

## INTERAKCIJA LASERA SA MATERIJALIMA OPTIČKIH POMAGALA I IMPLANTANATA I DOZIMETRIJSKI ASPEKT

Milesa Srećković<sup>1</sup>, Aleksandar Marinović<sup>2</sup>, Aleksander Kovačević<sup>3</sup>, Dragan Družijanić<sup>4</sup>, Sladjana Pantelić<sup>1</sup>, Goran Gligorić<sup>6</sup>, Danilo Barjaktarević<sup>1</sup>, Srđan Popović<sup>1</sup>

1. Elektrotehnički fakultet Beograd, 2. SINGI Inženjering, 3. Institut za fiziku, 4. Vojna akademija, 5. Institut za nuklearne nauke

**Sadržaj** - Optička sočiva različitog tipa i optičke moći (meka, polutvrda i tvrda) i njihova interakcija sa laserskim snopovima različitih talasnih dužina su predmet ovoga rada. Praćena je mikroskopska analiza povreda. Analizirane su potencijalne primene laserske tehnike u obradi i u svrhe merenja karakteristika sočiva, kao i distorzije prenosa slike kroz njih. Obzirom na akcidente sa laserskim snopovima u smislu povreda oka, diskutovan je dozimetrijski aspekt.

### 1. UVOD

Kontaktna sočiva, naočare (za popravljavanje vida i aberacija), filtri, zaštitne naočare pri radu sa laserima i drugim izvorima elektromagnetnog i drugog zračenja, koja mogu da nanese povredu oku, pripadaju složenoj problematici preplitanja zakona geometrijske optike, interakcije zračenja sa materijalom (transparentnim), dozimetrije i fizike loma. Posebno je interesantna oblast, gde se govori o implantima za razne svrhe kod organa vida i o biokompatibilnim materijalima, koji se ugrađuju u organizam (HAP). Ovdje se i dalje nalazi bar dva modela o procesu urastanja implanta u tkivo.

Relativno novija oblast kontaktnih sočiva je donedavno imala mnogo više problema, koji su se ubrzanim razvojem tehnologije proizvodnje polimera ublažili. Nove tehnologije su dovele do znatnih poboljšanja karakteristika optičkih elemenata. Kod očnih sočiva, smanjena je debljina i povećana propustljivost za kiseonik. U zavisnosti od mehaničkih (tvrdoća, debljina), optičkih i fizičkih (propustljivost kiseonika i gustina) osobina, kontaktna sočiva se dele na tvrda, meka i polutvrda. Meka se odlikuju najvećom propustljivošću kiseonika i najmanjom tvrdoćom, a kod tvrdih je to obrnuto.

U radu su sočiva posmatrana kao materijal i njihova interakcija sa laserskim snopovima. Oni mogu da dovedu do povreda materijala sočiva i oka. Potrebno je pratiti paralelno polimerne i staklene komponente (stakla za naočare).

Interesantna bi bila i uloga lasera u optičkoj kontroli kvaliteta sočiva u procesu izrade i posle[1]. Kontrola se može vršiti i brojem Newtonovih prstenova i njihovom pravilnošću. Uticaj lasera na materijale radi dobijanja poboljšanih osobina (promena ugla kvašenja) je takodje od interesa.

Prilaz interakciji je složen obzirom da se LIDT (laser induced damage threshold) razlikuje zavisno od predistorije i čistoće uzorka [2-4]. Aditivnosti i repeticija impulsa, uz prag povrede sočiva su nezaobilazne teme (zbirni karakter interakcije).

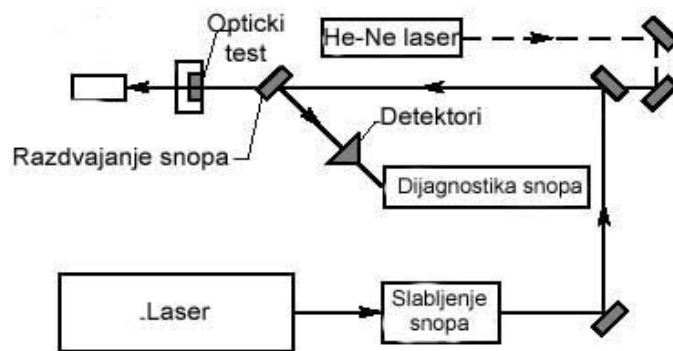
Često se govori o mehanizmu dezintegracije laserskim impulsom, koji ima određenu repeticiju. Karakteristično je da se smanjuje prag u odnosu na delovanje jednog impulsa. Mnogo je eksperimenata urađeno ozračavanjem laserom u režimu slobodne generacije i modulisanе dobrote [5]. Površine senjetoelektričnih kristala (LiNbO<sub>3</sub>, LaTaO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>NbO<sub>3</sub> ...) su

ozračavane kratkim impulsima, a organska stakla, PMMA i polistirol sa dugim i kratkim impulsima. Ispitivanje je vršeno površinski i zapreminski, a bila su uključena i kvarcna stakla BK, TF, K8, stakla GLS-1, GLS<sub>2</sub>KGSS<sub>2</sub>G, i linearni kristali KDP, D, LiTiO<sub>3</sub>, rubin. Prag dezintegracije se snižava kad se pokrije tankim slojevima različite prirode.

Impulsni Nd<sup>3+</sup>:YAG (1,064μm) se koristi u oftalmologiji u različite svrhe; radi se o fotoablativnim procesima. Najčešće korišćene tehnike su laserska: iridotomija, ciklofotokoagulacija, trabekuloplastika, retinalna fotokoagulacija, fakoliza, okulooplastična hirurgija, sklerostomija...

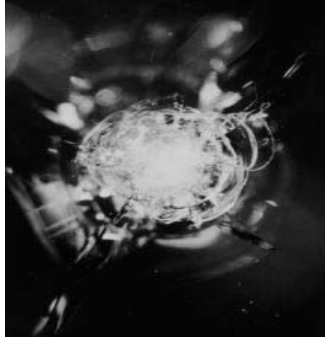
### 2. MEHANIZAM ODREĐIVANJA PRAGA OŠTEĆENJA

Prema primeni određene komponente, postoje definisani protokoli kojima se traži prag oštećenja. Po nekim autorima, izražava se granica posle upotrebljivosti komponente (%). Jedan od češćih postupaka je vezan za aparaturu na sl.1. Prag oštećenja se vezuje za impulsni laser definisanih karakteristika (talasne dužine, trajanja impulsa, polarizacije, modne strukture), instrumente za dijagnostiku zračenja, koji određuju energiju, raspodelu, koja nije uvek Gaussova, dužinu impulsa, polarizaciju i širinu snopa, i pomoćne elemente (He-Ne ili drugi laser male snage za pozicioniranje, detektori, optički elementi...). Optički test ispitivanog materijala se vrši pokretnim mehaničkim elementima, koji obezbeđuju ravnomerne pomeraje između uzastopnih izlaganja.

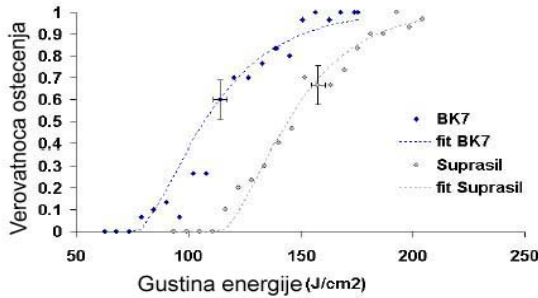


Sl.1. Glavni delovi sistema za određivanje praga povreda optičkih materijala i komponenata.

Tipičan slučaj povrede uzorka antirefleksionog optičkog elementa je prikazan na sl.2. Specijalno se moraju razdvojiti slučajevi višeimpulsnog praga oštećenja od jednoimpulsnog, sl.3, na staklu. Na sl.3a su krive nastale iz merenja podataka iz izlaganja Suprasila i BK-7 pojedinačnim laserskim impulsima.



Sl.2. Mikrograf oštećenja uzorka iz literature (75X).



Sl.3.a. Dijagram praga oštećenja Suprasil-a i BK-7, pojedinačni laserski impulsi ( $Nd^{3+}$ :YAG, 1064nm, Q-switch).

**Verovatnoća za povredu.** Mehanizmi povreda su složeni i tretiraju se teorijama fizike i mehanike loma, dielektričkih, Brilluinovih i termalnih proboja, itd. Jedan od praktičnih tretmana je vezan za karakteristike lasera i eksperimentalne rezultate. Oblik krivih zavisi od prečnika laserskog snopa  $w_0$  i nehomogenosti materijala. Verovatnoća oštećenja se predstavlja kao funkcija upadne gustine energije:

$$P(F) = 1 - e^{-dV_T(F)}$$

$V_T$  je definisano kao:

$$V_T = \frac{4}{6} \pi \omega_0^2 2Z_R \left( u + \frac{u^3}{6} - \arctg(u) \right) \text{ gde je } z_R \text{ Rayleigh-eva}$$

dužina,  $u = \sqrt{F/T} - 1$ ,  $T$  unutrašnji prag oštećenja. Najniži pragovi dobijeni fitovanjem su  $115 \text{ J/cm}^2$  za Suprasil, odnosno  $76 \text{ J/cm}^2$  za BK-7.

**Prag višimpulsnih povreda.** Postoje dve teorije, koje tretiraju mehanizam delovanja unutrašnjih uzročnika oštećenja. Prva polazi od pretpostavke da se delovanje uzročnika ne razlikuje za pojedinačne i višestruke impulse. Unutrašnji prag oštećenja  $T$  je predstavljen u obliku funkcije broja impulsa  $N$ , a verovatnoća oštećenja se izražava u obliku:

$$\frac{4}{3} d \pi \omega_0^2 z_R \left[ \frac{\left( \sqrt{\frac{F}{T(N)} - 1} \right)^3}{6} + \sqrt{\frac{F}{T(N)} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{F}{T(N)} - 1} \right]$$

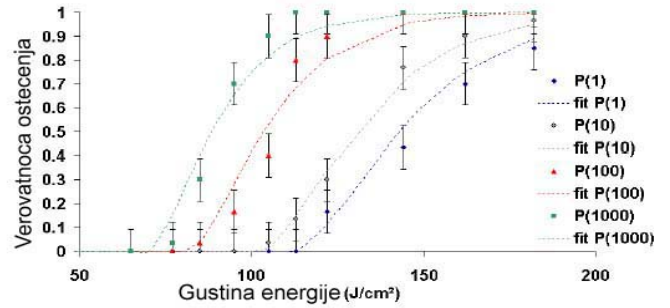
$$P(F) = 1 - e$$

gde je  $d$  poznata vrednost gustine unutrašnjih uzročnika oštećenja. Neki eksperimentalni rezultati i fitovanja predloženim krivama su na sl.3.b i c.

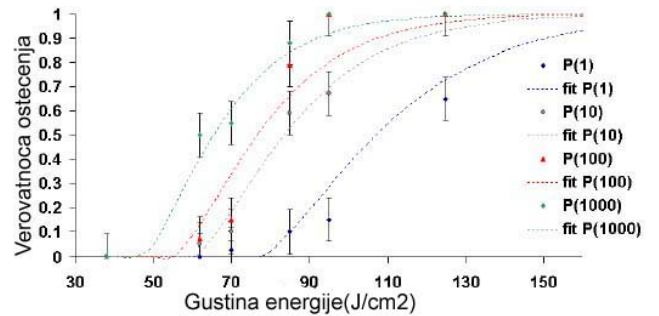
Druga teorija se zasniva na pretpostavci da unutrašnji uzročnici ne deluju isto za pojedinačne i višestruke impulse. Tu

se predviđa logaritamska zavisnost praga oštećenja od broja impulsa (sl.4), tako da je:

$$T(N) = -6.5 \ln(N) + 115, \text{ Suprasil, tj. } T(N) = -4 \ln(N) + 76, \text{ za BK-7.}$$

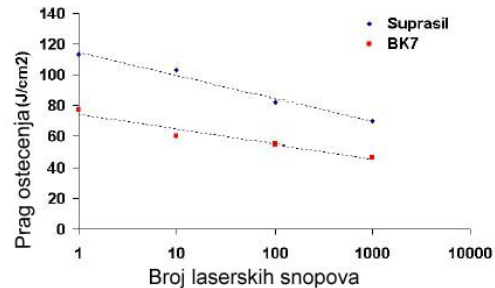


Sl.3.b. Verovatnoća oštećenja Suprasil-a višestrukim impulsima ( $Nd^{3+}$ :YAG, 1064nm, Q-switch, prečnik snopa  $12 \mu\text{m}$ ).



Sl.3.c. Verovatnoća oštećenja BK-7 višestrukim impulsima ( $Nd^{3+}$ :YAG 1064nm, Q-switch, prečnik snopa  $12 \mu\text{m}$ ).

To je od velikog značaja u predviđanju trajnosti optičkih komponenta u laserskim sistemima.



Sl.4. Zavisnost pragova od broja impulsa.

**Mehanizam oštećenja.** Jedan od prilaza modelima [6] predlaže dve faze. U toku prve, pod uticajem određenog broja impulsa, dolazi do promena u unutrašnjosti materijala; nema vidljivih oštećenja na površini uzorka. Druga faza nastupa kada unutrašnje promene dostignu kritičan nivo (jedan impuls dovodi do površinskog oštećenja komponente (sl.5)).



Sl.5. Mikrofilm Suprasil-a, izloženog  $Nd^{3+}$ :YAG laseru ( $110 \text{ J/cm}^2$ ). Oštećenje nastaje tek u trenutku 6-tog impulsa.

### 3. EKSPERIMENT

**Uzorci.** U eksperimentu su korišćena meka kontaktna sočiva od polimera alphafilcon A [7]a. To je material od kopolimera 2-hydroxethyl methacrylate, N-vinyl pyrrolidone i 4-tertiary butyl-2-hydroxycyclohexyl methacrylate, i sadrži 66% vode kada se potopi u odgovarajući sterilni rastvor NaCl i boratnih bafera. Osnovne fizičke i optičke osobine sočiva izrađenih od alphafilcon A su: gustina 1,075 g/cm<sup>3</sup>, n=1,390, sadržaj vode 66% i propustljivost kiseonika\* 32x10<sup>-11</sup> {(cm<sup>3</sup>O<sub>2</sub>:cm)/(cm<sup>2</sup>:sec:mmHg}@35°C}[7] (1mmHg=133Pa)  
\*propustljivost određena polarigrafskom metodom

Nejonski materijal se dizajnira tako da omogući ravnotežu između permeabilnosti kiseonika i otpornosti na dehidraciju. Pored polimera se nalaze i agensi za ojačanje mehaničkih osobina sočiva pri rukovanju i za povećavanje otpornosti polimera na suze, koje luči oko tokom nošenja sočiva.

Drugi uzorak je polutvrdo sočivo od itabisfluorofoccon polimera [7]. To su nehidrofilna jedinjenja od methyl-methacrylate-fluoritaconate-siloxanyl kopolimera. Osnovne fizičke i optičke osobine sočiva su: gustina 1,27 g/cm<sup>3</sup>, n=1,435, hidrofobnost, ugao kvašenja 39°, sadržaj vode <1%, propustljivost kiseonika 45\*(24\*\*)x10<sup>-11</sup> {(cm<sup>3</sup>O<sub>2</sub>:cm)/(cm<sup>2</sup>:sec:mmHg}@35°C}  
\*-gasna metoda  
\*\*- polarografska metoda (ISO/Fatt)

Sočiva se odlikuju velikom transparentnošću u vidljivom opsegu (od 380 nm). Na sl.6 su uporedne zavisnosti propustljivosti sočiva od itabisfluorofoccon tipa A (BOSTON RXD), rožnjače i običnog sočiva.



Sl.6. Transmisija sočiva, rožnjače i sočiva tipa A.

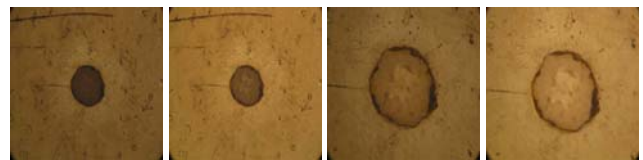
Treći uzorak je tvrdo kontaktno sočivo (n=1,42). U Tab.1a su dati zbirni podaci.

Tab.1.

Uzorak	n	D <sub>k</sub>	Gustina g/cm <sup>3</sup>
1 meko	1,39	32x10 <sup>-11</sup>	1,075
2 Polutvrdo	1,435	24x10 <sup>-11</sup>	1,27

Sočiva su izlagana laserima tipa: CO<sub>2</sub>, diodni 808nm, Er:YAG 2,9 μm. To su laseri koji se često pojavljuju u praksi.

Uzorci su izlagani nekim od ovih lasera i povrede su praćene mikroskopskom analizom. Ovde su detaljnije prikazani uzorci sočiva izlaganih impulsima Nd<sup>3+</sup>:YAG lasera λ=1,064 μm (Nd<sup>3+</sup>:YAG) energije 20 mJ, τ=15 ns, f=200 mm. Na fotopapiru se vidi oblik snopa, na osnovu čije površine se izračunava snaga po jedinici površine (sl.7. a, b, c, d).

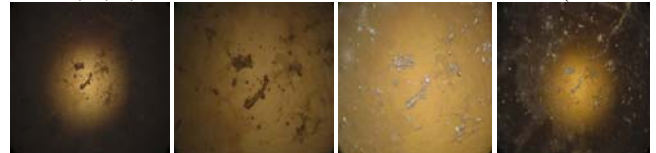


Sl.7. a, b, c, d. Povrede na fotopapiru (50-100x)

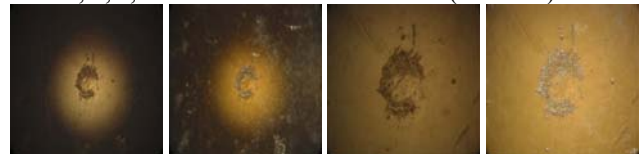
Povrede su date na slikama 8-12 za polutvrdo i tvrdo sočivo.



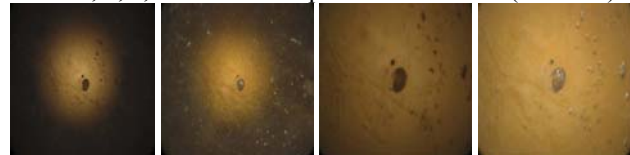
Sl.8. a, b, c, d. Povrede na tvrdom sočivu PWR 775(50-100x)



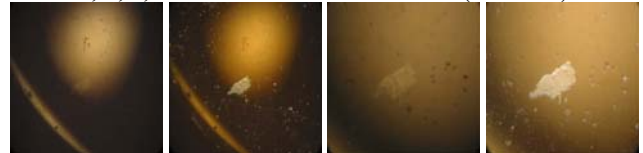
Sl.9. a, b, c, d. Povrede na tvrdom sočivu(50-100x)



Sl.10. a, b, c, d. Povrede na polutvrdom sočivu(50-100x)



Sl.11. a, b, c, d. Povrede na tvrdom sočivu(50-100x)



Sl.12. a, b, c, d. Povrede na tvrdom sočivu(50-100x)

### 4. DOZIMETRIJSKI I BEZBEDNOSNI ASPEKT

Prema klasama lasera trebalo bi uvek izračunati prvo maksimalne uslove pod kojima se može raditi sa odgovarajućom zaštitom. Primeri iz prakse o povredama laserskim sistemima se nažalost dobijaju iz akcidentnih kvalitativnih i kvantitativnih podataka.

LIDT razmatranje za neke tipove se može diskutovati i polazeći od efektivnog uračunavanja korekcija na interna polja vezana za stanje površine i indekse prelamanja. Pojava malih crta ili žljebova dobijenih od upotrebe stvaraju potrebu za korekcije.

### 5. DISKUSIJA

Otpornost optičkih komponenata na lasersko zračenje se kvantifikuje gustinom snage ozračavanja potrebnom da u komponenti izazove promene, pri čemu se ta granična gustina naziva pragom oštećenja. Do oštećenja dolazi na površini dielektrika usled jonizacije apsorbovanih molekula kontaminata, najčešće molekula vode. Ne treba zaboraviti i višefotonske jonizacije. Za visokokvalitetne dielektrike ovo je glavni način oštećenja, pošto su oštećenja izazvana toplotnim frakturama usled absorpcije energije vrlo retka.

Mehanička završna obrada optičkih komponenti igra bitnu ulogu u ukupnoj otpornosti, pošto ogrebotine i ispuščenja izazvana lošim poliranjem dovode do efekata refleksije i difrakcije, i do električnog polja asociranog sa LIDT.

Prag oštećenja se različito specificira za kontinualne i impulsne laserske snopove, tako što se kod kontinualnih posmatra snaga po jedinici površine, dok se kod impulsnih posmatra energija u jedinici vremena po jedinici površine.

Oštećenja su reverzibilna ili trajna. Najčešća reverzibilna su porast temperature, nelinearna propustljivost i apsorpcija, samofokusanje, generisanje drugog harmonika i razne oscilacije optičkih parametara, dok trajna oštećenja, koja se javljaju kod dejstava jačim snopovima uključuju topljenje, omekšavanje materijala, savijanje, pucanje i isparavanje. Stoga proučavanja graničnih slučajeva reverzibilnih oštećenja zapravo daju uvid u otpornost optičkih komponenata na lasersko zračenje [8].

Neka istraživanja polaze od zaključka da termomehnički odziv mnogih materijala na stimulans laserskim snopom ne samo da nije linearan, već da je haotičan i teško predvidiv [9]. Ovo ukazuje na činjenicu da i male promene u trajanju ozračavanja laserskim snopom ili male fluktuacije u energiji snopa mogu izazvati drastične promene i velika oštećenja komponente koja se ozračava. Odziv optičkih kontaktnih sočiva na laserski snop može biti veoma interesantan sa dozimetrijskog stanovišta, i u cilju zaštite oka.

Iako su dosadašnje normative izostavljale mogućnost upotrebe kontaktnih sočiva kao zaštite od laserskog snopa, potencirajući primenu zaštitnih naočara, sve je više istraživanja koja ukazuju na prednosti kontaktnih sočiva u odnosu na zaštitne naočare. Kontaktna sočiva potpuno prijanjaju uz oko prekrivajući zenicu i korneu eliminišući mogućnost da neki odbijeni ili prelomljeni snop dospe u oko zaobilazeći klasične zaštitne naočare.

Kontaktna sočiva, otporna na laserske snopove iz vidljivog i infracrvenog dela spektra bi našla svoje mesto kako u civilnoj (operacije laserima u medicini i stomatologiji...), u vojnoj primeni (daljinomeri, komunikacije, laserska navođenja "pametnih" bombi...) i u mnogim drugim primenama.

Ono što je bitno napomenuti je da kontaktna sočiva koja bi se koristila kao zaštita od laserskog snopa bi morala biti napravljena od optičkog materijala koji apsorbuje, a ne reflektuje laserski snop i prema sadašnjim standardima za zaštitne naočare do oka sme da proдре najviše 0,001% laserske energije (vrlo okvirna cifra). Predlaže se izlaganje malim fluksevima radi promene ugla kvašenja, kao što se radi sa mikrotalasima. I u procesu proizvodnje, grejanje proširenim laserskim snopovima bi možda menjalo karakteristike, kao pri izvlačenju vlakna.

## 6. ZAKLJUČAK

Postoji mnogo modela interakcije lasera i optičkih komponenata na bazi stakla i polimera. Obzirom na široku upotrebljivost ovih materijala, postoji i mnogo eksperimentalnih podataka planiranih ali na žalosti i akcidentnih. Zato je i spominjana, pored medicinske primene, i vojna. Autori su tretirali, pored mekih i tvrdih, i polutvrda sočiva, stakla za naočare, i stakla za druge primene, uključujući i finu lasersku, holografsku i interferometarsku optiku. Povrede Nd:YAG laserom u Q-switch modu su mnogo manje od povreda CO<sub>2</sub> laserom mnogo manje gustine snage.

Za profesionalno ispitivanje praga povrede i LIDT postoji više priznatih procedura. Međutim, veoma su različiti pragovi povreda i za najpoznatije materijale [5]. Statistički karakter interakcije je nesumnjivo uvek moguće potvrditi. Primena

stabilisanih lasera je manje uključena u eksperimente ove vrste, pa bi bilo interesantno sprovesti paralelna istraživanja i sa tim klasama lasera.

Dozimetrijski karakter u svakom istraživanju sa laserskim snopovima je strogo vezan za  $\lambda$ , E,  $\tau$ , P i oblik impulsa i za svaku ocenu se mora poštovati protokol [11, 12, 13].

## LITERATURA

- [1] a) *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara, Москва: Машиностро., 1985., b) *Методы неразрушающих испытаний*, ed. P. Шарп, Москва: Мир, 1972, c) Brežinščak M., *Merenje i računanje u tehnici*, Zagreb: Tehn. knjiga, 1980.
- [2] L. Gallais, J. Y. Natoli, C. Amra, "Statistical study of single and multiple pulse laser-induced damage in glasses", *Optics express*, vol. 10, No. 25, pp. 1465-1473, 2004.
- [3] M. Srečković, A. Marinović, V. Šijački-Žeravčić, S. Ristić, V. Krasnjuk, A. Milutinović-Nikolić, S. Pantelić, Ž. Tomić, "Optical and radiation resistance of some optical components and fibers and interaction with some laser beams", *Proc. of LASERS 2001*, pp. 367-374, 2002.
- [4] M. Srečković, P. Osmokrović, J. Ilić, S. Ostojić, R. Gospavić, S. Pešić, "Mehanizmi interakcije lasera sa materijalima", *Elektrotehnika*, vol. 51, pp. 9-15, 2002.
- [5] R M Wood, *Laser Induced Damage of Optical Materials*, COSOLAS Ltd, UK, Aug 2003.
- [6] a Bernard Gerstman; Florida International Univ Miami Dept of Physics -Theoretical Modeling of Damage Mechanisms for Ultrashort Laser Pulses in Ocular Media, www.stormingmedia.us, Report number: A699704. b. b Feit, M. D.; Musher, S.L.; Shapiro, E.G.; Rubenchik, A.M. - Increased damage thresholds due to laser pulse modulation, 1st Annual Solid-State Lasers for Application To Inertial Conf. Fusion Meeting, Monterey, May 30 - Jun 2, 1995. c. [6]c Opt. Engineer Interview. Dr. Ric Peterson, Lt Col, USAF. AFRL/HEDR, Brooks City-Base San Antonio, TX, 2004
- [7] www.bausch.com
- [8] *Lasers and Applications*, Product Directory
- [9] "Laser-protective technologies and their impact on low-light level visual performance", Sheehy, James B. and Morway, Phyllis E. in *Laser-Inflicted Eye Injuries: Epidemiology, Prevention, and Treatment*, *SPIE Proc.* vol.2674, pp 208-218,
- [10] 10a Stuck, Bruce E. and Belkin, Michael, Eds. Univ. S. Wales, 2002, Website: Cornea and Contact Lens Research Unit., 10b R. M. Wood, *Laser Damage in Opt. Materials*, Bristol: Adam Hilger, 1986.
- [11] D. Sliney, M. Wolbarsht, *Safety with Lasers and Other Optical Sources*, New York: Plenum, 1980.
- [12] IEC 825/84 + amend. 1/90, JUS NAO.860.
- [13] D. Živković, *Magistarski rad ETF*, Beograd, 2004.

**Abstract.** Optical lenses of different types and optical characteristics were exposed to laser beams of different wavelenghts. Microfractures were monitored and analyzed. Also, possible applications of laser techniques in optical lenses characterization procedures were discussed, as well as observed picture distorsions made by lenses. Dosimetric aspect of above is also discussed in order to prevent accident situation with eyes injuries during exposure to laser beams.

## LASER BEAM INTERACTION WITH OPTICAL ASSECORIES, IMPLANTS AND DOSIMETRY ASPECT

M. Srečković, A. Marinović, A. Kovačević, D. Družijanić, S. Pantelić, G. Gligorić, D. Barjaktarević, S. Popović