

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA U BEOGRADU

Na sednici br. 729 Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, održane 8.3.2011. godine, određeni smo za članove Komisije za ocenu naučne zasnovanosti i prihvatanje teme doktorske disertacije pod naslovom “Modelovanje interakcija laserskih snopova sa ugljeničnim nanoporoznim materijalom“ kandidata mr Milovana Janićijevića, diplomiranog inženjera elektrotehnike. Posle pregleda dostavljene dokumentacije, podnosimo Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu sledeći

IZVEŠTAJ

a) Podaci o kandidatu

Mr Milovan Janićijević je rođen 2.11.1976. u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju opšteg smera je završio u Gornjem Milanovcu sa odličnim uspehom i kao đak generacije sa Vukovom diplomom. Učestvovao je na opštinskim i regionalnim takmičenjima iz matematike i fizike. Posle srednje škole upisao je Elektrotehnički fakultet u Beogradu. Diplomirao je 7.10. 2004. godine na smeru za Optoelektroniku i lasersku tehniku, odseka za Fizičku elektroniku. Odbranio je diplomski rad “Optička bistabilnost i primena u kvantnoj elektronici” sa ocenom 10,00. Po diplomiranju je upisao postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu i magistrirao je 9.7. 2009. godine sa prosečnom ocenom 10,00 na smeru za Optoelektroniku lasersku tehniku. Tema magistarske teze je bila “Interakcija laserskog zračenja sa ugljeničnim nanoporoznim materijalom“.

Od 1.9.2005. je zasnovao radni odnos u kompaniji “Metalac” A.D. u zavisnom preduzeću “Metalac posuđe” d.o.o. u Gornjem Milanovcu u Službi elektroodržavanja na mestu glavnog inženjera elektroodržavanja. Pohađao je kurs „Održavanje tehničkih sistema“ na Kopaoniku 2009.godine, i dobio nagradu kao najbolji polaznik kursa. Učestvovao je u programima obuke zaposlenih, koji obuhvataju oblasti automatizacije procesa, metrologije, održavanja i menadžmenta (Siemens Srbija, Adižes, itd.). Putovao je u inostranstvo (Slovenija) radi upoznavanja sa novom opremom.

b) Podaci o objavljenim radovima kandidata

Radovi saopšteni na međunarodnim naučnim skupovima i štampanim u formi apstrakta:

1. M. Srećković, B. Kaludjerović, N. Ivanović, A. Kovačević, D. Družijanić, M. Janićijević, Modeling and experiment in area of interaction of carbon cloth material with various laser types, 3rd Serbian Congress for Microscopy (3SCM-2007), Beograd, 2007.

2.M. Janićijević, B. Kaluđerović, M. Srećković, A.Kovačević, D. Družijanić, Modeling and experiments in the interaction of laser beam with carbon nanoporous materials, 10.Yukomat, Herceg Novi, 31.avgust-4.septembar, pp.103, 2009.

3. M. Srećković, B. Kaluđerović, A. Kovačević, V. Rajković, S. Pantelić, Z. Latinović, D. Družijanić, M. Janićijević, Some problems in modeling of laser interaction with transparent and absorptive material , 2nd International conference on physics of optical materials and devices (Icom 2009) , Herceg Novi, 27.august- 30. august, pp. 205, 2009.

4. M. Janićijević, B. Kaluđerović, M. Srećković, A. Kovačević, D. Družijanić, Approach to modeling interaction of carbon fiber materials and laser beam with experiment, 11.Yukomat, Herceg Novi, 6.septembar-10. septembar, pp.XXXV, 2010.

Radovi u domaćim časopisima:

1.M. Srećković, M. Kutin, S. Ristić, S. Milić, B. Kaluđerović, M. Janićijević, Nekonvencionalne tehnike za ocenu zaostalih napona sa akcentom na IC i mikroramanovoj spektroskopiji u ispitivanju materijala, Tehnička dijagnostika, god.V, br.2, pp. 20-26, 2006.

2. M. Janićijević, M. Srećković, B. Kaluđerović, Predviđanje vremenskog odziva ugljeničnog materijala ozračenog Nd³⁺:YAG laserom, Tehnika, Novi materijali , Vol.19, br.4, pp. 1-4, 2010.

Radovi na domaćim konferencijama štampani u formi apstrakta:

1. M. Janićijević, M. Srećković, B. Kaluđerović, Predviđanje vremenskog odziva ugljeničnog materijala ozračenog Nd³⁺:YAG laserom , Osma konferencija mladih istraživača, Nauka i inženjerstvo novih materijala, 21-23 decembar, Beograd, pp.XVII-8 , 2009.

2. M. Janićijević, M. Srećković, D. Družijanić, Prilaz modelovanju interakcije ugljeničnog materijala i laserskih snopova i eksperiment, Fotonika 2010, 21-23.april, Beograd, pp.14, 2010.

3. Ž. Tomić, M. Srećković, S. Polić-Radovanović, L. Lukić, A. Kovačević, M. Dinulović, M. Janićijević, Characteristics of the Laser Interaction with Chosen Ceramic Materials, 1st Conference of the Serbian Ceramic Society (1CSCS-2011), 17.-18.mart, Beograd, pp.25, 2011.

Stručni projekti vezani za posao:

- 1) Projektovanje komandnog elektro ormana i izrada aplikativnog softvera za mašinu za uzdužno zavarivanje kazana bojlera (Metalac A.D. , Gornji Milanovac, 2006.)
- 2) Rekonstrukcija upravljanja i električne instalacije za hidrauličnu prese 63t, Litostroj (Metalac A.D. , Gornji Milanovac, 2007.)
- 3) Projektovanje razvodno-komandnog elektro ormana i pripadajuće instalacije i izrada aplikativnog softvera za mašinu za savijanje slamčica (Bomex, Gornji Milanovac, 2008.)
- 4) Projektovanje razvodno-komandnog elektro ormana i pripadajuće instalacije i izrada aplikativnog softvera za automatsku mašinu za regenerat sušera (Vapeks, Kraljevo, 2008.)
- 5) Rekonstrukcija upravljanja i električne instalacije za hidrauličnu prese 160t, Litostroj (Metalac A.D. , Gornji Milanovac, 2008.)
- 6) Rekonstrukcija elektro upravljanja na mašini za sečenje sušera (Vapeks, Čačak, 2009.)
- 7) Izrada nadzornog SCADA sistema za praćenje nivoa hemikalija u rezervoarima (Vapeks, Čačak, 2010.)
- 8) Rekonstrukcija elektro upravljanja i izrada aplikativnog softvera za sistem za doziranje sumporne kiseline. (Metalac A.D. , Gornji Milanovac, 2010.)
- 9) Projektovanje razvodno-komandnog elektro ormana i pripadajuće instalacije i izrada aplikativnog softvera za grafički nož (Metalac A.D. , Gornji Milanovac, 2010.)
- 10) Rekonstrukcija elektro upravljanja i izrada aplikativnog softvera za automatsku mašinu za drukovanje (Metalac A.D. , Gornji Milanovac, 2010.)

c) Predmet i cilj istraživanja

Proučavanje interakcije laserskih snopova sa materijalima uopšte je složen zadatak. Specifičnost izabranih materijala doprinosi sa svoje strane kompleksnosti problema. Složenost je prisutna i po mikrogeometrijskoj strukturi i po hemijskom sastavu. Zahvaljujući specifičnim osobinama i mogućnosti kreiranja najrazličitijih formi materijala sa željenim svojstvima variranjem polaznih materijala i procesa dobijanja, ugljenični materijali imaju sve šira polja primene i oblasti istraživanja. Termički su vrlo postojani, u vazduhu do 350 °C, a u inertnoj sredini do 3600 °C, hemijska stabilnost je vrlo izražena i ogleda se u visokoj postojanosti prema većini agresivnih sredina. Njihova specifičnost u odnosu na druge materijale su brojne.

Transportne osobine su na sredini između metala, keramike i polimera. To važi za termalnu provodnost (0,06-0,09 mW/K), a bez obzira što postoje bazične teorije veze između termalne i električne provodnosti (Franz-Wiedemann-ov zakon), neophodno je dalje proučavanje. U primenama ovog materijala važne su i osobine na visokim temperaturama, a na sobnoj temperaturi ugljenično vlakno, dobijeno iz poliakrilonitrila ima 5-6 puta veću zateznu čvrstoću u odnosu na čelik. Aktivirani ugljenični vlaknasti materijali, imaju veliku površinsku aktivnost i specifične površine (dostižu vrednosti i preko 2000 m²/g). Uglavnom su mikroporozni (do 2 nm), i mezoporozni (od 2 do 50 nm). Raspodela veličine pora može biti predmet posebne diskusije.

Poznati pristupi rešenju problema kvantitativnog opisa poroznosti su: statistički pristup (npr. standardna devijacija) i netradicionalni pristupi zasnovani na razmatranju strukturalnih karakteristika. Fraktalna analiza (FA) je često korišćen netradicionalni sistem. Osnovna ideja metoda zasnovanog na fraktalskoj geometriji izložena je u radu B. Mandelbrot-a sa kraja 80-ih prošlog veka. Glavni koncept FA je da se fraktalske dimenzije mogu smatrati za meru heterogenosti objekta, koja je posledica poroznosti. Često korišćena fraktalska struktura za opis poroznosti u 2D je tepih Sierpinskog.

Priroda materijala uslovljava vrlo specifična termička svojstva i mogućnost za odvijanje brojnih fotohemijskih procesa. Pod terminom specifična termička svojstva, misli se na složene mehanizme apsorpcije toplote i transporta toplote u samom materijalu. Kod apsorpcije energije laserskih snopova raznih tipova najčešće se deo energije konvertuje u toplotnu energiju, a apsorpcija se odvija površinskim i zapreminskim procesima. Preovladavanje tipa procesa zavisi i od karakteristika materijala (koeficijent apsorpcije i termalna difuzivnost), i od parametara laserskih snopova (režim rada, talasna dužina, trajanje impulsa, prostornih modova, intenziteta, i dr.).

Modelovanje interakcije se vrši različitim metodama, fundamentalnog ili fenomenološkog pristupa. Termalni modeli se zasnivaju na generalnoj termalnoj jednačini, koja se rešava prema izabranom tipu problema, izabranim aproksimacijama, graničnim uslovima i savremenim numeričkim metodama. Opis transporta toplote u ugljeničnom materijalu zavisi od pojedinačnih doprinosa, koji potiču od kondukcije, konvekcije, i radijacije. Kao dominantni mehanizam za ovaj tip materijala se smatra kondukcija, ali kad se u razmatranje uključi poroznost, doprinosi, koji potiču od radijacije, više nisu zanemarljivi. Pojavljuju se potrebe za preciznijim kvantifikovanjem ovih doprinosa korišćenjem modela za mikrogeometrijsku strukturu. Prelazni procesi u druge faze osnovnog materijala se moraju posebno razmatrati (veći uticaj konvekcije). Ovakav pristup za specifičan izabran tip materijala (ugljenični filc, karbonizovana pletenina, aktivna ugljenična pletenina, P4396-2, P1336-1, P7295-2) treba da omogući bolje razumevanje i simulacije procesa za razne režime rada lasera. Kombinacijom analitičkih i numeričkih prilaza uz predviđen eksperimentalan rad, metrološka analiza treba da odgovori o stepenu saglasnosti i oceni aplikativnost formiranog modela.

Modelovanje fotohemijskih procesa (oksidacija površine, preraspodela funkcionalnih grupa na površini ugljeničnog materijala) s obzirom na hemijsku složenost ovih materijala je posebno vezano za površinske mehanizme. To bi podrazumevalo uključenje teorijskih modela, koji opisuju fotohemijske procese izazvane pri interakciji laserskih snopova i ugljeničnih materijala, koji uključuju složene rotacione i vibracione spektre organskih molekula i funkcionalnih grupa na površini. Za složene materijale bi bilo potrebno mnogo aproksimacija da bi se došlo do kvantitativnih detaljnijih odgovora.

Analizom eksperimentalnih rezultata iz literature i organizovanih za predloženu tezu, uz odgovarajuće merne tehnike (optička i elektronska mikroskopija-SEM, rendgenske, IC i Ramanove spektroskopije i specifičnih tehnika za ovu vrstu materijala i dr.) pretpostavlja se da će doći do nekih zaključaka o dominantnim fotohemijskim reakcijama za odgovarajuću kombinaciju lasera i ugljeničnog materijala.

d) Osvrt na relevantne bibliografske izvore

Predložena tema pripada savremenoj oblasti istraživanja ([1]-[44]), koja je mada široko zastupljena u literaturi ipak nedovoljno razjašnjena. Predložena tema se fokusira na deo problematike, koji je do sada manje analiziran i ne na ovaj način. Literatura je zastupljena i na teorijskoj i na eksperimentalnoj bazi. Za potrebe teze će se koristiti delom razvijene fundamentalne osnove, a delom će se razvijati nove. U bibliografske izvore će se uključiti literatura fundamentalnog karaktera (ref. [3], [5], [24], [25], [27], [29], [32]), fenomenološki modeli (ref. [2], [11]) , karakteristike ugljeničnog materijala (ref. [6]-[8], [28]) i mogućnosti savremenih tipova lasera (ref. [9], [10], [11], [12], [13], [15]) uz osvrt na klasičnije tipove (ref. [39]- [42], [44]).

[1] P. F. Moulton, Spectroscopic and laser characteristics of $\text{Ti:A1}_2\text{O}_3$, Journal Optical Society. America. B, Vol. 3, No. 1, pp. 125-133, 1986.

[2] Y.G.Ly, X.L. Huai, W.W. Wang, Study on the effect of micro geometric structure on heat conduction in porous media subjected to pulse laser, Chemical Engineering Science, Vol. 61, pp. 5717-5725, 2006.

[3] M.G. Vavilov, A.D. Stone, Failure of the Wiedemann-Franz law in mesoscopic conductors, Physical Review B, Vol.72, pp. 205107-205111, 2005.

[4] T. R. Hart, R. L. Agrawal, B. Lax, Temperature Dependence of Raman Scattering in Silicon, Physical Review B , Vol.1, No.2, pp. 638-642, 1970.

- [5] J. P. Longtin, Non-linear phenomena in laser-material interactions, *Annual Reviews of Heat Transfer*, Vol.14, pp. 419-438, 2005.
- [6] B. Kaludjerović, M. Srećković, M. S. Trtica, A. A. Ionin, B. M. Babić, L. M. Milovanović, A new laser technique for the formation of oxide surface complexes on carbon cloth, *Carbon*, 42 pp.443-445, 2004.
- [7] B. Kaluderovic, N. Ivanović, A. Ionin, D. Marjanović, B. Babić, M. Srećković, P. Škundrić, R. Aleksić, Some possibilities for laser treatment and control of the process of cellulose pyrolysis, *Proc. Of Lasers 2000*, STS Press, McLean, pp. 760-763, 2001.
- [8] B. Wielage, A. G. Odeshi, H. Mucha, H. Lanh, R. Buschbeck, A cost effective route for the densification of carbon-carbon composites, *J. Mater. Process. Techn.*, Vol.132, pp. 313-322, 2003.
- [9] X. M. Duan, B. Q. Yao, G. Li, T. H. Wang, Y. L. Ju, and Y. Z. Wang, Efficient Tm:YLF laser with a Volume Bragg Grating Recycle Pumped by Laser Diode, Vol.19, No.12, pp. 2163-2168, 2009.
- [10] F. Krausz, T. Brabec, Passive mode locking in standing-wave laser resonators, *Optics Letters*, Vol. 18, Issue 11, pp. 888-890, 1993.
- [11] P. T. Mannion, J. Magee, E. Coyne, G. M. O'Connor, T.J. Glynn, The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air, *Applied Surface Science*, Vol.233, pp. 275–287, 2004.
- [12] D. Y. Shen, J. K. Sahu, W. A. Clarkson, Highly efficient in-band pumped Er:YAG laser with 60 W of output at 1645 nm, *Optics Letters*, Vol. 31, Issue 6, pp. 754-756, 2006.
- [13] D. Sangla, M. Castaing, F. Balembois, P. Georges, Highly efficient Nd:YVO₄ laser by direct in-band diode pumping at 914 nm, *Optics Letters*, Vol. 34, Issue 14, pp. 2159-2161, 2009.
- [14] R. Bornemann, U. Lemmer, E. Thiel, Continuous-wave solid-state dye laser, *Optics Letters*, Vol. 31, Issue 11, pp. 1669-1671, 2006.

- [15] P. K. Kennedy, K. C. Sun, R. H. Labbe, R. A. Cover, Effect of Various Outcoupling on Free-Electron Ring Laser Performance, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.25, No.11, pp. 2322-2326, 1989.
- [16] E. G. Gamaly, A. V. Rode, V. T. Tikhonchuk, B. Luther-Davies, Ablation of solids by femtosecond lasers: ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics (<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0102/0102046.pdf>)
- [17] S. Martin, A. Hertwig, M. Lenzner, J. Kruger, W. Kautek, Spot-size dependence of the ablation threshold in dielectrics for femtosecond laser pulses, *Applied Physics A*, Vol.77, pp. 657-665, 2003.
- [18] B. Anderson, S. K. Ramini, M. G. Kuzyk, Imaging studies of photodamage and self-healing in disperse orange 11 dye-doped PMMA, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 28, Issue 3, pp. 528-532, 2011.
- [19] E. G. Gamaly, N. R. Madsen, M. Duering, A. V. Rode, V. Z. Kolev, B. Luther-Davies, Ablation of metals with picosecond laser pulses: Evidence of long-lived nonequilibrium conditions at the surface, *Physical Review B* 71, pp. 174405-1-174405-12, 2005.
- [20] Y. V. Afanasiev, B. N. Chichkov, N. N. Demchenko, V. A. Isakov, I. N. Zavestovskaya, Ablation Of Metals By Ultrashort Laser Pulses: Theoretical Modeling and Computer Simulation, 28th EPS Conference, Funchal, 18.-22.june, Vol 25A, pp.2021-2024, 2001.
- [21] F. A. Costache, Dynamics of Ultra-short Laser Pulse Interaction with Solids at the Origin of Nanoscale Surface Modification, Dissertationen, Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Cottbus, 2006.
- [22] Ed. A. Peled, Photo-Excited Processes, Diagnostics and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
- [23] Y. Qin, Micro-manufacturing engineering and technology, Elsevier, Oxford, 2010.
- [24] Ed. M. Bass, Handbook of Optics, Vol.1, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [25] V. S. Letokhov, V. P. Chebotayev, Nonlinear Laser Spectroscopy, Springer, New York 1977.
- [26] J. F. Ready, LIA Handbook of Laser Materials Processing, Associate Editor Dave F. Farson MPI Laser Institute of America Magnolia Publishing, Inc., 2001.
- [27] F. Bonetto, L. Rey-Bellet: Fourier Law, Elsevier Ltd, Amsterdam, 2006.

- [28] P. Delhaes, *Fibers and Composites*, CRC Press, 2003
- [29] P. Löwdin, *Advances in Quantum Chemistry*, Volume I, Academic Press, New York, 1964.
- [30] I. N. Ermolenko, I. P. Lyubliner, N. V. Gulko, *Chemically Modified Carbon Fibers and Their Application*, VCH Publishers, Inc. New York, 1990.
- [31] K. A. Nowakowski, *Laser beam interaction with materials for microscale applications*, Worcester Polytechnic Institute, 2005.
- [32] P. Bruesch: *Phonons: Theory and Experiments I*, Springer-Verlag, New York, 1982.
- [33] Hausdorff Dimension (<http://mathworld.wolfram.com/HausdorffDimension.html>)
- [34] A New Precision Cutting Tool: The Femtosecond laser (<https://www.llnl.gov/str/Stuart.html>)
- [35] Laser cutting textiles (http://www.trotec.net/_Cutting/_en-US/_120+Textiles.htm)
- [36] Tuning the Laser Wavelength (<http://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-6/F6s2t3p3.htm>)
- [37] Alexandrite Laser ($\text{Cr}^{+3}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$) (<http://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-6/F6s2t3p1.htm>)
- [38] Femtosecond Titanium:Sapphire Laser Kits: Models TISSA20, TISSA50 and TISSA100 (<http://www.sciner.com/CDP/kit.htm>)
- [39] The Encyclopedia of Laser Physics and Technology: YAG Lasers (http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html)
- [40] TWI Knowledge Summary Carbon dioxide laser (<http://www.twi.co.uk/content/kspah002.html>)
- [41] Understanding CO₂ laser (<http://www.laserk.com/newsletters/whiteCO.html>)
- [42] CO₂ laser theory (<http://www.laserk.com/newsletters/whiteTHE.html>)
- [43] Photochemistry (http://www.meta-synthesis.com/webbook/17_photo/photo.html)
- [44] Encyclopedia of Laser Physics and Technology - YAG lasers, Nd:YAG laser, Yb:YAG, yttrium aluminum garnet (<http://www.medical-device-data.com/laser/Encyclopedia-Laser-Physics-Technology-lasers-NdYAG-a-210.html>)

e) Polazne hipoteze

Prvi korak u modelovanju interakcije je opis dinamike koherentnog izvora, čiji je rezultat energija, koja dolazi do mete. To se može opisati na nekoliko načina prema izabranom dinamičkom režimu rada lasera. Za impulsni režim, daje se karakteristična funkcija, koja opisuje impuls, čiji integral daje totalnu energiju impulsa. Praktični i češći opis, dat je parametrima: talasna dužina, intenzitet, snaga, energija impulsa, divergencija. Mono- ili više-impulsno tretiranje materijala dovodi ne samo do uvođenja frekvencije repeticije kao parametra, već i do problema u vezi sa tretiranjem kumulativnih procesa. Uračunavanje optike sistema, kojim se materijal izlaže snopu, uvodi dubinu fokusa i minimalnu veličinu dijametra fokusiranog snopa. Prostorna raspodela laserske energije u snopu se često predstavlja Gauss-ovom raspodelom čak i za multimodne lasere, čiji indeks kvaliteta snopa M^2 dostiže vrednost do 50. U literaturi postoji dosta aproksimativnih pristupa, koji ređe vode računa o svim ovim parametrima. U predloženoj tezi će se analizirati detaljnije izloženi prilaz.

Kad laserski snop pogodi metu, moguć je razvoj različitih procesa i različitih raspodela energije, nezavisno od najuobičajenijeg tretmana (apsorpcija, refleksija i transmisija) u aproksimaciji linearnog razmatranja. Pojednostavljeno razmatranje apsorbovanog dela konstatovalo bi da deo energije, koji se apsorbuje zavisi od talasne dužine laserskog zračenja, mikrostrukture i elektromagnetnih svojstava materijala u linearnom domenu. Koeficijenti refleksije, apsorpcije i transmisije se određuju eksperimentalno direktno ili indirektno ili raznim teoretskim prilazima. Ugljenični porozni materijali, raznih uzoraka male debljine dovode do zahteva različitih odnosa ova tri koeficijenta. U zavisnosti od izabranih tipova lasera u vidljivoj, IC i UV oblasti, takođe doprinosi složenosti razmatranja. Često je sasvim održiva aproksimacija da energija snopa, koja pogađa ugljenični materijal, u potpunosti učestvuje u procesima, koji će se odigrati u materijalu.

Apsorbovana energija u izloženom materijalu dovodi do brojnih procesa: zagrevanje materijala, oksidacija površine, topljenje, isparavanje, ablacije, izmene reljefa, formiranje kristala, formiranja plazme, promene strukture materijala, povećanje ili smanjenje sadržaja pojedinih funkcionalnih grupa na površini materijala, i razni drugi efekti. Za odvijanje nekih od ovih procesa neophodno je da se dostigne određeni prag energije, a kao dominantni efekti, posebno u slučaju, kada su laserski snopovi u IC i vidljivom domenu, prepoznaju se termalni efekti i oksidaciju površine. Ako se pri zagrevanju dostignu odgovarajuće temperature, mogu se javiti i fazni prelazi (topljenje i isparavanje), ali se kao dominantniji proces, istražuje mehanizam ablacije i prag ablacije.

Složeni molekuli u sastavu ugljeničnih materijala, imaju veliki broj vibracionih i rotacionih energetske nivoa, i elektronskih kvantnih stanja. Pri dejstvu lasera na ovakav sistem, dolazi do pobuđivanja molekula i brojnih energetske prelaza, pa se osim termičkih efekata javljaju i hemijske reakcije (fotohemijske reakcije). Ako usled pobude molekuli vezuju atome kiseonika dolazi do oksidacije i to je fotohemijska reakcija, koja se često javlja u eksperimentima sa

izlaganjem ugljeničnih nanoporoznih materijala laserskim snopovima. S obzirom na veliki broj energetskih nivoa, i u opšte, kvantnih stanja, molekulskih sistema ugljeničnih materijala, detaljan opis svih mogućih pobuda i kvantnih prelaza takvog sistema, usled interakcije sa laserskim snopovima, je praktično nemoguće. Zato je za prvi stepen modelovanja celishodno opredeliti se za fenomenološki pristup u opisivanju fotohemijskih reakcija.

f) Naučne metode istraživanja

Metode korišćene u predloženom radu će biti eksperimentalne i numeričke. Za potrebe ovoga rada izvršiće se niz eksperimenata sa izlaganjima nanoporoznih materijala (ugljenični filc, karbonizovana pletenina, aktivna ugljenična pletenina, P4396-2, P1336-1, P7295-2) dejstvu CO₂, TEA CO₂, CO, Nd³⁺:YAG, aleksandritnog, Ti³⁺:safirnog, erbijumskog lasera. Numerički modeli, koji će biti korišćeni su izvedeni iz teorijskih modela, koji opisuju procese apsorpcije energije laserskih snopova i njen dalji transport u materijalu. U slučajevima, koji su od praktičnog interesa, mora se sa analitičkih tretmana preći na numerički tretman, radi dobijanja rešenja za izvedene modele. Da bi se dobila rešenja, moraju se koristiti numerički metodi: metod konačnih razlika i metod konačnih elemenata. Na bazi ovako razvijenih numeričkih metoda mogu se izvesti računarske simulaciju za interakciju laserskih snopova i ugljeničnog nanoporoznog materijala kod koje su ulazne veličine izabrani parametri laserskih snopova i karakteristike izloženog materijala ili korišćenje drugog prilaza sa oblikom impulsa. Za izvođenje simulacija predviđa se koristiti računarske programe Matlab i COMSOL multiphysics. Dobijeni rezultati simulacija će se sagledati kroz eksperimentalne rezultate. Analiza mikrografskih zapisa dobijenih korišćenjem optičke i skenirajuće elektronske mikroskopije, pre i posle interakcije, izvodi se korišćenjem softverskih alata i programa za analizu slike (Image J i Adobe Photoshop), tako da se dobijaju kvantifikovane ocene promena.

g) Očekivani naučni doprinosi

Analizom brojnih eksperimentalnih podataka samog kandidata i drugih podataka iz literature predviđa se dobijanje preciznih kvalitativnih i kvantitativnih opisa promena i procesa u ugljeničnom materijalu (reverzibilnog i destruktivnog tipa), koji su posledica izlaganja laserskim snopovima poznatih parametara (CO₂ laseri sa pobudom električnog pražnjenja ili CO₂ laseri pumpani elektronskim snopom u režimu slobodne generacije (50μs, 3-8J, talasna dužina 10,6 μm); CO laseri pumpani elektronskim snopom u režimu slobodne generacije i Q-prekidanja (100-500μs, 1-30 μs, 15-22J, talasna dužina 4,9-6,5 μm); TEA CO₂ (eng. Transversely excited atmospheric pressure laser-sr. laser sa transverzalnom pobudom na atmosferskom pritisku) laser u režimu slobodne generacije sa repeticijom impulsa od 2-2,4Hz (22-200mJ); rubinski laser u režimu Q-prekidanja (30ns, 0,1-4J, talasna dužina 694,3nm); aleksandritski laser (20ms, frekvencije repeticije 1Hz, do 30J, talasna dužina 755nm), Nd³⁺:YAG laseri u režimu Q-

prekidanja (1-8-15-30ns, 22-36mJ na talasnoj dužini 1064nm, ali i II harmonik na 532nm i III harmonik na 355nm). Iz dobijenih podataka ocenjivaće se pragovi energije za odigravanje pojedinih procesa i kako na ove pragove utiče promena tipa lasera, talasne dužine izlaznog zračenja, režim rada lasera i širina laserskog impulsa. Prepoznavanje i opisivanje mehanizama pojedinih procesa je i neophodna osnova za modelovanje interakcije ugljeničnog materijala i laserskih snopova. Predviđeni modeli će biti zasnovani na različitim stepenima aproksimacija generalne toplotne jednačine. Uspešnost predloženih modela se može testirati poređenjem njihovih rezultata sa rezultatima eksperimenata i njihova korelacija može da služi za interpretaciju odigranih procesa.

Očekuju se doprinosi, konkretno:

- na polju interakcije laserskog zračenja sa izabranim ugljeničnim materijalima,
- razvijanje modela za opis izabranih materijala i lasera,
- razvijanje posebnih softverskih rešenja uz dostupne postojeće softverske alate i programe,
- u oceni termičke strane procesa,
- određivanje neophodnih parametara za kompletan kvantitativni opis interakcije.

6. Plan istraživanja i struktura rada

U prvoj celini doktorske disertacije analiziraće se tipovi lasera, koji se koriste za razne vrste obrade i tretmana ugljeničnih materijala. Posebno pažnja će biti posvećena drugim tipovima, koji nisu u komercijalnoj upotrebi, a od potencijalnog su interesa za proučavanje interakcije u više dijapazona koherentnog zračenja. Od interesa su posebno laseri sa ultra-kratkim impulsima i razmatranje zavisnosti, koje se javljaju u poređenju modelovanja impulsnih lasera različite frekvencije repeticije sa karakterističnim širinama atto- ili fs prema ps i ns. Korišćene energije impulsa su u opsegu od reda nanodžula (za femtosekundnih i pikosekundnih lasere) do reda desetina J (za ms lasere). Razmatraće se i kontinualni režimi rada sa energijama reda mJ. Talasne dužine korišćenih laserskih izvora biće od UV (266 nm) do IC oblasti (10,6 μ m). Pored režima rada razmotriće se i modelovanje njihovog «lasing» procesa (efikasnost, pouzdanost, vreme života, i dr.).

Druga glavna celina će biti posvećena samim ugljeničnim materijalima izabranog tipa. Biće izložene osnovne termodinamičke, električne, mehaničke i hemijske karakteristike. Strukturne karakteristike će predstavljati posebnu glavu teze.

Treća celina će predstavljati prilaz interakciji laserskih snopova sa materijalima uopšte, a posebno sa ugljeničnim nanoporoznim materijalima. Opisaće se i analizirati potrebne teoretske osnove i računski aparati.

Eksperimentalnom delu rada će se posvetiti nova celina, koja će uključiti opis planiranih eksperimenata za interakciju i za njeno praćenje «on-line» ili sa poređenjem osobina materijala pre i posle interakcije. Razmotriće se uloge X-, fotoelektronska, infracrvena i Ramanova spektroskopija, tehnike elektronske (SEM) i optičke mikroskopije, razne hemijske metode i dr. Daće se analiza izbora metoda, radi što kompletnije predstave interakcije.

Težište će biti na modelovanju procesa, koji se očekuju sa izabranim tipovima lasera i materijala. U tom delu disertacije analiziraće se termički i fotohemijski procesi, indukovani laserskim snopovima. Primeniće se više mogućih prilaza za objašnjenje i teorijsko, analitičko, numeričko modelovanje ovih procesa. Kod termičkih procesa, primeniće se Fourier-ovi i ne-Fourier-ovi prilazi problemu transporta toplote u materijalu. Problematika će se tretirati uz uzimanje u obzir mikrogeometrijske strukture posmatranog materijala i aproksimacije sa njenim zanemarivanjem.

U delu posvećenom fotohemijskim procesima, definišaću se osnovni fotohemijski procesi, kao i mehanizmi, koji su u osnovi ovih procesa.

Na bazi eksperimentalnih rezultata iz literature i iz sprovedenih eksperimenata u ovoj disertaciji, biće analizirani fotohemijski procesi za više kombinacija laserskog izvora i ugljeničnih materijala. Analizom ulaznih i izlaznih podataka tražiće se moguća objašnjenja, dominantnost određenog procesa i reakcije. Na bazi režima rada, centralnih talasnih dužina, širine linije, vremena izlaganja, maksimalnih i srednjih energija (broja impulsa) opisaće se izazvani fotohemijski procesi i reakcije u izloženom materijalu.

Poseban deo disertacije će biti posvećen softverskim modelima za opis apsorpcionih i transportnih procesa, iz literature, posebno razvijenih ili modifikovanih u ovoj tezi. Koristiće se različite numeričke metode (metoda konačnih razlika, metoda konačnih elemenata, i dr.), a modeli zasnovani na njima biće dati uporedo, kako bi se mogli porediti finalni rezultati. Rezultati će biti dati u grafičkoj formi, u 2D ili 3D predstavi. Apsorpcija i provođenje toplote u materijalu će biti računato u jednoj ili dve dimenzije.

Verodostojnost korišćenih i razvijenih modela će se ocenjivati poređenjem sa eksperimenatalnim rezultatima, tako da će saglasnost rezultata i eksperimenta dati ocenu uspešnosti dobijenih modela.

Eksperimentalni deo rada će se analizirati izabranim programima za analizu mikrografa iz elektronske i optičke mikroskopije. Na bazi dobijenih histograma slike, analize boje i prepoznavanja elementarnih oblika određene geometrijske forme (njihovu brojnost) rezultati će dobiti kvantifikovane parametre. Ove analize treba da se povežu sa izazvanim procesima (oksidacija površine) i za kvantifikovanje intenziteta interakcije.

7. Zaključak i predlog

Na osnovu analize priložene dokumentacije i neposrednog uvida u dosadašnji rad kandidata, Komisija je zaključila da kandidat mr Milovan Janićijević dipl.ing.elektrotehnike, ispunjava sve potrebne formalne i suštinske uslove predviđene zakonom o visokom obrazovanju i Statutom Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu za pristupanje izradi doktorske disertacije. Predložena tema dokorskog rada je naučno aktuelna u svetu u oblasti laserske interakcije i novih materijala i ima neophodne elemente naučnog rada. Rezultati do kojih bi trebalo da se dođe u disertaciji, predstavljaju doprinos teoretske i praktične prirode.

Stoga Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću elektrotehničkog fakulteta u Beogradu da mr Milovanu Janićijeviću, diplomiranom inženjeru elektrotehnike odobri izradu doktorske disertacije sa naslovom "Modelovanje interakcije laserskih snopova sa ugljeničnim nanoporoznim materijalom".

Datum: 27 maj 2011

Članovi Komisije:

dr Vitomir Milanović, redovni profesor

dr Branka Kaluđerović, Inst. Nukl. nauka Vinča

dr Aleksander Kovačević, naučni saradnik, Institut za fiziku

dr Jelena Radovanović, vanredni profesor

dr Milan Tadić, redovni profesor
