

UNIVERZITET U BEOGRADU

FIZIČKI FAKULTET

Dejan S. Maletić

**RAZVOJ I DIJAGNOSTIKA
ATMOSFERSKOG PLAZMA MLAZA I
NJEGOVA PRIMENA NA UZORKE
BIOLOŠKOG POREKLA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2018.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF PHYSICS

Dejan S. Maletić

**DEVELOPMENT AND DIAGNOSTICS OF
ATMOSPHERIC PLASMA JET AND
APPLICATION ON BIOLOGICAL
SAMPLES**

A Doctoral Thesis

Belgrade, 2018

Članovi komisije:

1. Dr Nevena Puač, naučni savetnik,
Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu
2. Dr Gordana Malović, naučni savetnik,
Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu
3. Dr Milorad Kuraica, redovni profesor,
Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu
4. Dr Srđan Bukvić, redovni profesor,
Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu
5. Dr Bratislav Obradović, redovni profesor,
Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Lauri i Aleksis

Doktorska disertacija pod nazivom "Razvoj, dijagnostika i primena atmosferskog plazma mlaza na uzorke biološkog porekla" urađena je pod rukovodstvom dr Nevene Puač u Laboratoriji za gasnu elektroniku, Instituta za fiziku u Beogradu. U razvoju eksperimentalne aparature, formiranju eksperimentalne postavke i eksperimentalnim merenjima takođe je rukovodila i dr Gordana Malović. Rad na disertaciji, kao i raniji rad na master i diplomskom radu se odvijao u kontinuitetu u Centru za neravnotežne procese pod strateškim rukovodstvom dr Zorana Lj. Petrovića. Ova doktorska disertacija je urađena i finansirana od strane projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije III41011 i ON171037.

Takođe bih se zahvalio članovima laboratorije i dr Zoranu Petroviću na obezbeđivanju najsavremenije dijagnostičke opreme i odličnim uslovima za rad, kao i na organizovanju velikog broja seminara koji su bili od značaja za moj istraživački rad i naučnu karijeru.

Zahvalio bih se svom mentoru dr Neveni Puač, na velikoj pomoći pri prvim naučnoistraživačkim koracima u laboratoriji. Njena zainteresovanost za najrazličitije oblasti primene plazma izvora mi je bila inspiracija da se i ja zainteresujem za plazmu i njene primene. Svojim konstantnim praćenjem, podrškom i prenošenjem znanja mi je omogućila da uspešno privedem kraju eksperimente, pisanje radova i teze. Njeni konstruktivni saveti bili su od ključnog uticaja za uobličavanje ove disertacije u jednu celinu.

Veliku zahvalnost dugujem svom komentoru dr Gordani Malović koja je svojim iskustvom u laboratoriji dala veliki doprinos mom sazrevanju u naučnom smislu. Savetima u pisanju radova, pravljenju postera i načinu prezentovanja rezultata na konferencijama.

Prof. dr Antoniju Đorđeviću bih se zahvalio na stručnoj pomoći i jasnim i preciznim savetima tokom rešavanja problema konstrukcije napajanja plazma mlaza i strujno naponskim merenjima.

Zahvalio bih se kolegama sa Stomatološkog fakulteta u Beogradu, prof. dr Dragani Vuković, dr Maji Miletić i dr Ivani Dakić na saradnji u oblasti primene plazme u medicini iz koje su proistekli značajni rezultati. Takođe i na pripremi bioloških uzoraka i analizi rezultata tretmana plazmom.

Posebnu zahvalnost dugujem tehničkim saradnicima Instituta za fiziku Vladimiru Saviću, Vladimiru Dragojloviću i Zoranu Velikiću na tehničkoj pomoći u realizaciji i pripremi eksperimenata i tehničkoj realizaciji ideja.

Zahvalio bih se kolegama iz kancelarije Nenadu Selakoviću i Kostu Spasiću na druženju i razmeni iskustava u radu u laboratoriji i prilikom obrade podataka.

Na kraju bih se zahvalio svojoj sestri, majci i ocu na podršci i naporima koje su uložili u moje školovanje. Zahvalio bih se Branki, ćerki Lauri i sinu Aleksi koji su mi bili motivacija tokom rada na disertaciji.

Razvoj i dijagnostika atmosferskog plazma mlaza i njegova primena na uzorke biološkog porekla

Rezime:

Poslednjih desetak godina plazma mlazevi privlače veliku pažnju istraživača širom sveta zbog interesantnih fizičkih fenomena koji su zapaženi zahvaljujući razvoju novih eksperimentalnih tehnika, a posebno brzih i osetljivih laboratorijskih kamera. Za razliku od klasičnih strimera, koji se kreću stohastično u prostoru, plazma mlazevi, odnosno vođeni jonizacioni talasi, su visoko reproducibilni i kreću se u stubu radnog gasa. Zbog pojave emisije visokog intenziteta u glavi strimera neki autori su ih nazvali plazma „mecima“ da bi se kasnije došlo do naziva „Pulsed Atmospheric-Pressure Plasma Streams (PAPS)“. Takođe je primećeno da je brzina kretanja brzih jonizacionih paketa za nekoliko redova veličine veća od protoka radnog gasa.

Tokom izrade ove doktorske disertacije je konstruisan, dijagnostikovao i primenjen atmosferski plazma mlaz na uzorke biološkog porekla. Ispitivan je veliki broj elektrodnih geometrija koje utiču na formiranje prostiranja plazma mlaza u prostoru. Za ispitivanje plazme unutar elektroda koristili smo provodne prozirne folije, pomoću kojih smo mogli da potvrdimo da je plazma unutar elektroda torusnog oblika i da se kreće klizeći po zidovima cevčice u zoni elektroda. Plazma između elektroda je odvojena od zidova cevčice zbog oblika električnog polja u međuelektrodnoj oblasti. Prilikom izlaska plazme iz cevčice jonizacioni front poprima oblik loptice koja se kreće velikom brzinom kroz okolni vazduh.

Dijagnostika plazma mlaza je urađena primenom dve dijagnostičke metode: električnim sondama i brzom iCCD kamerom. Iz električnih merenja smo izračunali napone, snage i impedanse plazme a iCCD kamerom smo dobili prostorni i vremenski razvoj plazme za različite eksperimentalne parametre. Brzina plazma „metka“ u nekim konfiguracijama je dostizala čak 20 km/s, što je za nekoliko redova veličine veće od brzine radnog gasa u kome se formira plazma. Podešavanjem širine elektroda, njihovog međusobnog rastojanja i rastojanja od ruba cevčice može se podešavati domet plazma mlaza.

Domet plazma mlaza je jedan od ključnih parametara pri tretmanu uzoraka kako bi se reaktivne čestice iz plazme dopremile do mesta koje se tretira.

Posle detaljne dijagnostike primenili smo plazma mlaz na soj MRSA bakterija koje su zasejane u petri šolje i u obliku biofilma na mikrotitar pločama. Odredili smo zone inhibicije i procenat smanjenja bakterija u uzorku posle tretmana MTT testom. Takođe smo ipitali uticaj plazma mlaza na DNK bakterije.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je plazma mlaz veoma fleksibilan izvor što se tiče radnih parametara i veoma efikasan u sterilizaciji površina koje su prekrivene bakterijama.

Ključne reči: plazma, plazma mlaz, plazma tretman, sterilizacija bakterija, biofilmovi

Naučna oblast: fizika

Uža naučna oblast: Fizika jonizovanih gasova i plazme

UDK broj: 533.9 (043)

Development and diagnostics of atmospheric plasma jet and application on biological samples

Abstract:

In the past ten years, the plasma jets have attracted great attention of researchers worldwide due to the interesting physical phenomena that have been observed thanks to development of new diagnostic techniques, especially the development of fast and sensitive laboratory cameras. Unlike the classical streamers, that are moving stochastically in space, plasma jets or guided ionization waves are highly reproducible trajectories and they are travelling in the column of buffer gas. Due to the emission of high intensity in the streamer and spherical head some authors have called them plasma “bullets” later on called „Pulsed Atmospheric-Pressure Plasma Streams (PAPS)“. It was also noted that the speed of fast ionization packages are several orders of magnitude greater than the working gas velocity.

During the preparation of this doctoral thesis, atmospheric plasma jet was constructed, analysed and applied on the biological samples. The large number of electrode geometries were tested. Electrode configuration affects the formation and propagation of the plasma jet in space. To test the plasma inside the electrodes we used a conductive transparent foil. With this electrodes we were able to confirm that the plasma inside the electrodes has a torus shape and hanging on the tube walls. The plasma between the electrodes is separated from the walls of the tube due to the effects of the electric field. When plasma leaves the tube it takes the form of a small ball and moves at high velocities.

Diagnostics of plasma jet is performed by using two diagnostic methods, electrical probe measurement and fast iCCD imaging. From electrical measurements we calculated voltages, powers and impedances of plasma, from iCCD images we get spatial and temporal development of plasma for various experimental parameters. Velocity of plasma “bullet” in some configurations can reach a speeds up to 20 km/s, which is several orders of magnitude higher than the speed of the working gas in which the plasma is formed. By adjusting the width of the electrodes, their mutual distance and distance from the edge of the tube the range of plasma jet can be adjusted, and the range is one of the key parameter in plasma treatment and delivery of reactive plasma species.

After a detailed diagnostics, we applied the plasma jet on the MRSA bacteria planted in Petri dishes, and in the form of biofilms in the microtiter plates. We measured inhibition zones and reduction of the bacteria number in the samples with MTT assay. We also investigated the influence of the plasma jet on the bacteria DNA.

Based on these results it can be concluded that the plasma jet is a very flexible plasma source in operating parameters. The plasma jet is very efficient in sterilization of surfaces covered with bacteria.

Key words: plasma, plasma jet, plasma treatment, bacteria sterilization, biofilms

Major scientific field: physics

Scientific subfield: Physics of ionized gases and plasma

UDC number: 533.9 (043)

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Plazma	2
1.2. Neravnotežne niskotemperaturne plazme	5
1.3. Jonizacioni talasi i strimeri	6
1.4. Vođeni jonizacioni talasi - plazma mlazevi	9
1.5. Važne osobine plazma mlazeva	12
1.6. Dijagnostičke metode za ispitivanje plazma mlazeva	14
1.7. Primene atmosferskih plazma mlazeva	20
1.8. Organizacija teze	22
2. Eksperimentalni uređaji i procedura merenja	23
2.1. Eksperimentalne postavke za merenje svetlosnih profila iCCD kamerom i električna merenja	23
2.2. Konstrukcija pojačala za napajanje plazma mlaza	24
2.3. iCCD kamera	26
2.4. Vremenski razloženi snimci i aksijalni profili emisije	31
2.5. Električna merenja	35
3. Dijagnostika plazma mlazeva različitih geometrija metalnih elektroda	36
3.1. iCCD snimci sa ekspozicijom koja je duža od perioda pobudnog signala	36
3.2. Poređenje tri različite konfiguracije metalnih elektroda	40
3.2.1. Vremenski razloženi snimci za dve tanke elektrode - konfiguracija „Žica“	40
3.2.2. Vremenski razloženi snimci za dve elektrode od bakarne folije – konfiguracija „Traka“	43
3.2.3. Vremenski razloženi snimci za elektrodu sa prozorom i jednu tanku elektrodu – konfiguracija „Prozor“	48
3.2.4. Poređenje vremenski razloženih snimaka za tri konfiguracije	51
3.2.5. Strujno naponske karakteristike za tri geometrije bakarnih elektroda	52
3.3. Zaključak	57
4. Vremenski razloženi snimci dvoelektrodnog plazma mlaza sa providnim elektrodama i optimizacija elektrodne geometrije	59
4.1. Pomeranje elektroda od ruba cevčice plazma mlaza	59
4.2. Pomeranje elektroda od ruba cevčice i menjanje međuelektrodnog rastojanja	66
4.3. Optimalna elektrodna konfiguracija plazma mlaza	77

4.4. Dodatna elektroda između uzemljene i napajane elektrode	81
4.5. Snaga pri kojoj se formira PAPS za vremenski trenutak 10.8 μ s	88
4.6. Zamenjena mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi	92
4.7. Zaključak	95
5. Uticaj prisustva treće metalne elektrode u obliku šiljka na formiranje plazma mlaza	97
5.1. Električna merenja	97
5.2. Vremenski razloženi snimci za plazma mlaz sa trećom napajanom elektrodom u obliku šiljka	103
5.3. Interakcija plazma mlaza sa provodnom metom koja je na istom potencijalu kao i napajana elektroda	105
5.4. Vremenski razloženi snimci za plazma mlaz sa trećom uzemljenom elektrodom u obliku šiljka	108
5.5. Interakcija plazme sa plastičnom metom	110
5.6. Jednoelektrodni plazma mlaz koji udara u uzemljenu metalnu metu	112
5.7. Zaključak	115
6. Uticaj dodatka sintetičkog vazduha i argona na formiranje i prostiranje plazma mlaza	116
6.1. Uticaj dodatka sintetičkog vazduha na prostiranje plazma mlaza	116
6.2. Uticaj dodatka argona na prostiranje plazma mlaza	119
6.3. Zaključak	122
7. Formiranje plazma mlaza sa napajanom elektrodom na dodatnoj cevčici, u cevčici u obliku slova T i u dvostrukom plazma mlazu	123
7.1. Formiranje plazma mlaza za konfiguraciju sa napajanom elektrodom na dodatnoj cevčici	123
7.2. Vremenski razloženi snimci za T plazma mlaz	126
7.3. Vremenski razloženi snimci za T plazma mlaz sa dodatnom uzemljenom elektrodom	130
7.4. Dvostruki plazma mlaz	133
7.5. Zaključak	138
8. Tretman bioloških uzoraka plazma mlazom	139
8.1. Eksperimentalna postavka i pripremanje uzoraka bakterija za tretman atmosferskim plazma mlazom	139
8.2. MTT test	141
8.3. Zone inhibicije	142
8.4. Fragmentacija DNK bakterija	145

8.5. Zaključak	147
9. Zaključak	148
10. Literatura	152
11. Biografija	162
12. Prilozi	165

1. Uvod

Cilj ove doktorske disertacije je detaljna dijagnostika atmosferskih plazma mlazeva korišćenjem dve dijagnostičke metode: električna merenja i vremenski razložena optička emisiona spektroskopija. Nakon detaljne karakterizacije i optimizacije plazma mlaz je primenjen na uzorke bakterija. Tokom realizacije ove teze napravljen je jednostavan, prenosan i jeftin izvor napajanja i konstruisano je nekoliko tipova plazma mlazeva. Napajanje za generisanje plazma mlaza je razvijeno u Laboratoriji za gasnu elektroniku Instituta za fiziku u Beogradu. Plazma mlaz koji je korišćen u ovom radu je dielektrično barijerne prirode i kao radni gas koristi helijum. Elektrodni sistem plazma mlaza se napaja pomoću visokog napona sinusnog oblika. Frekvencija na kojoj su urađena sva merenja je 80 kHz. Za dijagnostiku plazma mlaza su korišćene komercijalne naponske sonde i iCCD kamera velike osetljivosti. U ovom radu je detaljno ispitana vremenski razložena emisija svetlosti plazma mlaza za veliki broj različitih geometrija elektroda. Urađena je električna dijagnostika plazma mlaza i dobijene su snage, naponi, struje i impedanse pražnjenja.

Takođe je ispitana efikasnost plazme pri sterilizaciji *Methicillin*-rezistentne *Staphylococcus aureus* (MRSA) i uticaj na DNK (*Dezoksiribonukleinska kiselina*) bakterije. Na osnovu dobijenih rezultata pokazano je da plazma mlaz dovodi do sterilizacije površine na kojoj su zasejane bakterije. Veličina sterilisane površine zavisi od parametara tretmana i može da bude od 1 mm do 15 mm u prečniku. Takođe, ovaj plazma mlaz je korišćen za sterilizaciju bakterija koje se nalaze u obliku biofilma i zaključeno je da se posle tretmana plazmom količina bakterija u uzorku značajno smanjuje. Mogućnost primene plazma mlazeva u sterilizaciji termalno osetljivih uzoraka (posebno tkiva i kože) od bakterija koje su razvile otpornost na većinu antibiotika je od velikog značaja za razvoj novih terapija u budućnosti.

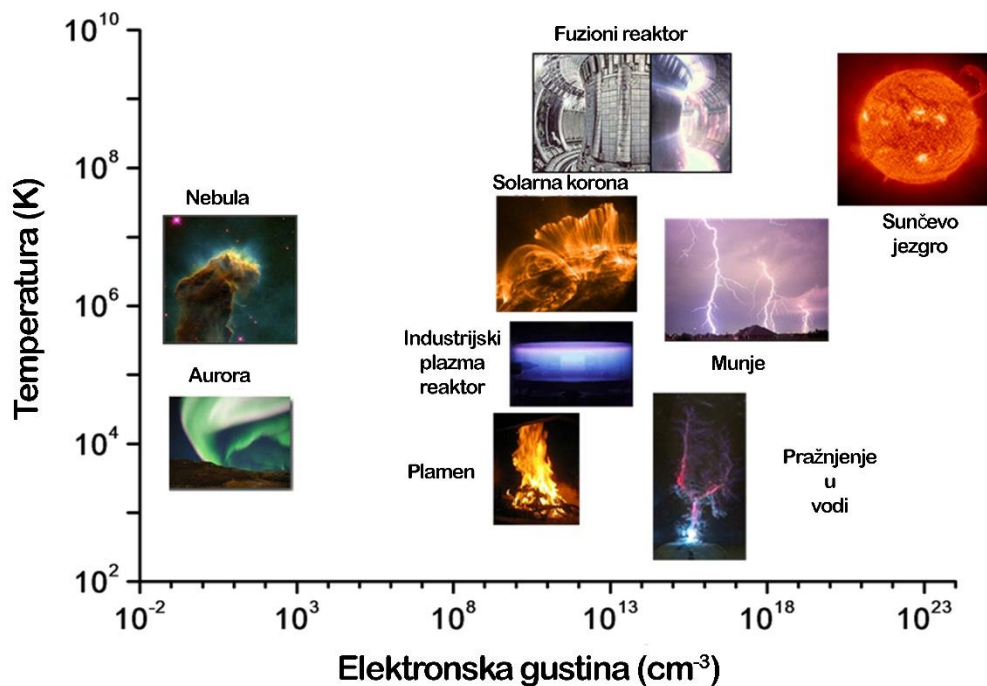
1.1. Plazma

Plazma je jonizovani gas, četvrto agregatno stanje materije. Pored neutralnih atoma i molekula plazma sadrži i veliki broj slobodnih elektrona i pozitivnih jona. Iako u plazmi postoje naelektrisane čestice, u mnogim slučajevima plazma je kao celina elektroneutralna. Iako se u plazmi nalaze naelektrisane čestice, plazma kao celina je elektroneutralna. Kao i kod gasova, stanje plazme je određeno srednjim energijama čestica (neutralnih i naelektrisanih) od kojih je plazma sastavljena i njihovim stepenima slobode (translacionim, rotacionim, vibracionim i elektronskim). Zbog složenog sastava i velike razlike u masi između elektrona i teških čestica (jona i neutrala) mogu se definisati i različite temperature čestica: T_e (temperatura elektrona), T_j (temperatura jona) i T_g (temperatura gasa). Plazme se mogu klasifikovati prema stepenu jonizacije na vruće (potpuno jonizovane), jako jonizovane i slabo jonizovane. U gasu stanje plazme može da se ostvari električnom, termalnom i optičkom jonizacijom neutralnih molekula gasa. Plazma se u laboratoriji najčešće dobija primenom električnog polja, kojim se energija prenosi prvo na elektrone a zatim postepeno sa elektrona na teške čestice u elastičnim i neelastičnim sudarima. Većina plazmi od praktičnog značaja imaju elektronske temperature 1-20 eV (10000 do 250000K) i elektronske gustine 10^6 cm^{-3} do 10^{18} cm^{-3} .

U plazmi ne moraju sve čestice biti jonizovane, pa je u najvećem broju slučajeva plazma samo delimično jonizovana. Jonizacioni koeficijent, odnosno odnos broja naelektrisanih i neutralnih čestica se obično kreće od 10^{-7} do 10^{-4} . Kada se jonizacioni koeficijent približi jedinici dobijamo potpuno jonizovanu plazmu. Potpuno jonizovane plazme imaju najveću primenu u termonuklearnim sistemima kao sto su tokamaci, pinč plazme, stelatroni itd. Kada je jonizacioni koeficijent mali, plazma je slabo jonizovana i naš fokus će biti usmeren na ovakve plazme. Raspodela plazmi prema elektronskim gustinama i temperaturama data je na slici 1.1.

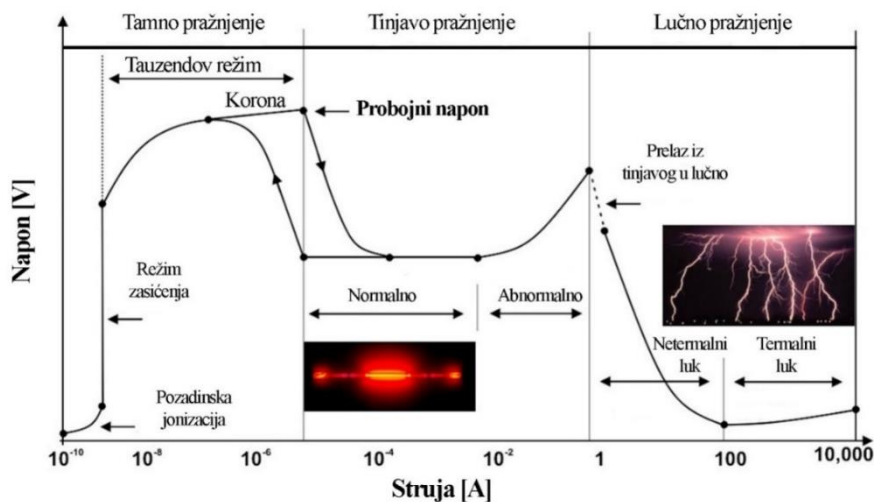
Stabilna gasna pražnjenja se mogu podeliti prema strujnim opsezima na tri tipa:

- 1) Taunzendovo ili tamno pražnjenje sa strujom do 10^{-6} A
- 2) Tinjavo pražnjenje sa strujom od 10^{-6} A do 10^{-1} A
- 3) Lučno sa strujama preko 10^{-1} A



Slika 1.1. Tipovi plazmi prema temperaturama i elektronskim gustinama
(http://www.lpp.fr/IMG/gif/Te=f_ne_anglais-2.gif).

Taunzendovo pražnjenje se karakteriše time da je nesamostalno, ne može se održavati bez spoljašnjeg izvora jonizacije (X, UV ili kosmičkog zračenja). Ono se može detektovati preciznim merenjem struje a trenutak u kome struja poraste za nekoliko redova veličine naziva se probojna tačka, a napon na kome se dogodio proboj se naziva probojni napon (Slika 1.2.). Tada pražnjenje prelazi iz nesamostalnog u samostalni režim i može biti tinjavo ili lučno u zavisnosti od datih uslova, pritiska, rastojanja između elektroda, gasa itd. Gas počinje da emituje fotone u vidljivom delu spektra. Tinjavo pražnjenje teži da pređe u lučno pražnjenje ako se ili pritisak ili struja povećaju. Ovaj prelaz se dešava iznenada i nije ga uvek moguće predvideti (Raizer, 1991; Francis F. Chen, 2002; Fridman, 2008; Makabe and Petrović, 2015).

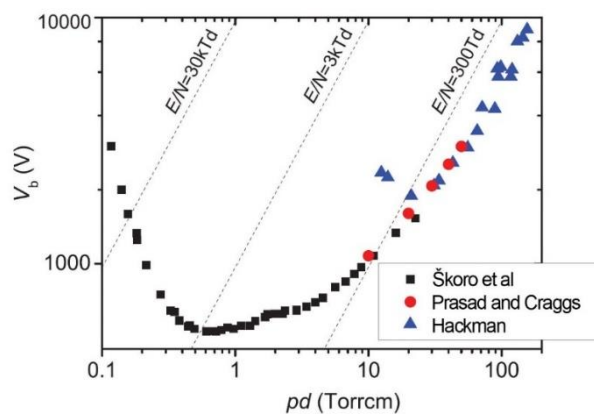


Slika 1.2. Tausendove oblasti pražnjenja (http://www.plasma-universe.com/images/thumb/f/f2/Glow_D.jpg/600px-Glow_D.jpg).

Proboj u gasovima je proučavao Friedrich Paschen i došao do uslova za probojni napon u gasu. Probojni napon se može opisati jednačinom (1.1.):

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (1.1.)$$

Gde je V_B probojni napon, p pritisak, d međuelektrodno rastojanje, γ koeficijent sekundarne emisije, A je saturacioni koeficijent emisije, a B je koeficijent koji je povezan sa ekscitacionim i jonizacionim energijama. Koeficijenti A i B se određuju eksperimentalno. Primer Pašenove krive je dat na slici ispod za proboj u vodenoj pari (Slika 1.3.). Sa slike se vidi da probojni napon ima minimum.



Slika 1.3. Pašenova kriva za proboj u vodenoj pari (Škoro *et al.*, 2011).

1.2. Neravnotežne niskotemperaturne plazme

Neravnotežne plazme privlače sve veću pažnju zbog svojih specifičnih osobina, velike hemijske reaktivnosti i relativno niske temperature teških čestica. Definišimo sada niskotemperaturne plazme kao jako i slabo jonizovane plazme kod kojih su individualne osobine teških čestica ključne za opisivanje plazme. Domen niskotemperaturnih plazmi je ograničen na energije teških čestica. Do sada su neravnotežne plazme primenjivane u mnogim industrijskim procesima: proizvodnji čipova, obradi tekstila, optici, aeronautici, tretmanu implantanata i bioloških uzoraka. Kada se kaže hladne plazme misli se pre svega na temperature koje su za više redova veličine niže od temperatura elektrona. Temperatura hladnih plazmi se kreće od sobne do stotinak stepeni Celzijusa. U zavisnosti od primene biraćemo tip plazme i njene parametre. Na primer za nanošenje tankih filmova na supstrat mogu se koristiti plazme nešto viših temperatura, dok u slučaju tretmana bioloških uzoraka ova temperatura ne sme preći četrdesetak stepeni Celzijusa da ne bi došlo do odumiranja tretiranih ćelija. Većina plazma tehnologija se zasniva na uticaju reaktivnih čestica iz plazme na površinu, dok materijal ispod površinskog sloja ostaje netaknut. Ove plazme se dobijaju sudarnom jonizacijom slobodnim elektronima koji se ubrzavaju spoljašnjim električnim poljem. One imaju osobinu da je temperatura elektrona mnogo veća od temperature neutralnog gasa i jona $T_e \gg T_j \approx T_g$. Niskotemperaturne plazme mogu da budu dimenzija od nekoliko mikrometara pa sve do nekoliko metara. Komore za generisanje plazme mogu da budu sa ili bez elektroda, dok su električni naponi kojima se održava pražnjenje od jednosmernog do nekoliko gigaherca.

Na površinske procese u plazmi najviše utiču sledeći faktori: reaktivne vrste koje se približavaju površini, njihovi fluksevi i energije. Raspodele energija i njihova kontrola su presudni za reakcije plazme na površinama. Energije elektrona se najlakše kontrolišu brzim promenama električnog polja a energije jona sporim, pa su zato konstruisani reaktori koji koriste napajanja sa dve frekvencije (Makabe and Petrović, 2015). Energije neutralnih čestica se mogu kontrolisati promenom temperature gasa i kontrolom energija jona. Od vrste jona koji padaju na površinu i njihove energije zavise i promene koje se dešavaju na granici između plazme i površine (engl. *Sheath*). Osobine ove granice su od velike važnosti pri tretmanu površina a posebno u tretmanu izolatora.

1.3. Jonizacioni talasi i strimeri

Električni fenomeni pražnjenja u dielektričnim medijumima (gasovima, tečnostima i čvrstim supstancama) često su praćeni pojavom i prostiranjem jonizacionih talasa, čiji se svetleći jonizacioni front prostire velikom brzinom, tipično $10^5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ - $10^9 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Jonizacioni talasi su ključni element u periodu pre samog pražnjenja, pojavljuju se kod korona, dielektričnih barijernih pražnjenja, atmosferskih plazma mlazeva, varnica i munja. Jonizacioni talasi mogu imati različite oblike, mogu biti skoro potpuno ravni kada se kreću po površini dielektrika ili sfernog oblika pri formiranju strimera.

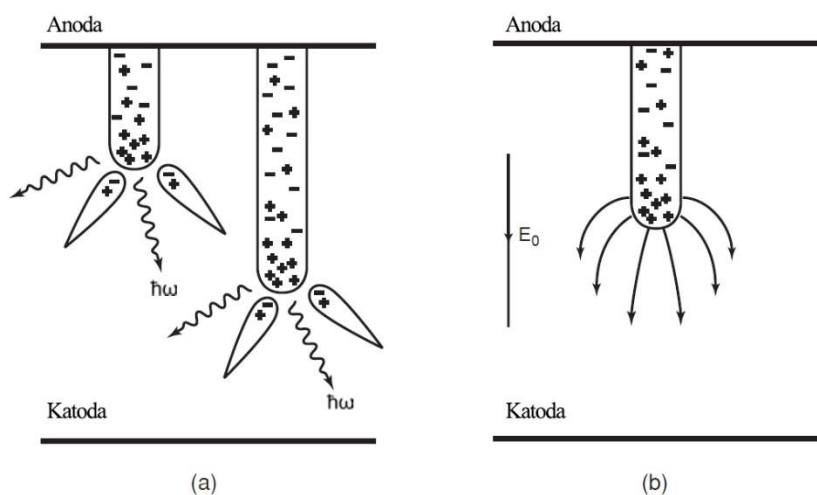
Prilikom prostiranja jonizacionog talasa, naelektrisane čestice (joni i elektroni) se proizvode jonizacijom atoma i molekula medijuma udarom elektrona u lokalizovanoj oblasti sa povećanim električnim poljem – front talasa. Vrednost pojačanog električnog polja na frontu talasa određena je gustinom zapreminskih naelektrisanja formiranih samim jonizacionim talasom i može značajno da premaši vrednost primenjenog spoljašnjeg polja.

Jonizacioni talasi imaju sposobnost da proizvedu jako električno polje na frontu talasa i jonizuju medijum kroz koji se prostiru. Električno polje koje nastaje na frontu talasa im omogućava prostiranje u oblasti slabog električnog polja kada napuste zonu elektroda. Jačina električnog polja opada sa rastojanjem kako se udaljavamo od napajane elektrode unutar staklene kapilare, dok polje raste kada strimer izađe iz cevčice i počne da se udaljava od zone glavnog pražnjenja (Sretenović *et al.*, 2017). Zbog ove osobine moguća su električna pražnjenja sa nehomogenim električnim poljem, kao što su šiljak – ravan pražnjenje (engl. *Point to Plane*). Strimer se formira u oblasti šiljka i prostire ka suprotnoj elektrodi, formirajući tanak provodni kanal.

U zavisnosti od smera prostiranja, odnosno naelektrisanja, strimeri se dele na pozitivne i negativne. Kada nastane jaka primarna lavina ona pojačava električno polje i formira strimer. Strimerski kanal je povezan sa elektrodom, a struja u nekom trenutku može značajno porasti i formirati varnicu. Prelaz između lavine i strimera je moguć kada je unutrašnje polje lavine uporedivo sa spoljašnjim električnim poljem. Ako je međuelektrodno rastojanje malo, ova promena se događa kada lavina stigne do anode. Strimeri koji se prostiru od anode ka katodi se nazivaju katodno usmereni ili pozitivni

strimeri. Ukoliko su napon i međuelektrodno rastojanje veliki može doći do formiranja strimera daleko od anode i formiranja anodno usmerenog ili negativnog strimera koji se prostire ka obe elektrode.

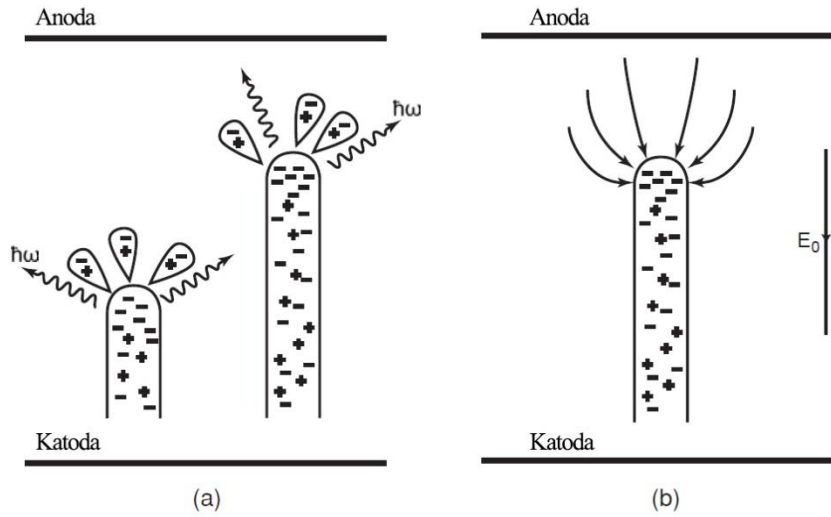
Mehanizam formiranja katodno usmerenog strimera prikazan je na slici 1.4. Visoko energijski fotoni emitovani iz primarne lavine omogućavaju fotojonizaciju između elektroda kojom započinju sekundarne lavine. Elektroni sekundarnih lavina su povučeni u jonizacioni trag primarne lavine i formiraju kvazi neutralni plazma kanal. Katodno usmereni strimeri se formiraju u blizini anode, gde je pozitivno naelektrisanje i električno polje koje potiče od primarne lavine najviše. Strimer liči na tanku provodnu iglu koja raste od anode. Električno polje na vrhu „anodne igle“ je veoma visoko. Ovo polje obezbeđuje visoke brzine drifta elektrona i samog strimera, oko $10^8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dijametar strimerskog kanala je 0.01 cm -0.1 cm i odgovara maksimalnoj veličini primarne lavinske glave, $1/\alpha$ (α je broj sekundarnih elektrona proizvedenih po jedinici puta od strane primarnog elektrona). Gustina plazme takođe odgovara maksimalnoj elektronskoj gustini primarne lavine: 10^{12} cm^{-3} - 10^{13} cm^{-3} . Energija koja se ubacuje u strimer je mala za vreme rasta strimera ($\sim 30 \text{ ns}$), u molekularnim gasovima je oko 10^{-3} eV/mol , što odgovara grejanju od $\sim 10 \text{ K}$ (Raizer, 1991).



Slika 1.4. Ilustracija katodnog (pozitivnog) strimera: a) prostiranje strimera; b) električno polje blizu glave strimera (Raizer, 1991).

Anodno usmereni strimer se pojavljuje ako primarna lavina postane jaka pre nego što stigne do anode. Ovakav strimer raste u dva pravca i prikazan je na slici 1.5.

Mehanizam kretanja strimera u pravcu katode je isti kao i kod pozitivnog strimera, a mehanizam kretanja strimera u pravcu anode je sličan, ali u ovom slučaju elektroni koji potiču od primarne lavine neutralizuju jonski rep sekundarnih lavina. Sekundarne lavine mogu da započnu ne samo fotonima već i elektronima koji se kreću ispred primarne lavine.



Slika 1.5. Ilustracija anodnog (negativnog) strimera: a) prostiranje strimera; b) električno polje blizu glave strimera (Raizer, 1991).

Strimer se pojavljuje kada je električno polje prostornog naelektrisanja u lavini, E_a , jednako spoljašnjem električnom polju E_0 (Meek-ov kriterijum formiranja strimera):

$$E_a = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r_A^2} \exp\left[\alpha\left(\frac{E_0}{p}\right) \cdot d\right] \approx E_0 \quad (1.2.)$$

Pretpostavljajući da je radijus glave lavine $r_a \approx 1/\alpha$, formiranje strimera u međuelektrodnom rastojanju (d) može biti predstavljen kao uslov da parametar za pojačanje lavine αd pređe kritičnu vrednost:

$$\alpha\left(\frac{E_0}{p}\right) \cdot d = \ln \frac{4\pi\epsilon_0 E_0}{e\alpha^2} \approx 20, \quad N_e = \exp(\alpha d) \approx 3 \cdot 10^8. \quad (1.3.)$$

Ovaj kriterijum formiranja strimera je poznat kao Meek-ov probojni uslov ($\alpha d \geq 20$).

Minimalno električno polje potrebno za formiranje strimera iznosi 26 kV/cm za vazduh. Ukoliko postoji neuniformnost polja ona može značajno uticati na probojne uslove i prelaz iz lavine u strimer. Napon primenjen neuniformno obezbeđuje intenzivnu

multiplikaciju elektrona u blizini elektrode i nastaje strimer. Kada nastane plazma kanal on raste zbog jakog električnog polja same glave strimera. U slučaju veoma dugačkih neuniformnih sistema srednje električno polje za proboj je 2 kV/cm -5 kV/cm. Prag za proboj kod neuniformnih električnih polja zavisi od polariteta, pa je na primer prag u slučaju negativno naelektrisane šipke oko dva puta veći nego za pozitivno naelektrisanu šipku (Fridman, 2008).

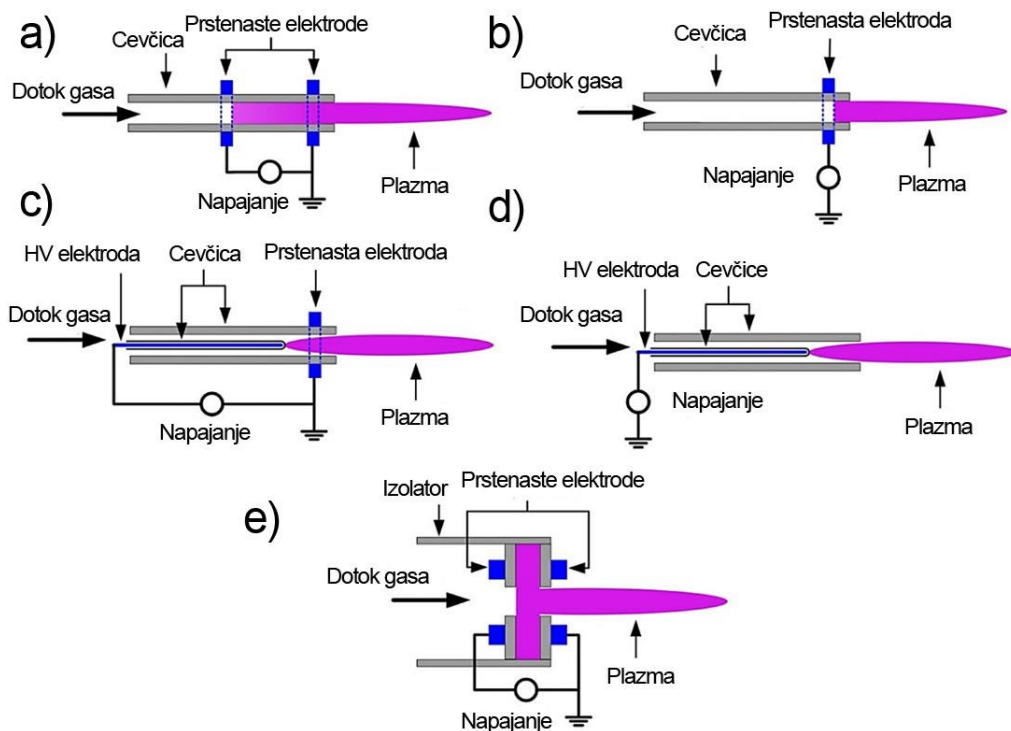
1.4. Vođeni jonizacioni talasi - plazma mlazevi

U prirodi i u mnogim laboratorijskim eksperimentima, jonizacioni talasi se slobodno prostiru kroz prostor. Međutim, moguće je obezbediti uslove kada se jonizacioni talasi kreću vođeni duž puta koji je definisan na primer laserskim zrakom ili stubom nekog inertnog gasa. Još jedan primer su brzi jonizacioni talasi na niskom pritisku koji se kreću u unutrašnjosti dielektričnih cevčica. Specifična forma jonizacionih talasa je otkrivena u eksperimentima sa plazma mlazevima na atmosferskom pritisku (engl. *Atmospheric Pressure Plasma Jets – APPJ*) koji se formiraju u dielektričnim barijernim pražnjenjima plemenitih gasova (argon ili helijum) u tankim dielektričnim cevčicama i injektuju u ambijentalni vazduh. Atmosferski niskotemperaturni plazma mlazevi (engl. *Plasma jets*) privlače sve veću pažnju zbog svojih specifičnih fizičkih i hemijskih osobina. Najvažnije osobine ovih plazma mlazeva su jednostavnost njihove izrade, rad na atmosferskom pritisku i produkcija velikih koncentracija reaktivnih hemijskih vrsta u plazmi. Plazma mlazevi se sastoje od cevčice kroz koju prolazi radni gas i jedne ili više elektroda. Radni gasovi koji se koriste su najčešće plemeniti gasovi kao što su helijum (Oh, Walsh and Bradley, 2012) i argon (Reuter, Winter, Iseni, Peters, a Schmidt-Bleker, *et al.*, 2012), a upotrebljavani su i drugi na primer neon (Robert *et al.*, 2014) i kripton (Li *et al.*, 2010). Pored čistih plemenitih gasova korišćene su i smeše plemenitog i nekog molekularnog gasa, najčešće azota, kiseonika ili metana u malim procentima (oko 1-2%), kako bi se povećale koncentracije pojedinih reaktivnih hemijskih vrsta koji su neophodne za primenu u tretmanima. Upotreba čistog molekularnog gasa, azota ili kiseonika je korišćena kod plazma mlazeva kod kojih je napajana elektroda u kontaktu sa radnim gasom, što omogućava proboj na nižim naponima. Uklanjanjem dielektrika dobijaju se veća polja i nemamo dielektričnu barijeru, pa čestice koje udaraju u površinu metalne elektrode mogu izbijati nove elektrone koji dalje učestvuju u pražnjenju. Sa druge strane,

uklanjanje dielektrika i povećanje napona može da dovede do formiranja strimera kao do lakog prelaska u lučno pražnjenje. Kod ovakvih geometrija je potrebno posebno obratiti pažnju na uslove rada. Reaktivne vrste koje se formiraju u plazmi su NO, O₃, atomski kiseonik (O[•]), azot (N[•]) (Maletić *et al.*, 2012) i joni He⁺, HeH⁺, N⁺, O⁺, OH⁺, N₂⁺ i O₂⁺ (Oh, Aranda-Gonzalvo and Bradley, 2011). Od koncentracija i sastava reaktivnih vrsta zavisi i kakav ćemo efekat postići prilikom interakcije plazme sa tretiranom površinom.

Plazma mlazevi se mogu podeliti na više podkategorija, prema tipu elektroda i prema vrsti električne pobude. Elektrode se prave od metala ili plastične folije sa naparenim provodnim slojem i mogu da budu cilindrične, prstenaste, cevaste ili u obliku igle (Slika 1.6.) (Lu, Laroussi and Puech, 2012).

Elektrode mogu biti izolovane ili neizolovane od radnog gasa. Za električnu pobudu se koriste različiti tipovi visokonaponskih signala, jednosmerni (Dudek *et al.*, 2007), impulsni (Karakas, Akman and Laroussi, 2012a; Wu *et al.*, 2012) i sinusoidni (Reuter, Winter, Iseni, Peters, A. Schmidt-Bleker, *et al.*, 2012; Guaitella and Sobota, 2015; Kim *et al.*, 2015; Maletić *et al.*, 2015). Kod jednosmerne i impulsne pobude zadati potencijali mogu da budu pozitivni ili negativni, a kod sinusne pobude koriste se frekvencije od nekoliko kHz do nekoliko GHz. Da bi snaga predata plazmi bila reda nekoliko vati, struja kroz plazmu se ograničava kolom za napajanje. Ograničavanje struje se najčešće postiže dodavanjem otpornika u uzemljenoj grani kola, ali i sama plazma svojom kompleksnom impedansom ograničava struju u kolu. Zbog male snage predate plazmi i zbog stalnog proticanja radnog gasa dolazi do minimalnog porasta temperature i ona obično ne prelazi 40°C. Niska temperatura radnog gasa i velike koncentracije reaktivnih hemijskih vrsta su najbitnije osobine za primenu atmosferskih plazmi u tretmanima termalno osetljivih uzoraka kao što su biološki uzorci, polimeri, organske boje, nano cevi, grafen i drugi. Biološke primene su postale toliko popularne da je cela jedna oblast fizike plazme posvećena primenama plazme u medicini tzv. "plazma medicina" (Fridman, 2008).



Slika 1.6. Različiti tipovi plazma mlazeva (Lu, Laroussi and Puech, 2012).

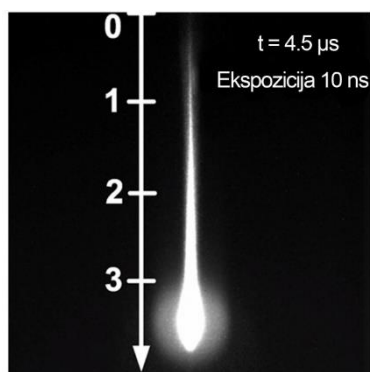
U početku su plazma paketi u plazma mlazevima nazivani „plazma mecima“ (engl. *Plasma Bullet*), ali je kasnije naziv promenjen kada se došlo do saznanja da se radi o pulsним strimerima na atmosferskom pritisku PAPS (engl. *Pulsed Atmospheric Pressure Streamers*) (Robert *et al.*, 2012; Fridman, 2013; Gherardi *et al.*, 2015). Mehanizam prostiranja PAPS-a duž plazma mlaza sličan je kao i prostiranje strimera u slobodnom (uniformnom) prostoru, uz dve specifične osobine koje ih izdvajaju od standardnih strimera. Prva je to što unutar plazma mlaza dolazi do mešanja gasa sa okolnim vazduhom, PAPS se kreće kroz gas koji je jako neuniforman kako aksijalno, tako i radialno postoje gradijenti koncentracije radnog gasa i vazduha. Zbog ove neuniformnosti, struktura PAPS-a se razlikuje od strukture strimera u homogenom medijumu. Još jedna razlika je to što za razliku od strimera koji se kreću u uniformnom prostoru stohastično i često granaju, PAPS je vođen predefinisanom putanjom duž ose plazma mlaza, jer je tu koncentracija radnog gasa najveća kroz koji je prostiranje plazme lakše.

1.5. Važne osobine plazma mlazeva

Plazma mlazevi privlače veliku pažnju istraživača zbog specifičnih osobina. Neke od bitnih karakteristika plazma mlazeva su: kretanje plazma mlaza po zidovima cevčice u zoni elektroda, pojava PAPS-a, osobine kanala iza glave PAPS-a, interakcija plazma mlaza sa površinama.

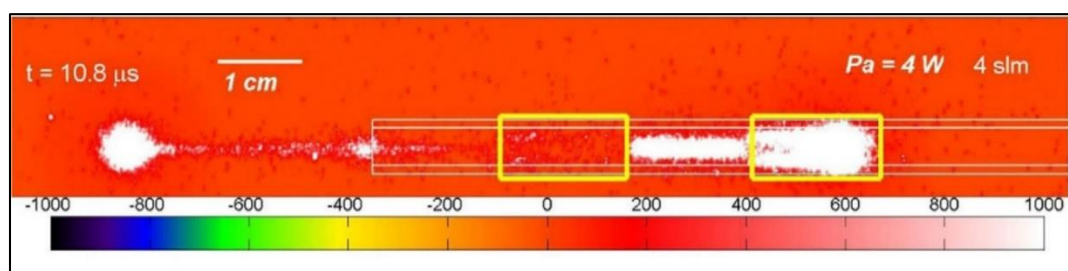
Jedan od razloga zbog kojih je dinamika plazma mlazeva privukla toliko mnogo pažnje je to što je kanal između elektrode i glave brzog jonizacionog fronta taman, odnosno mnogo manjeg inteziteta u odnosu na glavu plazma mlaza. U početku nije bilo poznato da li se PAPS kreće sam pod uticajem električnog polja indukovano naelektrisanjem u glavi strimera ili spoljašnje električno polje igra značajnu ulogu u njegovom prostiranju. Zato nije jasno da li tamni kanal treba tretirati kao izolator, provodnik ili ni jedno ni drugo (Lu *et al.*, 2014). U slučaju da je tamni kanal izolator, onda na PAPS koji se kreće daleko od elektrode i formira tamni kanal, uklanjanjem spoljašnjeg električnog polja ne bi trebalo da ima uticaja. Da bi se ovo potvrdilo plazma mlaz je napajan pulsним jednosmernim naponom sa različitim širinama pulsa i konstantne frekvencije od 500 Hz primenjenog napona. Tamni kanal dužine više od 2 cm je formiran između PAPS-a i napajane visokonaponske elektrode. Dužina plazma mlaza se povećavala sa oko 3 cm na preko 6 cm, sa povećanjem širine impulsa sa 500 ns na 1000 ns (Lu *et al.*, 2008). Može se zaključiti da je tamni kanal više provodan nego izolatorski. Ovo su takođe potvrdili i Karakas et al (Karakas and Laroussi, 2010; Karakas, Akman and Laroussi, 2012b). U njihovim eksperimentima, za napajanje plazma mlaza korišćeno je impulsno DC napajanje. Nađeno je da se sekundarno pražnjenje formira na silaznoj ivici primenjenog impulsa, inhibirajući prostiranje plazma metka. Ovo ukazuje na postojanje jonizacionog kanala između visokonaponske elektrode i PAPS-a.

Da bi ispitali da li tamni kanal između otvora cevčice plazma mlaza i plazma metka emituje svetlost ili ne, Shashurin et al. (Shashurin, Shneider and Keidar, 2012) su napravili vemenski razložene snimke PAPS-a. Ekspozicija koju su koristili je bila 100 ns i prikazani snimak je napravljen u vremenskom trenutku 4.5 μ s na oko 4 cm od mlaznice (Slika 1.7.) napravljen sa akumulacijom od oko 500 pojedinačnih snimaka.



Slika 1.7. Glava plazma mlaza, akumulacija 500 snimaka plazma strimera u trenutku $t=4.5 \mu\text{s}$ posle glavnog proboja, vreme ekspozicije je 100 ns, UHV=3.1 kV (Lu et al., 2014).

Kao što je prikazano na slici 1.7. glava plazme je povezana sa mlaznicom plazma kanalom koji emituje relativno slabu svetlost. Ovo ukazuje na prisustvo stuba plazme iza glave strimera, glave strimera je u električnoj sprezi sa glavnim pražnjenjem. Rezultati ukazuju da tamni kanal i nije potpuno „taman“, već emituje mnogo manje svetlosti u poređenju sa PAPS-om. Akumuliranjem snimaka ipak možemo videti merljivu emisiju svetlosti.



Slika 1.8. iCCD snimak plazma mlaza.

Slične rezultate su dobili Gherardi i saradnici, a rezultati su prikazani na slici 1.8. su (Gherardi *et al.*, 2015). Na slici se jasno može primetiti da je plazma u plazma mlazu spojena u jednu celinu od glave strimera, preko kanala plazme do elektrodnih zona. Kanal koji spaja glavu strimera je veoma slabog intenziteta.

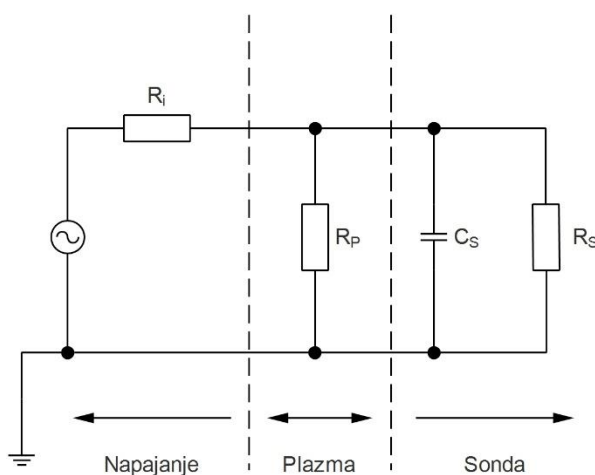
1.6. Dijagnostičke metode za ispitivanje plazma mlazeva

Električna merenja

Merenje električnih parametara plazme je jedna od osnovnih i najzastupljenijih dijagnostičkih metoda. Električna karakterizacija se obavlja korišćenjem naponskih i strujnih sondi.

Merenje napona

Merenje napona električnih pražnjenja se vrši pomoću naponske sonde i osciloskopa. Naponska sonda se dovodi u fizički i električni kontakt sa elektrodom i zajedno sa osciloskopom formira merni sistem za merenje napona pražnjenja. Merni sistem se može prikazati ekvivalentnim električnim kolom (Slika 1.9.). Otpor sonde R_s koji se nalazi u paraleli sa kapacitivnošću vrha sonde C_s kada se sonda spoji u kolo. Idealna sonda bi bila ona koja bi imala beskonačno veliku impedansu, pa tako električna struja uopšte ne bi proticala kroz nju i dobili bismo pravu vrednost pada napona na plazmi R_p .



Slika 1.9. Ekvivalentno kolo pri merenju napona plazme.

Međutim, zbog postojanja realnih vrednosti R_s i C_s , merena vrednost se razlikuje od stvarne vrednosti napona.



Slika 1.10. Visokonaponska naponska sonda Agilent N2771B

(http://www.hensleytech.com/sites/default/files/imagecache/product_full/N2771B_Probe.jpg).

Za naizmeničnu struju visokih frekvencija reaktansa vrha sonde teži maloj vrednosti i više struje protiče kroz sondu. Zato je preporučljivo koristiti sonde sa visokom otpornošću i malom kapacitivnošću. Kapacitivnost sonde određuje njen propusni opseg.

Propusni opsezi sonde i osciloskopa određuju i propusni opseg mernog sistema. Visokonaponska komercijalna sonda je prikazana na slici 1.10.

Merenje struje

Merenje struje može da se izvrši na dva načina, postavljanjem otpornika u električno kolo na kome će se meriti pad napona pomoću naponske sonde ili korišćenjem strujne sonde. Kada se koristi otpornik imamo ograničenje da pad napona mora biti dovoljno velik da bi bio merljiv pomoću naponske sonde a da pri tome veoma malo utiče na formiranje plazme. Kod korišćenja strujne sonde, ona se ponaša kao transformator, odnosno pretvara struju koja prolazi kroz vod u napon, znatno je preciznija i pogodna je za merenje malih struja. Strujna sonda je kalibrisana i određeni napon na njoj odgovara struji. Nekoliko tipova i veličina komercijalnih strujnih sondi je prikazano na slici 1.11.



Slika 1.11. Strujne sonde (http://www.encyclopedia-magnetica.com/lib/exe/fetch.php/pearson_family_ct.jpg).

Snimanje brzim kamerama (engl. iCCD imaging)

Formiranje plazme i njeno prostiranje u prostoru je veoma brz proces koji se može jedino posmatrati kamerama koje imaju ekspozicije reda nekoliko ns. Još jedna bitna stvar je i veoma mali intenzitet emisije svetlosti koji dolazi iz plazme, pa je potrebno da kamera bude velike osetljivosti. Ove karakteristike ne mogu da ispune standardne digitalne kamere koje se koriste za pravljenje fotografija jer je kod njih najkraća ekspozicija 1/8000 s, a osetljivost veoma mala. Zbog toga su u poslednjih desetak godina razvijene laboratorijske kamere koje zadovoljavaju ove kriterijume (Slika 1.12.). One koriste standardni CCD senzor koji se hladi do niskih temperatura kako bi se smanjio šum. Svetlosni signal se pomoću fotokatode prevodi u elektrone i pojačava pomoću mikrokanalnog pojačavača a potom ponovo konvertuje u fotone koji se detektuju na CCD senzoru. Da bi se dobile veoma kratke ekspozicije koriste se naponi kojima se otvara ili zatvara prolaz elektrona kroz pojačavač.



Slika 1.12. Brza iCCD kamera Andor iStar

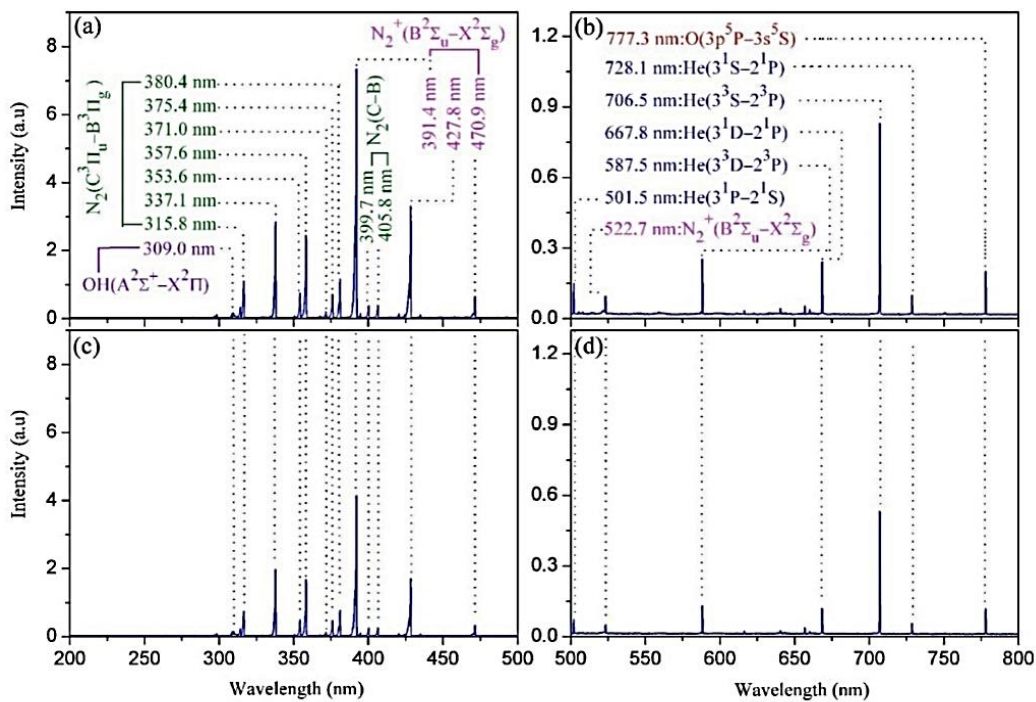
(http://www.andor.com/UploadImages/ImageGallery/Web/330ce124-af41-4310-9317-8de91d73bae4_web.jpg).

Ovim kamerama je analiziran veliki broj plazma mlazeva (Walsh, Shi and Kong, 2006; Topala and Dumitrascu, 2011; Puač *et al.*, 2012; Yonemori and Ono, 2014), dielektričnih barijernih pražnjenja (Dumitrascu, Topala and Popa, 2005; Teschke *et al.*,

2005; Yang *et al.*, 2012), korona pražnjenja (Skalny *et al.*, 2008; Shirai *et al.*, 2009), klizajući luk (engl. *gliding arc*) (Kim *et al.*, 2011) i drugi. Detaljan opis kamere, korišćene u našim eksperimentima, će biti dat u poglavlju o eksperimentalnoj postavci.

Optička spektroskopija plazme

Optička emisiona spektroskopija je metoda koja se koristi za dijagnostiku plazme, posmatranjem intenziteta zračenja svetlosti u funkciji talasne dužine. Najzastupljenije su dve vrste spektroskopije: emisiona i apsorpciona. Emisionom spektroskopijom posmatramo zračenje koje se emituje iz plazme od strane pobuđenih čestica a apsorpcionom spektroskopijom posmatramo slabljenje intenziteta zračenja koje prolazi kroz plazmu. Spektroskopijom je moguće kvalitativno i kvantitativno odrediti sastav plazme, temperaturu radnog gasa, energije i koncentracije elektrona i jačinu električnog polja. Sretenović i saradnici su merili jačinu električnog polja u plazma mlazu korišćenjem Štarkove polarizacione spektroskopije (Sretenović *et al.*, 2011; Sretenović *et al.*, 2014, 2017). Velika prednost spektroskopije u odnosu na druge dijagnostičke metode je to da ona ne remeti pražnjenje.

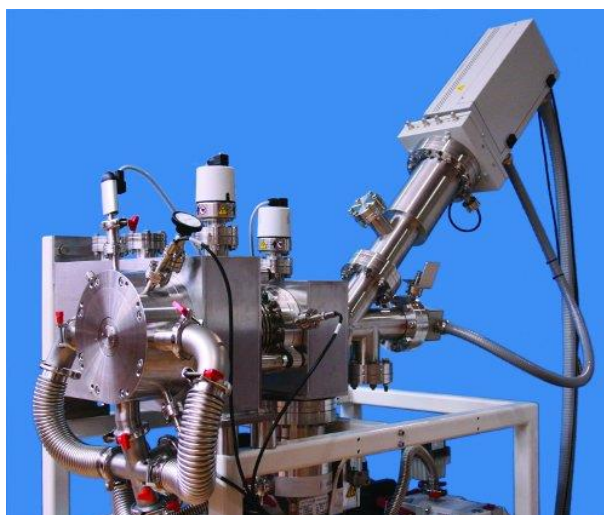


Slika 1.13. Tipičan emisioni spektar plazma mlaza (Xiong *et al.*, 2010).

Slika 1.13. prikazuje tipičan spektar helijumskog plazma mlaza sa označenim maksimumima intenziteta zračenja koji odgovaraju pobuđenim atomima helijuma, kiseonika, trakama molekuskog i jonskog azota, kao i trakama hidroksilne grupe. Ukoliko se koristi spektrometar visoke rezolucije moguće je odrediti rotacione i vibracione temperature molekula (npr. azota).

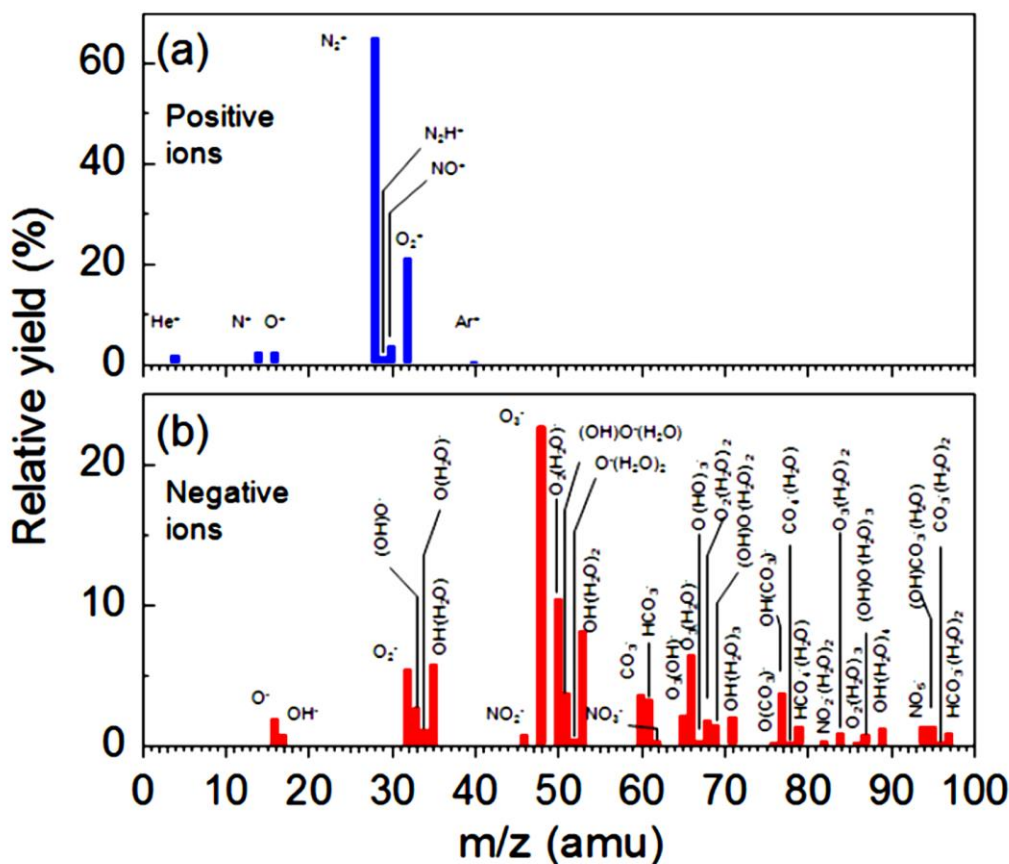
Masena spektrometrija

Masena spektrometrija je dijagnostička metoda koja se koristi za analizu najrazličitijih uzoraka. Zasniva se na prevođenju molekula uzorka prvo u gasovito a zatim iz gasovitog u jonizovano stanje. Razdvajanje jona se vrši u analizatorskoj komori i može se izvršiti pomoću električnog i magnetnog polja, kao i merenjem vremena preleta. Posle prolaska kroz analizator joni ulaze u detektor koji je najčešće elektronski multiplikator i meri se struja jona. Da bi joni stigli do detektora komore kroz koje prolaze moraju biti na veoma niskom pritisku ($\sim 10^{-8}$ bar). Tipični maseni spektrometri nisu optimizovani za analizu plazme na atmosferskom pritisku već za uzorke u čvrstom, tečnom ili gasovitom stanju. Specijalni maseni spektrometar koji uzorkuje plazmu direktno sa atmosferskog pritiska konstruisan je u kompaniji Hiden (Slika 1.14.). Njegova specifičnost je što na prednjoj strani ima ravnu ploču na kojoj se nalazi mali otvor kroz koji prolaze produkti pražnjenja, oni formiraju snop čestica i pomoću trostepenog vakuumnog sistema dolaze do detektora na niskom pritisku.



Slika 1.14. Maseni spektrometar za dijagnostiku atmosferskih plazmi Hiden HPR-60 (<http://www.intech-group.ru/upload/iblock/55f/Hiden%20HPR-60%20MBMS-v3.jpg>).

Do sada su ovim sistemom analizirani razni tipovi dielektričnih pražnjenja, plazma igla, mikro atmosferski plazma mlaz (engl. *Micro Atmospheric Plasma Jet - μ APPJ*) i nekoliko tipova plazma mlazeva. Masenim spektrometrom mogu se detektovati neutrali, pozitivni i negativni joni. Tipičan maseni spektar za pozitivne i negativne jone u plazma mlazu je prikazan na slici 1.15.

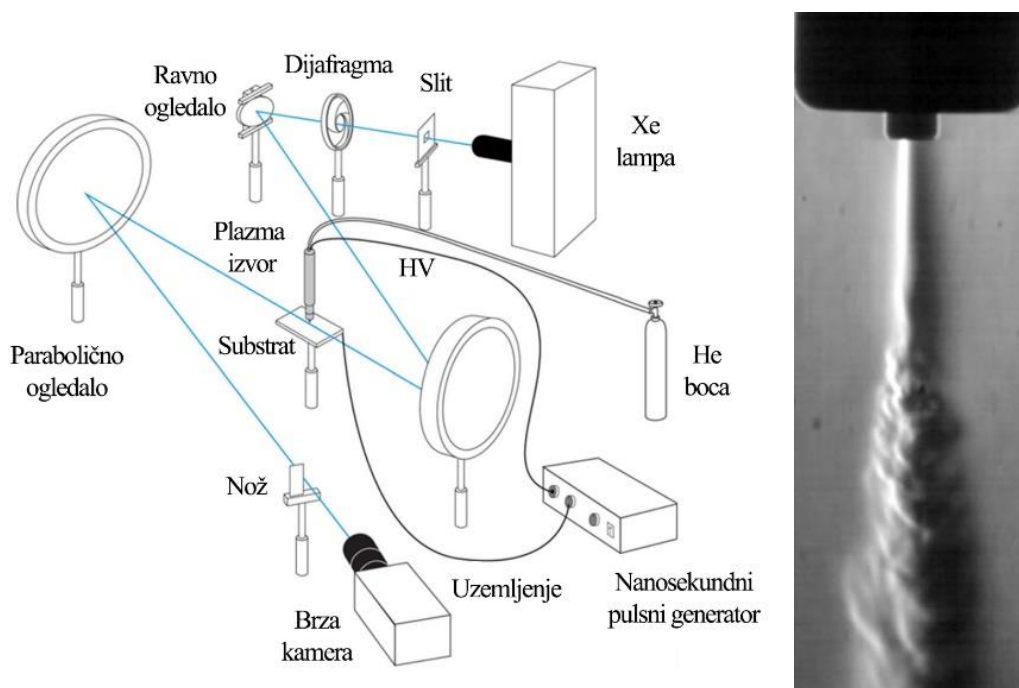


Slika 1.15. Spektar pozitivnih i negativnih jona plazma mlaza rastojanje od 7 mm plazma mlaza od masenog spektrometra, frekvenciju 10 kHz, napon 8 kVpp i protok helijuma od 1.38 slm (Oh, Aranda-Gonzalvo and Bradley, 2011).

Šlirenova fotografija

Šlirenova fotografija je još jedna od tehnika koja se može primeniti u dijagnostici atmosferskih pražnjenja. Ona se zasniva na snimanju fotografija kojima se beleže promene indeksa prelamanja fluida koji se posmatra. Njena prvobitna primena je bila ispitivanje kretanja vazduha koji se prostire oko nekog predmeta npr. krila aviona. Slika 1.16. prikazuje sa leve strane tipičnu eksperimentalnu postavku za snimanje Šlirenovih

fotografija plazma mlaza (levo) i Šlirenova fotografija (desno). Šlirenov sistem se sastoji od jakog tačkastog izvora svetlosti, razreza (slita), dijafragme, ogledala, dva parabolična ogledala, noža i kamere.



Slika 1.16. Shema eksperimentalne postavke levo, Šlirenova fotografija desno (Boselli *et al.*, 2014).

1.7. Primene atmosferskih plazma mlazeva

Do sada su vršena ispitivanja uticaja atmosferskih plazmi na bakterije, ćelije biljnog i životinjskog porekla, rane, kožu, zube, itd. Tretmane bakterija plazma iglom je vršila Eva Stoffels od 2002. godine (Stoffels *et al.*, 2002) i pokazala da plazma efikasno ubija bakterije pri kratkom izlaganju plazmi. U našoj laboratoriji plazma igla je modifikovana i primenjena na *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) i *Escherichia coli* (ATCC 25922). Pokazano je da se koncentracija bakterija smanji za nekoliko redova veličine posle tretmana (Lazović *et al.*, 2010; Maletić *et al.*, 2010). Plazma uglavnom deluje na bakterije tako što ih uništava pri kratkim ekspozicijama razaranjem membrane, bombardovanjem naelektrisanim česticama, uticajem radikala koji prodiru u ćeliju, toplotom i UV zračenjem. Uticaj plazme na ljudske ćelije je znatno slabiji zbog različite fiziologije ova dva tipa ćelija. Postoje i pozitivni efekti plazme na ćelije, posebno kod stem ćelija biljaka

– kalusa, gde posle tretmana plazmom dolazi do povećanja mase u odnosu na kontrolnu grupu (Puač *et al.*, 2006).

Primećeno je da se tretmanom ljudskih stem ćelija izolovanih iz zubnog tkiva, može pospešiti njihova diferencijacija a to može naći veliku primenu u novim metodama lečenja nekih oboljenja (Miletić *et al.*, 2013). U stomatologiji, plazma mlazevi su korišćeni u tretiranju *in vitro* kanala zuba pri čemu dolazi do sterilizacije kanala (Wang *et al.*, 2011) i za izbeljivanje zuba usled uticaja kafe i vina (Lee *et al.*, 2009, 2010). Atmosferske plazme imaju pozitivan efekat i u lečenju kožnih oboljenja (Heinlin *et al.*, 2010). Reaktivne vrste iz plazme sterilišu površinu kože, uklanjaju bakterije i gljivice i time omogućuju koži da se lakše i brže oporavi. Najupečatljiviji primer je tretman hroničnih rana kod dijabetičara, gde se stanje rane drastično popravlja nakon nekoliko ponovljenih tretmana (Fridman *et al.*, 2008). Kod tretiranja sveže rane dolazi do brže koagulacije krvi, formiranja kraste i zarastanja (Fridman *et al.*, 2008; Dobrynin *et al.*, 2011).

Još jedna oblast primene plazma mlazeva je proizvodnja i modifikacija nanomaterijala. Oni su korišćeni za proizvodnju nano tuba i ugljeničnih nano zidova (Lee *et al.*, 2008), kao i njihovu aktivaciju (Kolacyak *et al.*, 2011), aktivaciju površine polimera (Fricke *et al.*, 2011), nanošenje tankih filmova velike čistoće (Ito, Sakai and Tachibana, 2010). Tretiranjem rastvora nano tuba dolazi do aktivacije njihove površine i one ostaju uniformno dispergovane nekoliko nedelja za razliku od netretiranog rastvora gde dolazi do sedimentacije u roku od nekoliko sati (Kolacyak *et al.*, 2011). Pokazano je da se plazma mlazom mogu razgraditi azo-boje (koje su veliki zagađivači) na prostija organska jedinjenja, efikasnije i sa manjim utroškom energije u odnosu na klasične metode (Klavarioti, Mantzavinos and Kassinos, 2009; Huang *et al.*, 2010).

Da bi se rasvetlili svi mehanizmi kojima plazma utiče na tretirani uzorak ulažu se veliki naponi da se naprave detaljni kompjuterski i teorijski modeli koji bi mogli da opišu i predvide ponašanje plazme pri različitim uslovima. Naidis (Naidis, 2011) je predložio da se plazma mlazevi opisuju pomoću fluidnog modela strimera, uzimanjem u obzir samo najvažnijih reakcija. Pomoću ovog modela može se predvideti sastav plazme i oblik pražnjenja (koji je u slučaju negativnog pulsa konusan, dok je za pozitivni puls oblika plazma metka). Još jedan pokušaj opisivanja prostiranja plazme kroz uske kanale su uradili Z. Xiong i M. J Kushner (Xiong and Kushner, 2012). Oni su ispitivali brzine

prostiranja jonizacionih talasa kroz kapilaru i uticaj zakrivljenosti kanala na njihovu brzinu. W Van Gaens i A Bogaerts su u svoj nultu dimenzioni model ubacili veliki broj reakcija i dobili koncentracije hemijskih vrsta na različitim rastojanjima od otvora cevčice argonskog plazma mlaza (W Van Gaens and Bogaerts, 2013). Iako je postignut značajan napredak u simulacijama ovakvih plazma mlazeva postoji još dosta otvorenih pitanja na koje treba dati odgovor.

1.8. Organizacija teze

U prvoj glavi je dat uvod u oblast kojom se bavi ova teza. Opisana su neravnotežne plazme, mehanizmi proboja i uslovi za održanje plazme. Opisane su neke od standardnih dijagnostičkih metoda. Zatim su opisane vrste i primene plazma mlazeva na atmosferskom pritisku.

U drugoj glavi su detaljno opisana eksperimentalna postavka i metode merenja. Dat je opis električnih merenja i vremenski razloženog snimanja iCCD kamerom.

Treća glava se bavi dijagnostikom plazma mlaza sa metalnim elektrodama. Prvo su prikazani snimci plazme sa ekspozicijom dužom od perioda pobudnog signala, zatim su prikazani vremenski razloženi snimci za tri konfiguracije bakarnih elektroda „žica“, „traka“ i „prozor“ i na kraju struju naponske karakteristike.

U četvrtoj glavi su prikazani rezultati merenja za različite konfiguracije providnih elektroda i opisana je optimalna elektrodna konfiguracija.

U petoj glavi je ispitivan uticaj treće metalne elektrode na prostiranje plazma mlaza, kao i uticaj različitih meta.

Šesta glava je posvećena uticaju dodatka argona i sintetičkog vazduha na formiranje plazma mlaza u cevčici i van nje.

Sedma glava je posvećena plazma mlazu kada je napajana elektroda na posebno cevčici, u cevčici oblika slova T i opisan je dvostruki plazma mlaz.

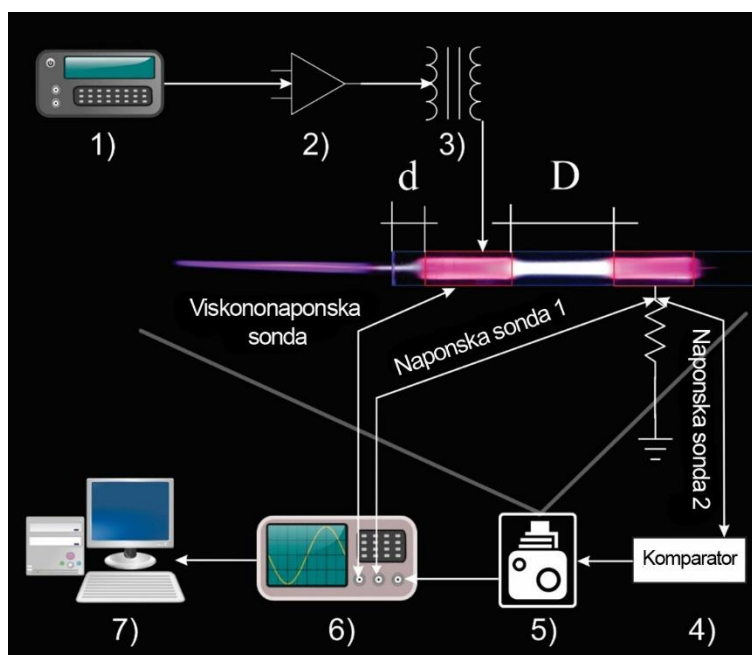
U osmoj glavi smo opisali tretman bakterija plazma mlazom. Ispitali smo zone inhibicije i vijabilnost bakterija MTT testom posle plazma tretmana. Takođe je ispitan i uticaj plazma mlaza na DNK bakterija.

U devetoj glavi je dat generalni zaključak teze, u desetoj je dat pregled korišćene literature, u jedanaestoj je data biografija autora i na kraju u dvanaestoj su dati prilozi.

2. Eksperimentalni uređaji i procedura merenja

2.1. Eksperimentalne postavke za merenje svetlosnih profila iCCD kamerom i električna merenja

U Laboratoriji za gasnu elektroniku razvili smo plazma mlaz (engl. *Plasma jet*) veoma jednostavne konstrukcije. Plazma mlaz se sastoji od staklene cevčice, unutrašnjeg prečnika 4 mm i spoljašnjeg 6 mm, oko koje su omotane elektrode. U eksperimentima smo koristili nekoliko tipova i oblika elektroda napravljenih od bakarne folije, žice i providne folije sa provodnim slojem. Šematski prikaz eksperimentalne postavke za ispitivanje plazma mlaza prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1. Eksperimentalna postavka za ispitivanje plazma mlaza: 1) signal generator; 2) pojačavač; 3) visokonaponski transformator; 4) naponski komparator; 5) iCCD kamera; 6) osciloskop; 7) kompjuter; d - rastojanje od ruba cevčice i D rastojanje između elektroda.

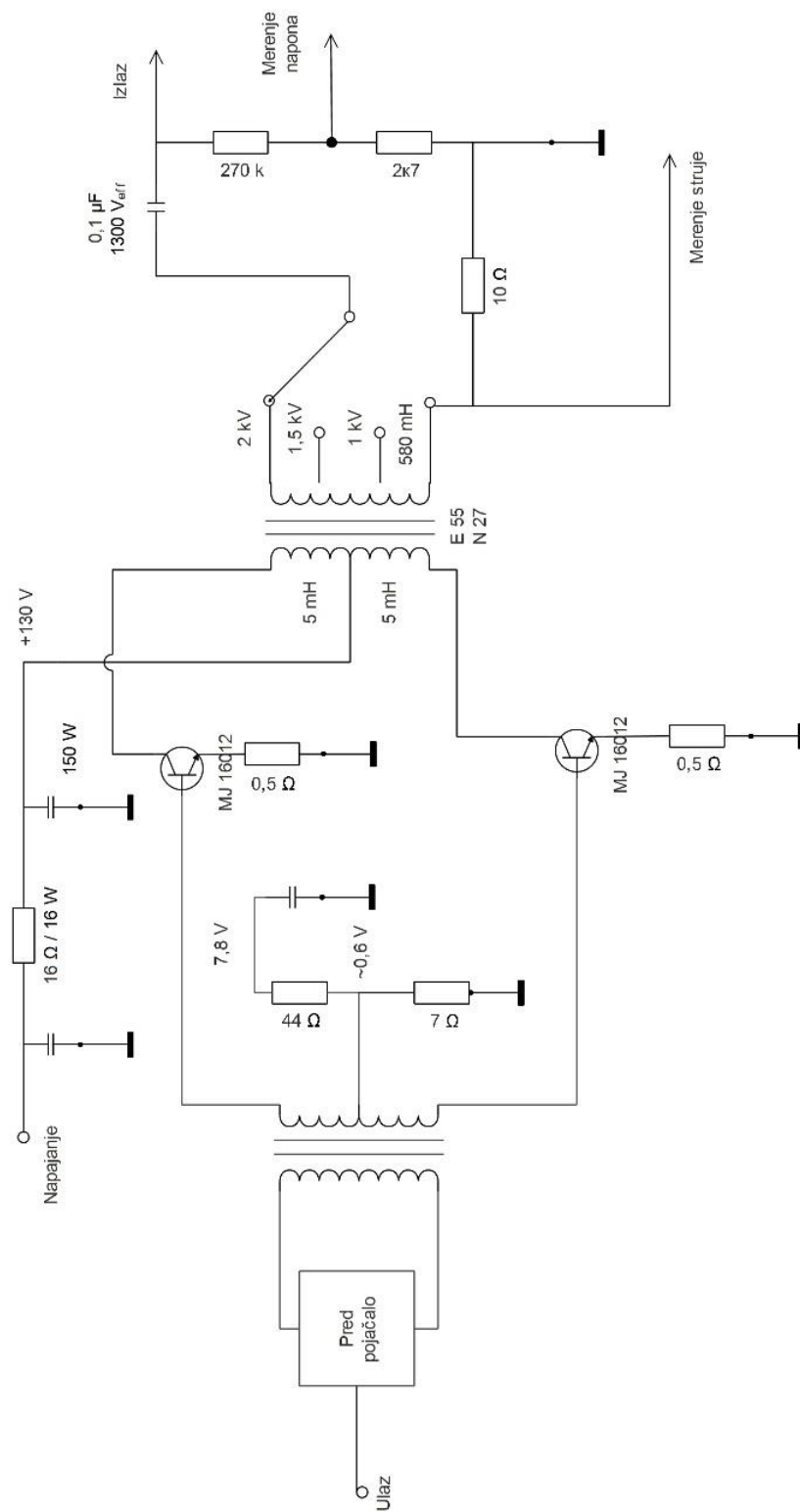
Sistem za merenje vremenski razloženih profila emisije i ispitivanje električnih karakteristika plazma mlaza se sastoji iz sledećih delova: 1) signal generatora (PeakTech DDS Function Generator 4025) 2) pojačavača 3) visokonaponskog transformatora

4) naponskog komparatora 5) iCCD kamere i 6) osciloskopa. Signal se iz signal generatora dovodi pojačalu koje ga pojačava, a zatim se visokonaponskim transformatorom signal pojačava na radni napon plazma mlaza od oko 8 kV_{pp}. Pojačan signal dovodimo na napajanu elektrodu. Druga elektroda je preko otpornika od 100 kΩ spojena na uzemljenje. Na otpornik su zakačene dve naponske sonde (Agilent 10076A), od kojih jedna služi za sinhronizaciju kamere a druga za semplovanje pada napona, odnosno merenje struje u ovom delu kola. Na napajanu elektrodu je prikačena visokonaponska sonda (Agilent N2771B) kojom se meri trenutni napon plazma mlaza. Kamera se sinhronizuje sa strujnim signalom a ključni element za sinhronizaciju slika i signala je komparator napona. Protok radnog gasa helijuma je kontrolisan protokomerom (Omega FMA5400/5500).

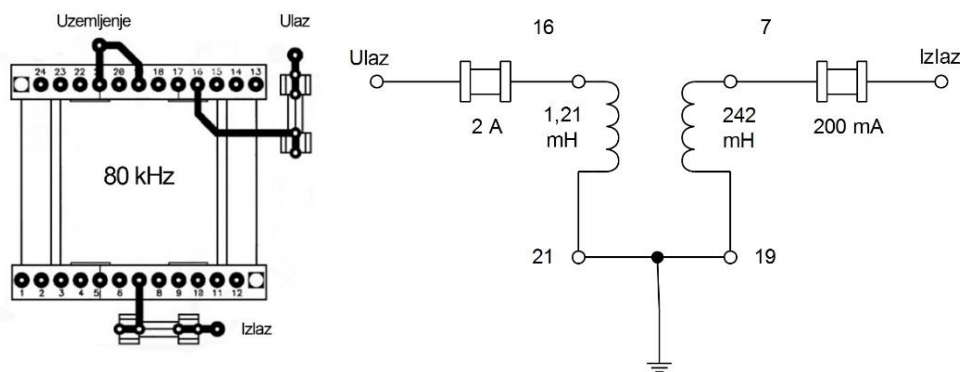
2.2. Konstrukcija pojačala za napajanje plazma mlaza

U eksperimentima su korišćena dva tipa napajanja različitih konstrukcija. Prvi tip pojačala koristi isključivo signal iz signal generatora, dok se kod drugog pojačala može koristiti signal iz signal generatora ili oscilator na 80 kHz koji je ugrađen u pojačalo.

Sada ćemo opisati prvo pojačalo čija je šema prikazana na slici 2.2. Ovo pojačalo je tipa engl. *Push-Pull*. Kod ovog tipa pojačala ulazni signal se pojačava pomoću dva tranzistora tipa MJ16012. Nakon pojačanja signal se dovodi na transformator kojim se napon povećava na oko 1 kV_{pp}. Glavni nedostaci ovog pojačala su težina od oko 3 kg i njegove dimenzije (širina 45 cm, dubina 25 cm i visina 15 cm). Pojačalo sadrži veliki broj električnih komponenti koje komplikuju proces izrade i povećavaju mogućnost kvarova. Izlaz iz pojačala se priključuje na ulaz visokonaponskog transformatora koji je prilagođen radu na frekvenciji od 80 kHz, odnosno to je njegova rezonantna frekvencija pri opterećenju koje čini plazma mlaz. Ulazni signal se dovodi preko osigurača od 2 A na pin 16 koji je povezan na primar trafoa od 1.21 mH. Krajevi primara i sekundara su kratko spojeni i uzemljeni (pinovi 19 i 21). Induktivnost sekundara je 242 mH, a njegov izlaz je zaštićen osiguračem od 200 mA. Ulazni signal se sa 1 kV_{pp} pojačava na napon od oko 8 kV_{pp}. Osigurači u ovom kolu nisu neophodni, ali su poželjni, da bi se izbeglo oštećenje trafoa u slučaju prevelike struje. Visokonaponski transformator koji je korišćen za generisanje plazme je prikazan na slici 2.3.



Slika 2.2. Električna shema prvog pojačala.



Slika 2.3. Visokonaponski trafo.

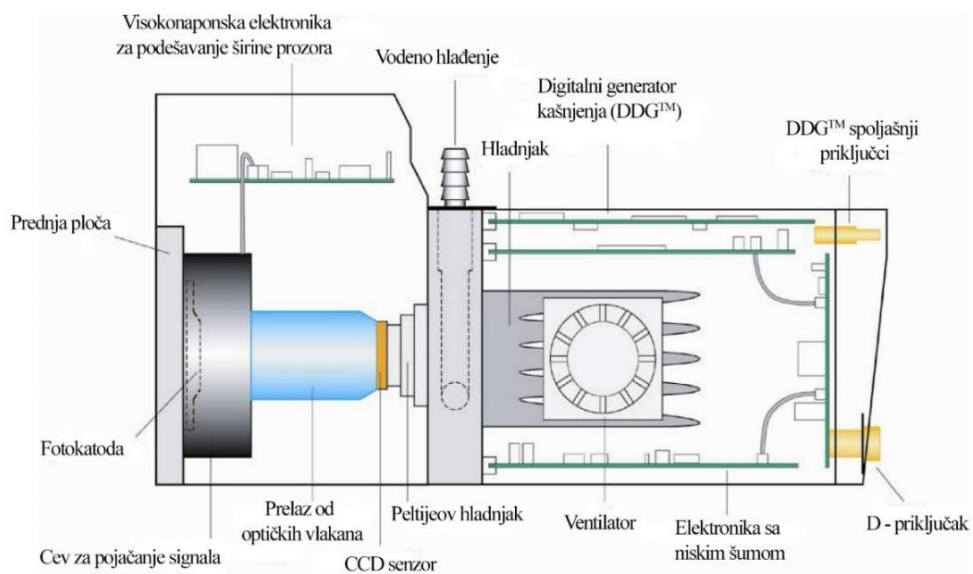
Kako bi pojednostavili izradu pojačala, smanjili mu masu i pojednostavili konstrukciju napravili smo drugo poboljšano pojačalo pomoću čipa TDA7293. Sada se celo pojačalo nalazi na jednoj štampanoj ploči malih dimenzija. Ovo pojačalo je maksimalne snage 100 W, a napon napajanja pojačala je ± 50 V. Korišćenjem više čipova povezanih paralelno moguće je napraviti i pojačala veće snage. Signal iz signal generatora koji ulazi u pojačalo se povećava sa nekoliko volti do oko 50 V. Pošto je ovo mali napon za formiranje plazme koristili smo visokonaponski transformator koji se sastoji od primara induktivnosti 95 μ H i sekundara od 995 mH. Napon se direktno iz pojačala povećava sa nekoliko desetina volti na oko 8 kV_{pp}, što je dovoljan napon za formiranje plazma mlaza. Kako bi zaštitili pojačalo od prekomernog pregrevanja na izlazu smo postavili keramički otpornik koji preuzima višak snage od pojačala. Nakon otpornika je povezana zavojnica promenljive induktivnosti koja služi za precizno podešavanje radne rezonantne frekvencije plazma mlaza.

2.3. iCCD kamera

Uređaj koji smo koristili za prikupljanje svetlosnog signala iz plazme je brza iCCD (*Image Intensifier Charge Coupled Device*) kamera koja je prikazana na slici 2.4. Ova kamera je namenjena za snimanje vremenski razloženih snimaka ili spektara plazme veoma slabog intenziteta. Posmatranjem profila zračenja pražnjenja mogu se dobiti bitne informacije o raspodeli čestica u pražnjenju i kinetici plazme. Postavljanjem kamere na spektrometar visoke rezolucije moguće je posmatrati širenje pojedinih spektralnih linija i analizirati Doplerov i Štarkov efekat. Analizom vibracionih traka molekula (azota ili kiseonika) može se odrediti temperatura gasa u plazmi.



Slika 2.4. Andor iStar kamera (Andor iStar user manual).

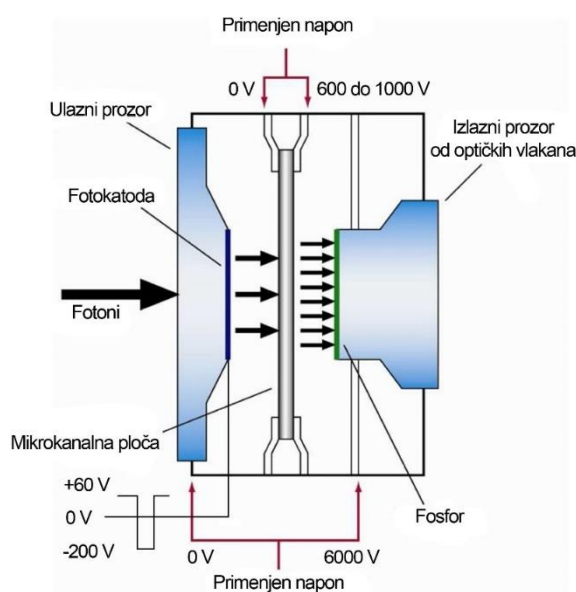


Slika 2.5. Presek kamere sa obeleženim delovima (Andor iStar user manual).

Detektorska glava kamere (Slika 2.5.) se sastoji od sledećih delova:

1. Pojačavač signala slike
2. Visoko naponsko napajanje
3. Opciono DDG™ (Digitalni generator kašnjenja - Digital Delay Generator)
4. Opciono Intelligate™ elektronika
5. CCD senzor i predpojačalo
6. Senzor temperature (nije prikazan na slici)
7. Predpojačalo i senzor temperature (nisu prikazani na slici)
8. Peltijeov hladnjak (termoelektronski ili TE hladnjak)

Ova glava može da se montira na spektrometar ili drugi optički uređaj za prikupljanje podataka. CCD senzor kamere se nalazi u kućištu sa suvim vazduhom kako bi se izbegla kondenzacija. Dva priključka sa gornje strane kamere služe za dovod vode i dodatno hlađenje kamere i postizanje temperature do -30°C , čime se drastično smanjuje nivo šuma, dok je sa vazдушnim hlađenjem najniža temperatura -20°C . U svim našim merenjima bila je dovoljna temperatura od -10°C za postizanje zadovoljavajuće niskog šuma (oko 800 a. j. oko 2% maksimalnog signala).



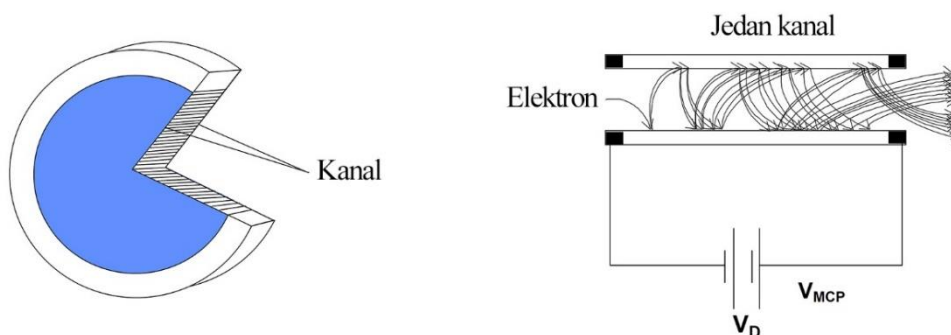
Slika 2.6. Pojačavač signala slike (Andor iStar user manual).

Pojačavač signala se koristi za pojačanje svetlosnog signala koji pada na ulazni prozor (Slika 2.6.). Ovaj uređaj je malih dimenzija, obično prečnika 2.5 cm -5 cm i debljine oko 2.5 cm. Pored toga što se koristi za pojačanje slike, može se koristiti i kao veoma brz zatvarač (engl. *Shutter*). Ovim uređajem se mogu postići širine prozora od 2 ns. Tri najvažnije komponente pojačavača slike su:

1. Fotokatoda
2. Mikrokanalna ploča (engl. *Microchannel Plate*)
3. Fosforni ekran
4. Izlazni prozor od optičkih vlakana

Slika se projektuje na fotokatodu, kada foton udari u fotokatodu može se emitovati elektron. Ovaj proces je određen kvantnom efikasnošću fotokatode. Elektron se električnim poljem vodi duž razreza (~ 0.2 mm) ka mikrokanalnoj ploči.

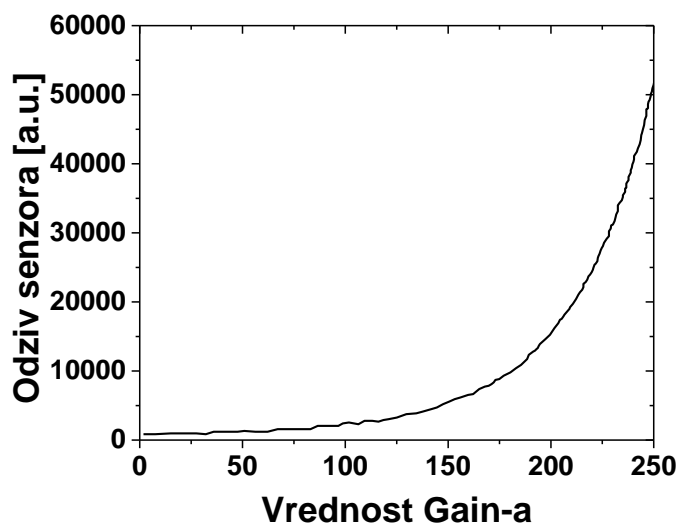
Mikrokanalna ploča je tanak disk (debljine ~ 1 mm) od stakla u obliku saća. Svaki kanal na ploči je presvučen provodnim slojem. Širina ovih kanala je oko 10 mikrona (slika 2.7.). Električni potencijal duž mikrokanala je od 500 V do 1000 V, pa fotoelektroni kaskadno udaraju u zidove kanala i proizvode sekundarne elektrone formirajući elektronsku lavinu. Rezultujuće pojačanje može da bude i do 10^4 puta. Elektronska lavina na kraju prelazi još jedan mali procep (~ 0.5 mm) sa potencijalom od nekoliko hiljada volti.



Slika 2.7. Mikrokanalna ploča (Andor iStar user manual).

Još jedan od parametara kojim može da se kontroliše intenzitet snimaka je „prinos“ (engl. *Gain*). U merenjima smo najčešće koristili velike prinose kamere (200 ili 250) u

zavisnosti od parametara plazme. Uvek smo se trudili da izbegnemo saturaciju iCCD senzora. Na slici 2.8. je prikazan odnos intenziteta signala i zadate vrednosti prinosa. Iz ovog grafika se lako mogu dobiti faktori za skaliranje signala koji su dobijeni na različitim vrednostima prinosa.

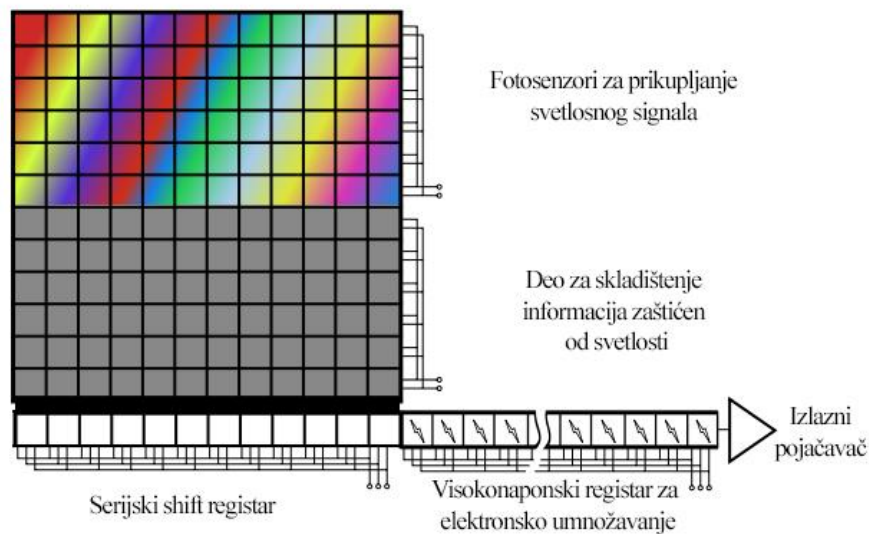


Slika 2.8. Odziv CCD senzora u funkciji vrednosti prinosa (Gain-a) kamere.

CCD senzor se sastoji od velikog broja fotoosetljivih dioda poređanih u matricu određenih dimenzija u našem slučaju 1024x1024 piksela. Fotodioda pretvara prikupljene fotone u električni napon koji se može obraditi pomoću analogno digitalnog konvertora. Naponu koji se prikuplja sa senzora dodeljuje se vrednost nivoa osvetljenosti i dodeljuje mu binarnu oznaku, tako da se može sačuvati digitalno. Princip rada CCD senzora je prikazan na slici 2.9.

iCCD kamera je veoma osetljiv uređaj koji uz pažljivo i stručno rukovanje može trajati godinama. Dva glavna procesa koja mogu oštetiti kameru su preeksponovanje (engl. *Bleaching*) i jonska oštećenja (engl. *Ion damage*). Preeksponiranje fotokatode može dovesti do smanjivanja kvantne efikasnosti, odnosno smanjivanja osjetljivosti detektora i trajnog povećanja šuma u pojačavaču slike. Veliki broj elektrona unutar mikrokanalne ploče može dovesti do izbijanja jona iz zidova i dovesti njenog oštećenja. Iako u kameri postoji električno kolo koje štiti senzor i mikrokanalnu ploču od oštećenja treba izbegavati korišćenje visokih vrednosti pojačanja kada se očekuju veliki intenziteti

svetlosnog signala. Pre povećavanja vrednosti pojačanja treba se uveriti da signal nije previše visok kako bi se izbeglo oštećenje kamere.



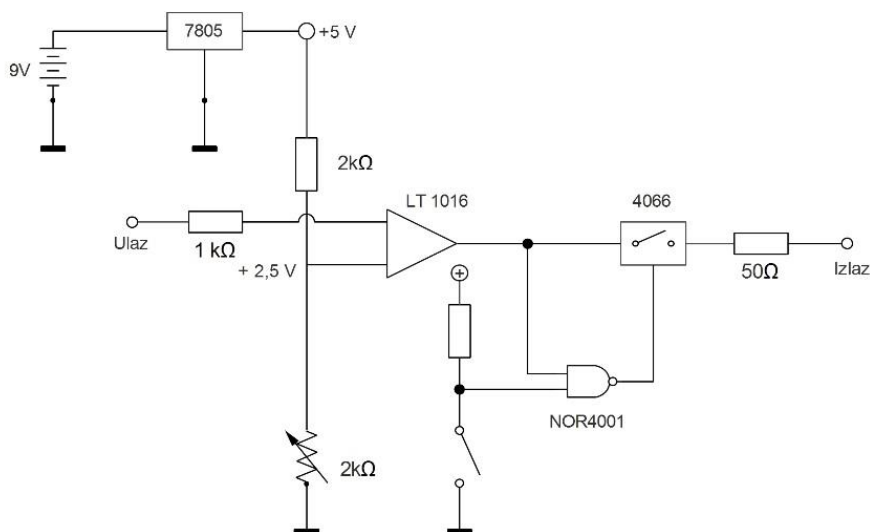
Slika 2.9. Shematski prikaz rada CCD senzora

(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e1/EMCCD2_color_en.svg/633px-EMCCD2_color_en.svg.png).

2.4. Vremenski razloženi snimci i aksijalni profili emisije

Za vremenski razloženo snimanje plazme korišćena je iCCD (*Intensified Charge Coupled Device*) kamera Andor iStar DH734I sa objektivom Nikon Nikkor 50mm f/1.4. Ovaj objektiv je izabran zbog optimalnog ugla vidljivosti, male dubine vidnog polja i velike svetlosne moći, koja nam omogućava prikupljanje dovoljne količine svetlosti za snimanje. Drugi objektiv koji je korišćen je Nikon Nikkor 105mm f/2.8 AF D Micro u kombinaciji sa prstenom PN11. Ovaj sistem je zbog velikog uveličanja korišćen za snimanje plazma mlaza sa prednje strane.

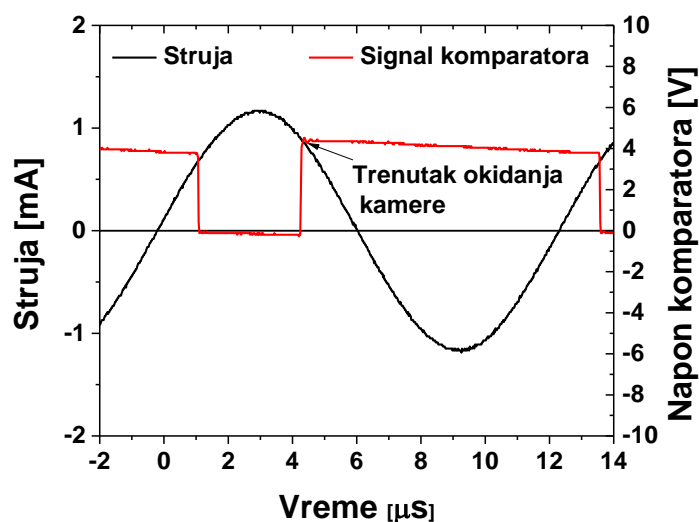
Jedan od bitnih uslova za snimanje vremenski razloženih snimaka je izbor preciznog uređaja za okidanje (engl. *Triggering*). Sinhronizacija i okidanje nekoliko uređaja istovremeno se najčešće postiže korišćenjem komercijalnih generatora kašnjenja sa više kanala. Zbog visoke cene uređaja u eksperimentima smo koristili komparator napona specijalno izrađen i prilagođen našem eksperimentu. Komparator je jednostavne konstrukcije, a njegova shema je prikazana na slici 2.10.



Slika 2.10. Električna shema napenskog komparatora.

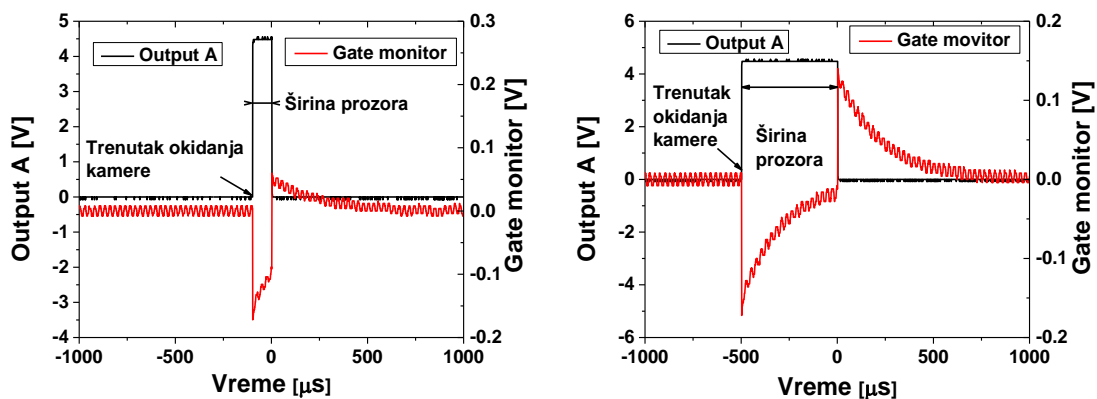
Opseg napona korišćenog komparatora je od 0.7 V do 3.7 V i podešava se potencijetrom. Kada se dovede napon koji je veći od podešenog napona, komparator proizvodi TTL signal kojim se okida kamera. U komparator se uvodi signal sonde koja se nalazi na otporniku u uzemljenoj grani kola. Glavna komponenta komparatora je ultra brzi čip LT1016 koji omogućava tipična vremena od 10 ns na uzlaznoj ivici TTL signala. Komparator okida kameru svaki put kada napon na otporniku pređe zadanu vrednost, to jest u svakom periodu i to nam omogućava dobijanje oštarih snimaka korišćenjem integracije na čipu kamere jer je priroda pražnjenja repetitivna. Korišćenjem komparatora bili smo u mogućnosti da dobijemo vremenski razložene snimke plazma mlaza.

Na slici 2.11. prikazan je trenutak okidanja kamere. U svim merenjima komparator je bio podešen na vrednost struje od 0.87 mA. Korišćenjem komparatora smo jasno definisali trenutak okidanja kamere i osciloskopa na vremenskoj skali. Kretanje po vremenskoj skali je urađeno pomoću preciznog internog generatora kašnjenja u kameri i ona se okida na uzlaznu ivicu signala komparatora.



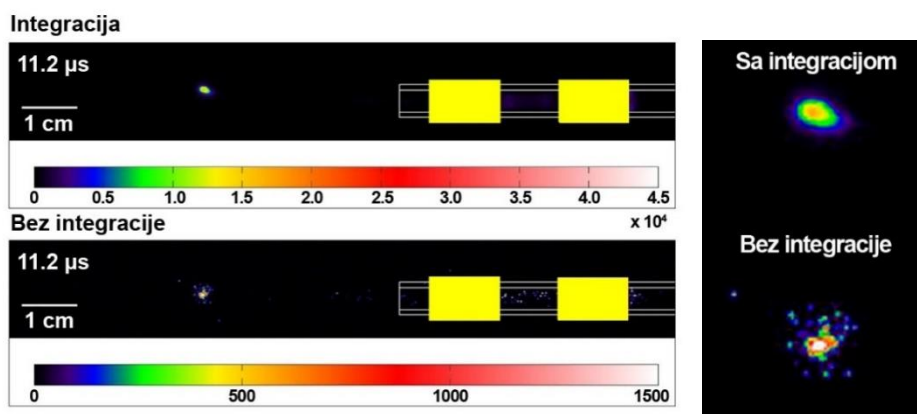
Slika 2.11. Signal sa komparatora i strujni signal.

Na slici 2.12. prikazani su signali koje daje kamera prilikom okidanja *OutputA* i *Gate monitor*. *OutputA* služi za spoljašnje okidanje osciloskopa ili nekog drugog uređaja (Slika 2.12). U našem slučaju osciloskop se okida samo na prvi signal koji dobije od kamere. Sa slika se vidi da se signal *OutputA* u potpunosti poklapa sa signalom *Gate monitor*. Prikazani su signali bez internog kašnjenja kamere, za širine prozora kamere od 100 μs i 500 μs. Kretanje po vremenskoj skali pobudnog signala se vrši pomoću internog generatora kašnjenja kojim se zadaje vreme posle koga će kamera da napravi snimak. Prozor kamere je u merenjima bio podešen na 25 ns a kašnjenje je bilo od 0 μs do 12 μs, sa korakom od 0.4 μs, čime je pokriven ceo period pražnjenja. Snimci napravljeni iCCD kamerom, prikazani u ovom radu, su napravljeni sa korakom od 0.8 μs jer je i ovaj korak dovoljno fin za opisivanje celog perioda pražnjenja.



Slika 2.12. Poređenje signala koji daje kamera (OutputA i Gate monitor) za dve vrednosti prozora kamere, 100 μs levo i 500 μs desno.

Pošto je intenzitet zračenja koji dolazi iz plazme u delu perioda sa širinom prozora od 25 ns veoma mali, bilo je neophodno vršiti integraciju na čipu kako bi se dobili snimci zadovoljavajućeg intenziteta. Na slici 2.13. prikazano je poređenje snimaka kada je uključena integracija (gore) i bez integracije (dole). Jasno se vidi da je mesto formiranja PAPS-a identično u oba slučaja. Uočljivo je znatno povećanje intenziteta a to je posledica akumulacije signala u više perioda pobudnog signala. Zbog male varijacije u pobudnom signalu i zbog same osobine plazme u „metak“ modu (engl. *Bullet Mode*) emisija svetlosti se u svakom periodu pojavljuje na istom mestu, pa se dobijaju oštri snimci pri akumulaciji.



Slika 2.13. Poređenje vremenski razloženih snimaka sa integracijom (gore) i bez integracije (dole), trenutak okidanja 11.2 μs , snagu 5 W, protok 4 slm, desno je uveličano poređenje plazma PAPS-a.

Aksijalni profili emisije se dobijaju sumiranjem intenziteta svetlosti na snimku duž vertikalne ose u zoni pražnjenja. Korišćenjem samo ove zone za dobijanje profila emisije smanjuje se uticaj šuma na snimku. Dobijeni profili predstavljaju emisiju svetlosti u zavisnosti od položaja duž ose pražnjenja.

2.5. Električna merenja

Električna merenja smo vršili pomoću 2 komercijalne naponske sonde. Visokonaponska sonda ($\times 1000$) je prikačena na napajanu elektrodu dok je druga naponska sonda ($\times 100$) služila za merenje pada napona na keramičkom otporniku od $100 \text{ k}\Omega$ koji se nalazi u delu kola između uzemljenja i uzemljene elektrode. Strujni i naponski signali su snimani pomoću osciloskopa. Pri merenju snage radi se usrednjavanje signala kako bi se izbegle eventualne oscilacije signala tokom vremena. Na osnovu snimljenih signala izračunate su strujno-naponske krive, a iz nagiba ovih krivih i impedansa sistema za slučaj kada je plazma formirana i kada je nema. Formule koje su korišćene za računanje srednje kvadratne vrednosti struje (2.1.) i napona (2.2) su:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} (i(t))^2 dt} \quad 2.1.$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} (u(t))^2 dt} \quad 2.2.$$

Snaga isporučena plazmi je računata iz razlike snaga u sistemu kada imamo plazmu i kada je plazma isključena, odnosno kada nemamo protok radnog gasa pa ne dolazi do pražnjenja. Formula korišćena za računanje srednje snage u električnom kolu je:

$$P_{sr} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} v(t)i(t)dt \quad 2.3.$$

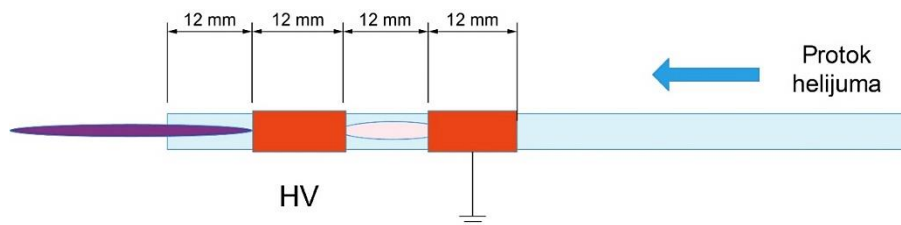
Analizirani su trenutni strujni i naponski signali pomoću FFT (*Fast Fourier Transform*) algoritma i provereno je koji se sve harmonici javljaju u signalu kada je plazma formirana i kada je nema.

3. Dijagnostika plazma mlazeva različitih geometrija metalnih elektroda

Cilj ispitivanja različitih geometrija elektroda plazma mlaza bio je pronalaženje uticaja njihove geometrije na formiranje plazme, njene domete i električne karakteristike. U ovoj glavi ćemo prvo pokazati snimke plazma mlaza koji su napravljeni sa ekspozicijom koja je znatno duža od perioda pobudnog signala a zatim ispitati različite elektrodne konfiguracije, njihove električne karakteristike i vremenski razložen razvoj pražnjenja. Ovde ćemo pokazati da je neophodan uslov za dobijanje plazme van cevčice dovoljna širina napajane elektrode. Široka elektroda omogućava nagomilavanje naelektrisanih čestica na unutrašnjoj površini staklene cevčice, koje se zatim izbacuju u pozitivnom poluperiodu blizu maksimalnog napona na napajanoj elektrodi. Plazma prilikom izlaska iz cevčice formira PAPS koji se prostire velikom brzinom. Ispitali smo sledeće slučajeve: dve tanke elektrode – konfiguracija „žica“, dve široke elektrode – konfiguracija „traka“ i elektroda sa prozorom na napajanoj elektrodi i tankom elektrodom – konfiguracija „prozor“. Samo u slučajevima kada je napajana elektroda dovoljno široka dolazi do izbacivanja plazme iz cevčice i formiranja PAPS-a.

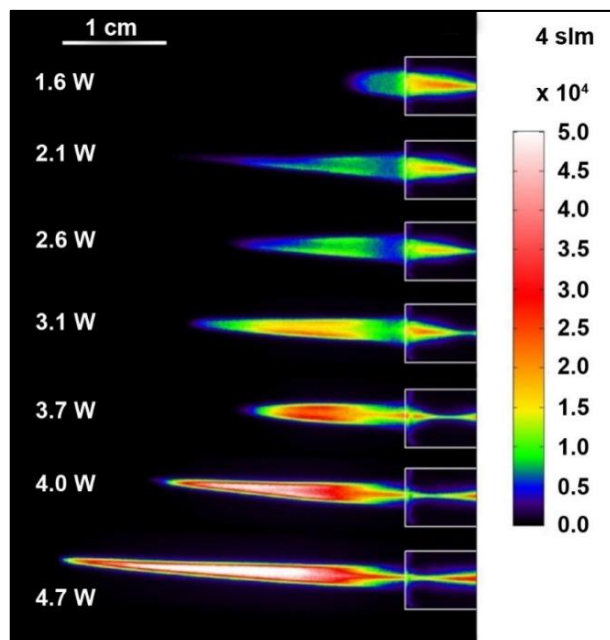
3.1. iCCD snimci sa ekspozicijom koja je duža od perioda pobudnog signala

U ovom delu smo ispitivali uticaj protoka radnog gasa i snage predate plazmi na domet plazma mlaza kada se snimanje vrši sa ekspozicijom koja je znatno duža od perioda pobudnog signala. Protoci radnog gasa koji su ovde korišćeni su 4 slm, 5 slm i 6 slm. Elektrode su napravljene od bakarne folije koja je zalepljena oko staklene cevčice. Rastojanje između elektroda i udaljenost napajane elektrode od ruba cevčice i širina elektroda su 12 mm (Slika 3.1.). Radna frekvencija je 80 kHz što odgovara jednom periodu od 12.5 μ s. Snaga predata plazmi nije prelazila 5 W.



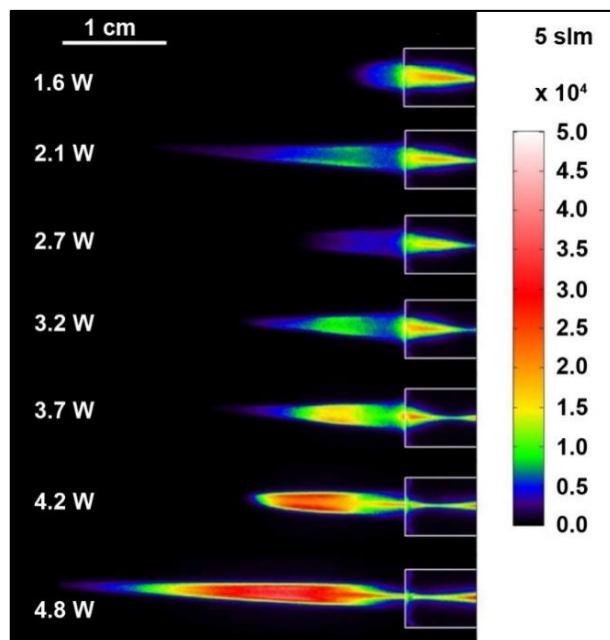
Slika 3.1. Plazma mlaz sa elektrodama od bakarne folije.

Na slikama 3.2, 3.3 i 3.4. su prikazani iCCD snimci plazma mlaza za protoke helijuma od 4 slm, 5 slm i 6 slm redom. Svi snimci su dobijeni postavljanjem iCCD kamere normalno na osu cevčice (engl. *side on*). Ekspozicija je 6 ms, a širina prozora 5 ms (engl. *Gate Width*). Ova širina prozora je 400 puta duža od jednog perioda pobudnog signala (5 ms/12.5 μ s). Na slikama su prikazani snimci plazma mlaza za sedam različitih snaga. Sve slike su prikazane sa istom skalom kako bi mogli da se porede intenziteti emisije. Plazma mlaz na najmanjoj snazi veoma malo izlazi iz cevčice (oko 5 mm), sa povećanjem snage dolazi do naglog povećanja dužine plazme na oko 20 mm. Daljim povećanjem snage dužina se neznatno smanji a zatim ponovo počinje da raste. Ukoliko posmatramo deo plazma mlaza izvan staklene cevčice vidimo da je plazma dobro definisana i visokog intenziteta emisije. Maksimalni domet i intenzitet se dobija za maksimalnu snagu. Najveći intenzitet emisije potiče iz središnjeg dela plazma mlaza, koji ka ivicama postepeno opada. Takođe možemo da primetimo da je plazma mlaz veoma dobro definisanog prečnika od oko 4 mm u blizini otvora cevčice koliko iznosi i unutrašnji prečnik cevčice. Prečnik plazma mlaza postepeno opada kako se udaljavamo od otvora cevčice jer se smanjuje uticaj električnog polja cilindrične napajane elektrode, pa samim tim dolazi do promena u lokalnom električnom polju u glavi strimera koje raste kako se udaljavamo od ruba cevčice. Takođe, udaljavanjem od otvora cevčice dolazi do većeg mešanja radnog gasa sa okolnim vazduhom čime se smanjuje molska frakcija helijuma u stubu radnog gasa. Električno polje opada sa udaljavanjem od napajane elektrode, ali i dalje postoji jako lokalno električno polje u glavi strimera koje omogućava prostiranje u prostoru. Kretanje plazma paketa je stabilisano stubom helijuma. Prečnik plazma mlaza je veoma bitan parametar koji može da se iskoristi prilikom izbora optimalnih uslova pri tretmanu površina.

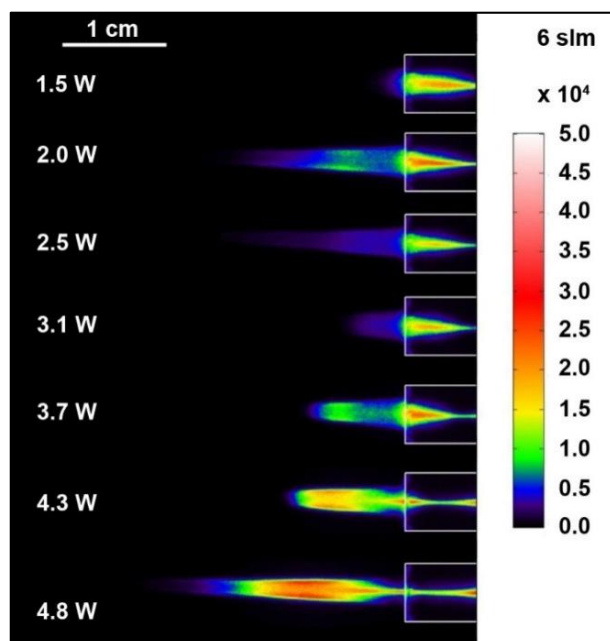


Slika 3.2. Snimci plazma mlaza za različite snage i protok helijuma od 4 slm, ekspozicija je 6 ms, a širina prozora 5 ms.

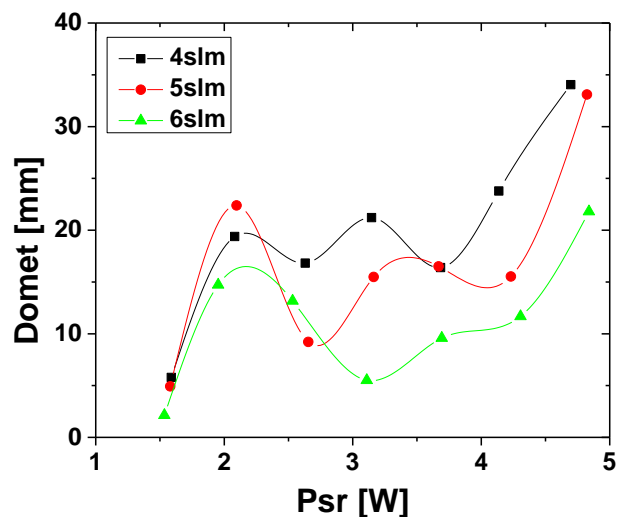
Na slici 3.2. je prikazan plazma mlaz za protok od 4 slm. Za ovaj protok intenzitet emisije je najveći. Dužina i intenzitet plazma mlaza zavise od primenjene snage. Na slici se može uočiti da se za snage do 3.1 W plazma mlaz relativno niskog intenziteta. Sa povećanjem snage dolazi do naglog povećanja emisije iz centralnog dela plazma mlaza. Za protoke 4 slm i 5 slm protok je laminaran, dok je za protok od 6 slm protok u prelaznom modu između laminarnog i turbulentnog, što se može primetiti po smanjenju intenziteta pražnjenja i dometa plazma mlaza.



Slika 3.3. Snimci plazma mlaza za različite snage i protok helijuma od 5 slm, ekspozicija je 6 ms, a širina prozora 5 ms.



Slika 3.4. Snimci plazma mlaza za različite snage i protok helijuma od 6 slm i različite snage, ekspozicija je 6 ms, a širina prozora 5 ms.



Slika 3.5. Dometi plazma mlaza za tri različita protoka helijuma 4 slm, 5 slm i 6 slm.

Dometi plazma mlaza za tri različita protoka su prikazani na slici 3.5. Za snagu od 1.5 W za protoke 4 slm i 5 slm dometi su približno isti i iznose 5 mm, dok je za protok od 6 slm domet nešto manji, oko 2 mm. Sa povećanjem snage dometi rastu i dostižu maksimum pri najvećoj snazi 34 mm, 33 mm i 22 mm za 4 slm, 5 slm i 6 slm redom. Zbog male razlike za protoke 4 i 5 slm, u većini merenja smo koristili niži protok od 4 slm. Ovaj protok nam je omogućio stabilan rad plazma mlaza i reproducibilnost merenja.

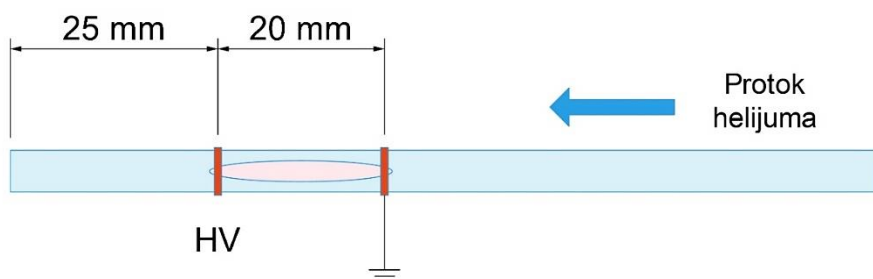
3.2. Poređenje tri različite konfiguracije metalnih elektroda

U ovom delu ćemo se baviti predstavljanjem i diskusijom rezultata dobijenih za metalne elektrode. Posmatraćemo strujno naponske karakteristike i vremenski razložene snimke pražnjenja. Ispitane su tri elektrodne konfiguracije: „žica“, „traka“ i „prozor“.

3.2.1. Vremenski razloženi snimci za dve tanke elektrode - konfiguracija „Žica“

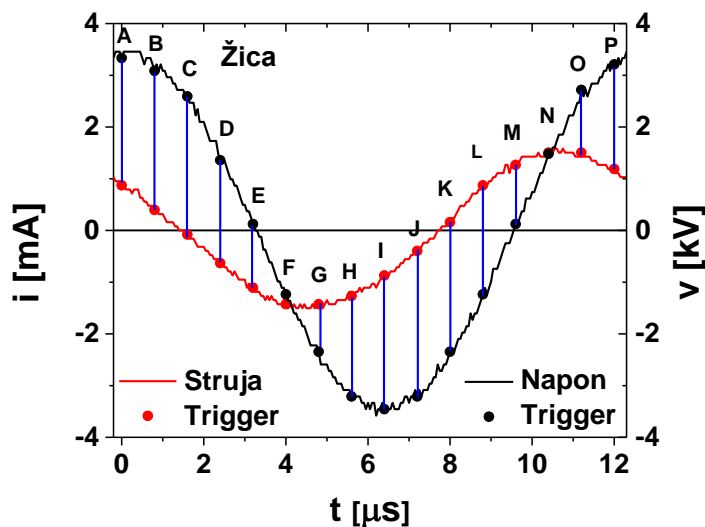
U ovom poglavlju ćemo opisati vremenski razvoj plazme za elektrodnu konfiguraciju sa dve tanke elektrode od bakarne žice, odnosno konfiguracija „žica“ (slika 3.6.). Kada se na elektrode primeni visoki napon formira se kontinualna plazma između elektroda. U ovoj elektrodnoj konfiguraciji nismo uspeali da dobijemo PAPS mod ni

menjanjem položaja elektroda od ruba cevčice i međuelektrodno rastojanja, ni menjanjem protoka radnog gasa. Napon je variran od 5 kV do 10 kVpp a protok od 1 slm do 7 slm. Rastojanje od ruba cevčice do napajane elektrode je varirano od 2 mm do 25 mm a međuelektrodno rastojanje od 5 mm do 25 mm. Ukoliko se međuelektrodno rastojanje smanji na manje od 5 mm dolazi do proboja i stvaranja luka između elektroda sa spoljašnje strane cevčice i naglog povećanja struje što može dovesti do oštećenja i pregorevanja pojačala.



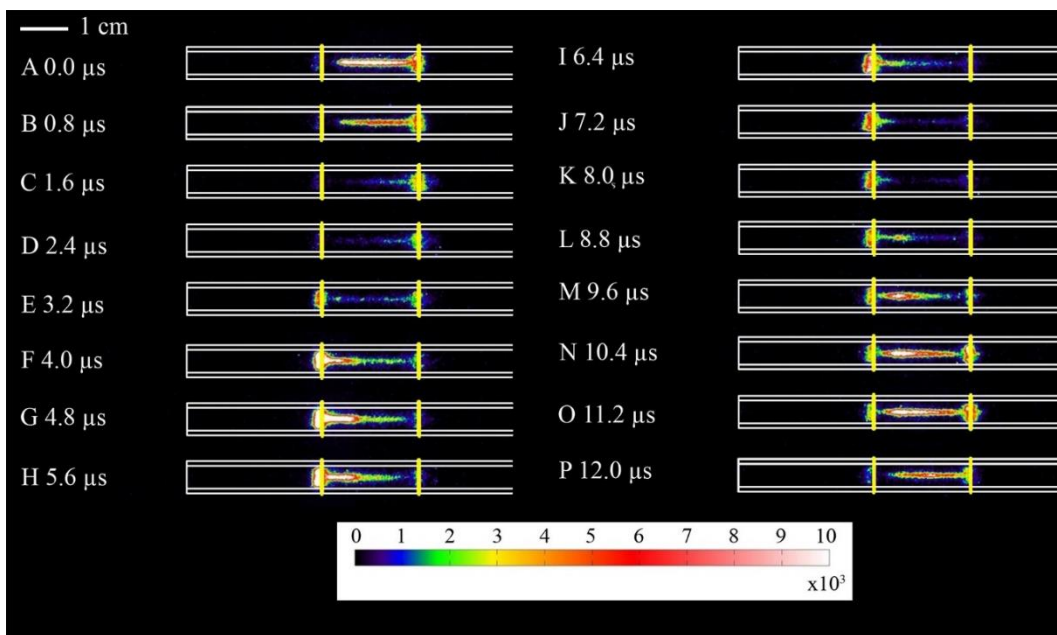
Slika 3.6. Shema plazma mlaza sa dve tanke elektrode - konfiguracija „žica“.

Strujni i naponski signali sa obeleženim pozicijama okidanja snimaka su dati na slici 3.7. Pozicije okidanja su obeležene slovima od A(0.0 μ s)-P(12.0 μ s) sa korakom od 0.8 μ s između tačaka. Protok radnog gasa helijuma je 4 slm, a snaga predata plazmi 0.6 W.



Slika 3.7. Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere za konfiguraciju „žica“, protok helijuma 4 slm, snaga 0.6 W.

Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju „žica“ su prikazani na slici 3.8. Ceo period (12.5 μs) je hronološki podeljen na 16 snimaka od tačke A(0.0 μs) do P(12.0 μs) sa korakom od 0.8 μs . Snimak za 12.5 μs nije prikazan jer odgovara položaju 0 μs . Napon je pozitivan za prve četiri tačke snimanja A(0.0 μs), B(0.8 μs), C(1.6 μs) i D(2.4 μs), pa je i emisija zračenja pomerena ka trenutnoj katodi (desna elektroda). U ovom trenutku intenzitet zračenja slabi u oblasti između elektroda. Kako napon opada emisija se sve više koncentriše oko desne elektrode - tačke C(1.6 μs) i D(2.4 μs). Pošto se sve više pomeramo ka strujnom minimumu E(3.2 μs), F(4.0 μs), G(4.8 μs) i H(5.6 μs), emisija se pomera ka levoj elektrodi koja u ovom slučaju postaje trenutna katoda. I u tačkama I(6.4 μs), J(7.2 μs) i K(8.0 μs) emisija je potpuno koncentrisana oko leve elektrode.



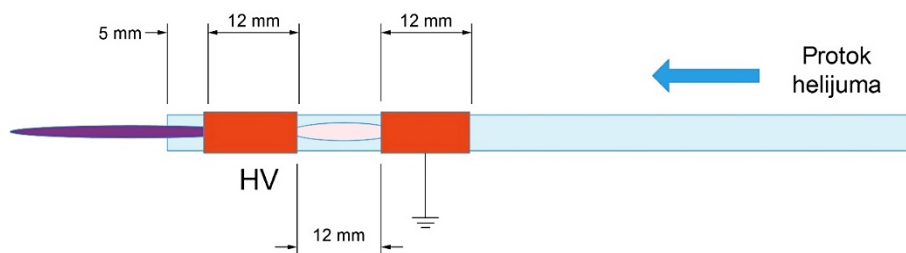
Slika 3.8. Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju „žica“. Protok helijuma je 4 slm i snaga 0.6 W.

Sada ćemo se koncentrisati na rastući deo strujnog i naponskog signala krećući od pozicije snimaka K(8.0 μs) i L(8.8 μs). Visoki intenziteti emisije su posledica interakcije elektrona i atoma helijuma koji se nalaze u oblasti elektroda. Kada potencijal obe elektrode počne da se izjednačava plazma se pomera ka međuelektrodnom prostoru. Kako struja raste, dostiže maksimum i počinje da opada (tačke M(9.6 μs), N(10.4 μs) i O(11.2 μs)), emisija se širi između elektroda, ostaje visokog intenziteta oko leve elektrode (trenutna anoda) i počinje da raste u oblasti trenutne katode. Emisija plazma

kanala između dve elektrode je kontinualna u celom periodu pobudnog signala (potrebno je podesiti skalu intenziteta da bi se ovo uočilo). Nakon tačke P(12.0 μ s) ceo proces se ponavlja.

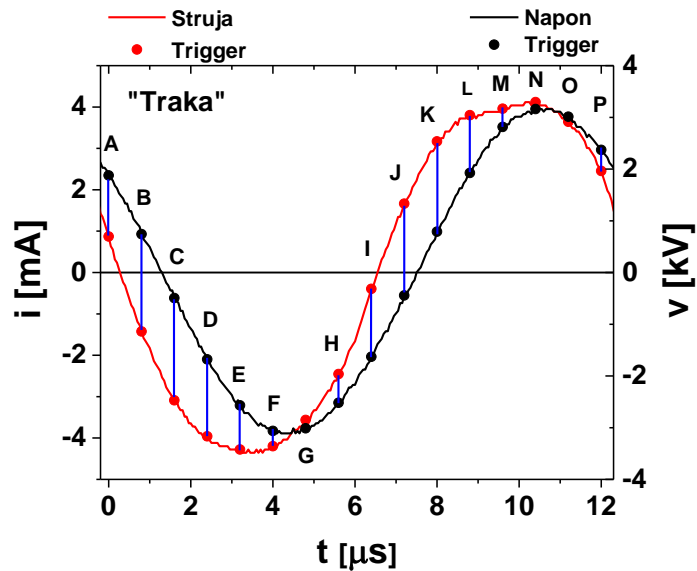
3.2.2. Vremenski razloženi snimci za dve elektrode od bakarne folije – konfiguracija „Traka“

U ovom poglavlju posmatramo vremenski razvoj plazme za elektrodnu konfiguraciju „traka“ koja se sastoji od elektroda od bakarne folije širine 12 mm, postavljene na međusobno rastojanje od 12 mm. Napajana elektroda se nalazi na 5 mm ruba cevčice. Eksperimentalna shema prikazana je na slici 3.9.



Slika 3.9. Shema plazma mlaza sa dve elektrode od bakarne folije, konfiguracija „traka“.

Protok radnog gasa helijuma je 4 slm, a snaga predata plazmi 4 W. Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja su prikazani na slici 3.10. Kao i u prethodnom slučaju vremenski razvoj pražnjenja se može lako pratiti tokom celog perioda pobudnog signala, pa su pozicije okidanja obeležene slovima od A(0.0 μ s)-P(12.0 μ s) sa korakom od 0.8 μ s između tačaka za ceo period pobudnog signala.

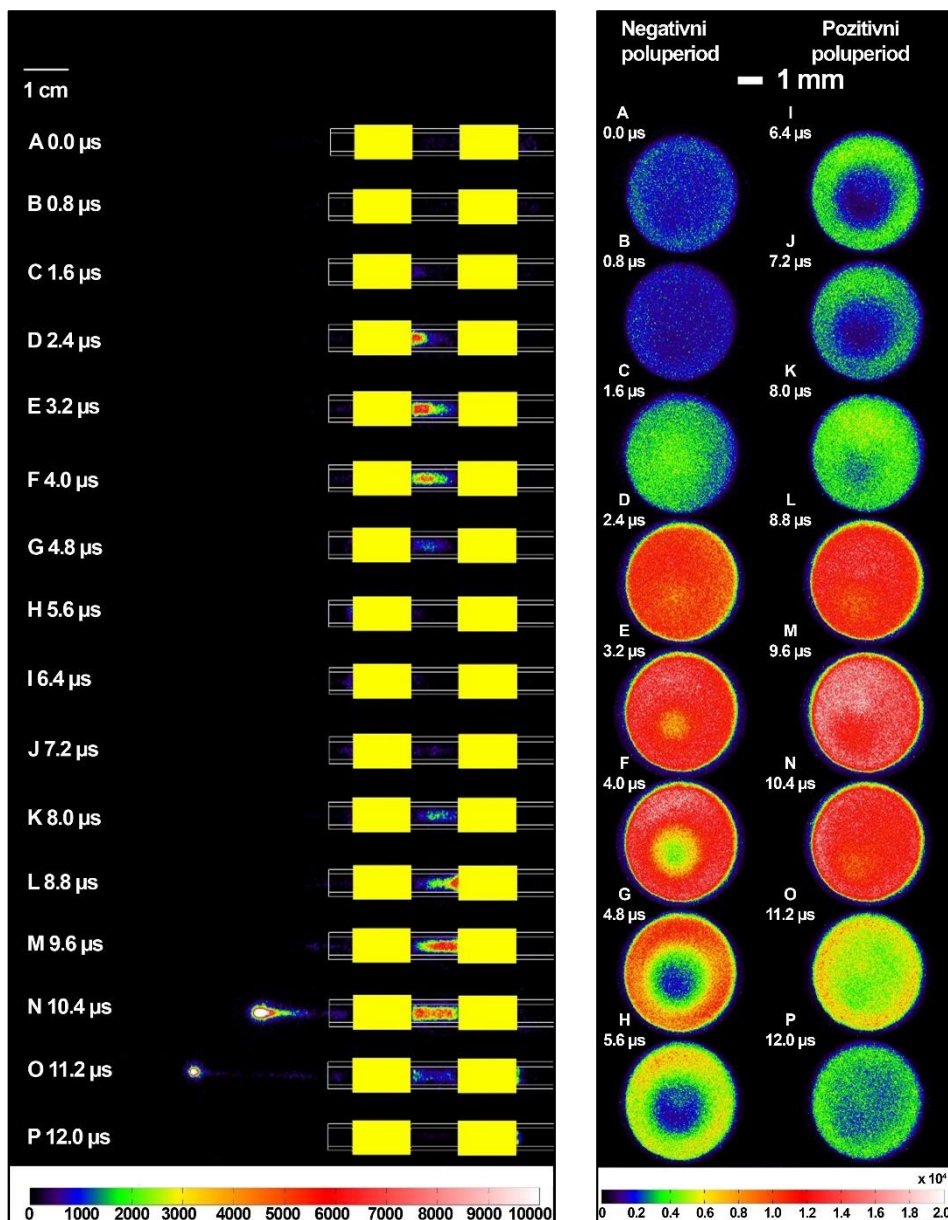


Slika 3.10. Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere za konfiguraciju „traka“. Proptok helijuma 4 slm, snaga 4 W.

Glavni fokus ovog dela je trenutak formiranja PAPS-a izvan cevčice. Vremenski razloženi snimci pražnjenja, napravljeni sa strane su prikazani na slici 3.11. (levo) i od napred na slici 3.11. (desno). Formiranje PAPS-a se dešava kada smo na maksimalnom trenutnom signalu i on tada izlazi iz cevčice velikom brzinom (Lu *et al.*, 2014a; Robert *et al.*, 2014; Bourdon *et al.*, 2016). Kako se PAPS udaljava od staklene cevčice, povećava mu se intenzitet emisije svetlosti i dostiže maksimalnu vrednost na određenom rastojanju od ruba cevčice. Nakon toga, intenzitet emisije opada i potpuno nestaje.

Sa slike se može uočiti da u tačkama A(0.0 μs) i B(0.8 μs) imamo samo slabu emisiju koja potiče iz prethodnog pobudnog perioda. Plazma počinje da se formira na desnoj ivici napajane elektrode, tačka C(1.6 μs) i širi prema uzemljenoj elektrodi G(4.8 μs), kada počinje ponovo da se smanjuje intenzitet pražnjenja između elektroda (3.11. levo). Ove slike odgovaraju opadanju naponskog signala. Elektroni počinju da ubrzavaju prema uzemljenoj elektrodi (trenutna anoda), dok se joni kreću prema napajanoj elektrodi (trenutna katoda) i maksimalni intenzitet emisije plazme se može videti u oblasti između elektroda. Unutar napajane elektrode plazma formira prstenast oblik i dodiruje zidove cevi, tačke E(3.2 μs) do J(7.2 μs). Povećanje intenziteta emisije u odnosu na konfiguraciju sa dve tanke elektrode navodi na zaključak da je jedan od ključnih parametara za formiranje PAPS-a i njegov intenzitet, širina tj. površina

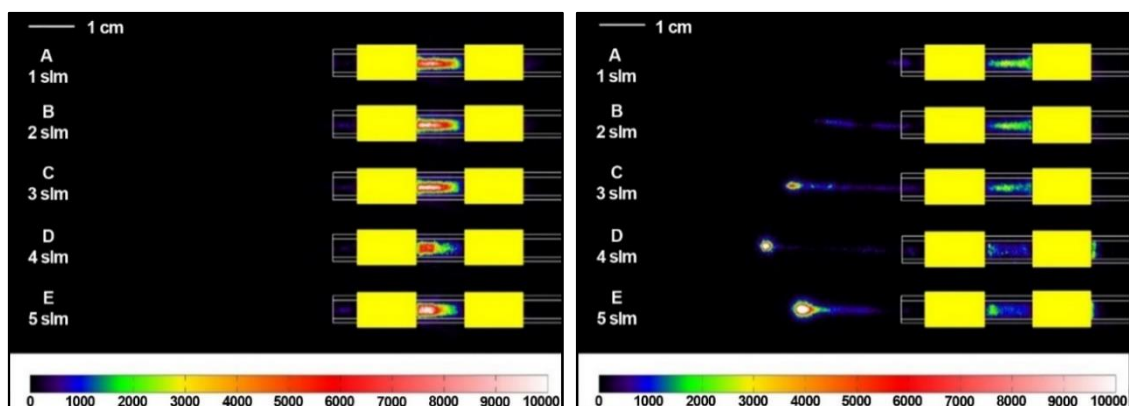
korišćenih elektroda. Trenutak u kome se formira PAPS je 10.4 μs od momenta okidanja komparatora, odnosno nalazi se blizu maksimuma struje i napona. U ovom trenutku imamo i najveću zapreminu plazme između elektroda. Može se primetiti da je PAPS u svakom trenutku spojen sa glavnim delom plazme preko provodnog „tamnog“ kanala koji slabog intenziteta svetlosti (Lu *et al.*, 2014b).



Slika 3.11. Vremenski razloženi snimci plazma mlaza za konfiguraciju „traka“, protok helijuma od 4 slm i snagu 4 W. Na levoj strani su prikazani snimci sa strane, a na desnoj snimci od napred.

Snimci od napred (3.11. desno) su napravljeni tako što je fokus kamere podešen na rub cevčice čime se smanjuje uticaj zračenja koje potiče iz oblasti između elektroda i iz uzemljene elektrode. Gledano od napred plazma metak nije jasno vidljiv zbog fokusiranja na rub cevčice. Na snimcima se vidi da u tačkama A(0.0 μ s) i B(0.8 μ s) unutar elektroda postoji veoma slabo zračenje koje potiče iz prethodnog poluperioda. Plazma je ravnomerno raspoređena unutar cevčice zbog slabog električnog polja koje omogućava difuziju plazme. Kada se pogleda sa strane u ovim tačkama ne vidimo zračenje. U tački C(1.6 μ s) plazma se pojavljuje na desnom rubu napajane elektrode, a zatim se širi ka uzemljenoj elektrodi G(4.8 μ s). Ovi snimci odgovaraju opadajućoj ivici struje i napona. Maksimum zračenja se uočava između elektroda. Unutar napajane elektrode plazma se formira u obliku prstena i dodiruje zidove cevčice, tačke od E(3.2 μ s) do J(7.2 μ s) snimci od napred. Plazma koja dodiruje zidove cevčice nagomilava pozitivne jone u zoni napajane elektrode. Od tačke L(8.8 μ s) do N(10.4 μ s) imamo visok intenzitet svetlosti u cevčici i u tim tačkama imamo formiran PAPS. Nakon tačke N(10.4 μ s) intenzitet zračenja počinje da opada.

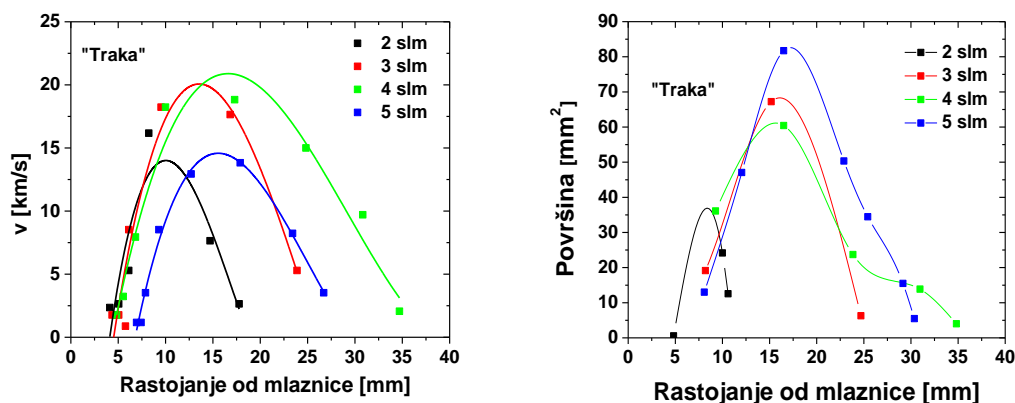
Kako bi ispitali uticaj protoka radnog gasa na formiranje PAPS-a izvršili smo identična snimanja za pet različitih protoka helijuma (1 slm, 2 slm, 3 slm, 4 slm i 5 slm). Na slici 3.12.-levo je prikazano pražnjenje u trenutku E(3.2 μ s), sa slike vidimo da je emisija skoro identična za sve protoke osim za protoke 4 slm i 5 slm za koje je malo pomerena ka napajanoj elektrodi.



Slika 3.12. Poređenje snimaka za pet različitih protoka radnog gasa (1 slm, 2 slm, 3 slm, 4 slm i 5 slm) u trenutku E(3.2 μ s) (levo) i O(11.2 μ s) (desno) i snagu od 4 W.

Uticaj protoka u trenutku formiranja plazma PAPS-a je prikazan na slici 3.12. desno. Trenutak okidanja kamere je $O(11.2 \mu s)$. Sa slike se jasno uočava da se formiranje PAPS-a dobija za protoke veće od određenog nivoa, u našem slučaju je to protok od 3 slm. Dometi koji su dobijeni su veoma slični za protoke 3 slm, 4 slm u 5 slm, dok za protok 1 slm plazma jedva izlazi iz cevčice. Za protok 2 slm plazma izlazi iz cevčice, ali ne dolazi do formiranja plazma PAPS-a. Ovim je pokazano da je jedan od faktora za kontrolu dometa plazma mlaza protok radnog gasa, odnosno helijuma. Generalno sa povećanjem protoka može se povećati domet do određene mere, nakon čega gas prelazi u turbulentno kretanje i domet opada što je pokazano i u glavi 3.1.

Brzine PAPS-a su izračunate za pomeranje leve granice jonizacionog fronta, dok su površine određene za poziciju njenog centra glave PAPS-a koji je (slika 3.13.). Površine su izračunate uz aproksimaciju da PAPS ima oblik elipse ($P = ab\pi$). Brzina plazma paketa za protok 2 slm je manja od brzine za 3 slm i 4 slm i malo veća u odnosu na protok 5 slm. Maksimalni dometi plazme su 18 mm, 24 mm, 35 mm i 27 mm za 2 slm, 3 slm, 4 slm i 5 slm redom. Za protoke 3 slm i 4 slm brzina PAPS-a dostiže 20 km/s na rastojanju od 17 mm od ruba cevčice. Domet plazme počinje da opada za maksimalni protok helijuma zato što dolazi do turbulencija u stubu helijuma. Maksimalna površina PAPS-a je 85 mm^2 i ova površina se postiže na polovini dometa za protok helijuma od 5 slm.



Slika 3.13. Brzine (levo) i površine (desno) PAPS-a za različite protoke i snagu od 4 W.

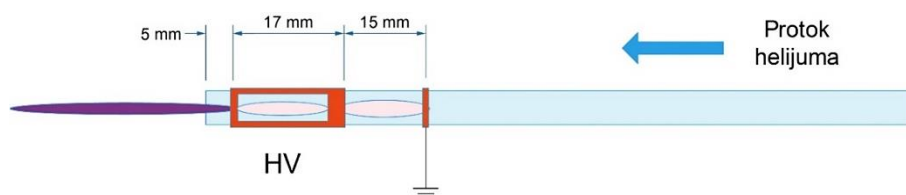
Na kraju ćemo zaključiti da u ovoj konfiguraciji elektroda i napajanja pri manjim protocima odnosno do 2 slm stub helijuma izvan cevčice nije dovoljno dugačak da bi

došlo do formiranja plazma PAPS-a. Optimalni protok za ovu elektrodnu konfiguraciju je 4 slm, zato što se dobija najduži laminarni stub helijuma u kome su koncentracije ostalih komponenti iz vazduha relativno male. Za veće protoke, 5 slm ili više, dolazi do turbulencija u protoku helijuma i domet plazme se smanjuje, zbog mešanja helijuma sa okolnim vazduhom (Karakas, Koklu and Laroussi, 2010).

Pažljivim izborom protoka gasa možemo fino podešavati domet plazme, koji može biti ključan parametar prilikom tretmana nepristupačnih površina. Kontrolisanje maksimalnog dometa plazma mlaza je od suštinske važnosti za tretiranje uskih kanala i kapilara. Reaktivne vrste mogu biti isporučene relativno udaljenim uzorcima a njihova količina se može precizno kontrolisati. Uzorci su zaštićeni od prekomernog zagrevanja ako se nalaze na dovoljno velikom rastojanju od jezgra plazma mlaza.

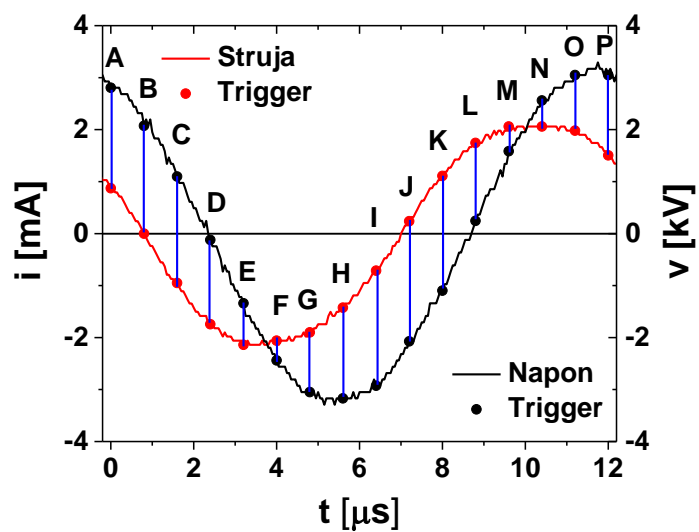
3.2.3. Vremenski razloženi snimci za elektrodu sa prozorom i jednu tanku elektrodu – konfiguracija „Prozor“

Iz ispitivanja prve dve elektrodne konfiguracije („žica“ i „traka“) smo zaključili da površina elektroda igra značajnu ulogu u formiranju i prostiranju PAPS-a. Pošto je veliki deo emisije pražnjenja blokiran netransparentnom bakarnom elektrodom došli smo na ideju da na samoj elektrodi napravimo prorez pravougaonog oblika. Otvor na elektrodi nam je omogućio posmatranje emisije u napajnoj elektrodi, a u isto vreme minimalno poremetio električno polje elektrode. Otvor na elektrodi su koristili Jun-Seok Oh i saradnici, ali u nešto drugačijij konfiguraciji, koristili su kapilaru unutrašnjeg prečnika 1 mm i dve elektrode od bakarne folije sa otvorom duž elektroda od 1 mm kako bi posmatrali pražnjenje u zoni elektroda (Oh, Bryant and Bradley, 2011). Shema plazma mlaza sa elektrodom sa prozorom, konfiguracija „prozor“ prikazana je na slici 3.14.

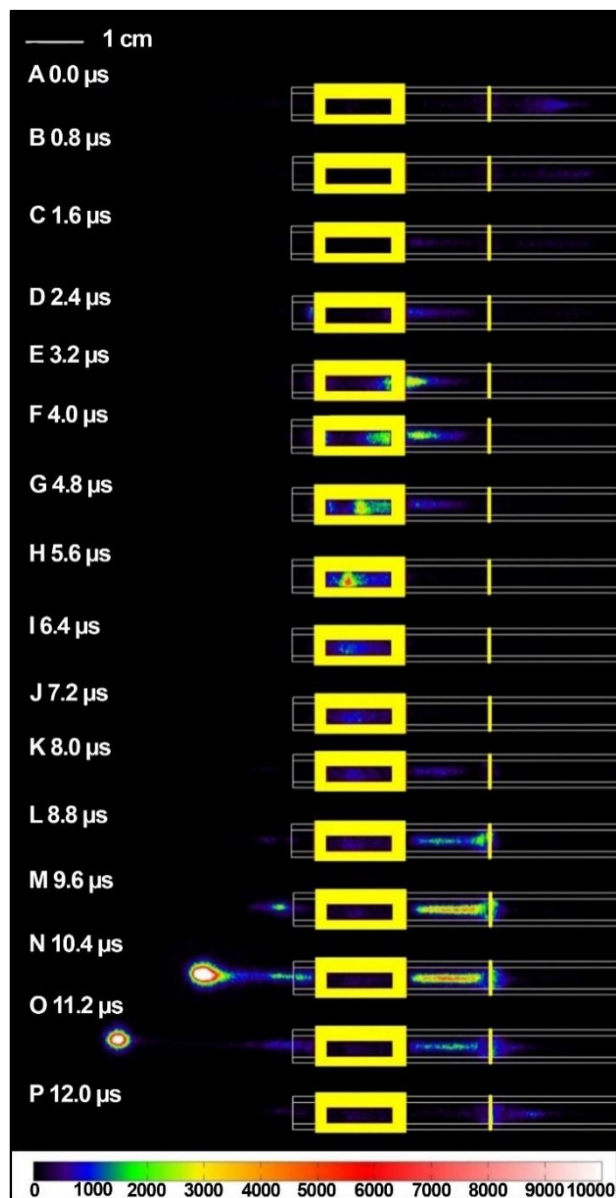


Slika 3.14. Shema plazma mlaza za elektrodnu konfiguraciju „prozor“.

Na slici 3.15. prikazani su strujni i naponski signali za konfiguraciju „prozor“. Tačke okidanja su obeležene slovima od A-P.

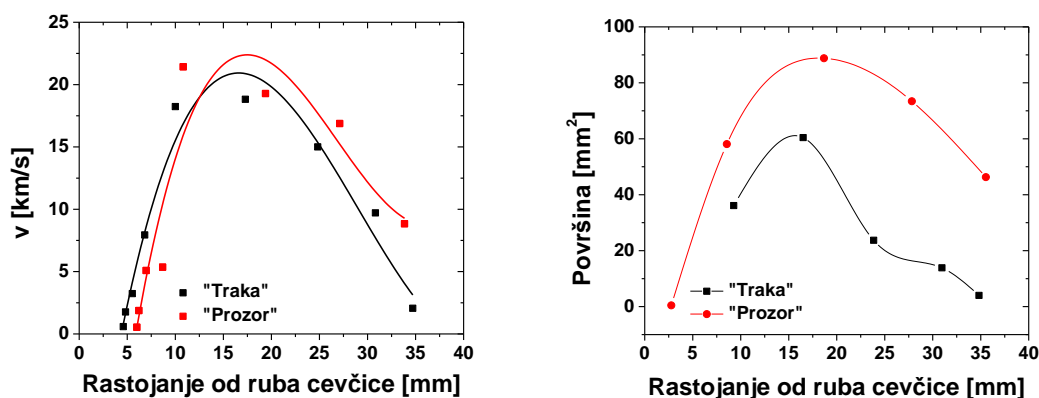


Slika 3.15. Strujni i naponski signali za konfiguraciju „prozor“, protok helijuma 4 slm i snagu 1.6 W.



Slika 3.16. Vremenski razloženi snimci za plazma mlaz sa širokom elektrodom sa prorezom, 4 slm i snagu 1.6 W.

iCCD snimci za ceo pobudni period pražnjenja prikazani su na slici 3.16. I za ovu konfiguraciju, kao i za konfiguraciju „traka“, PAPS se formira kada struja dostigne maksimum. Zanimljivu osobinu možemo videti u vremenskim trenucima G(4.8 μ s) i H(5.6 μ s) gde se uočava kretanje paketa plazme kroz napajanu elektrodu. Ovo ponašanje ćemo jasnije videti i detaljnije analizirati u narednim poglavljima u kojima su korišćene providne elektrode.



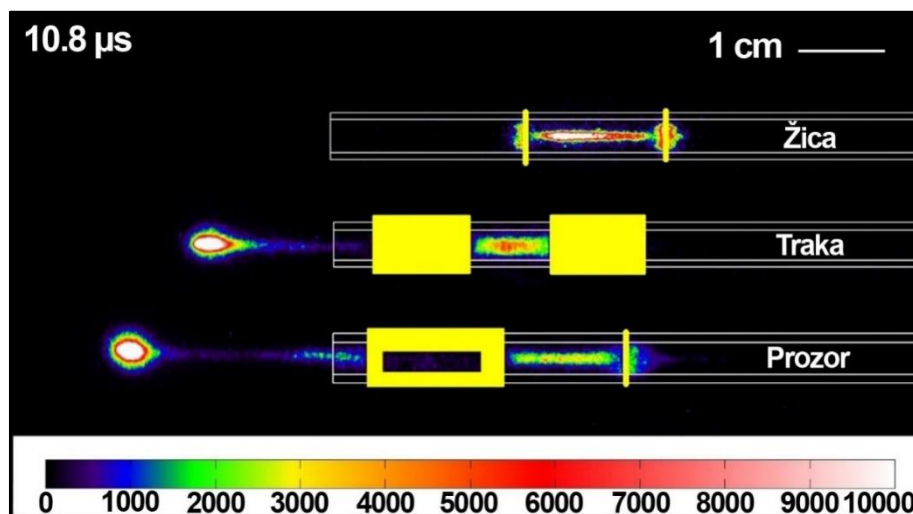
Slika 3.17. Brzine PAPS-a (levo) i površine (desno) za konfiguracije „traka“ i „prozor“, protok radnog gasa od 4 slm.

Kako bi uporedili brzine i veličine plazma metka prikazali smo njihovo poređenje na slici 3.17. Jasno se uočava da konfiguracija „prozor“ daje nešto veće brzine u odnosu na konfiguraciju „traka“ (22 km/s prema 20 km/s). Takođe je i maksimalna površina plazma paketa je veća za konfiguraciju „prozor“ (90 mm² prema 60 mm²). Položaj na kome plazma dostiže svoju najveću površinu se nešto razlikuje (25 mm prema 18 mm). Domet za obe konfiguracije je praktično isti i iznosi 35 mm (grafik levo). Poznavanje ponašanja plazme u elektrodama je veoma važno za razumevanje mehanizma formiranja PAPS-a.

3.2.4. Poređenje vremenski razloženih snimaka za tri konfiguracije

Poređenje iCCD snimaka za sve tri konfiguracije bakarnih elektroda („žica“, „traka“ i „prozor“) je prikazano na slici 3.18. Sve tri konfiguracije su snimljene za isto kašnjenje kamere od 10.8 μs, protok helijuma od 4 slm i napon od 6.5 kV_{pp}. Sa slike se vidi da samo u slučaju elektrodne konfiguracije „žica“ PAPS nije prisutan, dok se za elektrodne konfiguracije „traka“ i „prozor“ formira. Takođe se može primetiti izvesno kašnjenje paketa plazme za konfiguraciju „traka“ u odnosu na konfiguraciju „prozor“ što bi moglo biti posledica različitog rastojanja između elektroda i samim tim različite kapacitivnosti plazme. Takođe se može primetiti da se plazma ne prostire u oblasti iza uzemljene elektrode. Može se zaključiti da uzemljena elektroda nema uticaja na prostiranje plazme u oblasti izvan cevčice. Za konfiguraciju „žica“ plazma je

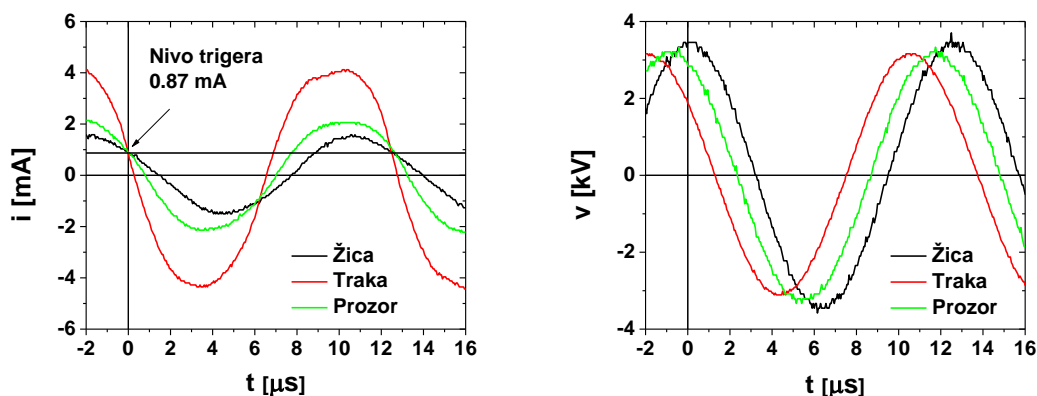
koncentrisana na oblast između elektroda i ne prostire se ni levo i desno, praktično je ograničena elektrodama. Ključni faktor koji određuje formiranje PAPS-a je širina elektroda.



Slika 3.18. Poređenje vremenski razloženih snimaka za tri različite konfiguracije bakarnih elektroda.

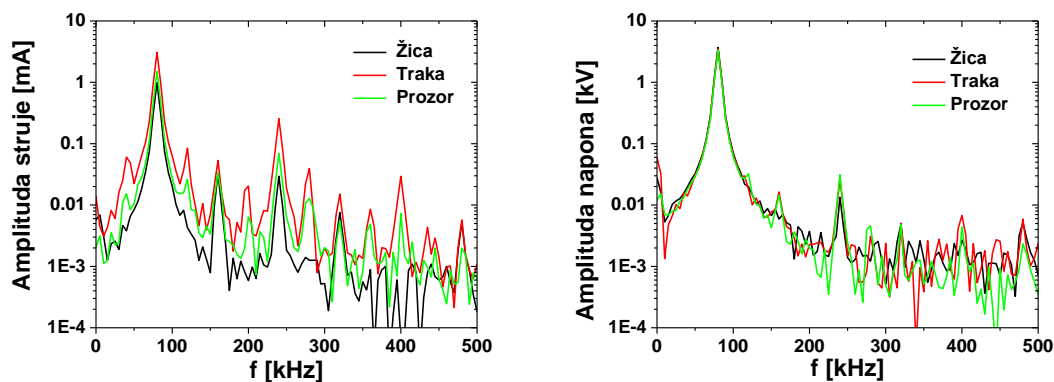
3.2.5. Strujno naponske karakteristike za tri geometrije bakarnih elektroda

U ovom delu smo ispitili uticaj elektrodne konfiguracije na električne karakteristike sistema i plazme. Ispitane su tri elektrodne konfiguracije „žica“, „traka“ i „prozor“ opisane u prethodnim poglavljima. Strujni i naponski signali su prikazani na slici 3.19. Amplituda napona za sve tri konfiguracije je praktično ista i iznosi 6 kV. Strujni signali za konfiguracije „traka“ i „prozor“ su skoro u fazi dok je strujni signal za konfiguraciju „žica“ malo pomeren, što je posledica znatno većeg rastojanja između elektroda i promene kapacitivnosti elektrodnog sistema. Struje kod ove tri konfiguracije se međusobno znatno razlikuju i iznose 1.5 mA, 4 mA i 2 mA za „žicu“, „traku“ i „prozor“ redom.



Slika 3.19. Signali struje i napona za tri različite elektrodne konfiguracije, protok radnog gasa 4 slm i snagu od 4 W.

Sastav naponskih i strujnih signala u frekventnom domenu su prikazani na slici 3.20. Vrednosti pojedinih harmonika su u tabelama 3.1. i 3.2. Ulazni signal je sinusni frekvencije 80 kHz, a frekventni spektri pokazuju da se pored osnovnog harmonika na 80 kHz pojavljuju i viši harmonici na 120 kHz, 200 kHz, 280 kHz i 360 kHz.



Slika 3.20. Strujni i naponski FFT (Welch) harmonici za tri različite elektrodne konfiguracije i protok radnog gasa od 4 slm i snagu 4 W.

Tabela 3.1. Amplitude struje u mA posle FFT (Welch) transformacije za tri različite elektrodne konfiguracije.

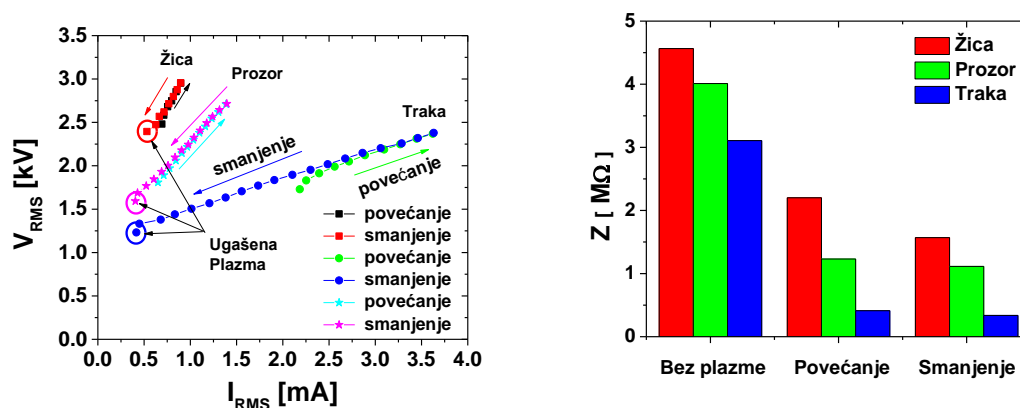
f [kHz]	80	(120)	160	(200)	240	(280)	320	(360)	400
Žica	0.986	-	0.033	-	0.029	-	0.008	-	-
Traka	3.077	0.084	0.053	0.02	0.256	0.039	0.015	0.008	0.029
Prozor	1.498	0.026	0.033	0.006	0.069	0.013	0.006	0.005	0.007

Tabela 3.2. Amplitude napona u kV posle FFT (Welch) transformacije za tri različite elektrodne konfiguracije.

f [kHz]	80	(120)	160	(200)	240	(280)	320	(360)	400
Žica	3.702	-	-	-	0.013	-	0.004	-	-
Traka	3.504	-	0.016	-	0.026	-	0.005	-	0.007
Prozor	3.362	0.032	0.014	-	0.031	0.005	0.005	-	0.004

Promena u elektrodnoj konfiguraciji ne utiče značajnije na amplitudu naponskog signala na 80 kHz. Međutim, u slučaju struje situacija je znatno drugačija na 80 kHz (0.985 mA – „žica“; 3.077 mA – „traka“; 1.497 mA – „prozor“). Struja pražnjenja je povezana sa površinom elektroda i njihovim međusobnim rastojanjem. I ostali harmonici veoma zavise od elektrodne konfiguracije. Posebno se ističe odsustvo harmonika za konfiguraciju „žica“ na 120 kHz, 200 kHz, 280 kHz, 360 kHz i 400 kHz. Poređenjem podataka iz tabela vidimo da su harmonici za napon na 200 kHz, 280 kHz, 360 kHz potpuno izostali u odnosu na struju. Kao što je i očekivano, glavna komponenta signala je na 80 kHz.

Pored razlike u ponašanju struje i napona u frekventnom domenu primećena je i značajna pojava histerezis efekta za sve tri konfiguracije plazma mlaza. Histerezis efekat je prikazan na strujno-naponskim krivama 3.21. Ova pojava je najjače izražena za konfiguraciju „traka“, nešto slabije za konfiguraciju „prozor“, dok je za konfiguraciju „žica“ jedva uočljiva. Impedanse sistema za tri konfiguracije su prikazane na slici 3.21. desno. Nagibi krivih su ukupne impedanse sistema i odnose se $Z_{žica} > Z_{prozor} > Z_{traka}$ za sva tri slučaja, bez plazme, sa plazmom prilikom povećavanja i smanjivanja snage. Kada plazma nije formirana impedansa je uglavnom kapacitivna i određena je međuelektrodnim rastojanjem. Kada se plazma formira ukupna impedansa se smanji jer se uvodi impedansa plazme koja je kompleksna i može se predstaviti RLC kolom (Lieberman and Lichtenberg, 2005). Najveći pad u impedansi sistema imamo za konfiguraciju „traka“.



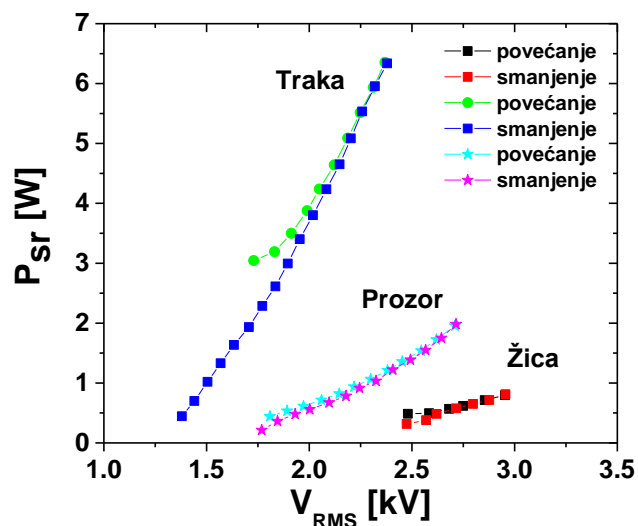
Slika 3.21. Strujno-naponske karakteristike (levo) i impedanse (desno) za tri elektrodne konfiguracije i protok radnog gasa od 4 slm.

Plazma ostaje formirana za napone od 1.2 kV prilikom smanjivanja snage za konfiguraciju „traka“. Minimalna struja potrebna za održavanje pražnjenja je 0.5 mA za konfiguraciju „traka“ i „prozor“, dok je za konfiguraciju „žica“ nešto veća, oko 0.7 mA prilikom smanjivanja predate snage. Vrednosti struja, napona i impedansi su prikazani sumirano u tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Opsezi vrednosti V_{RMS} , I_{RMS} i Z za tri elektrodne konfiguracije.

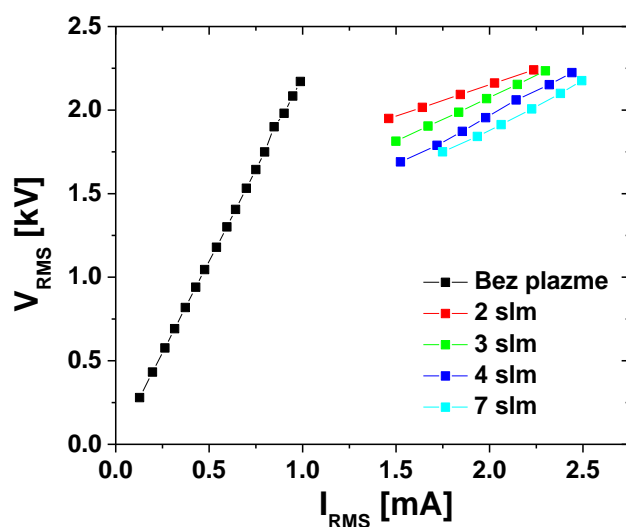
Konfiguracija	V_{RMS}	V_{RMS}	I_{RMS}	I_{RMS}	Impedansa	Impedansa
	(povećanje)	(smanjenje)	(povećanje)	(smanjenje)	(povećanje)	(smanjenje)
	[kV]	[kV]	[mA]	[mA]	[MΩ]	[MΩ]
Žica	2.5-3.0	3.0 – 2.5	0.7 – 0.9	0.9 – 0.7	2.2	1.6
Traka	1.7-2.4	2.4 – 1.4	2.2 – 3.6	3.6 – 0.5	0.4	0.3
Prozor	1.8 – 2.7	2.7 – 1.8	0.6 – 1.4	1.4 – 0.5	1.2	1.1

Promena u impedansi se uočava zajedno sa histerezis efektom. Impedanse se menjaju sa 2.2 MΩ, 0.4 MΩ i 1.2 MΩ na 1.6 MΩ, 0.3 MΩ i 1.1 MΩ, za konfiguraciju „žica“, „traka“ i „prozor“.



Slika 3.22. Srednje snage predate plazmi za tri elektrodne konfiguracije „žica“, „traka“ i „prozor“, protok helijuma od 4 slm.

Kada je upitanju snaga predata plazmi, vidimo da je opseg snaga za konfiguraciju „traka“ najveći i kreće se od 0.4 W-6.5 W, dok je najmanji za konfiguracija „žica“. Očigledno je da snaga predata plazmi zavisi od površine obe elektrode plazma mlaza, tj. od struje koja protiče u kolu.



Slika 3.23. Strujno naponske karakteristike za konfiguraciju „traka“ za različite protoke helijuma.

Uticaj protoka helijuma na strujno naponske karakteristike za konfiguraciju „traka“ je prikazan na slici 3.23. Impedanse sistema kada helijum nije prisutan iznosi $2.2 \text{ M}\Omega$. Ako pretpostavimo da je sistem dominantno kapacitivan, može se izračunati da je kapacitivnost elektrodnog sistema oko 0.5 pF . Formiranje plazme dovodi do promene nagiba strujno naponskih krivih i promene impedanse koja je u opsegu od $0.3 \text{ M}\Omega$ do $0.6 \text{ M}\Omega$ za protoke od 2 slm do 7 slm.

3.3. Zaključak

U ovom poglavlju je urađena detaljna optička i električna karakterizacija atmosferskog plazma mlaza za tri konfiguracije metalnih elektroda „žica“, „traka“ i „prozor“. Vremenski razloženim merenjima plazma mlaza dobili smo evoluciju profila emisije unutar i izvan staklene cevčice. Iz snimaka se vidi da se PAPS formira za konfiguracije „traka“ i „prozor“, dok se za konfiguraciju „žica“ PAPS nije formirao. Za konfiguraciju „žica“ nismo mogli da dobijemo formiranje PAPS-a iako smo varirali rastojanje između elektroda i primenjeni napon na napajanoj elektrodi. Za ovu konfiguraciju plazma je uvek bila ograničena između dve elektrode ili je dolazilo do varničenja sa spoljne strane staklene cevčice u slučaju kada bi približili napajanu i uzemljenu elektrodu. Pojava proboja sa spoljne strane cevčice je izbegnuta povećanjem udaljenosti između elektroda. U ispitivanoj konfiguraciji „žica“ dalje povećanje primenjene snage bi možda moglo dovesti do formiranja PAPS-a, ali to nismo mogli da testiramo jer smo u eksperimentima već išli do maksimalnog napona koje može dati naše pojačalo.

Sa druge strane, povećavanjem površine napajane elektrode povećava se struja, pa samim tim i snaga predata pražnjenju. Zbog toga je oblast sa istim potencijalom unutar napajane elektrode potrebna za formiranje PAPS-a za fiksni primenjeni napon (maksimalni raspoloživi napon koje može dati napajanje). Ovo je u skladu sa zaključcima drugih autora koji se mogu naći u literaturi. Laroussi *et al* tvrde da je snaga koju plazma mlaz dobija od napajanja, a koja pali pražnjenje „delimično akumulirana“ na zidovima cevčice u zoni elektroda u vidu površinskog naelektrisanja. Ovo akumulirano naelektrisanje se kasnije koristi za paljenje sukcesivnih pražnjenja (Karakas, Akman and Laroussi, 2012b). U slučaju „žičane“ konfiguracije, oblast u kojoj se akumulira

naelektrisanje nije dovoljno veliko da bi se akumulirala dovoljna energija potrebna za formiranje PAPS-a. Za formiranje PAPS-a ključnu ulogu igraju metastabili plemenitih gasova koji Penning-ovom jonizacijom pobuđuju azot i druge molekule iz atmosfere (Li *et al.*, 2010). Prelazak sa fenomenološkog opisa na kvantitativan opis zahteva kompjutersko modelovanje plazma mlazeva.

Ovde smo takođe odredili i strujno naponske karakteristike plazma mlaza i snage predate plazmi. Za sve tri konfiguracije je primećena pojava histerezisa koji je najizraženiji za konfiguraciju „traka“. Najveći radni opseg je dobijen za konfiguraciju „traka“ od 0.5 W do 6.5 W, pa je stoga ova konfiguracija najpovoljnija za primene u tretmanima.

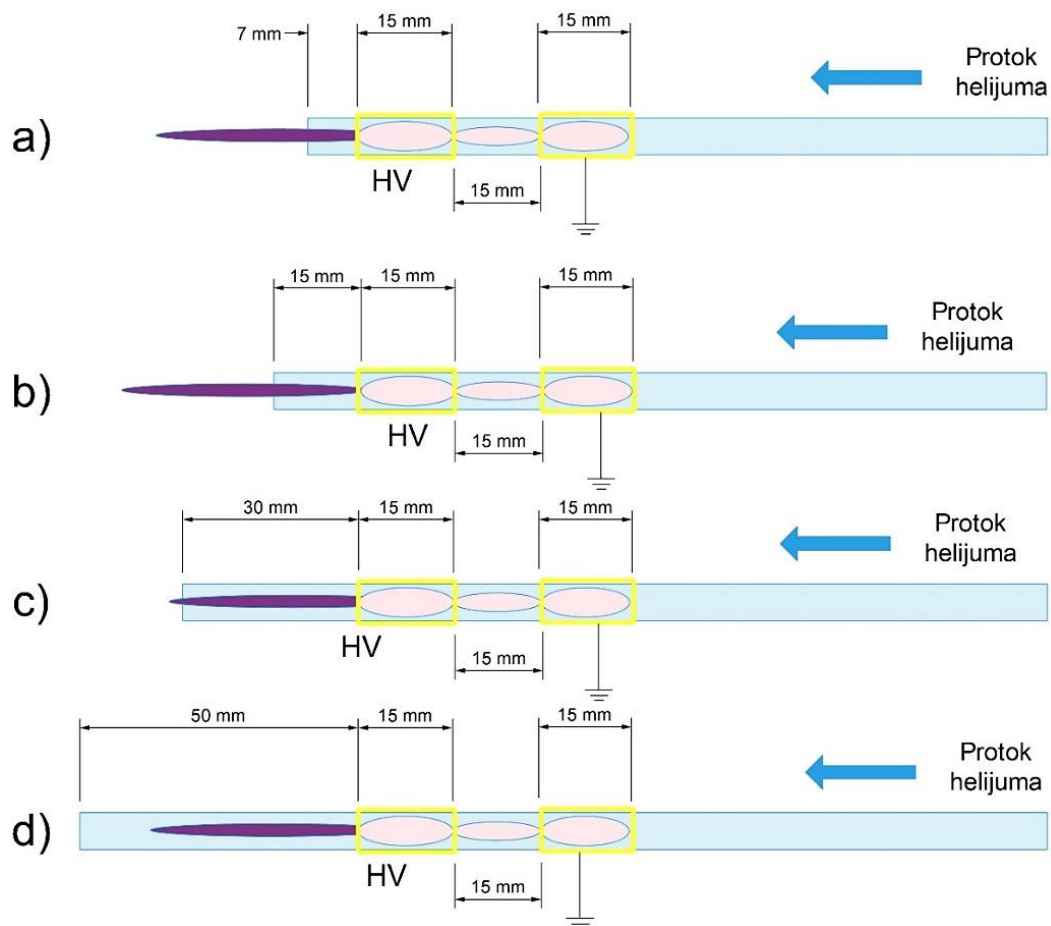
Na kraju ovog poglavlja se može zaključiti da konfiguracija elektroda snažno utiče na režim rada plazma mlaza, a posebno širina napajane elektrode. Ako je konfiguracija povoljna, odnosno širina napajane elektrode dovoljno velika PAPS se generiše i prostire izvan cevčice u suprotonom ne dolazi do njegovog formiranja. Takođe smo pokazali da električno polje uzemljene elektrode (kada je ona postavljena pre napajane elektrode) nema uticaja na formiranje PAPS-a izvan cevčice.

4. Vremenski razloženi snimci dvoelektrodnog plazma mlaza sa providnim elektrodama i optimizacija elektrodne geometrije

U ovom poglavlju je ispitivana konfiguracija u kojoj smo umesto bakarnih elektroda koristili elektrode koje su napravljene od plastične folije sa provodnim slojem od indijum kalaj oksida (engl. *ITO-indium tin oxide*), koji je pored toga što je provodan u isto vreme i transparentan za svetlost. Transparentne elektrode su nam omogućile da posmatramo razvoj pražnjenja u zoni elektroda. Takođe smo ispitivanjem različitih elektrodnih geometrija došli do optimalne elektrodne konfiguracije za koju je plazma mlaz najstabilniji i postiže najveći domet.

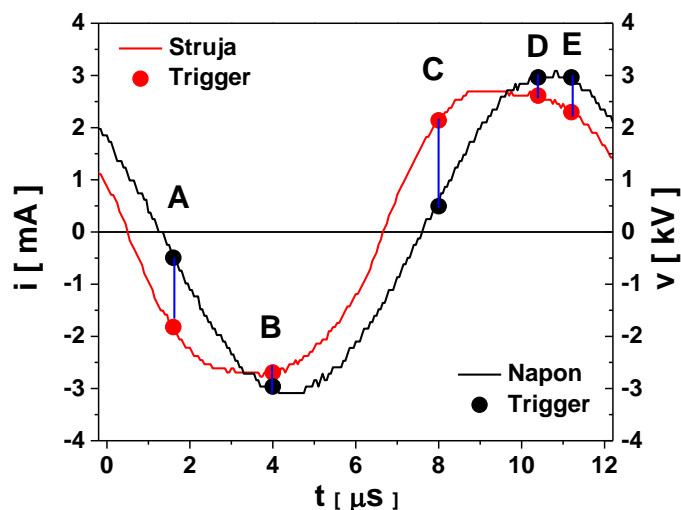
4.1. Pomeranje elektroda od ruba cevčice plazma mlaza

Ovo poglavlje je posvećeno ispitivanju uticaja rastojanja napajane elektrode od ruba cevčice na formiranje i domet plazma mlaza, a međuelektrodno rastojanje je održavano konstantnim. Elektrode su pomerane na sledeća rastojanja 7 mm, 15 mm, 30 mm i 50 mm, a međuelektrodno rastojanje je držano konstantnim na 15 mm (Slika 4.1.). Pomeranje napajane elektrode od ruba cevčice dovodi do promena u električnom polju u kojem se prostire plazma mlaz sa leve strane napajane elektrode. Konstantnim rastojanjem između elektroda održava se konstantno polje u međuelektrodnoj oblasti čime je obezbeđena stabilnost pražnjenja. Za sve prikazane konfiguracije u ovom poglavlju primenjeni napon je bio 6 kV_{p-p} , protok radnog gasa 4 slm i snaga predata plazmi 4 W.



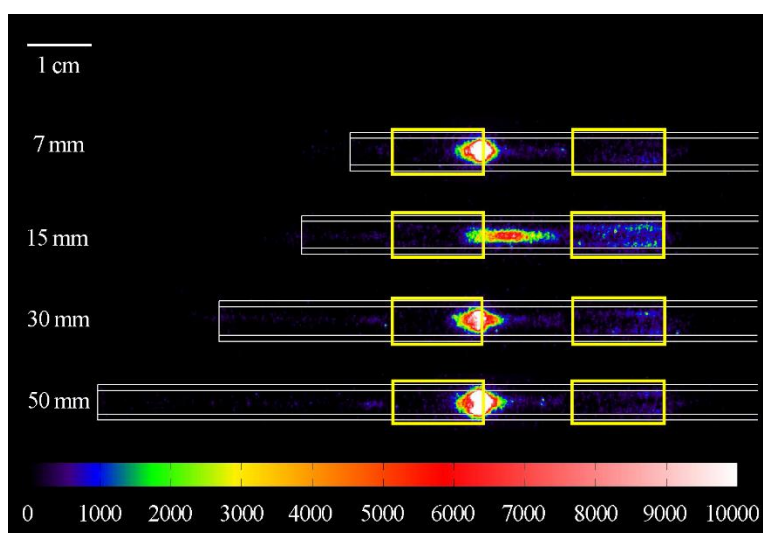
Slika 4.1. Pomeranje elektroda od ruba cevčice za konstantno međuelektrodno rastojanje od 15 mm. Rastojanja napajane elektrode od ruba su: a) 7 mm; b) 15 mm; c) 30 mm; d) 50 mm.

Za vremenski razloženo snimanje odabrali smo pet karakterističnih tačaka koje dobro opisuju ponašanje plazme tokom jednog perioda pobudnog signala. Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere A(1.6 μ s), B(4.0 μ s), C(8.0 μ s), D(10.4 μ s) i E(11.2 μ s) su prikazani na slici 4.2. Prikazani signali se odnose na konfiguraciju 15 mm-15 mm, odnosno napajana elektroda je na 15 mm ruba cevčice a međuelektrodno rastojanje je 15 mm.



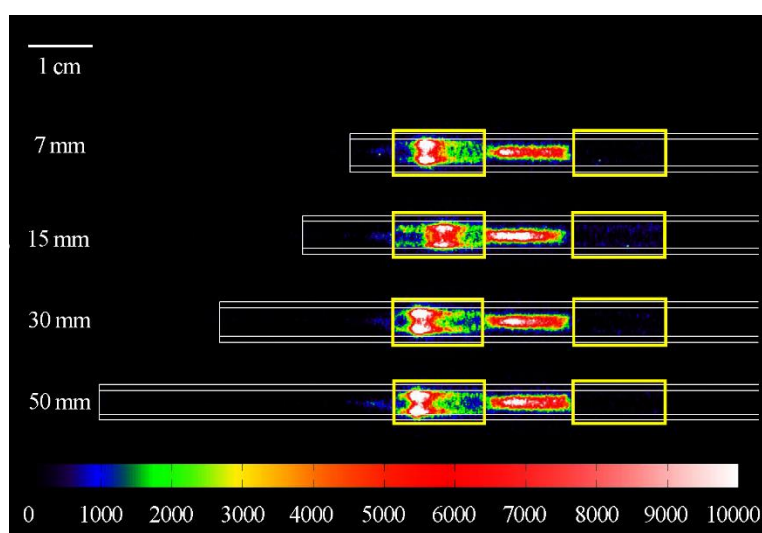
Slika 4.2. Strujni i naponski signali sa tačkama okidanja kamere za konfiguraciju 15-15 mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

Na slici 4.3. prikazani su intenziteti emisije za tačku okidanja kamere A(1.6 μ s). U ovom trenutku struja i napon su negativni. Struja je na polovini vrednosti amplitude, a napon je prošao kroz nulu i počeo da opada. Sa snimaka se može videti da se plazma formira na desnoj ivici napajane elektrode koja je u tom trenutku na negativnom potencijalu (trenutna katoda). Plazma dodiruje zidove cevčice, osim za konfiguraciju 15 mm-15 mm kod koje se nalazi samo u centru cevčice. U ovoj konfiguraciji plazma je razvučena i malo pomerena ka uzemljenoj elektrodi.



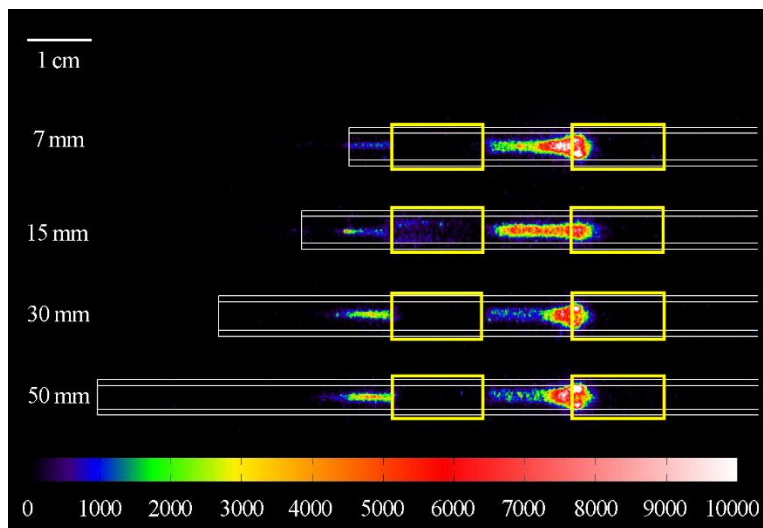
Slika 4.3. iCCD snimci za vremenski trenutak A(1.6 μ s), protok 4 slm i snagu od 4 W.

Ako se pomeramo dalje duž perioda možemo da vidimo da se ekscitacija i jonizacija gasa koje indukuju emisiju svetlosti pomeraju. Jonizacioni front se kreće unutar napajane elektrode od desne ivice ka levoj. Struja i napon su ovde na minimumu. Ovo prostiranje se odvija u pravcu protoka radnog gasa i odgovara vremenskom trenutku B(4.0 μ s) (Slika 4.4.). Od trenutka kada plazma uđe u napajanu elektrodu ona klizi po površini staklene cevčice. Drugi deo plazme zauzima prostor između elektroda i ne pomera se. Plazma koja se nalazi u međuelektrodnom prostoru obezbeđuje proticanje struje. Vidimo da u ovom vremenskom trenutku za konfiguraciju 15 mm-15 mm plazma „kasni“ u odnosu na ostale konfiguracije.



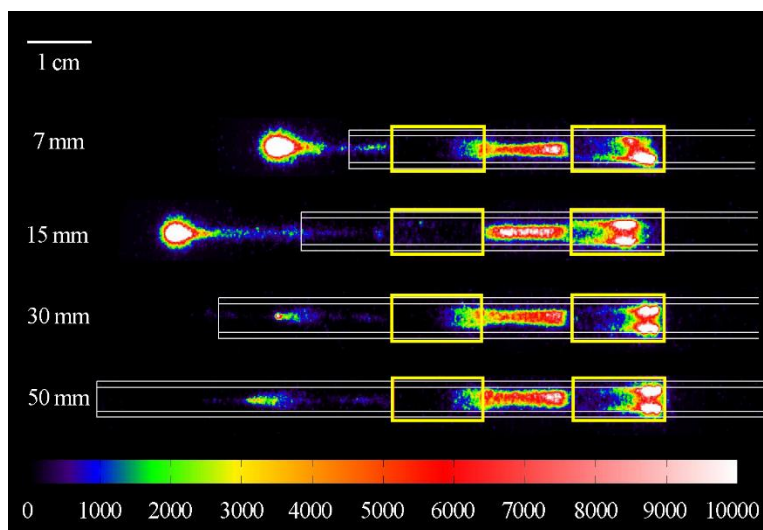
Slika 4.4. iCCD snimci za vremenski trenutak B(4.0 μ s), protok 4 slm i snagu 4 W.

Za vremenski trenutak C(8.0 μ s) struja i napon su u pozitivnom poluperiodu pobudnog signala i počeli su da rastu (Slika 4.5.). Sada se napajana elektroda nalazi na pozitivnom potencijalu (trenutna anoda), dok je uzemljena elektroda na negativnijem potencijalu (trenutna katoda). Emisija svetlosti je koncentrisana na levom rubu uzemljene elektrode, a jedan deo se prostire ka napajanoj elektrodi, prolazi kroz napajanu elektrodu i izlazi sa druge strane.



Slika 4.5. iCCD snimci za vremenski trenutak C(8.0 μ s), protok 4 slm i snagu 4 W.

U trenutku kada napon dostigne maksimalnu vrednost dolazi do formiranja PAPS-a za rastojanja 7 mm i 15 mm i on se kreće izvan cevčice kroz okolni vazduh (Slika 4.6.).

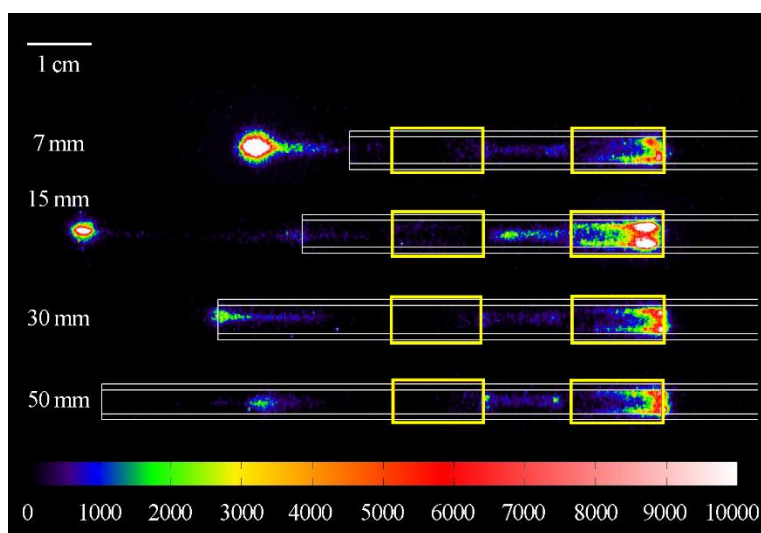


Slika 4.6. iCCD snimci za vremenski trenutak D (10.4 μ s), protok 4 slm i snagu 4 W.

Za veća rastojanja (30 mm i 50 mm) plazma još uvek ne uspeva da izađe iz cevčice i na slici se vidi samo prekursor PAPS-a u vidu slabog svetljenja koji se kreće unutar cevčice. Sa slika se takođe vidi da je PAPS za konfiguraciju 15 mm-15 mm prešao veće rastojanje u odnosu na ostale konfiguracije. Takođe je očigledno da u trenutku izlaska plazme iz cevčice, ona počinje da se kreće brže i postaje svetlija. Bez obzira na to kako

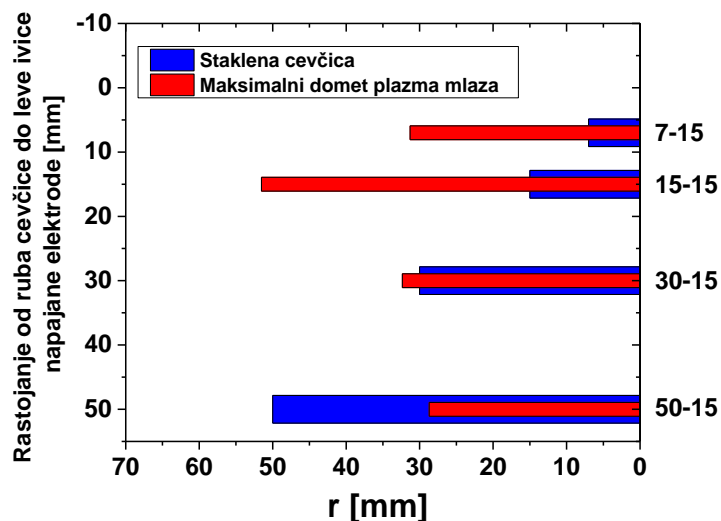
se objašnjava povećanje svetljenja plazme, bilo Peningovom jonizacijom (Li *et al.*, 2010; Boeuf, Yang and Pitchford, 2013; Maletić *et al.*, 2017) bilo raspodelom električnog polja (Sakiyama *et al.*, 2010), za formiranje svetlije oblasti potrebno je izvesno vreme nakon izlaska iz cevi. PAPS je povezan sa ostatkom plazme u svakom trenutku, čime je podržano strimersko objašnjenje plazma mlaza (Boeuf, Yang and Pitchford, 2013).

Na samom kraju PAPS dostiže maksimalne domete u trenutku posle prolaska kroz maksimum struje i napona tačka E (11.2 μ s) (Slika 4.7.). Sa slike vidimo da plazma nije uspela da izađe iz cevčice za najveće rastojanje od 50 mm, dok je za rastojanje 30 mm uspela da stigne samo do ruba. Za rastojanja 7 mm i 15 mm jonizacioni front je nastavio da se kreće kroz atmosferu.



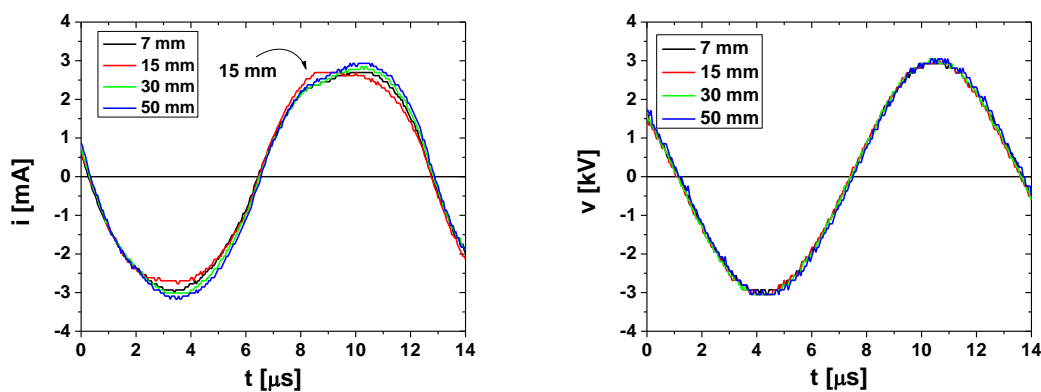
Slika 4.7. iCCD snimci za vremenski trenutak E(11.2 μ s), protok 4 slm i snagu 4 W.

Kako bi jasnije prikazali maksimalne domete, na grafiku smo ih prikazali u vidu crvenih stubića dok su cevčice obeležene plavim stubićima (Slika 4.8.). Maksimalni dometi su uzimani za vrednosti emisije veće od 2000 a. j. na iCCD snimcima. Sa slika se vidi se da je najveći domet postignut za konfiguraciju 15 mm-15 mm, dok je za ostale tri konfiguracije praktično isti ako se domet računa od levog ruba napajane elektrode. Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da ukoliko se koriste elektrode 15 mm širine i međuelektrodno rastojanje napajane i uzemljene elektrode od 15 mm, za postizanje maksimalnog dometa treba postaviti napajanu elektrodu takođe na 15 mm od ruba cevčice.



Slika 4.8. Maksimalni dometi plazma mlaza, protok 4 slm i snagu 4 W.

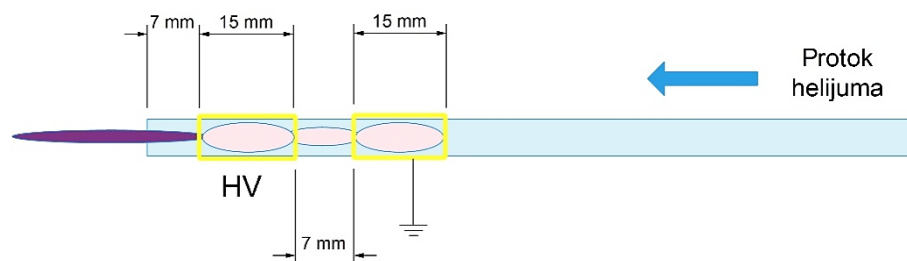
Glavnu razliku u električnim karakteristikama između konfiguracije 15 mm-15 mm i ostalih elektrodnih konfiguracija smo primetili u strujnom signalu (Slika 4.9.). Strujni signal je nešto manji po amplitudi a njegov oblik deformisan i pojavljuje se pik u pozitivnom poluperiodu, blizu maksimuma. Pik u strujnom signalu ukazuje na povećanje struje u trenutku pojave PAPS-a. Što se tiče naponskog signala primećujemo da nema značajnije razlike između signala za različite konfiguracije.



Slika 4.9. Poređenje strujnih (levo) i naponskih (desno) signala za četiri različite konfiguracije elektroda (7 mm, 15 mm, 30 mm i 50 mm), protok 4 slm i snagu 4 W.

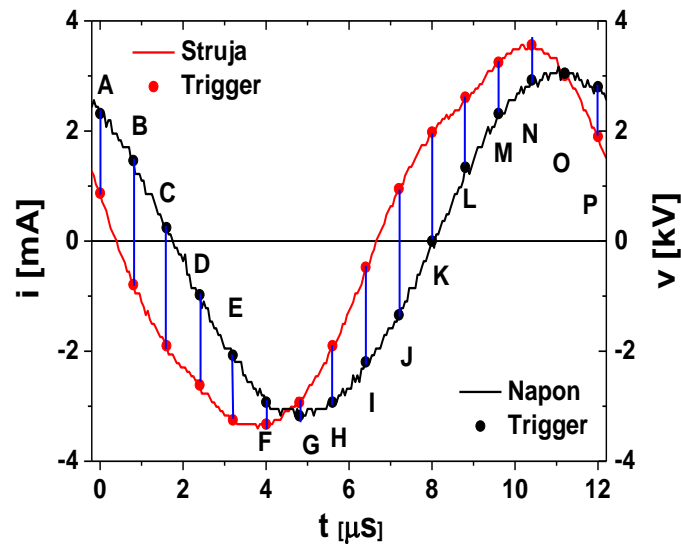
4.2. Pomeranje elektroda od ruba cevčice i menjanje međuelektrodnog rastojanja

U prethodnom poglavlju smo prikazali da je najveći domet PAPS-a primećen za konfiguraciju 15 mm-15 mm. Kako bi ispitali uticaj međusobnog položaja elektroda i njihove udaljenosti od ruba cevčice na formiranje i prostiranje PAPS-a urađena su snimanja za četiri konfiguracije gde su ova rastojanja iznosila: 7 mm-7 mm, 10 mm-10 mm, 15 mm-15 mm i 20 mm-20 mm (sheme su prikazane na odgovarajućim slikama 4.10, 4.13, 4.16 i 4.19.). Snaga predata plazmi za sve četiri konfiguracije je bila 4 W, a protok helijuma 4 slm. Na slici ispod (Slika 4.10.) je prikazana eksperimentalna shema za konfiguraciju 7 mm-7 mm.



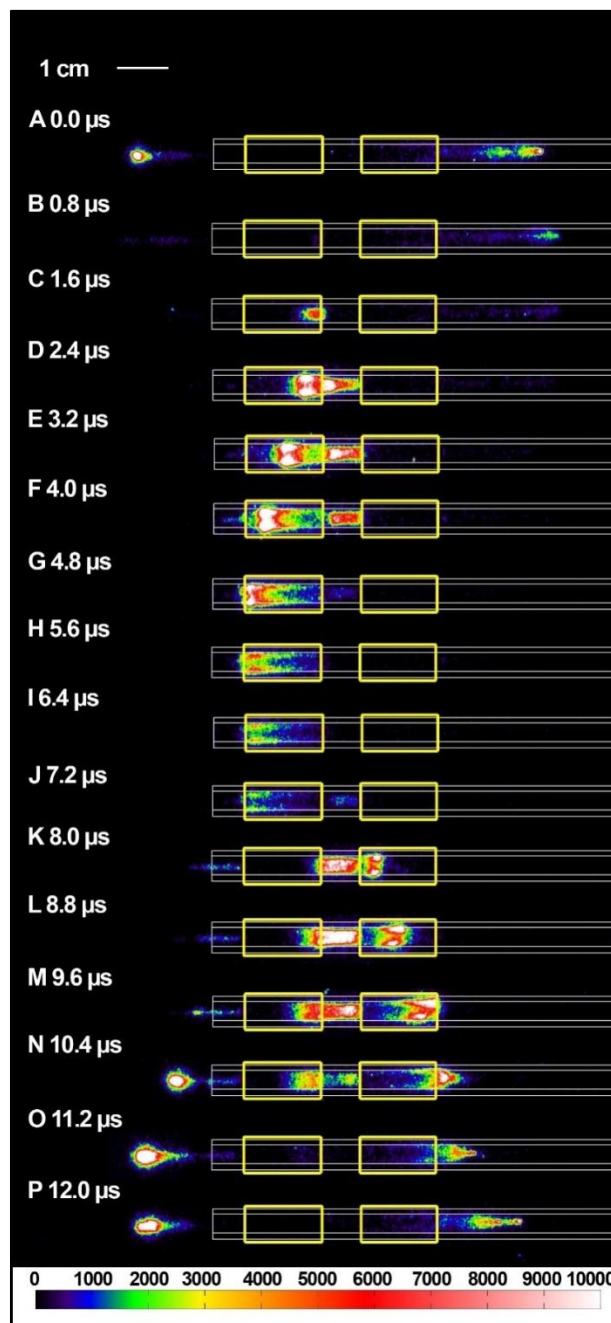
Slika 4.10. Shema plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 7 mm-7 mm.

Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere za konfiguraciju 7 mm-7 mm su dati na slici 4.11. Na slici se vidi značajna deformacija strujnog signala u pozitivnom poluperiodu, koja je ovde više izražena u odnosu na druge elektrodne konfiguracije zbog malog međuelektrodnog rastojanja.



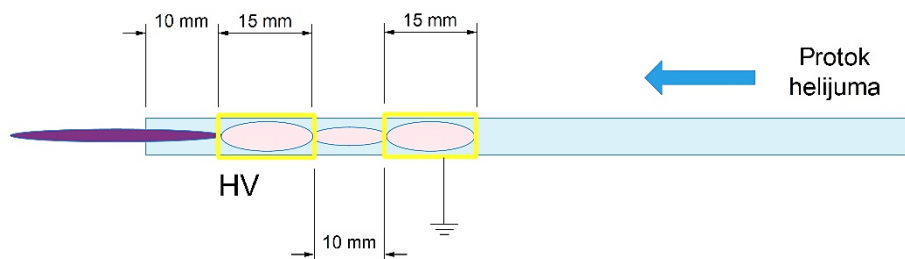
Slika 4.11. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 7 mm-7 mm, protok 4 slm i snagu 4 W.

Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju 7 mm-7 mm su prikazani na slici 4.12. Sa slike se vidi da se prostiranje plazme razlikuje u odnosu na slučaj kada je međuelektrodno rastojanje 15 mm. U ovom slučaju plazma se prostire i preko oblasti uzemljene elektrode suprotno od protoka helijuma. U cevčici se formira strimer koji počinje da se kreće u pozitivnom poluperiodu u isto vreme kada se formira i strimer koji se kreće ka izlazu iz staklene cevčice, odnosno levo od napajane elektrode. Prilikom izlaska plazme iz cevčice formira se PAPS čiji je domet znatno manji od PAPS-a za konfiguraciju 15 mm-15 mm. Dometi u cevčici i izvan nje ako se mere u odnosu na rub napajane i uzemljene elektrode su jednaki i iznose 25 mm.



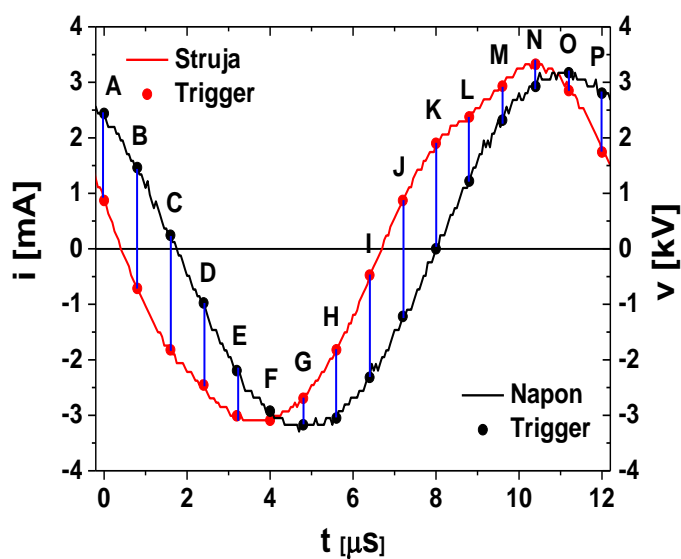
Slika 4.12. Vremenski razloženi iCCD snimci za elektrodnu konfiguraciju 7 mm-7 mm, protok 4slm i snagu 4 W.

Shema za konfiguraciju 10 mm-10 mm je prikazana na slici 4.13. U ovom slučaju su rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice i međuelektrodno rastojanje po 10 mm.

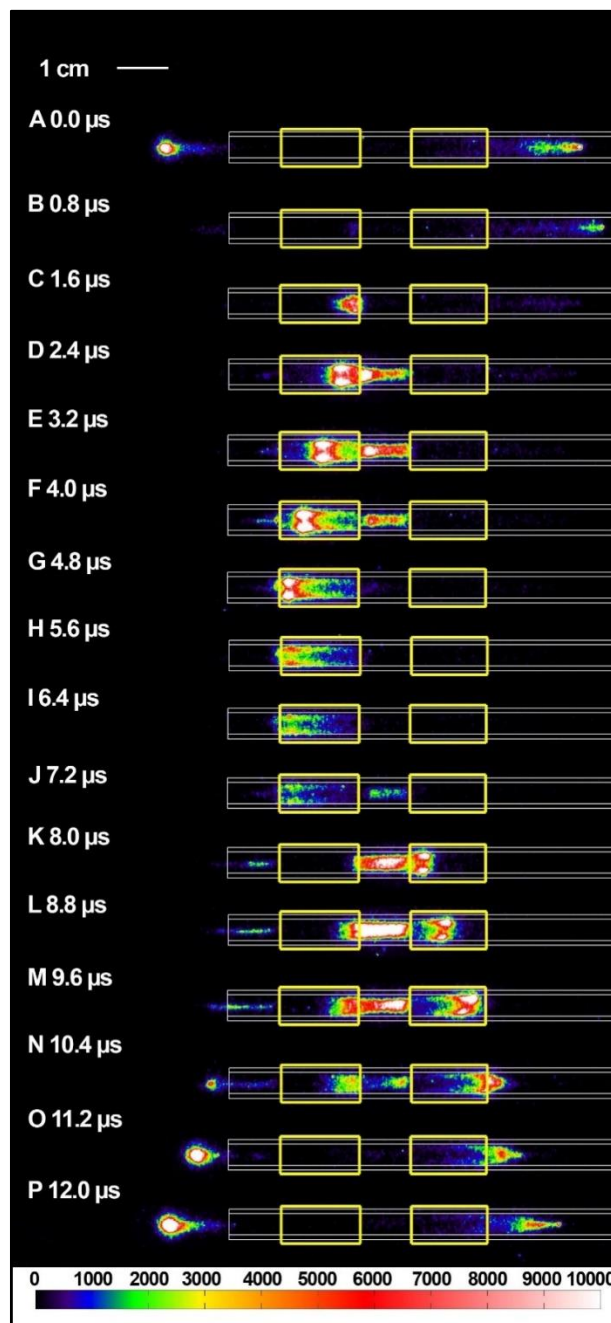


Slika 4.13. Shema plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 10 mm-10 mm.

Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja za konfiguraciju 10 mm-10 mm su prikazani na slici 4.14.



Slika 4.14. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 10 mm-10 mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

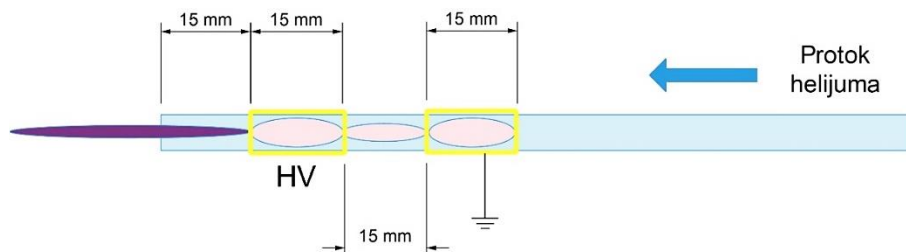


Slika 4.15. Vremenski razloženi iCCD snimci za elektrodnu konfiguraciju 10 mm-10 mm, protok helijuma 4slm i snagu 4 W.

Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju 10 mm-10 mm su prikazani na slici 4.15. I ovde, kao i za konfiguraciju 7 mm-7 mm, nastaje u cevčici strimer u pozitivnom poluperiodu, koji se kreće suprotno od protoka helijuma. Ovo prostiranje plazme sa desne strane uzemljene elektrode je najverovatnije posledica većeg električnog polja između uzemljene i napajane elektrode, koje omogućava da naelektrisane čestice prikupe

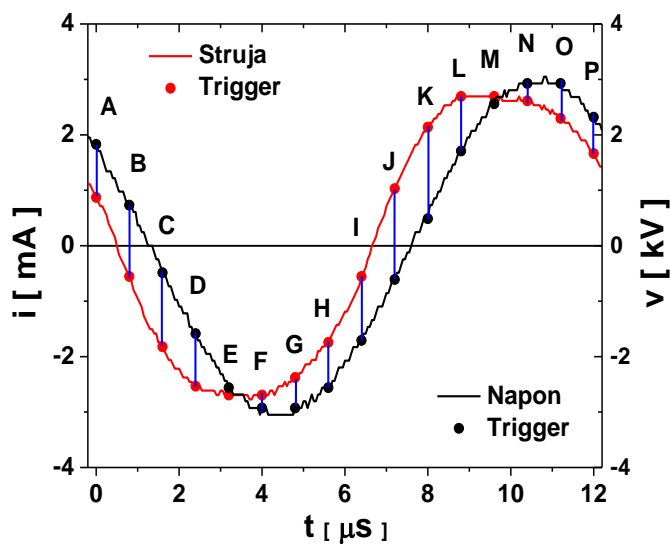
dovoljno energije da mogu da se kreću u suprotnom smeru od kretanja radnog gasa u oblasti u kojoj je električno polje malo.

Shema plazma mlaza za rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice i međuelektrodno rastojanje od 15 mm je prikazano na slici 4.16.



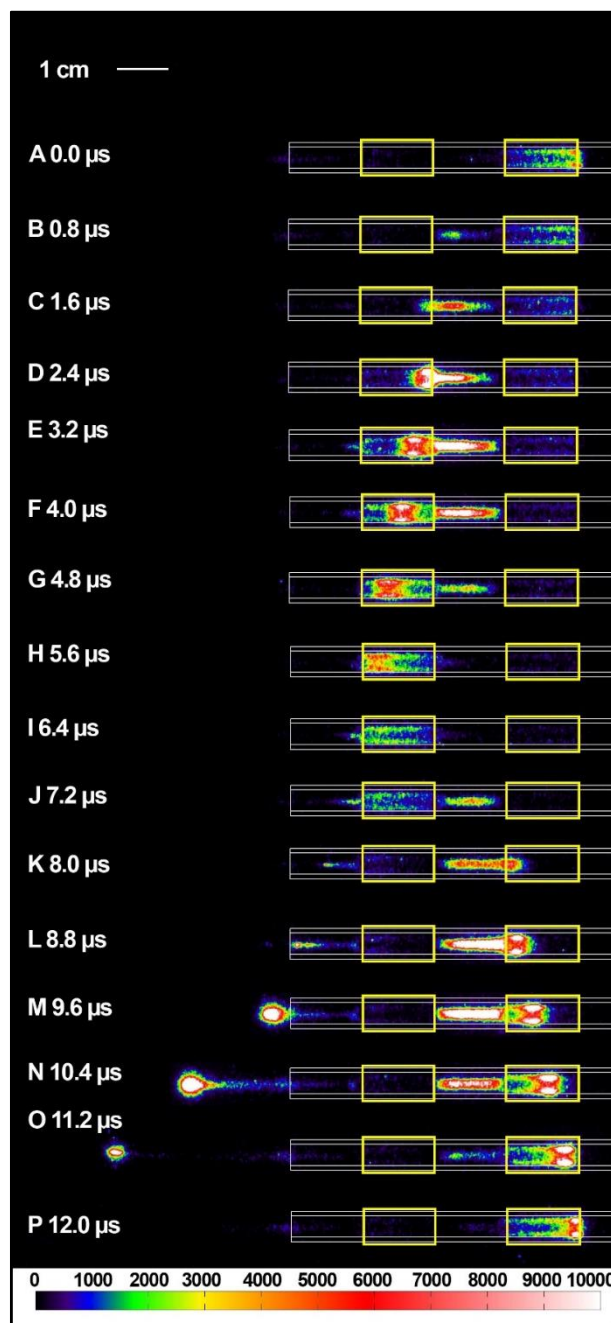
Slika 4.16. Shema plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 15 mm-15 mm.

Strujni i naponski signali za konfiguraciju 15 mm-15 mm su prikazani na slici 4.17. Sa slike se može primetiti da je strujni signal deformisan, ali drugačijeg oblika u odnosu na prethodne dve konfiguracije.



Slika 4.17. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 15 mm-15 mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

Vremenski razloženi snimci su prikazani na slici 4.18. Snimanje počinje sa tačkom A(0.0 μs) u kojoj su napon i struja pozitivni, emisija svetlosti se nalazi u uzemljenoj elektrodi i potiče iz prethodnog poluperioda.

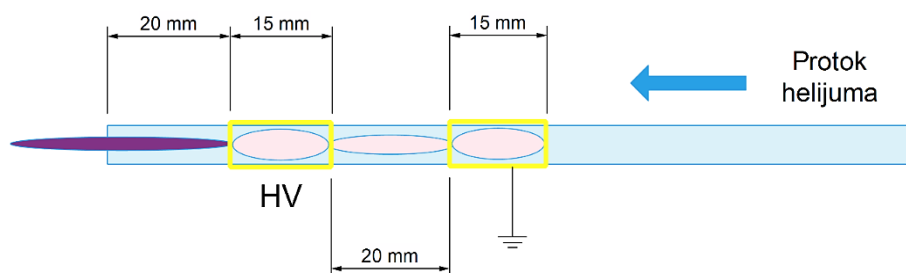


Slika 4.18. Vremenski razloženi iCCD snimci za elektrodnu konfiguraciju 15 mm-15 mm, protok helijuma 4slm i snagu 4 W.

U sledećoj tački B(0.8 μs) struja je negativna a napon je i dalje pozitivan, pražnjenje se gasi u uzemljenoj elektrodi a počinje da se formira na levom rubu napajane elektrode.

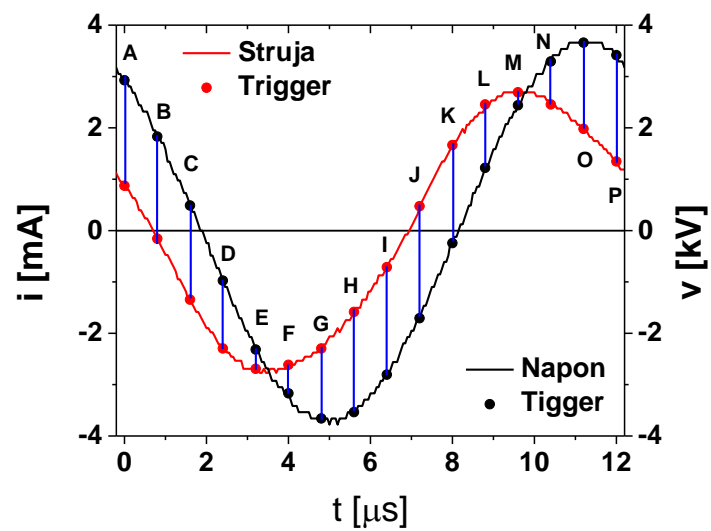
U ovoj tački pražnjenje još ne ulazi u napajanu elektrodu. U tački C(1.6 μ s) intenzitet pražnjenja se povećava i ispunjava centralni deo cevčice, struja i napon su negativni i smanjuju se. Od tačaka D(2.4 μ s) do tačke H(5.6 μ s) jonizacioni front se kreće po zidovima cevčice u zoni napajane elektrode. U pozitivnom poluperiodu od tačke K(8.0 μ s) do P(12.0 μ s) pražnjenje se formira u uzemljenoj elektrodi i u oblasti izvan cevčice gde se formira PAPS.

Na slici 4.19. je prikazana elektrodna konfiguracija 20 mm-20 mm, rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice je 20 mm, a rastojanje između elektroda je 20 mm. Rastojanje od 20 mm između elektroda je maksimalno rastojanje pri kome smo mogli da dobijemo stabilno pražnjenje, daljim povećanjem elektroda pražnjenje nije moglo da se formira.

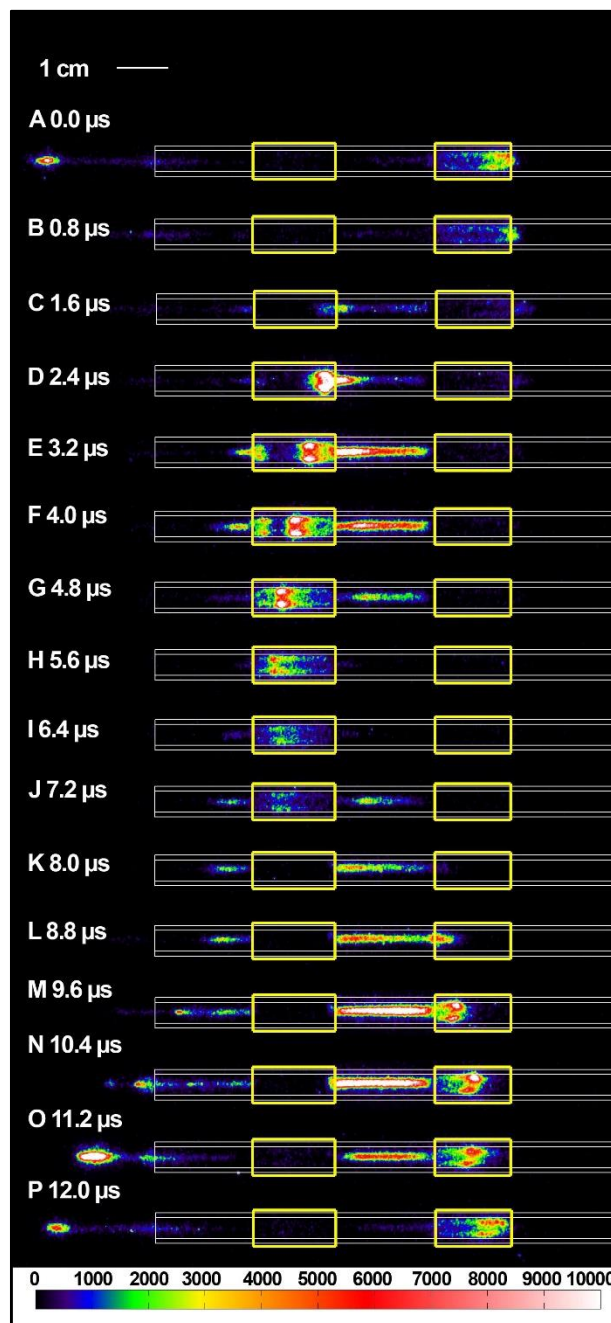


Slika 4.19. Shema plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 20 mm-20 mm.

Na slici 4.20. su prikazani strujno naponski signali za konfiguraciju 20 mm-20 mm. U ovom slučaju strujni signal nije deformisan, već je čista sinusoida. Ovakvo ponašanje se može objasniti velikim rastojanjem između napajane i uzemljene elektrode gde povećanje struje prilikom formiranja PAPS-a nije bilo moguće detektovati.



Slika 4.20. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa providnim elektrodama za konfiguraciju 20 mm-20 mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

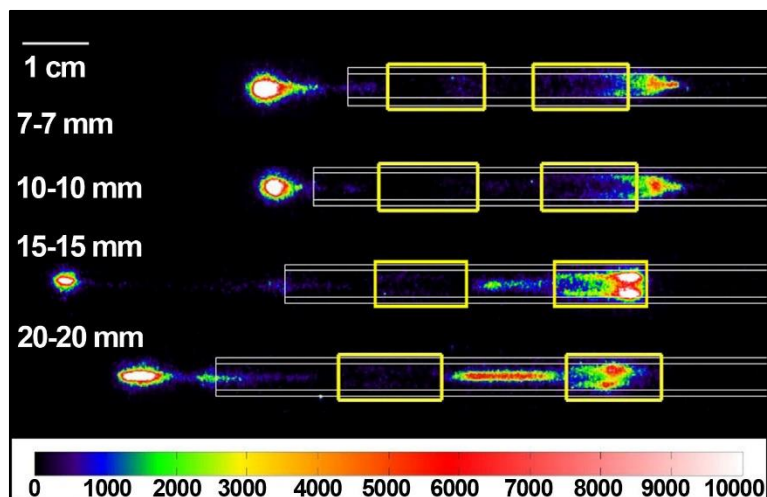


Slika 4.21. Vremenski razloženi iCCD snimci za elektrodnu konfiguraciju 20 mm-20 mm, protok 4slm i snagu 4 W.

Na slici 4.21. prikazani su vremenski razloženi snimci plazma mlaza za konfiguraciju 20 mm-20 mm. Prostiranje plazme je slično kao i kod prethodnih konfiguracija, ali ima par razlika. U negativnom poluperiodu u napajanoj elektrodi se formiraju dva jonizaciona fronta u tačkama E(3.2 μs) i F(4.0 μs) koji se kreću jedan ka

drugom. Prilikom izlaska iz cevčice PAPS nije loptastog oblika već je izdužen i domet mu je znatno manji u odnosu na konfiguraciju 15 mm-15 mm.

Sada ćemo uporediti sve četiri konfiguracije u tački O(11.2 μ s) kada se formira PAPS (Slika 4.22.). U ovom trenutku za konfiguracije 7 mm-7 mm i 20 mm-20 mm domet PAPS-a je skoro isti i iznosi 15 mm. Najmanji domet PAPS-a smo dobili za konfiguraciju 10 mm-10 mm oko 10 mm. Pri datim eksperimentalnim uslovima najveći domet plazme smo dobili za konfiguraciju 15 mm-15 mm i iznosi 35 mm. Takođe je zanimljivo da je za konfiguracije 7 mm-7 mm i 10 mm-10 mm plazma prešla rub uzemljene elektrode i formirala prekursor PAPS-a koji se prostire suprotno od protoka radnog gasa. Za konfiguraciju 20 mm-20 mm plazma u uzemljenoj elektrodi ne uspeva da stigne do desne ivice uzemljene elektrode, što je posledica nedovoljnog električnog polja koje se uspostavlja između elektroda u ovakvoj elektrodnoj geometriji. Iz ovih rezultata se može zaključiti da je za formiranje stabilnog plazma mlaza optimalna konfiguracija 15 mm-15 mm.

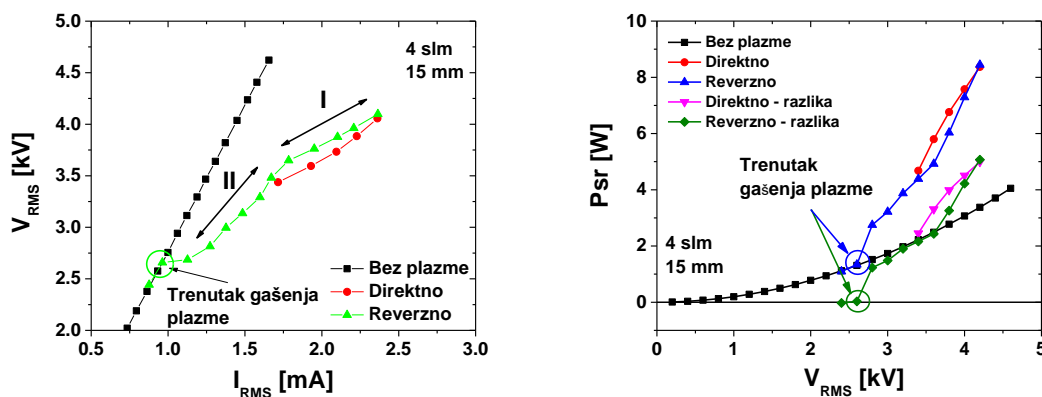


Slika 4.22. iCCD snimci za vremenski trenutak 11.2 μ s, protok 4 slm i snagu 4 W.

4.3. Optimalna elektrodna konfiguracija plazma mlaza

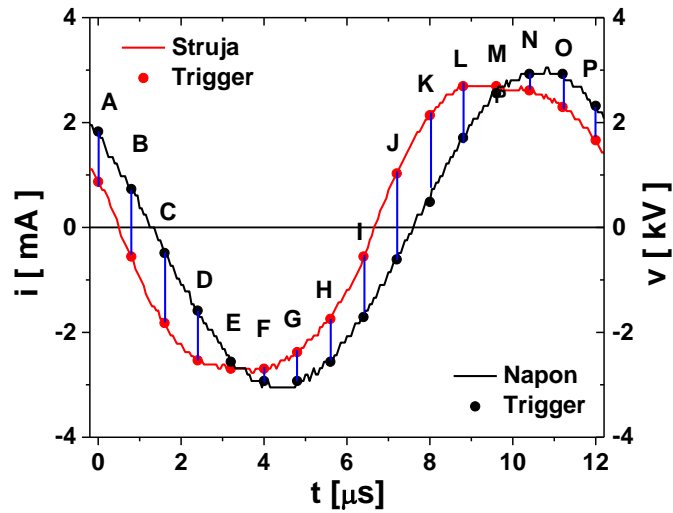
U ovom poglavlju ćemo se detaljnije baviti optimalnom konfiguracijom koju smo definisali u poglavljima 4.1. i 4.2. Shema optimalne konfiguracije je ranije prikazana na slici 4.16. u prethodnom poglavlju. Napajana elektroda se nalazi na 15 mm od ruba cevčice a međuelektrodno rastojanje je 15 mm, konfiguracija 15 mm-15 mm.

Na slici 4.23. su prikazane strujno naponske karakteristike (levo) i srednje snage (desno) za konfiguraciju 15 mm-15 mm. Impedansa elektrodne konfiguracije bez plazme je $2.80 \text{ M}\Omega$. Prilikom postepenog povećavanja snage za formiranu plazmu impedansa je $0.95 \text{ M}\Omega$ (crvena linija) a prilikom smanjivanja snage impedansa je prvo $0.77 \text{ M}\Omega$ (oblast I), a zatim menja nagib i postaje duplo veća i iznosi $1.50 \text{ M}\Omega$ (oblast II). I ovde je prisutna značajna pojava histerezis efekta. Snage predate plazmi su bile do 5 W kada se oduzme snaga sistema bez plazme. Na oba grafika prikazan je trenutak gašenja plazme.



Slika 4.23. Strujno naponske karakteristike (levo) i srednje snage (desno) za konfiguraciju 15 mm-15 mm, protok helijuma 4 slm.

Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja za konfiguraciju 15 mm-15 mm su prikazani na slici 4.24. Korak sa kojim su snimljene vremenski razložene slike je $0.8 \mu\text{s}$. Protok radnog gasa je 4 slm, a snaga predata plazmi 4 W.

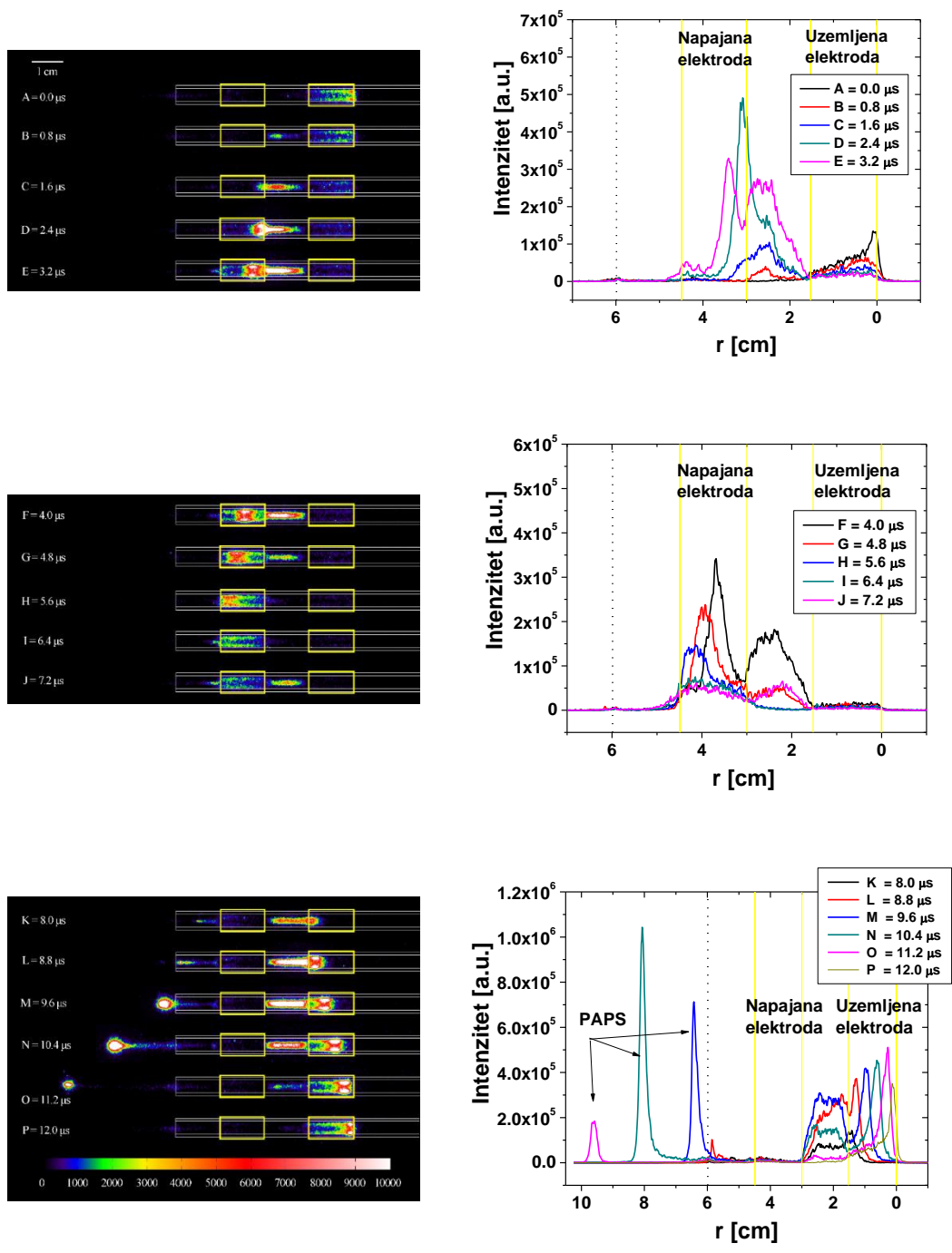


Slika 4.24. Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja za konfiguraciju 15 mm-15 mm, protok helijuma 4 slm i snaga 4 W.

U opadajućem delu strujnog i naponskog signala A(0.0 μ s) – E(3.2 μ s) na slici 4.25. u tački A(0.0 μ s) emisija svetlosti iz plazme se nalazi u uzemljenoj elektrodi i potiče iz prethodnog perioda. Kako struja i napon opadaju uspostavlja se pražnjenje između napajane i uzemljene elektrode, tačke B(0.8 μ s) i C(1.6 μ s). U tački D(2.4 μ s) jonizacioni front ulazi u napajanu elektrodu i poprima prstenasti oblik dok se kreće po unutrašnjem zidu cevčice u zoni elektrode. Iz aksijalnih profila se može videti da je intenzitet emisije najveći u trenutku dolaska jonizacionog fronta do napajane elektrode u tački D(2.4 μ s). Jonizacioni front se prostire u istom smeru kao i protok radnog gasa. Treba još primetiti da se intenzitet emisije smanjuje kako se jonizacioni front prostire duž napajane elektrode i zaustavlja se u tački J(7.2 μ s) na levoj ivici napajane elektrode. Nakon ove tačke intenzitet emisije u napajanoj elektrodi se smanjuje i potpuno gubi u tački K(8.0 μ s).

iCCD snimci

Aksijalni profili



Slika 4.25. Vremenski razloženi iCCD snimci (levo) i aksijalni profili emisije (desno) za vremena kašnjenja od A(0 μ s)–P(12.0 μ s), za protok helijuma od 4 slm i snagu od 4 W.

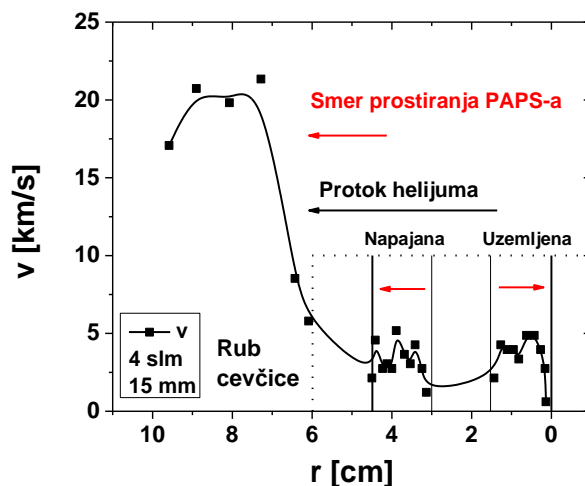
Kako se plazma gasi u napajanoj elektrodi, postepeno se formira u oblasti između elektroda. U pozitivnom delu poluperioda strujnog signala se nalaze tačke

J(7.2 μ s)-P(12.0 μ s). Sa povećanjem strujnog signala plazma iz međuelektrodne oblasti počinje da se širi ka uzemljenoj elektrodi u koju ulazi u tački K(8.0 μ s). I u ovom slučaju plazma se kreće duž zidova staklene cevčice, ali u ovom slučaju kretanje jonizacionog fronta je suprotno od protoka radnog gasa. Takođe, intenzitet emisije se povećava kako front propagira unutar uzemljene elektrode K(8.0 μ s)-O(11.2 μ s). U isto vreme kada jonizacioni front ulazi u uzemljenu elektrodu, deo pražnjenja počinje da se udaljava od napajane elektrode ka izlazu iz cevčice, tačka K(8.0 μ s). U ovom vremenskom trenutku se formira prekursor PAPS-a, koji će preći u brzi paket plazme prilikom izlaska iz cevčice i formirati PAPS u kontaktu sa atmosferom. Prilikom izlaska iz cevčice emisija svetlosti značajno raste i zapremina pražnjenja se povećava. Glavni razlog za brzo povećanje emisije i zapremine plazme je kontakt pobuđenih helijumovih atoma i metastabila sa molekulima azota i kiseonika iz atmosfere (Sakiyama *et al.*, 2010; Naidis and Walsh, 2013). Dok sa druge strane izgleda da promena u električnom polju izvan cevčice obezbeđuje veći pad potencijala i tako značajno povećava jonizaciju.

Maksimum intenziteta emisije je dobijen za tačku N(10.4 μ s). Može se primetiti da maksimum emisije odgovara polovini ukupnog dometa plazma mlaza. U ovoj tački se jasno vidi da je jonizacioni front i dalje spojen sa glavnim pražnjenjem u cevčici preko provodnog repa koji je veoma malog intenziteta. Sa daljim pomeranjem jonizacionog fronta, intenzitet svetljenja provodnog repa se smanjuje. Kada je jonizacioni front na maksimalnom rastojanju od ruba cevčice intenzitet emisije paketa je najmanji, a rep plazme je tanak. Ovde treba naglasiti da je paket plazme konstantno spojen sa glavnim pražnjenjem preko dugačkog repa plazme nalik na strimer.

Brzine emisionog pika su određene iz vremenski razloženih profila emisije za različita vremena (Slika 4.26.). Praćene su brzine jonizacionog fronta i u cevčici i van nje. Brzina kojom se jonizacioni front kreće u napajanoj elektrodi počinje da raste od desne ivice elektrode. Na oko 4 mm od ivice, dostiže brzinu od 4 km/s. Brzina je skoro konstantna dok jonizacioni front ne stigne do leve ivice elektrode. Pravac prostiranja jonizacionog talasa je u smeru protoka helijuma. U uzemljenoj elektrodi jonizacioni talas počinje da ubrzava od leve ivice elektrode i dostiže brzinu od 4 km/s na 2 mm od desne ivice elektrode. Nakon toga, počinje ponovo da ubrzava i dostiže maksimalnu brzinu od 5 km/s. Propagiranje jonizacionog talasa unutar uzemljene elektrode je suprotno protoku

helijuma. Protok helijuma nema značajniji uticaj na brzinu prostiranja jonizacionog talasa. Fotoni i elektroni su odgovorni za brzo prostiranje jonizacionog talasa.

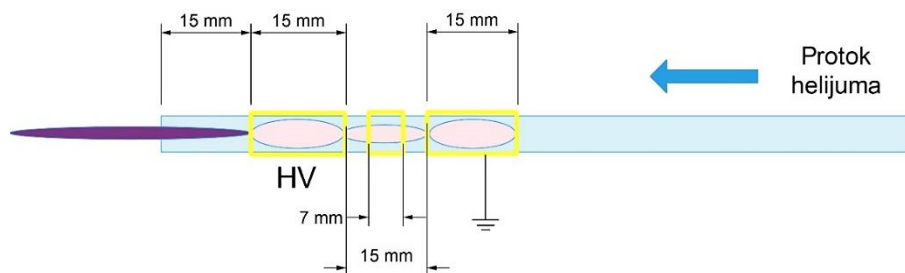


Slika 4.26. Brzine jonizacionog fronta plazma mlaza u cevčici i van nje za konfiguraciju 15 mm-15 mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

Brzina izvan staklene cevčice raste od njenog ruba i dostiže maksimum od 20 km/s na rastojanju od 15 mm od ruba cevčice. Brzina prostiranja je konstantna od 15 mm do 30 mm, a nakon toga opada. Veće brzine izvan cevčice u odnosu na brzine u cevčici su posledica promene sastava medijuma kroz koji se prostire plazma. U cevčici imamo čist helijum, a izvan nje vazduh koji difunduje u protok helijuma i meša se pa dovodi do kompleksnih hemijskih reakcija u plazmi koje stvaraju aktivne vrste pogodne za plazma tretmane (W. Van Gaens and Bogaerts, 2013; Hasan and Bradley, 2015).

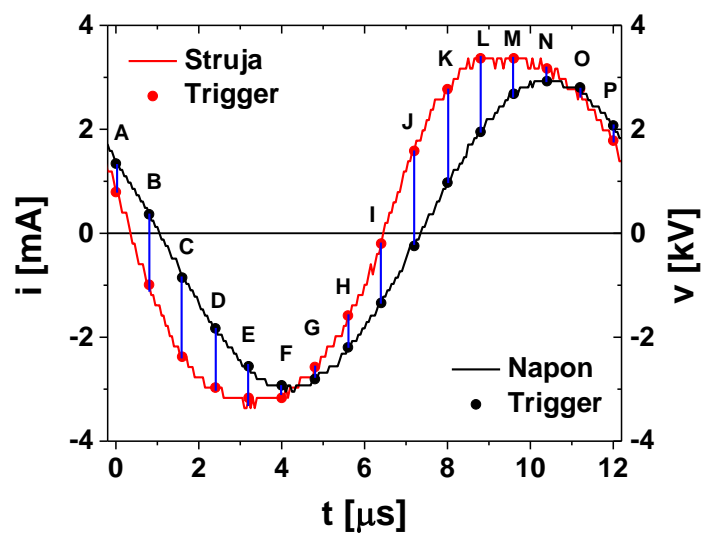
4.4. Dodatna elektroda između uzemljene i napajane elektrode

Na ovom mestu smo ispitivali uticaj dodatne treće elektrode od 7 mm, koja je postavljena između napajane i uzemljene elektrode, na formiranje plazma mlaza. Uvođenje elektrode na plutajućem potencijalu (engl. *Floating potential*) dovodi do promena u električnom polju između elektroda, a samim tim i do promena u ponašanju plazme. Napajana elektroda je na rastojanju od 15 mm od ruba cevčice, a rastojanje između napajane i uzemljene elektrode 15 mm, konfiguracija 15 mm-15(7) mm (Slika 4.27.).

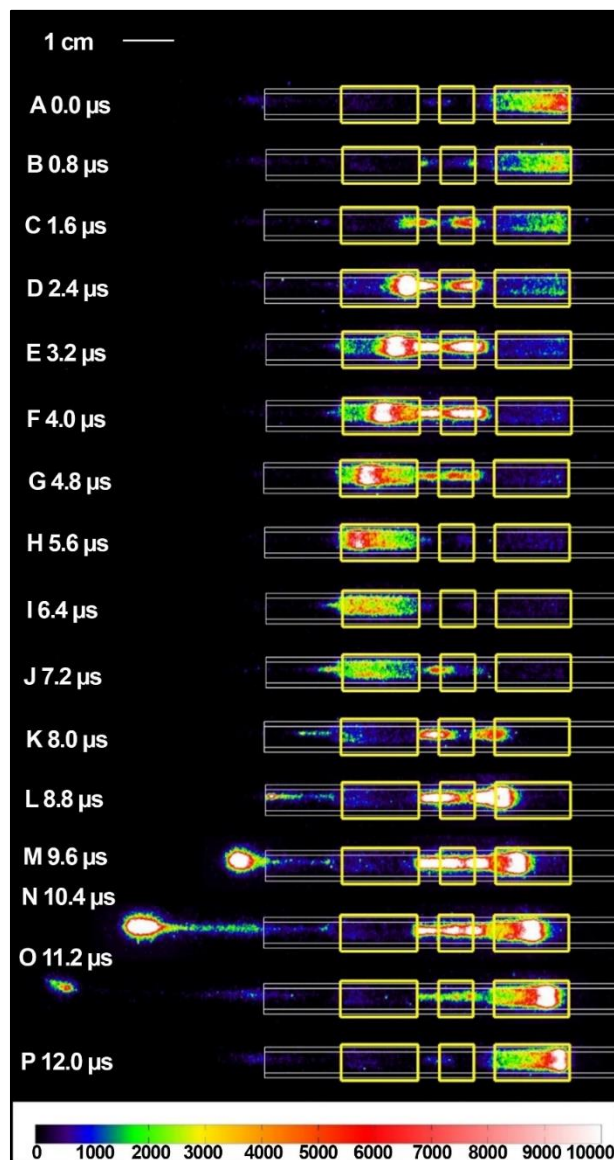


Slika 4.27. Shema plazma mlaza sa dodatnom elektrodom od 7 mm, napajana elektroda je na 15 mm od ruba cevčice, a rastojanje između elektroda 15 mm, elektrodna konfiguracija 15 mm-15(7) mm.

Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere su prikazani na slici ispod (Slika 4.28.). Okidanje kamere je vršeno sa korakom $0.8 \mu\text{s}$ od tačke A($0.0 \mu\text{s}$) do tačke P($12.0 \mu\text{s}$).



Slika 4.28. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa dodatnom elektrodom za konfiguraciju 15 mm-15(7) mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

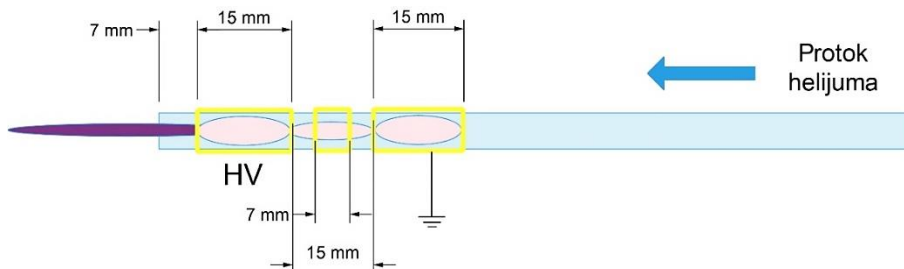


Slika 4.29. Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju 15 mm-15(7) mm, protok helijuma 4 slm, snaga 4 W.

Na slici 4.29. su prikazani vremenski razloženi snimci za konfiguraciju 15 mm-15(7) mm. Plazma između elektroda se sada ne sastoji iz jednog dela i nije uniformna kao kada nema dodatne elektrode. U pozitivnom poluperiodu od tačke M(9.6 μ s) do O(11.2 μ s) dolazi do formiranja PAPS-a koji se ponaša slično kao i u slučaju kada nemamo dodatnu elektrodu.

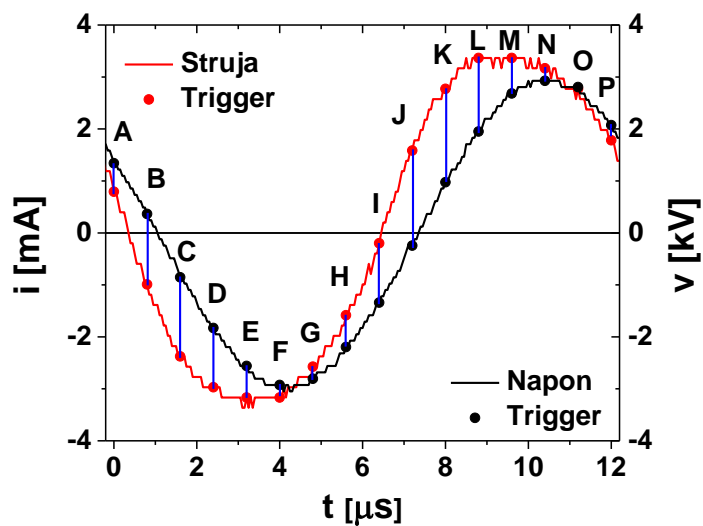
Da bismo proverili da li možemo da dobijemo veći domet plazma mlaza ceo elektrodni sistem smo pomerili bliže rubu staklene cevčice. Rastojanje između napajane i uzemljene elektrode je osalo isto. Shema plazma mlaza za ovu konfiguraciju je

prikazana na slici 4.30. Konfiguracija se sastoji od napajane i uzemljene elektrode na međusobnom rastojanju od 15 mm, napajana elektroda se nalazi na 7 mm od ruba cevčice, a širina elektrode na plivajućem potencijalu je 7 mm.

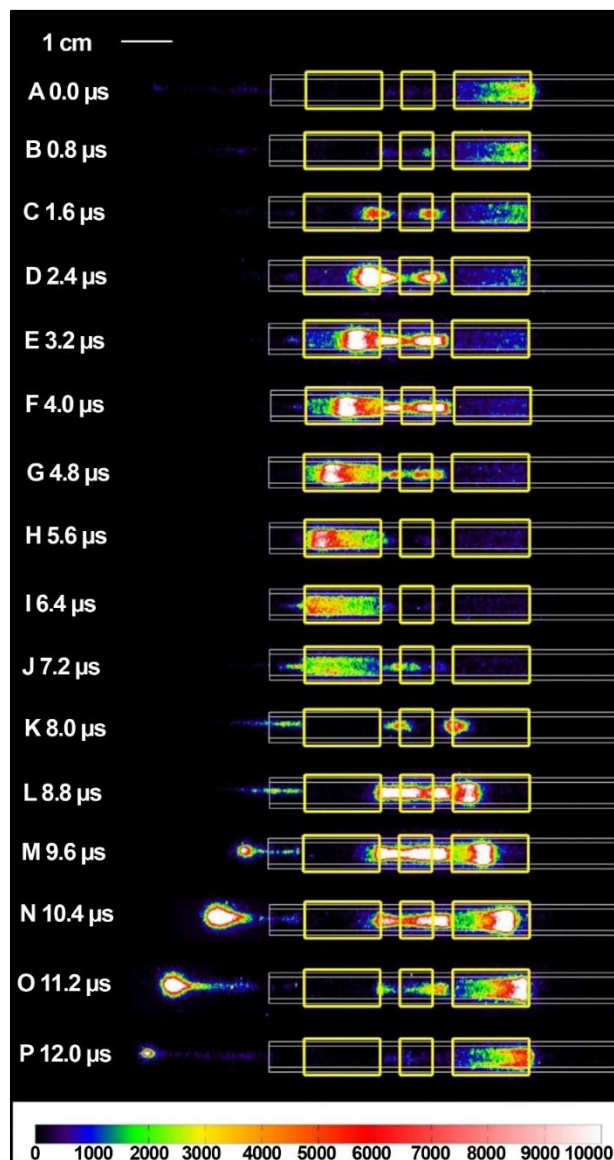


Slika 4.30. Shema plazma mlaza sa dodatnom elektrodom od 7 mm, napajana elektroda je na 7 mm od ruba cevčice, a rastojanje između elektroda 15 mm, elektrodna konfiguracija 7 mm-15(7) mm.

Signali za ovu elektrodnu konfiguraciju sa pozicijama okidanja su prikazani na slici 4.31. Kamera je okidana sa korakom 0.8 μs od tačke A(0.0 μs) do tačke P(12.0 μs). Snaga predata plazmi je 4 W, a protok helijuma 4 slm.



Slika 4.31. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa dodatnom elektrodom za konfiguraciju 7 mm-15(7) mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

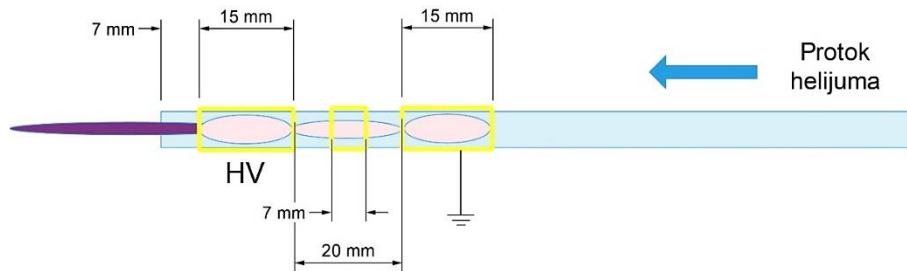


Slika 4.32. Vremenski razloženi snimci za 7 mm-15(7) mm, dodatna elektroda 7 mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

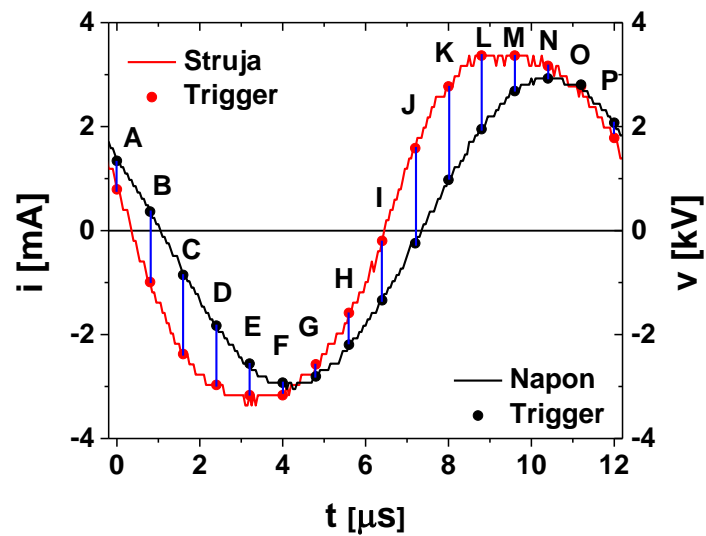
Vremenski razloženi iCCD za konfiguraciju 7 mm-15(7) mm su prikazani na slici 4.32. vremenski razvoj plazme je sličan kao i u prethodnom slučaju, PAPS se u negativnom poluperiodu prostire u napajanoj elektrodi, a u pozitivnom u uzemljenoj elektrodi. Deo plazme izlazi iz cevčice u vidu PAPS-a. Domet je za ovu konfiguraciju nešto manji u odnosu na prethodni slučaj.

Shema elektrodne konfiguracije kod koje je rastojanje između napajane i uzemljene elektrode 20 mm, a rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice 7 mm i dodatna

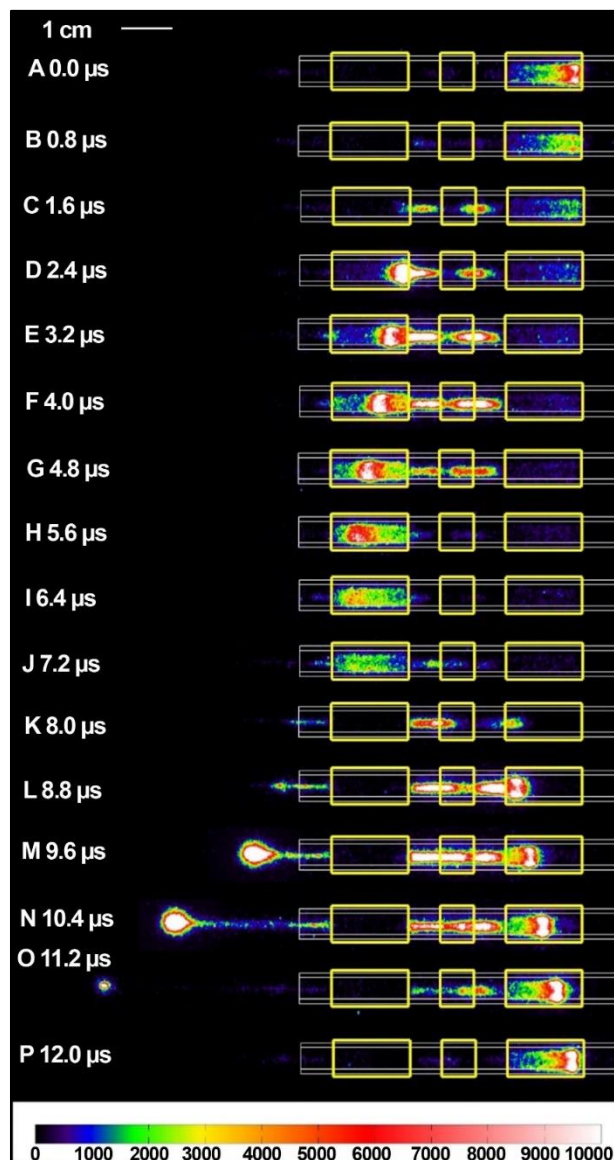
elektroda od 7 mm je prikazana na slici 4.33. Strujni i naponski signali za ovu elektrodnu konfiguraciju su slični kao i u prethodnom slučaju i dati su na slici 4.34.



Slika 4.33. Shema plazma mlaza sa dodatnom elektrodom od 7 mm, napajana elektroda je na 7 mm od ruba cevčice, a rastojanje između elektroda 20 mm.



Slika 4.34. Strujni i naponski signali plazma mlaza sa dodatnom elektrodom za konfiguraciju 7 mm-20(7) mm, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

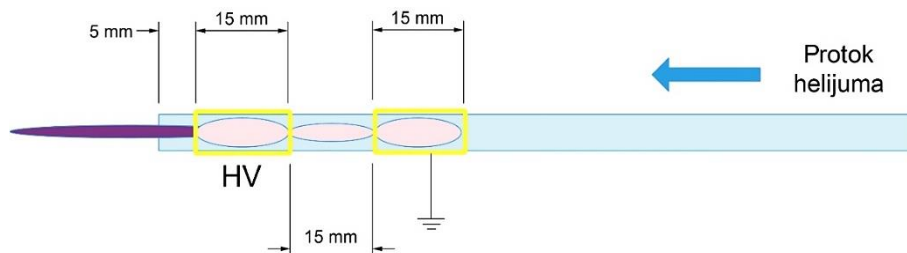


Slika 4.35. Vremenski razloženi snimci za elektrodnu konfiguraciju 7 mm-20(7) mm, protok 4 slm i snagu 4 W.

Ako posmatramo iCCD snimke (Slika 4.35.) vidimo da je ponašanje plazme ne razlikuje mnogo u odnosu na prethodne slučajeve. Za ovu konfiguraciju je specifično da i pored toga što je rastojanje između napajane i uzemljene elektrode 20 mm ovde imamo formiranje PAPS-a koje nismo uspeli da dobijemo kada nemamo dodatnu elektrodu. Ovo je još jedna potvrda da je za formiranje PAPS-a van cevčice potrebna dovoljno široka elektrodna zona.

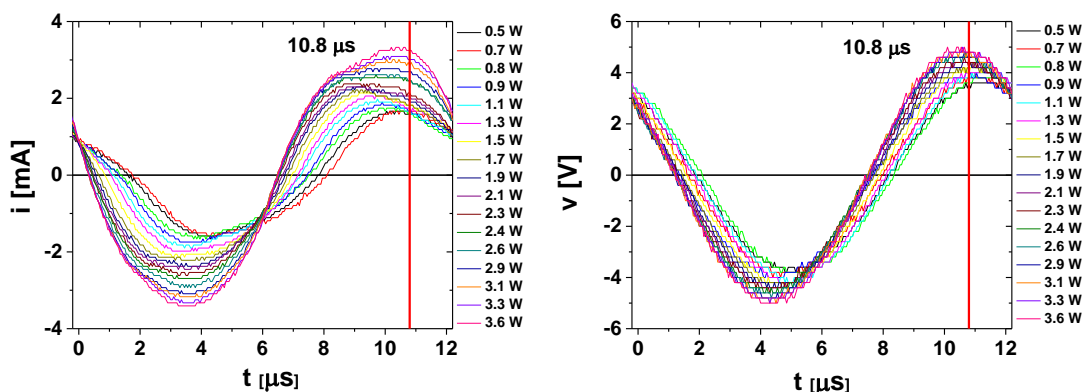
4.5. Snaga pri kojoj se formira PAPS za vremenski trenutak 10.8 μs

Kako bismo proverili pri kojoj snazi dolazi dolazi do pojave PAPS-a snimljene su strujno naponske karakteristike i iCCD snimci za kašnjenje kamere od 10.8 μs posle okidanja komparatora. Snimanje je vršeno za providne elektrode od 15 mm i rastojanje napajane elektrode od 5 mm od ruba cevčice, elektrodna konfiguracija 5 mm-15 mm. Protok radnog gasa je bio 4 slm, a snagu smo varirali. Na slici 4.36. je prikazana shema korišćenog plazma mlaza.



Slika 4.36. Shema plazma mlaza, konfiguracija 5-15 mm.

Na slici 4.37. su prikazani strujni signali levo i naponski signali desno za različite snage plazma mlaza. Iz strujnih signala se može primetiti da se sa povećanjem snage oblik strujnog signala menja. Pri većim snagama dolazi do pojave pika u pozitivnom poluperiodu koji se ne pojavljuje za manje snage. Kod naponskog signala dolazi do pomeranja faze.

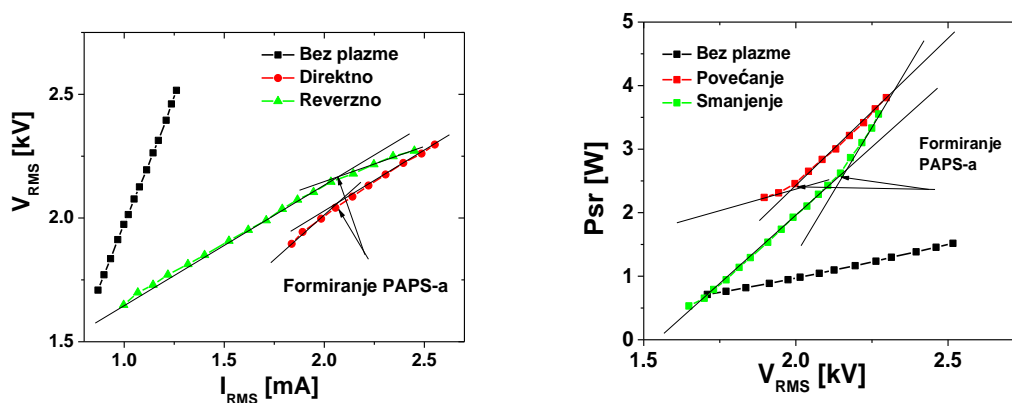


Slika 4.37. Strujni (levo) i naponski (desno) signali za različite snage plazma mlaza.

Strujno naponske karakteristike su prikazane na slici 3.38, sa koje se vidi da se nagib V-I krive menja u trenutku kada dolazi do prelaska iz jednog plazma moda u drugi, odnosno iz „difuznog“ u „PAPS“ mod. Menjanje nagiba krive ukazuje da dolazi do

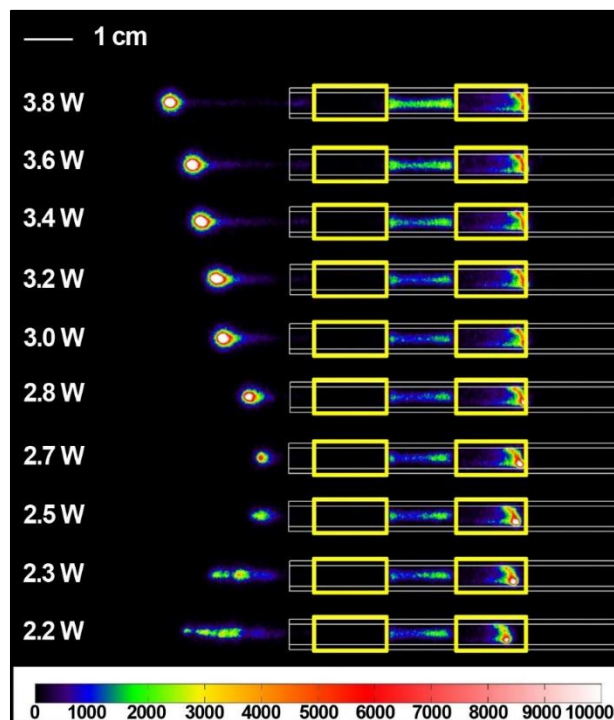
promene provodnosti plazme u trenutku prelaska u PAPS mod, odnosno provodnost plazme raste. Slično se dešava i sa snagom predatom plazmi (slika 3.39. desno). Snaga u tom trenutku skače, veće je iskorišćenje snage od strane plazme.

Prilikom smanjivanja primenjenog napona (reverzni smer) takođe se pojavljuje promena nagiba V-I krivih samo u suprotnom smeru, provodnost plazme se smanjuje a time i snaga predata plazmi.



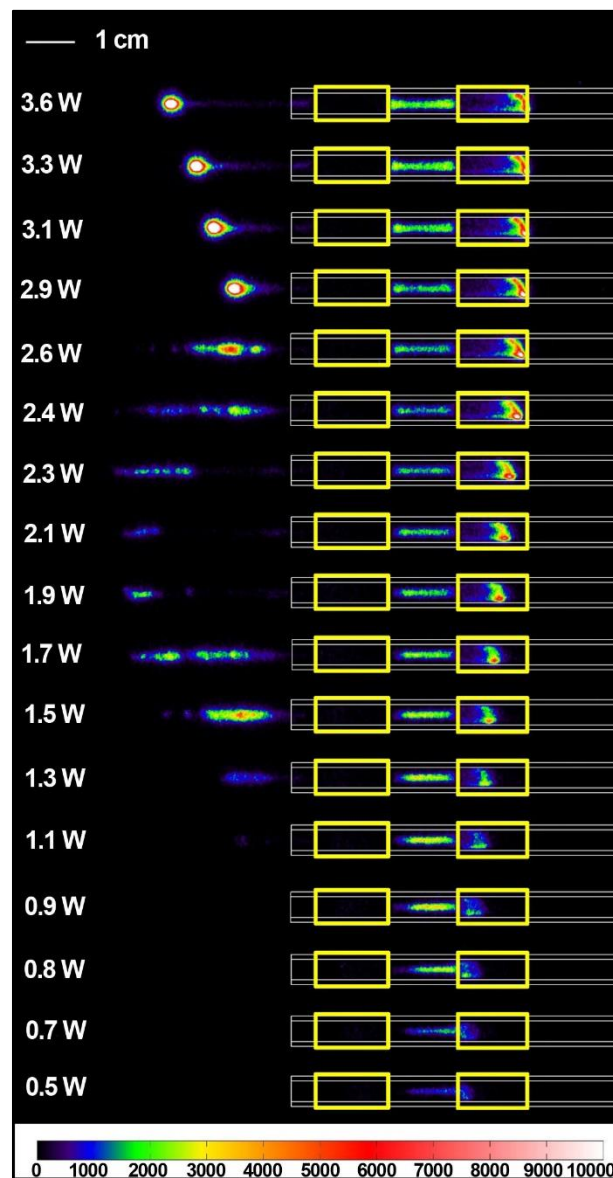
Slika 4.38. Strujno naponske karakteristike plazma mlaza (levo), srednja snaga predata plazmi u funkciji napona (desno).

Snimci emisije plazma mlaza za kašnjenje kamere od $10.8 \mu s$ su prikazani na slici 4.39. za direktan smer i 4.41. za reverzni smer. Sa snimaka za direktni smer se može videti da za snage 2.2 W i 2.3 W nemamo formiranje PAPS-a, odmah posle formiranja plazme. Kada napon na elektrodi dostigne vrednost $V_{RMS}=2.0$ kV a to odgovara snazi od 2.5 W, dolazi do prelaska iz „difuznog“ u „PAPS“ mod. Nakon ovog trenutka plazma je stabilna i povećava se samo domet plazma mlaza, koji raste sa povećanjem snage i dostiže maksimalnu vrednost pri snazi od 3.8 W.



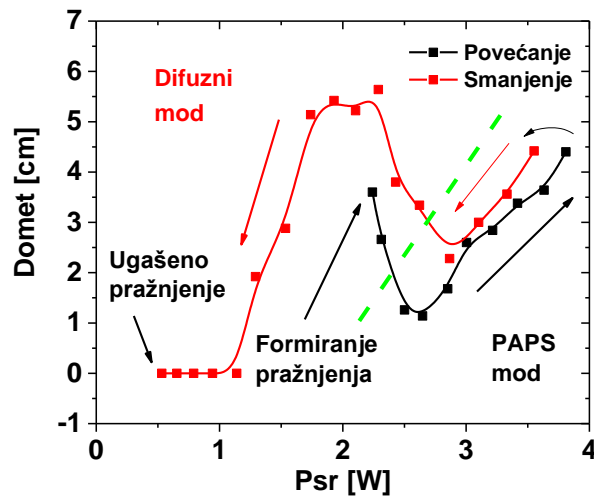
Slika 4.39. Snimci emisije plazma mlaza u trenutku $10.8 \mu\text{s}$ posle okidanja komparatora pri povećavanju snage i protok helijuma 4 slm.

Kada napon na elektrodi počnemo da smanjujemo plazma je u PAPS modu od 3.8 W do 2.9 W. Domet se polako smanjuje i u trenutku kada napon dostigne vrednost $V_{\text{RMS}}=2.1 \text{ kV}$ što odgovara snazi od 2.9 W dolazi do nestabilnosti u pražnjenju i plazma se vraća u „difuzni“ mod. Posle ovog trenutka domet plazme počinje ponovo da raste i dostiže maksimalnu vrednost za snagu od 2.3 W, nakon ovog trenutka domet ponovo opada i pri snazi od 1.1 W plazma uopšte ne izlazi iz cevčice. Od 1.1 W do 0.5 W plazma se nalazi samo u cevčici.



Slika 4.40. Snimci emisije plazma mlaza u trenutku $10.8 \mu\text{s}$ posle od okidanja komparatora pri smanjivanju snage i protok helijuma 4 slm.

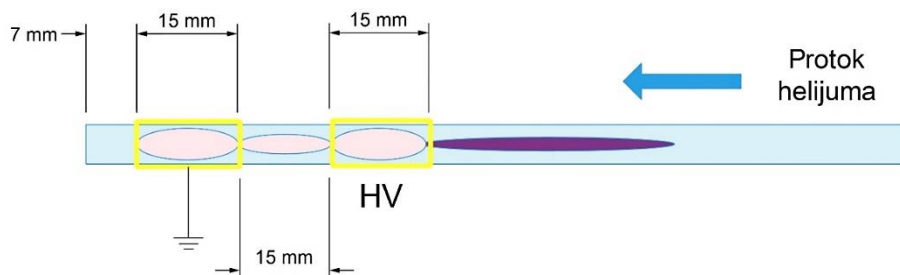
Zavisnost dometa plazma mlaza od srednje snage prikazana je na slici 4.41. Prikazani su dometi u direktnom i reverznom smeru i sa grafika se vidi da je u PAPS modu u direktnom smeru domet nešto manji za istu snagu u odnosu na reverzni smer. Dok je u difuznom modu domet znatno veći za istu predatu snagu u reverznom smeru. Kako smanjujemo snagu tako se smanjuje i intenzitet pražnjenja. Kada je plazma difuzna imamo mali inicijalni strimer ali sa nedovoljno energije da bi formirao jasno definisan jonizacioni front koji bi se prostirao kroz vazduh izvan zone elektroda.



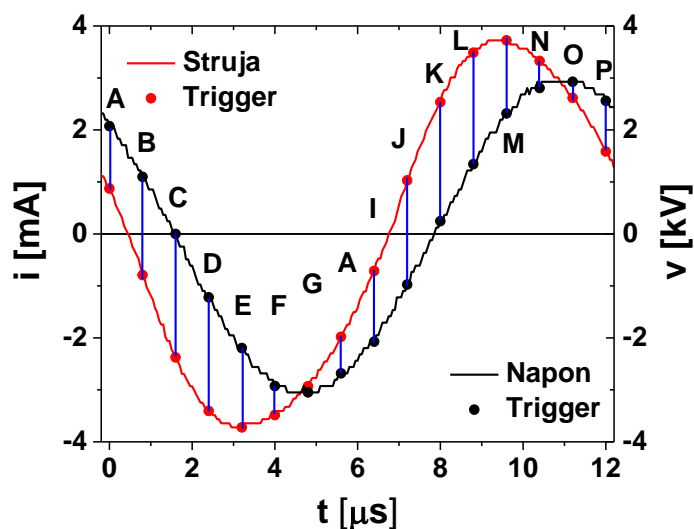
Slika 4.41. Zavisnost dometa plazma mlaza od srednje snage, protok helijuma 4 slm. Granica između Difuznog i PAPS mode je obeležena zelenom isprekidanom linijom.

4.6. Zamenjena mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi

Da bi proverili da li dolazi do formiranja PAPS-a u čistom helijumu i suprotno od protoka radnog gasa zamenili smo napajanu i uzemljenu elektrodu. Sada je leva elektroda, bliža rubu cevčice uzemljena, a desna elektroda napajana. Na slici 4.42. je prikazana eksperimentalna shema za konfiguraciju kod koje je napajana elektroda na 7 mm od ruba cevčice i 15 mm međuelektrodno rastojanje. Protok radnog gasa je 4 slm a snaga 4 W. Strujni i naponski signali za ovu konfiguraciju su prikazani na slici 4.43. U ovom slučaju kada su zamenjena mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi ne dolazi do deformacije strujnog signala. Odsustvo pada struje u pozitivnom poluperiodu ukazuje na to da nemamo pojavu PAPS-a, što ćemo videti iz iCCD snimaka.

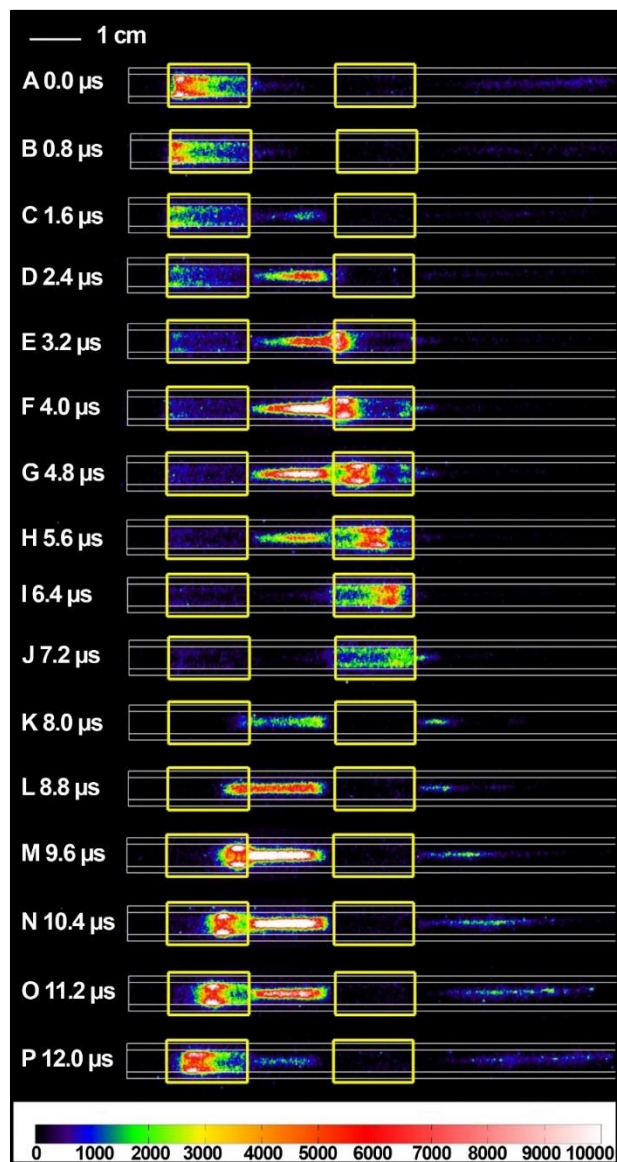


Slika 4.42. Zamenjena mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi, elektrodna konfiguracija 7 mm-15 mm.



Slika 4.43. Strujni i naponski signali za konfiguraciju na kojoj su zamenjena mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi, protok helijuma 4 slm.

Na slici 4.44. prikazani su vremenski razloženi snimci za vremena kašnjenja od A(0.0 μs) do P(12.0 μs) sa korakom od 0.8 μs . Sa slika se vidi da se za tačke od A(0.0 μs) do D(2.4 μs) plazma kreće kroz uzemljenu elektrodu (elektroda bliža rubu cevčice). U trenutku C(1.6 μs) plazma počinje da se formira između napajane i uzemljene elektrode. Plazma između elektroda je prisutna i u negativnom poluperiodu C(1.6 μs)-H(5.6 μs) i u pozitivnom poluperiodu K(8.0 μs)-P(12.0). Od tačke E(3.2 μs) do tačke J(7.2 μs) jonizacioni front se kreće kroz napajanu elektrodu po unutrašnjim zidovima cevčice. U tački K(8.0 μs) sa desne strane napajane elektrode počinje da se formira plazma koja se kreće suprotno od protoka radnog gasa. Za razliku od slučaja kada je napajana elektroda bliža rubu cevčice, gde dolazi do formiranja plazma PAPS-a, ovde imamo samo pojavu jonizacionig talasa koji se prostire centralnim delom staklene cevčice. Odsustvo PAPS-a je posledica sastava gasa kroz koji se jonizacioni front prostire, u ovom slučaju to je čist helijum.



Slika 4.44. Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju 7 mm-15 mm, protok helijuma 4 slm, snaga 4 W.

4.7. Zaključak

U ovoj glavi smo prikazali vremenski razložene snimke snimljene pomoću iCCD kamere i strujno naponske karakteristike za različite konfiguracije elektroda plazma mlaza sa providnim elektrodama. Varirali smo rastojanje između elektroda, rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice, postavili treću elektrodu na plutajućem potencijalu, zamenili mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi.

Iz ovog dela se može izvući nekoliko zaključaka:

-dok se plazma nalazi u oblasti elektroda ima prstenast oblik i prostire se uz unutrašnju površinu staklene cevčice;

-u oblasti između elektroda unutar cevčice plazma je konfinirana u osi plazma mlaza;

-samo u trenutku kada plazma dođe u kontakt sa ambijentalnim vazduhom, zapremina pražnjenja se značajno povećava i formira oblik sfere i formira se PAPS.

-za sve elektrodne konfiguracije kod kojih je PAPS formiran, može se videti tamni kanal koji povezuje glavu strimera sa glavnim delom plazme a to je u skladu sa teorijskim objašnjenjem prostiranja PAPS-a modelom strimera (Naidis, 2010).

-za konfiguracije 7 mm-15 mm i 15 mm-15 mm, PAPS se formira i nastavlja da se kreće kroz vazduh. Za elektrodnu konfiguraciju 30 mm-15 mm, plazma stiže do ruba cevčice, povećava svoju zapreminu, ali se ne prostire kroz vazduh. I na kraju za konfiguraciju

50 mm-15 mm, plazma ostaje unutar staklene cevčice za ceo period pobudnog signala.

-Maksimalni domet je dobijen za rastojanje 15 mm rastojanja od ruba cevčice i između elektroda i ovo je optimalna konfiguracija plazma mlaza.

-Maksimalne brzine PAPS-a u vazduhu su oko 20 km/s za konfiguraciju 15 mm-15 mm.

-Istovremenim menjanjem rastojanja od ruba cevčice i rastojanja između elektroda 7 mm-7 mm, 10 mm-10 mm, 15 mm-15 mm i 20 mm-20 mm nismo uspeli da povećamo domet PAPS-a u odnosu na standardnu elektrodnu konfiguraciju 15 mm-15 mm.

-Umetanje treće elektrode na plutajućem potencijalu pospešuje formiranje PAPS-a, čak i za međuelektrodno rastojanje od 20 mm, za konfiguraciju 20 mm-20(7) mm i dovodi do neznatnog povećanja dometa plazma mlaza.

-U konfiguraciji 15 mm-15 mm plazma se pojavljuje u dva moda u zavisnosti od primenjene snage. „Difuzni“ mod se javlja na manjim snagama, a „PAPS“ mod na većim snagama. Granica između ova dva moda se razlikuje u zavisnosti da li povećavamo ili smanjujemo snagu predatu plazmi i pri povećanju je na 2.5 W, a pri smanjenju je na 2.9 W.

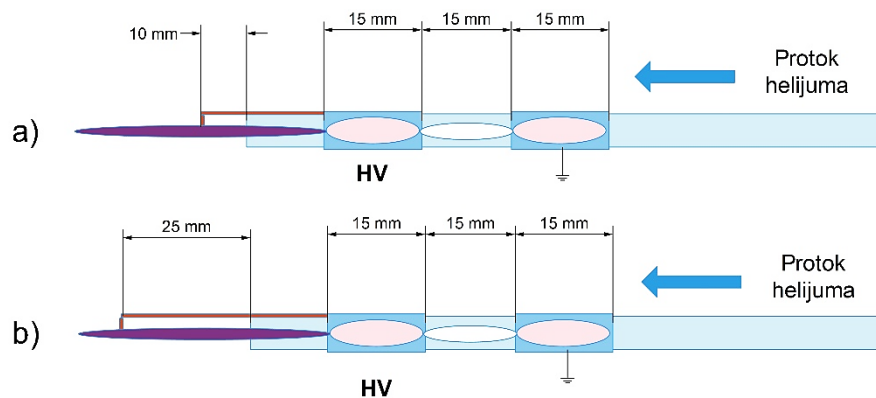
-Zamenom mesta napajane i uzemljene elektrode dolazi do prostiranja plazme suprotno od protoka radnog gasa i ne dolazi do izlaska plazme iz cevčice. U cevčici ne dolazi do formiranja PAPS-a, već se plazma nalazi u „difuznom“ modu.

5. Uticaj prisustva treće metalne elektrode u obliku šiljka na formiranje plazma mlaza

U ovoj glavi smo ispitivali uticaj dodatne metalne elektrode na prostiranje plazme koja je postavljena ispred plazma mlaza. Ispitali smo dva slučaja: kada je metalni šiljak napajan, (u tekstu „napajani šiljak“) i kada je šiljak uzemljen, odnosno „uzemljeni šiljak“. Takođe smo ispitivali i uticaj različitih tipova meta u koje udara plazma mlaz.

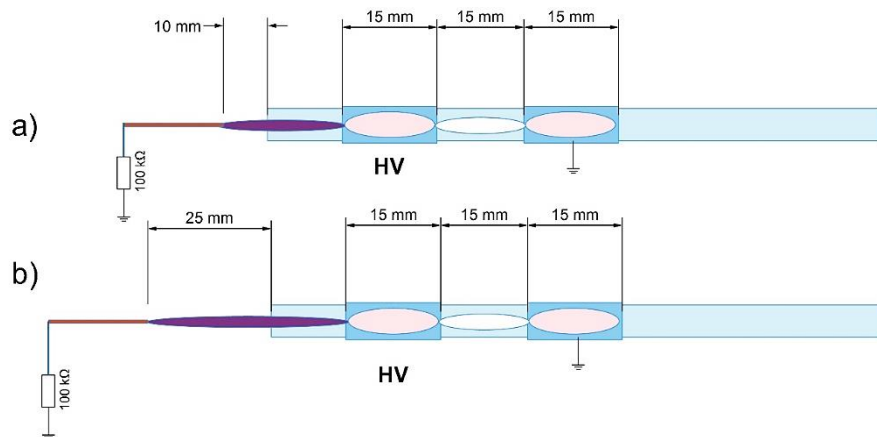
5.1. Električna merenja

Na slici ispod je prikazan plazma mlaz sa šiljkom koji je povezan sa napajanom elektrodom, pa se oni nalaze na istom potencijalu, konfiguracija „napajani šiljak“. Ispitali smo dva rastojanja napajane šiljka, 10 mm (Slika 5.1. a) i 25 mm (Slika 5.1. b). Rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice je 15 mm, a rastojanje između elektroda je 15 mm.



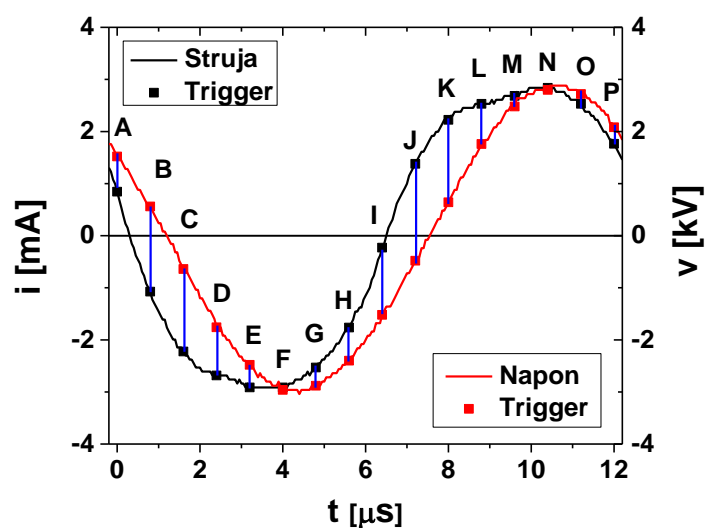
Slika 5.1. Shema plazma mlaza sa napajanim šiljkom a) 10 mm i b) 25 mm.

U drugom slučaju smo povezali metalni šiljak sa uzemljenjem, za dva rastojanja 10 mm i 25 mm. Između uzemljenog šiljka i uzemljenja se nalazi otpornik od 100 k Ω .



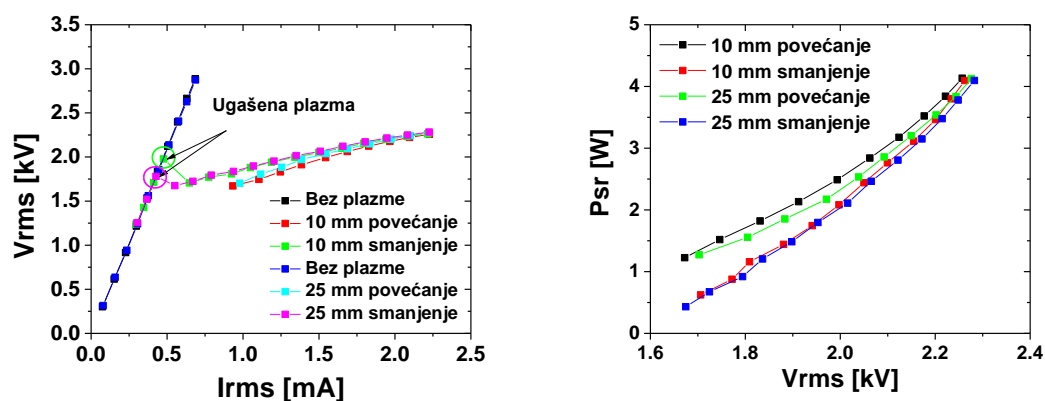
Slika 5.2. Shema plazma mlaza sa uzemljenim šiljkom a) 10 mm i b) 25 mm.

Na slici 5.3. su prikazani tipični signali za napajani šiljak koji se nalazi na 10 mm od mlaznice plazma mlaza. Slični signali su dobijeni i za rastojanje od 25 mm, kao i za konfiguraciju sa uzemljenim šiljkom te oni ovde nisu prikazani. Slovicima od A(0.0 μ s) do P(12.0 μ s) su označene pozicije na kojima su napravljeni iCCD snimci. Kao i u prethodnim elektrodnim konfiguracijama i ovde je napon čista sinusoida, dok je strujni signal deformisan zbog složene impedanse plazme. Može se primetiti promena na strujnom signalu u pozitivnom poluperiodu koja odgovara trenutku u kome se formira PAPS.



Slika 5.3. Signal za konfiguraciju „napajani šiljak“ na 10 mm od mlaznice plazma mlaza sa označenim pozicijama okidanja kamere, za snagu od 3.5 W i protok helijuma je 3 slm

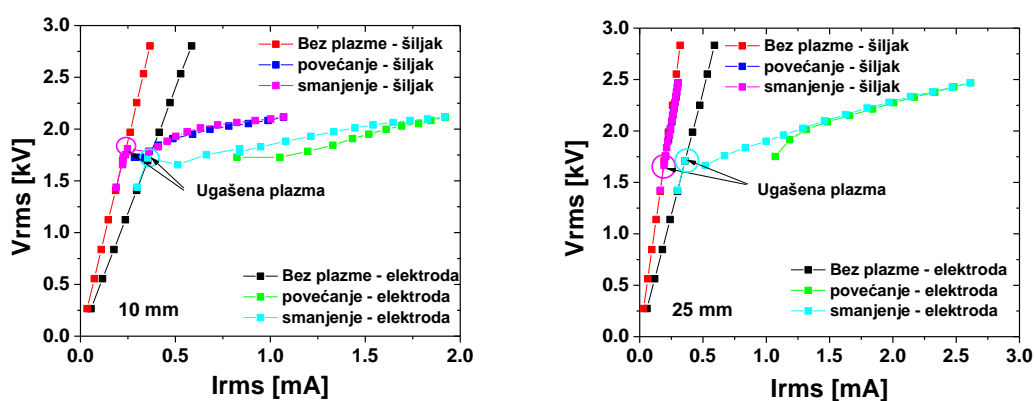
Na slici 5.4. su prikazane strujno naponske karakteristike za konfiguraciju „napajani šiljak“ na levoj strani, a na desnoj su prikazane snage predate plazmi. Bez plazme, strujno naponska karakteristika je linearna funkcija. Struja se kreće u opsegu od 0.08 mA do 0.7 mA, a naponi od 0.3 kV do 2.85 kV. Impedanse za oba rastojanja 10 mm i 25 mm uzemljenog šiljka od mlaznice su iste i iznose 4.23 M Ω . Kada se plazma formira uvodi se nova impedansa u sistem, pa se i nagib strujno naponske krive menja. Sa grafika se može primetiti da postoji izrazita pojava histerezis efekta kada povećavamo snagu i kada smanjujemo snagu. U smeru povećanja snage struja je u oblasti od 0.9 mA do 2.2 mA, a napon od 1.7 kV do 2.3 kV. Dok je prilikom smanjenja struja u opsegu od 0.6 mA do 2.2 mA, a napon od 1.7 kV do 2.3 kV. Postoji oko 0.3 mA razlike između ova dva smera. Prilikom postepenog smanjivanja snage plazma ostaje formirana i pri manjim strujama. Daljim smanjivanjem snage dolazi do gašenja plazme i vrednosti struje i napona se vraćaju na vrednosti pre formiranja plazme (obeleženo strelicama na slici). Impedansa je u smeru povećanja snage 0.5 M Ω , a u smeru smanjenja snage 0.4 M Ω .



Slika 5.4. Strujno naponske karakteristike (levo) i snaga predata pražnjenju (desno) za elektrodnu konfiguraciju „napajani šiljak“ za 10 mm i 25 mm od mlaznice, protok helijuma je 3 slm

Snaga predata plazmi za oba rastojanja je bliska. I ovde se može primetiti histerezis efekat. U smeru povećanja snage napon je u opsegu 1.7 kV do 2.3 kV, a snage od 0.4 W do 4.1 W a u smeru smanjenja snage ona je nešto veća i u oblasti nižih napona dostiže 1.2 W. Postoji razlika u snazi od 0.8 W između smera kada se povećava snaga i kada se smanjuje. Iz prikazanih podataka može se zaključiti da položaj treće napajane elektrode ne utiče značajno na strujno naponsko karakteristike sistema.

Sada ćemo preći na elektrodnu konfiguraciju „uzemljeni šiljak“. I ovde smo ispitivali dva rastojanja treće elektrode od mlaznice plazma uređaja. Rastojanja koja su ispitana su 10 mm i 25 mm. Na slici 5.5. levo su prikazane strujno naponske karakteristike za konfiguraciju „uzemljeni šiljak“ i rastojanje od 10 mm. Struje su merene pomoću dve naponske sonde koje su na graficima obeležene kao „šiljak“ i „elektroda“. Sondom „šiljak“ se meri pad napona na otporniku koji se nalazi između šiljka i uzemljenja, a sondom „elektroda“ pad napona na otporniku koji se nalazi između uzemljene elektrode i uzemljenja. Oba ova otpornika su od po 100 kΩ. Bez plazme struja je u opsegu od 0.06 mA do 0.6 mA, a naponi od 0.3kV do 2.8 kV za sondu „elektroda“. Dok je za sondu „šiljak“ struja u opsegu od 0.04 mA do 0.4 mA. Napon je meren na napajanoj elektrodi.



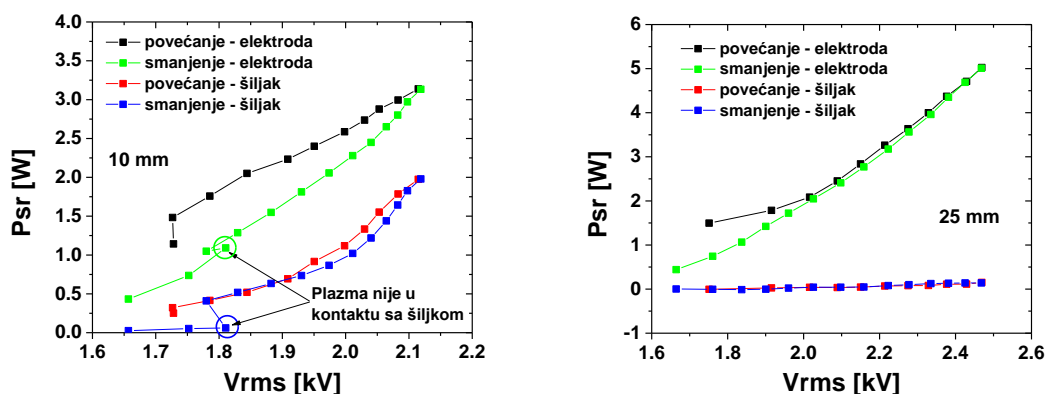
Slika 5.5. Strujno-naponske karakteristike za elektrodnu konfiguraciju „uzemljen šiljak“ za 10 mm (levo) i 25 mm (desno) od mlaznice, protok helijuma je 3 slm.

Kada se plazma formira situacija se drastično menja, u smeru povećanja snage za sondu „elektroda“ struja je od 0.8 mA do 1.9 mA, a napon od 1.7 kV do 2.1 kV. Za sondu „šiljak“ struja je od 0.4 mA do 1.1 mA. U smeru smanjenja snage za sondu „elektroda“ struja je od 0.5 mA do 1.9 mA, dok je za sondu „šiljak“ od 0.4 mA do 1.1 mA a napon u opsegu od 1.7 kV do 2.1 kV. Značajne razlike u strujama, merene pomoću sonde na dva različita mesta, potiču od razlike u gustinama plazme i koncentracije naelektrisanih čestica u plazmi između elektroda i u samom plazma mlazu. Impedanse se takođe razlikuju za ova dva merenja. Bez plazme impedansa za „elektrodu“ je 4.80 MΩ, a za „šiljak“ 7.62 MΩ, impedansa za prvu sondu je skoro dva puta manja u odnosu na drugu. Kada se plazma formira pojavljuje se značajan histerezis efekat, impedansa je za sondu „elektroda“ 0.46 MΩ u smeru povećanja snage i 0.32 MΩ u smeru smanjenja snage. Za

sondu „šiljak“ se ne može uočiti histerezis efekat, impedanse su iste i u oba smera i iznose 0.38 M Ω .

Za konfiguraciju „šiljak“ kod koje se treća uzemljena elektroda nalazi na rastojanju 25 mm od mlaznice, strujno naponske karakteristike su potpuno drugačije (Slika 5.5. desno). Za sondu „šiljak“ situacija je jednostavna, strujno naponske karakteristike sa i bez plazme su potpuno identične, zato što je struja kroz plazma mlaz na tom rastojanju zanemarljivo mala. Struje su u opsegu od 0.2 mA do 0.3 mA, a naponi od 1.7 kV do 2.5 kV. Impedansa je 8.8 M Ω koja je veća u odnosu na slučaj kada je rastojanje treće elektrode od mlaznice 10 mm. Za sondu „elektroda“ struja je u opsegu od 1.1 mA do 2.6 mA u direktnom i 0.5 mA do 2.6 mA u reverznom smeru. Napon je u opsegu od 1.7 kV do 2.5 kV u oba smera i nema promene impedanse sistema, a nije primećena ni pojava histerezisa.

Na slici 5.6. prikazana je snaga predata plazmi, levo za rastojanje 10 mm, a desno za 25 mm.



Slika 5.6. Snaga predata pražnjenju za konfiguraciju „uzemljen šiljak“ za 10 mm (levo) i 25 mm (desno) od mlaznice, protok helijuma je 3 slm.

Za rastojanje 10 mm snaga se kreće u rasponu od 1.1 W do 3.1 W u direktnom i od 0.4 W do 3.1 W u reverznom smeru. Na grafiku su označena mesta kada plazma mlaz prestaje da bude povezan sa trećom elektrodom. U tom trenutku snaga na sondi „šiljak“ značajno opada sa 0.4 W na 0.06 W. Za ovu sondu snage idu od 0.3 W do 2.0 W u direktnom i od 0.03 W do 2.0 W u reverznom smeru. Sa grafika se može videti da za obe sonde postoji uočljiva pojava histerezisa. U slučaju rastojanja od 25 mm situacija je

drugačija, za konfiguraciju „šiljak“ snaga je skoro jednaka nuli, dok se za konfiguraciju „elektroda“ kreće od 1.5 W do 5.0 W u smeru povećanja snage i od 0.4 W do 5.0 W u suprotnom smeru. Histerezis efekat se ne pojavljuje.

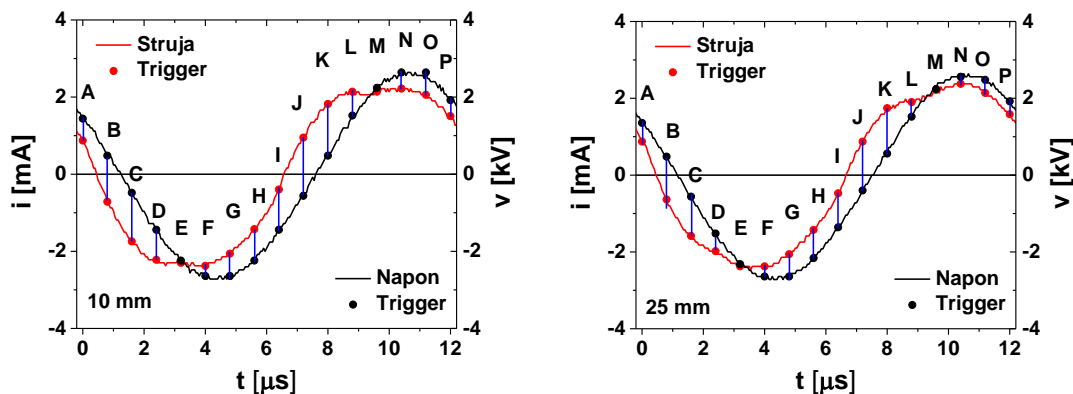
Iz dobijenih vrednosti struje smo izračunali približne koncentracije naelektrisanih čestica preko aproksimativne formule koju su predložili T. Gerling *et al* (Gerling *et al.*, 2012) u svom radu:

$$I = j \cdot A_I = q \cdot n \cdot v \cdot A_I, \quad A_I = \frac{\pi}{4} d_{\parallel}^2 \quad (5.1.)$$

Gde je A_I površina plazma „metka“, j je gustina struje, v brzina plazma „metka“ i q naelektrisanje. Procenjena vrednost brzine prostiranja jonizacionog fronta u našoj konfiguraciji elektroda je 3.2 km/s, izračunato za snagu (3.5 W) i rastojanje 10 mm od mlaznice plazma mlaza do uzemljenog „šiljka“. Dijametar plazma PAPS-a (normalno u odnosu na mlaznicu) $d_{\parallel} \approx 1.6$ mm, a struja je $I \approx 1$ mA. Izračunata gustina naelektrisanih čestica je $\approx 1 \cdot 10^{11}$ cm⁻³ što je u oblasti koncentracija koje su dobili T. Gerling i saradnici (Gerling *et al.*, 2012).

5.2. Vremenski razloženi snimci za plazma mlaz sa trećom napajanom elektrodom u obliku šiljka

Na ovom mestu ćemo razmatrati vremenski razložene iCCD snimke plazme za konfiguraciju „napajani šiljak“. Strujni i naponski signali su prikazani na slici 5.7. Ispitana su dva rastojanja napajnog šiljka 10 i 25 mm od mlaznice plazma uređaja.

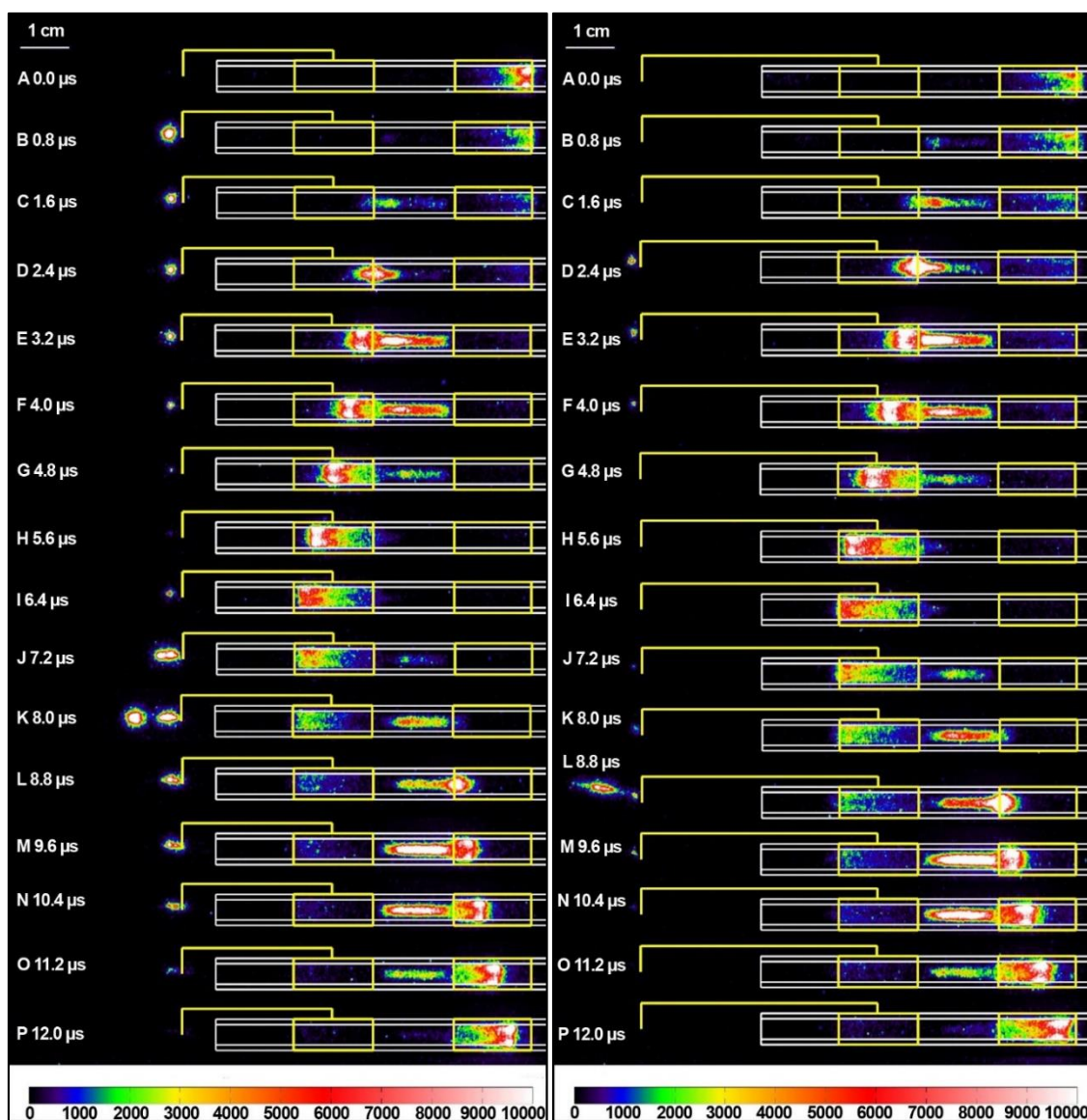


Slika 5.7. Strujni i naponski signali za konfiguraciju „napajani šiljak“, za snagu 2.5 W, 10 mm (levo) i 25 mm (desno), protok helijuma je 3 slm.

Na slici 5.8. su prikazani iCCD snimci za vremenski razvoj plazme i snagu 2.5 W. Merenja su vršena i za druge snage, ali su iCCD snimci veoma slični, pa ćemo ovde prikazati rezultate samo za 2.5 W. Snimci su obeleženi slovima od A(0.0 μ s) do P(12.0 μ s) sa vremenskim korakom od 0.8 μ s.

Ova konfiguracija je specifična jer smo jedino za nju uspeli da dobijemo formiranje PAPS-a u negativnom poluperodu. Opis vremenskog razvoja plazme počecemo od tačke A(0.0 μ s). U ovoj tački emisija se nalazi u uzemljenoj elektrodi i potiče iz prethodnog pobudnog perioda. Novi pobudni period počinje i možemo ga podeliti na dva dela: na negativni od tačke B(0.8 μ s) do I(6.4 μ s) i pozitivni od J(7.2 μ s) do A(0.0 μ s). Prvo ćemo opisati negativni poluperiod. U tački B(0.8 μ s) plazma počinje da se formira u blizini napajane elektrode i istovremeno u blizini „napajnog šiljka“ ali samo za rastojanje 10 mm, dok je za rastojanje 25 mm emisija svetlosti na dodatnoj elektrodi neprimetna. Kako se plazma širi u pravcu napajane elektrode menja oblik, iz cilindričnog u oblik „krofne“, što je posledica menjanja električnog polja u zoni između elektroda i u elektrodi. Posmatranjem tačke D(2.4 μ s) možemo uočiti da na ovoj poziciji plazma

počinje da se pojavljuje i na šiljku za rastojanje 25 mm. Jonizacioni front u oblasti napajane elektrode je prilepljen na unutrašnje zidove cevčice i kreće se ka mlaznici. Emisija na „šiljku“ poprima sferni oblik i ima dijametar oko 1 mm. Plazma je za rastojanje 25 mm prisutna samo na pozicijama D(2.4 μ s), E(3.2 μ s) i F(4.0 μ s) u negativnom poluperiodu. Posle tačke D(2.4 μ s) intenzitet plazme na šiljku je najveći i posle toga on počinje da opada. U pozitivnom poluperiodu intenzitet plazme počinje da raste i interesantna stvar se pojavljuje u tačkama J(7.2 μ s) i K(8.0 μ s), kada se formira PAPS, plazma se deli na dva dela.

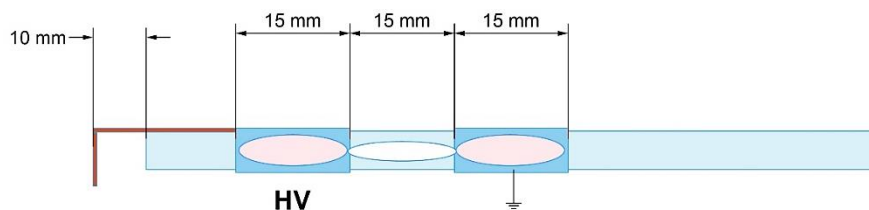


Slika 5.8. Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju „napajani šiljak“ za rastojanja 10 mm (levo) i 25 mm (desno), protok helijuma 3 slm i snagu 2.5 W.

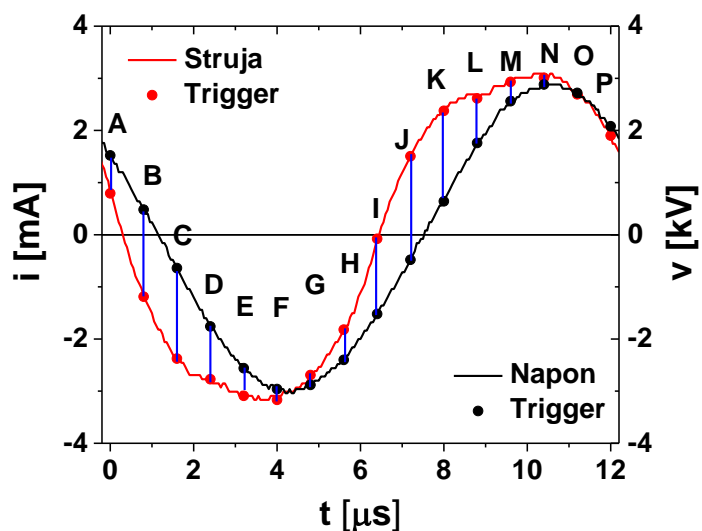
Prvi deo ostaje na šiljku, a drugi se od njega odvaja i nastavlja da se prostire kroz vazduh i udaljava od šiljka. Ovaj paket plazme je sličan PAPS-u koji je ranije opisan kod drugih elektrodnih konfiguracija u pozitivnom poluperiodu. Ovaj fenomen je prisutan samo za rastojanje 10 mm, dok se za rastojanje od 25 mm pojavljuje samo u jednoj tački L(8.8 μ s). U tački L(8.8 μ s) plazma u zoni uzemljene elektrode prelazi iz cilindričnog oblika u oblik koji podseća na „krofnu“, odnosno poprima torusni oblik i počinje da se kreće suprotno od protoka helijuma uz zidove cevčice. Plazma se pojavljuje na vrhu napajanog šiljka za rastojanje 25 mm u tačkama od K(8.0 μ s) do M(9.6 μ s) sa maksimumom intenziteta 8.8 μ s. Zanimljiv fenomen u ovoj konfiguraciji je odsustvo plazme između napajane elektrode i napajanog šiljka. Pretpostavljamo da je to posledica istog električnog potencijala dve elektrode, pa naelektrisane čestice ne mogu da se ubrzavaju kako bi došlo do jonizacije i ekscitacije i samim tim do emisije svetlosti u toj zoni. Pojava PAPS-a posle zone šiljka je posledica razlike potencijala između šiljka i okolnog prostora koji se nalazi na nižem potencijalu.

5.3. Interakcija plazma mlaza sa provodnom metom koja je na istom potencijalu kao i napajana elektroda

Kako bi proverili da li pad potencijala igra značajnu ulogu u formiranju PAPS-a postavili smo napajanu metu ispred mlaznice plazma mlaza na rastojanje od 10 mm. Meta je napravljena od bakarne folije, a njene dimenzije su (8x8 mm). Ona je žicom spojena sa napajanom cilindričnom elektrodom (Slika 5.9).

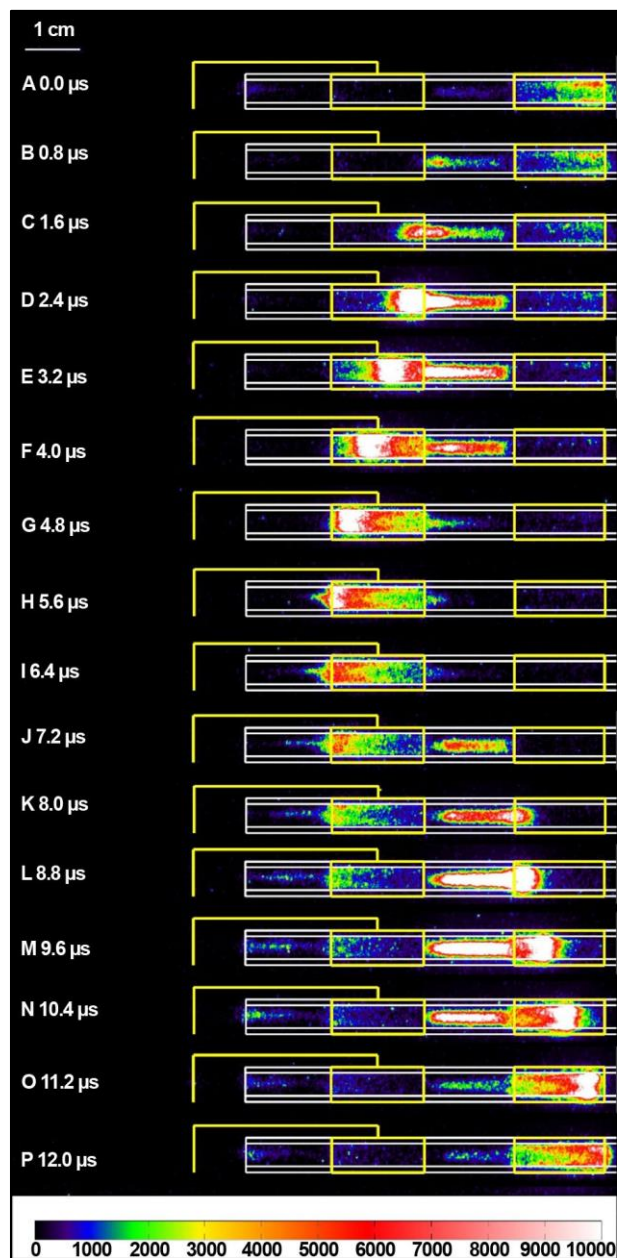


Slika 5.9. Plazma mlaz sa napajanom metom.



Slika 5.10. Strujni i naponski signali za plazma mlaz koji udara u napajanu metu, protok helijuma 3 slm i snagu 3.5 W.

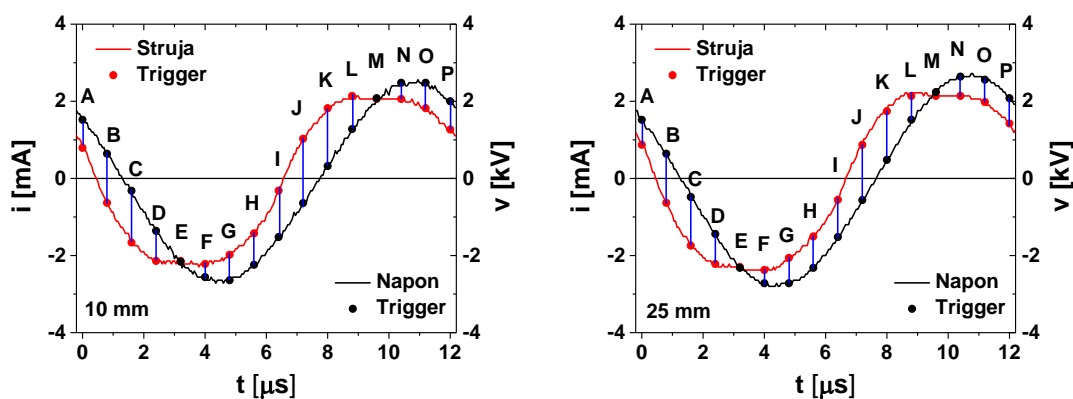
Strujni i naponski signali su prikazani na slici 5.10, a vremenski razloženi iCCD snimci su prikazani na slici 5.11. Sa slike se može videti da je prostiranje plazme izvan cevčice suzbijeno postavljanjem metalne mete koja je na istom potencijalu kao i napajana cilindrična elektroda. Plazma unutar cevčice ne primećuje prisustvo napajane mete i ista je kao i da mete nema. Meta koja je postavljena ispred mlaznice plazma mlaza prekida protok helijuma i raspršuje ga, pa pojava plazme posle mete takođe nije uočena. Iz ovog eksperimenta se može zaključiti da je za formiranje PAPS-a pored visokog potencijala potrebno i prisustvo helijuma u dovoljnoj koncentraciji.



Slika 5.11. Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju sa napajanom metom na rastojanju od 10 mm, snagu 3.5 W i protok helijuma od 3 slm.

5.4. Vremenski razloženi snimci za plazma mlaz sa trećom uzemljenom elektrodom u obliku šiljka

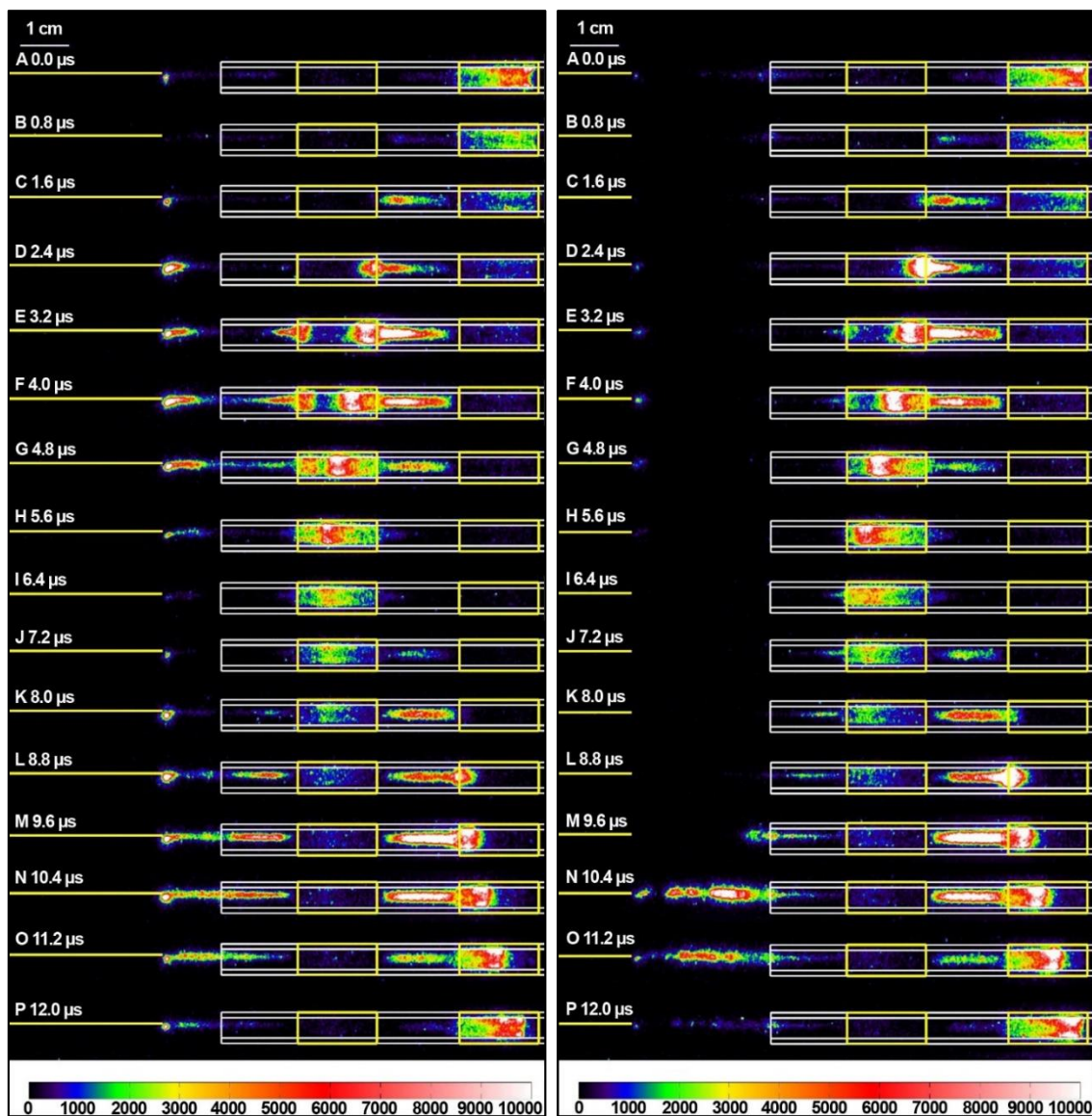
Nakon ispitivanja uticaja treće metalne napajane elektrode na formiranje plazma mlaza logično je bilo ispitati ponašanje plazme u prisustvu treće uzemljene elektrode. I ovde smo ispitili dva rastojanja treće elektrode, 10 mm i 25 mm od mlaznice plazma uređaja. Strujno naponski signali su prikazani na slici 5.12.



Slika 5.12. Strujno naponski signali za konfiguraciju „uzemljeni šiljak“, 10 mm (levo) i 25 mm (desno), protok helijuma 3 slm i snagu 2.5 W.

Vremenski razloženi iCCD snimci za snagu od 2.5 W su prikazani na slici 5.13. za dva ispitivana rastojanja. U silaznom delu pobudnog signala, tačke A(0.0 μs) i B(0.8 μs), plazma je koncentrisana u oblasti uzemljene elektrode koja potiče iz prethodnog pobudnog perioda. Nakon ovoga u tački C(1.6 μs), plazma se formira kod desnog ruba napajane elektrode i u isto vreme postaje intenzivnija na uzemljenoj elektrodi. Nakon toga plazma se simultano pojavljuje sa obe strane napajane elektrode za rastojanje 10 mm, tačka E (3.2 μs). Dva jonizaciona fronta se kreću jedan ka drugom i sudaraju na sredini napajane elektrode, tačka G (4.8 μs). Pojava dva fronta pražnjenja je posledica prisustva uzemljenog šiljka blizu mlaznice plazma mlaza i glavnog pražnjenja. Pošto je u negativnom poluperiodu napajana elektroda na negativnom potencijalu, a uzemljene elektrode (cilindrična na staklenoj cevčici i uzemljena elektroda u obluku šiljka) na pozitivnom potencijalu dolazi do formiranja katodno usmerenog strimera CDS (Cathode Directed Streamer). Pozitivno naelektrisane čestice se kreću od uzemljenih elektroda ka napajanoj elektrodi ali postaju vidljive samo u trenutku formiranja dva jonizaciona fronta.

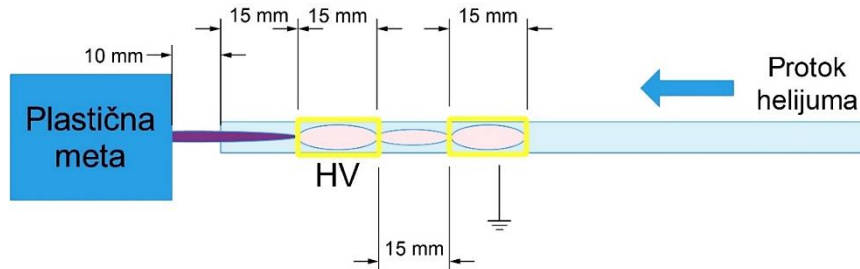
Evidentno je da prisustvo uzemljene elektrode dovodi do pojave kompleksnog električnog polja, jer se u blizini napajane elektrode sada nalaze dve uzemljene elektrode. Za manje rastojanje 10 mm glavni deo plazme je uvek povezan kanalom sa „uzemljenim šiljkom“. Ovaj kanal plazme emituje dovoljno svetlosti pa ga je bilo moguće snimiti. Za rastojanje od 25 mm intenzitet emisije iz prostora između napajane elektrode i šiljka bio je preslab da bi se detektovao. Za rastojanje od 25 mm plazma je spojena sa šiljkom samo za jedan deo pozitivnog poluperioda za tačke N(10.4 μ s) do P(12.0 μ s).



Slika 5.13. Vremenski razloženi snimci za konfiguraciju „uzemljeni šiljak“ i rastojanja 10 mm (levo) i 25 mm (desno), protok helijuma 3 slm i snagu 2.5 W.

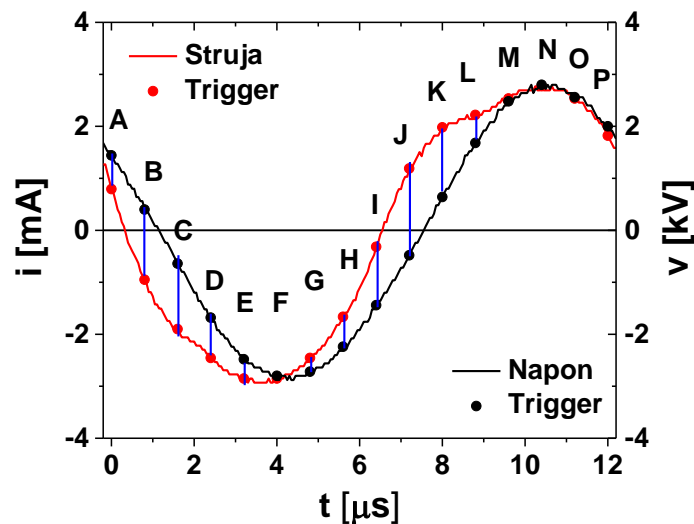
5.5. Interakcija plazme sa plastičnom metom

Ovde ćemo ispitati interakciju plazma mlaza sa plastičnom metom (klirit) koja se nalazi na 10 mm od ruba cevčice (Slika 5.14.).



Slika 5.14. Shema plazma mlaza u kontaktu sa plastičnom metom, elektrodna konfiguracija 15 mm-15 mm.

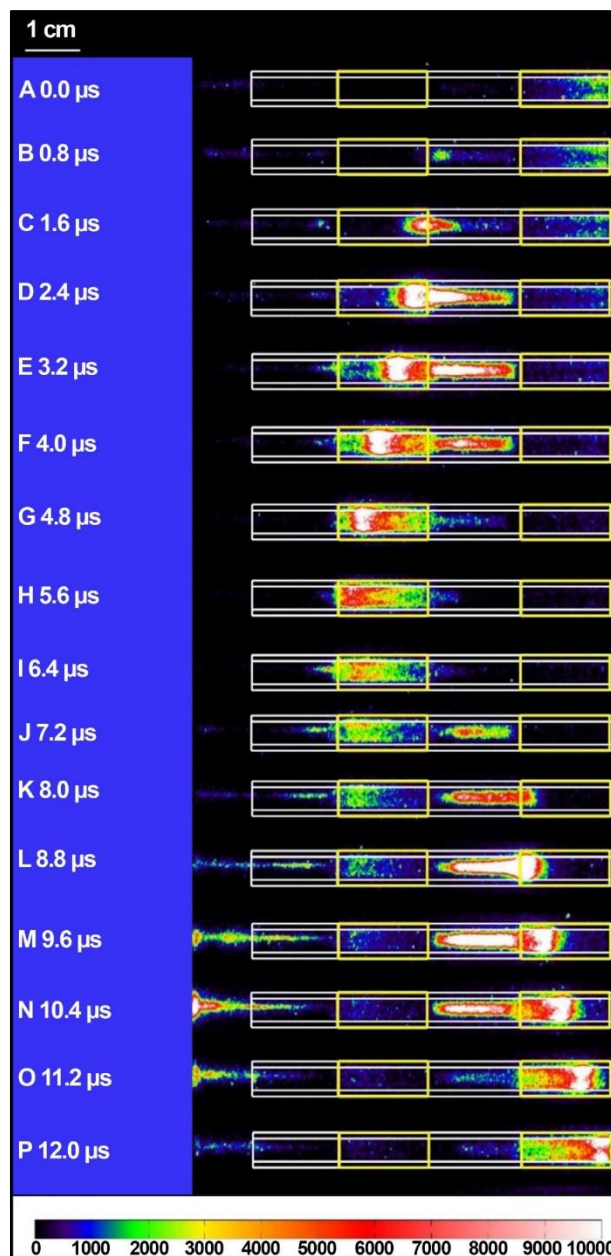
Protok radnog gasa je 3 slm, a snaga predata plazmi 3 W. Strujni i naponski signali su prikazani na slici 5.15.



Slika 5.15. Strujni i naponski signali za plazma mlaz koji udara u plastičnu metu, protok helijuma 3 slm i snagu 3 W.

iCCD snimci su prikazani na slici 5.16. Sa prikazanih slika se može primetiti da je vremenski i prostorni razvoj plazme u cevčici isti kao i kada nemamo metu. Plazma u

negativnom poluperiodu se kreće kroz napajanu elektrodu u pravcu prostiranja radnog gasa, a u pozitivnom kroz uzemljenu suprotno od protoka gasa.



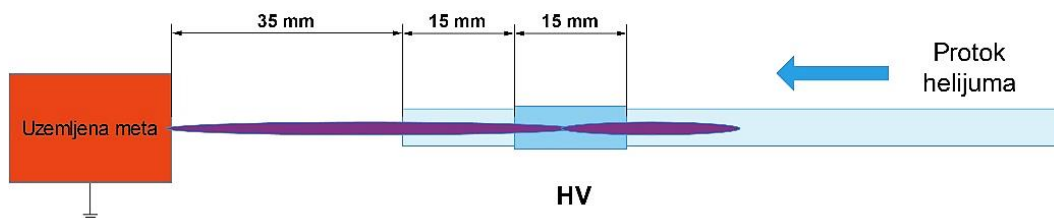
Slika 5.16. Vremenski razloženi iCCD snimci plazma mlaza u interakciji sa plastičnom metom na 10 mm, protok helijuma 3 slm, snaga 3 W.

Trenutak kada plazma počinje da interaguje sa površinom mete je tačka K(7.2 μs), kada se između mete i napajane elektrode uspostavlja kanal plazme koji ostaje prisutan sve do tačke P(12.0 μs). Na početku pozitivnog poluperioda J(7.2 μs) plazma kanal je veoma slabog intenziteta, kako se krećemo kroz pozitivan poluperiod ovaj intenzitet se

pojačava i dostiže maksimalnu vrednost u tački N(10.4 μ s). Površina koju plazma pokriva je oko 115 mm² (6 mm u prečniku). Veličina plazme na površini je veoma bitan parametar kod tretmana površina. Plazma mlaz zbog malih dimenzija nije pogodan za tretmane velikih površina i zbog toga je neophodno napraviti snopove plazma mlazeva kako bi se pokrile veće površine. Do sada su ispitane različite konfiguracije (Cao, 2010; Hu *et al.*, 2012; Ghasemi *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014) kod kojih su plazma mlazovi paralelizovani linearno ili u dve dimenzije i mogu da pokrivaju površine od nekoliko desetina kvadratnih centimetara.

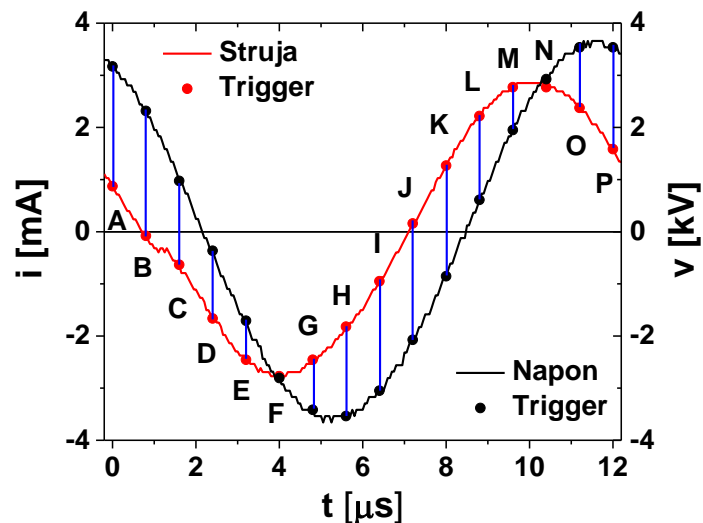
5.6. Jednoelektrodni plazma mlaz koji udara u uzemljenu metalnu metu

U ovom delu smo ispitivali interakciju jednoelektrodnog plazma mlaza sa uzemljenom metom od bakarne folije koja je nalepljena na blok od plastike (Slika 5.17.). Rastojanje napajane elektrode od ruba cevčice je 15 mm, a rastojanje između mete i mlaznice je 35 mm.



Slika 5.17. Jednoelektrodni plazma mlaz koji udara u uzemljenu metu.

Strujni i naponski signali su dati na slici 5.18.

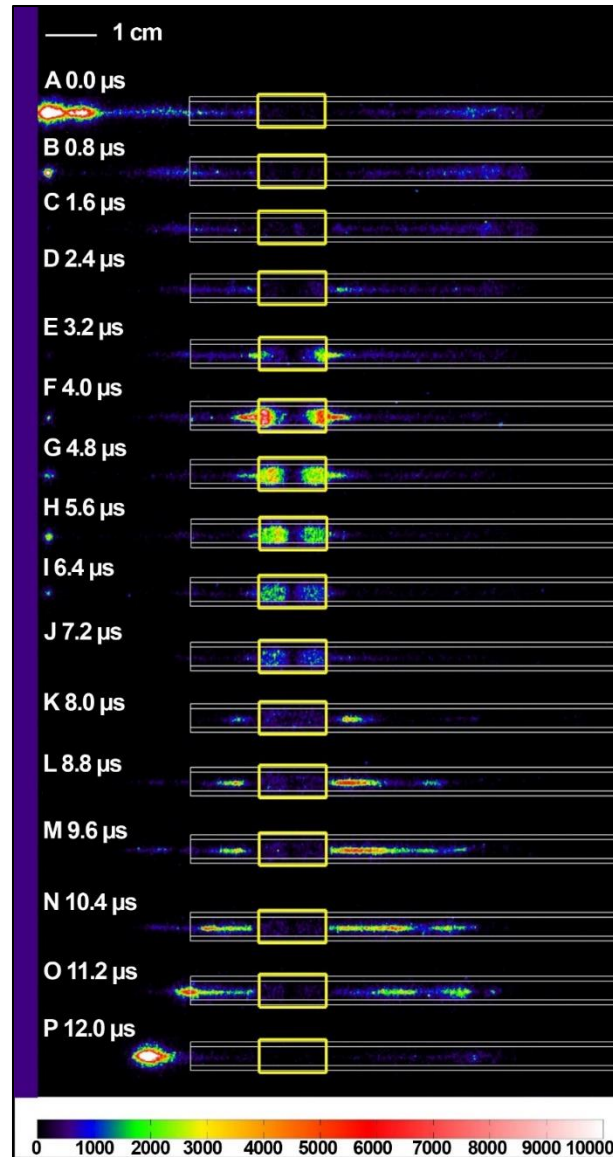


Slika 5.18. Signali za plazma mlaz koji udara u uzemljenu metu, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

Merenje je vršeno za protok radnog gasa od 4 slm i snagu od 4 W. Vremenski razloženi snimci su prikazani na slici 5.19. za ceo period pobudnog signala. Ako krenemo da razmatramo snimke od tačke A ($0.0 \mu\text{s}$), koja odgovara trenutku posle maksimuma struje i napona plazma mlaza, vidimo da plazma udara u metu. Nakon ovog trenutka intenzite plazme na meti se smanjuje u tački B ($0.8 \mu\text{s}$) i potpuno nestaje u tački C ($1.6 \mu\text{s}$). U tački D ($2.4 \mu\text{s}$) pražnjenje se skoro potpuno gasi. U isto vreme vidi se veoma slabo svetljenje desno od napajane elektrode. Tačka E ($3.2 \mu\text{s}$) je karakteristična po tome što u ovom trenutku počinje formiranje pražnjenja u napajanoj elektrodi. Za razliku od dvoelektrodnog mlaza ovde se plazma formira i na levoj i na desnoj ivici napajane elektrode. U sledećim tačkama od F ($4.0 \mu\text{s}$) do J ($6.4 \mu\text{s}$) dolazi do približavanja dva fronta plazme u elektrodi, ali se oni ni u jednom trenutku ne spoje u potpunosti. U istim tačkama se na meti pojavljuje veoma slabo svetljenje, katodno usmereni strimer, jer se pojavljuje u negativnom poluperiodu pobudnog signala. Uzemljena meta je trenutna anoda, ona je pozitivna i ovo svetljenje izazivaju elektroni koji udaraju u metu. Takođe se vidi da svetljenje nije u potpunosti zalepljeno za metu, između plazme i trenutne anode se nalazi tamni anodni prostor.

Od tačkaka K ($8.0 \mu\text{s}$) do O ($11.2 \mu\text{s}$) imamo formiranje dva stuba pražnjenja, jedan ka meti i drugi koji se kreće na suprotnu stranu od napajane elektrode, suprotno od protoka

gasa. Ova dva stuba se povećavaju kako se povećavaju napon i struja na napajanoj elektrodi. U tački P(12.0 μ s) dolazi do formiranja plazma PAPS-a sličnog onom koji se formira kod plazma mlaza sa dve elektrode. Posle ove tačke plazma se odmah zalepi za metu i ubrzo nestaje, a ciklus se ponavlja.



Slika 5.19. iCCD snimci plazma mlaza sa jednom elektrodom i uzemljenom metalnom metom, snaga 4 W, protok helijuma 4 slm.

5.7. Zaključak

U ovom delu smo dali pregled rezultata dobijenih za plazma mlaz u prisustvu treće metalne elektrode koja je ili napajana ili uzemljena i uticaj različitih meta na formiranje PAPS-a. Ispitali smo dva rastojanja treće metalne elektrode od mlaznice, 10 mm i 25 mm. Takođe je ispitana i konfiguracija sa napajanom metom koja je bila postavljena na 10 mm od ruba cevčice. Dielektrina meta je bila postavljena na 10 mm, a uzemljena provodna meta na 35 mm od mlaznice. Iz rezultata se mogu izvući sledeći zaključci:

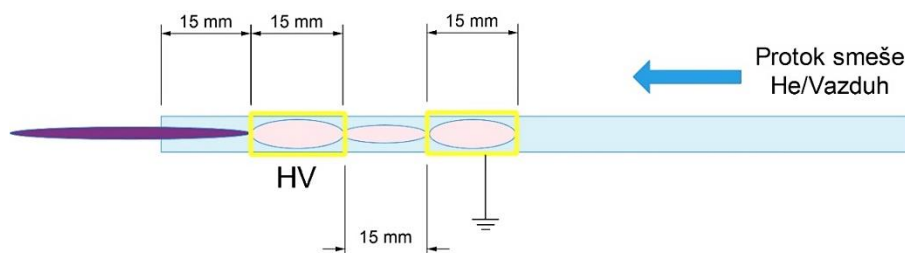
1. Treća napajana elektroda ne utiče na električne karakteristike pražnjenja.
2. Postoji značajna razlika u električnim karakteristikama za dva rastojanja uzemljene elektrode od mlaznice, na manjem rastojanju kroz šiljak protiče merljiva struja koja se može povezati sa brojem nosilaca naelektrisanja i izračunati njihova koncentracija, dok za veće rastojanje to nismo mogli da uradimo.
3. Prisustvo napajanog šiljka u blizini mlaznice plazma mlaza dovodi do prekida plazma kanala i ponovnog stvaranja plazme na vrhu šiljka. U slučaju rastojanja od 10 mm dolazi do formiranja PAPS-a na vrhu šiljka koji se od njega odvaja i nastavlja da se kreće kroz atmosferu.
4. U konfiguraciji „Uzemljeni šiljak“ prisustvo utemljene metalne elektrode dovodi do promene električnog polja plazma mlaza i za rastojanje od 10 mm dolazi do pojave dva jonizaciona fronta u napajanoj cilindričnoj elektrodi koji se kreću jedan ka drugom u negativnom poluperiodu. Ovo nije slučaj za rastojanje od 25 mm.
5. Plazma je tokom celog pobudnog perioda spojena vidljivim provodnim kanalom za uzemljeni šiljak koji je na 10 mm.
6. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da meta sa kojom interaguje plazma dosta utiče na njegovo propagiranje i strukturu. Takođe ukoliko se postavi provodna meta veoma je važno na kom se potencijalu ona nalazi. Videli smo da napajana meta sprečava izlazak plazme iz staklene cevčice, dok ga uzemljena meta pospešuje. Dielektrična meta nema uticaja na prostiranje plazma mlaza u cevčici.

6. Uticaj dodatka sintetičkog vazduha i argona na formiranje i prostiranje plazma mlaza

Posle ispitivanja plazma mlaza sa napajanom elektrodom na posebnoj cevčici kod koga smo uočili značajne promene prilikom formiranja plazme i njenog dometa jer dolazi do mešanja vazduha sa helijumom, logični korak je bio ispitati uticaj dodatka sintetičkog vazduha i argona u malom procentu čistom helijumu pre ulaska u zonu pražnjenja kako bismo posmatrali promene u pražnjenju.

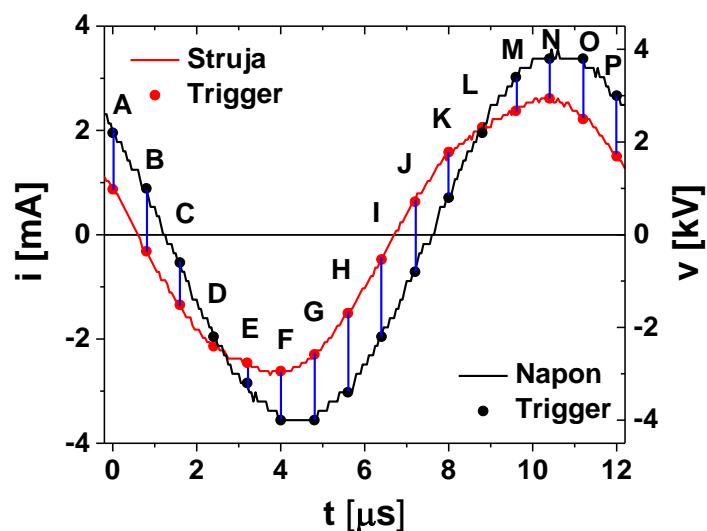
6.1. Uticaj dodatka sintetičkog vazduha na prostiranje plazma mlaza

Procentat sintetičkog vazduha koji smo dodavali radnom gasu je 0.5%, 1.0% i 1.5%. Protok radnog gasa je 3 slm, a snaga predata plazmi 4 W. U ovim merenjima koristili smo koristili standardnu elektrodnu konfiguraciju, kod koje je napajana elektroda na 15 mm od ruba, a međuelektrodno rastojanje 15 mm (Slika 6.1.).

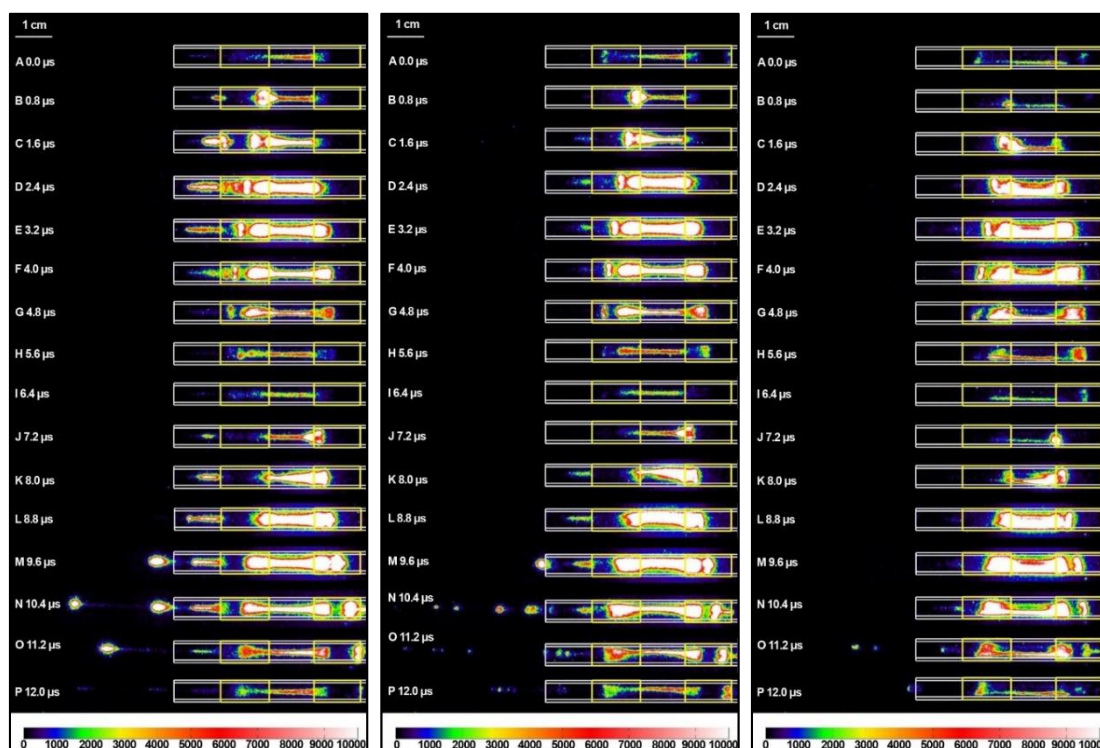


Slika 6.1. Shema plazma mlaza u konfiguraciji 15 mm-15 mm, smeša helijuma i sintetičkog vazduha.

Strujni i naponski signali plazma mlaza za smešu helijuma i sintetičkog 0.5% vazduha su prikazani na slici 6.2.



Slika 6.2. Strujni i naponski signali za plazma mlaz sa dodatkom 0.5% vazduha, snagu 4 W i protok helijuma 3 slm.



Slika 6.3. Vremenski razloženi iCCD snimci plazma mlaza, za protok helijuma od 3 slm, snagu 4 W, i dodatak vazduha od 0.5% (levo), 1.0% (u sredini) 1.5% (desno).

Vremenski razloženi iCCD snimci prostiranja plazma mlaza za dodatak od 0.5% (levo), 1.0% (u sredini) 1.5% (desno) sintetičkog vazduha u čist helijum su prikazani na slici 6.3. Plazma je snimljena za ceo period pobude od A(0.0 μ s) do P(12.0 μ s). Specifičnost

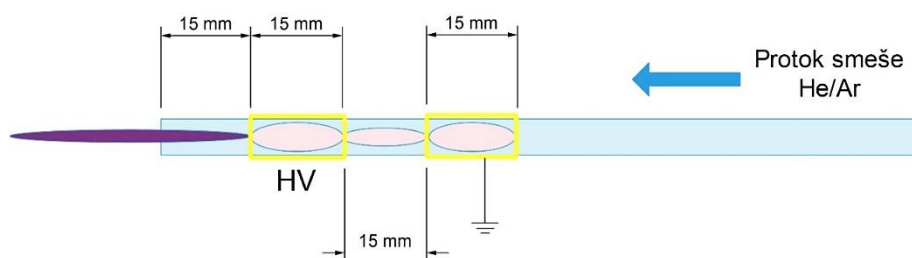
ovog pražnjenja je pojava dva fronta plazme koja se kreću jedan ka drugom unutar napajane elektrode, tačke od B(0.8 μ s) do D(2.4 μ s), a zatim posle spajanja nastavljaju da se kreću ka mlaznici plazma mlaza E(3.2 μ s) do D(4.8 μ s). Slična pojava je uočena i u poglavlju 7, kada je ispitivana konfiguracija sa napajanom elektrodom na posebnoj cevčici (slika 7.1). Dodatak vazduha radnom gasu utiče na povećanje intenziteta emisije u cevčici. Začetak PAPS-a se pojavljuje u tački K(8.0 μ s) na levom rubu napajane elektrode. On se prostire kroz cevčicu u vidu tankog stuba plazme i na izlasku iz cevčice formira plazma PAPS. Specifičnost ovog pražnjenja je pojava dvostrukog PAPS-a u tački N(10.4 μ s). Ova dva paketa plazme su međusobno povezani plazma kanalom čija je emisija slabog intenziteta.

Kada povećamo procenat sintetičkog vazduha na 1.0% u radnom gasu pražnjenje se drastično menja. Pojava dva fronta u napajanoj elektrodi se potpuno gubi i ostaje samo jedan jonizacioni front koji se kreće kroz uzemljenu elektrodu ka mlaznici, tačke B(0.8 μ s) do G(4.8 μ s). Pražnjenje između elektroda i dalje ima veliki intenzitet i prošireno je u odnosu na čist helijum ali je „zalepljeno“ za gornji zid cevčice. Najzanimljivija pojava koja je zapažena u ovom slučaju je prelazak iz jednostrukog PAPS-a koji se pojavljuje na izlazu iz mlaznice u tački M(9.6 μ s) u višestruki PAPS (četiri paketa plazme), ali znatno manjeg intenziteta. Pojava višestrukog PAPS-eva je primećena kod pražnjenja sa impulsnim napajanjem (Xian *et al.*, 2012) i u smeši helijuma i azota (Park, Youn Moon and Choe, 2013). Višestruke PAPS-ove su Sanghoo Park i saradnici primetili kada su u čist helijum dodavali azot (Park, Youn Moon and Choe, 2013), primetili su čak i do osam PAPS-ova u jednom impulsu. Takođe su pokazali da proizvodnja elektrona iz N₂ Peningovom jonizacijom može biti značajnija u odnosu na proizvodnju elektrona iz sudarne jonizacije iz helijuma za $[\text{He}/\text{N}_2] > 0.5\%$.

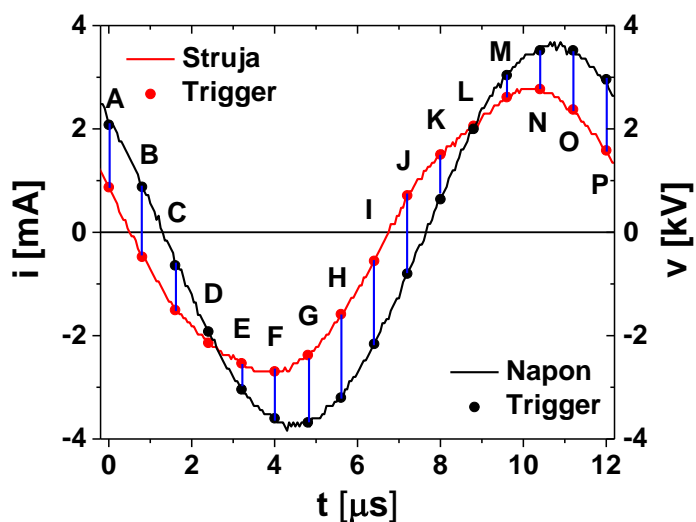
I na kraju dodatak od 1.5 % sintetičkog vazduha znatno deformiše pražnjenje između elektroda (Slika 6.3. desno). Plazma se lepi za donji zid cevčice što je suprotno od prethodnog slučaja kada je plazma zalepljena za gornji zid cevčice u slučaju dodatka od 1% sintetičkog vazduha (Slika 6.3. u sredini). Pražnjenje van cevčice je skoro potpuno ugašeno i nema formiranja PAPS-a. Daljim povećavanjem procenta sintetičkog vazduha plazma se potpuno gasi.

6.2. Uticaj dodatka argona na prostiranje plazma mlaza

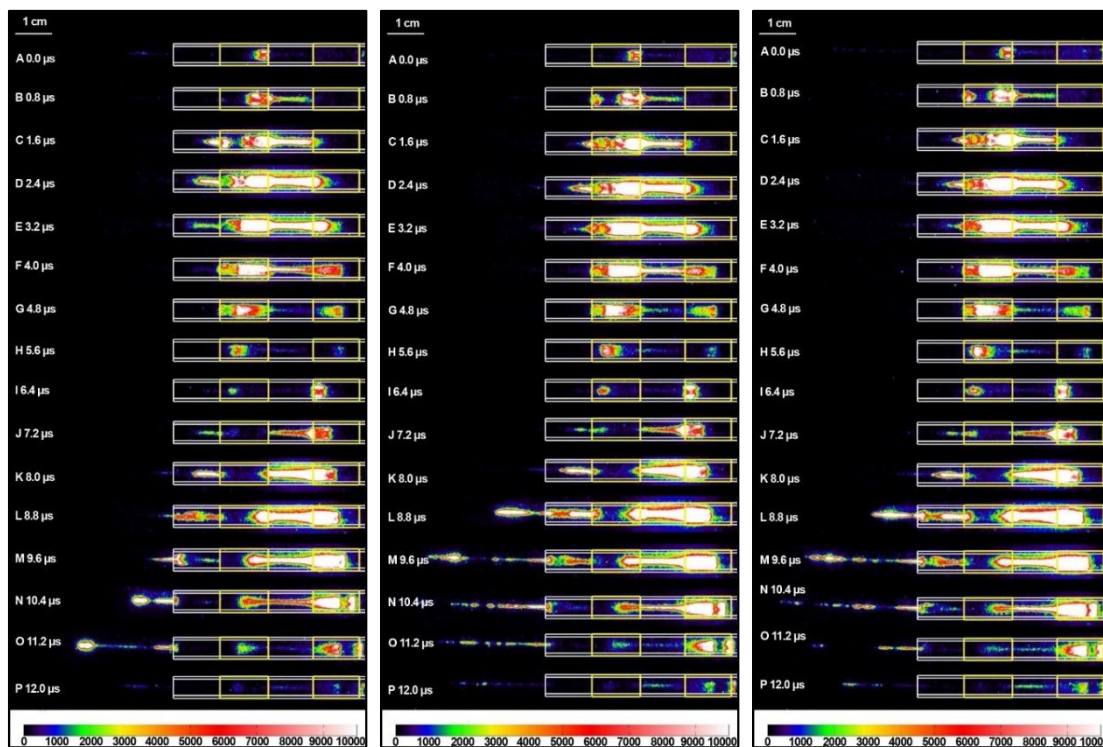
Sada ćemo preći na analizu uticaja dodatka argona u malom procentu radnom gasu. Protok radnog gasa je bio 3 slm, a procenat argona koji smo dodavali u radni gas je bio 0.5%, 1.0% ,1.5% i 5%. Snaga predana plazmi je 4 W, a elektrodna konfiguracija je 15 mm rastojanje od ruba cevčice do napajane elektrode i rastojanje između elektroda, konfiguracija 15 mm-15 mm. Na slici 6.4. je prikazana shema plazma mlaza, a na slici 6.5. su prikazani signali za protok 3 slm (0.5% argona u helijumu).



Slika 6.4. Shema plazma mlaza koji je korišćen za ispitivanje uticaja argona na formiranje PAPS-a.



Slika 6.5. Signali za plazma mlaz za smešu helijum/argon 3 slm, 0.5% argona, snaga 4 W.

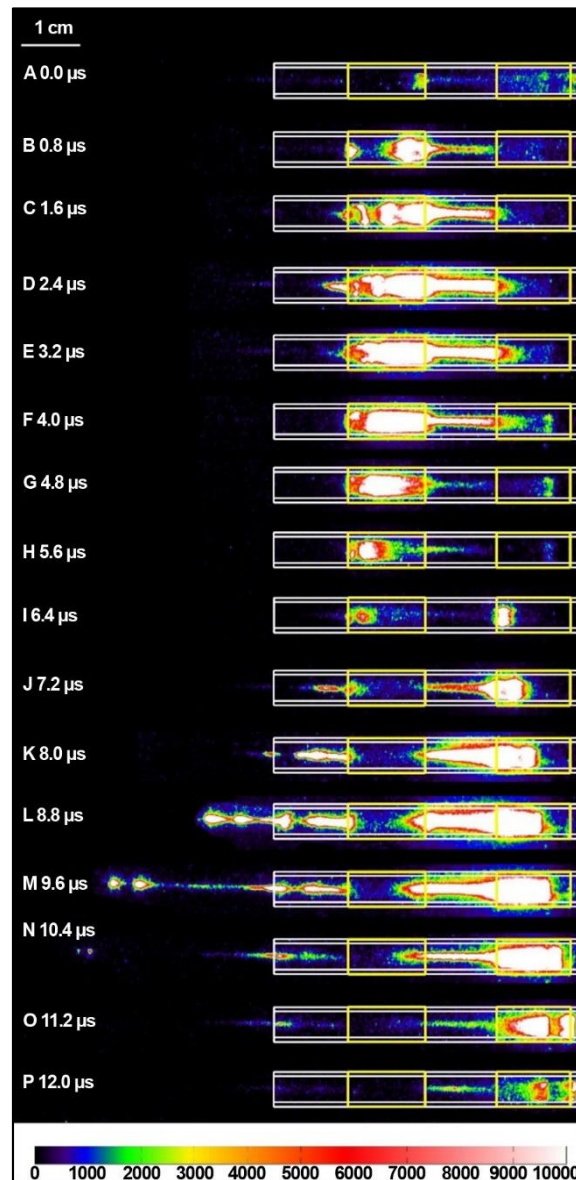


Slika 6.6. Vremenski razloženi iCCD snimci plazma mlaza, za protok helijuma od 3 slm, snagu 4 W, i dodatak argona od 0.5% (levo), 1.0% (sredina) i 1.5% (desno).

Prvo ćemo opisati snimke za 0.5 % slika 6.6. levo. Ponašanje plazme unutar cevčice je dosta drugačije u odnosu na slučaj kada imamo čist helijum. U uzemljenoj elektrodi u negativnom poluperiodu pojavljuju dva jonizaciona fronta C(1.6 μ s) i D(2.4 μ s) koji se kreću jedan prema drugome do spajanja i onda ostaju na tom mestu, od E(3.2 μ s) do H(5.6 μ s). Plazma formirana između elektroda je visokog intenziteta i nije ograničena ivicama uzemljene i napajane elektrode već ulazi jednim delom u njih. Plazma između elektroda je nije koncentrisana samo u osi cevčice već se širi ka zidovima cevčice. Formiranje PAPS-a počinje već u zoni napajane elektrode I(6.4 μ s), zatim se pomera ka rubu napajane elektrode i kreće ka mlaznici u vidu tankog stuba pražnjenja. U trenutku kada jonizacioni front stigne u blizinu mlaznice, gde dolazi u kontakt sa vazduhom, pojavljuje se plazma koja je „zalepljena“ za zidove cevčice i istovremeno izlazi iz nje u obliku šiljka, tačka M(9.6 μ s). PAPS se pojavljuje u tačkama N(10.4 μ s) i O(11.2 μ s). On se sastoji od dva paketa plazme koji se međusobno dodiruju i zajedno kreću kroz vazduh. I ovde je PAPS spojen plazma kanalom slabe emisije sa glavnim delom plazme.

Prilikom dodatka argona od 1.0 i 1.5 % (slika 6.5 sredina i slika 6.5. desno) radnom gasu dolazi do manje intenzivnog pražnjenja. Plazma mlaz van cevčice ne formira PAPS-

ove i pojavljuje se u vidu slabog svetljenja. Snimano brzom kamerom plazma se pojavljuje haotično na različitim rastojanjima od mlaznice, pa na snimcima izgleda kao da je razmrljana. Plazma u zoni elektroda se ponaša kao i u za 0.5% argona. Dodatak argona u procentu od 5% (slika 6.7.) dovodi do prelaza iz „difuznog“ u „dvostruki“ PAPS mod. Plazma u cevčici se ponaša slično kao i u prethodnim slučajevima. Formiranje „dvostrukog“ PAPS-a je pomeren u vremenu, sa uobičajenih N(10.4 μ s) na L(8.8 μ s). Na snimcima se jasno uočavaju dva PAPS-a koji se kreću na konstantnom međusobnom rastojanju od 3 mm, tačke L(8.8 μ s) i M(9.6 μ s).



Slika 6.7. Vremenski razloženi iCCD snimci plazma mlaza, za protok helijuma od 3 slm, dodatak argona od 5.0%, snaga 4 W.

6.3. Zaključak

U ovom poglavlju su predstavljeni rezultati koji su dobijeni za konfiguraciju 15 mm-15 mm, a kao radni gas je korišćena smeša helijuma i sintetičkog vazduha (0.5%, 1.0% i 1.5%) pri protoku od 3 slm i smeša argona i helijuma (0.5%, 1.0%, 1.5% i 5%).

Iz ovih rezultata se može zaključiti da:

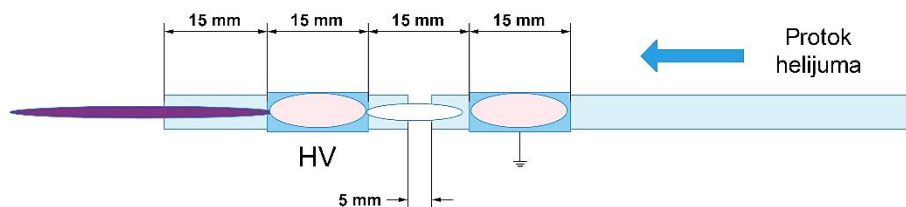
1. Procenat vazduha u pražnjenju pri datim eksperimentalnim uslovima može se kretati najviše do 1.5%, jer sa većim procentom pražnjenje se gasi.
2. Dodatak vazduha drastično menja pražnjenje, pojavljuju se višestruki PAPS-ovi, pražnjenje postaje intenzivnije između elektroda, pražnjenje se „lepi“ za zidove cevčice u međuelektrodnoj oblasti,
3. Pri procentu sintetičkog vazduha od 0.5% u napajanoj elektrodi se pojavljuju dva jonizaciona fronta koja se kreću jedan prema drugom.
4. Višestruki PAPS-ovi su međusobno povezani „tamnim“ provodnim kanalom malog intenziteta svetljenja
5. Pri dodatku argona pojavljuju se dvostruki plazma PAPS-ovi. Udeo argona u radnom gasu može da se menja u znatnom širem opsegu u odnosu na sintetički vazduh, a da se pritom pražnjenje ne ugasi.

7. Formiranje plazma mlaza sa napajanom elektrodom na dodatnoj cevčici, u cevčici u obliku slova T i u dvostrukom plazma mlazu

U ovoj glavi smo ispitali konfiguraciju kod koje je napajana elektroda na odvojenoj cevčici što omogućava da okolni vazduh ulazi u zonu plazme i rezultate uporedimo sa slučajem kada dodajemo sintetički vazduh iz prethodnog poglavlja. Takođe smo ispitali formiranje plazma mlaza u cevčici u obliku slova T i na kraju smo ispitali ponašanje dvostrukog plazma mlaza.

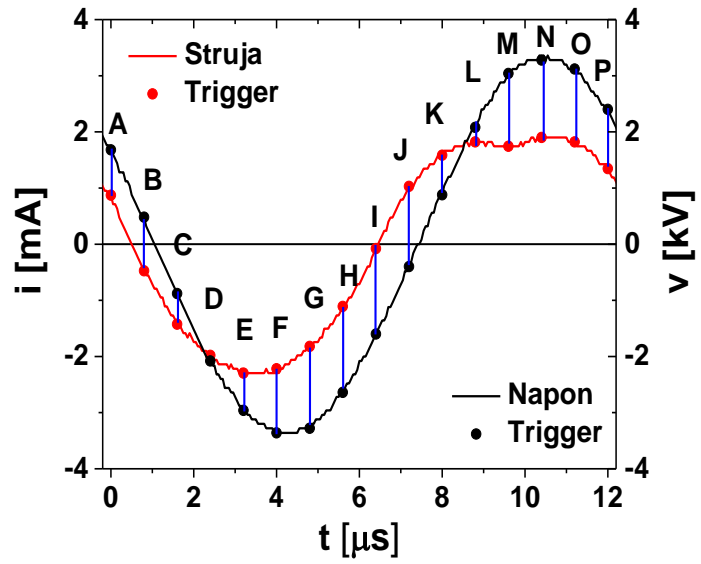
7.1. Formiranje plazma mlaza za konfiguraciju sa napajanom elektrodom na dodatnoj cevčici

Kako bi omogućili da se okolni vazduh meša sa helijumom pre ulaska u zonu napajane elektrode, cevčicu plazma mlaza smo podelili na dva dela, na levom (kraćem) kraju smo postavili napajanu elektrodu, a na dužem uzemljenu. Ovu konfiguraciju ćemo nazvati plazma mlaz sa „procepom“. Dve cevčice su centrirane i radni gas koji izlazi iz prve cevčice ulazi u drugu. Rastojanje između dve cevčice je 5 mm, što je dovoljno da molekuli iz vazduha difunduju u zonu pražnjenja nošeni strujom helijuma. Iz prikazanih rezultata ćemo videti da se u ovom slučaju plazma unutar napajane elektrode potpuno drugačije ponaša u odnosu na standardni plazma mlaz (15-15 mm) u čistom helijumu. Shema plazma mlaza je data na slici 7.1.

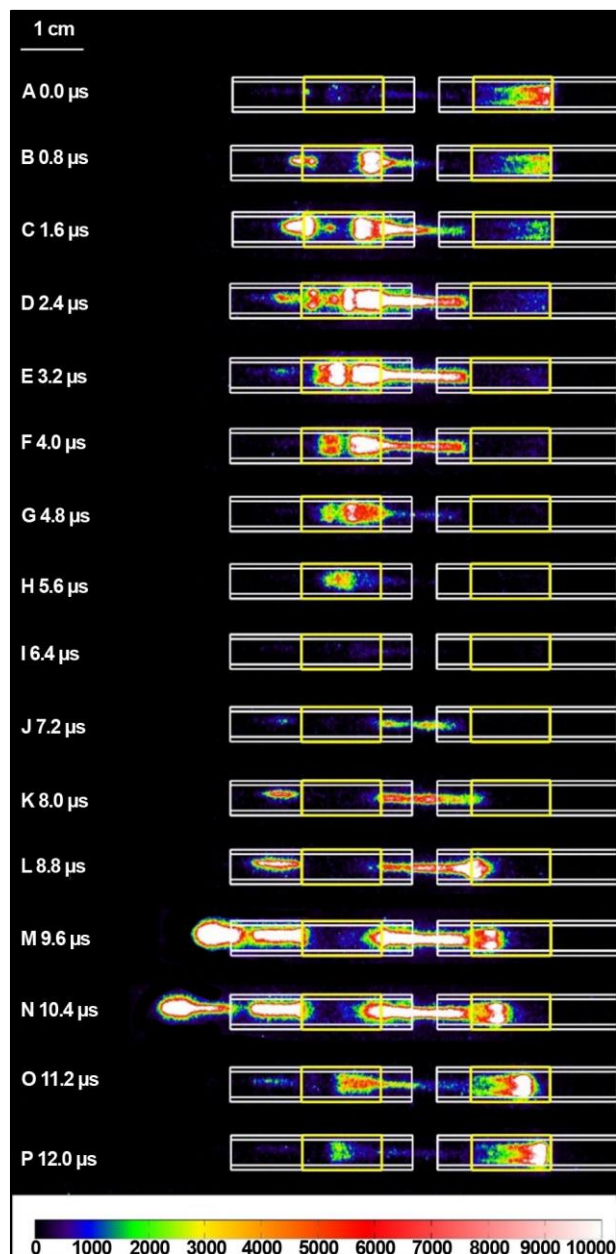


Slika 7.1. Shema plazma mlaza sa napajanom elektrodom na dodatnoj cevčici.

Strujni i naponski signali sa tačkama okidanja su dati na slici 7.2.



Slika 7.2. Signali za plazma mlaz sa napajanjem elektrodom na dodatnoj cevčici, protok helijuma 3 slm i snagu od 3 W.



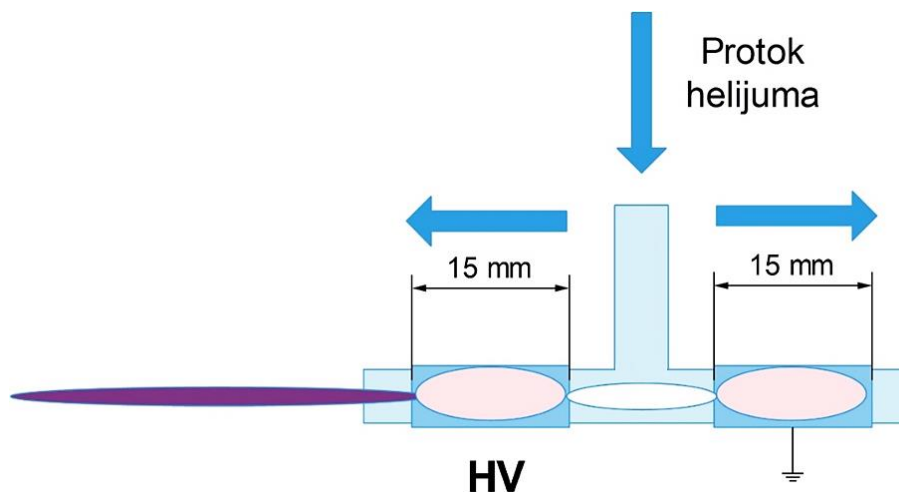
Slika 7.3. Plazma mlaz sa „procepom“, protok helijuma je 3 slm, snaga 3 W.

Vremenski razloženi iCCD snimci su prikazani na slici 7.3. od tačke A(0.0 μ s) do P(12.0 μ s) sa korakom od 0.8 μ s. Snaga predata plazmi je bila 3 W i protok helijuma 3 slm. Sa opisivanjem plazme ćemo krenuti od tačke A(0.0 μ s). U ovoj tački plazma se nalazi u uzemljenoj elektrodi. Najzanimljiviji deo razvoja plazme je negativan poluperiod od tačke B(0.8 μ s) do H(5.6 μ s) kada se front plazme formira na obe ivice napajane elektrode B(0.8 μ s). Posle formiranja dva plazma fronta se kreću jedan prema drugom. Jedan se kreće u smeru protoka helijuma, a drugi u suprotno od protoka. U tački C(1.6 μ s)

između dva jonizaciona fronta u napajanoj elektrodi se pojavljuje PAPS, koji se kreće suprotno od prostiranja helijuma, tačka C(1.6 μ s). U tački I(6.4 μ s) emisija se skoro gasi a novo pražnjenje se uspostavlja između elektroda. Začetak PAPS-a se pojavljuje u tački J(7.2 μ s) na levom rubu napajane elektrode unutar cevčice. Nakon ovog trenutka plazma se širi ka mlaznici i izlazi iz nje u tački M(9.6 μ s). Prilikom izlaska iz cevčice plazma značajno povećava svoju zapreminu i intenzitet, ovo se pojavljuje i kod standardnog plazma mlaza. Maksimalni domet dostiže u tački N(10.4 μ s), a nakon ove tačke plazma van cevčice se gasi, što se razlikuje u odnosu na standardni plazma mlaz koji se prostire sve do O(11.2 μ s). Smanjenje dometa je posledica mešanja helijuma sa molekulima iz vazduha i smanjenja koncentracije helijuma u protoku radnog gasa. Ponašanje jonizacionog fronta u zoni uzemljene elektrode je isto kao i kod standardnog plazma mlaza, formira se na levom rubu uzemljene elektrode L(8.8 μ s) i prostire se ka desnom rubu unutar cevčice do tačke C(1.6 μ s).

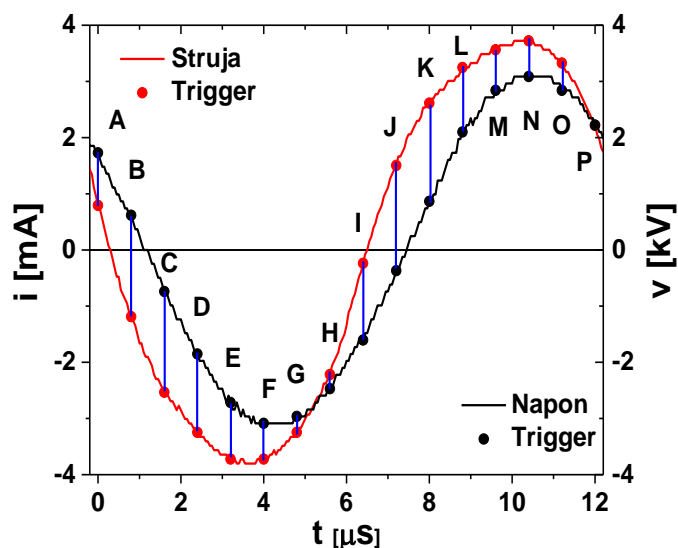
7.2. Vremenski razloženi snimci za T plazma mlaz

U ovom poglavlju smo ispitivali ponašanje plazma mlaza koji se formira u staklenoj cevčici u obliku slova „T“. U daljem tekstu ćemo za ovaj plazma mlaz koristiti izraz „T plazma mlaz“. Elektrode su cilindričnog oblika, napravljene su od provodne folije i istih su dimenzija kao i kod standardnog plazma mlaza, odnosno široke su 15 mm. Rastojanje između napajane i uzemljene elektrode je 15 mm. Sličnu konfiguraciju plazma mlaza je koristila Deborah O'Connell sa saradnicima (Algwari and O'Connell, 2011). Napajana i uzemljena elektroda su postavljene na rastojanje od 5 mm od rubova staklene cevčice. Shema „T plazma mlaza“ je data na slici 7.4.



Slika 7.4. Shema plazma mlaza u obliku slova T (pogled odozgo).

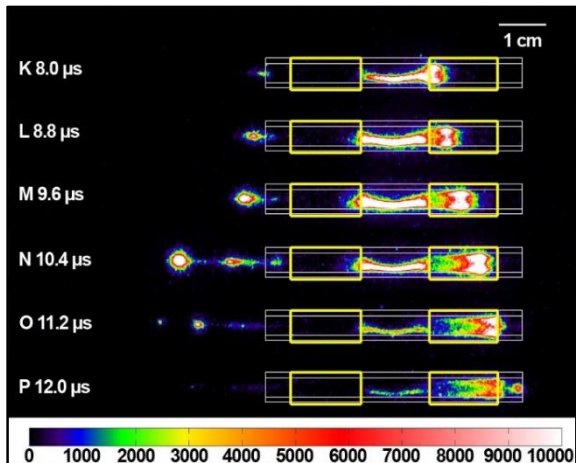
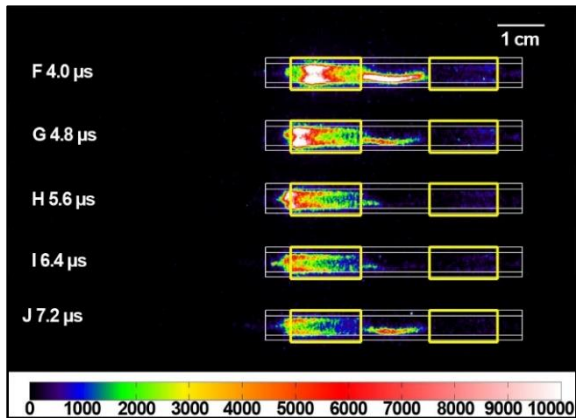
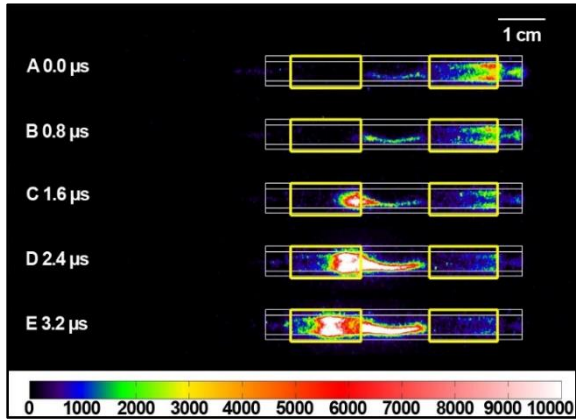
Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere su dati na slici 7.5.



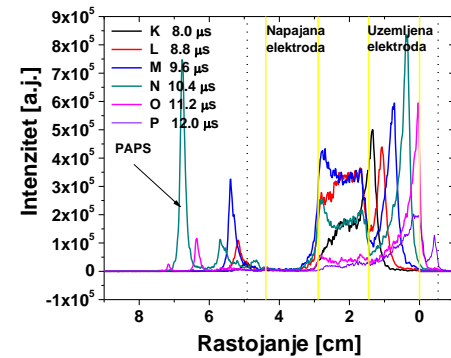
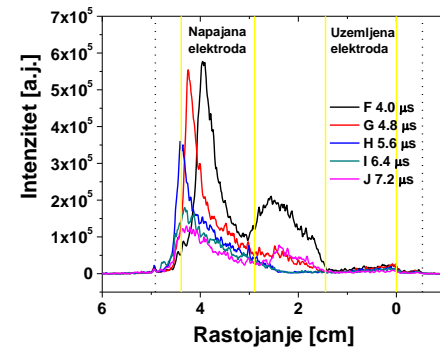
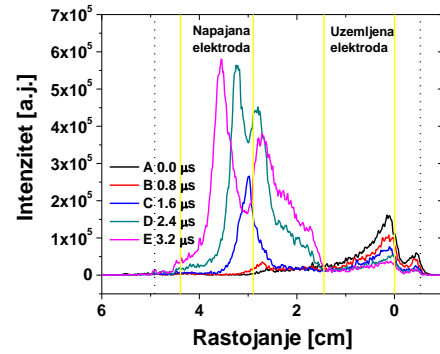
Slika 7.5. Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere za „T plazma mlaz“, protok helijuma 4 slm, snaga 4 W.

Na slici 7.6. sa leve strane su prikazani vremenski razloženi snimci, a sa desne aksijalni profili emisije „T plazma mlaza“. Snimci su napravljeni u osi glavne cevčice tako da se ona ne vidi na slici. Slike su obeležene slovima od A(0.0 μs) do P(12.0 μs) sa lprakom od 0.8 μs . Snaga predana plazmi je 4 W, a protok helijuma 4 slm.

iCCD snimci



Aksijalni profili



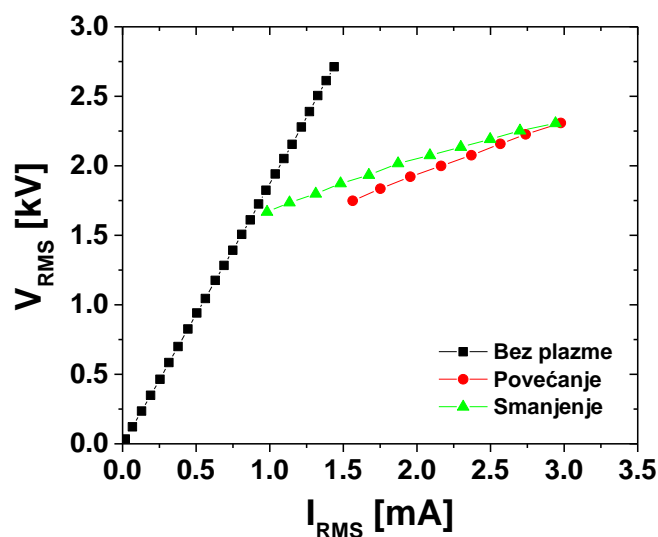
Slika 7.6. Vremenski razloženi snimci i aksijalni profili za T mlaza, protok helijuma 4 slm, snaga 4 W.

Iz iCCD snimaka se može videti prostiranje plazme u cevčici. Plazma se u negativnom poluperiodu od tačke B(0.8 μs) do I(6.4 μs) formira između elektroda i

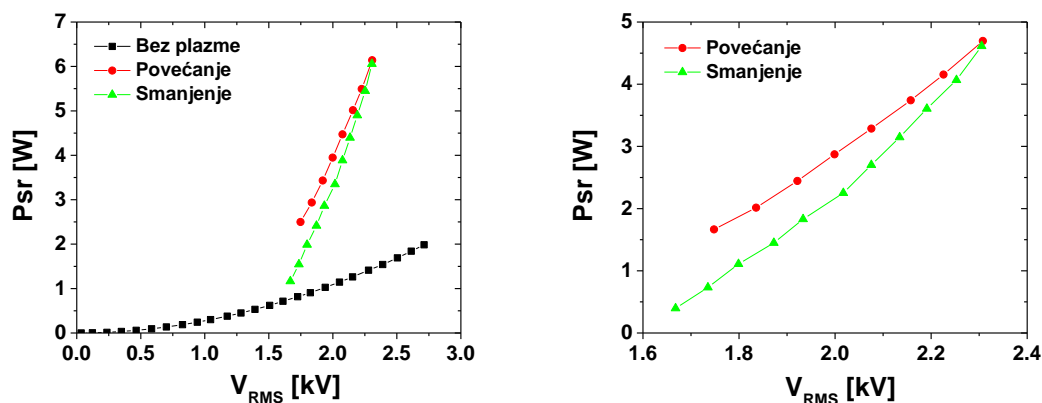
prostire u napajanoj elektrodi i kreće se ka rubu cevčice (leva elektroda). Na graficima sa profilima ovo se uočava kao dva pika, jedan oštiji u napajanoj elektrodi i jedan difuzan između elektroda. U pozitivnom poluperiodu, tačke J(7.2 μ s) do P(12.0 μ s), plazma mlaz se prostire u napajanoj elektrodi, a u isto vreme počinje da izlazi iz cevčice. Maksimalni intenzitet dostiže u tački N(11.2 μ s). Domet PAPS-a je manji u odnosu na slučaj kada smo koristili ravnu cevčicu.

Strujno naponske karakteristike za T plazma mlaz

Na slici 7.7. su prikazane strujno naponske karakteristike „T plazma mlaza“. Impedansa sistema je 1.9 M Ω kada plazma nije formirana, a u smeru povećanja snage je 0.4 M Ω , a u smeru smanjenja 0.33 M Ω . Na slici 7.8. su prikazane srednje snage sistema (levo) i snage predate plazmi (desno) u funkciji napona. Vidi se da je srednja snaga predata plazmi od 0.7 W do 4.5 W, a naponi su od 1.6 kV – 2.3 kV. I u ovom sistemu se uočava blaga pojava histerezis efekta.



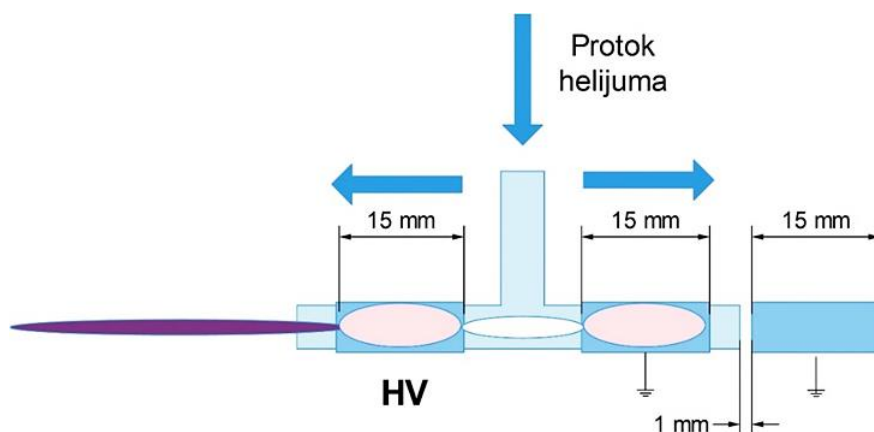
Slika 7.7. Strujno naponske karakteristike za T plazma mlaz, protok helijuma 4 slm.



Slika 7.8. Srednje snage sistema u funkciji napona (levo), snage predate plazmi (desno).

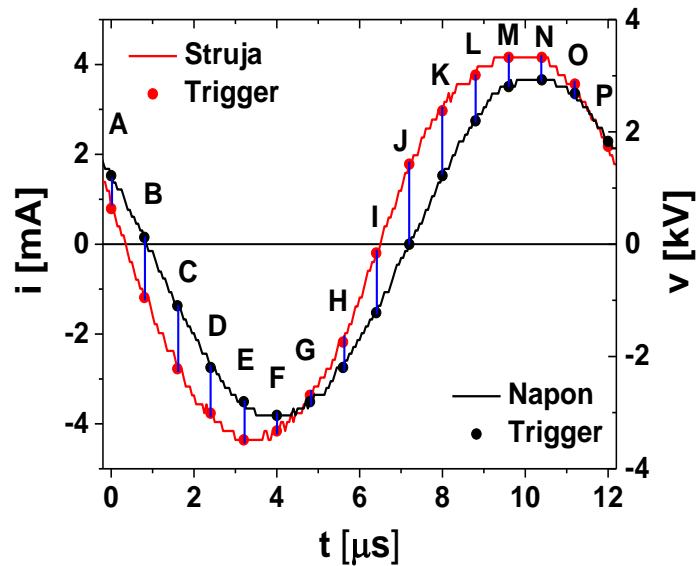
7.3. Vremenski razloženi snimci za T plazma mlaz sa dodatnom uzemljenom elektrodom

U ovoj glavi smo ispitivali uticaj treće uzemljene elektrode na formiranje plazme u „T plazma mlazu“. Uzemljena elektroda je postavljena na rastojanje od 1 mm od mlaznice na strani „T cevčice“ na kojoj se nalazi uzemljena elektroda. I u ovom slučaju rastojanje između elektroda na cevčici je 15 mm. Na slici ispod je prikazana shema plazma mlaza 7.9.



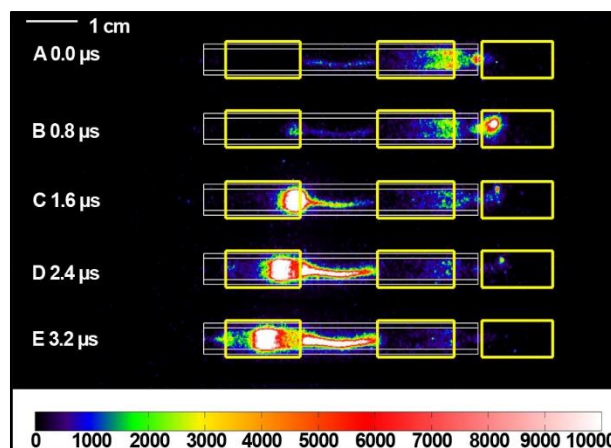
Slika 7.9. Plazma mlaz sa T cevčicom i dodatnom uzemljenom elektrodom (pogled odozgo).

Strujni i naponski signali su prikazani na slici 7.10., a tačke okidanja kamere su obeležene slovima od A(0.0 μ s) do P(12.0 μ s).



Slika 7.10. Strujno naponski signali za T plazma mlaz sa dodatnom uzemljenom elektrodom, protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

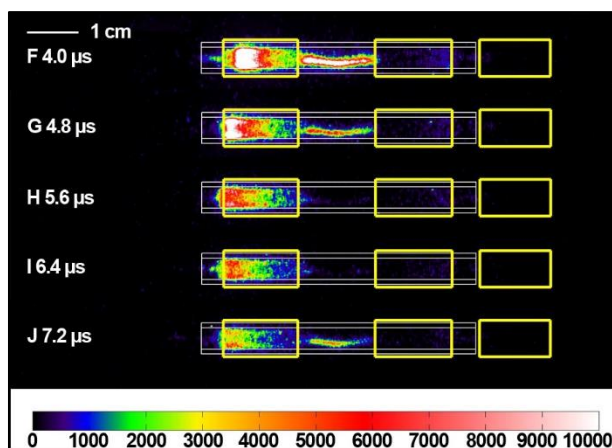
Snimci iCCD kamerom su napravljeni u osi glavne cevčice tako da se ona ne vidi. Na slici 7.11. su prikazani snimci za vremena od A(0.0 μ s) do (3.2 μ s). Za prve četiri tačke od A(0.0 μ s) do D(2.4 μ s) plazma jednim delom ulazi u dodatnu uzemljenu elektrodu nakon prolaska kroz uzemljenu elektrodu na cevčici.



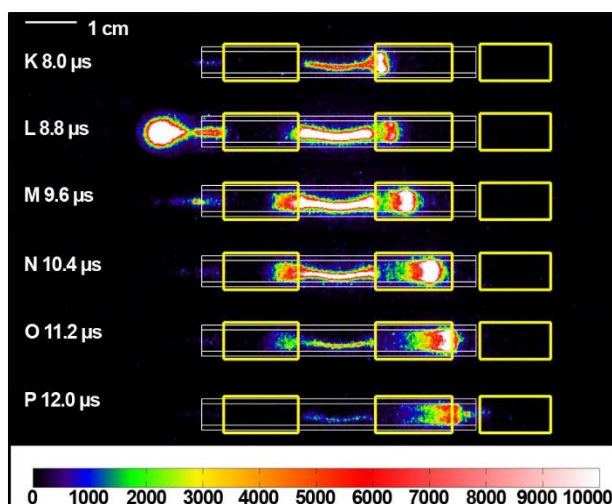
Slika 7.11. Vremenski razloženi iCCD snimci za vremena kašnjenja od A(0.0 μ s) do E(3.2 μ s), protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

Od tačke C(1.6 μ s) do I(6.4 μ s) plazma se kreće kroz napajanu elektrodu, a u isto vreme se nalazi i u oblasti između uzemljene i napajane elektrode. U ovom slučaju PAPS

se formira samo u tački L(8.8 μ s), dok u ostalim tačkama nije primećen. U pozitivnom poluperiodu plazma se kreće kroz uzemljenu elektrodu K(8.0 μ s) do P(12.0 μ s) slika 7.12.



Slika 7.12. Vremenski razloženi iCCD snimci za vremena kašnjenja F(4.0 μ s) do J(7.2 μ s), protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.



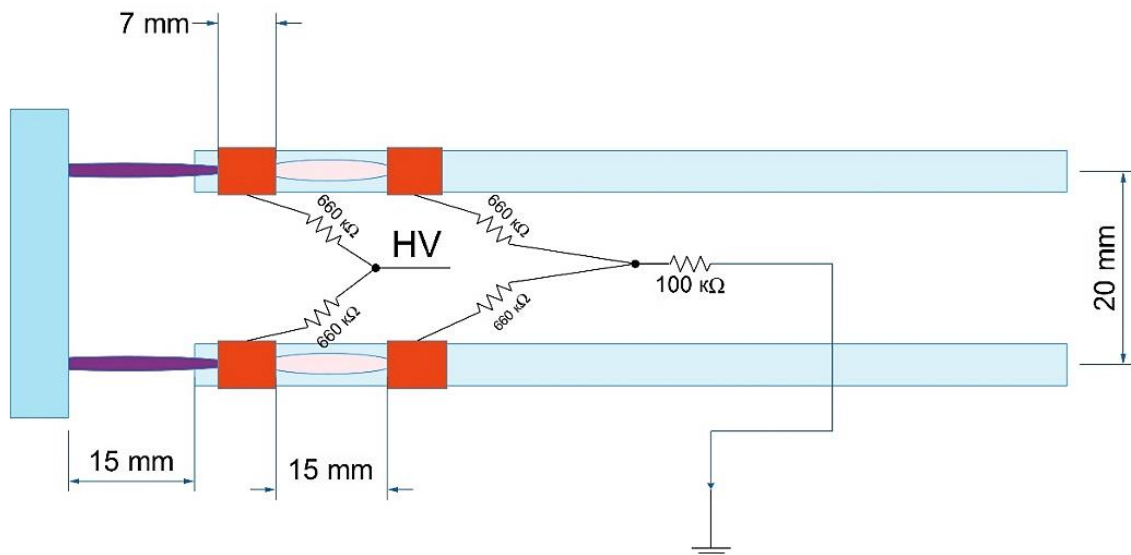
Slika 7.13. Vremenski razloženi iCCD snimci za vremena kašnjenja K(8.0 μ s) do P(12.0 μ s), protok helijuma 4 slm i snagu 4 W.

Korišćenjem cevčice T oblika ispitali smo kako smer protoka plazma mlaza utiče na kretanje plazme u zoni uzemljene elektrode. Promenom smera protoka radnog gasa u zoni uzemljene elektrode plazma se ne zadržava samo u zoni elektrode već stiže do ruba cevčice. Kada se doda treća uzemljena elektroda sa strane uzemljene electrode nismo uspeli da dobijemo pražnjenje u dodatnoj elektrodi.

7.4. Dvostruki plazma mlaz

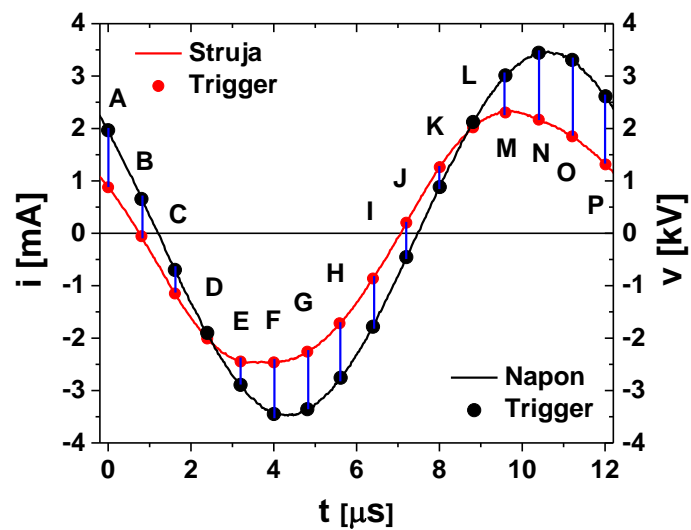
Vremenski razloženi snimci za dvostruki plazma mlaz

U ovom poglavlju smo ispitivali dvostruki plazma mlaz, koji se sastoji iz dva identična plazma mlaza koja su povezana na isto napajanje. Dve cevčice su postavljene na rastojanje od 20 mm. Elektrode su napravljene od bakarne folije širine 7 mm, a rastojanje između elektroda je 15 mm. Kako bi se ograničile struje koje prolaze kroz pojedinačne plazma mlazeve napajane i uzemljene elektrode su povezane na otpornike od po 660 k Ω . Shema plazma mlaza je data na slici ispod 7.14.

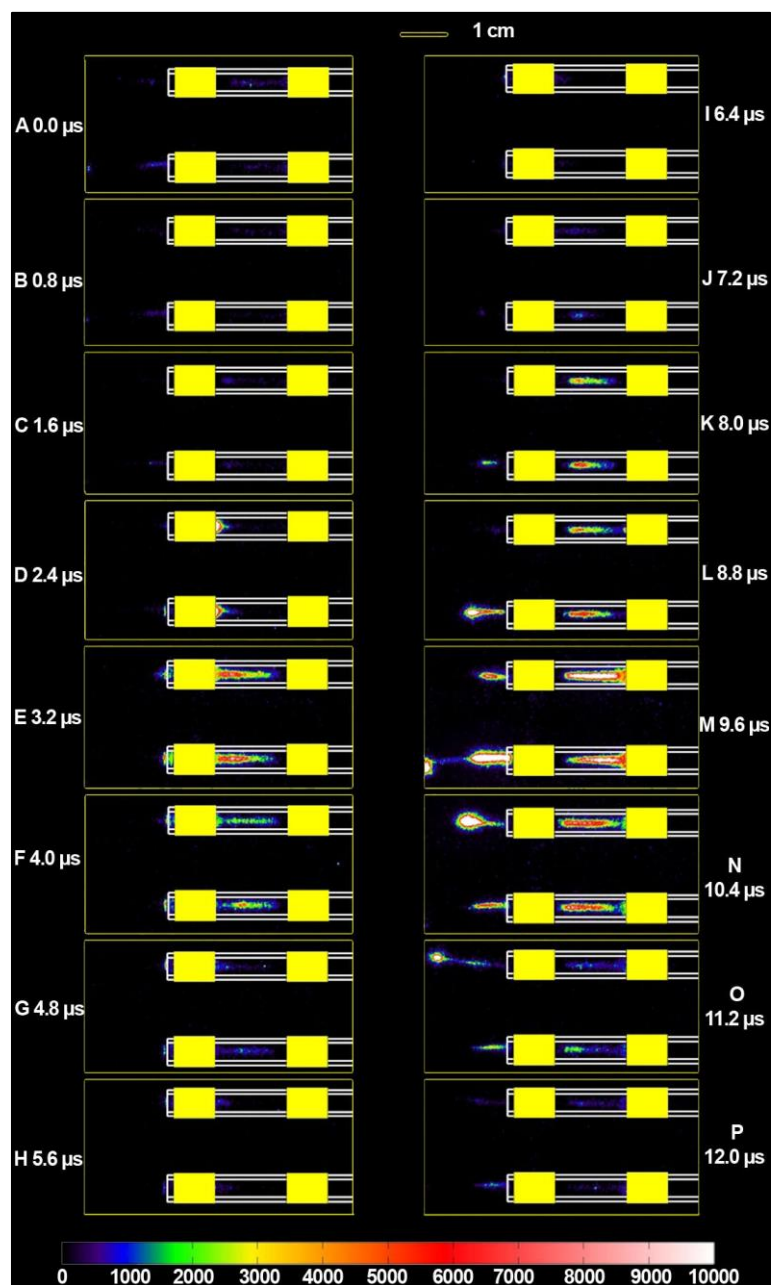


Slika 7.14. Shema dvostrukog plazma mlaza.

Strujni i naponski signali sa pozicijama okidanja kamere su prikazani na slici 7.15. Vrednost napona je oko 7 kVpp, a struje oko 5 mApp. Pozicije okidanja su obeležene slovima od A do P što odgovara vremenima od A(0.0 μ s) do P(12.0 μ s) sa korakom od 0.4 μ s. Snaga koja je predata plazmi je bila 1.8 W, a protok helijuma 4 slm.



Slika 7.15. Strujno i naponski signali dvostrukog plazma mlaza za snagu 1.8 W i protok helijuma od 4 slm.



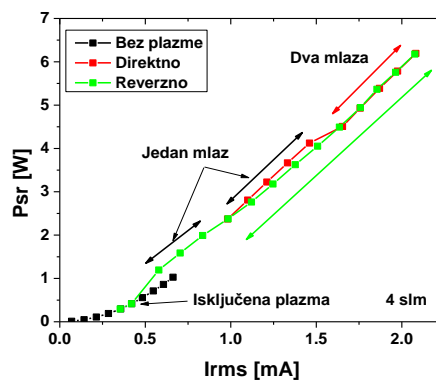
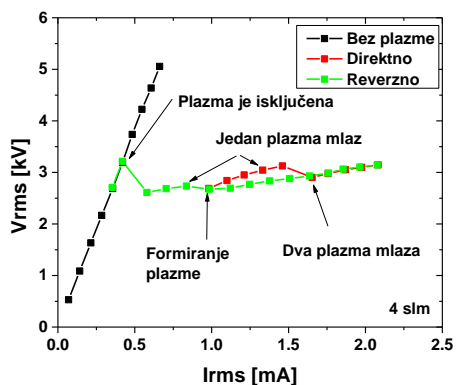
Slika 7.16. Vremenski razloženi iCCD snimci dvostrukog plazma mlaza, protok helijuma 4 slm, snaga 1.8 W.

Vremenski razloženi iCCD snimci su prikazani na slici 7.16. Struja koja odgovara poziciji okidanja A ($0.0 \mu\text{s}$) je oko 1 mA, a napon je oko 2kV. Za ovu poziciju emisija svetlosti potiče od propratnog svetljenja iz prethodnog pobudnog perioda. Emisija je veoma malog intenziteta sve do pozicije D ($2.4 \mu\text{s}$) kada plazma počinje da se formira na desnoj ivici napajane elektrode donjeg i gornjeg plazma mlaza. U ovoj poziciji struja je oko 2 mA, a napon oko 2kV. Sa daljim smanjenjem struje i napona plazma se širi ka

uzemljenoj elektrodi, pozicije od E(3.2 μ s) do G(4.8 μ s). Posle minimuma, kada struja i napon počnu da rastu, emisije svetlosti skoro da nema sve do tačke K(8.0 μ s) kada postaju dovoljno veliki da omoguće formiranje plazme u pozitivnom poluperiodu. Kada strujni signal dostigne maksimum električno polje je dovoljno za formiranje prekursora PAPS-a, ali samo u donjem plazma mlazu, dok u gornjem plazma mlazu nema ove pojave. U poziciji M(9.6 μ s) plazma stiže do mete za donji plazma mlaz, a u poziciji O(11.2 μ s) za gornji plazma mlaz. Srednja brzina prostiranja plazma paketa za oba plazma mlaza je oko 6.4 km/s. Brzina prostiranja PAPS-a kod dvostrukog plazma mlaza sa metom je uporediva sa brzinom koju smo dobili za standardnu konfiguraciju plazma mlaza 15-15 mm za prostirane plazme u zoni elektroda (5 km/s). Kašnjenje između dva plazma mlaza van cevčice je oko 1.6 μ s. Ovo kašnjenje je najverovatnije posledica varijacije u kapacitivnosti elektroda. Takođe se primećuje i da se plazma mlazevi odbijaju što ukazuje da je plazma mlaz naelektrisan, slično ponašanje su primetili M Ghasemi koji su posmatrali nizove plazma mlazeva. U slučaju kada imaju dva plazma mlaza, oni se međusobno odbijaju jer se odbijaju joni koji se nalaze u njima, a kada imaju veći broj plazma mlazeva odbijanje se dobija samo za one plazma mlazeve koji se nalaze na krajevima (M Ghasemi, P Olszewski, J W Bradley, 2013).

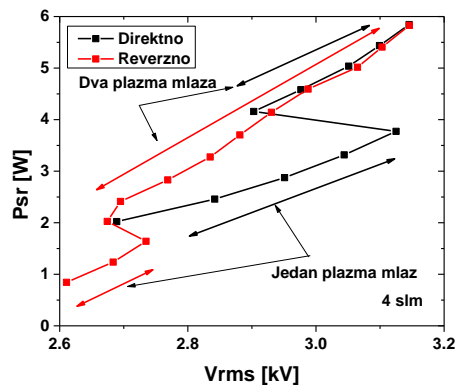
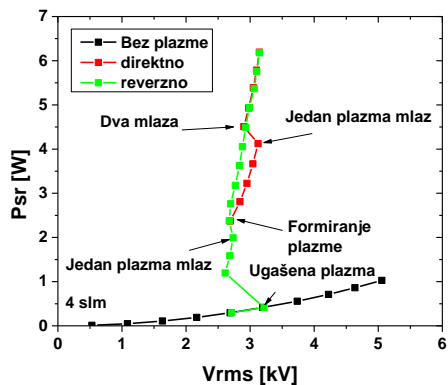
Strujno-naponske karakteristike dvostrukog plazma mlaza

Na slici 7.17. su prikazane strujno naponske karakteristike dvostrukog plazma mlaza (levo) i srednja snaga u sistemu u funkciji struje desno. Iz strujno naponskih karakteristika izračunate su impedanse sistema. Kada nema plazme impedansa je 7.7 M Ω , kada se upali samo jedan plazma mlaz 0.9 M Ω , a kada se upali i drugi impedansa padne na 0.45 M Ω . Impedansa za dva plazma mlaza je duplo manja nego za jedan. Srednja snaga u sistemu bez plazme u funkciji struje se ponaša eksponencijalno, a kada se plazma formira postaje linearna funkcija struje. Bez plazme je snaga do 1 W, a sa plazmom ide do 6.5 W. Na slici su prikazani direktni i reverzni smer i označena mesta na kojima su formirana jedan i dva mlaza. Kada je plazma formirana struja je u opsegu od 0.5 mA do 2.25 mA. U direktnom smeru (crvena linija) prvo se pali jedan plazma mlaz, a zatim i drugi, što se dešava i u smeru smanjenja snage. Ispod struje od 0.5 mA plazma se gasi, a strujno naponske karakteristike se vraćaju na vrednost bez plazme.



Slika 7.17. Strujno naponska kriva levo i srednja snaga predana plazmi u funkciji struje (desno), protok helijuma 4 slm.

Na slici 7.18. su prikazane srednje snage sistema u funkciji napona (levo) i snaga predana plazmi (desno). Sa slike se vidi da je snaga predana plazmi veća kada su oba plazma mlaza upaljena. Snaga predana plazmi se kreće od 1 W do 6 W.



Slika 7.18. Srednja snaga u sistemu u funkciji napona (levo), snaga predana plazmi (desno), protok helijuma 4 slm.

7.5. Zaključak

U ovoj glavi smo ispitali ponašanje plazme za konfiguraciju „procep“ kod koje se napajana elektroda nalazi na posebnoj cevčici što omogućava da vazduh ulazi u zonu pražnjenja i samim tim utiče na formiranje PAPS-a. U ovoj konfiguraciji pražnjenje u zoni elektroda je intenzivnije, ali je zbog smanjenje molske frakcije helijuma zbog ulaska vazduha smanjen i domet PAPS-a u odnosu na standardni plazma mlaz.

„T plazma mlaza“. Prostiranje plazme u cevčici je drugačije u odnosu na standardni plazma mlaz, domet plazma mlaza je manji u odnosu na standardni plazma mlaz, a plazma se prostire i preko ivice uzemljene elektrode. Prostiranje plazme preko ivice uzemljene elektrode je posledica istog smera prostiranja jonizacionog fronta i protoka helijuma.

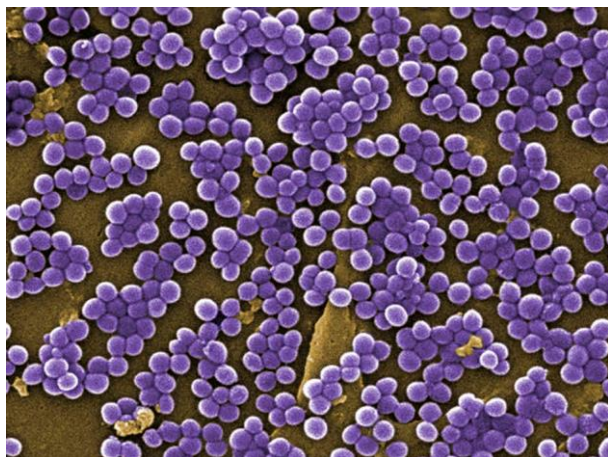
U ovoj glavi je predstavljen i sistem sa dva plazma mlaza koji se napajaju pomoću jednog napajачa. Korišćenjem vremenski razloženih iCCD snimaka primetili smo asinhrono ponašanje plazma mlazeva, koje je najverovatnije posledica malih varijacija u elektrodnim geometrijama koje dovode do razlike u njihovim kapacitivnostima. Da bi se u potpunosti shvatilo asinhrono ponašanje potrebna su dalja istraživanja. Ova pojava je veoma značajna jer omogućava fino podešavanje pojedinačnih plazma mlazeva i otvara širok spektar mogućih primena.

8. Tretman bioloških uzoraka plazma mlazom

U ovom poglavlju ćemo opisati postupak pripremanja uzoraka bakterija za tretman plazma mlazom. Prikazaćemo efekte na bakterije koje se nalaze na hranljivoj podlozi i u obliku biofilma, kao i uticaj tretmana plazmom na DNK bakterija. Bakterija koja je izabrana za tretmane je Methicilin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) koja je Gram-pozitivna bakterija. Ona može da preživi u anaerobnim uslovima i veoma je česta bakterija u flori sluznice nosa kod zdravih odraslih osoba. U nekim uslovima izaziva lokalne infekcije kože i mekih tkiva, postoperativne infekcije hirurških rana i infekcije opekotina. Sojevi ove bakterije mogu pored toga da izazovu i brojne invazivne i sistemske infekcije. Ova bakterija brzo razvija različite mehanizme rezistencije na antibiotike i zato je od velikog značaja naći alternativne metode sterilizacije kao što je tretman atmosferskim plazmama.

8.1. Eksperimentalna postavka i pripremanje uzoraka bakterija za tretman atmosferskim plazma mlazom

Većina bakterija u prirodi ima tendenciju da formira biofilme. Biofilmovi su kolonije bakterija koje su ugrađene u matricu koja prekriva određenu površinu. Metabolizam i fiziologija bakterija u biofilmu se znatno razlikuje u odnosu na pojedinačne bakterije. Razni tipovi niskotemperaturnih atmosferskih plazmi su do sada korišćeni za sterilizaciju površina, plazma igla, razne vrste dielektričnih barijernih pražnjenja i plazma mlazeva (Fridman *et al.*, 2008; Weltmann *et al.*, 2010; Schneider *et al.*, 2012). Uzorci bakterija koji su korišćeni u eksperimentu su pripremani i analizirani od strane kolega sa Stomatološkog fakulteta, dok je naš zadatak bio da nađemo optimalne parametre za tretman bakterija plazma mlazom. Na slici 8.1. su prikazane MRSA bakterije uveličane elektronskim mikroskopom.



Slika 8.1. MRSA bakterije uveličane elektronskim mikroskopom
(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/MRSA_SEM_9994_lores.jpg).

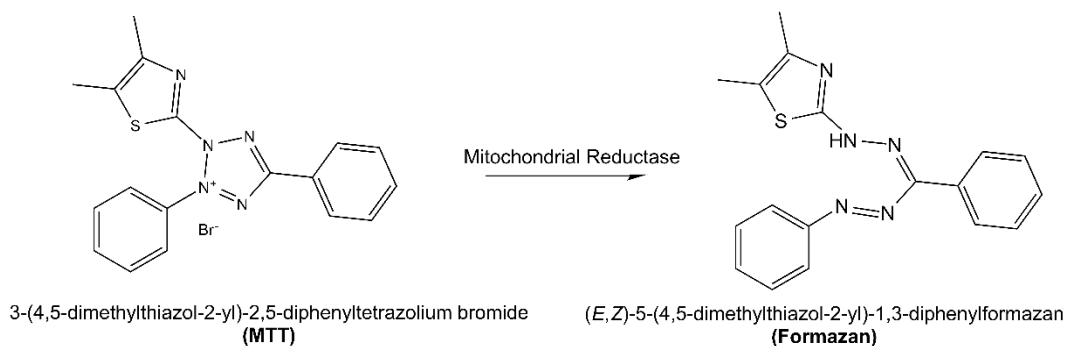
Za tretmane plazmom smo koristili soj bakterija *Staphylococcus aureus* (ATCC 25922), čija se koncentracija meri fotometrijski prema McFarland–ovoj skali i uzorci su postavljeni u bunarčiće mikrotitar ploče sa 48 bunarčića zajedno sa hranjivim medijumom BHI (engl. *Brain Heart Infusion Broth*). Koncentracija bakterija koje smo tretirali je bila 10^6 CFU/ml. Na slici 8.2. sa leve strane je prikazana ploča na kojoj su zasejane bakterije i sa koje se uzimaju kolonije kako bi se dobili rastvori odgovarajućih koncentracija. Na slici desno prikazan je tretman bakterija koje se nalaze u mikrotitar ploči od 48 bunarčića.



Slika 8.2. Uzimanje bakterija sa podloge za gajenje (levo); tretman bakterija plazma mlazom na mikrotitar ploči od 48 bunarčića (desno).

8.2. MTT test

Vijabilnost odnosno sposobnost preživljavanja bakterija je određena korišćenjem MTT ogleđa i zasniva se na sposobnosti živih ćelija da promene rastvorljivi MTT u nerastvorljivi formazan u mitohondrijama (Slika 8.3.). Nakon odgovarajućih tretmana bakterija plazmom dodavan je MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide, Sigma-Aldrich, SAD) u koncentraciji 0.5 mg/ml. Bakterije su zatim inkubirane 3 h na 37°C. U mitohondrijama živih bakterija žuti MTT se redukuje u ljubičasti formazan koji je nerastvoran u vodi. Novonastali kristali formazana se rastvaraju u 0.1 N HCl u izopropanolu. Posle rastvaranja, iz bunarčića sa mikrotitar ploče sa 48 bunarčića, uzorci se prebacuju u bunarčiće na ploči sa 96 bunarčića i meri se optička gustina na automatskom čitaču za mikrotitar ploče na 540 nm (Labsystems Multiskan PLUS).

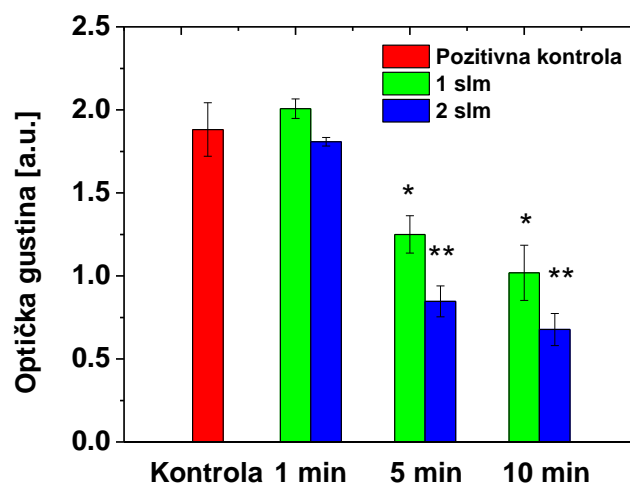


Slika 8.3. Redukcija MTT u formazan

(https://en.wikipedia.org/wiki/MTT_assay#/media/File:MTT_reaction.png).

Bakterije su tretirane pomoću plazma mlaza koji je u elektrodnoj konfiguraciji 15-15 mm sa transparentnim elektrodama. Rastojanje između mlaznice plazma mlaza i dna bunarčića je u svim tretmanima bilo 10 mm. Hranljivi medijum koji se nalazi u bunarčićima preko biofilma bakterija je vađen neposredno pre tretmana i odmah posle tretmana vraćan u isti bunarčić. Korišćena su dva protoka helijuma 1 slm i 2 slm, a snaga pri svim tretmanima je bila 4 W. Na slici 8.4. su prikazani rezultati tretmana bakterija plazma mlazom analizirani MTT testom. Prikazani rezultati su obrađeni t-testom i obeležene su vrednosti sa * za nivo značajnosti 0.05 i sa ** za nivo značajnosti 0.01 u odnosu na kontrolu. Sa slike se može zaključiti da koncentracija preživelih bakterija u

uzorku zavisi od dužine tretmana i korišćenog protoka. Kada uporedimo dva protoka koja smo koristili 1 slm i 2 slm, vidimo da je veći protok helijuma doveo do većeg smanjenja bakterija. Drugi parametar koji utiče na koncentraciju bakterija je vreme izlaganja plazmi. Za dužinu tretmana od 1 minuta praktično nemamo nikakvo smanjenje koncentracije bakterija. Za 5 minuta koncentracija se smanji na 66% i 45% od početne koncentracije, a za duže vreme ekspozicije od 10 minuta koncentracija se smanji na 54 % odnosno 36 % za 1 slm i 2 slm.

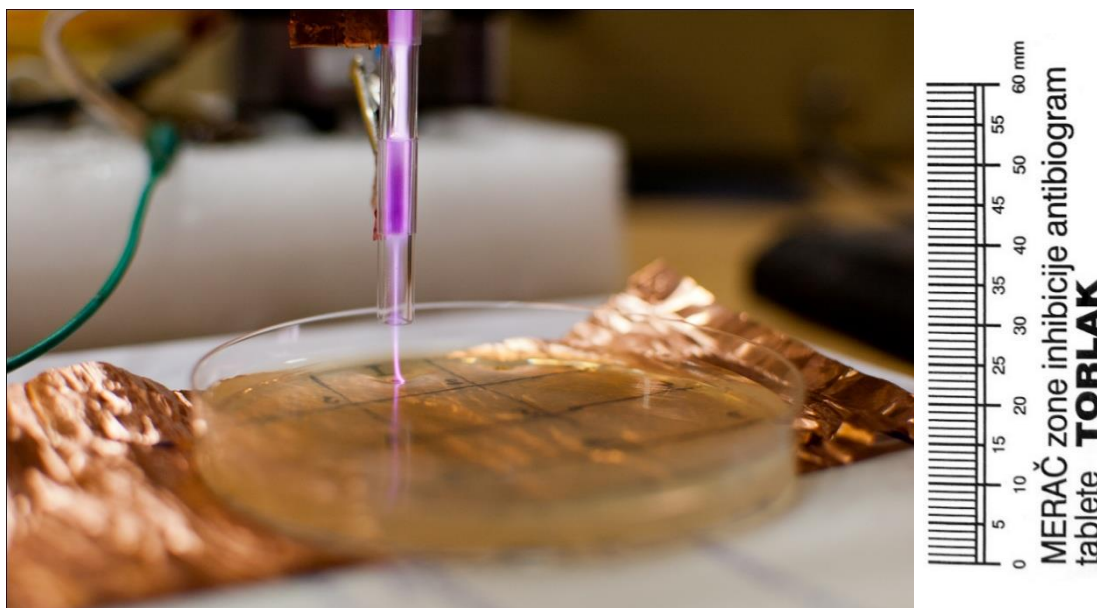


Slika 8.4. MTT test za tretman bakterija plazma mlazom, * nivo značajnosti 0.05, ** nivo značajnosti 0.01.

8.3. Zone inhibicije

Drugi test koji smo uradili je određivanje zona inhibicije posle tretmana plazma mlazom. Prilikom tretmana plazma mlazom dolazi do potpunog uklanjanja bakterija sa hranljive površine na kojoj su zasejane bakterije. Na slici 8.5. sa leve strane je prikazan tretman bakterija plazma mlazom, a desno na slici prikazan je merač zona inhibicije. Očitavanje veličine zone inhibicije se vrši pomoću lenjira, nonijusa ili specijalnog merača. Za zasejavanje bakterija smo koristili rastvor bakterija koncentracije 0.5 McFarland, što odgovara koncentraciji od $1.5 \cdot 10^8$ CFU/ml. Primetili smo da izlaganje uzoraka bakterija u petri šolji samo protoku helijuma ne utiče na razvoj i rast bakterija,

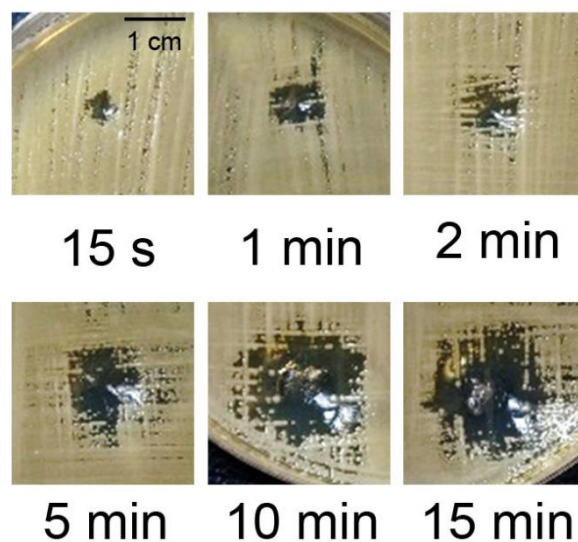
odnosno dolazi do formiranja kolonija na agaru i nema formiranja zone inhibicije. Prikazane zone inhibicije su isključivo posledica delovanja plazme na uzorke bakterija.



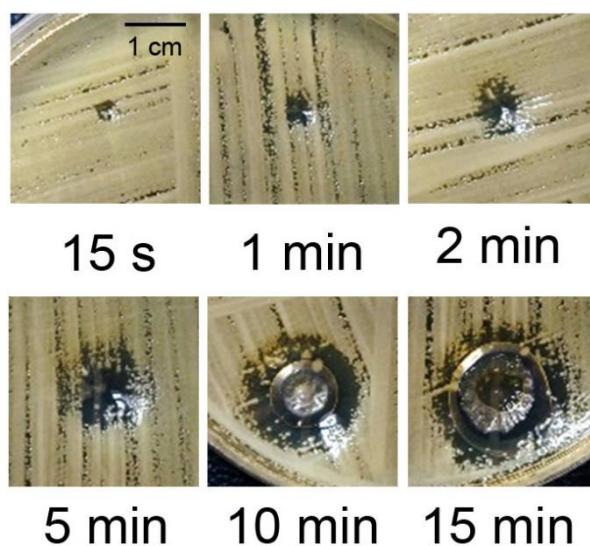
Slika 8.5. Tretman plazma mlazom (levo); merač zone inhibicije (desno).

Prilikom tretmana bakterija koje su zasejane na hranljivoj podlozi koristili smo dva protoka helijuma 1 slm i 2 slm. Snaga koja je korišćena je održavana konstantnom na 4 W za sve tretmane. Rastojanje uzorka od ruba cevčice je u svim eksperimentima bilo 10 mm.

Zone inhibicije su očitavane tako što je meren prečnik kruga u kome nisu razvijene bakterije, odnosno za potpuno čistu površinu. Zone inhibicije za protok 1 slm su prikazane na slici 8.6. Sa slike se vidi da veličina zone inhibicije veoma zavisi od dužine tretmana. Za vreme 15 s zona inhibicije je mala i postepeno se povećava kako se produžava vreme tretmana. Za protok 2 slm zone inhibicije su bolje definisane i nešto većeg prečnika (slika 8.7.).

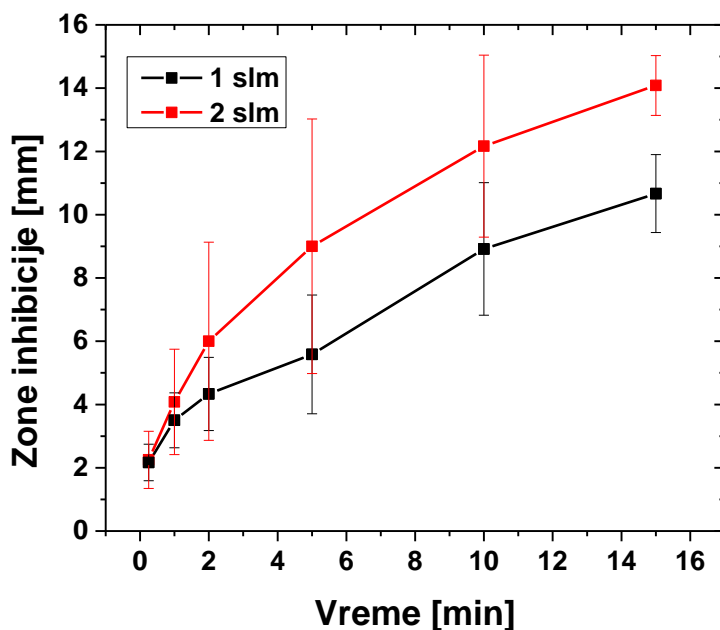


Slika 8.6. Zone inhibicije za tretman plazma mlazom za protok helijuma 1 slm, snagu 4 W i rastojanje 10 mm.



Slika 8.7. Zone inhibicije za tretman plazma mlazom za protok helijuma 2 slm, snagu 4 W i rastojanje 10 mm.

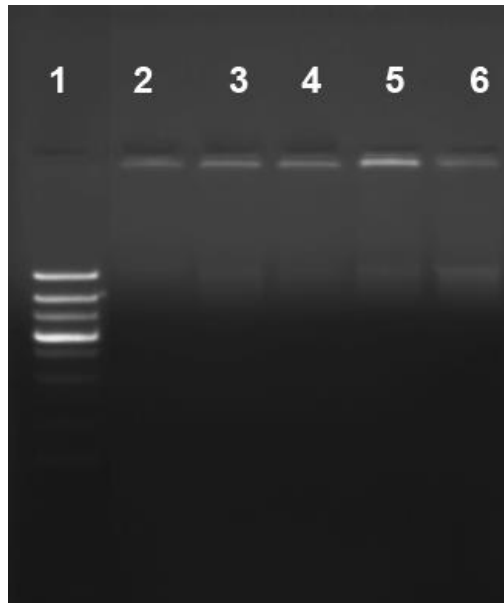
Grafik sa prikazanom zavisnošću zona inhibicije od dužine tretmana je prikazan na slici 8.8. Sa grafika se vidi da je za sterilizaciju površina bolje primenjivati duža vremena i veće protoke kako bi se povećala površina sa koje su uklonjene bakterije. Najveća zona inhibicije je dobijena za protok od 2 slm i dužinu tretmana od 15 minuta.



Slika 8.8. Zone inhibicije za dva protoka helijuma.

8.4. Fragmentacija DNK bakterija

Za ispitivanje fragmentacije genomske DNK u biofilmovima MRSA nakon tretmana plazmom korišćena je elektroforeza na agaroznom gelu. Biofilmovi MRSA koncentracije 10^4 CFU/ml kultivisani u mikrotitacionoj ploči sa 48 bunara su nakon tretmana plazmom bili izloženi delovanju enzimskog rastvora (20 μ g lizozima, 20 μ l Tris-HCl, 40 μ l EDTA, 11.2 μ l Triton, 928.8 μ l dH₂O) tokom 30 minuta na 37°C. Za ekstrakciju i prečišćavanje genomske DNK korišćen je QIAamp DNA Mini Kit (Qiagen, Hilden, Germany) u skladu sa preporukama proizvođača. Hromozomska DNK, izolovana iz MRSA biofilma koji nije bio izložen delovanju plazme, je korišćena kao kontrola. Elektroforeza je izvedena na 1% agaroznom gelu na 90 V tokom 75 minuta. Za vizuelizaciju DNK korišćeno je bojenje etidijum bromidom. Na slici ispod je prikazana ploča sa uzorcima DNK MRSA posle tretmana plazmom.



Slika 8.9. Uzorci DNK na gelu: kolona 1) molekularni standard DNA Molecular Weight Marker XIII (50 bp ladder) (Merck, Darmstadt, Germany); 2) plazma mlaz (1 slm; 5 minuta, 4 W); plazma mlaz (2 slm; 5 minuta, 4 W); 4) plazma mlaz (1 slm; 10 minuta, 4 W); 5) plazma mlaz (2 slm; 10 minuta, 4 W); 6) kontrola.

Na slici 8.9. je prikazana analiza uzoraka DNK elektroforezom posle tretmana plazmom. Na slici je brojem 1 obeležen marker i jasno se vide linije koje su na rastojanju od oko 50bp. Uzorci tretirani plazmom su obeleženi brojevima od 2 do 5, a uzorak 6 je kontrolni uzorak. Uzorak broj 2 je tretiran za 1 slm; 5 minuta, uzorak broj 2 za 2 slm; 5 minuta, uzorak broj 4 sa 1 slm; 10 minuta i uzorak broj 5 sa 2 slm; 10 minuta. Snaga plazme je u svim tretmanima bila konstantna i iznosila je 4 W. Sa slike se može primetiti da se ni kod jednog uzorka tretiranog plazma mlazem ne pojavljuje fragmentacija DNK. Tretirani uzorci se ne razlikuju od kontrolnog uzorka.

8.5. Zaključak

U ovoj glavi smo tretirali uzorke bakterija kako bismo ispitali baktericidna svojstva našeg plazma mlaza. Tretirana su dva tipa uzoraka, na hranljivoj podlozi i u obliku biofilma u mikrotitar pločicama. Ispitali smo zonu inhibicije, vijabilnost i fragmentaciju DNK.

Iz dobijenih rezultata mogu se izvući sledeći zaključci:

-U tretmanima smo varirali dva parametra, protok i vreme ekspozicije. Rezultati tretmana pokazuju da se povećanjem vremena tretmana povećavaju inhibitorne zone. Takođe povećanje protoka sa 1 na 2 slm povećava zonu inhibicije za isto vreme tretmana.

-U eksperimentima smo za vremena duža od 5 minuta dobili zone inhibicije koje su većeg prečnika od cevčice, a to ukazuje da dugoživuće vrste proizvedene u plazmi difunduju od ose plazma mlaza po uzorku i zaslužne su za sterilizaciju većih površina.

-Prilikom tretmana bakterija nismo uspeali pri našim eksperimentalnim uslovima da dobijemo fragmentaciju DNK.

9. Zaključak

Cilj ove doktorske disertacije je bio detaljno ispitivanje helijumskog plazma mlaza na atmosferskom pritisku. Plazma mlaz je dijagnostikovao pomoću dve dijagnostičke metode, brze iCCD kamere i pomoću električnih sondi. Posle dijagnostikovanja, ispitana je praktična primena plazma mlaza za sterilizaciju površina. Tretirani su uzorci MRSA bakterija i određene zone inhibicije, ispitana vijabilnost i fragmentacija DNK.

U poglavlju 3 na početku smo snimili plazma mlaz sa ekspozicijom koja je duža od perioda pobude i odredili njegove domete za različite protoke i snage. Zatim smo ispitali tri različite konfiguracije metalnih elektroda „žica“, „traka“ i „prozor“. Uradili smo njihovu električnu karakterizaciju i prikazali vremenski razložene snimke za ceo period pobudnog signala. Iz predstavljenih rezultata može se zaključiti da konfiguracija elektroda snažno utiče na režim rada plazma mlaza, a posebno širina napajane elektrode. Za konfiguraciju „traka“ i „prozor“, PAPS (engl. Pulsed Atmospheric Pressure Streamers) se generiše i prostire izvan cevčice, dok je za konfiguraciju „žica“ plazma ograničena prostorom između elektroda. Korišćenjem elektrodne konfiguracije „prozor“ mogli smo da posmatramo prostiranje plazme u napajanoj elektrodi. Za ove eksperimentalne konfiguracije i uslove, bilo je potrebno da se obezbedi dovoljno široka napajana elektroda da bi se formirao PAPS. Uzemljena elektroda koja je postavljena uz protok helijuma nema uticaja na formiranje PAPS-a u oblasti izvan cevčice.

U poglavlju 4 je prikazano ispitivanje za različite elektrodne konfiguracije plazma mlaza sa providnim elektrodama. Prvo smo menjali položaj elektroda od mlaznice, a zatim i međuelektrodno rastojanje i rastojanje elektrode od ruba cevčice. Ispitali smo uticaj dodatne elektrode koju smo postavili između uzemljene i napajane elektrode. Analizirali smo trenutak formiranja PAPS-a. Snimili smo kako se ponaša plazma kada napajana i uzemljena elektroda zamene mesta. Na osnovu ovih rezultata ustanovili smo da je optimalna elektrodna konfiguracija plazma mlaza 15-15 mm i za nju smo snimili strujno naponske karakteristike, vremenski razložene aksijalne i radijalne iCCD profile i izračunali brzine prostiranja jonizacionog fronta u cevčici i van nje. Nekoliko zaključaka se može izvući iz ovih merenja. Kada se plazma nalazi u oblasti elektroda ona ima prstenast oblik i prostire se uz unutrašnju površinu staklene cevčice. Plazma u oblasti

između elektroda unutar cevčice je koncentrisana u osi plazma mlaza i ne dodiruje zidove cevčice. U trenutku kada plazma dođe u kontakt sa okolnim vazduhom, zapremina pražnjenja se značajno povećava i formira se PAPS. Za sve elektrodne konfiguracije kod kojih se PAPS formira, može se videti kanal malog intenziteta svetljenja koji povezuje glavu strimera sa glavnim delom plazme, a to je u skladu sa teorijskim objašnjenjem prostiranja plazma PAPS-a modelom strimera (Naidis, 2010). Prilikom pomeranja elektroda od ruba cevčice, za rastojanja 7 mm i 15 mm formira se PAPS. Za rastojanje od 30 mm, plazma stiže do ruba cevčice, povećava svoju zapreminu, ali se ne prostire kroz vazduh, a za rastojanje od 50 mm, plazma ostaje unutar staklene cevčice za ceo period pobudnog signala. Maksimalni domet plazma mlaza je dobijen za rastojanje od 15 mm od ruba cevčice i međuelektrodno rastojanje i ovo je optimalna konfiguracija plazma mlaza. Maksimalne brzine u vazduhu su oko 20 km/s za konfiguraciju 15-15 mm. Istovremenim menjanjem rastojanja od ruba cevčice i rastojanja između elektroda 7 mm-7 mm, 10 mm-10 mm, 15 mm-15 mm i 20 mm-20 mm nismo uspeli da povećamo domet u odnosu na konfiguraciju 15 mm-15 mm. Umetanje treće elektrode na plutajućem potencijalu pospešuje formiranje PAPS-a, pa smo uspeli da dobijemo formiranje PAPS-a čak i za međuelektrodno rastojanje od 20 mm, a domet je neznatno povećan. Plazma mlaz se pojavljuje u dva moda „difuznom“ i PAPS mod. „Difuzni“ mod se javlja na manjim snagama a „PAPS“ mod na većim snagama. Granica između ova dva moda se razlikuje u zavisnosti da li povećavamo ili smanjujemo snagu predatu plazmi. Ukoliko se zamene mesta napajanoj i uzemljenoj elektrodi dolazi do prostiranja plazme suprotno od protoka radnog gasa i ne dolazi do izlaska plazme iz cevčice.

U glavi 5 smo ispitali uticaj dodatne uzemljene i napajane metalne elektrode na prostiranje plazma mlaza. Prikazali smo dobijene strujno naponske karakteristike i iCCD snimke za rastojanja 10 mm i 25 mm treće elektrode od mlaznice plazma mlaza. Uvođenjem treće napajane elektrode ne utiče se na električne karakteristike pražnjenja. Prisustvo napajanog šiljka u blizini mlaznice plazma mlaza dovodi do prekida kanala plazme i ponovnog stvaranja plazme na vrhu šiljka. U slučaju rastojanja od 10 mm dolazi do formiranja PAPS-a koji se odvaja od „napajanog šiljka“. Sa druge strane kod konfiguracije sa uzemljenim šiljkom postoji značajna razlika u električnim karakteristikama za dva ispitana rastojanja. Za rastojanje od 10 mm kroz šiljak protiče merljiva struja, koja se može povezati sa brojem nosilaca naelektrisanja i izračunati

njihova koncentracija dok za veće rastojanje to nismo mogli da uradimo. Uzemljeni šiljak dovodi do promene električnog polja plazma mlaza i za rastojanje od 10 mm dolazi do pojave dva jonizaciona fronta u napajanoj cilindričnoj elektrodi koji se kreću jedan ka drugom. Ovo nije slučaj za rastojanje od 25 mm. Plazma je tokom celog pobudnog perioda spojena provodnim kanalom za uzemljeni šiljak koji je na 10 mm.

Ova glava je bila posvećena interakciji plazma mlaza sa različitim metama. Ispitali smo interakciju plazma mlaza sa uzemljenom i napajanom provodnom metom i interakciju sa plastičnom metom. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da meta sa kojom interaguje plazma dosta utiče na njegovo propagiranje i strukturu. Ukoliko se postavi provodna meta veoma je važno na kom se potencijalu ona nalazi. Videli smo da napajana meta sprečava izlazak plazme iz staklene cevčice, dok ga uzemljena meta pospešuje. Dielektrična meta nema uticaja na prostiranje plazma mlaza u cevčici.

U šestoj glavi smo proučavali uticaj dodatka sintetičkog vazduha i argona na formiranje plazma mlaza. Procenat vazduha u pražnjenju pri datim eksperimentalnim uslovima može se povećavati najviše do 1.5%, a da se pražnjenje ne ugasi. Dodatak vazduha radnom gasu drastično menja pražnjenje, pojavljuju se višestruki PAPS-ovi, pražnjenje postaje intenzivnije između elektroda. Pražnjenje se „lepi“ za zidove cevčice u oblasti između elektroda. U napajanoj elektrodi se pojavljuju dva jonizaciona fronta koja se kreću jedan prema drugom. Višestruki PAPS-evi su međusobno povezani „tamnim“ provodnim kanalom malog intenziteta svetljenja. Pri dodatku argona pojavljuje se dvostruki PAPS. Procenat argona koji se može dodati je znatno veći u odnosu na sintetički vazduh. Struktura pražnjenja se menja prilikom dodavanja argona.

Tema sedme glave je bila ispitivanje plazma mlaza za konfiguraciju „procep“ kod koje se napajana elektroda nalazi na posebnoj cevčici. Procep između uzemljene i napajane elektrode omogućava da vazduh ulazi u zonu pražnjenja i samim tim utiče na formiranje PAPS-a. U ovoj konfiguraciji pražnjenje u zoni elektroda je intenzivnije, ali je zbog smanjenje molske frakcije helijuma u stubu radnog gasa smanjen i domet PAPS-a u odnosu na standardni plazma mlaz. Zatim smo analizirali „T plazma mlaz“, za koji smo snimili strujno naponske karakteristike i vremenski razložene iCCD snimke. Ispitali smo i uticaj dodatne uzemljene elektrode na plazma mlaz. Domet „T plazma mlaza“ je manji u odnosu na standardni plazma mlaz. Primitili smo da se plazma prostire i preko

ivice uzemljene elektrode. Prostiranje plazme preko ivice uzemljene elektrode je posledica istog smera prostiranja jonizacionog fronta i protoka helijuma. Dodatnom uzemljenom elektrodom na strani uzemljene elektrode bili smo u mogućnosti da izvučemo plazmu iz cevčice. U ovoj glavi je ispitan i dvostruki plazma mlaz, za koji smo snimili strujno naponske snimke i iCCD snimke. Predstavljen je sistem sa dva plazma mlaza koji se napajaju pomoću jednog napajачa. Korišćenjem vremenski razloženih iCCD snimaka primetili smo asinhrono ponašanje plazma mlazeva, koje je najverovatnije posledica malih varijacija u elektrodnim geometrijama koje dovode do razlike u njihovim kapacitivnostima. Da bi se u potpunosti shvatilo asinhrono ponašanje potrebna su dalja istraživanja, a ova pojava je veoma značajna jer omogućava fino podešavanje pojedinačnih plazma mlazeva i otvara širok spektar mogućih primena.

U osmoj glavi smo tretirali bakterije u petri šoljama i u mikrotitar pločama. Određene su zone inhibicije i urađen je MTT test za *Staphylococcus aureus*. Rezultati tretmana nam pokazuju da je za tretman bakterija bolje koristiti veći protok helijuma, odnosno 2 slm jer se sa njim sterilišu veće površine i dolazi do većeg smanjenja broja bakterija u uzorku. Sa povećanjem vremena tretmana postiže se veće smanjenje bakterija i povećava se površina sa koje su bakterije uklonjene. Prilikom tretmana bakterija nismo uspeli pri našim eksperimentalnim uslovima da dobijemo fragmentaciju DNK.

10. Literatura

Algwari, Q. T. and O'Connell, D. (2011) 'Electron dynamics and plasma jet formation in a helium atmospheric pressure dielectric barrier discharge jet', *Applied Physics Letters*, 99(12), p. 121501. doi: 10.1063/1.3628455.

Boeuf, J.-P., Yang, L. L. and Pitchford, L. C. (2013) 'Dynamics of a guided streamer ("plasma bullet") in a helium jet in air at atmospheric pressure', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(1), p. 13pp. doi: 10.1088/0022-3727/46/1/015201.

Boselli, M., Colombo, V., Ghedini, E., Gherardi, M., Laurita, R., Liguori, A., Sanibondi, P. and Stancampiano, A. (2014) 'Schlieren high-speed imaging of a nanosecond pulsed atmospheric pressure non-equilibrium plasma jet', *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 34(4), pp. 853–869. doi: 10.1007/s11090-014-9537-1.

Bourdon, A., Darny, T., Pechereau, F., Pouvesle, J.-M., Viegas, P., Iséni, S. and Robert, E. (2016) 'Numerical and experimental study of the dynamics of a μ s helium plasma gun discharge with various amounts of N₂ admixture', *Plasma Sources Science and Technology*, 25(3), p. 35002. doi: 10.1088/0963-0252/25/3/035002.

Cao, Z. (2010) *Large-scale spatially extended atmospheric pressure plasma*. Loughborough University.

Dobrynin, D., Wasko, K., Friedman, G., Fridman, A. a. and Fridman, G. (2011) 'Fast Blood Coagulation of Capillary Vessels by Cold Plasma: A Rat Ear Bleeding Model', *Plasma Medicine*, 1(3–4), pp. 241–247. doi: 10.1615/PlasmaMed.2012005167.

Dudek, D., Bibinov, N., Engemann, J. and Awakowicz, P. (2007) 'Direct current plasma jet needle source', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(23), pp. 7367–7371. doi: 10.1088/0022-3727/40/23/017.

Dumitrascu, N., Topala, I. and Popa, G. (2005) 'Dielectric barrier discharge technique in improving the wettability and adhesion properties of polymer surfaces', *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33(5), pp. 1710–1714. doi: 10.1109/TPS.2005.856335.

- Francis F. Chen, J. P. C. (2002) *Principles of Plasma Diagnostics: Second Edition, Plasma Physics and Controlled Fusion*. doi: 10.1088/0741-3335/44/12/701.
- Fricke, K., Steffen, H., von Woedtke, T., Schröder, K. and Weltmann, K.-D. (2011) ‘High Rate Etching of Polymers by Means of an Atmospheric Pressure Plasma Jet’, *Plasma Processes and Polymers*, 8(1), pp. 51–58. doi: 10.1002/ppap.201000093.
- Fridman (2013) ‘From short pulses to short breaks: exotic plasma bullets via residual electron control’, *Scientific Reports*, 3(1599), pp. 1–6. doi: 10.1038/srep01599.
- Fridman, A. (2008) *Plasma Chemistry, Plasma Chemistry*. Cambridge University Press. Available at:
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=ZzmtGEHCC9MC&oi=fnd&pg=PR39&dq=Plasma+chemistry&ots=YhbAAcm08f&sig=iHC2mizqtafrUBFdPIMf50p6bvA>.
- Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N. and Fridman, A. (2008) ‘Applied Plasma Medicine’, *Plasma Processes and Polymers*, 5(6), pp. 503–533. doi: 10.1002/ppap.200700154.
- Gaens, W. Van and Bogaerts, A. (2013) ‘Kinetic modelling for an atmospheric pressure argon plasma jet in humid air’, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(27), p. 275201. doi: 10.1088/0022-3727/46/27/275201.
- Gerling, T., Nastuta, a V, Bussiahn, R., Kindel, E. and Weltmann, K.-D. (2012) ‘Back and forth directed plasma bullets in a helium atmospheric pressure needle-to-plane discharge with oxygen admixtures’, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34012. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034012.
- Ghasemi, M., Olszewski, P., Bradley, J. W. and Walsh, J. L. (2013) ‘Interaction of multiple plasma plumes in an atmospheric pressure plasma jet array’, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(5), p. 52001. doi: 10.1088/0022-3727/46/5/052001.
- Gherardi, M., Puač, N., Marić, D., Stancampiano, A., Malović, G., Colombo, V. and Petrović, Z. L. (2015a) ‘Practical and theoretical considerations on the use of ICCD imaging for the characterization of non-equilibrium plasmas’, *Plasma Sources Science and Technology*, 24(6), p. 64004. doi: 10.1088/0963-0252/24/6/064004.
- Guairella, O. and Sobota, A. (2015) ‘The impingement of a kHz helium atmospheric

pressure plasma jet on a dielectric surface', *Journal of Physics D: Applied Physics*. IOP Publishing, 48(25), p. 255202. doi: 10.1088/0022-3727/48/25/255202.

Hasan, M. I. and Bradley, J. W. (2015) 'Computational study of the afterglow in single and sequential pulsing of an atmospheric-pressure plasma jet', *Plasma Sources Science and Technology*. IOP Publishing, 24(5), p. 55015. doi: 10.1088/0963-0252/24/5/055015.

Heinlin, J., Morfill, G., Landthaler, M., Stolz, W., Isbary, G., Zimmermann, J. L., Shimizu, T. and Karrer, S. (2010) 'Plasma medicine: possible applications in dermatology', *JDDG - Journal of the German Society of Dermatology*, pp. 968–977. doi: 10.1111/j.1610-0387.2010.07495.x.

Hu, J. T., Liu, X. Y., Liu, J. H., Xiong, Z. L., Liu, D. W., Lu, X. P., Iza, F. and Kong, M. G. (2012) 'The effect of applied electric field on pulsed radio frequency and pulsed direct current plasma jet array', *Physics of Plasmas*, 19(6), p. 63505. doi: 10.1063/1.4729730.

Huang, F., Chen, L., Wang, H. and Yan, Z. (2010) 'Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma', *Chemical Engineering Journal*. Elsevier B.V., 162(1), pp. 250–256. doi: 10.1016/j.cej.2010.05.041.

Ito, Y., Sakai, O. and Tachibana, K. (2010) 'Study of plasma enhanced chemical vapor deposition of ZnO films by non-thermal plasma jet at atmospheric pressure', *Thin Solid Films*. Elsevier B.V., 518(13), pp. 3513–3516. doi: 10.1016/j.tsf.2009.11.034.

Karakas, E., Akman, M. A. and Laroussi, M. (2012a) 'The evolution of atmospheric-pressure low-temperature plasma jets: jet current measurements', *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34016. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034016.

Karakas, E., Akman, M. A. and Laroussi, M. (2012b) 'The evolution of atmospheric-pressure low-temperature plasma jets: jet current measurements', *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34016. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034016.

Karakas, E., Koklu, M. and Laroussi, M. (2010) 'Correlation between helium mole fraction and plasma bullet propagation in low temperature plasma jets', *Journal of*

Physics D: Applied Physics, 43(15), p. 155202. doi: 10.1088/0022-3727/43/15/155202.

Karakas, E. and Laroussi, M. (2010) 'Experimental studies on the plasma bullet propagation and its inhibition', *Journal of Applied Physics*, 108(6), p. 63305. doi: 10.1063/1.3483935.

Kim, H., Wright, K. C., Hwang, I., Lee, D., Rabinovich, A., Fridman, A. and Cho, Y. I. (2011) 'Effects of H₂O₂ and Low pH Produced by Gliding Arc Discharge on the Inactivation of Escherichia Coli in Water', *Plasma Medicine*, 1, pp. 295–307. doi: 10.1615/PlasmaMed.2013006439.

Kim, J., Sakakita, H., Ohsaki, H. and Katsurai, M. (2015) 'Microwave-excited atmospheric pressure plasma jet with wide aperture for the synthesis of carbon nanomaterials', *Japanese journal of physics*, 54, pp. 8–12.

Klavarioti, M., Mantzavinos, D. and Kassinos, D. (2009) 'Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes.', *Environment international*. Elsevier Ltd, 35(2), pp. 402–17. doi: 10.1016/j.envint.2008.07.009.

Kolacyak, D., Ihde, J., Merten, C., Hartwig, A. and Lommatzsch, U. (2011) 'Fast functionalization of multi-walled carbon nanotubes by an atmospheric pressure plasma jet.', *Journal of colloid and interface science*. Elsevier Inc., 359(1), pp. 311–7. doi: 10.1016/j.jcis.2011.03.069.

Lazović, S., Puač, N., Miletić, M., Pavlica, D., Jovanović, M., Bugarski, D., Mojsilović, S., Maletić, D., Malović, G., Milenković, P. and Petrović, Z. (2010) 'The effect of a plasma needle on bacteria in planktonic samples and on peripheral blood mesenchymal stem cells', *New Journal of Physics*, 12.

Lee, H. W., Kim, G. J., Kim, J. M., Park, J. K., Lee, J. K. and Kim, G. C. (2009) 'Tooth bleaching with nonthermal atmospheric pressure plasma.', *Journal of endodontics*. Elsevier Ltd, 35(4), pp. 587–91. doi: 10.1016/j.joen.2009.01.008.

Lee, H. W., Nam, S. H., Mohamed, A.-A. H., Kim, G. C. and Lee, J. K. (2010) 'Atmospheric Pressure Plasma Jet Composed of Three Electrodes: Application to Tooth Bleaching', *Plasma Processes and Polymers*, 7(3–4), pp. 274–280. doi: 10.1002/ppap.200900083.

- Lee, K. H., Jang, H.-S., Eom, G.-Y., Lee, B.-J., Burk, D., Overzet, L. and Lee, G. S. (2008) 'The enhanced growth of multi-walled carbon nanotubes using an atmospheric pressure plasma jet', *Materials Letters*, 62(23), pp. 3849–3851. doi: 10.1016/j.matlet.2008.04.083.
- Li, Q., Zhu, W.-C., Zhu, X.-M. and Pu, Y.-K. (2010) 'Effects of Penning ionization on the discharge patterns of atmospheric pressure plasma jets', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(38), p. 382001. doi: 10.1088/0022-3727/43/38/382001.
- Lieberman, M. and Lichtenberg, A. (2005) 'Discharges and Materials Processing Principles of Plasma Discharges and Materials', Publisher Wiley, ISBN: 978-0-471-72001-0
- Lu, X., Laroussi, M. and Puech, V. (2012) 'On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets', *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34005. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034005.
- Lu, X., Naidis, G. V., Laroussi, M. and Ostrikov, K. (2014a) 'Guided ionization waves: Theory and experiments', *Physics Reports*, 540(3), pp. 123–166. doi: 10.1016/j.physrep.2014.02.006.
- Lu, X. P., Member, S., Jiang, Z. H., Xiong, Q. and Tang, Z. Y. (2008) 'Effect of E-Field on the Length of a Plasma Jet', 36(4), pp. 988–989.
- M Ghasemi, P Olszewski, J W Bradley, J. L. W. (2013) 'Interaction of multiple plasma plumes in an atmospheric pressure plasma jet array', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(5), p. 52001. doi: 10.1088/0022-3727/46/5/052001.
- Makabe, T. and Petrović, Z. L. (2015) *Plasma Electronics*. 2nd editio, *Plasma Electronics*. 2nd editio. Cambridge: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Maletić, D., Miletić, M., Puač, N., Selaković, N. and Lazović, S. (2010) 'Plasma needle treatment of Staphylococcus Aureus (ATCC 25923) biofilms', 83037(Atcc 25923), p. 83037.
- Maletić, D., Puač, N., Lazović, S., Malović, G., Gans, T., Schulz-von der Gathen, V. and Petrović, Z. L. (2012) 'Detection of atomic oxygen and nitrogen created in a radio-frequency-driven micro-scale atmospheric pressure plasma jet using mass

- spectrometry', *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 54(12), p. 124046. doi: 10.1088/0741-3335/54/12/124046.
- Maletić, D., Puač, N., Malović, G., Đorđević, A. and Petrović, Z. L. (2017) 'The influence of electrode configuration on light emission profiles and electrical characteristics of an atmospheric-pressure plasma jet', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(14), p. 145202. doi: 10.1088/1361-6463/aa5d91.
- Maletić, D., Puač, N., Selaković, N., Lazović, S., Malović, G., Đorđević, A. and Petrović, Z. L. (2015) 'Time-resolved optical emission imaging of an atmospheric plasma jet for different electrode positions with a constant electrode gap', *Plasma Sources Science and Technology*, 24(2), p. 25006. doi: 10.1088/0963-0252/24/2/025006.
- Miletić, M., Mojsilović, S., Okić Đorđević, I., Maletić, D., Puač, N., Lazović, S., Malović, G., Milenković, P., Petrović, Z. L. and Bugarski, D. (2013) 'Effects of non-thermal atmospheric plasma on human periodontal ligament mesenchymal stem cells', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46, p. 345401. doi: 10.1088/0022-3727/46/34/345401.
- Naidis, G. V (2010) 'Modelling of streamer propagation in atmospheric-pressure helium plasma jets', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(40), p. 402001. doi: 10.1088/0022-3727/43/40/402001.
- Naidis, G. V (2011) 'Simulation of streamers propagating along helium jets in ambient air: Polarity-induced effects', *Applied Physics Letters*, 98(14), p. 141501. doi: 10.1063/1.3576940.
- Naidis, G. V and Walsh, J. L. (2013) 'The effects of an external electric field on the dynamics of cold plasma jets—experimental and computational studies', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(9), p. 95203. doi: 10.1088/0022-3727/46/9/095203.
- Oh, J.-S., Aranda-Gonzalvo, Y. and Bradley, J. W. (2011) 'Time-resolved mass spectroscopic studies of an atmospheric-pressure helium microplasma jet', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(36), p. 365202. doi: 10.1088/0022-3727/44/36/365202.
- Oh, J.-S., Bryant, P. M. and Bradley, J. W. (2011) 'Discharge and Plasma Bullet

Formation in a Capillary DBD Atmospheric-Pressure Microplasma Jet', *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(11), pp. 2352–2353. doi: 10.1109/TPS.2011.2160290.

Oh, J.-S., Walsh, J. L. and Bradley, J. W. (2012) 'Plasma bullet current measurements in a free-stream helium capillary jet', *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34020. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034020.

Park, S., Youn Moon, S. and Choe, W. (2013) 'Multiple (eight) plasma bullets in helium atmospheric pressure plasma jet and the role of nitrogen', *Applied Physics Letters*, 103(22). doi: 10.1063/1.4833638.

Puač, N., Maletić, D., Lazović, S., Malović, G., Dordević, A. and Petrović, Z. L. J. (2012) 'Time resolved optical emission images of an atmospheric pressure plasma jet with transparent electrodes', *Applied Physics Letters*, 101(2), pp. 1–5. doi: 10.1063/1.4735156.

Puač, N., Petrović, Z. L., Malović, G., Dordević, a, Živković, S., Giba, Z. and Grubišić, D. (2006) 'Measurements of voltage–current characteristics of a plasma needle and its effect on plant cells', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(16), pp. 3514–3519. doi: 10.1088/0022-3727/39/16/S09.

Raizer, Y. P. (1991) *Gas Discharge Physics*. Edited by J. E. Allen. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Reuter, S., Winter, J., Iseni, S., Peters, S., Schmidt-Bleker, A., Dünnbier, M., Schäfer, J., Foest, R. and Weltmann, K.-D. (2012) 'Detection of ozone in a MHz argon plasma bullet jet', *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34015. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034015.

Robert, E., Sarron, V., Darny, T., Riès, D., Dozias, S., Fontane, J., Joly, L. and Pouvesle, J.-M. (2014) 'Rare gas flow structuration in plasma jet experiments', *Plasma Sources Science and Technology*, 23(1), p. 12003. doi: 10.1088/0963-0252/23/1/012003.

Robert, E., Sarron, V., Riès, D., Dozias, S., Vandamme, M. and Pouvesle, J.-M. (2012) 'Characterization of pulsed atmospheric-pressure plasma streams (PAPS) generated by

a plasma gun', *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34017. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034017.

Sakiyama, Y., Graves, D. B., Jarrige, J. and Laroussi, M. (2010) 'Finite element analysis of ring-shaped emission profile in plasma bullet', *Applied Physics Letters*, 96(4), p. 41501. doi: 10.1063/1.3298639.

Schneider, S., Lackmann, J. W., Ellerweg, D., Denis, B., Narberhaus, F., Bandow, J. E. and Benedikt, J. (2012) 'The role of VUV radiation in the inactivation of bacteria with an atmospheric pressure plasma jet', *Plasma Processes and Polymers*, 9(6), pp. 561–568. doi: 10.1002/ppap.201100102.

Shashurin, A., Shneider, M. N. and Keidar, M. (2012) 'Measurements of streamer head potential and conductivity of streamer column in cold nonequilibrium atmospheric plasmas', *Plasma Sources Science and Technology*, 21, p. 49601. doi: 10.1088/0963-0252/21/4/049601.

Shirai, N., Shito, H., Ibuka, S. and Ishii, S. (2009) 'DC Corona and Glow Discharges Generated along the Intersecting Axial Miniature Gas Flows under Atmospheric Pressure Air', *Applied Physics Express*, 2, p. 76001. doi: 10.1143/APEX.2.076001.

Skalny, J. D., Orszagh, J., Mason, N. J., Rees, J. a, Aranda-Gonzalvo, Y. and Whitmore, T. D. (2008) 'A mass spectrometric study of ions extracted from a point-to-plane dc corona discharge in N₂O at atmospheric pressure', *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(8), p. 85202. doi: 10.1088/0022-3727/41/8/085202.

Škoro, N., Marić, D., Malović, G., Graham, W. G. and Petrović, Z. L. (2011) 'Electrical Breakdown in Water Vapor', *Physical Review E*, 84(5), p. 55401. doi: 10.1103/PhysRevE.84.055401.

Sretenović, G. B., Guaitella, O., Sobota, A., Krstić, I. B., Kovačević, V. V, Obradović, B. M., Kuraica, M. M., (2017) 'Electric field measurement in the dielectric tube of helium atmospheric pressure plasma jet', *Journal of Applied Physics*, 121, p. 123304. doi: 10.1063/1.4979310.

Sretenović, G. B., Krstić, I. B., Kovačević, V. V., Obradović, B. M. and Kuraica, M. M. (2011) 'Spectroscopic measurement of electric field in atmospheric-pressure plasma jet

operating in bullet mode’, *Applied Physics Letters*, 99(16), p. 161502. doi: 10.1063/1.3653474.

Sretenović, G. B., Krstić, I. B., Kovačević, V. V., Obradović, B. M. and Kuraica, M. M. (2014) ‘Spatio-temporally resolved electric field measurements in helium plasma jet’, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(10), p. 102001. doi: 10.1088/0022-3727/47/10/102001.

Stoffels, E., Flikweert, a J., Stoffels, W. W. and Kroesen, G. M. W. (2002) ‘Plasma needle: a non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of (bio)materials’, *Plasma Sources Science and Technology*, 11(4), pp. 383–388. doi: 10.1088/0963-0252/11/4/304.

Teschke, M., Korzec, D., Finantu-Dinu, E. G. and Engemann, J. (2005) ‘Plasma cleaning of “endless” substrates by use of a tandem dielectric barrier discharge’, *Surface and Coatings Technology*, 200(1–4), pp. 690–694. doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.179.

Topala, I. and Dumitrascu, N. (2011) ‘Evolution of Bullets in Helium Atmospheric Pressure Plasma Jet’, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(11), pp. 2342–2343. doi: 10.1109/TPS.2011.2147805.

Walsh, J. L., Shi, J. J. and Kong, M. G. (2006) ‘Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets’, *Applied Physics Letters*, 88(17), p. 171501. doi: 10.1063/1.2198100.

Wang, R., Zhou, H., Sun, P., Wu, H. and Pan, J. (2011) ‘The Effect of an Atmospheric Pressure , DC Nonthermal Plasma Microjet on Tooth Root Canal , Dentinal Tubules Infection and Reinfection Prevention’, *Plasma Medicine*, 1(2), pp. 143–155. doi: 10.1615/PlasmaMed.2011003259.

Weltmann, K. D., Kindel, E., von Woedtke, T., Hähnel, M., Stieber, M. and Brandenburg, R. (2010) ‘Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine’, *Pure and Applied Chemistry*, 82(6), pp. 1223–1237. doi: 10.1351/PAC-CON-09-10-35.

Wu, S., Xu, H., Lu, X. and Pan, Y. (2012) ‘Effect of Pulse Rising Time of Pulse dc Voltage on Atmospheric Pressure Non-Equilibrium Plasma’, *Plasma Processes and*

Polymers, 10(2), pp. 136–140. doi: 10.1002/ppap.201200071.

Xian, Y., Lu, X., Liu, J., Wu, S., Liu, D. and Pan, Y. (2012) ‘Multiple plasma bullet behavior of an atmospheric-pressure plasma plume driven by a pulsed dc voltage’, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34013. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034013.

Xiong, Q., Lu, X. P., Ostrikov, K., Xian, Y., Zou, C., Xiong, Z. and Pan, Y. (2010) ‘Pulsed dc- and sine-wave-excited cold atmospheric plasma plumes: A comparative analysis’, *Physics of Plasmas*, 17(4), p. 43506. doi: 10.1063/1.3381132.

Xiong, Z. and Kushner, M. J. (2012) ‘Atmospheric pressure ionization waves propagating through a flexible high aspect ratio capillary channel and impinging upon a target’, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 34001. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/034001.

Yang, D.-Z., Yang, Y., Li, S.-Z., Nie, D.-X., Zhang, S. and Wang, W.-C. (2012) ‘A homogeneous dielectric barrier discharge plasma excited by a bipolar nanosecond pulse in nitrogen and air’, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(3), p. 35004. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/035004.

Yonemori, S. and Ono, R. (2014) ‘Flux of OH and O radicals onto a surface by an atmospheric-pressure helium plasma jet measured by laser-induced fluorescence’, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(12), p. 125401. doi: 10.1088/0022-3727/47/12/125401.

Zhang, C., Shao, T., Zhou, Y., Fang, Z., Yan, P. and Yang, W. (2014) ‘Effect of O₂ additive on spatial uniformity of atmospheric-pressure helium plasma jet array driven by microsecond-duration pulses’, *Applied Physics Letters*, 105(4), p. 44102. doi: 10.1063/1.4887992.

11. Biografija

Dejan Maletić je rođen u Beogradu 28.10.1982. godine. Pohađao je Treću beogradsku gimnaziju koju je završio 2001. godine.

Fakultet za fizičku hemiju je završio u Beogradu 2008. godine sa temom diplomskog rada pod nazivom „Određivanje koncentracije neutrala i jona energetske masenim spektrometrom u atmosferskom radiofrekventnom pražnjenju malih dimenzija“. Prvog novembra iste godine počinje da radi u Institutu za fiziku u Zemunu i upisuje master studije na fakultetu za fizičku hemiju. Master rad na temu „Detekcija ozona i azotovih oksida u neravnotežnoj radiofrekventnoj plazmi na atmosferskom pritisku u smeši kiseonika i helijuma“ uradio je pod mentorstvom dr. Nevene Puač u Laboratoriji za gasnu elektroniku pod rukovodstvom dr. Zorana Lj. Petrovića i odbranio ga na Fakultetu za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu. Od septembra 2009. godine do marta 2010. godine je na odsluženju vojnog roka. U martu 2010. nastavlja sa radom u Institutu za fiziku u Zemunu.

Doktorske studije upisuje na Fizičkom fakultetu u Beogradu 2010. godine, a eksperimentalni rad nastavlja na Institutu za fiziku. U zvanje Istraživač saradnik je izabran 2011. godine.

Ima više publikovanih radova u vrhunskim međunarodnim časopisima, a rezultati njegovog rada su prezentovani na više međunarodnih konferencija. Učestvovao je na nekoliko međunarodnih konferencija u zemlji i inostranstvu gde je prezentovao svoje rezultate. Naučna oblast kojom se bavi je dijagnostika i primena različitih niskotemperaturnih plazmi na uzorke biološkog porekla.

Spisak publikovanih radova u međunarodnim časopisima

1. D. Maletić, N. Puač, G. Malović, A. Đorđević, Z. Lj. Petrović; “The influence of electrode configuration on light emission profiles and electrical characteristics of an atmospheric-pressure plasma jet”; Journal of Physics D: Applied Physics, 50 145202 (12pp), 2017, IOP Publishing (M21, IF: 2.588)

2. D. Maletić, N. Puač, N. Selaković, S. Lazović, G. Malović, A. Đorđević, Z. Lj. Petrović; “Time-resolved optical emission imaging of an atmospheric plasma jet for different electrode positions with a constant electrode gap”; *Plasma Sources Science and Technology* 24, 025006 (9pp), 2015, IOP Publishing (M21, IF: 3.302)
3. N. Puač, M. Miletić, M. Mojović, A Popović-Bijelić, D. Vuković, B. Miličić, D. Maletić, S. Lazović, G. Malović, Z. Lj. Petrović; „Sterilization of bacteria suspensions and identification of radicals deposited during plasma treatment”, *Open Chemistry*, 2015; 13: 332–338, De Gyter Open, (M23, IF: 1.027)
4. M. Miletić, D. Vuković, I. Živanović, I. Dakić, I. Soldatović, D. Maletić, S. Lazović, G. Malović, Z. Lj. Petrović, N. Puač, “Inhibition of methicillin resistant *Staphylococcus aureus* by a plasma needle”, *Central European Journal of Physics* • 12(3) • 2014 • 160-167, DOI: 10.2478/s11534-014-0437-z, Versita (M23, IF: 0.765)
5. S. Lazović, D Maletić, A. Leskovac, J. Filipović, N. Puač, G. Malović, Z. Lj. Petrović, “Plasma induced DNA damage: Comparison with the effects of ionizing radiation”, *Applied Physics Letters*, 105, 124101, 2014 (M21, IF: 3.411)
6. M. Miletić, S. Mojsilović, I. Okić Đorđević, D. Maletić, N. Puač, S. Lazović, G. Malović, P. Milenković, Z. Lj. Petrović, D. Bugarski; “ Effects of non-thermal atmospheric plasma on human periodontal ligament mesenchymal stem cells”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 345401, 2013 (M21, IF: 2.588)
7. N. Puač, D. Maletić, S. Lazović, G Malović, A Đorđević, Petrović Z Lj; “Time resolved optical emission images of an atmospheric pressure plasma jet with transparent electrodes”; *Applied Physics Letters*, 101, 2, 024103-024103-4, 2012, AIP (M21, IF: 3.411)
8. D. Maletić, N. Puač, S. Lazović, G. Malović, T. Gans; V. Schulz-von der Gathen, Z. Lj. Petrović; “Detection of atomic oxygen and nitrogen created in a radio-frequency-driven micro-scale atmospheric pressure plasma jet using mass spectrometry”; *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 54, 12, 124046-124053, 2012, IOP Publishing (M21, 2.392)
9. Z. Lj. Petrović, N. Puač, G. Malović, S. Lazović, D. Maletić, M. Miletić, S. Mojsilović, P. Milenković, D. Bugarski; “Application of non-equilibrium plasmas in

medicine”, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 77, 12, 142-142, 2012 (M23, IF: 0.822)

10. S. Lazović, N. Puač, M. Miletić, D. Pavlica, M. Jovanović, D. Bugarski, S. Mojsilović, D. Maletić, G. Malović, P. Milenković, Z. Lj. Petrović; “The effect of a plasma needle on bacteria in planktonic samples and on peripheral blood mesenchymal stem cells”, *New Journal of Physics*, 12, 8, 083037, 2010, IOP Publishing (M21, IF: 3.786)

12. Prilozi

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani Dejan Maletić

Broj upisa D-26/2010

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Razvoj i dijagnostika atmosferskog plazma mlaza i njegova primena na
uzorke biološkog porekla

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- de nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 3.8.2018.

Dejan Maletić

Prilog 2.

**Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije
doktorskog rada**

Ime i prezime autora Dejan Maletić

Broj upisa D-26/2010

Studijski program Fizika jonizovanog gasa, plazme i tehnologija plazme

Naslov rada Razvoj i dijagnostika atmosferskog plazma mlaza i njegova primena
na uzorke biološkog porekla

Mentor Dr Nevena Puač

Potpisani Dejan Maletić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta Beogradu.

U Beogradu,

Potpis doktoranda

3. 8. 2018.

Dejan Maletić

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Razvoj i dijagnostika atmosferskog plazma mlaza i njegova primena na uzorke biološkog porekla

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sa se odlučio.

- 1. Autorstvo**
- 2. Autorstvo – nekomercijalno**
- 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade**
- 4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima**
- 5. Autorstvo – bez prerade**
- 6. Autorstvo deliti pod istim uslovima**

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na sledećoj strani).

U Beogradu,

3. 8. 2018.

Potpis doktoranda

Dejan Marčević

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.