

Analitički i numerički aparati za primene lasera u dijagnostičke svrhe u linearnoj i nelinearnoj oblasti

Milesa Srećković
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
esreckov@etf.rs

Željka Tomić
Tehnikum Taurinum VIŠSS i IRITEL A.D.
Beograd, Srbija
ztomic@tehnikum.edu.rs, zeljka@iritel.com

Sanja Jevtić
Železnička tehnička škola
Beograd, Srbija
jevtic.sanja@gmail.com

Dragan Jevtić
"Železnice Srbije", AD
Beograd, Srbija
dragan.jevtic@hotmail.com

Stanko Ostojić
Tehnološko-metalurški fakultet
Beograd, Srbija
stankos@afrodita.rcub.bg.ac.rs

Nada Ratković Kovačević
Visoka tehnička škola strukovnih studija
Požarevac, Srbija
nada.ratkovic.kovacevic@vts-pozarevac.edu.rs

Aleksandar Bugarinović
Telekom Srpske
Bijeljina, Republika Srpska
aleksandar.bugarinovic@mtel.ba

Magdalena Dragović
Građevinski fakultet
Beograd, Srbija
dim@grf.bg.ac.rs

Jasmina Rakić
Saobraćajno-tehnička škola
Beograd, Srbija
orhangof@gmail.com

Sadržaj—Primena lasera sa procesima rasejanja i interakcije zahteva rešavanje teorijskih problema, koji se razvojem računarskih alata svode na brze provere. Zadaci u vezi metroloških problematika pokrivaju zadatke sa angularnom raspodelom, monohromatskih i polihromatskih problema matrice rasejanja, specijalne funkcije ili komponentni prilaz definisanim geometrijama i koherentnih osobina snopa, rasejavača i ugla posmatranja. Laserski snopovi velikog intenziteta izazivaju niz efekata u atmosferi ili u prolazu kroz materijal, uključujući i disturbanse u rezonatorima zbog uticaja elastičnih i neelastičnih rasejanja i promene koeficijenata refleksije elemenata (ogledala), koji su u radnom prostoru kvantnog generatora-pojačavača. Rad se bavi izabranom problematikom teorijsko-analitičko-numeričke prirode i pored pozivanja na zadatke iz prakse, analizira podrške informacione tehnologije.

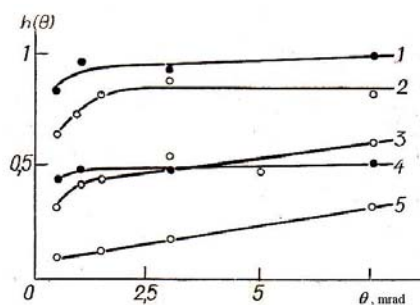
Ključne riječi- laserska tehnika, rasejanje, softver

I. SAVREMENI PROBLEMI LASERSKE TEHNIKE.
EFIKASNOST I DEGRADACIJA LASERA. LASERSKA MEHANIKA.

Laserska tehnološka obrada povećanjem snage lasera povišava proizvodnost kod automatizacije i mehanizacije tehnoloških procesa, širi oblast primene laserske tehnologije u metaloprerađivačkoj industriji. Razvoj snažnih lasera vodi i višoj efikasnosti procesa: rezanje, konturna obrada, zavarivanje, termooobrada otvora (ojačavanje, legiranje, ostakljivanje, odgrevanje) probijanje i kalibracija otvora,

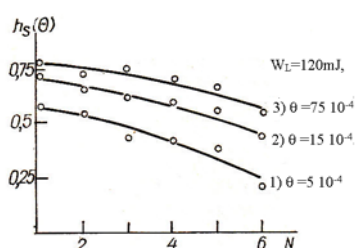
litografija, epitaksija, itd. Traže se izvori, stabilizacije, uglovne divergencije, stabilnost rezonatora, visoka pouzdanost, više optičkih sistema i konstrukcija izlaznih prozora, ogledala, snižavanje gubitaka, povišenje koeficijenta korisnog dejstva. To je vezano sa laserskom mehanikom, dinamičkim procesima, pri interakciji sa površinama čvrstog tela. Promene fizičko mehaničkih svojstava površine, razrušenje, izbacivanje čestica, lokalni mehanički naponi, udarni talasi, vibracije, granične oblasti, termomehanički efekti su u efektima interakcije. Tu je i skup termofizičkih i plazmenih pojava, mikrostrukturne i fazne izmene, efekti uzmaca, elektrostrikcija, korozija, izmena apsorpcije, proboj vazduha blizu mete, X zračenje. Aspekt automatizacije je važan i za mašinstvo, brodogradnju, mikroelektroniku i dr.

Kvantna teorija, spektri i korelacija fotona, problemi *samočišćenja atmosfere* od radionuklida nad vodenom sferom su u grupi problema inverzije talasnog fronta-OVF pri indukovanom rasejanju Brillouina-VRMB fokusiranih laserskih snopova. Ispitivanja OVF pri VRMB u nizu kondenzovanih sredina se vrši sa 1,06 (0,53)μm. Analiziraju se uslovi fokusiranja, spektralni sastav i frekvencije povorki impulsa. OVF se kontroliše u konjugovanoj ravni, u snopu pumpe. Koeficijent refleksije ogledala $R=W/W_0$ - deo energije Stokesa pod uglom θ u acetonu, C₆H₆, benzoalkoholu, destilovanoj vodi je bio često predmet analize [1-3]. Deo rezultata [1], će biti u rezultatima rada analiziran unošenjem analitičkih zavisnosti.



Slika 1. Deo energije lasera (1) i zavisnost Stokesovog zračenja pri VRMB u acetonu od uslova fokusiranja (2-5) za ugao θ . Fokusiranje snopa: 2- sfernim sočivom SF ($f=16\text{cm}$) i koeficijentom refleksije $R>0,6$; 4- SF i FP (povećana divergencija snopa 15x), $R>0,1$; 3- sistem SF i cilindričnog sočiva CF ($f=4\text{cm}$) $R>0,3$; 5- Sistemom SF-CF i FP $R>0,1$.

Na sl. 1 je zavisnost VRMB u acetonu. Povrede kvarca (u staklu K8) snopom pogoršavaju osobine OVF, a h_s i R znatno opada sa povećanjem broja impulsa N koji povređuju materijal.



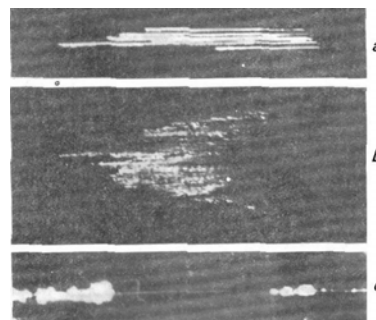
Slika 2. Promena dela energije Stokesovog zračenja $h_s(\theta)$ od broja impulsa N u staklu K-8. $W_L=120\text{mJ}$, Rasipanje vrednosti $h_s(\theta)$ od 10% pri prvoj povredi do 60% na kraju eksperimenta

Na sl. 2 sa drže konstantne žižne daljine i energija pumpe. Deo energije Stokesovog zračenja se brže smanjuje sa povećanjem broja impulsa, N . Efikasnost VRMB i morfologija dezintegracije stakala zavisi od spektralnog sastava pumpe. Proširenje spektra povišava prag proboja VRMB, ali se ostvaruju uslovi za razvoj samofokusiranja. Rascepi proizvedeni snopom širokog spektra su karakteristični za fomiciju filamenata. Pri fokusiranju zračenja pumpe sistemom sa sfernim i cilindričnim sočivima, (SF i CF) filamenti leže u jednoj ravni i zauzimaju oblast prvog struka žižne oblasti, sl.3-a, b. Proširenje spektra dovodi do povišenja praga VRMB u sredini sa višom svetlosnom otpornošću, sl. 3a i sniženja praga P_f^* za sredinu sa nižom sl. 3b. Može da dođe do odsustva VRMB i karakteristične morfologije razrušenja. U režimu ponovljenih impulsa, dužina/ širina oblasti razrušenja raste na stranu SF sočiva pri svakom sledećem impulsu, sl. 3c. Efikasnost VRMB ($R \geq 0,1$) raste sve dok oblast razrušenja ne zauzme celu oblast kaustike sočiva.

A. O problemima degradacije i efikasnosti

Degradacija poluprovodničkih struktura i lasera, pripada specifičnim fenomenima zavisno od materijala i režima rada [4,5]. Mehanizmi su vezani za opšte stavove o oštećenjima (proces omekušavanja, modna struktura, pregrevanje, optičko samorazrušenje, termalni mikroemulzioni procesi). Numerički proračuni, inicijacija mikroeksplozija, je vezana za raspodelu temperature (bezzračni prelazi, rekombionacioni i apsorpcioni defekti) uz energetske procese i rastezanje rešetke blizu dislo-

kacija. Termička lokalna zagrevanja dovode do termoelastičnih napona.



Slika 3. Razrušenja pojedinačnim laserskim impulsom u prvom struku SF ($f=16\text{cm}$) i CF($f=4\text{cm}$) sočiva. a) Staklo K8, 20x, b) staklo TF, 15x. Razrušenje stakla ponovljenim impulsima $f=16\text{cm}$, staklo K8, 5x.

Radi se o koničnim ili polusfernim formama udubljenja. Do pucanja dolazi kod najviših napona i grejanja uz refleksione pojave, izbacivanja materijala (čestica visoke energije) i definicija kritičnih parametara. Postoje mehanizmi sa toplotnim udarima, HZ talasima, pojavama Brillouina, viših harmonika nelinearnih, višefotonskih efekata i dr. (Kritične gustine su $\sim 100\text{MW}/\text{cm}^2$). Postoje i procesi sa skladištenjem koherentnosti. Fizički procesi postepene degradacije se vezuju za razvoj centara bezzračne rekombinacije, (fononski udari, γ zračenje se koristi i kao postupak za termička odgrevanja materijala). Ponašanje je suprotno degradaciji u odnosu na pravce rascepa. Glavni procesi degradacije su: starenje faseta, migracija defekata, granična rekombinacija, optičko samorazrušenje, mikroskopski defekti na ogledalima. Od interesa je šema procesa razrušenja, stadijumi, statističke raspodele otkaza, funkcije pouzdanosti, vek rada (*shelf* i stvarni). U Tabeli 1. je data analiza kvantne efikasnosti poluprovodničkih lasera u zavisnosti od mehanizma pobude.

B. Optika i računarska tehnika

Primena računarskih metoda u optici i digitalnoj obradi, dovela je i do novih pravaca digitalne i adaptivne optike [6]. Digitalna predstava optičkih polja nosi nove metode obrade slike, filtracije, sinteze holograma. U adaptivnoj optici računari upravljaju optičkim poljima i procesima u realnom vremenu i teži se optimalnom upravljanju optičkih sistema. Sa komponentama, ogledalima, sočivima, ide se na *sastavne delove računara* i digitalne procesore. Obrnut proces je da se optičke ideje i metode; memorije (i holografske), optički procesori, hibridni optičko-digitalni sistemi, koriste u obradi informacija. Zajednički zadaci su: obrada rezultata optičkih eksperimenata, konstrukcija optičkih sistema računarima, digitalna optika, numeričko modelovanje i optimizacija optičkih procesa, digitalna optika, automatizacija eksperimenata, adaptivno upravljanje sistemima i procesima, razrada optičkih metoda obrade informacija u izradi optičkih računara. Primena računara u optici podrazumeva više od kompjuterske optike. Tu su i nove mogućnosti koherentne optike. Optički element propušta, reflektuje, karakteriše amplitudnu ili faznu frekventnu karakteristiku. Računar služi i za inverzne problem; u etapi projektovanja, određuju se karakteristike optičkog elementa. Metode optimizacije u optici su vezane za: izvore, podešavanje krivih, projektovanje elemenata (tankoslojni filter, sočiva, osvetljenja).

TABELA I. EFIKASNOST POLUPROVODNIČKIH LASERA [7]

Vid pumpe	Maksimalni energetski izraz	Dužina Impulsa, sec	Maksi.gustina snage pumpe, W/cm ²	Maksi.snaga zračenja, W	Debljina aktivnog sloja, cm	Specijalni zahtevi
Elektronska pobuda	$\sim \hbar \omega / 3 E_g \sim 0,3$	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^7 - 10^8$	10^6	$10^{-4} - 10^{-3}$	-
Optička pobuda (jednofotonska)	$\hbar \cdot \omega / \hbar \cdot \omega_p$	Kontinualna generacija	$10^4 - 10^5$	10^4	$10^{-5} - 10^{-3}$	$E_g < \hbar \cdot \omega_p$
			$10^{-8} - 10^{-7}$	10^7	10^5	
Optička pobuda (dvo-fotonska)	$\hbar \cdot \omega / 2 \cdot \hbar \cdot \omega_p$	$10^{-8} - 10^{-7}$	10^9		$10^{-2} - 10^{-1}$	$E_g < 2 \cdot \hbar \cdot \omega_p$
Injekcija	$\frac{\hbar \omega}{e U} \approx 1,0$	Kontinualna generacija	$10^4 - 10^5$	~ 10	$10^{-5} - 10^{-3}$	1) Elektroprovodnost 2) Injek. kontakt 3) Električni kontakt
			$10^{-8} - 10^{-6}$	10^6	10^2	
Proboj	$\sim \hbar \omega / 3 E_g \sim 0,3$	$10^{-8} - 10^{-7}$	10^6	10^2	$10^{-4} - 10^{-3}$	1) Elekt. kontakt 2) Veliko vreme za domet 3) Nestacionarni uslovi

Matematičke osnove optimizacije obuhvataju nelinearno programiranje i optimizacije, algoritme pretraživanja, i konfiguracije koje ne podležu ograničenjima (metodi sa izvodom ili bez), 1D/2D slučajeve. Rešavanje zadataka je sa ograničenjima funkcije Lagranga, norme Čebiševa [6] i dr.

C. Kvantna optika i elektronika

I za jedan i za drugi deo naslova postoji mnogo referenci, a uključeno je i mnogo disciplina. Nas interesuje tehnika merenja rasejane svetlosti i objašnjenje boje neba, što mogu da objasne i teorije kvantne optike i elektronike. Možda je najbolji grafički put predstavljanja područja, tehnika i fenomena, koje obe pokrivaju. Može se videti da li postoji preklapanje: više tehnika služe istoj oblasti fizičkih i hemijskih fenomena, ili više fenomena se mere istom tehnikom [7-9]. Rayleighovo rasejanje u oblasti $10^4 - 10^7 \text{cm}^{-1}$, Brownovo kretanje sa merenjima rasejanja, merenja sa tečnim kristalima, anemometrija i ispitivanje turbulencija snopa se mere istom tehnikom, kao optički radari lidari, kritička opalescencija tehnikom heterodina i ispitivanjima fluktuacija intenziteta. Druga tehnika, koja se preklapa sa heterodinom za neke od fenomena su merenja sa Fabry-Perot (FP) etalonima, sa mogućnošću ispitivanja akustičkih i optičkih fonona, Brillouinovih pomaka i rasejanja uopšte. To su oblasti gde se preklapaju FP i klasične spektroskopije.

D. Korelacija fotona -interferometrija

Visokorezoluciona spektroskopija se *ponosila* merenjima fine i HF strukture, izotopnih pomaka, udarnim proširenjima u plazmi sa FP etalom i difrakcionom rešetkom. Moć rezolucije 10^7 odgovarala je mogućnosti merenja širina $2 \cdot 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ (60MHz) što je bilo nedovoljno za Dopplerova proširenja Gausovih linija, za lakše elemente. Pojava lasera je pokazala da je merenje širine linije najužih spektralnih izvora sada moguće. Rezolucija je znatno povišena, za uređaje sa stabilizovanom frekvencijom. FP je povisio za nekoliko MHz, fotomultiplikatori su usavršeni i zbog drugih primena (mikrotalasne tehnike bi imale svoju reč). Korelacije intenziteta su sa vremenom uzorkovanja 10 ns (~ 100 MHz). Oblast 2-10 MHz rezolucije je i sa interferencijom i korelacijom. Korelacije ne igraju ulogu za rezoluciju ispod 10^6 . Vremenske fluktuacije su male za obična merenja. Interferometrija nema rezoluciju iznad 10^7 . Klasični izvori nisu tražili velike rezolucije, a pozitivna korelacija dolazi tek sa laserima. Nema mnogo novog u vezi sa foton-

ima u posmatranju spektralnog sadržaja signala u vremenskom domenu, u principu je isto i za RF, mikro i akustičke talase.

E. Tranzijentni fenomeni

Dok su talasni fenomeni kauzalni i vremenski zavisni, elektromagnetni-EM izvori i generatori rade u stacionarnom stanju u harmonijskom režimu. Zato je naglasak bio na vremensko harmoničnoj talasnoj propagaciji [10]. Sad su ponovo aktuelni tranzijentni fenomeni, stimulisane primene eksplicitnog tretmana vremenski zavisnih efekata (transmisija signala kroz vremenski promenljive medije - jonosfera, jonizovane strukture, kratki EM impulsi, impulsi sa širokim frekventnim spektrom i novi vremenski domeni za transmisiju, prijem i rasejanje, EM tehnike i metode i antene). Optička oblast kao dijagnostika za ablaciju, imploziju, (i druge interakcije talas-materijal) sa impulsno eksitovanim burstovima, impulsno eksitovani EM proboji na elektronskim uređajima, instalacijama, postali su predmet interesovanja ili *zabrinutosti*. Prouzrokuju varnično pražnjenje (munje, nuklearne eksplozije). Sigurnost, odn. bezbednost i pouzdanost telekomunikacionih kanala je motivisala iscrpna istraživanja u vojne i civilne svrhe. Teškoće su: tehnike za tranzijentne električne fenomene, mešanje edukativnog i tutorijalnog, propagacije, difrakcija u disperzivnom/nedisperzivnom medijumu, poštovanje konvencije da propagacija bude u vremensko-harmonijskom režimu. Pretpostavka je da se on opisuje lakše nego tranzijentni – što je moguće Fourier-ovom i Laplace-ovom transformacijom. Progressivna disturbansa se kreće od izvora do prijemenika kroz ambijant, i u tranzijentnom stanju, omogućava direktno praćenje signala. Tako je vremensko-harmonijski režim specijalni slučaj cw emitovane eksitacije stalne frekvencije, gde se Fourier-ova ili Laplace-ova transformacija ne mogu uvek koristiti.

F. Elektrooptički efekti i rasejanje svetlosti

Kvadratni Kerrov efekt u kristalima [11] i linearni elektrooptički Pockels, koriste se za modulaciju laserskog snopa (amplitudnu ili faznu frekventnu) sa velikim brzinama (MHz-GHz), za tehniku merenja u energetici i dobijanje kratkih laserskih impulsa. Pri optičkim interakcijama sa EM i akustičnim poljima, zbog pojava nelinearnosti se dosta gubi. Magnetooptički Faradey, akustooptički, Kerrov i Pockelsov su među najizraženijim efektima. Kerrov je važan i za veze polarizacije sa višim redovima hiperpolarizabilnosti i Kerrove

konstante. Posebna je uloga tečnih kristala (holesterinskih i nematskih). Od interesa su za razvoj lasera danas i računarske tehnike. Panhromatska svetlost, kad se kristali podvrgnu jakom polju, donosi nove efekte (*neKerrovog tipa*). Jednosmerno ili sporopromenljivo ($< 100\text{Hz}$) polje, intenziteta 100kV/cm , čini mlečnu sredinu transparentnom ($100\text{-}700\text{Hz}$). Ne radi se o elektrohemijским, ni o polarizacionim efektima, već o agregaciji centara rasejanja i temperaturnoj zavisnosti. Tu su i pojave dvojnog prelamanja. Pretpostavlja se da se o mehaničkim pritiscima ili elektrostatičkim silama ne mora voditi računa. Radovi su komplikovani mogućim probojem, a fazne promene kristala se mere tehnikom rasejanja svetlosti, usled dejstava električnih i magnetnih polja [11, 12]. Veza Kerrove konstante i koeficijenta depolarizacije kod gasova, vreme relaksacije anizotropije i vreme inercije efekta Kerra su sledeće teme, odn. poređenje vremena relaksacije anizotropije iz rasejanja svetlosti i iz inercije Kerrovog efekta. Posle relaksacione teorije (Leontoviča) nađeno je da postoji velika razlika iz rasejanja i Kerrovog efekta. Progresivan UZ talas je stroboskopiran, modulisan Kerrovom ćelijom, napajanom sa istog generatora kao i piezo-kvarc, koji emituje zvučne talase. Ekvidistantne *tamne* i *svetle* zone zavise od odnosa zvučnog talasa i fazne modulacije svetlosti. Iz relacija, pomaka zona i frekvencije modulacije za male uglove sledilo je mnogo primena.

G. Efekti nelinearne optike i rasejanje laserskih snopova

Pri velikim intenzitetima svetlosnih snopova, amplitude pridruženih električnih polja dobijaju veličine reda atomskih, pa su mogući i mnogi novi efekti nelinearne optike-NO, koji se i danas otkrivaju s obzirom na skraćenje impulsa u atto-fs područje. Uz spontane efekte (Rayleigh, Brillouin, Raman) rasejanja nastupaju sva tri indukovana efekta. Zato je potrebno voditi računa o eksperimentima već pri radu sa gigantskim impulsima, ali i sa cw He-Ne i Ar^+ jon laserima. Ps- laseri svojevremeno su prouzrokovali 4-talasan interakcije u tečnostima i čvrstim telima [12]. Pojavljuju se karakteristične dužine samofokusiranja, pa bi za kivete sa merenjem za rasejanja D_2O , CH_3CCl_3 , CH_3COCH_3 , nastupilo samofokusiranje mesto apsorcije i rasejanja kao dominantnih. Ponovo su aktuelna merenja sa Rayleighevim rasejanjima, ali sada sa velikim intenzitetima. Interesantni su i efekti susceptibilnosti viših redova za alkohole, koji su istog reda veličina kao za vodu. Sa *Q switch* laserom i ćelijom (2cm) sa uzorkom HFIP u rezonatoru rubinskog ili Nd^{3+} :YAG lasera, pokazana je modulacija intenziteta. To su bile indukovane nelinearnosti III reda (χ_3^0), VF Kerr-ov efekat i elektrostrikcija.

Nelinearni deo indeksa prelamanja III reda je vezan sa Kerrovom konstantom i dobija se iz niza merenja,

$$n_2^0 = (2/3)\lambda B_o, \quad \text{a} \quad \chi_3^0 = (n_0/12\pi)n_2^0.$$

To se vezuje i sa razmatranjima Proutiera. I orijentacioni mehanizam Kerrovog efekta, zbog χ_3^0 igra važnu ulogu. Povećanje optičke χ_3^0 je u vezi sa zasićenim porastom veza kod fluora F i veće elektronegativnosti u odnosu na vodonik, a i zbog veće elektronske anizotropije molekula. Uz linearizovanu teoriju laserski indukovanih nestabilnosti i gasova je obrađena i pojava optičkih vlakana, koja se formiraju kad intenzivan snop propagira kroz Raman aktivan materijal. I dužina samofokusiranja je važna. Vremena relaksacije u polarnim tečnostima (odziv materijala) su važna u primenama za optičke prekidače.

Pretpostavlja se da su za materijale sa istim molarnim zapreminama i viskoznošću isti; τ_R je isto za iste molekulske zapremine, ali 50% veće, nego što viskoznošću nalažu, Tabela II.

TABELA II. KERROVA KONSTANTA I VREME RELAKSACIJE

Materijal	B_o/B_{oHF}	τ_r [ps]	τ_r
Acetofenon	8,9	37	-
Nitrobenzol	13,9	31±6	48-27,5
HFIP	1	29,6	

Primenjena nelinearna optika, [13] daje osnove fizike i tehnike optičkih pretvarača i transformatora frekvencija sa nelinearnim efektima u kristalima. Od istorijskih dana (1960g) i generacija II harmonika sa rubinskim laserom, nelinearna optika se razvijala i u pravcu primene nelinearnih efekata za nove koherentne izvore. Razvijeni su koeficijenti transformacije 10^{-11} - 10^{-12} pri generaciji harmonika do udvajanja 10^2 - 10^1 od početne snage (saglašavanje faznih brzina talasa raznih frekvencija). Rađeno je u sve 3 oblasti: vidljivoj, IC i UV sa cw, ns, ps laserima. Ovo zahteva kvalitetnu lasersku optiku i elektroniku, a to su i oblasti optičkih proboja i indukovanih rasejanja. Od početka rada na transformatorima frekvencija- parametarskih generacija svetlosti, koje se koriste u nelinearnoj laserskoj spektroskopiji (molekularnoj, atomskoj) u projektima izdvajanja izotopa [14] i *superčistih* materijala laserskog sondiranja atmosfere mnogo je urađeno [15]. Generatori razlike frekvencija na principu mešanja frekvencija u nelinearnoj sredini, koriste se i u IC i u UV tehnici. Primena transformacija iz IC u vidljivo područje od 1961.-1970. je odredila za glavni pravac nelinearne optike (NO) nelinearnu optiku kristala. Nelinearna optička refleksija tretira odnos Lorentz Lorenza, koji tretiramo kroz ceo rad u nelinearnoj oblasti kao aproksimaciju, koju i dalje često primenjujemo kao i u linearnoj oblasti.

Indukovano Ramanovo rasejanje (kombinaciono) je obrađeno kod mnogo autora. Ramanove efekte sa HeNe laserom izdvajamo kao efekte na relativno malim snagama. Laseri pogodni za Ramanove spektre, pa i za polaritone.

Formalizmi rasejanja – U molarnoj refrakciji, gde se vidi uloga pojedinih molekularnih doprinosa nalazi se deo podrške mernim tehnikama. Jedan od oblika molarne refrakcije je:

$$(n-1)_\alpha = \frac{2\pi e^2}{m} \sum_{i,k} \frac{f_{ik} N_i}{\omega_{ik}^2 - \omega^2} = \frac{e^2}{2\pi m c^2} \sum_{i,k} \frac{f_{ik} \lambda^2 \lambda_{ik}^2 N_i}{\lambda^2 - \lambda_{ik}^2}.$$

Formalizmi i modeli rasejanja su predmet dugogodišnje literature gde vidno mesto zauzimaju Mieovo i Rayleighovo rasejanje. Ovde će se dati delovi teorije, koji su korišćeni u traženju angularne raspodele i u primeni jednog od raspoloživih softvera u rezultatima rada. Rasejanje o veoma male čestice, ili molekule, dimenzija $\lambda/10$ se razmatra, kao graničan slučaj Mieovog rasejanja. Od interesa su efikasni preseki [16], a tako se shvataju i snopovi kao informacioni sistemi:

$$\sigma_{eff} = (10\pi/3)a^2(ka)^4, \quad \text{a je radijus, a k talasni vektor.}$$

Za θ formiran pravcem upadnog talasa rasejanje je cilindrične simetrije pod osom $\theta=0$, angularna raspodela je:

$$\frac{d\sigma_{eff}}{d\Omega}(\theta) = a^2(ak)^4 \left[\frac{5}{8}(1 + \cos^2 \theta) + \cos \theta \right],$$

Funkcija ψ zadovoljava D'Alembertovu teoriju. U sfernim koordinatama postoje stacionarna rešenja talasne jednačine izraženih putem sfernih harmonika.

$$\psi_{N,L} = \cos(L\phi) P_N^L(\cos\theta) z_N(nkr),$$

$$\psi_{N,L} = \sin(L\phi) P_N^L(\cos\theta) z_N(nkr)$$

P- Legendre-ovi polinomi, z Besselove sferne funkcije; r, θ , ϕ sferne koordinate. Pod ograničenim uslovima za $x=2\pi a/\lambda$ dobija se diferencijalni presek za talasnu dužinu matematičko rešenje D' Alembertove jednačine sa:

$$a_N = \frac{\psi'_N(nx)\psi_N(x) - n\psi_N(x)\psi'_N(nx)}{\psi'_N(nx)\zeta_N(x) - n\psi_N(x)\zeta'_N(x)},$$

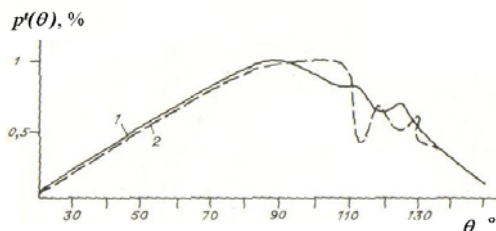
$$b_N = \frac{\psi'_N(nx)\psi_N(x) - n\psi_N(x)\psi'_N(nx)}{\psi'_N(nx)\zeta_N(x) - n\psi_N(x)\zeta'_N(x)}$$

ψ i ζ su funkcije Riccati-Bessela, a presecci su:

$$\sigma_{eff} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{N=1}^{\infty} (|a_N|^2 + |b_N|^2), \quad \sigma_{eff} = \frac{10\pi}{3} a^2 (ka)^4$$

H. Ispitivanje bioćelija metodama rasejanja

Ispitivanje karaktera dinamike i morfologija bioobjekata metodama dinamičke spektroskopije (spektroskopije optičkog mešanja) i određivanje optičkih konstanti pigmenta u ćelijama spektroskopijom rasejanja su metodi poznati po visokoj tačnosti, ne unose perturbacije, a donose informacije o živoj ćeliji. Ovakvo razmatranje obuhvata viruse, bakterije, elemente dinamike krvotoka, hloroplasti. Radi se o formama rasejanja na sferama, cilindrima, štapičastim bioorganizmima, elipsoidu i disku (linijske dimenzije: 20-15000nm). Radi se o malim vrednostima realnog dela indeksa prelamanja ćelija u tečnosti, slaboj apsorpciji u vidljivoj i bliskoj IC, pa su metode rasejanja svetlosti upotrebljene sa aproksimacijama. Dinamička svojstva i morfologija, translacione i rotacione konstante i frekvencije fluktuacija intenziteta svetlosti, rasejane o centre rasejanja sa Brownovim kretanjem su bili predmet brojnih radova. Počelo se sa izotropnim česticama i dimenzijama mnogo manjim od λ svetlosti (makromolekula i latex-sfera). Sledi i proširenje spektra rasejanja na pokretnim mikroorganizmima, analiza anizotropnih materijala, proučava se polidisperznost, i fluktuacije razne prirode. Izvedeni su analitički izrazi za statičke karakteristike parametara polja i parametara sredine, a razmatrani su i inverzni: problemi dobijanja koncentracija, dimenzije ćelija, forme, brzine, pravca kretanja.



Slika 4. Stepeni polarizacije i angularna rasopodela na dvoslojnim česticama i suspenzijama bakterija [8,9]

Disperzne osobine, razni bioobjekti, biološki procesi se uključuju u osnovne metode merenja vezane za verovatnoće raspodele, amplitude i intenzitete uz autokorelacije i razvoj u

spektar. Jedan od rezultata statističkih razmatranja je povezivanje dinamike kretanja sa oblicima linija rasejanog spektra, koji se do ere kvantnih generatora nisu mogli da mere. Za Brownovo kretanje dobija se Lorentzov spektar i razvijaju se matricni metodi. Proučava se i višestruko rasejanje i razvijaju inženjerski prilazi za klimatske promene i probleme kosmosa, u okeanologiji, itd. U sledećem periodu razvoja, uključeni su i stepeni polarizacije i centri rasejanja sa višeslojnim objektima. Na sl.4. su stepeni polarizacije i angularna rasopodela na dvoslojnim česticama i suspenzijama bakterija [8, 9].

II. REZULTATI I DISKUSIJA

1. Na osnovu eksperimentalnog rada [1] tražene su analitičke zavisnosti parametara refleksije R i broja impulsa kojima su materijali izlagani. Rezultati su dati u Tab. III.

TABELA III. ANALITIČKE ZAVISNOSTI PARAMETARA REFLEKSIJE R I BROJA IMPULSA N, ZA DVA MATERIJALA

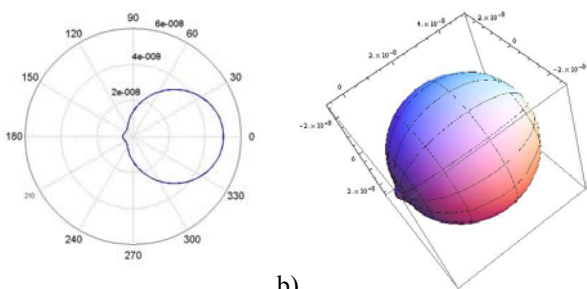
Žižna daljina sočiva, cm	Refleksija	Broj impulsa	Energija WL, mJ
16	$R=-0,225N+0,5$	$NC[0,2]$	5
	$R=-0,233N+0,73$	$NC[0,3]$	25
	$R=-0,175N+0,74$	$NC[0,4]$	80
	$R=-0,112N+0,75$	$NC[0,6]$	120
7,5	$R=-0,208N+0,42$	$NC[0,2]$	25
	$R=-0,173N+0,52$	$NC[0,3]$	80
	$R=-0,1325N+0,53$	$NC[0,4]$	120

2. Kao rezultat teorije Mia i odgovarajućih numeričkih paketa simulirana su rasejanja na talasnim dužinama lasera, koji se često koriste za rasejanje. Rezultati simulacija su na sl. 5 i sl. 6

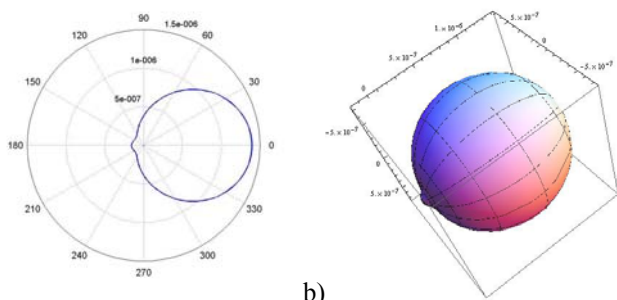
3. Softver MiePlot – rezultati simulacije dati su na sl. 7 i sl. 8

I. ZAKLJUČAK

Eksperimenti nelinearne optike se često vrše u kratkim vremenskim intervalima ali zahtevaju složenu pripremu i usaglašavanje sa teorijom. U ovom radu smo na osnovu eksperimentalnih rezultata iz literature linearno aproksimirali veze broja impulsa N i refleksije R. Primena matematičkih paketa daje relativno brzo zavisnosti parametara rasejanja u simulacijama različitog tipa po predstavi (2D, 3D). Veći su problemi u izboru teorije i specifičnosti ansambala koji se proučavaju, dijagnosticiraju metodama statičkog i dinamičkog rasejanja laserskih snopova. Problemi su i u primeni aproksimacija sa funkcijama odziva materijala i njihovih parcijalnih izvoda. Simulirani su slučajevi bez interakcija centara rasejanja. Mie teorija sa rigidnim računom postala je user friendly uz korišćenje savremenih računarskih sistema. MiePlot softver se oslanja na Mie algoritme i simulira rasejanje svetlosti o razne geometrijske oblike, poznatim modelima (Rayleigh, Debye, geometrijska optika, interferencija, difrakcija, Airy,...). Intenzitet rasejane svetlosti se može predstaviti kao funkcija ugla rasejanja, radijusa rasejavača, talasne dužine svetlosti i indeksa prelamanja. Moguće je proračunati i efikasne preseke rasejanja (C_{ext} , C_{sca} & C_{abs}) i efikasnosti rasejanja (Q_{ext} , Q_{sca} & Q_{abs}) kao funkcije radijusa sfere rasejavača, talasne dužine.



Slika 5. Angularna raspodela za Ar⁺Yon laser za $\lambda=514\text{nm}$ o centre rasejanja $a=1\mu\text{m}$. u 2D predstavi (a) i 3D (b).



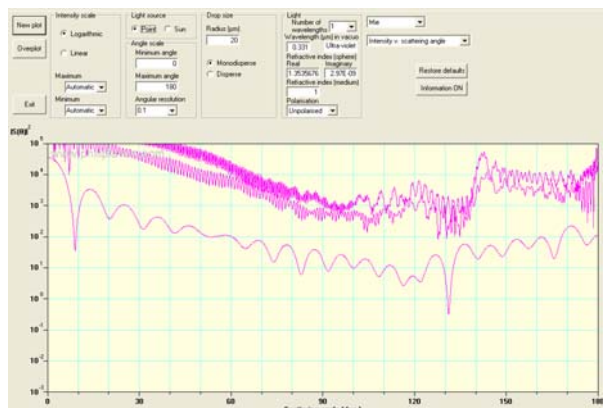
Slika 6. Angularna raspodela za HeNe laser za $\lambda=633\text{nm}$ o centre rasejanja $a=2\mu\text{m}$. u 2D predstavi (a) i 3D (b).

ZAHVALNICA

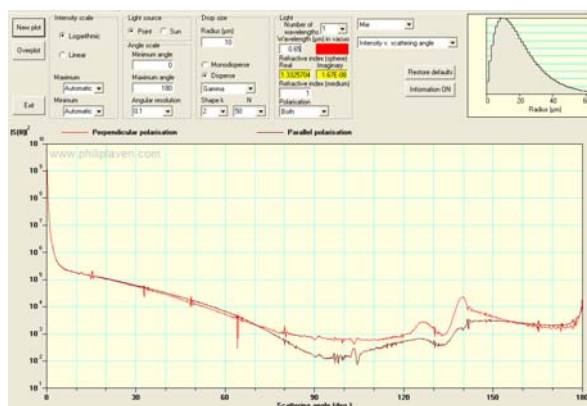
Istraživanja u ovom radu je podržalo Min. kulture i informisanja u okviru Projekta 633-00-373 MPNTR Republike Srbije- projekti br: III45003 i III44003.

LITERATURA

- [1] Balkevičius, et al., The experimental investigation of wavefront reversal of focused laser beams under stimulated Brillouin scattering in condensed materials, *Liet.Fiz.Rinkiny*, Vol.24(2)pp.81-89, 1984
- [2] H.J.Eichler,R.Menzel,D.Schumann, 10-W single -rod Nd:new XYag laser with stimulated Brillouin sc. *App. Opt.*, Vol.31 pp.5038-5043. 1969.
- [3] Y. R. Shen, Electrostriction, optical Kerr Effects and selffocussing of laser beams, *Phys. Lett.*, Vol.20, No.4, 1966
- [4] O.V.Bogdankevič S.A.Darzniak, *Poluprovodnikovie lazери*, Nauka, Moskva,1976
- [5] M. Fukuda, *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs*, Artech House, Boston, 1991.
- [6] R. Frieden, *Probability, Statistical Optics, and Data Testing: A Problem Solving Approach*, Amazon.com, 1980,
- [7] M. Srećković, et al., *Interakcija lasera sa materijalom: teorija, eksperiment i realnost*, Regionalni centar za talente Bg 2, Beograd 2012.
- [8] B.J.Berne,R.Pecora, *Dynamic Light scattering*, Wiley intersc. N.Y, 1976.
- [9] H-G.Cummins,R. Pike,- *Photon Counting and Beating*, Mir, Mosk. 1981.
- [10] Felsen L. B, ed. *Transient electromagnetic fields*, Springer, Berlin, 1976.
- [11] T.S.Narasimhamurty, *Photoelastic and electro-optic properties of crystals*, Mir, Moscow, 1984 (In Russian)
- [12] Trudi IOFAN, *Dejstvie lazernogo izluceniya na pogloščayuščie kondensirovanie sredi*, Moskva, Nauka, Tom 13, 1988.
- [13] F.Zernike,J.E.Midwinter, *AppliedNonlinearOptics*, Wiley.NY York,1973.
- [14] M.Srećković, i dr., *Implementations of LIS,LIE,Rydberg atoms, Lidar and Fiber in Ecology and Space Technology*, Kloster Journ, Vol.64,2014
- [15] S.Ostojić, et al., *Physical Approximations used in Applied Estimations of Environmental Parameters*, URBANECO., pp.377-386, 2014
- [16] B.Črnko, *Dinamičko sipanje svetlobe*, Univerz Ljubljana, maj 2005



Slika 7. Angularna raspodela centra rasejavača $R=1\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ (odozdo naviše) za materijal indeksa prelamanja $n=1,3535676+i 2,97*10^{-9}$ u UV oblasti $\lambda=331\text{nm}$ (monodisperzno, nepolarizovano).



Slika 8. Angularna raspodela centra rasejavača $R=10\mu\text{m}$ (odozdo naviše) za materijal indeksa prelamanja $n=1,3325704+i 1,67*10^{-8}$ za talasnu dužinu $\lambda=650\text{nm}$ (disperzno, obe komponente).

ABSTRACT

The use of lasers with scattering processes and interactions requires solving theoretical problems, which are reduced to quick check-ups with development of computer tools. Tasks concerning metrology problems cover assignments with angular distribution, mono- and polychromatic problems, scattering matrix, special functions or component approach with defined geometry and properties of coherent beam, scatterer and field of view. Laser beams of high intensity can induce effects in the atmosphere or in material they are passing through, including disturbance in resonators due to the influence of elastic and inelastic scatterings, as well as changes in the reflection coefficients of elements (mirrors) in the work-space of a quantum generator. The paper deals with selected problems of theoretical-analytical-numerical nature, and with references to the experimental tasks from practice, analyzing possible support of information technology.

ANALYTICAL AND NUMERICAL APPARATUSES FOR APPLICATION OF LASERS FOR DIAGNOSIS IN THE LINEAR AND NONLINEAR AREA

M. Srećković, Ž. Tomić, S. Jevtić, D. Jevtić, S. Ostojić, N. Ratković Kovačević, A. Bugarinović, M. Dragović, J. Rakić