

Skeniranje atmosferskog plazmenog mlaza helija korištenjem laserski induciranog sloma

Aleksandar Opančar*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Bijenička 32, Zagreb

Mentor: dr. sc. Slobodan Milošević
Institut za fiziku, Bijenička 46, Zagreb

(Dated: 26. siječnja 2020.)

Ionizacija medija u koji fokusiramo laserski puls može smanjiti potreban intenzitet pulsa u fokusu da bi došlo do laserski inducirano sloma medija (laser-induced breakdown) te je i dobivena laserska plazma intenzivnija nego u slučaju kada nema predionizacije. Posljedično promatranjem minimalnog intenziteta lasera potrebnog za laserski inducirani slom ili optičkog emisijskog intenziteta laserske plazme možemo dobiti informaciju o elektronskoj gustoći u djeliću medija. Takvim mjerenjem možemo prostorno i vremenski kvalitativno mjeriti ionizaciju čak i u plazmama koje su preslabe za tipične dijagnostičke metode. U ovom radu prikazani su rezultati optičke emisijske spektroskopije laserski inducirane plazme uz automatizirano pomicanje fokusa lasera u odnosu na os plazmenog mlaza. Plazmeni mlaz stvara jednapolna visokonaponska elektroda, a lasersku plazmu induciramo pomoću pulsnog infracrvenog nanosekundnog lasera.

I. UVOD

Potencijalne primjene atmosferskih plazmenih mlazova u biomedicini te tretmanu hrane i vode u posljednjih petnaest godina predmet su mnogih istraživanja [1–6]. Za te i slične primjene bitno je znati parametre plazme, a jedan od najvažnijih je elektronska gustoća. Neke od standardnih metoda za mjerenje elektronske gustoće u plazmi su Thomsonovo raspršenje [7], Starkovo širenje linija [8] i laserska interferometrija [9]. Problem s tim metodama je što imaju prag detekcije ispod kojeg ne mogu precizno izmjeriti koncentraciju elektrona. Taj prag detekcije iznosi oko 10^9 elektrona po cm^3 . Koncentracije elektrona u atmosferskim plazmama često mogu biti ispod tog praga detekcije stoga postoji potreba za novim metodama dijagnostike atmosferskih plazmi.

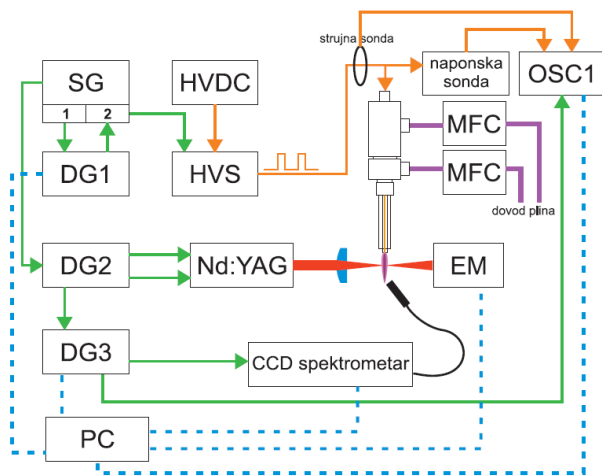
Ovaj rad se nastavlja na [10] gdje je predložena metoda za kvalitativno određivanje elektronske gustoće u plazmenom mlazu helija. Ta metoda mada ne daje kvantitativne rezultate nudi mogućnost kvalitativnog određivanja elektronske gustoće ispod praga detekcije navedenih standardnih metoda. Glavna ideja metode zasniva se na činjenici da predionizacija medija smanjuje intenzitet lasera u fokusu koji je potreban da bi došlo do laserski inducirano sloma medija [11]. Osim toga i nastala laserska plazma biti će intenzivnija što više elektrona u fokalnom volumenu lasera. Ako laser fokusiramo u mlaz helija i energiju odaberemo tako da bez početne ionizacije ne dolazi do laserski inducirano sloma, tada nam laserski inducirani slom ukazuje na prisustvo slobodnih elektrona, a optički emisijski intenzitet nastale laserske plazme to je veći što je elektronska gustoća u fokalnom volumenu lasera veća.

Na početnu ionizaciju, takozvane *seed* elektrone, laser djeluje procesom inverznog bremsstrahlunga u kojem u blizini teške čestice, atoma ili iona, elektroni mogu nerezonatno apsorbirati foton i dobiti kinetičku energiju. Ti elektroni se dalje sudaraju s atomima koje ioniziraju i stvaraju nove slobodne elektrone koji prolaze isti proces dok traje laserski puls. Ova metoda, osim za dijagnostiku, može se koristiti i za daljinsku detekciju malih količina radijacije što je demonstrirano u [12].

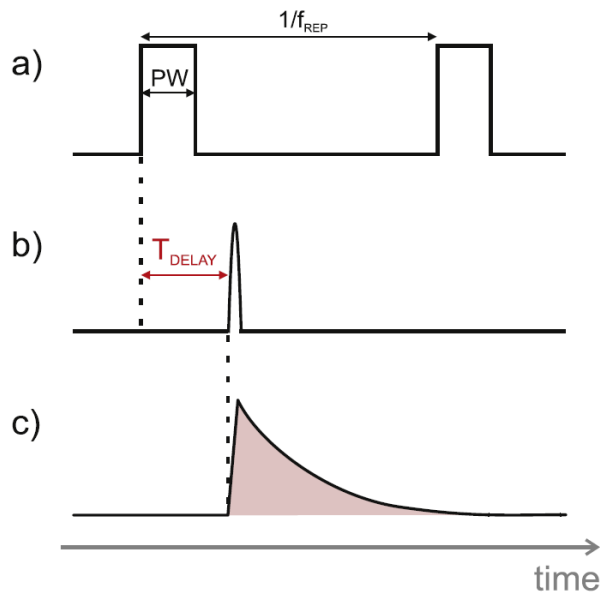
II. EKSPERIMENTALNA METODA

Eksperimentalni postav većim dijelom isti je kao u radu [10]. Nadogradnja u ovom radu je primarno u automatizaciji eksperimenta. Točnije, sinkronizirano je pomicanje fokusa lasera uz pomoć step motora i translatora, te mjerenje optičkog emisijskog intenziteta laserski inducirane plazme i spremanje podataka u računalo, sve napravljeno u LabVIEW programu. Takva kontrola eksperimenta omogućuje brža, preciznija i reproducibilnija mjerenja. Shema eksperimentalnog postava prikazana je na slici 1. Izvor visokog DC napona spojen je na visokonaponsku sklopku koja prekidanjem DC napona stvara visokonaponske pulseve prikazane na slici 2 a). Frekvencija repeticije pulseva je $f_{REP} = 10\text{kHz}$ dok je vrijeme trajanja jednog pulsa $PW = 10\mu\text{s}$. Takav napon dolazi na jednapolnu bakrenu elektrodu koja se nalazi unutar staklene kapilare i stvara atmosferski plazmeni mlaz helija. Mjerač protoka plina osigurava jednolik protok helija koji je namješten na vrijednost 2 slpm. Napon se preko naponske sonde mjeri osciloskopom. Generator signala stvara trigger signal za visokonaponsku sklopku, laserski puls te spekrometar. Pomoću generatora kašnjenja stvaramo vremenski razmak T_{DELAY} između naponskog pulsa i laserskog pulsa prikazanog na slici 2 b). Prikaz vremenske ovisnosti intenziteta svjetlosti emitirane iz la-

* aleksandar.opancar@gmail.com



Slika 1. Shema eksperimentalnog postava. SG - generator signala, DG - generator kašnjenja signala, HVDC - izvor visokog (DC) napona, HVS - visokonaponska sklopka, Nd:YAG - nanosekundni laser, MFC - mjerač protoka plina, OSC - osciloskop, PC - računalo, EM - detektor za mjerenje energije laserskog pulsa. Preuzeto iz [13].



Slika 2. Prikaz vremenskih ovisnosti: a) napona nakon visokonaponske sklopke, $f_{REP} = 10\text{kHz}$ te $PW = 10\mu\text{s}$, b) laserskog pulsa i c) emisije svjetlosti iz laserske plazme. Preuzeto iz [10].

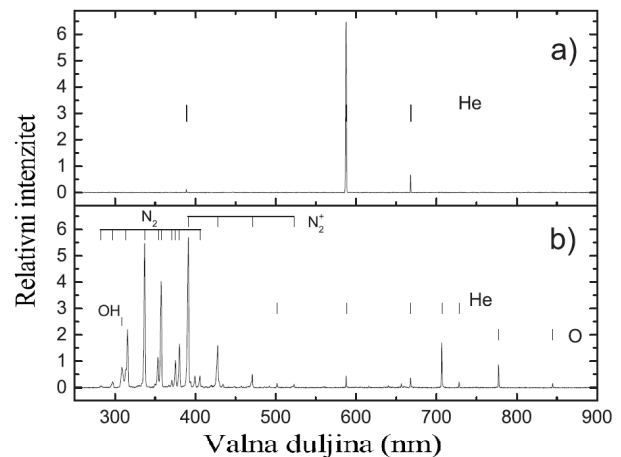
laserske plazme nalazi se na slici 2 c).

Leća koja fokusira laser i leća koja skuplja svjetlost pričvršćeni su na postolje koje pomoću translatora možemo precizno horizontalno pomicati. Na translator je priključen step motor koji omogućuje automatizirano pomicanje postolja u koracima od $5\mu\text{m}$. Tako vrtnjom step motora, odnosno translacijom postolja između la-

serskih pulseva možemo dobiti prostornu 1D sliku mlaza plazme. Vremensku evoluciju plazmenog mlaza promatramo mijenjanjem vremenskog razmaka između napona i laserskog pulsa T_{DELAY} .

Posebno su nam zanimljiva dva trenutka. Približno 100 ns nakon početka rasta napona ($T_{DELAY} \approx 100\text{ns}$) dolazi do paljenja primarnog izboja, što se može opaziti i u porastu struje izboja. Tada je koncentracija elektrona u plazmi najveća. Za vrijeme trajanja pulsa izbojna struja i koncentracija elektrona u plazmi eksponencijalno trnu. Približno 100 ns nakon početka pada napona dolazi do paljenja sekundarnog izboja, što se također može opaziti u porastu struje izboja, ali negativne vrijednosti. Nastala plazma opet vrlo brzo trne u vremenu, odnosno dolazi do rekombinacije elektrona i iona. Prostorno pomicanje translatora step motorom i T_{DELAY} kontroliraju se na računalo preko programa napisanog u LabView-u.

Laserski puls atenuiramo pomoću polarizirajućeg djelitelja snopa tako da energija pulsa koji prođe bude malo ispod praga za laserski induciran slom u heliju bez prisustva napona tj. predionizacije. Ta energija u našem slučaju iznosila je 19 mJ. Kada je helij ioniziran smanjuje se prag te dolazi do laserski induciranog sloma. Svjetlost iz laserske plazme fokusiramo lećom spojenom na optički kabel koji vodi u spektrometar. Prijelazi koje očitavamo u laserskoj plazmi su $\text{He}(2p^3P^0-3d^3D)$ na 588 nm te dušikova ionska linija na 501 nm koju tvori par nerazlučenih prijelaza. Tipični izmjereni spektar prikazan je na slici 3.

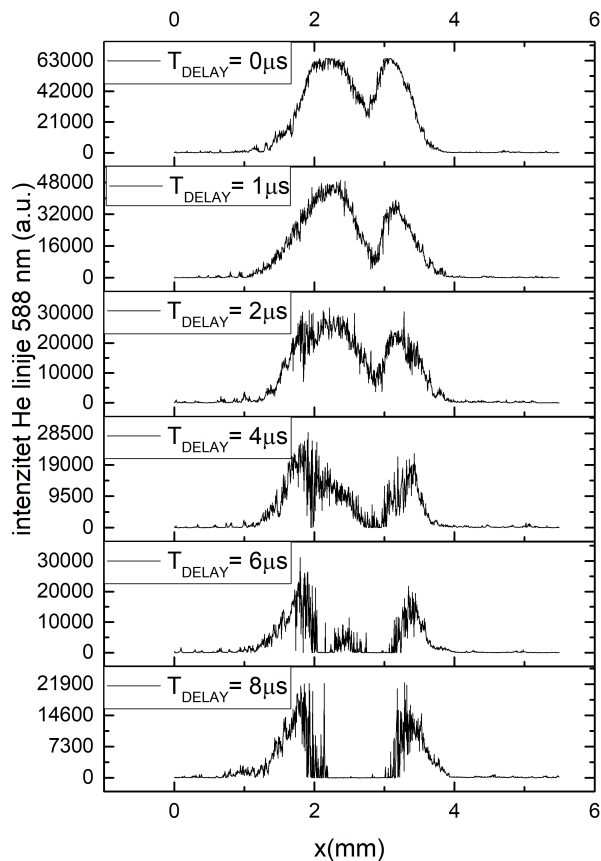


Slika 3. Spektar optičke emisije: a) laserske plazme i b) atmosferskog mlaza helijeve plazme. Preuzeto iz [10].

Skeniranje mlaza sastoji se od pucanja laserskim pulsom u jednu točku te mjerenjem intenziteta navedenih linija u optičkoj emisiji laserske plazme. Zatim se fokus lasera i leća spektrometra pomiču za $5\mu\text{m}$ duž horizontalne osi te se proces ponavlja za tu točku. Postupak je automatiziran tako da fokus lasera prebriše cijeli mlaz širine oko 3 mm. Mjerenje se vrši za različite T_{DELAY} kako bi se dobila vremenska evolucija mlaza.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Graf ovisnosti intenziteta helijeve linije na 588 nm o položaju fokusa za različite T_{DELAY} unutar trajanja naponskog pulsa prikazan je na slici 4. Na prva tri grafa

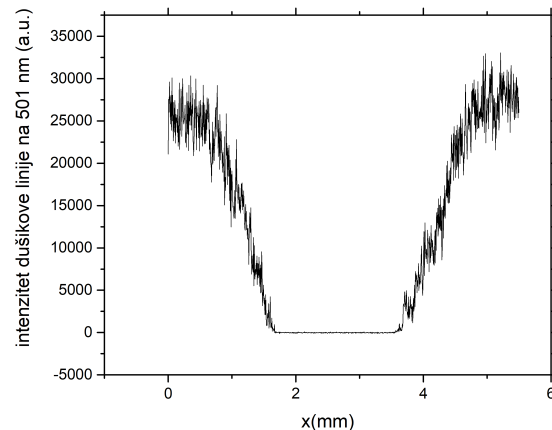


Slika 4. Graf intenziteta linije helija na 588 nm u ovisnosti o položaju fokusa za različite T_{DELAY} primarnog izboja.

slike 4 primjećujemo oblik koji je u literaturi poznat kao "donut" oblik za koji signal u sredini toka helija ima lokalni minimum. Signal u sredini trne u vremenu kako povećavamo T_{DELAY} kao što i očekujemo, no zanimljivo je da krila signala ne utru do kraja. Jedno objašnjenje temelji se na tome što u tom rubnom području dolazi do miješanja zraka i helija. Energija laserskog pulsa namještena je tako da ne može bez napona uzrokovati laserski induciran slom u heliju, no zrak je znatno lakše ionizirati nego čisti helij pa u zraku dolazi do laserski induciranog sloma. U mješavini helija i primjesa zraka laserski puls može ionizirati molekule u zraku te onda procesom inverznog bremsstrahlunga te elektrone ubrzati. Ubrzani elektroni dalje sudarima ioniziraju atome helija.

U prilog ovom objašnjenju ide i graf emisije dušika na 501 nm prikazan na slici 5. Krila signala helija javljaju se

blizu dna signala dušika. To je zato što u tom prostoru ima i dovoljno dušika da pokrene proces ionizacije, a i dovoljno helija da linija bude intenzivna.



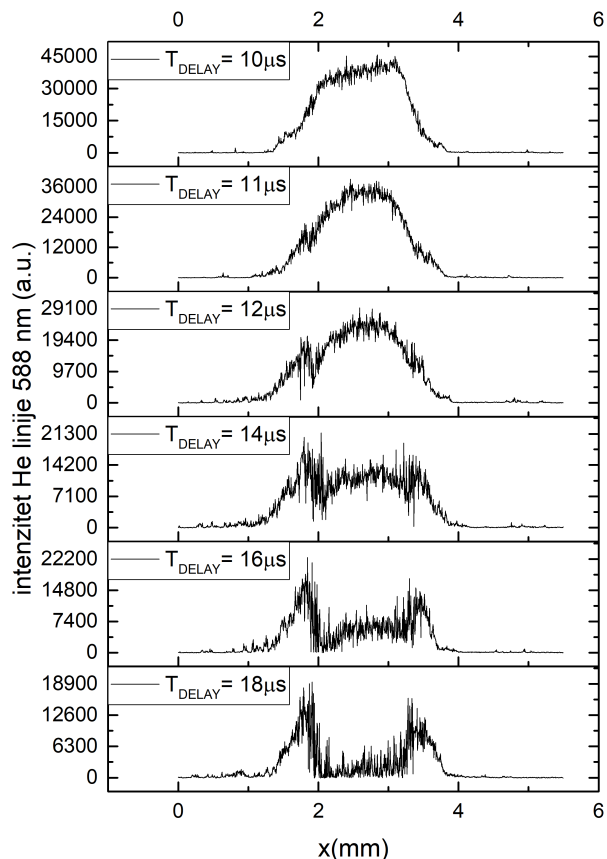
Slika 5. Graf intenziteta linije dušika na 501 nm u ovisnosti o položaju fokusa.

Ukoliko bi se ovaj efekt htio izbjeći trebalo bi energiju laserskog pulsa smanjiti dovoljno da ne može uzrokovati laserski slom ni u jednom plinu koji je prisutan, no to bi kao posljedicu imalo gubitak osjetljivosti unutar samog medija koji ispituje. Alternativno moglo bi se oko mlaza plazme kroz širu kapilaru puštati helij koji će spriječiti ulazak zraka u mjerno područje.

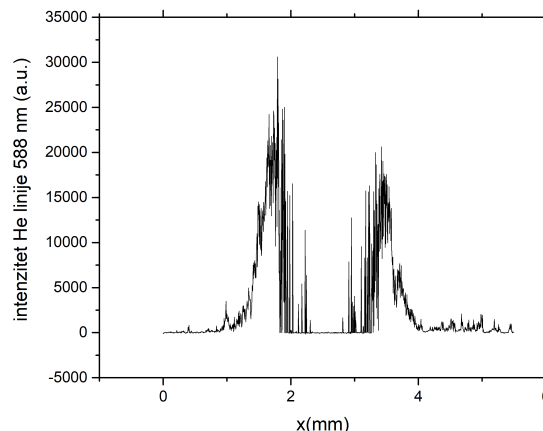
Na slici 6 prikazan je graf ovisnosti intenziteta helijeve linije na 588 nm o položaju za različite T_{DELAY} izvan trajanja naponskog pulsa tj. sekundarni izboj. U sekundarnom izboju kao i u prvom primjećujemo pad signala u sredini mlaza s vremenom. Također primjećujemo da zadnji grafovi na obje slike izgledaju vrlo slično. To je i za očekivati jer dovoljno dugo nakon pulsa nema utjecaja vanjskog električnog polja. To potvrđuje i slika 7 gdje je prikazana ovisnost linije He na 588nm, ali bez uključenog napona. Vidimo da i slika 7 izgleda vrlo slično zadnjim grafovima na slikama 4 i 6.

Najveća razlika između primarnog i sekundarnog izboja je u intenzitetu koji je veći za primarni izboj te u "donut" obliku koji je prisutan u slučaju primarnog, ali ne i sekundarnog izboja. To je zanimljiv rezultat jer ukazuje na moguću razliku u mehanizmu nastanka primarnog i sekundarnog izboja. Još jedna stvar koju primjećujemo na slikama 3 i 5 je asimetrija signala. Razlog tome je vjerojatno nesavršenost ruba kapilare iz koje izlazi helij ili nesimetričan položaj elektrode unutar kapilare.

Prirodna nadogradnja ovog istraživanja bila bi ugrađivanje i automatizacija vertikalnog translatora koji bi dopuštao brže i preciznije 2D skeniranje presjeka mlaza. Cilj takvih mjerenja bio bi mapiranje elektronske gustoće u plazmenom mlazu, uz dobru prostornu i vremensku razlučivost. Mogli bi se odrediti parametri poput



Slika 6. Graf intenziteta linije helija na 588 nm u ovisnosti o položaju fokusa za različite T_{DELAY} sekundarnog izboja.



Slika 7. Graf intenziteta linije helija na 588 nm u ovisnosti o položaju fokusa bez uključenog napona.

brzine širenja ionizacijske fronte, i detektirati efekt plazmenih metaka, što se obično radi pomoću skupih iCCD kamera.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je unaprijeđen postav iz članka [10] u vidu automatizacije translatora koja omogućuje preciznije i brže skeniranje mlaza helijeve plazme. Prethodno su mjerenja bila provedena samo za jedan T_{DELAY} , a zahvaljujući automatizaciji sad su mjerenja proširena na čitavo područje T_{DELAY} -eva. Opaženi su novi efekti u rubnim područjima mlaza kao i postojanje "donut" oblika u primarnom izboju, a izostanak u sekundarnom.

ZAHVALE

Zahvaljujem se dr. Slobodanu Miloševiću i dr. Deanu Popoviću na gostoprimstvu u laboratoriju te na pomoći u i izvan laboratorija.

-
- [1] Lu, X., Reuter, S., Laroussi, M., Liu, D. (2019). Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma Jets. Boca Raton: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9780429053665>
- [2] Mateu-Sanz, M.; Tornín, J.; Brulin, B.; Khlyustova, A.; Ginebra, M.-P.; Layrolle, P.; Canal, C. Cold Plasma-Treated Ringer's Saline: A Weapon to Target Osteosarcoma. *Cancers* 2020, 12, 227.
- [3] Speranza, G., Liu, W., Minati, L. (2019). Applications of Plasma Technologies to Material Processing. Boca Raton: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9780429264658>
- [4] C. Labay, I. Hamouda, F. Tampieri, M.P. Ginebra, C. Canal. Production of reactive species in alginate hydrogels for cold atmospheric plasma-based therapies. *Scientific Reports*, 9, 16160 (2019).
- [5] Gierczik, K, Vukušić, T, Kovács, L, et al. Plasma-activated water to improve the stress tolerance of barley. *Plasma Process Polym.* 2020;e1900123. <https://doi.org/10.1002/ppap.201900123>
- [6] Kutasi, K., Popović, D., Krstulović, N., & Milošević, S. (2019). Tuning the composition of plasma-activated water by a surface-wave microwave discharge and a kHz pla-

- sma jet. *Plasma Sources Science and Technology*, 28(9), [095010]. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab3c2f>
- [7] Hubner S, Sousa J S, Puech V, Kroesen G M W and Sadeghi N 2014 Electron properties in an atmospheric helium plasma jet determined by Thomson scattering *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 432001
- [8] Xiong Q, Nikiforov A Y, Gonzalez M A, Leys C and Lu X P 2013 Characterization of an atmospheric helium plasma jet by relative and absolute optical emission spectroscopy *Plasma Sources Sci. Technol.* 22 015011
- [9] Choi J Y, Takano N, Urabe K and Tachibana K 2009 Measurement of electron density in atmospheric pressure small-scale plasmas using CO₂-laser heterodyne interferometry *Plasma Sources Sci. Technol.* 18 035013
- [10] Popović, Dean; Bišćan, Marijan; Milošević, Slobodan: Laser induced breakdown in pulsed helium atmospheric pressure plasma jet; *Plasma Sources Science and Technology*, 28 (2019), 5; 055009
- [11] Soubacq S, Pigolet P, Schall E and Batina J 2004 Investigation of a gas breakdown process in a laser-plasma experiment *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37 2686
- [12] Daniel Woodbury, Robert M. Schwartz, and Howard M. Milchberg, "Measurement of ultralow radiation-induced charge densities using picosecond mid-IR laser-induced breakdown," *Optica* 6, 811-820 (2019)
- [13] Popović, D. (2019). *Dijagnostika i primjena pulsnih hladnih atmosferskih plazma (Disertacija)*. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:986074>