

SAVREMENE METODE I FORMALIZMI OPISA INTERAKCIJE LASERSKOG SNOPI SA MATERIJALOM

MODERN METHODS AND FORMALISMS OF DESCRIBING THE INTERACTION OF LASER BEAM WITH MATERIAL

Autori:

Stevan Urošević, student Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Jelena Stašić, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Mentori:

Prof. dr Milesa Srećković, dipl. inž., Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Katedra za mikroelektroniku i tehničku fiziku

dr Branka Kaluđerović, dipl. inž., Institut za nuklearne nauke "Vinča",
Laboratorija za materijale

REZIME

Laserska tehnika ima značajnu primenu u ispitivanju materijala, medicini, zaštiti životne sredine, industriji. Laser je deo LIDAR sistema za daljinsku detekciju, kojima se ispituju svojstva vraćenog snopa svetlosti radi dobijanja informacija o udaljenoj meti. U ovim sistemima se koriste laseri sa malom širinom linije. Određivanje širine linije laserskog zračenja (Gauss, Lorentz, Voight) pre i nakon delovanja na materijal može dati važne informacije o interakciji, kao i o samom materijalu. Zato su razvijeni razni softveri za interpretaciju signala koji odgovara datom procesu. Druga velika klasa procesa koji se javljaju pri delovanju laserskog snopa su efekti difrakcije svetlosti, kojima se mogu odrediti brojna svojstva materijala. U ovom radu su dati prilozi putem eksperimentalne difrakcije na ugljeničnoj tkanini nakon interakcije sa rubinskim laserom.

ABSTRACT

Laser technique has a wide application in material investigation, medicine, environmental protection, industry. Laser is a part of large distance detection LIDAR systems for examination of the returned light beam and obtaining information about a distant target. In these systems, lasers with small linewidth are used. Determination of laser radiation linewidth (Gauss, Lorentz, Voigt) before and after affecting the material can give important information about interaction, as well as the material itself. That is why various softwares for interpretation of the signal corresponding to the given process have been developed. Another large class of processes that occur during laser beam action are the effects of light diffraction, which can be used for determination of numerous material properties. In this work, a contribution is given with experimental diffraction on carbon cloth after interaction with ruby laser.

UVOD

Izlaganjem materijala zračenju i ispitivanjem povratnog signala mogu se dobiti mnoge informacije o samom materijalu. Posebnu primenu su u ovoj oblasti našli laseri, i interakcija laserskog zračenja sa materijalom postaje sve interesantnija za proučavanje. Neke od tehnika koje se koriste su laserska spektroskopija, LIDAR (*Light Detection and Ranging*), laserska difrakcija, itd. Laserska spektroskopija pružila je potpuno nove mogućnosti u različitim poljima, kao što je proučavanje procesa sagorevanja, praćenje pojava u atmosferi, nadgledanje vode i vegetacije, očuvanje kulturnog nasleđa, i medicinska dijagnostika [1]. LIDAR tehnologija je omogućila proučavanje udaljenih meta, te je našla primenu u arheologiji, geografiji, geologiji, geomorfologiji, seizmologiji, atmosferskoj fizici [2-5]. Najveću primenu u oblasti ispitivanja materijala laserska difrakcija ima u analizi veličine čestica i njihove raspodele [6]. Koristi se i u tekstilnoj industriji za merenje gustine i raspodele veličine vlakana, određivanje površinske konfiguracije pletene tkanine, kao i za utvrđivanje prisustva i veličine periodičnih defekata [7-9]. U prvom delu rada dat je teorijski pregled ovih laserskih tehnika, sa posebnim osvrtom na širinu linije, kao važan parametar za dobijanje podataka o ispitivanom materijalu i procesima. Eksperimentalni deo je posvećen difraktogramima na ugljeničnom tekstilnom materijalu nakon interakcije sa rubinskim laserom.

TEORIJSKO RAZMATRANJE

1. Zračenje, laser, LIDAR

Širina linije i oblik funkcije određenog zračenja sadrže podatke o izvornom procesu usled koga dolazi do emitovanja svetlosti. Na osnovu toga, možemo odrediti o kom izvoru je reč (Sunce, fluorescencija, različite lampe, laser...). Prema tome, ako je razvijena mogućnost detekcije zračenja i analize oblika funkcije koja ga opisuje, mogu se dobiti glavni podaci o samom izvoru (koherentnost, monohromatičnost, kolimisanost, intenzitet). U širini linije $\Delta\nu$ sadržano je vreme koherencije, jer važi

$$\Delta\nu \cdot \tau_k \sim 1, \quad (1)$$

gde je τ_k vreme koherencije [10].

Tačna vrednost ove definicije išla bi preko korelacione funkcije $n + m$ -tog reda :

$$G_{j_1, j_2 \dots j_{N+M}}^{N, M}(x_1, x_2 \dots x_{N+M}) = \langle V_{j_1}^{\oplus}(x_1) \dots V_{j_N}^{\oplus}(x_N) V_{j_{N+1}}^{\ominus}(x_{N+1}) \dots V_{j_{N+M}}^{\ominus}(x_{N+M}) \rangle \quad (2)$$

gde su sa V označene komponente elektromagnetnog polja [11].

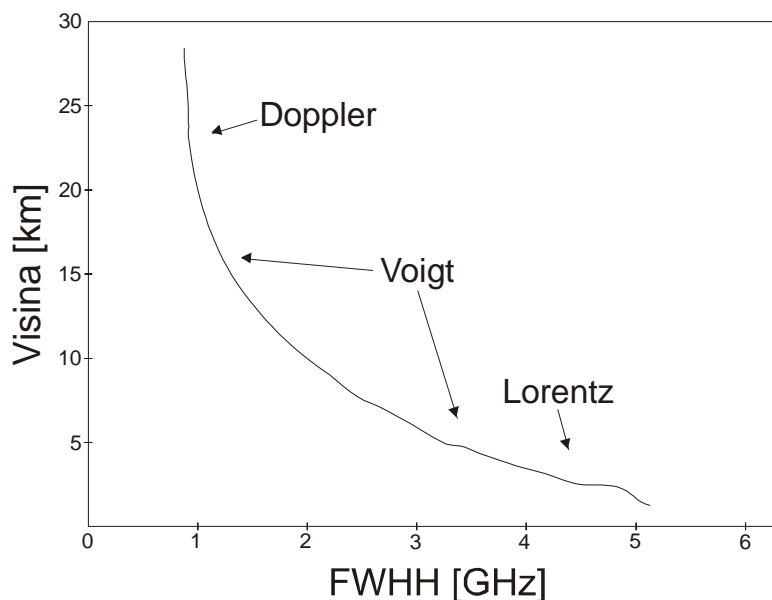
Zračenje na svom putu trpi interakcije raznog tipa koje uglavnom šire linije. Ako se može razlučiti pojedinačni uticaj, dobija se mogućnost opisa dinamike ansambla sa kojima se stupa u interakciju. Postoji nekoliko novih razvijenih pravaca u spektroskopiji, koji se baziraju na laserskim izvorima. U osnovi postoje linearne i nelinearne, čija je osnovna razlika u primeni spontanijih ili stimulisanih (indukovanih) efekata. Posebno mesto ima laserska koherentna spektroskopija.

Proučavanje pomaka emisionih linija jednog izvora je obično manji problem od proučavanja širine linije. Poznavanje širine linije primarnog izvora i detektovanog snopa nekog elektromagnetnog talasa pokazuje istoriju događanja u izvoru na putu snopa kroz neki medijum, i prirodu detekcije. Ove tri karike (izvor, medijum i detektor) su bile predmet proučavanja mnogobrojnih teoretskih i eksperimentalnih radova. Uske linije lasera (reda MHz i manje) su poseban problem za merenje. Međutim, pri tačnom poznavanju početnog i krajnjeg oblika i intenziteta signala, dobijaju se mnogi podaci o materijalu i procesima pri prostiranju snopa. S druge strane, merenja širine laserske linije (pogotovo uske) je moguće samo unošenjem spoljnih efekata [12]. Tabela 1 može da posluži kao ilustracija vrste porekla očekivane širine linije za nekoliko karakterističnih procesa u gasovima [13].

Tabela 1. Izvori proširenja linije u gasovima

Vrsta	Poreklo	Širina linije	Opseg [Hz]
<i>Doppler</i> -ovo (nehomogeno)	<i>Doppler</i> -ov efekat kao posledica termičkog kretanja	$\nu_0 \frac{v}{c}$ ν_0 - frekvencija prelaza, v - srednja brzina	$10^8 - 10^{10}$
prirodno	spontani prelaz sa pobuđenog nivoa	$\frac{1}{2\pi\tau}$	atomi: $10^5 - 10^7$ molekuli: $10 - 10^3$
<i>Lorentz</i> -ovo (sudarno)	sudari među česticama	$\frac{1}{\pi\tau_c}$, τ_c - srednje vreme između sudara	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$
sudari sa zidovima	sudari sa zidovima ćelije	$\frac{\nu_0}{2\pi L}$, ν_0 - srednja brzina, L – prečnik ćelije	$10^3 - 10^4$
širenje zbog vremena preleta	prelet čestice kroz svetlosni snop	$\frac{\nu_0}{2\pi a}$, ν_0 - srednja brzina, a – prečnik snopa	$10^3 - 10^4$
širenje usled intenziteta	veliki intenzitet laserskog snopa uzrokuje veliku brzinu prelaza	$\frac{p_{12}E}{\hbar}$, p_{12} – dipolni momenat prelaza, E – intenzitet laserskog polja	$10^4 - 10^5$

Jedna od značajnih primena lasera je i LIDAR, o kojem će dalje biti reči. On se, između ostalog, koristi i za ispitivanje atmosfere, a na slici 1 data je zavisnost oblika linije od visine [14].



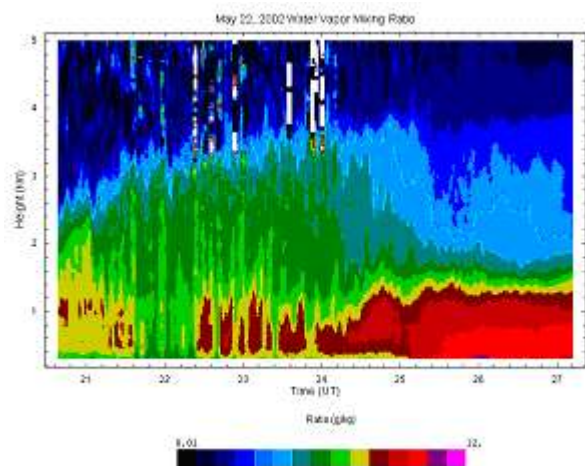
Slika 1. Zavisnost oblika linije od visine

LIDAR predstavlja optičku daljinsku senzorsku tehnologiju kojom se mere svojstva vraćene svetlosti kako bi se dobile informacije o udaljenoj meti. Koriste se kratke talasne dužine elektromagnetnog spektra, obično u ultraljubičastoj, vidljivoj ili bliskoj infracrvenoj oblasti. Zato je LIDAR veoma osetljiv na aerosoli i čestice u oblacima i ima brojne primene u istraživanju atmosfere i meteorologiji. U različitim primenama se koriste različiti tipovi rasejanja, ali najčešće *Rayleigh*-jevo, *Mie* i *Raman*-ovo rasejanje, kao i fluorescencija [15].

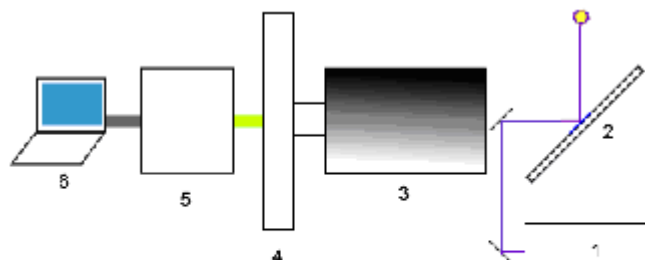
LIDAR sistem ima nekoliko glavnih komponenti:

- Laser – koriste se laseri sa malom širinom linije, kao što je Nd^{3+} :YAG laser. Kasnije su razvijeni i poluprovodnički DFB (*distributed feedback laser diodes*) i DBR (*distributed Bragg reflector lasers*) laseri, sa širinom linije od nekoliko MHz. Značajno smanjenje širine može se postići produžavanjem rezonatora jednomodnim fiberom koji sadrži *Bragg*-ovu rešetku sa uzanim opsegom. Time se postižu izuzetno male širine linije od nekoliko kHz ili čak ispod 1 kHz. U novije vreme koriste se i fiber laseri, pa tako imamo fiber lidar [16]. **Fiber lidar** može da se koristi za kontrolu zračenja u industriji. INO (*Institut National d'Optique*, Kanada) lidar se bazira na EDFL-u (fiber laser dopiran erbijumom). Sastoji se od lidarske glave koja sadrži predajnu i prijemnu optiku i koja je postavljena na skenirajuću platformu. Glava je povezana sa laserskim izvorom i detektorom preko optičkog fibera [17].
- Skener i optika;
- Prijemnik i prijemna elektronika;
- Pozicioni i navigacioni sistemi [15].

NASA je razvila skenirajući *Raman* LIDAR (SRL) za proučavanje atmosfere. Ovim LIDARom se meri stepen mešanja vodene pare, dinamike aerosoli, depolarizacije aerosoli, itd. Svetlost rasejana unazad molekulima i aerosolima na talasnoj dužini lasera, kao i Ramanova rasejana svetlost od molekula vodene pare (3657 cm^{-1}), azota (2329 cm^{-1}), i kiseonika (1555 cm^{-1}) prikuplja se sa dva teleskopa. Teleskopi koriste različita polja posmatranja za merenje signala na velikim i malim visinama. Na slici 2 dat je stepen mešanja vodene pare meren SRL-om, dok je slika 3 shematski dijagram ovog uređaja.

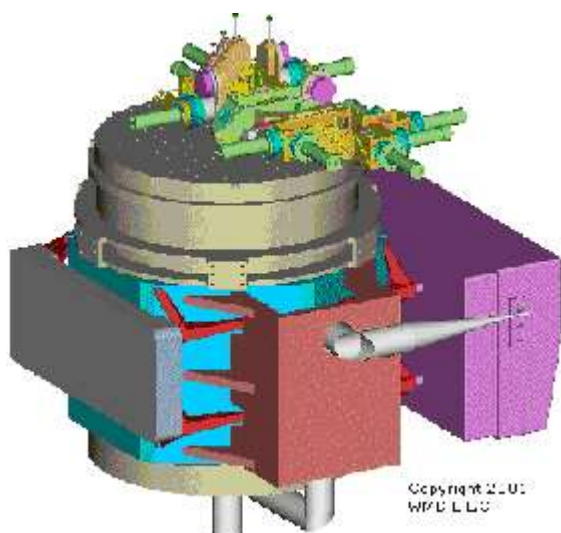


Slika 2. Stepen mešanja vodene pare meren SRL-om.

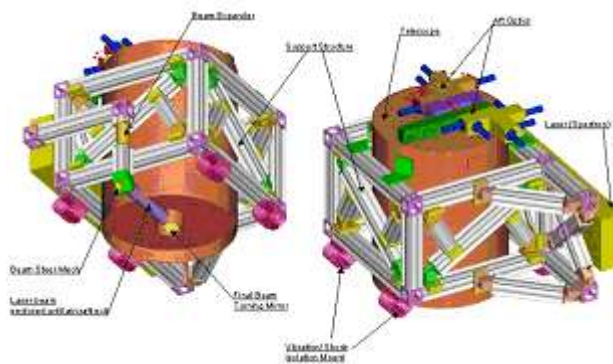


Slika 3. Shematski dijagram SRL lasera. 1-Nd³⁺:YAG laser, 2-skenirajuće ogledalo, 3-teleskop, 4-optika i fotomultiplikatorske cevi, 5-integrisana analogna i elektronika za brojanje fotona, 6-kompjuter za akviziciju podataka.

Razvijen je i prvi Ramanov spektroskopski LIDAR u vazduhu – RASL (*Raman airborne spectroscopic LIDAR*). Ovaj tip uređaja koristi Nd³⁺:YAG laser u kombinaciji sa jednim teleskopom, i sva merenja se vrše korišćenjem samo jednog polja gledanja. Na slici 4 dat je izometrijski prikaz RASL-a, dok je na slici 5 njegov dijagram [18].



Slika 4. Izometrijski prikaz RASL-a.



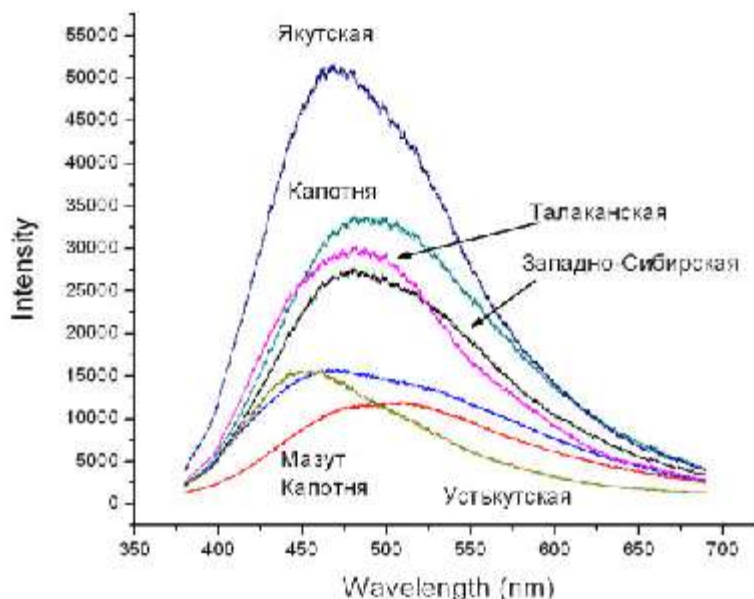
Slika 5. Dijagram NASA-inog RAS LIDARa.

Posebno važna oblast primene lasera sa malom širinom linije je detekcija gasova u tragovima lidarom sa diferencijalnom apsorpcijom (DIAL – *differential absorption LIDAR*). Impulsni laserski snop se šalje u atmosferu i mali delovi svetlosti se rasejavaju unazad od čestica duž pravca snopa do detektora. Za merenja koncentracije DIAL sistem se oslanja na diferencijalni povratni signal od dve

bliske talasne dužine, od kojih je samo jedna snažno apsorbovana merenim gasom. Veličina diferencijalnog povratnog signala na različitim rastojanjima duž pravca laserskog snopa ukazuju na koncentraciju [19].

DIAL tehnika je jedna od najpodesnijih i za nadgledanje stratosferskog ozonskog sloja do visine od 50 km. Ozon je jedan od najvažnijih gasova koji se javljaju u atmosferi. Igra dominantnu ulogu u balansu energije troposfere i stratosfere. Takođe, deluje kao štit protiv Sunčevog UV zračenja. Korišćen je XeCl eksimer laser, a emitovana talasna dužina (308 nm) se nalazi na granici apsorpcionog opsega ozona. Druga talasna dužina, koja služi kao referentna, je generisana stimulacijom *Raman* rasejanja u gasu na visokom pritisku ćelije. *Raman* medijum je metan (2916 cm^{-1}) ili vodonik (4155 cm^{-1}) [20].

Postoji i fluorescentni LIDAR, a jedan od savremenijih je LIDAR tipa PL200 firme *Optosystems*, kojim se dobija fluorescentni spektar različitih vrsta nafte (slika 6) [21].



Slika 6. Fluorescentni spektri različitih vrsta nafte

2. Difrakcija

Skalarna teorija difrakcije

Centralnu ulogu u izvođenju skalarne teorije difrakcije ima takozvana integralna teorema *Helmholtz*-a i *Kirchhoff*-a, jer omogućava da se polje $U(\mathbf{x})$ u tački posmatranja \mathbf{x}_0 izrazi preko “graničnih vrednosti” na bilo kojoj zatvorenoj površini S koja okružuje \mathbf{x}_0 :

$$U(\mathbf{x}_0) = -\frac{1}{4\pi} \iint_S \left[\frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial n} G(\mathbf{x}) - U(\mathbf{x}) \frac{\partial G(\mathbf{x})}{\partial n} \right] dS. \quad (1)$$

Sferni talas jedinice amplitude koji se siri oko tacke posmatranja \mathbf{x}_0 je izabran kao Green-ova funkcija, tj.

$$G(x) = \frac{e^{jk_0 r_0}}{r_0} \quad \text{sa} \quad r_0 = \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}\| \quad . \quad (2)$$

Integralna teorema (1) može da se koristi za proučavanje difrakcionih efekata koji se javljaju na ravnom objektu.

Uvodeći različite aprokcimacije i granične uslove, dobijamo *Fresnel-Kirchhoff*-ovu difrakcionu formulu

$$U(\mathbf{x}_0) = \frac{jA_S}{\lambda} \iint_A \frac{e^{jk_0(r_S+r_0)}}{r_S r_0} \left[\frac{\cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}_0 - \mathbf{x}) - \cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}_S - \mathbf{x})}{2} \right] dS \quad . \quad (3)$$

Izraz u srednjim zagradama je faktor inklinacije i prvi ga je uveo *Fresnel* na osnovu heurističkih argumenata, tako što je kombinovao *Huygens*-ovu konstrukciju obvojnice sa *Young*-ovim principom interferencije. Opisano matematičko izvođenje kasnije je dao *Kirchhoff*. Interesantna osobina difrakcione formule (3) je njena simetrija u odnosu na izvor i tačku posmatranja, što se naziva *Helmholtz*-ovom teoremom reciprociteta.

Sada ponovo pišemo (3) uvodeći opšti linearni odnos između pobudnog polja $U_S(x,y)$ na ekranu i resultantne difrakcione slike $U(x_0,y_0)$

$$U(x_0, y_0) = \iint_{x,y} h(x_0, y_0; x, y) U_S(x, y) dx dy \quad . \quad (4)$$

Kako su od interesa vrednosti polja koje leže u određenim ravnima paralelnim ekranu, samo zavisnost od lateralnih x i y koordinata se eksplicitno izražava, dok je vertikalni položaj označen indeksima. Integracioni kernel $h(x,y;x_0,y_0)$ superpozicionog integrala u (4) dat je sa ((1) i (3))

$$h(x_0, y_0; x, y) = \frac{j}{\lambda} \left[\frac{\cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}_0 - \mathbf{x}) - \cos(\mathbf{n}, \mathbf{x}_S - \mathbf{x})}{2} \right] \frac{e^{jk_0 r_0}}{r_0} \quad . \quad (5)$$

U zavisnosti od rastojanja z_0 između tačke posmatranja \mathbf{x}_0 i ekrana, kernel $h(x_0,y_0;x,y)$ može da se pojednostavi.

- ***Fresnel*-ove aproksimacije** se dobijaju skraćivanjem *Taylor*-ovog reda u članu $k_0 r_0$ posle prvog člana, tj.

$$h(x_0, y_0; x, y) \cong j \cos \delta \frac{e^{jk_0 z_0}}{\lambda z_0} e^{j \frac{k_0}{2z_0} ((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)} . \quad (6)$$

Rezultantna relacija (4) uključuje *Fresnel*-ove integrale, tj. integrale tipa

$$C(w) = \int_0^w \cos(\pi \tau^2 / 2) d\tau \text{ i } S(w) = \int_0^w \sin(\pi \tau^2 / 2) d\tau .$$

Usled kvadratne zavisnosti od

integracionih promenljivih (x, y) , ne postoji nijedno analitičko rešenje. Tabela vrednosti

mogu se pronaći u literaturi. Aproksimacija (6) važi za $(2z_0)^3 \gg k_0 [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]_{\max}^2$

ili jednostavno $z_0 \gg w$.

- **Fraunhofer-ove aproksimacije** zanemaruju i kvadratnu zavisnost od integracionih promenljivih (x, y) što rezultuje u

$$h(x_0, y_0; x, y) \cong j \cos \delta \frac{e^{jk_0 z_0}}{\lambda z_0} e^{j \frac{k_0}{2z_0} (x_0^2 + y_0^2)} e^{j \frac{k_0}{z_0} (xx_0 + yy_0)} . \quad (7)$$

Integralna relacija (4) odgovara *Fourier*-ovoj transformaciji, tj. zavisnost od integracionih promenljivih je linearna. Efikasne numeričke tehnike kao što je FFT mogu da se koriste za procenu. Opseg u kome važi (1) dat je sa $2z_0 \gg k(x^2 + y^2)_{\max}$ ili $z \gg w^2 / \lambda$ [22].

REZULTATI I DISKUSIJA

Difraktogrami ugljeničnih vlaknastih materijala

Ugljenični tekstilni materijali u različitim oblicima (tkanina, pletenina, filc) interesantni su za proučavanje zbog velikog broja dobrih osobina: termički su postojani, hemijski stabilni, mogu da imaju veliku električnu provodnost, lako se seku i oblikuju. Zato su našli veliku primenu kao toplotni izolatori, grejni elementi, podloge u C/C kompozitima itd. Najveću primenu – u ličnoj zaštiti, zaštiti životne sredine, medicini – imaju aktivni ugljenični materijali koji se dobijaju kontrolisanom oksidacijom u procesu proizvodnje. Aktivnu ugljeničnu pleteninu, koja je i korišćena u ovom radu, razvilo je britansko ministarstvo odbrane za izradu odela i maski za nuklearnu, biološku i hemijsku zaštitu. Ovi materijali se odlikuju velikom specifičnom površinom od preko 1500 m²/g [23].

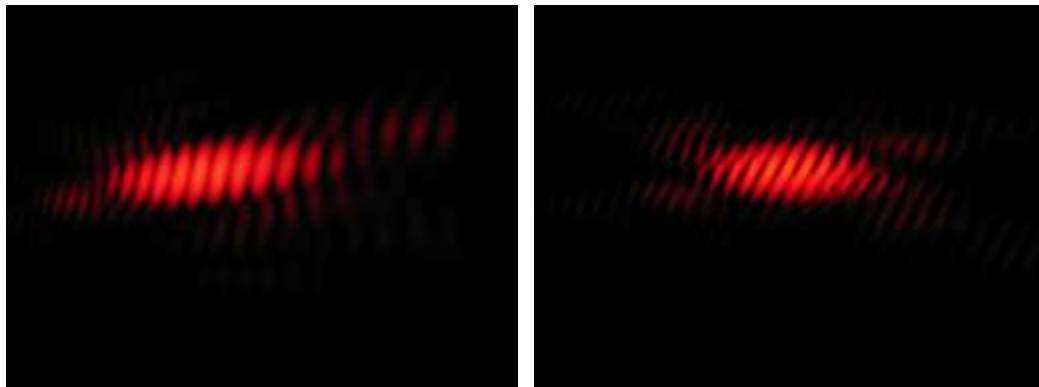
Ugljenični vlaknasti materijali tipa aktivne ugljenične pletenine izlagani su dejstvu rubinskog lasera ($\lambda = 694,3 \text{ nm}$). Difrakcioni efekti ispitani su pomoću He-Ne lasera.

U literaturi [24] utvrđeno je da rubinski laser ima interesantno dejstvo na ugljenične vlaknaste materijale, tj. da dovodi, u manjoj ili većoj meri, do sređivanja njihove mikrokristalne strukture. Očekuje se da će se primenom laserskih metoda skratiti vreme modifikacije materijala i da će se izbeći neželjene reakcije pri dobijanju materijala određenih osobina drugim metodama.

Rubinski laser je korišćen u režimu Q prekidanja, a dužina impulsa je 30 ns. Korišćen je fokusiran i nefokusiran snop i različiti položaji uzoraka u odnosu na položaj žiže sočiva. U slučaju interakcije sa nefokusiranim snopom uzorci su, u zavisnosti od veličine, izlagani dejstvu snopa u mono ili višeimpulsnom režimu, kako bi se približno pokrila cela površina uzorka. Uzorci su stavljani pod pravim uglom u odnosu na snop lasera. Laser je radio u TEM_{00} modu.

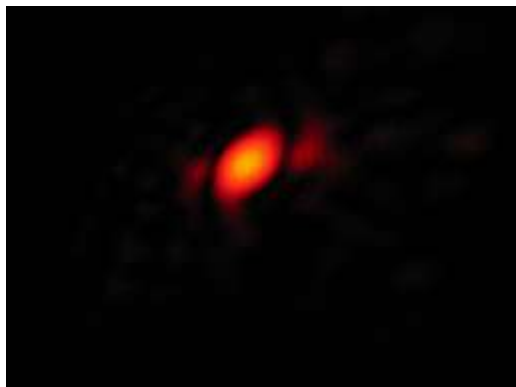
Difrakcioni efekti ispitivani su za uzorke ozračene nefokusiranim snopom ($\Phi = 0,088 \text{ J/cm}^2$ i $0,29 \text{ J/cm}^2$), kao i za uzorke ozračene fokusiranim snopom energije $E = 1 \text{ J}$, na rastojanju od žiže $r = 0$, $r = 3 \text{ mm}$, tj. $r = 1 \text{ cm}$.

Na slici 1 prikazani su snimci difrakcionih efekata za uzorak pre gađanja koji je tokom snimanja osvetljavan pod različitim uglovima.

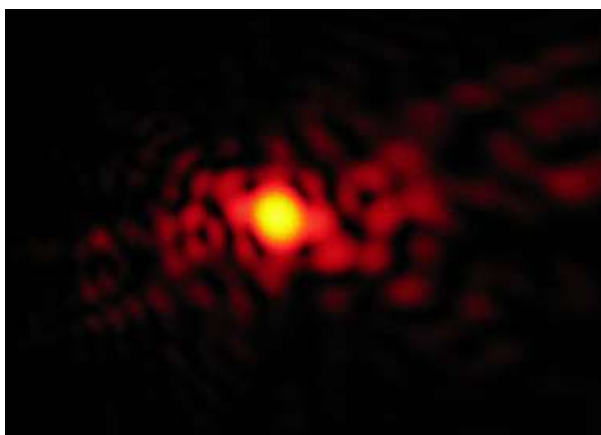


Slika 1.

Pri delovanju fokusiranog snopa, energije $E = 1 \text{ J}$, na rastojanju od žiže $r = 0$, došlo je do bušenja materijala, a difraktogram kroz “rupicu” dat je na slici 2.



Slika 2. Difraktogram uzorka nakon gađanja fokusiranim snopom energije $E = 1 \text{ J}$, na $r = 0$.



Slika 3. Difraktogram uzorka nakon gađanja fokusiranim snopom energije $E = 1 \text{ J}$, na $r = 3 \text{ mm}$ [23].

U slučaju delovanja fokusiranog snopa, na $r = 3 \text{ mm}$, dolazi do oštećenja materijala, što je vidljivo i na slici 3. Nepravilnost difrakcione slike ukazuje na činjenicu da su pojedina vlakna oštećena, istopljena ili prekinuta [23].

Pri delovanju fokusiranog laserskog snopa na $r = 1 \text{ cm}$, vidljiva je promena boje na materijalu, tačnije izlagana oblast je tamnija od okoline. Difrakcioni efekti u ovom slučaju ne mogu da se registruju, a pretpostavlja se da dolazi do topljenja materijala, odnosno usled njegove homogenizacije ne mogu da se vide difrakcioni efekti na vlaknastim strukturama.

Delovanje nefokusiranog snopa, gustine energije $0,088 \text{ J/cm}^2$ i $0,29 \text{ J/cm}^2$ izaziva promene u mikrostrukтури, tačnije dolazi do sređivanja turbostratične strukture materijala [24]. Međutim, ova energija ne utiče na makrostrukтуру, i difrakcione slike ovih uzoraka pre i nakon interakcije se ne razlikuju.

Analiza ovih fotografija pokazuje da je difrakcija veoma složena pojava koja zavisi od više faktora (naponi materijala u okviru, ugao pod kojim se postavlja uzorak, da li je laserski snop "pogodio" vlakno ili međuprostor, pravac sečenja uzorka itd.). Interpretacija difrakcione slike je ovim mnogo složenija.

ZAKLJUČAK

U radu su obrađene savremene tehnike ispitivanja različitih svojstava materijala i sredina, koje se zasnivaju na upotrebi lasera.

U prvom delu rada dat je teorijski prikaz rada LIDARa, kao i neke od njegovih mnogobrojnih primena – od ekologije do atmosfere fizike. U različitim primenama se koriste različiti tipovi rasejanja, ali najčešće *Rayleigh*-jevo, *Mie* i *Raman*-ovo rasejanje, kao i fluorescencija. I dalje postoji mnogo prostora za dalji teorijski i praktični razvoj ove tehnike – u oblasti usavršavanja optike, slanja snopa, detekcije signala, kao i metoda njegove obrade.

Druga metoda, koja je u ovom radu korišćena za ispitivanje ugljeničnih vlaknastih materijala, počiva na pojavi difrakcije svetlosti. Najveću primenu u oblasti ispitivanja materijala laserska difrakcija ima u analizi veličine čestica i njihove raspodele. Međutim, široko se koristi i za opisivanje vlakana, od metrologije tekstila do telekomunikacionih fibera. Kod tekstilnih materijala, zbog složenosti površine, ova tehnika ima posebnu ulogu, jer može da se koristi u procesu automatizacije i kontrole. Korišćenjem laserske difrakcije određuje se gustina vlakana, raspodela veličine vlakana, površinska konfiguracija, utvrđuje se prisustvo defekata itd. Takođe, ovi procesi se vezuju za složene zadatke, kao što je *pattern recognition* (prepoznavanje obrazaca). Radi dobijanja što preciznijih podataka o materijalu, i ovde je neophodno rešavanje mnogih mernih, teorijskih i praktičnih pitanja.

LITERATURA:

- [1] S. Svanberg, "Laser spectroscopy in development", Europhysics News, Vol. 33, No. 2, 2002
- [2] <http://inst.wff.nasa.gov/eaarl>
- [3] <http://www-calipso.larc.nasa.gov>
- [4] <http://www.etl.noaa.gov/technology/instruments/floe>
- [5] <http://atm.wff.nasa.gov>
- [6] http://www.malvern.com/ProcessEng/systems/laser_diffraction/technology/technology.htm
- [7] B. Mallick, T.N. Tiwari, S. Panigrahi, R.C. Behera, "A new approach for fibre density determination by laser diffraction: application to proton-irradiated PET microfibre", Meas. Sci. Technol., Vol. 17, 2006, pp. 3289-3292
- [8] G.P. Meshcheryakova, B.M. Tarakanov, "Diffraction method of measuring the structural characteristics of fabrics made of chemical fibres", Fibre chemistry, Springer, New York, Vol. 36, No. 3, 2004, pp. 227-231
- [9] C. Fandrey, A. Naqwi, "Recent developments and applications of ensemble laser diffraction technology for diagnostics of nonwovens", 14th TANDEC International Nonwovens Conference, Knoxville, Tennessee, SAD, 2004
- [10] M. Srećković, skripte iz predmeta "Kvantna elektronika", Elektrotehnički fakultet, Beograd
- [11] B.E.A. Saleh, "Photoelectron Statistics", Springer-Verlag, Berlin, 1978, pp. 440
- [12] A. Kovačević, "Optimizacija i stabilizacija laserskih parametara sa primenama", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2005

- [13] D. Družijanić, N. Slavković, Lj. Konstantinović, Z. Ristić, Z. Fidanovski, A. Kovačević, M. Trtica, B. Radenković, Zbornik radova XLVII ETRAN konferencije 3, 2003, pp. 342-346
- [14] M. Srećković, skripte iz predmeta "Laserska tehnika", Elektrotehnički fakultet, Beograd
- [15] <http://en.wikipedia.org>
- [16] www.rp-photonics.com
- [17] "Industrial fiber lidar: some applications", Proceedings of SPIE, Vol.4087, 2000, pp.981-987
- [18] <http://ramanlidar.gsfc.nasa.gov/>
- [19] <http://www.spectrasyne.ltd.uk/html/technique.html>
- [20] I. Radovic, "Primena laserske tehnike", diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997
- [21] http://www.optosystems.ru/eng/lidar_03.php?p=25
- [22] <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/kirchauer/node50.html>
- [23] J. Stašić, S. Ristić, Z. Anastasijević, "Ispitivanje dejstva rubinskog lasera na aktivnu ugljeničnu pleteninu", Odbrambene tehnologije - OTEH 2007, 03-05. oktobar 2007, zbornik radova
- [24] J. Stašić, M. Srećković, B. Kaluđerović, S. Ristić, "Interaction of ruby laser with carbon fibrous materials", *Chemical Industry*, Vol. 61, No. 2, pp. 60-65, 2007