje radiofrekvenčno valovanje, je tipično povečanje energije 15 MeV/m, torej bi za 4,2 GeV potrebovali 280 m dolg pospeševalnik!

Laserji z visokointenzitetnimi ultrakratkimi sunki so razširjeni tudi v industriji in medicini, najpogostejša uporaba pa je za natančno ablacijo materiala. Zaradi kratkega trajanja sunka je segrevanje materiala minimizirano, zato je okolica interakcijskega volumna praktično nepoškodovana. Za primer, vrtanje 10 μ m luknje z 1 ps sunki v tanko plast zlata naredi stene luknje neravne na velikostni skali pod 100 nm. Če za isti namen uporabimo

100 ps sunke, so stene luknje neravne na mikrometrski skali, saj se med obdelavo okoliška kovina stali, tvori kapljice, nato pa se spet strdi.

V medicini so femtosekundni laserji zaradi brezkontaktne narave in ne-destruktivnosti okoliškega tkiva vedno bolj prisotni pri operacijah kratkovidnosti, dolgovidnosti ali astigmatizma očesne leče. Namesto s skalpelom pri metodi LASIK operater naredi režo v roženico z računalniško vodenim femtosekundnim laserjem, nato pa skozi nastalo odprtino z excimernim laserjem s fotoablacijo preoblikuje površino sredice roženice in tako spremeni njeno zakrivljenost ter s tem dioptrijo očesa. Zadnji dosežek na področju laserske operacije kratkovidnosti je metoda SMILE, pri kateri je uporabljen samo en femtosekundni laser. Ta v tkivo roženice vreže tanek okrogel disk primerne oblike ter v roženico napravi 4 mm dolgo režico, skozi katero operater disk potegne ven. S tem je dioptrija odpravljena, okrevanje pa še hitrejše kot pri operaciji LASIK.

LITERATURA

- [1] A. Ashkin, *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure*, Physical Review Letters **24** (1970), 156–159.
- [2] A. Ashkin in J. M. Dziedzic, *Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria* Science **235** (1987), 1517–1520.
- [3] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm in S. Chu, *Observation of a Single-Beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles*, Optics Letters **11** (1986), 288–290.
- [4] M. DiDomenico, *Small-Signal Analysis of Internal (Coupling-Type) Modulation of Lasers*, Journal of Applied Physics **35** (1964), 2870–2876.
- [5] L. E. Hargrove, R. L. Fork in M. A. Pollack, *Locking of He–Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation*, Applied Physics Letters **5** (1964), 4–5.
- [6] F. J. McClung in R. W. Hellwarth, *Giant Optical Pulsations from Ruby*, Journal of Applied Physics **33** (1962), 828–829.
- [7] M. Pessot, P. Maine in G. Mourou, *1000 Times Expansion/Compression of Optical Pulses for Chirped Pulse Amplification*, Optics Communications **62** (1987), 419–421.
- [8] *Laboratorij za eksperimentalno fiziko mehke snovi*, dostopno na tweezers.fmf.uni-lj.si/opticna-pinceta/, ogled 21. 12. 2018.
- [9] *Optična pinceta*, dostopno na: sl.wikipedia.org/wiki/Opticna_pinceta, ogled 21. 12. 2018.
- [10] *The Nobel Prize in Physics 2018*, dostopno na www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/, ogled 21. 12. 2018.