



S. Vdović* i N. Vujičić**

Institut za fiziku, Centar za napredne laserske tehnike (CALT)
Bijenička 46, 10 000 Zagreb

Nobelova nagrada iz fizike za 2018. godinu – svjetlosna igra objektima i manipulacija laserskim pulsevima***

O dobitnicima nagrade

Arthur Ashkin, Gérard Mourou i Donna Strickland ovogodišnji su dobitnici Nobelove nagrade iz fizike za njihova revolucionarna otkrića u području laserske fizike. Arthur Ashkin, sa svojih 96 godina, najstariji je dobitnik Nobelove nagrade, koju će podijeliti s prof. Gérard Mourouom s École Polytechnique u Francuskoj i prof. Donnou Strickland sa Sveučilišta Waterloo u Kanadi. Ashkin je dobio Nobelovu nagradu za otkriće optičke pincete u svrhu zarobljavanja i manipulacije česticama, atomima i živim stanicama. Mourou i Strickland podijelili su nagradu za razvoj tehnike pojačavanja laserskih pulseva – tzv. *Chirped Pulse Amplification* (CPA), koja je postala standardna tehnika za povećanje energije pulseva u femtosekundnim laserskim pojačalima. To je deveti put u posljednjih dvadeset godina da Švedska kraljevska akademija znanosti prepoznaje i nagrađuje znanstvene aktivnosti koje su izravno povezane uz lasere i njihovu primjenu u znanosti. Arthur Ashkin se intenzivno bavio istraživanjima u području nelinearne optike i laserske pincete, bio je prvi znanstvenik koji je razumio tlak zračenja, a njegov rad u tom području odnosio se na optičko hvatanje i manipuliranje malim dielektričnim česticama pomoću optičkih gradijentnih sila. Bio je prvi koji je promatrao optičke gradijentne sile na atomima, prvi je radio na tehnikama laserskog hlađenja atoma, prvi je opazio tzv. optičke melase te uhvatio atome u optičke stupice. Donna Strickland tek je treća žena (nakon Marie Curie i Marie Goeppert-Mayer) i jedina živa dobitnica Nobelove nagrade. Profesor Gérard Mourou iznimno je aktivan znanstvenik čiji je rad prepoznat i cijjenjen u cijelom svijetu zbog svojeg doprinosa u područjima elektronike, optoelektronike, arheologije i medicine. Osim ostaloga, idejni je začetnik europskog projekta *Extreme Light Infrastructure* (ELI),¹ čiji je cilj izgradnja laserskih sustava koji će svojim karakteristikama – intenzitetom i kratkoćom laserskog pulsa nadmašiti sve postojeće lasere.

Iako su laseri, od svojeg otkrića daleke 1960. godine na ovamo, postali naša svakodnevica, iako su sveprisutni u laboratorijima, medicinskim ordinacijama i industrijskim postrojenjima, njihov utjecaj na sveukupno ljudsko znanje i korist za čovječanstvo još uvijek se može nagraditi najvećim priznanjem u znanosti – Nobelovom nagradom. U nastavku teksta pokušat ćemo objasniti zašto je mogućnost kontrole gibanja objekata laserskim zrakama i mogućnost povećanja snage laserskih pulseva ostavila tako važan trag u znanosti i koje su sagledive i nesagledive posljedice tih otkrića.

Kako sa svjetlošću manipulirati materijom

Arthur Ashkin je još 1970. godine izučavao i objasnio utjecaj radijacijskog tlaka u laserskom zračenju na kretanje objekta. Glavni izazov u istraživanju optičkih sila bilo je nalaženje mehanizma



Slika 1 – Dobitnici Nobelove nagrade za fiziku 2018.: Arthur Ashkin, Gérard Mourou i Donna Strickland

kojim će se izbjeći zagrijavanje objekata koje, uslijed termalnog gradijenta, stvara silu čiji je učinak nekoliko redova veličina jači od sile uzrokovane tlakom zračenja. Ashkin je problem riješio obasjavanjem prozirnog, neapsorbirajućeg medija: mikrometarskih dielektričnih sfera uronjenih u vodu. Prilikom sudara fotona o neapsorbirajuću kuglicu dolazi do promjene količine gibanja fotona, koji rezultira impulsom sile. Dakle, svjetlost djeluje optičkom silom na objekte. Uz pomoć tog jednostavnog koncepta te uz pomoć osnovnih zakona geometrijske optike (zakona loma i zakona refleksije, koju zove defleksijom) matematički se izvodi dijagram sila za dvije prostorne udaljenosti od središta laserske zrake – za mjesto gdje je kuglica bliže središtu zrake i za mjesto gdje je kuglica dalje od središta laserske zrake. Laserska zraka ima, idealno, Gaussovu raspodjelu intenziteta, s najvećom vrijednošću intenziteta na osi zrake. Iz dijagrama sila koje djeluju na sferu, rezultanta sila dolazi kao rezultat loma i defleksije dvije zrake na različitim dijelovima zakrivljene plohe sfere, pri ulasku svjetlosti u sferu i prilikom izlaska iz sfere. Ta sila ima dvije komponente – komponentu sile koja ubrzava česticu prema središtu zrake, u smjeru povećanja intenziteta laserske zrake te komponentu sile koja usmjerava česticu u smjeru gibanja fotona, dakle od izvora zračenja. Upravo je takvo ponašanje eksperimentalno i opaženo: kada je laser bio isključen, sfere od lateksa su se gibale Brownovim gibanjem u posudi s vodom; u trenutku dok je laserska zraka prolazila kroz medij, sfere bi se počele usmjereno gibati – prema središtu (osi) laserske zrake – dakle u smjeru povećanja (*gradijenta*) intenziteta laserske zrake i u smjeru zrake.

Ashkin je ponovio eksperiment i za slučaj kuglica indeksa loma manjeg od vode: raspršio je mjehuriće zraka u mediju velike viskoznosti – 80 postotnoj vodenoj otopini glicerola. Pokazao je da se mjehurići zraka veličine otprilike 8 mikrometara kreću u smjeru prostiranja laserske zrake, no u smjeru udaljevanja od osi zrake. Rezultantna sila bila je usmjerena od središta laserske zrake, jer je lom svjetlosti na dodiru s plohom manjeg indeksa loma drugačiji nego u slučaju kuglica od lateksa, pa je i rezultantna sila drugačijeg usmjerenja. Tim eksperimentom pokazao je da se dielektrične kuglice indeksa loma većeg od indeksa loma vode kreću u smjeru povećanja (*gradijenta*) intenziteta (prema središtu zrake), dok se kuglice indeksa loma manjeg od indeksa loma otopine kreću u smjeru smanjenja intenziteta (od središta zrake) – u

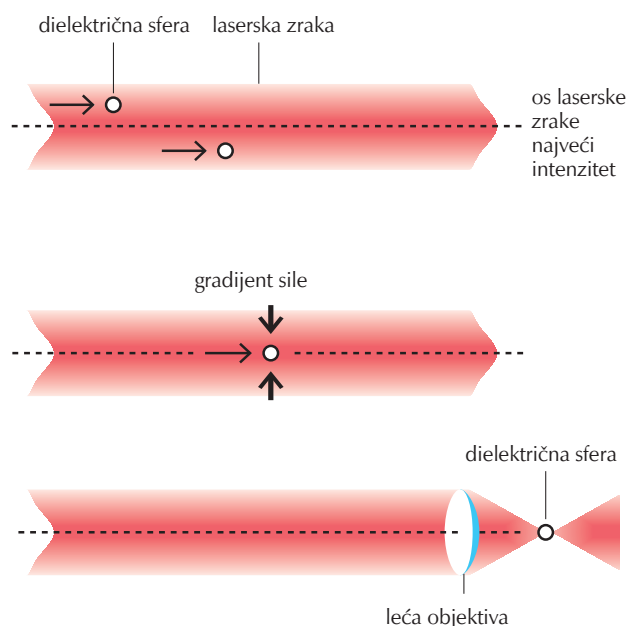
* Dr. sc. Silvije Vdović, e-pošta: silvije@ifs.hr

** Dr. sc. Nataša Vujičić, e-pošta: natasav@ifs.hr

*** Tekst je prethodno objavljen u skraćenom obliku na portalu ideje.hr, gdje je dostupan na poveznici: <http://ideje.hr/svjetlost-koja-zaustavlja-cestice-intenzitet-zracenja-usporediv-s-povrsinom-sunca-deveti-put-u-dva-deset-godina-nagrada-ide-istrazivanju-i-primjeni-lasera/>

smjeru *negativnog gradijenta*. Ashkin je pokazao da eksperimentalno opažena sila u smjeru prema središtu osi zrake i u smjeru prema naprijed dovodi do stvaranja pravog optičkog potencijala koji je rezultat činjenice da postoji tlak zračenja. Rezultate svojeg istraživanja objavio je u članku *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* iz 1970. godine, koji je objavio u časopisu *Physical Review Letters*.²

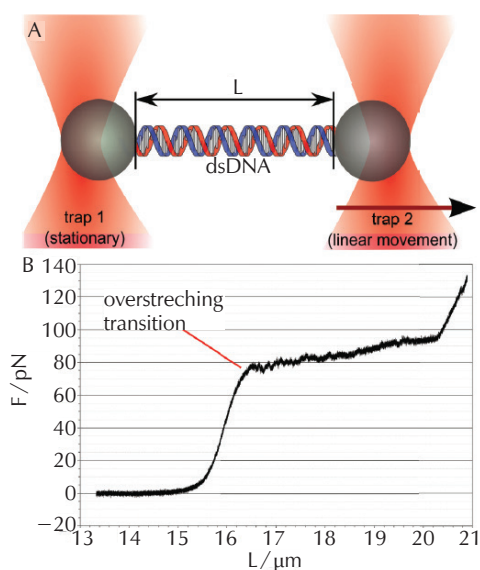
Ashkina je posebno zanimala primjena tog otkrića u atomskim sustavima, odnosno manipuliranje atomskim i molekulskim sustavima primjenom radijacijskog tlaka iz laserskog zračenja. Naime, atomi i molekule su po svojoj prirodi poprilično prozirni mediji. No, ukoliko ih se obasja zračenjem čija je frekvencija točno ugođena na frekvenciju atomskog prijelaza, udarni presjek za interakciju atoma s laserskom svjetlošću postaje deset milijuna puta veća od njegova geometrijskog presjeka. To znači da će atom apsorbirati svjetlost, foton, i dobiti moment u smjeru gibanja fotona. No, prilikom emisije fotona, fotoni se emitiraju nasumično u svim smjerovima, pa je ukupna sila na atom u smjeru prostiranja zrake. Ashkin je u tome vidio veliku mogućnost za primjenu u istraživanju i kontroliranju atomskih sustava i molekula, što se kasnije iskoristilo za lasersko hlađenje atoma u magneto-optičkoj stupci. Za demonstraciju prve magneto-optičke stupice za dobivanje hladnih atoma u submikrokelvinskom području Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i William Phillips dobili su Nobelovu nagradu iz fizike 1997. godine. Mnogi su smatrali da je Arthur Ashkin nepravredno zakinut jer je upravo mehanizam tlaka zračenja odgovoran za proces usporavanja atoma u optičkoj stupici. Možemo reći da je dodjelom Nobelove nagrade Arthuru Ashkinu 2018. godina ispravljena nepravda učinjena dva desetljeća ranije. Naime, Ashkin je godinama prije Nobelove nagrade za magneto-optičku stupicu surađivao s kolegom Stevenom Chuom na problemu optičke manipulacije sitnim dielektričnim česticama u polju fokusirane laserske zrake. U radu objavljenom u časopisu *Optics Letters*³ prvi put su demonstrirali i objasnili učinak fokusiranog laserskog zračenja na uhvat sitnih kuglica raspršenih u mediju nižeg indeksa loma (voda). U sličnom eksperimentu kao i prethodno opisanom, uveli su lasersku zraku u tekući medij, fokusirali je lećom objektiva i opazili da dielektrične kuglice ulaze



Slika 2 – Shematski prikaz načina rada tlaka zračenja te zarobljavanja čestice u fokusu laserske zrake. Ideja na granici sa SF da se uhvati objekt i zadrži na jednom mjestu pomoću svjetlosti, uz pomoć laserske pincete postala je stvarnost koja nam omogućava manipulaciju različitim objektima – od cijelih stanica do individualnih molekula. Preuzeto i prilagođeno iz ref. ⁴.

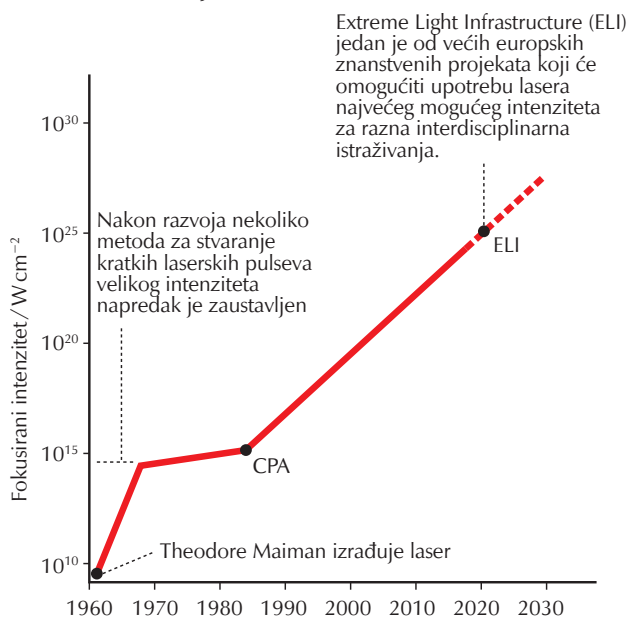
u žarište laserske zrake, no da se ne nastavljaju gibati u smjeru zrake, već da ostaju zatočene u tom žarištu. To je bila prva demonstracija optičke pincete. Razlog zarobljavanja čestica je činjenica da je prijenos impulsa raspršenog zračenja na uhvaćenoj kuglici takav da proizvodi silu čiji je rezultatni smjer u smjeru zadržavanja u žarištu zrake, odnosno takav da poništava učinak prijenosa impulsa fotona u smjeru zračenja. Na taj način čestica ostaje zarobljena u optičkoj pinceti. Svaki put kad žarište laserske zrake promijeni svoj položaj, zarobljena čestica prati taj pomak te ostaje i dalje čvrsto zarobljena u žarištu zrake. Na temelju tih spoznaja Chu je usmjerio svoj daljnji rad prema zarobljavanju i hlađenju atoma s laserima, što je rezultiralo spomenutom Nobelovom nagradom. Princip djelovanja tlaka zračenja i optičke pincete prikazan je na slici 2.

Ashkin je smatrao da optičke pincete imaju velik potencijal za primjenu u biologiji. Krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća, demonstrirao je primjenu optičke pincete na viruse i žive stanice, poput bakterija, pri čemu se koristio infracrvenim zračenjem niske energije ne bi li izbjegao termalno zagrijavanje i uništenje živih uzorka. Ashkin je, zajedno sa suradnikom Joseph M. Dziedzicem, demonstrirao prvu primjenu laserske pincete na bakteriju *E. coli* i virus mozaika duhana, a rezultate tog rada objavio je 1987. godine u časopisu *Science*.⁵ Optička pinceta postala je neizostavan svjetlosni alat za izučavanje živih stanica i njihovih dijelova te procesa koji se u njima odvijaju. Znanstvenici svakodnevno primjenjuju tu tehniku u istraživanjima u području biofizike i biologije. Optičke pincete uspješno se upotrebljavaju u istraživanju biofizike na razini jedne molekule. Omogućile su složena istraživanja elastičnosti i dinamike savijanja molekula poput DNK, RNK, proteina i drugih kompleksnih biopolimera. Optičke pincete također su pomogle daljnjem razumijevanju kako "motorni proteini", kao što su kinezin i miozin, pretvaraju kemijsku energiju u rad. Takvi biološki motori djeluju na nanometarskim udaljenostima malim silama iznosa 10^{-12} N (pN). Upravo potreba za razumijevanjem sila u tim bjelančevinama bila je važan pokretač razvoja tehnologije optičkih pinceta osjetljivih i na tako male sile, slika 3. Optičke pincete omogućile su istraživanja ve-



Slika 3 – Mjerenja mehaničkog istezanja jedne dvostruke DNA molekule pomoću tehnike dvostruke optičke pincete (stupice). Krajevi molekule kemijski su vezani na dvije različite čestice smještene u optičkoj pinceti. Pomicanjem jedne od stupica na molekulu se primjenjuje sila. Iz položaja zamke i pomaka čestica može se izmjeriti istezanje L molekule, a izmjerena sila daje informaciju o odnosu sile i produljenja DNA molekule. Preuzeto i prilagođeno s <https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/180081-Optical-Tweezers-for-Single-Cell-Multicellular-Investigations-in-the-Life-Sciences/>.

Ususret još većim intenzitetima



Slika 4 – Prikaz povijesnog razvoja tehnologije pulsnih lasera kroz rast vršne snage lasera. Nakon početnog snažnog napretka u 60-im godinama sljedeće desetljeće obilježila je stagnacija. Nakon otkrića Chirped Pulse Amplification tehnike 1985. godine trend rasta je bitno ubrzan i traje i danas. Preuzeto i prilagođeno iz ref. ⁴.

likog broja mehanički aktivnih enzima, uključujući i mnoge koji su uključeni u biokemijske procese vezane za DNA molekulu. Optičke pincete također se upotrebljavaju za proučavanje živih bioloških stanica. U početku su se upotrebljavale za selekciju, manipuliranje, guranje i privlačenje (*push and pull*) stanica, dakle, kao sredstvo kojim se kontrolira položaj stanice u prostoru. Kasnije je primjena optičkih pinceta omogućila i kvantitativno istraživanje procesa u živoj stanici ili oko nje, poput djelovanja sila u citoskeletu, proučavanju staničnih organela te složenih staničnih procesa kao što je npr. stanična dioba. Upravo zahvaljujući činjenici da se laserskom svjetlošću može rafinirano manipulirati živim stanicama *in vivo*, došlo se do otkrića novih fenomena i rješavanja starih problema u području stanične biologije.

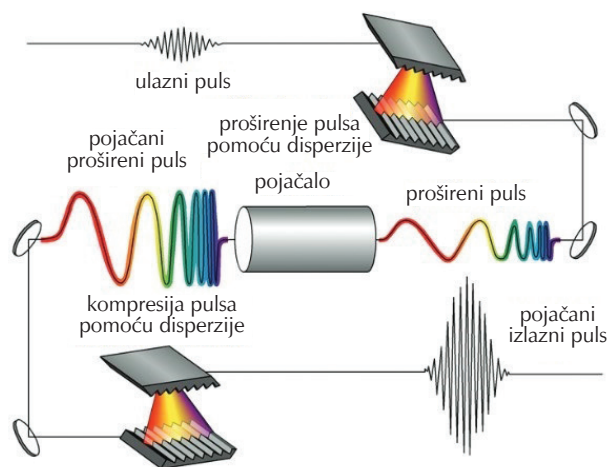
Iz svega navedenog, možemo reći da je pionirski rad Arthura Ashkina u izučavanju tlaka zračenja i višegodišnje istraživanje fenomena koji iz njega proizlaze, usavršavanje eksperimentalnih postava i širenjem mogućnosti primjene optičkih stupica i optičkih pinceta ostavilo nezaboravan trag na znanost i istraživanje. To je razlog zašto je Arthur Ashkin dobio Nobelovu nagradu iz fizike.

Laseri ekstremni u svakom pogledu – kako je jedno elegantno rješenje promijenilo svijet

Stvaranje laserske svjetlosti što veće snage i intenziteta jedan je od najvažnijih ciljeva laserske tehnologije kojem znanstvenici teže još od izuma lasera 60-ih godina prošlog stoljeća. Povijesno gledano, rješenje se tražilo razvijanjem metoda stvaranja što kraćih laserskih pulseva, slika 4. Tehnike razvijene u početnom razdoblju omogućile su stvaranje pulseva vršne snage reda veličine gigavata, čime su stvoreni preduvjeti za istraživanja nelinearnih optičkih efekata kao što su stvaranje viših harmonika, viševalno miješanje, samofokusiranje, stimulirano Raman raspršenje itd.

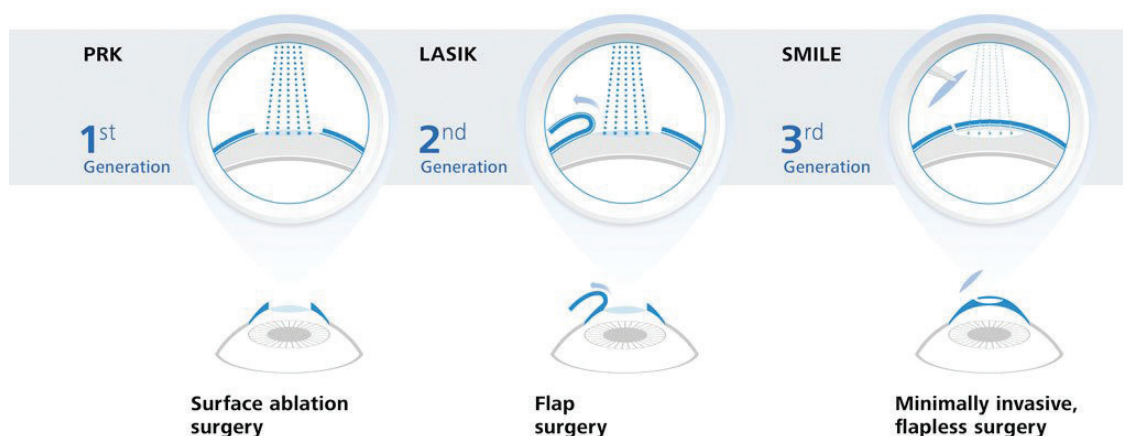
Osnovni preduvjet pojave nelinearnih optičkih efekata je da jačina električnog polja laserske svjetlosti mora biti usporediva s električnim poljem koje veže elektrone unutar atoma. Ironično, isti razlog koji je omogućio istraživanje novih fenomena usporio je daljnji napredak u razvoju laserskih izvora još veće snage koji bi npr. omogućili stvaranje laserske plazme i razvoj novih područja istraživanja kao što je relativistička optika. Tipično se pojačanje pulseva odvija u odgovarajućem kristalu (najčešće titanom dopiran safiru) u kojem je optičkim putem pohranjena energija koju puls koji pojačavamo treba "pokupiti". Problem nastaje kada su ti pulsevi toliko kratki da, zbog svoje velike snage koja je koncentrirana u iznimno malom vremenskom rasponu, uzrokuju fizička oštećenja kristala, kroz efekt samofokusiranja i filamentacije laserske zrake u kristalu. Smanjenje intenziteta pulsa nije rješenje zbog posljedičnog drastičnog smanjenja efikasnosti procesa pojačanja, te se činilo kako će biti nemoguće razviti tehnologiju do stupnja koji bi omogućio izradu pouzdanih laserskih izvora ultrakratkih (pikosekundnih i femtosekundnih) pulseva koji bi se mogli upotrebljavati i izvan najnaprednijih znanstvenih instituta.

Strickland i Mourou na svoju revolucionarnu ideju došli su posudivši koncept nešto ranije razvijen u radarskoj tehnologiji, gdje je jedan od problema bio kako povećati domet i preciznost radarske detekcije.⁶ Veći domet ostvariv je povećanjem snage radio valova, dok se preciznost može povećati slanjem kratkih pulseva radio valova. Glavna tehnološka prepreka bila je u razvoju odgovarajućih pojačala signala koji bi davali mikrovalno zračenje željenih karakteristika što je riješeno primjenom rastegnutih pulseva kako bi pojačalo radilo smanjenom snagom u duljem vremenskom razdoblju. Chirped Pulse Amplification tehnika (pojačanje rastegnutog pulsa), prikazana u pojednostavljenoj slici (slika 5), svodi se na sljedeće: laserski puls koji želimo pojačati najprije se rastegne u vremenu kako bi mu se smanjila vršna snaga, zatim ga se pojača, i nakon pojačanja ponovno skрати na početnu vrijednost primjenjujući disperzijske optičke elemente kao što su optičke rešetke ili prizme.



Slika 5 – Standardna konfiguracija laserskog pojačala koje primjenjuje CPA tehniku. Prilikom vremenskog proširenja (i kasnijeg skupljanja) pulsa primjenjuju se disperzivni optički elementi koji lasersku svjetlost prostorno razlažu po valnim duljinama (laserski puls nije monokromatski val) što uzrokuje cvrkut (chirp) odnosno činjenicu da različite valne duljine pulsa u neku točku prostora stižu u različitim vremenima. (Preuzeto i prilagođeno iz Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester).

Iako je ta tehnika omogućila značajan napredak u razvoju lasera postavlja se pitanje zašto je razvoj te tehnike toliko važan da zaslužuje Nobelovu nagradu? Odgovor leži u brojnim važnim po-



Slika 6 – Usporedba različitih oftalmoloških tehnika koje primjenjuju ultrakratke laserske pulseve. Preuzeto iz ref. 7.

dručjima znanosti, medicine i industrije gdje su ti laseri našli svoju primjenu. U znanosti, najpoznatija primjena lasera zasnovanih na CPA tehnici primjenjuje kratkoću tih pulseva za spektroskopsko praćenje dinamike kemijskih reakcija, molekularnih vibracija i prijelaznih stanja gdje se procesi odvijaju na femtosekundnoj vremenskoj skali (femtosekunda je milijunti dio milijarditog dijela sekunde) te za moguću lasersku manipulaciju kemijskim reakcijama, za što je Ahmadu Zewailu dodijeljena Nobelova nagrada za kemiju 1999. godine. Novi laserski izvori zasnovani na CPA konceptu primjenjuju se za izradu akceleratora na bazi laserski inducirane plazme koji bi jednog dana, zbog svoje kompaktnosti, mogli zamijeniti radiofrekventne akceleratora kakvi se danas upotrebljavaju u bolnicama npr. za radioterapiju tumora. Nadalje, ti laserski izvori omogućili su proboj i ubrzali razvoj područja istraživanja vezanih uz stvaranje visokih harmonika, kako bi se valne duljine laserskih izvora iz tradicionalnog područja vidljivog dijela spektra pomakle prema dubokom UV i rendgenskom području. Rezultati tih istraživanja omogućili su razvoj tehnika za stvaranje još tisuću puta kraćih, atosekundnih laserskih pulseva, čime je ostvareno donedavno nezamislivo praćenje dinamike elektrona unutar atoma. Svoju primjenu ultrakratki laseri nalaze u znanstvenim istraživanjima s velikim potencijalom primjene kao što su razvoj novih efikasnijih katalizatora, solarnih ćelija, novih izvora energije, efikasnijih metoda spremanja podataka, te u razvoju novih lijekova. Svim navedenim istraživanjima zajedničko je da se većina najvažnijih procesa odvija na ultrakratkoj vremenskoj skali.

U posljednja tri desetljeća izvori ultrakratkih laserskih zraka našli su svoju primjenu i u brojnim područjima izvan znanosti, kao

što su precizno mikrostrukturiranje te u oftalmologiji za liječenje miopije (kratkovidnosti) i uklanjanje astigmatizma, slika 6. Tehnološki napredak kojem je važan doprinos svojim idejama dao ovaj znanstveni dvojac omogućio je razvoj brojnih novih područja istraživanja u fundamentalnoj i primijenjenoj znanosti, medicini i industriji, čiji se zenit još ne naslućuje.

Literatura

1. URL: <https://eli-laser.eu> (1. studenoga 2018.).
2. A. Ashkin, Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure, *Phys. Rev. Lett.* **24** (1970) 156, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>.
3. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu, Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, *Opt. Lett.* **11** (1986) 288, doi: <https://doi.org/10.1364/OL.11.000288>.
4. ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy Of Sciences.
5. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria, *Science* **235** (1987) 1517–1520, doi: <https://doi.org/10.1126/science.3547653>.
6. C. Cook, Pulse Compression-Key to More Efficient Radar Transmission, *Proceedings of the IRE, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, **48** (3) (1960) 310–316, doi: <https://doi.org/10.1109/jrproc.1960.287599>.
7. URL: <https://www.laservue.com/smile/smile-lasik-or-prk-which-is-best> (1. studenoga 2018.).