

Keramički materijali i laserske tehnike uz studije slučaja

1. Milesa Srećković
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u
Beogradu,
Beograd, Srbija
esreckov@etf.bg.ac.rs

2. Željka Tomić
Odsek za Saobraćaj, mašinstvo i
inženjerstvo zaštite
Akademija tehničkih strukovnih studija
Beograd
Beograd, Srbija
ztomic@atssb.edu.rs

3. Aleksandar Savić
Katedra za materijale i konstrukcije
Građevinski fakultet, Univerziteta u
Beogradu
Beograd, Srbija
sasha@grf.bg.ac.rs

4. Veljko Zarubica
Laboratorija za etaloniranje i
ispitivanje
Analysis d.o.o.
Beograd, Srbija
veljko.zarubica@analysis.rs

5. Slađana Pantelić
Fakultet informacionih tehnologija,
Univerzitet Metropolitan,
Beograd, Srbija
sladjanapantelic@yahoo.com

Abstrakt— U odnosu na druge kategorije materijala, keramički materijali mogu da predstavljaju klasu materijala koja je za eksperimente teža, s obzirom na gabarite, poštovanje modela sličnosti, velike gustine. Zato se i tehnologije i merne tehnike, kojima se podvrgavaju odlikuju istim problemima.

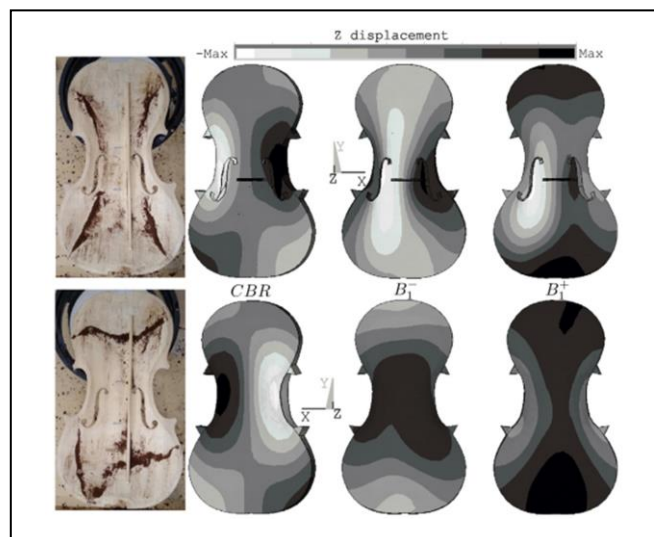
Iako se već mnogo godina koriste razne grane laserskih tehnika za različite keramičke materijale, u radu se razmatra nekoliko mogućih metoda, koje su već standardizovane u kontekstu keramike. Analiziraju se i potencijalno druge, koje se tek razvijaju. Uključuje se sprega sa drugim elionskim tehnikama, računajući proširenje sa akustikom, vodenim mlazovima, i dr. Sofisticirane tehnike brzih dejstava sa uključanjem nekada „brzih“ kamera, sada su se promenile za više redova veličine u odnosu na nekadašnje prve holograske kamere. Na primerima nekoliko keramičkih materijala i početnim komponentama u vidu prahova, proširuje se oblast ulaznja u procese sinterovanja i druge tehnologije. Uz primenu optičkih vlakana i metoda sa njihovom ugradnjom u karakterističke oblike, modele, olakšava se praćenje i uopšte dobijaju kvantitativni pokazatelji u dinamici naprezanja.

Ključne reči— keramika, materijali, holografija, metrologija, funkcije raspodele.

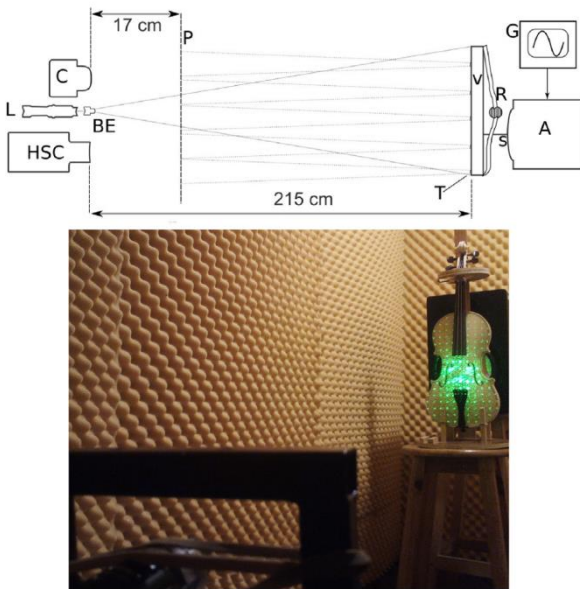
I. UVOD

Od prvih pokušaja da se odabir konstrukcije rezonatora muzičkih instrumenata, poveže sa rezonantnim frekvencijama, do današnjih koncerata sa laserskim harfama, pokriveno je mnogo drugih implemetacija holografskih i laserskih tehnika. Istorijski, imena vezana za holografiju, sreću se pre prvih indicija za stimulisanu zračenje, ali se u istorijskim, editorskim inženjerskim oblastima često uzimaju navodi najlakše vidljivih pisanih tragova, [1]-[3]. Uopšteno, zadatak je bio uključjenje i sprezanje koherentne optike i akustike i uopšte vibracija, kao oblast sa jedne strane, u mernu tehniku višeg ranga, bez obzira da li se uključuje holografija. Sa druge strane, ova se sprezanja uključuju u seizmiku, stabilnost tla, nalazišta dragocenih ruda do energenata, što je danas došlo u prvi plan [4] -[7].

Na sl. 1-3, prikazane su *istorijske teme* počete pre više od pola veka „sa starim“ komponentama i rešenjima, ili sa novim kvalitetom instrumenata. Decenijski pomaci su unosili u zamišljene šeme nove kvalitetne instrumente i komponente. Značajan pomak automatizacije procesa uz računarsku podršku olakšali su interpretaciju i brzine dobijanja kvantitativnih opisa dinamike procesa. Prve holografske reprodukcije (3D) i snimci su se brzo pojavili kao eksponati u muzejima holografije koje su posećivali studenti elektrotehnike i sami organizovali ekskurzije, po glavnim gradovima Evrope. Tu su spajana umetnička dela sa prigodnim hologramom kao delom umetničke predstave voza, modnih kreatora iz prošlog milenijuma. Tematika je oblast istraživanja na našim univerzitetima (temelj doktorskih teza na fakultetima) i neke tematike su ostvarivane u saradnji laboratorija od Ljubljane, Sarajeva, do Skoplja.



Sl. 1 Stanje vibracija violinskog rezonatora dobijeno putem holografske interferometrije [8]



Sl. 2. Eksperimentalna postavka za snimanje laserskih interferencionihi figura, u stanju pobuđenog rezonatora; laser-L, fotografska kamera-C, brza video kamera-HSC, proširivač snopa -sočivo - pinhole sistem -BE, ravan -P, violina na gornjoj ploči-v, držač- R, generator sinusoidalnih napona – G, sa odgovarajućim pretvaračima [8]

Dalje primene holografije su se širile u mnogo pravaca, (industrijski kompleksi, energetska postrojenja, građevina, arhitektura, geodezija, mašinstvo, sudovi pod pritiskom, vojna industrija, industrija letelica [7].

Traženje rezonantnih frekvencija mašinskih sklopova i sistema je dobilo snažnu podršku u eksperimentu i teoriji vezanu za primenu holografskih i drugih laserskih tehnika, [7]. U vezi tih problematika jedna strana je pokrivena eksperimentalnim set up-om za zapis, a druga računarskoj podršci za mogućnost brze interpretacije i kvantitativnog rezultata za postizanje sigurnih opsega frekvencija, gde se rezonantne frekvencije treba da izbegavaju (ili ne).

Kvantitativna slika naponskog stanja materijala je već imala razrađeno polje sa Moiré figurama i monohromatskim i polihromatskim nekoherentnim izvorima, gde se prate polarizaciona stanja ulaznog i izlaznog snopa (kroz maketu koja prati dizajn predviđene konstrukcije) [23].

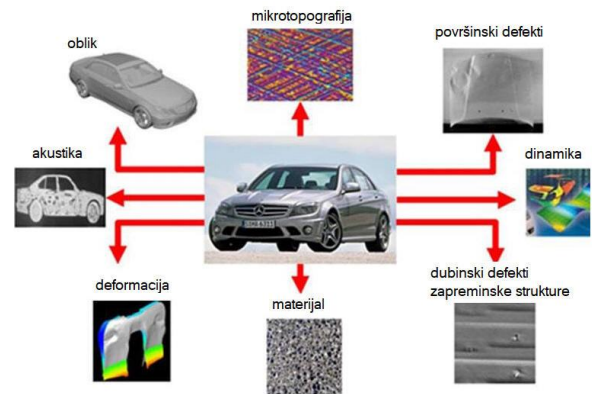
Naponska stanja se sa potpuno drugih pozicija vezuju za oblik i položaj Ramanove (kombinacione) linije. Ramanovo rasejanje je prisutno u primenama različite vrste od razvoja prvih CW lasera do brzih piko i femto sistema. Manje je poznata ova vrsta primene, već se prvenstveno traži sastav elemenata i jedinjenja.

U Tabeli I su date *prve* predstave sa vezom oblika interferentnih pruga i vremenske funkcije dinamike procesa u sceni /predmetu [3], [12].

Na sl.3 bi mogli da se prepoznaju zadaci za traženje deformacija i grešaka u širokom smislu u mikrotopografiji. (Deformacije odražavaju akustodinamiku, traže se greške po dubini komponente; mikrotopografija uz holografiju je pouzdan metod otkrivanja defekata.) [9], [10].

TABELA I. Vremenska funkcije interferentnih figura uz dinamiku kretanja

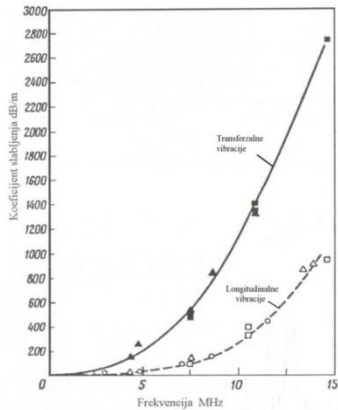
Vremenska funkcija	Funkcija interferentnih figura
Sinusoidalna	Besselova funkcija nultog reda
Sa dve vrednosti	Cosinusna funkcija
Tip kretanja	Ponašanje figura
Čista translacija	Lokalizacija u beskonačnosti
Rotaciono kretanje	Lokalizovano u ravni između ose rotacije i objekta, figure su orijentisane duž pravca ose
Spiralno kretanje	Ista lokacija kao predhodna. Vidljivost strogo zavisi od aperture duž ose, orijentacija pruga rotira sa sfernom perspektivom
Rotacija oko z-ose	Figure su lokalizovane duž kose koplanarne linije sa osvetljavanjem, vidljivost zavisi od aperture u ortogonalnom pravcu. Figure su hiperbolične iz sferne perspektive
Rotacija oko dve normale, (iskošene nja) ose	Figure lokalizovane između dve kardinalne ravni, koje određuju rotacije, zavisnost od oblika aperture
1D naprezanje	Lokalizovane figure u kosoj ravni; presek sa objektom je normalan na pravac napona
2D naprezanje	Lokalizacija je duž kose linije u odnosu na objekat. Figure su hiperbolične ili eliptične u odnosu na sferno osvetljenje i perspektivu.
*) Primedba i podsećanje na rešene slučajeve, [J. Ch. Vienot (Ricardson p.133)]	



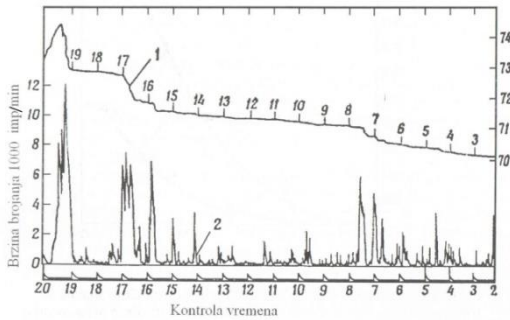
Sl.3. Razne primene holografije sa tendencijom traženja operacija vezanih za automobilsku industriju. Sada bi trebalo uključiti primenu za druge *nebenzinske* pogone vozila, [9].

Manje poznate tehnike akustičke emisije, magnetne emisije i dr..., su naši instituti i fakulteti koristili u laboratorijama u okolnim zemljama (Rumunija, Mađarska). Primene su usledile u mnogo oblasti, a neke od njih su analizirane na sl.4 i sl.5. Druge primene ovih tehnika su bile vezane za nuklearna postrojenja, za praćenje dinamike procesa i pripreme faze stabilnosti terena [4], [10], [11]. Jedna od primena podrazumevala je praćenje procesa nuklearnog reaktora Drezden I na sl.6, a na sl.7 je data blok šema mernog sistema na bazi akustičke emisije. Materijali kvantne elektronike i razvoj kvantnih generatora i pojačavača su se proširili na mnogo veoma različitih aktivnih materijala i raznih načina pumpanja u oblasti. Za aktivne materijale na bazi rubina ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) su traženi precizni odnosi primesa i pogodine

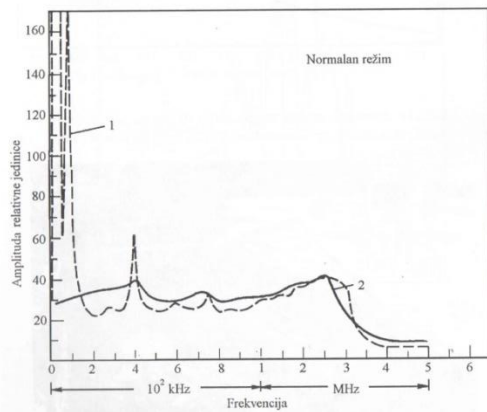
matrice. Prema tipu aktivnog materijala, ocenjivan je radni vek prema broju impulsa sistema.



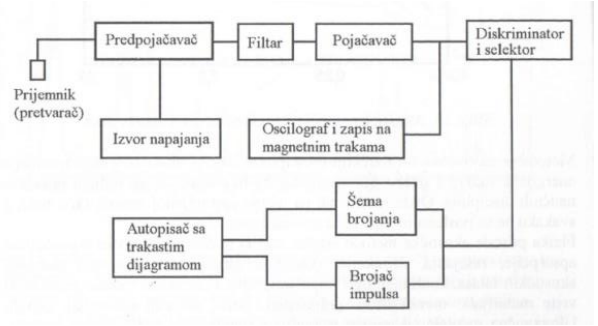
Sl.4 Akustička emisija. Zavisnost koeficijenta apsorpcije ultrazvničnih signala od frekvencije u nerđajućem čeliku tipa 304, (ruski standard) [10]



Sl.5. Akustička emisija u službi praćenja prslina. 1- Smanjenje statičkog opterećenja (uzorak instrumentalnog čelika D2 iz termičke obrade,(ruski sistem obeležavanja); 2- Brzina akustičke emisije. [10],

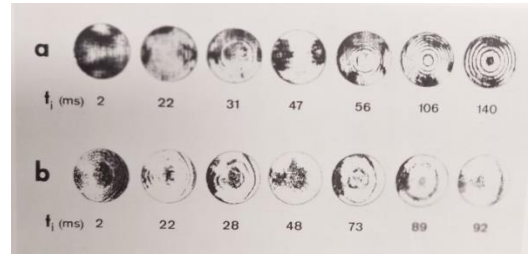


Sl.6 Spektar šumova nuklearnog reaktora Dresden I, 1- dijametar recirkulacione akumulacije vode 560 mm, brzina 7,6 m/s, 2- šumovi (pretvarač je na spoljnoj površini), Korišćeni filtri i razna pojačanja ,[10].



Sl.7. Blok šema mernog sistema na bazi akustičke emisije.

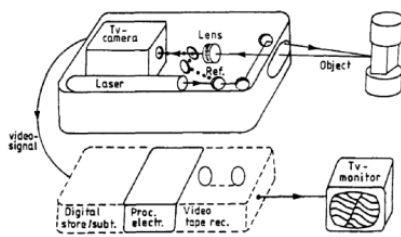
Ako je pumpa bila gasna lampa radni vek se meri sa hiljadama ispaljenih impulsa u lasing modu. Praćenje dinamike pogoršanja stanjima aktivnosti materijala (aktivnog valjka) sa preciznim tehnologijama poliranja i postizanja pravilno naparenih ogledala je vršeno holografskim i drugim tehnikama. Tako su praćeni aktivni materijali i stanje u raznim periodima rada. Na sl. 8., prikazani su rezultati u cilju praćenja pogodnost rada dva aktivna materijala.



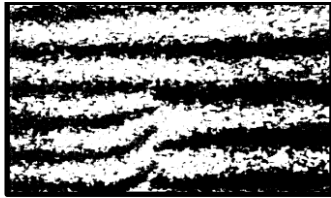
Sl.8 Interferentne figure za rekonstrukciju talasnih frontova za dva rubinska aktivna materijala istog kvaliteta, uz predviđenu optičku pumpu: (a) stanje zamućenosti valjka, (b) polirani valjak od početka rada bljeskalice (flash lampe)- optičke pumpe. Praćeno je vreme t_i (ms) od početka rada kvantnog generatora-pojačavača [12].

Slučaj proučavanja i eksperimentalne analize betona, odnosno praćenje dinamike razvoja prsline je predmet mnogo radova od kojih je među prvima (uslovno) rad [13], sl.9.

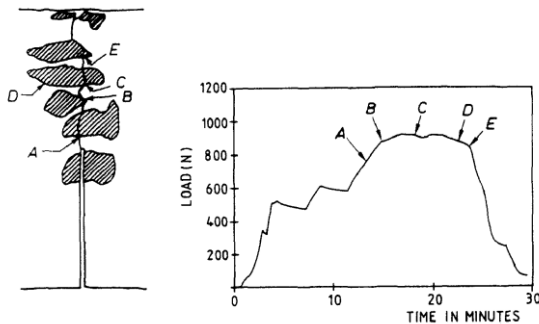
Metodom holografije, u realnom vremenu praćena je propagacija prsline u betonu. Izabrani detalji eksperimenta su dalje nastavljeni sa sofisticiranijom obradom signala, opremom za snimanje i kasnijim generacijama računara. Prikazivanjem raznih holografskih šema u zavisnosti od načina formiranja interferentnih figura, jedna vrsta rešenja je tražila glomazne stolove za snimanje, sa potrebnim gušenjem mehaničkih vibracija na kojoj se nalazi scena holografskog eksperimenta. Druga vrsta istraživanja je tražila kratke laserske impulse, čija je širina daleko ispod oblasti mehaničkih vibracija. Ovde ipak pokazujemo istorijske prilaze, jer se u prvi plan stavlja edukativni prikaz metode, uz slike sl. 9 –sl.11, [13].



Sl. 9. Elektronska šema: procesna elektronika koja konvertuje interferentne figure u visoko kontrastnu predstavu na TV monitoru.



Sl.10. Fotografija na TV monitoru sa prslinom na napregnutom (savijenom uzorku.)

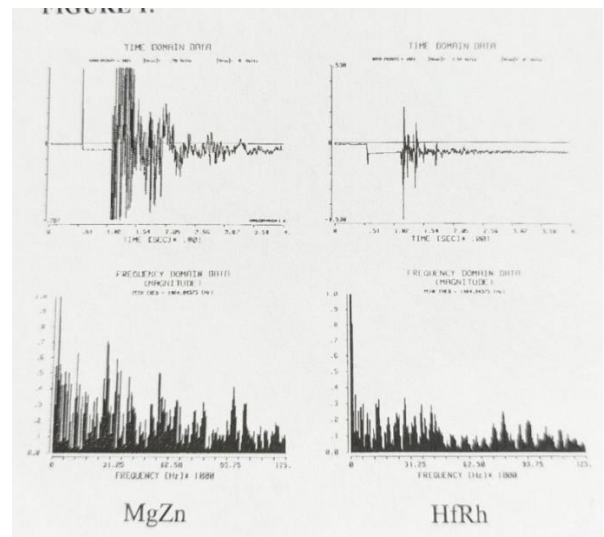


Sl.11 Putanja prsline i opterećenje u toku vremena

Danas postolji razvijena optoakustična grana metrologije. Ako se u šemu, kada se uzorak izlaže laserskom impulsnom snopu postavi na karakterističnim mestima mikrofoni, dobijaju se akustički zapisi, koji bi trebalo da se posle definisanih lanaca obrade interpretiraju. Na sl. 12 je jedan slučaj akustičkih zapisa pri interakciji sa laserskim snopom. Akustički signal, koji se javlja pri interakciji sa laserskim snopom je detektovan na odgovarajućem mikrofoni za materijale MgZn i HfRh u vremenskom i frekventnom domenu, [14]-[18].

Druga interesantna spreznja, koja uključuju akustiku su veze sa kvantnom elektronikom i naukom o materijalima baziranim na eksperimentalnom radu i teoretskom modelovanju. S obzirom na trend koji jača ulogu optičkih merenja i posebno merenja na bazi koherentne optike podsetićemo i ovde na neke pravce istraživanja.

Akustičke performanse materijala mogu početi sa analognim definicijama zakona tipa refleksije, (zakon je definisan koeficijentom refleksije, indeksom prelamanja, akustičkim impedansama). Ponašanje akustičnog snopa pri prelasku iz jedne sredine u drugu, je analogno zakonima optike ili elektriciteta. Nije retko da se za rad nekog sistema sa neelektričnim karakteristikama prave analogne ekvivalentne šeme [19].



Sl.12. Akustički zapis pri izlaganju materijala rubinskom laseru. Zapis sa mikrofona za materijale MgZn i HfRh u vremenskom i frekventnom domenu [14]

Kvantitativno, brzine zvuka koje se definišu za razne materijale putem modula elastičnosti, (Youngovog i dr.), vezana za mehaničke pobude je često predmet osnovnih kurseva fizike, mehanike, i drugih bazičnih disciplina i predmet a i studentskih vežbi. Kod tečnosti, pojavljuju se analogne veličine, gde se uključuje gustina ili odgovarajući drugi odnosi mase i zapremine. Od osobina materijala se pojavljuje Poissonov odnos i odnos specifičnih toplota, [20]. Među konstantama vezanim za keramičke materijale od interesa za spreznje sa optikom su koeficijent refleksije, koeficijent apsorpcije i provodnost [18]. Debyeova temperatura ima takođe svoju ulogu. Veza sa rasejanjem svetlosti izražava se putem Rayleighevih faktora. Pri interpretaciji R_{tot} pojavljuje se izotermna kompresibilnost a za anizotropne materijale R_{aniz} . Klasičan prilaz statičkom rasejanju ima i druge modifikacije R.

Postoji i niz kratkih formula vezanih za brzine zvuka, transferzalnu i longitudinalnu, koje daju prve ocene i mogu da budu predmet istraživanja. Neke od njih su vezane za molekularnu masu, brzinu i druge aproksimativne korekzione faktore. Od postojećih potrebnih konstanti, izabran je indeks prelamanja u zavisnosti od talasne dužine λ . Iz baze podataka koje su sakupljene za nekoliko tipova materijala, izabrali smo materijale, koje smo imali u radovima sa intrakcijom sa laserima. Među njima su titanati, alumina, [21]. U Tabeli II su dati nekoliko tipova lasera za koje će se kasnije tražiti podaci optičkih konstanti potrebnih, ili za modelovanje interakcije ili za spreznje sa akustikom [22]. Ovi podaci mogu da se koriste za formiranje familije krivih koje vezuju kategorije materijala, brzine zvuka i indeksa prelamanja, [18].

TABELA II. NEKI POZNATI LASERI

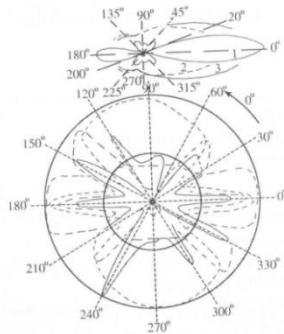
Laser	Talasna dužina glavnih prelaza λ , μm
KrF Excimer	0,2483 ;0,248
Ar+;jon	0,515
HeNe	2,395; 3,39; 0,6328
Nd ³⁺ :YAG	1,064
Laseri na bojama	Odlikuju se mogućnošću velikog broja λ
CO ₂	10,6

U raznim godištim proslava vezane za razvoj koherentne optičke holografije podsećano je na Nobelove i druge nagrade (Denis Gabor) Stetson i Powel za interferometriju (koja je prethodila holografskoj interferometriji). Od trenda za razvijanje novih ne destruktivnih tehnika za: analizu mehaničkih napona ideformacijom oblika došlo se do razvijenih komercijalnih terenskih uređaja za industriju, saobraćaj, vazduhoplovstvo, i dr.

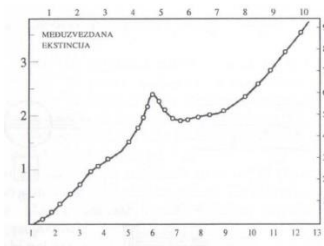
Progres je vezan za razvoj digitalnih alata i za statističke slučajeve, a i za daljinski monitoring. Razvijani su koncepti daljinske holografije, daljinske metrologije i putevi prenosa (komunikacija sa optičkim sistemom i sistemom daljinske metrologije, gde su uključeni 1D - 3D, virtualna realnost, interfejs sa fizičkim sistemom, i virtualnim svetom. Pojavljuju se: metadata, a i rad samih kvantnih generatora i stanja komponenata su predmet stalne kontrole.

Jedna od grana keramike, tehnologija pravljenja polazi od prahova odnosno od njihovih dobijanja. Pored klasičnih metoda dobijanja mlevenjem i prolaskom kroz sita, razvijeno je i lasersko dobijanje prahova. Druga uloga lasera u vezi prahova je definicija ansambla prahova putem eksperimentalnih snimanja i tehnika elektronske ili optičke mikroskopije i analiza snimaka (obrade slike). Tehnike rasejanja svetlosti, posebno dinamičkog rasejanja doveli su da automatizovanih uređaja kojima se dobijaju podaci po mogućstvu samim jedinkama (česticama prahova) ili o funkciji distribucije datog uzorka po raznim atributima (glavna dimenzija, oblik, itd.) [24]

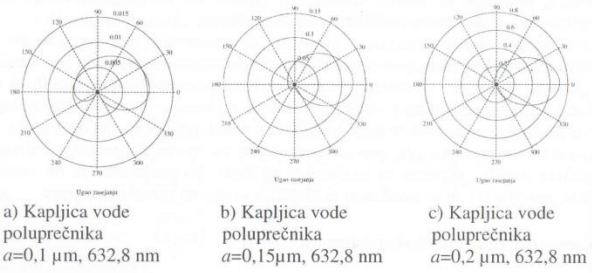
Neke ilustracije su na slikama koje prikazuju simulaciju Mie-rasejanja (sl. 13), uredjen spektar međuzvezdane estinkcije (sl. 14), angularna raspodela za izabrane geometrije čestica (sl.15), uređaj za analizu aerosola (Sl. 16) , [27]



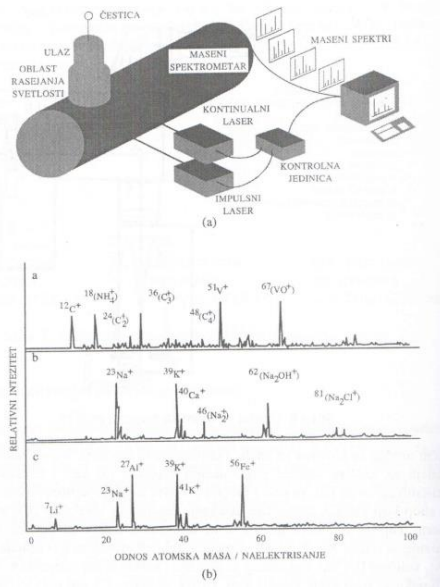
Sl.13. Indikatrisa i polarizacioni Mie-vi efekti. a) Indikatrisa rasejanja, 1- za čestice radijusa a = 0,3 μm i λ=0,6328 μm, 2- za čestice a = 0,15 μm i λ=0,556 μm, 3- za čestice a =0,05 μm i λ=0,556 μm; b) Indikatrise rasejanja za slučaj da je ρ = 10 (ρ = 2πa/λ.0) n = 1,33, α = 5°. (ovako mogu da se razlikuju indikatrisni i polarizacioni Mie-vi efekti. [27]



Sl.14 Usrednjen spektar međuzvezdane estinkcije [27]



Sl.15 Angularne raspodele za izabrane geometrije čestica [27]



Sl. 16. Uređaj za analizu pojedinačnih aerosola: a) skica uređaja i b) rezultati analize aerosola različitog porekla [27]

TABELA III. IZABRANE VREDNOSTI ZA INDEKS PRELAMANJA U KOMPLEKSNOJ ZAPISU [22]

Lit.	Materijal	Talasna dužina glavnih prelaza λ , μm	Indeks prelamanja u kompleksnom zapisu n+ik	
			n	ik
	Al ₂ O ₃ Query 1985: α-Al ₂ O ₃ (Safir); n,k(o) 0.21–55.6 μm	1,064	1,7490	0,0200
	Al ₂ O ₃ Query 1985: α-Al ₂ O ₃ (Safir); n,k(o) 0.21–55.6 μm	0,6328	1,7510	0,0200
	BaTiO ₃ Wemple et al. 1968:n(e) 0.4–0.7 μm	0,6328	2,3606	

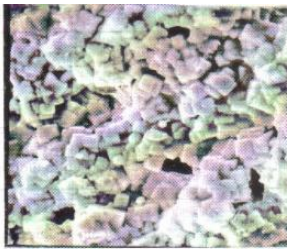
TABELA IV. DRUGE POTREBNE OPTIČKE KONSTANTE ZA BAZI ZA BATI O₃, [22]

Abbeovi brojevi -Vd = 13,96;
Hromatska disperzija -dn/dλ = -2,1076 μm ⁻¹
Grupni indeks -n _g = 3,4181
Disprzija grupne brzine -GVD = 2516,9 fs ² /mm
D = -29631 ps/(nm km)
Koristi se disperziona formula u obliku -n

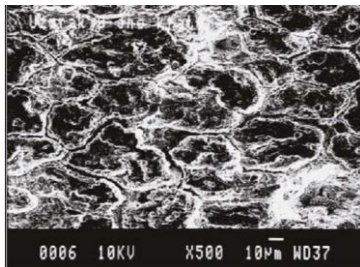
Za modelovanje interakcije laserskih snopova sa materijalom veličina praga za lasersko oštećenje (damage) zahteva po propisima definisanu proceduru. Za materijale tipa keramike u radovima, gde su naši uzorci laboratorijskog tipa i sinterovani klasičnim načinima razlikovale su različite operacije dobijanja prahova raznim metodama, a napominjemo da se laserskim tehnikama dobijaju nano prahovi, a da je odavno lasersko sinterovanje postalo oblast za sebe. Pri našim izlaganjima raznim laserskim snopovima uglavnom su materijali bili površinski modifikovani sa raznim oblicima: krateri dublji ili plići, različiti vertikalni profili. Kao prilog eksperimentalnog rada daje se distribucije prahova u odnosu na dimenzije, formiranje čvrstog materijala u obliku pastila, klasičnim sinterovanjem. Za slučaj pravljenja pastile bez procesa termalne sinteze u izlaženim površinama, dolazilo je do delića sa lokalnim sinterovanjem, pri energijama reda nekoliko J u režimima dužih impulsa [24]

Sl. 17 Mikrograf SEM analize izlaganja BaTiO₃ uzorka laseru Nd³⁺:YAG u osnovnom prelazu čiji je impuls E=0,9 J. Dno povrede (uvećanje 1320x) [25]

Na Sl 18 prikazan je mikrograf SEM analize BiTiO₃ (beli) pri izlaganju femtosekundnom laserskom snopu kompleksa Spitfire, koji je pomenut u opisu fs sistema. (Uzorci su izlagani uglavnom snopovima na 800nm, a sistem možda radi kao: I harmonik, P_I = 0,950W λ => 800nm, II harmonik, P_{II} = 150mW λ => 400nm, III harmonik, P_{III} = 266nm). Pri izlaganju je korišćen režim 1kHz i uzorak je pomeran određenom brzinom-linija L1.



Sl. 17 Mikrograf SEM analize izlaganja BaTiO₃ uzorka laseru Nd³⁺:YAG u osnovnom prelazu čiji je impuls E=0,9 J. Dno povrede (uvećanje 1320x) [25]



Sl. 18 Mikrograf SEM analize BiTiO₃ (beli) pri izlaganju femtosekundnom laserskom snopu, ; mesto snimka: dno kratera L1 sa uvećanje mikroskopa 500x [24] [25].

ZA ZAKLJUČAK

Odabrana tematika keramičkih materijala i laserskih snopova je predstavljena sa intencijom zahvata nekoliko problematika koje se prepliću i mogu da dopunjuju jedna drugu sa gledišta materijala i koherentne optike. Analizirana su i prisutna ili specijalno drugim kanalima uključeni akustički problem. Kroz sagledavanje teorije izabrano je i polje eksperimentalnog rada iz literature i autora.

Zahvalnica (Heading 5)

Ovde

LITERATURA

- [1] F.Kacmarek, Vvedenie v fiziku lazerov, Mir, Moskva, 1980.
- [2] J. A. Torres, C. Torres-Torres, E. Vidal, F. Fernández, M. de Icaza-Herrer, A. M. Loske, "Violin vibration state determined from laser streak patterns", Applied Acoustics 185, (2022) 108384, (<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108384>).
- [3] B. Richardson, "Mode studies of plucked stringed instruments: Application of holographic interferometry", Proc. of the Second Vienna Talk, Sept. 19–21, 2010, University of Music and Performing Arts Vienna, Austria
- [4] M.Srećković, B.Lazić, R.Vukotić, S.Ristić, Seizmička holografija, numeričko modelovanje i istraživanje energetske resursa i u polju seizmičkih fenomena, Tehnika str.1-8, 1993.
- [5] M.Srećković, R.Vukotić, S.Ristić, M.Hribšek, Primena lasera na probleme merenja u oblasti seizmike, tektonskih poremećaja i akustičko-seizmičkih spreznja, Naše građevinarstvo, Vol.47, No.4, pp.NG7-NG-14,1993.
- [6] M. Srećković, M. Kutin, M. Puharić, R. Radovanović, N. Marko vić, Laserske metode merenja i dijagnostike, Institut Goša, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2007.
- [7] M. Kirić, M. Srećković, Modern Approach to Control, and nondestructive testing methods, u Fundamentals of Fracture Mechanics and Structural Integrity Assessment Methods, ITMASS, Tenth International Fracture Mechanics Summer School, Zlati bor, 23 -27 June 2008.
- [8] J. A. Torres, C. Torres-Torres, E. Vidal, F. Fernández, M. de Icaza-Herrer, A. M. Loske, "Violin vibration state determined from laser streak patterns," Applied Acoustics vol. 185, 108384, 2022 (<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108384>).
- [9] W.Osten, G. Pedrini, "55 years of holographic non-destructive testing and experimental stress analysis: is there still progress to be expected?" , Osten et al. Light: Advanced Manufacturing (2022) 3:8, (<https://doi.org/10.37188/lam.2022.0089>)
- [10] M.Srećković, M.Kutin, M.Puharić, N.Marković, Izabrane metode beskontaktno kontrole, Institut Goša, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2007.
- [11] Z.Radaković, Ekperimentalno određivanje dinamičkih parametara mehanike loma primenom tehnike magnetne emisije, Doktorska teza, Mašinski fakultet Univerziteta u Beograd, 2004
- [12] The engineering uses of holography, ed. E.R. Robertson, J.M. Harvey, Cambridge University Press, 1970
- [13] E. Aassved Hansen, A holographic real time study of crack propagation in concrete, cement and concrete research, vol.19(4) pp. 611-620, Maxwell Pergamon Macmillan, USA, 1989.
- [14] M. Srećković, S.Ristić, M. Hribšek, Grozdanovski, Optoacoustical Couplings at the Interactions of the Laser Radiation with Materials in Practical and Theoretical Implementations, ICA 14, Beijing, Proc.pp. C9.9-C9-10, 1992.
- [15] M.Srećković, O.Žižić, N.Ivanović, M.Ivković, Z. Janevski, B.Vedlin, R.Bugarinović, R.Stepić, A.Kunosić, "Problems in HgMnSe and MnZn Ferrites Solved by Means of Laser Spectroscopy and Acoustooptical Couplings", Proc. of the 13. International Congress of Acoustics, Belgrade, Aug. 24- Sept. 3, pp.365-370, Vol.4, 1989.

- [16] M. Srećković, S.Ristić, N.Ivanović, M.Hribšek, D. Šagovnović, "Some couplings in laser material interaction phenomena and acoustical couplings", Roma, 17 the ICA, sept.2-7, p. 201, Section laser acoustics, 2001.
- [17] M.Srećković,S.Ristić,M.Hribšek. D. Grozdanovski, "Optoacous tical Couplings at the Interaction of the Laser Action with Materi al in Practical and Theoretical Implementation", Acoust. Suppl. No.4, p.7, Marz, 1993.
- [18] M.Srećković, S. Ostojić, B.Kaluđerović, Z. Fidanovski, Z. Latinović, S. Jevtić, Đ. Milanović, "Some considerations related to quantum electronics, acoustics and science of material based on experiment and theory", Zaštita materijala 56 broj 2 129-139, 2015., (doi:10.5937/ZasMat1502129S)
- [19] B. Reljin, S. Ristić, M. Srećković, "Analysis of Some Physical Phenomena and Proce sses by Equivalent Electrical Circuits", IJEE Education, Vol. 33 , Iss. No.4, oct.1996.
- [20] D. Zakić, A Savić, A Radević, M Aškrabić, Praktikum za vežbe i repertorium iz građvinskihmaterijala, Akademskamisao Beograd, ISBN 978-86-7466-767-5, 2019.
- [21] M.Srećković, Application of the Laser Light Scattering Method to the Measurement of the Sound Velocity of Organic Solvents and the Material Structure, Journ Eng, Phys., Tehnička fizika, Vol.XXIII, pp.19-32, 1981.
- [22] <https://refractiveindex.info>
- [23] R. Vukotić, Ispitivanje konstrukcija, Građevinski fakultet , 1984.
- [24] Ž. Tomić, Doktorska teza, Interakcija laserskih snopova sa specifičnim keramičkim i kompozitnim materijalima, ETF Beograd, 2007
- [25] M. Srećković, Lj. Vulićević, V.Rajković, Ž. Tomić,Guide of Laser Damages on The Surface of Some Modern Material, Technical Faculty, Čačak, 2004.
- [26] M. Srećković, J. Ilić, M.Davidović, B. Djokić, Ž.Tomić, Z. Latinović, D. Družijanić, Laser Interaction with Material -Theory, Experiments and Discrepancies, Acta Physica Polonica, Vol. 116, No.4, pp.618-621, 2009. ISSN0587-4246
- [27] M.Puharić, M.Kutin, M.Srećković, Dijagnostika materijala procesa i proizvoda, Institut Goša d.o.o., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, 2007.
- [28] M. Srećković, A. Bugarinović, Ž.Tomić, A. Kovačević, V. Rajković: Interakcija lasera sa materijalom: teorija, eksperiment i realnost, Regionalni centar za talente II, ISBN -978-86-916225-0-3, Beograd 2012.
- [29] M.Srećković , A. Ionin, Lj.Vulićević, Yu. Klimačev, D.Sinit syn, S.Bojanic, V. Rajković , A. Milosav ljević, J.Ilić, D. Mamula -Tartalja, B.Nedic, A.Petković Šparica, G.Šparica, Laser Interaction with Metallic and Ceramic Materials, Tucson 5-10.12. 1998, Proceedings of Lasers 98, Eds. V.J. Corcoran and T.Goldman , pp. 971-978, SoQuE, Mc Lean, 1999.
- [30] M.Srećković, L. Lukić, Ž.Tomić, Lj. Vulićević, V. Rajković, S. Ristić, D. Mamula, B. Savić, Micro damages of Bariumtitanate Ceramics with the Addition of Silver Provoked by Ruby Laser, MIO PEL, Proc. (Zbornik) pp.361-367, Niš, 1993.
- [31] M.Wolfke,(Mjačeslav?)Ann.de physic, Vol.34, p.277,1911 Vjačeslav?.
- [32] M.Srećković, infotech, et al., interakcija i od interesa.
- [33] M. Srećković,,S.Bojanić,Interakcija materijala od interesa za protetičke svrhe, wisil-a i wironit-a, salaserom i elektronskim snopom, Zbornikradova, XLI ETRAN, sv. 4, str. 169-172, Zlatibor 1997.
- [34] Laser material interaction 2007.
- [35] M. Srećković, A. Bugarinović, Ž.Tomić, A. Kovačević, V. Rajković: Interakcija lasera sa materijalom: teorija, eksperiment i realnost, Regionalni centar za talente II, ISBN -978-86-916225-0-3, Beograd 2012.
- [36] M. Srećković, Ž. Tomić, Z. Fidanovski, S. Ostojić, P. Jovanić, Lj. Vulićević, A. Bugarinović, B. Bokić, The correlation between the initial ceramic particles and final products, Book of abstracts, 1st Conference of the Serbian Ceramic Society, 1.7-18. mart Beograd 2011
- [37] Ž.Tomić, M. Srećković, A. Bugarinović, J. Mirčevski: Analize interakcije lasera sa materijalom i računarska podrška, Zbornik radova Infotech- Jahorijna, Vol. 6, Ref. E-VI-7, p.569-573, Jahorina, Republika Srpska, 2007
- [38] M. Srećković, Ž. Tomić, M. Pavlović, A. Kovačević, D.Družijanić, D. Knežević,S. Milić, J. Mirčevski, B. Đokić, M.Dimitrijević,M. Davidović, Savremeni problemi kvantne elektronike i lidarskih tehnika, Zbornik radova Infotech- Jahorijna Vol. 7, Ref. E-VII-13, p. 663-667, Jahorina, Republika Srpska, 2008. Zub proveri slike
- [39] Ž. Tomić, M. Srećković,V. Zarubica,S. Ćuk,B. Đokić, J. Ilić, S. Ostojić, M. Dukić, M.Sredojević, Ocena nelinearnih i linearnih konstanti materijala, Zbornik radova Infotech- Jahorijna, Vol. 7, Ref. E-VII-14, pp. 668-672, Jahorina, Republika Srpska, 2008.
- [40] Ž. Tomić, M. Srećković, S. Polić Radovanović, L. Lukić, A. Kovačević, M. Dinulović, M. Janićijević, Characteristics of the laser interaction with chosen ceramic materials, Book of abstracts, 1st Conference of the Serbian Ceramic Society, 1.7-18. mart Beograd 2011

ABSTRACT

In relation to other categories of materials, ceramic materials can represent a class of materials that is more difficult for experiments, considering the dimensions, respect for the similarity models, and their high density. That is why the technologies and measurement techniques that these materials are subjected to are characterized by the same problems.

Although various branches of laser techniques have been used for many years for ceramic materials of various types, the paper discusses several possible methods that are already standardized in relation to ceramics, and potentially newer ones that are being developed. In particular, coupling with other elionian techniques is included, counting on the expansion with acoustics, water jets, etc. The fine techniques of fast action with the inclusion of once fast PS cameras, have now risen by 12 orders of magnitude. On the examples of several ceramic materials and initial components in the form of powders, the field of investing in sintering and other processes is expanded, and with the application of optical fibers and methods with their incorporation into characteristic shapes, the follow-up and dynamics of stresses are facilitated.

CERAMIC MATERIALS AND LASER TECHNIQUES WITH A CASE STUDIES

Milesa Srećković, Željka Tomić, Aleksandar Savić, Veljko Zarubica, Slađana Pantelić