

Математичка гимназија

МАТУРСКИ РАД

~ из физике ~

Утицај проводности течног узорка на електричне
особине плазма млаза

Ученик:
Никола Милина

Ментор:
Др Никола Шкоро
виши научни сарадник
Институт за физику у Београду

Београд, мај 2021.

За област плазма млазева заинтересовао ме др Никола Шкоро, још 2017. године, када сам, као ученик осмог разреда, био у Центру за таленте. Електричне особине плазма млаза су веома занимљива област физике и зато сам се обратио др Николи Шкори да ми буде ментор и сада када је дошло време за писање матурског рада на крају средње школе.

Овим путем бих се захвалио др Николи Шкори за указано поверење и менторство при писању овог научно-истраживачког рада, као и за пружени материјал за рад на овом експерименту, који је урађен у Центру за неравнотежне процесе Института за физику у Београду.

Садржај

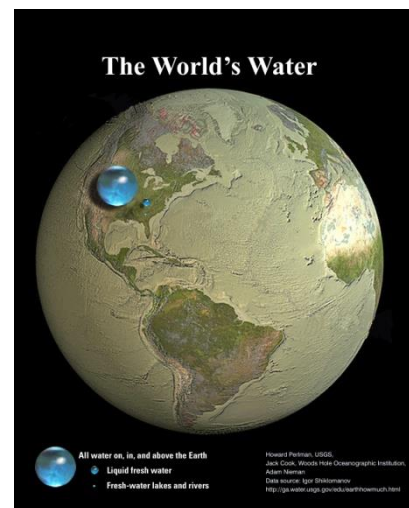
1. Увод	4
2. Плазма	7
2.1 Типови плазме.....	8
2.2 Типови плазма млаза - класификација	8
2.3 Плазма млаз са зашиљеном електродом	10
2.4 Неравнотежне плазме у контакту са течношћу	11
3. Експериментална поставка и методи	12
3.1 Списак потребне апаратуре за креирање плазма млаза	12
3.2 Опис поставке експеримента	14
3.3 RMS вредности	15
3.4 Оптичка емисиона спектроскопија.....	16
3.5 Припрема третиране течности	17
4. Резултати и дискусија	19
4.1 Одређивање карактеристике пражњења	19
4.2 Одређивање снаге у плазми	22
4.3 Оптички емисиони спектар плазма млаза.....	24
5. Закључак.....	26
6. Литература	28

1. Увод

У овом делу рада говори се о мотивацији за извођење овог експеримента. Живимо у времену убрзаног развоја индустријске производње, највећег глобалног загађивача пијаће воде, која и овако чини свега 2,5% укупне светске воде. Нажалост, област науке и технологије која се бави пречишћавањем воде и заштитом средине, не развија се тако брзо као индустрија. Овим радом покушавам да откријем да ли, и како, један потпуно нов приступ пречишћавању воде коришћењем плазма млаза може утицати на смањење контаминације пијаће воде.

Широм света је све већа забринутост због проблема загађености воде, последица испуштања такве воде у екосистем и проблема које отпадна вода проузрокује животној средини и на здравље људи. Према Светској здравственој организацији, скоро милијарду људи нема приступ чистој води за пиће, а годишње око 500 милиона људи умире од болести повезаних са контаминираним изворима.

Све категорије природних (слатких) вода, као што су површинске, подземне и атмосферске, изложене су разним врстама и процесима загађења. Свежа вода чини само 2.5 % укупне воде присутне на Земљи, од чега је мали део доступан у облику површинских и изворских вода (Слика 1). На смањење доступне количине свеже воде, поред климатских промена које доводе до дуготрајних периода суша, у значајниј мери утицао је раст броја становника и убрзани развој индустрије. Пољопривредне потребе за водом су веома велике и чак 70% површинских вода користи се у те сврхе. Са друге стране, модерне пољопривредне технике које подразумевају обилно коришћење различитих хемијских једињења (као што су пестициди, вештачка ђубрива, разни хемијски појачавачи и препарати) представљају једне од највећих загађивача површинских и подземних вода. Загађење умањује квалитет



Слика 1: Упоредни приказ планете Земље, светске воде и

воде и на тај начин утиче на смањење расположивости воде која се може користити као вода за пиће или за потребе пољопривреде.

Постојеће технологије које се користе за третман и пречишћавање воде су углавном засноване на механичкој обради, ултра-љубучасном зрачењу и/или примени хемијских средстава за уклањање и разградњу молекула загађивача. Услед тога овакви приступи су по правилу енергетски врло неповољни, тј. троше велике количине електричне енергије за обраду одређене запремине загађене воде. Поред тога, хемијска средства која се користе су у великом броју случајева врло реактивна и представљају опасност по животну средину док се транспортују или складиште пре употребе. Након употребе, у свим случајевима потребно је извршити њихову



Слика 2: Еколошки проблем загађења воде

неутрализацију или укључити додатни технолошки корак који ће обрадити искоришћено хемијско средство. Због свега наведеног, јасно је да постојеће технологије са једне стране решавају проблем загађености воде, док истовремено отварају нове опасности по животну средину.

Потенцијално решење проблема је развој нових технологија за третман воде, како би се она обрадила до нивоа да се може поново употребити, односно да је вода директно питка или довољно третирана да се може користити у пољопривреди.

Последњих година појавило се неколико потпуно нових приступа третману загађене воде који укључују: биолошке методе примене различитих бактерија и биљака, коришћење енергетски високо-ефикасних диодних система за третмане ултра-љубичастом светлости и методе које индукују релевантне хемијске реакције за разградњу молекула загађивача у води, али без коришћења реактивних хемијских супстанци.

Најсавременији приступ заснива се на коришћењу нових каталитичких и адсорпционих материјала или нетермалне плазме. За нетермалне плазме на атмосферском притиску у контакту са водом се у последње две деценије јавило велико интересовање због њихове селективности и енергетске ефикасности у индуковању хемијских реакција са загађивачем у води, при чему се не користе додатне хемијске супстанце и чиме је овај поступак потпуно нешкодљив за животну средину.

Опсег истраживања интеракција плазме са течностима је врло широк, јер због свестраности могућности за коришћење плазме обухвата различити поља примене, од

синтезе и обраде материјала, преко санације животне средине (третман воде и дезинфекција) до примене у биологији и медицини (плазма индуковано зарастање рана, аблација ткива, коагулација крви).

Циљ овог матурског рада је испитивање употребе плазма млаза који ради на атмосферском притиску у циљу пречишћавања воде. Плазма млаз се формира у ваздуху изнад самог узорка загађене воде чије се пречишћавање ради и формирајући велику количину реактивних честица изнад површине течности индукује хемијске реакције у самој течности. Како сваки загађивач има различиту сопствену електричну проводност, то директно утиче на електричну проводност самог течног узорка. Пошто је плазма формирана уз помоћ плазма млаза у директном контакту са течним узорком, његове електричне особине утичу на сам извор плазме- плазма млаз и тиме, посредно, и на реактивне хемијске врсте стварене у плазми које су одговорне за пречишћавање воде. Зато је битно утврдити како електрична проводност узорка загађене воде утиче на сам плазма млаз. У том циљу, у матурском раду испитиваћемо електричне особине плазма млаза за различите проводности течног узорка са циљем уочавања законитости њихове промене.

2. Плазма

У овом поглављу говори се о основним појмовима за разумевање поставке експеримента – плазми, типовима плазме и типовима плазма млаза. Такође, детаљније се објашњава принцип рада конкретног плазма млаза примењеног у овом експерименту, као и његовом деловању на третирану течност и одговара се на питање зашто баш плазмом пречишћавамо воду.

Плазма је делимично или потпуно јонизовани гас који се састоји од позитивно и негативно наелектрисаних јона, слободних електрона, слободних радикала и неутралних честица - неутрала. Настаје дејством неког спољашњег извора јонизације, ултраљубичастог зрачења или спољашњег поља на гас. Тиме се ствара довољна количина слободних наелектрисања у гасу, која иначе не постоје при нормалним условима.

Особине јонизованог гаса и плазме се разликују од особина гаса. Наиме, гас се понаша као изолатор, а плазма је проводна и осетљива је на спољашње електромагнетно поље. Због својих јединствених особина, плазма се сматра посебним агрегатним стањем, поред течног, чврстог и гасовитог стања. Назива се и четвртим агрегатним стањем материје. Осим тога, ово стање материје је увек праћено снажном емисијом зрачења, тј. светлости која потиче од побуђених атома и јона.

Реч плазма (πλάσμα) је грчког порекла и значи остварење, дело. Први ју је идентификовао Вилијам Крукс 1879. године у цеви за пражњење (Круксовој цеви). Термин „плазма“ увео је Ирвинг Лангмир 1928. године, да опише јонизовани гас настао у гасном пражњењу.

На планети Земљи плазма представља ретку форму постојања материје. Код олујног времена, облаци кумулонимбуси се понашају као велики кондензатори код којих временом долази до видљивог пражњења електрицитета - појаве муње, примера плазме који се јавља на површини Земље. У Свмиру је доминантно агрегатно стање, где се преко 90% материје налази у облику плазме. Она се може јавити у облику стеларне (звездане) плазме, или у облику интерстеларог (међузвезданог) гаса који се одликује веома малом густином и сразмерно ниском температуром.

2.1 Типови плазме

У делу 2. дефинисали смо плазму као јонизовани гас. Да би се од гаса направила плазма, а потом и одржавала, потребно је улагање енергије. Процес јонизације у гасу праћен је инверзним процесом рекомбинације – елиминације носиоца покретног наелектрисања.

Уколико су у неком делу система инверзни процеси подједнако заступљени, испуњени су услови локалне термодинамичке равнотеже. Плазме, за које је овај услов испуњен, називају се термалне или равнотежне и за њихово одржавање у лабораторијским условима је потребно уложити велику енергију, при чему су температуре такве плазме неколико хиљада степени. Дакле, прављење равнотежне плазме у лабораторијским условима је прилично непрактично – захтева гломазну апаратуру, специјалне услове за одржавање и веома је скупо.

Са друге стране, постоје и нискотемпературне, неравнотежне (хладне) плазме. Оне се карактеришу одсуством термодинамичке равнотеж и не постоји конкретна јединствена температура овакве плазме.

Код неравнотежних плазми успостављен је ефикасан начин преноса енергије на електроне, који у овом типу плазме имају знатно вишу температуру од осталих тежих честица, јона и неутрала. Они имају термалну енергију приближну собној температури. Стварање и одржавање неравнотежних плазми могуће је са знатно мање захтевном апаратуром од равнотежних плазми, а пошто закони равнотеже код хладних плазми зависе од ситуације до ситуације, поље њиховог истраживања се знатно проширује, а самим тим и поље примене, тако да су управо хладне плазме оне које испитујемо у овом експерименту.

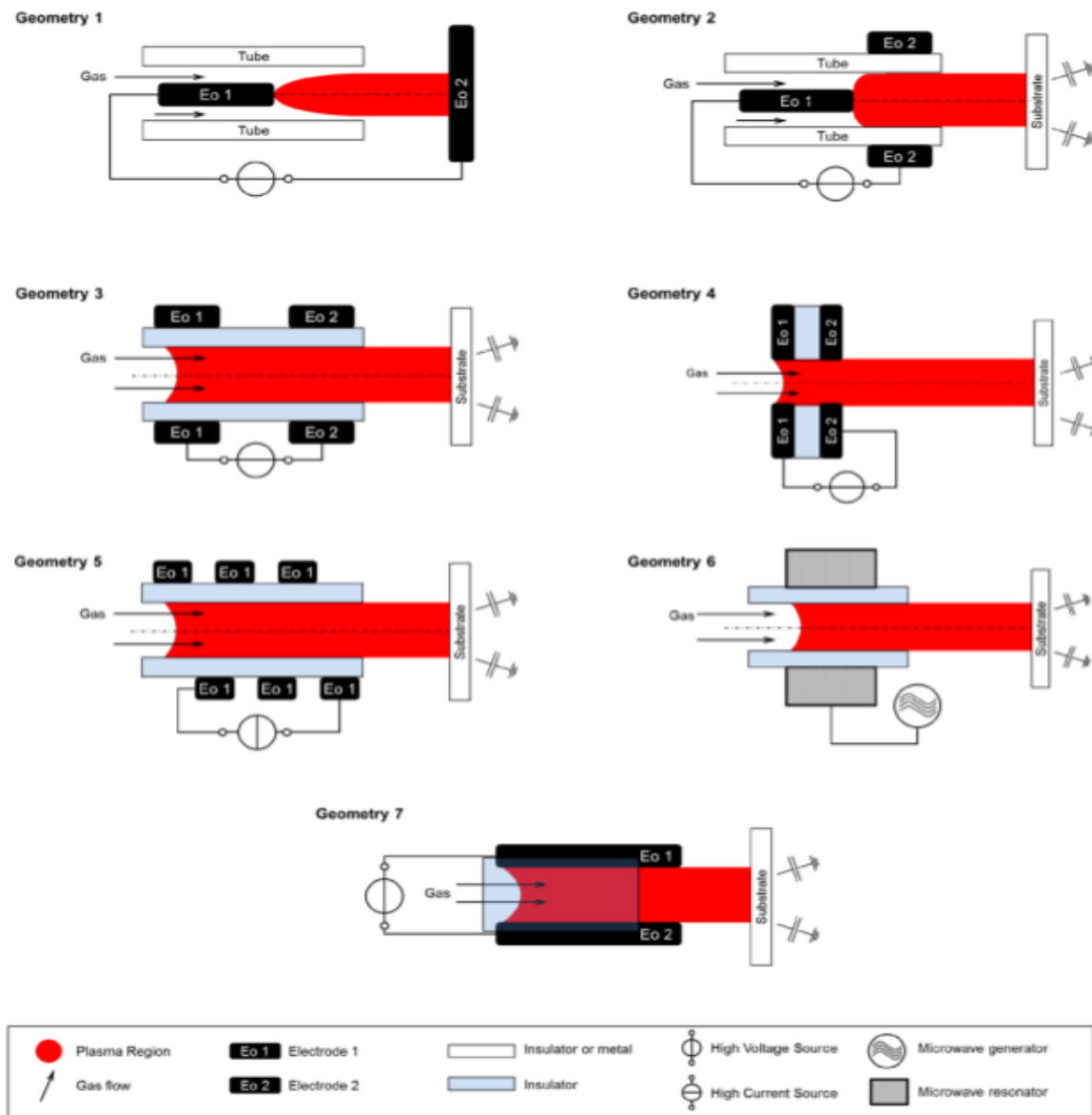
2.2 Типови плазма млаза – класификација

У примењеним плазма технологијама, појам неравнотежне плазме се користи за хладне плазме различитих врста и конфигурација. Оно што је заједничко за све неравнотежне плазме настале у лабораторијским условима је да гасно пражњење ради у поставци са електродама и шири се изван конструкције у околину. Постоји много различитих варијација добијених плазма млазева, а они зависе од:

- геометрије пражњења, расподели електрона или конфигурацији поља;

- врсте генерисане плазме (лук, варница, хладна плазма);
- типа радног гаса или смеше гасова који се јонизује;
- фреквенције побуде (AC, DC, RF, MW) или начину побуде.

На основу испитивања свих могућих варијација у конструкцији плазма млазева, научници су успели да сврстају нискотемпературне млазеве у седам основних геометријских конфигурација, приказаних на Слици 3.



Слика 3: Приказ седам основних типова конструкција млазева

Плазма млазеви са напајаном (зашиљеном) електродом унутар цеви различитих побуда (1) без и (2) са додатим уземљеним прстеном, (3) плазма млаз DBD типа, (4) тип плазма млаза заснован на микропражњењу са шупљом катодом (microhollow cathode discharge, MHCD), (5) индуктивно спрегнут плазма млаз, (6) плазма млаз напајан микроталасним напајањем и (7) тип микро плазма млаза на атмосферском притиску (micro atmospheric pressure plasma jet, uAPPJ)

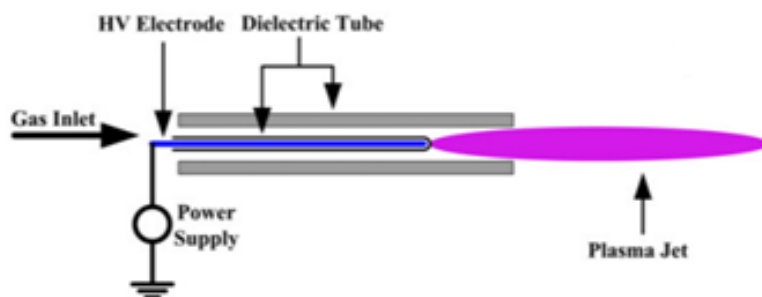
2.3 Плазма млаз са зашиљеном електродом – Pin electrode jet

Плазма млазеви на атмосферском притиску се најчешће користе као диелектрична баријерна пражњења са центрираном електродом зашиљеном на врху која се налази унутар диелектричне цеви. Експериментална поставка овог рада заснована је управо на оваквој конфигурацији плазма млаза.

Електрода је конструисана тако што се метална жица зашиљи на њеном врху.

Диелектрична цев је направљена од изолаторског материјала и она садржи занемарљив број слободних електрона који би се могли кретати под утицајем спољашњег електричног поља, односно има отпорност већу од $10^8 \Omega\text{m}$. Цев има функцију усмеравања протока гаса и конвективног преноса реактивних врста у течност која се третира.

Плазма се формира у гасној фази и долази у контакт са површином течности. Тип плазма млаза са зашиљеном електродом у литератури се још назива и плазма игла што је термин који ће бити коришћен за опис извора у овом раду.



Слика 4: Приказ плазма млаза са зашиљеном електродом

Главна разлика између ових плазма млазева од осталих плазма млазева са претходне шеме је оријентација електричног поља у односу на правац протока гаса, што између осталог утиче на то колико ће се плазма простирати изван цеви плазма млаза као и на побољшано генерисање реактивних врста.

2.4 Неравнотежне плазме у контакту са течношћу

Плазме које се користе за третмане течности и пречишћавање воде, класификују се у групу хладних, неравнотежних плазми на атмосферском притиску. У таквим плазмама се стварају велике количине УВ зрачења и реактивних врста кисеоника и азота. Истовремено стварање интензивног УВ зрачења и активних радикала чини ова пражњења посебно погодним за деконтаминацију, стерилизацију и пречишћавање. Ово је основни разлог зашто је ова врста плазме обимно проучавана у последње две деценије и зашто смо баш њу одабрали као средство за пречишћавање воде.

На основу расподеле фаза (гаса, плазме и течности) електрична пражњења у течностима могу се поделити у три главне групе:

- електрична пражњења у течности;
- електрична пражњења генерисана у гасу изнад течности са течношћу као електродом;
- пражњења у мехурићима у течности.

У нашем експерименту посматрамо електрична пражњења генерисана у гасу изнад течности са течношћу као електродом.

Пражњења у гасној фази изнад течности су заправо гасна пражњења чија је једна електрода течност. Напон који је неопходан да би дошло до индиректног гасног пражњења знатно је мањи од напона када би се пражњење десило директно у течности управо зато што је плазма у гасној фази која је у директном контакту са течном фазом. На граничном слоју између две фазе долази до хемијских реакција и дифузије врста произведених у гасној фази, као што су реактивне врсте кисеоника и азота.

Конфигурације извора који се користе за генерисање овог типа пражњења обично се састоје од металних шиљкова, а пражњење је обично уземљено и преко водене електроде.



Слика 5:
Електродна конфигурација за тип пражњења у гасној фази изнад течности

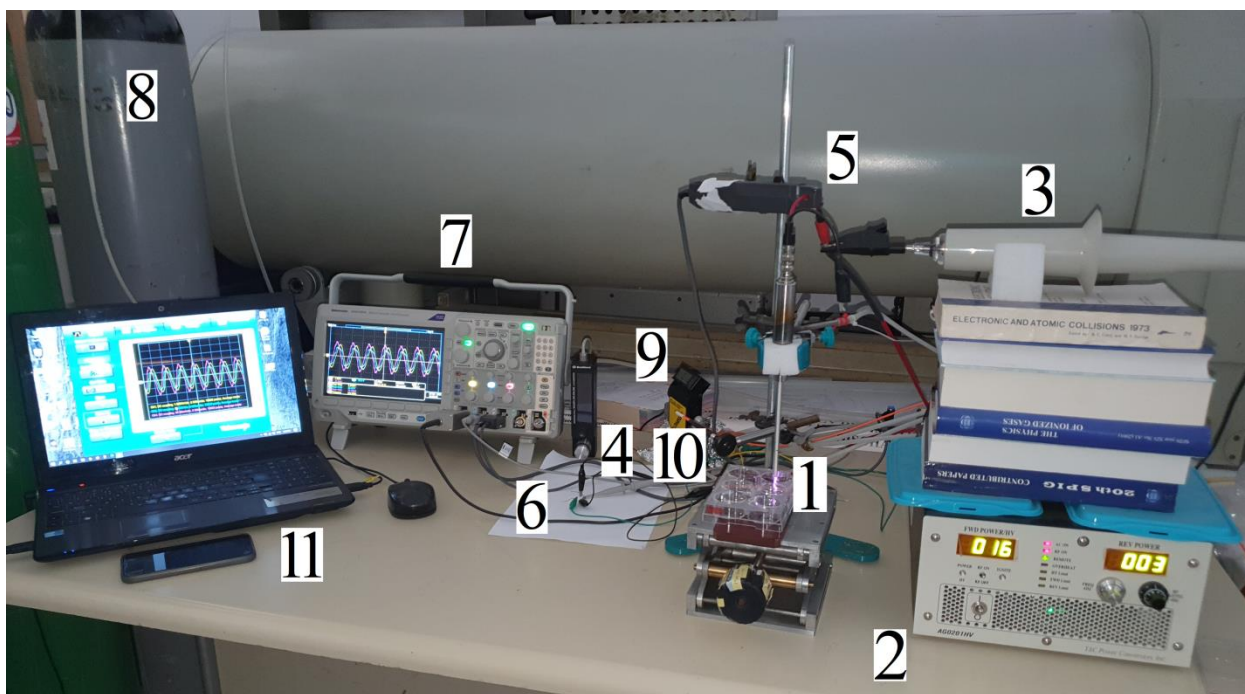
3. Експериментална поставка и методи

У овом делу рада се налазе детаљни описи коришћене апаратуре, принципа извршавања експеримента, као и његове теоријске основе. Основни елемент ове експерименталне поставке јесте плазма игла чији су изглед и особине описани у делу 2.3. Такође, у овом поглављу се говори и о припреми течних узорака одређене проводности, као и о израчунавању РМС вредности напона, струје и средњих снага.

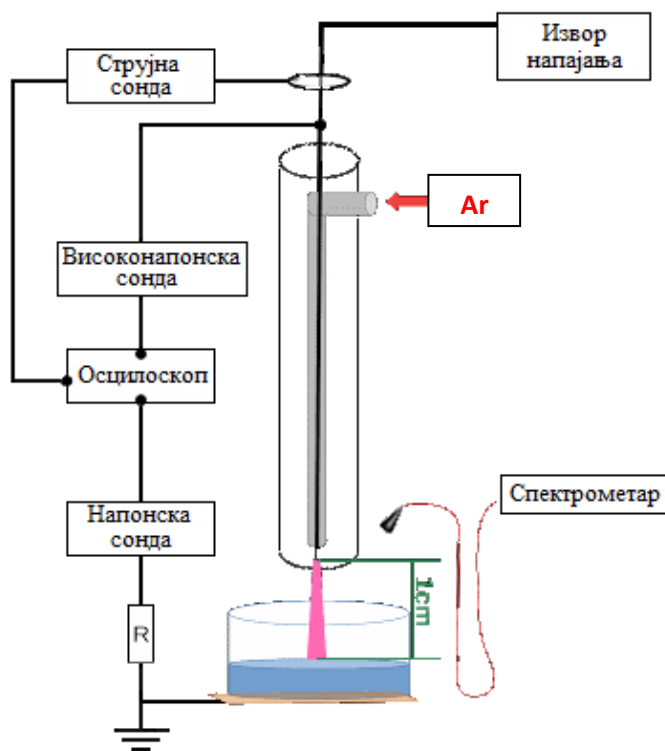
3.1 Списак потребне апаратуре за креирање плазма млаза

У овом експерименталном раду коришћена је следећа апаратура:

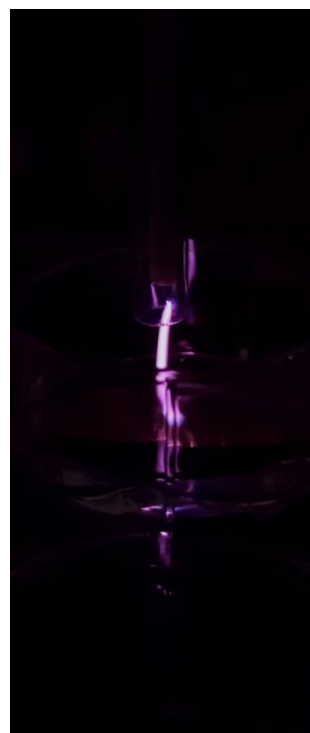
- 1) Плазма млаз
- 2) Извор напајања – високонапонски RF плазма генератор
- 3) Високонапонска сонда 1:1000
- 4) Напонска сонда 1:10
- 5) Струјана сонда
- 6) Отпорник $R = 1\text{k}\Omega$
- 7) Осцилоскоп
- 8) Боца са аргоном
- 9) Протокомер
- 10) Спектрометар са ICCD камером
- 11) Рачунар



Слика 6: Апаратура за извођење експеримента



Слика 7: Шематски приказ експерименталне поставке



Слика 8: Увећан приказ креиране плазме

3.2 Опис поставке експеримента

Извор плазме се састоји из плазма млаза који је вертикално наниже усмерен према узорку течности коју третирамо. Тај плазма млаз се састоји од металног тела цилиндричног облика, стаклене (диелектричне) цеви унутрашњег пречника 4mm и спољашњег пречника 6mm и напајане електроде - жице направљене од нерђајућег челика, чији је врх зашиљен и вири 3mm из керамичке изолације која обавија электроду.

Изнад цилиндричног дела цеви, налази се мали отвор кроз који се пропушта радни гас, у нашем случају аргон. Његов константан проток контролисан је уз помоћ мерача масеног протока *Omega FMA5400/5500*. У нашем случају, проток гаса је на свим мерењима подешен тако да сваког минута истекну два стандардна литра радног гаса (2slm – standard liter (T = 293K) per minute).

Са горње стране металног тела налази се још један прикључак, за напајање. Плазма млаз је напајан из комерцијалног високонапонског радио - фреквентног извора, *T&C AG 0201HV-OS 140W - 500kHz*, који ради на принципу конверзије снаге.

На растојању од тачно једног центиметра испод отвора стаклене цеви налази се течност коју третирамо. Она се налази унутар једног од шест кружних одељака микротитер посуде *MP6*, на чијем дну са спољне стране се налази бакарна трака којом је плоча повезана са уземљењем.

Растојање између површине узорка и врха плазма игле подешава се помоћу покретног металног носача. Између носача и узорка је постављена бакелитна плоча (диелектрик) како би се носач изоловао из електричног кола.

На самом врху металног тела, поред високонапонског извора, налазе се монтиране високонапонска сонда *Tektronix P6015A* и струјна сонда *Keysight Technologies N2783B*. Они нам омогућавају мерење напона којим извор снаге напаја плазма иглу, као и електричну струју која се доводи на плазма иглу.

Бакарна трака, која се налази на дну титер посуде, повезана је на уземљење преко отпорника од 1k Ω . Уз помоћ њега меримо струју пражњења која је протекла кроз плазму и узорак тако што ћемо на отпорнику измерити пад напона користећи напонску пасивну мерну сонду *Keysight Technologies N2863B*, која је такође повезана на овај отпорник.

Високонапонска, напонска пасивна и струјна сонда су прикључене на осцилоскоп *Tektronix TBS 1104*, који је повезан на рачунар.

Временски променљиви сигнали са струјне и напонских сонди снимљени су на осцилоскопу, који је био повезан са рачунаром, где су помоћу софтверског програма *Tektronix* подаци чувани у одговарајућим датотекама и обрађивани помоћу *OriginLab-a*.

3.3 RMS вредности

Root Mean Square, или скраћено RMS, представља средњу квадратну вредност временски промелјивог наизменичног напона или наизменичне струје. Напон синусног таласа наизменичне струје није у сваком моменту мерења једнак највишем пику. RMS вредност напона представља ефективан напон наизменичне струје, у еквивалентном смислу напона једносмерне струје, и добија се једино математичким израчунавањем.

У нашем случају, за напон који се предаје плазма млазу, струју кроз плазма иглу и струју пражњења, рачунати су корени квадрата средње вредности, на следећи начин:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} u^2(t) dt}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} i^2(t) dt}$$

где T представља период осциловања сигнала, а $\int_0^{nT} u^2(t) dt$ је средња вредност квадрата напона за n периода. Она се добија рачунањем површине испод графика зависности квадрата напона од времена, у интервалу од n периода осциловања сигнала. Аналогно важи и за струје. Све вредности су рачунате за $n = 10$ периода.

Рачунате су вредности снаге која се предаје плазма игли и снаге ослобођене у плазми, као производ одговарајућих тренутних вредности струја и напона. Средња снага која се преда плазма млазу и средња снага пражњења рачунате су на следећи начин:

$$P_{RMS} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt$$

Ознаке имају горе наведено значење, а $\int_0^{nT} p(t) dt$ представља средњу вредност снаге на n периода осциловања и добија се рачунањем површине испод графика зависности тренутне снаге од времена.

3.4 Оптичка емисиона спектроскопија

Поред електричних мерења изведена су и спектроскопска мерења емисије из пражњења помоћу методе оптичке емисионе спектроскопије.

Оптичка емисиона спектроскопија је аналитичка техника која се у нашем случају користи за прецизно одређивање побуђених атома и молекула који су настали у плазми. Ти атоми и молекули су хемијски изузетно реактивни и они су директни учесници у хемијским реакцијама које су одговорне за распад загађивача у води.

На једном крају оптичког кабла постављено је сочиво, *UV 74 Ocean Optics*, које сакупља зрачење из целе запремине између врха електроде плазма млаза и мете. Сочиво је постављено на растојању од 80mm од вертикалне осе дуж које се простире плазма млаз. Зрачење се преко оптичког кабла спроводи до улазног прикључка (отвора) на спектрометру. Спектрометар је даље повезан на рачунар који уз помоћ програма конструише график детектованог спектра зрачења плазме изнад површине течности.

Оптичка емисиона спектроскопија користи део електромагнетног спектра - видљиви спектар и део ултраљубичастог спектра. Ако говоримо о таласној дужини, користи се распон од 190 до 950 нанометара.

Поред овог снимања, извршено је и снимање околног позадинског зрачења (које постоји и када се не одвија третман), које је затим одузето од сигнала емисије.



Слика 9: *Ocean Optics* спектрометар



Слика 10: *UV 74 Ocean Optics* сочиво са носачем

3.4 Припрема течних узорака одређене проводности

У овом експерименту испитиване су две течности различитих проводности, једна од $500\mu\text{S}/\text{cm}$ и друга од $5000\mu\text{S}/\text{cm}$. Како је за сваки загађивач један од кључних параметара преко којих се они разликују управо отпорност, ове две течности представљају симулацију две различите групе пестицида / загађивача воде.

Те две течности смо најпре морали да направимо, јер смо полазили од стандардних комерцијално доступних раствора за калибрацију инструмента за мерење проводности, један од $1413\mu\text{S}/\text{cm}$, а други од $12800\mu\text{S}/\text{cm}$. Формула за разблажење раствора је

$$\frac{\sigma_S V_1 + \sigma_{H_2O} V_2}{V_1 + V_2} = \sigma_K$$

где је:

- σ_S проводност стандардизованог раствора (у првом случају од $1413\mu\text{S}/\text{cm}$, а у другом случају од $12800\mu\text{S}/\text{cm}$);
- σ_K тражена проводност (у првом случају од $500\mu\text{S}/\text{cm}$, а у другом случају од $5000\mu\text{S}/\text{cm}$);
- σ_{H_2O} проводност дестиловане воде коришћене у овом експерименту и која износи $1,4\mu\text{S}/\text{cm}$;
- једно од V_1 или V_2 је произвољна запремина одговарајуће течности, а конкретно у овом случају одређено је да запремина воде V_2 у оба случаја износи 5ml .

Користећи ову формулу, можемо направити течности жењене проводности.

Наравно, то не бисмо могли да урадимо без одговарајуће апаратуре, коју чине:

1. Комерцијални мерач проводности *Hanna Instruments HI552*
2. Аутоматске пипете од 1ml и од 0.1ml произвођача *Eppendorf*
3. Стаклени ерленмајер
4. Две пластичне епрувете од по 20ml
5. Шприц боце са алкохолом и дестилованом водом
6. Мерачи растојања и нонијус
7. Микро титер посуда *MP6*

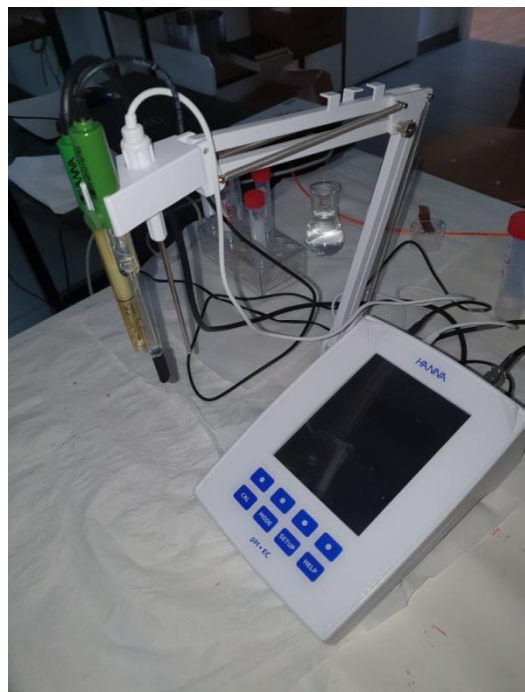
Најпре се епрувете и ерленмајер исперу дестилованом водом и алкохолом пар пута да би се отклониле било какве честице које би могле да контаминирају жељене течности тако што би им промениле проводност. Затим се епрувете и ерленмајер оставе на сушење, да се у њима случајно не би пронашле капљице воде и алкохола које би могле да буду узрок велике грешке у добијању резултата.

Након тога, ерленмајер се испуни дестилованом водом и у њу се урања електрода инструмента за мерење проводности. Унапред калибрисани инструмент је показао да је у овој лабораторији проводност дестиловане воде износила $1.4\mu\text{S}/\text{cm}$.

Та дестилована вода се аутоматским пипетама преноси у пластичне епрувете, по 5ml воде у сваку од епрувета. Из наведене формуле разблажења могу се израчунати запремине стандардизованих раствора, које конкретно износе 2.73ml раствора проводности $1413\mu\text{S}/\text{cm}$ и 7.8ml раствора проводности $12800\mu\text{S}/\text{cm}$. Те запремине се затим помешају у епруветама са унапред измереним запреминама дестиловане воде.

Тиме смо добили у две епрувете течности жељених проводности. Бројчана вредност проводности добијених течности се затим проверава инструментом. Добија се да је грешка мерења 1,4%, што је изузетно прецизно.

Течности се затим преносе у микро титер посуду. Уз помоћ мерача растојања и нонијуса, посуду се поставља у одговарајући положај тако да је ниво течности удаљен тачно један центиметар од плазма игле (Слика 8) и тиме је експеримент спреман за посматрање.



Слика 11: Комерцијални мерач проводности
Hanna Instruments HI552

4. Резултати и дискусија

У овом делу рада представићемо резултате електричних мерења плазма млаза и оптичке емисионе карактеристике. Мерење временски променљивих сигнала напона и струје омогућило је одређивање струјно-напонских карактеристика и израчунавање снаге што је приказано у деловима 4.1 и 4.2. Снимањем спектрално разложене емисије зрачења добијен је емисиони спектар плазма млаза приказан у делу 4.3.

4.1 Одређивање струјно-напонске карактеристике пражњења

Временски променљиви сигнали напона на плазма млазу, струје доведене у плазма млаз и струје која је кроз плазму протекла кроз уземљени део кола снимани су уз помоћ осцилоскопа на начин описан раније. За сваку различиту снагу подешену на напајачу снимљена су по два сета сигнала. Затим су из сваког сигнала израчунате RMS вредности чиме су добијене по две вредности за сваку снагу које су затим усредњене. Те вредности коришћене су за приказивање струјно-напонских карактеристика.

На слици 12 приказана је струјно-напонска карактеристика плазма млаза – зависност радног напона плазма млаза од струје при чему је коришћена струја која је доведена са напајача и протиче кроз извор плазме. Црни симболи представљају резултате добијене са узорком од $500\mu\text{S}/\text{cm}$, док су црвени симболи измерени са узорком са проводношћу $5000\mu\text{S}/\text{cm}$. Крстићима је приказано мерење са узорком дестиловане воде чија је проводност $5\mu\text{S}/\text{cm}$, као поређење са извршеним мерењима.

Приликом снимања струјно-напонских карактеристика, снага на електричном извору је постепено повећавана до максималне снаге, а затим постепено смањивана. На графику су тачке које су снимљене у узлазном сегменту приказане пуним симболима, а празним симболима снимљене у силазном сегменту.

На нижим снагама напон није довољан за пробој и формирање пражњења. У том делу тачке на струјно-напонској карактеристици леже на правој линији, тј. линеарна је зависност између струје и напона. Нагиб праве линије представља ефективну импедансу дела електричног кола експеримента у ком меримо струју и напон. Након што доведени напон на извор плазме постане довољан за пробој (негде око $1700 V_{RMS}$) долази до

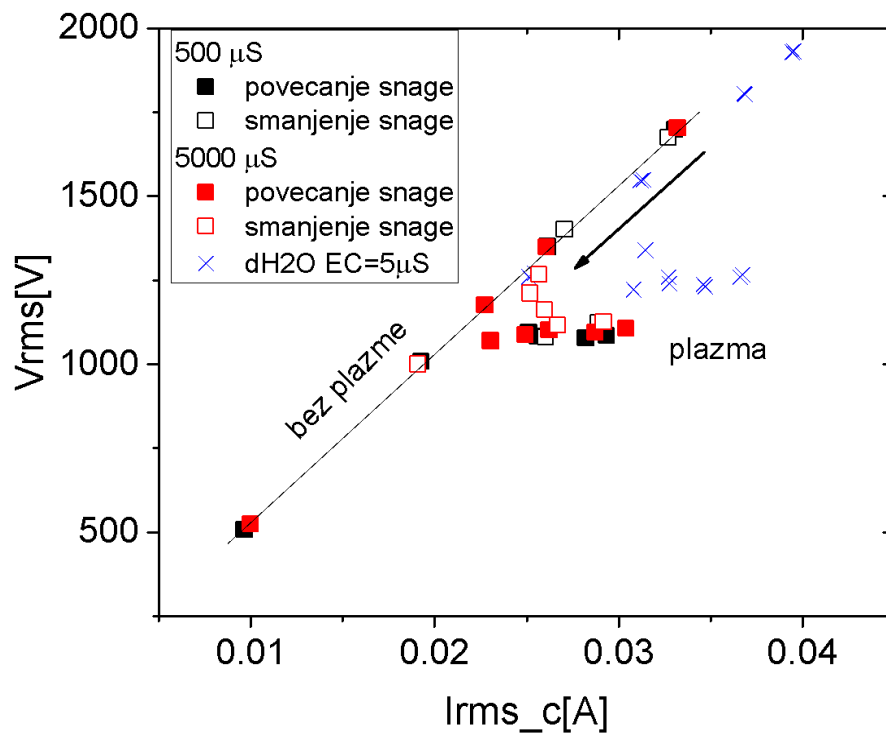
формирања стримерског пражњења. При томе напон и струја се смањују у односу на вредности пре пробоја (означено је стрелицом).

Стример је јонизациони талас (или канал) који самостално пропагира између електрода у диелектричним медијима, као што су ваздух или вода, уколико су испуњена два услова: да коефицијент јонизације премашује коефицијент за захват електрона дуж трага стримера и да је поље просторног наелектрисања које ствара глава стримера упоредиво са примењеним електричним пољем.

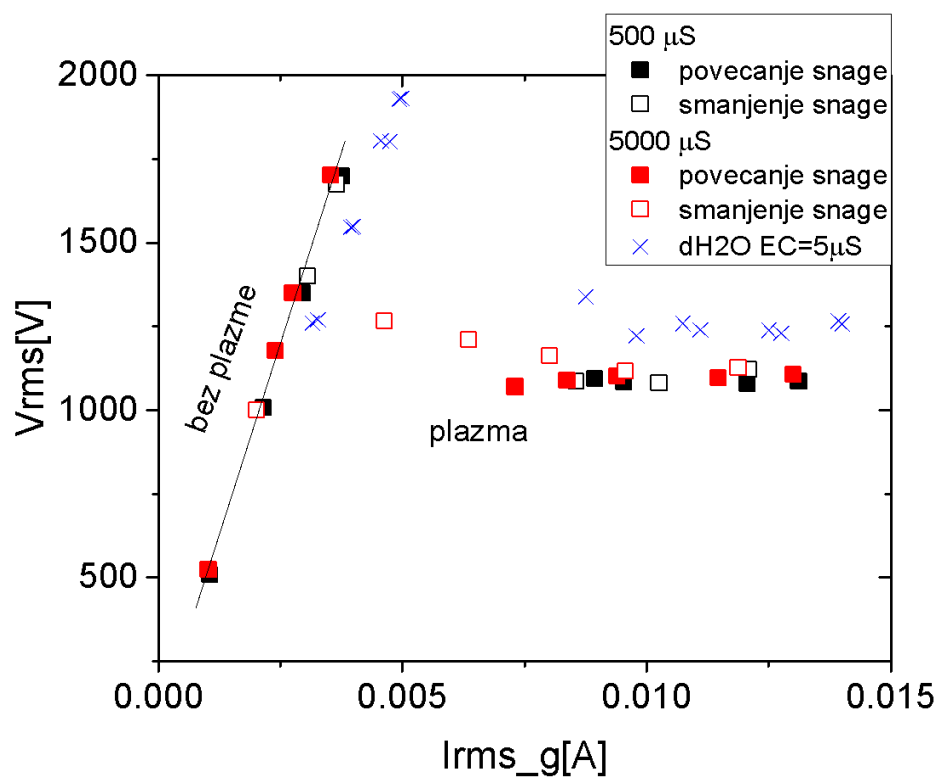
Даље повећање снаге на напајачу не доводи до повећања напона на извору плазме, већ се само струја повећава. Такође, тачке сада не леже више на правој линији, јер се формирано пражњење понаша као врло нелинеаран елемент у електричном колу. Описана зависност напона и струје и њихове вредности су врло слична код обе проводности узорка. У случају дестиловане воде, чија је проводност драстично мања од проводности коришћених узорка, плазма ради на нешто вишим напонима на плазма извору него код испитиваних узорка и при већим струјама.

На слици 13 приказана је струјно-напонска карактеристика плазма млаза али у зависности од струје пражњења - која је протекла кроз плазму и уземљени део кола. Црни симболи представљају резултате добијене са узорком од $500\mu\text{S}/\text{cm}$, а црвени симболи за узорак са проводношћу $5000\mu\text{S}/\text{cm}$. Крстићима је приказано мерење са узорком дестиловане воде чија је проводност $5\mu\text{S}/\text{cm}$, као поређење са извршеним мерењима.

Тачке снимљене на нижим напонима, тј. без упаљене плазме и за овај део електричног кола, имају линеарну зависност. Другачији нагиб праве линије у поређењу са сликом 12 последица је другачије ефективне импедансе у другом делу кола. Након што напон постане довољно висок да би дошло до пробоја и формирања стримера, кроз уземљени део кола почиње да протиче знатно већа струја него када плазме није било. Пробој је праћен падом радног напона. Поређењем наших мерења са мерењима са узорком дестиловане воде, видимо да се опсег струје која протиче кроз узорак и уземљени део кола не разликује пуно, тј. да промена проводљивости узорка у овом обиму не утиче знатно на електричне особине формираног стримера.



Слика 12: Струјно-напонска карактеристика плазма млаза за струју кроз извор плазме



Слика 13: Струјно-напонска карактеристика плазма млаза за струју кроз уземљену грану кола

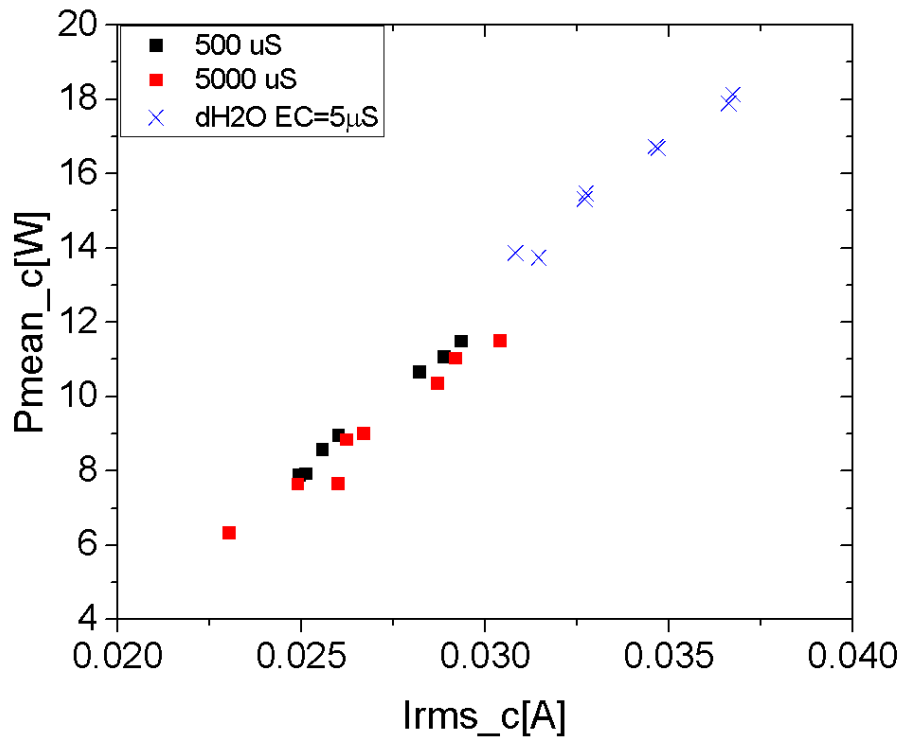
4.2 Одређивање снаге у плазми

Снимљени сигнали искоришћени су за рачунање средње снаге предате плазма млазу и самој плазми. Идентично као у делу 4.1, из два сета сигнала снимљених за сваку различиту снагу подешену на напајачу израчунате су по две вредности средњих снага које су затим усредњене.

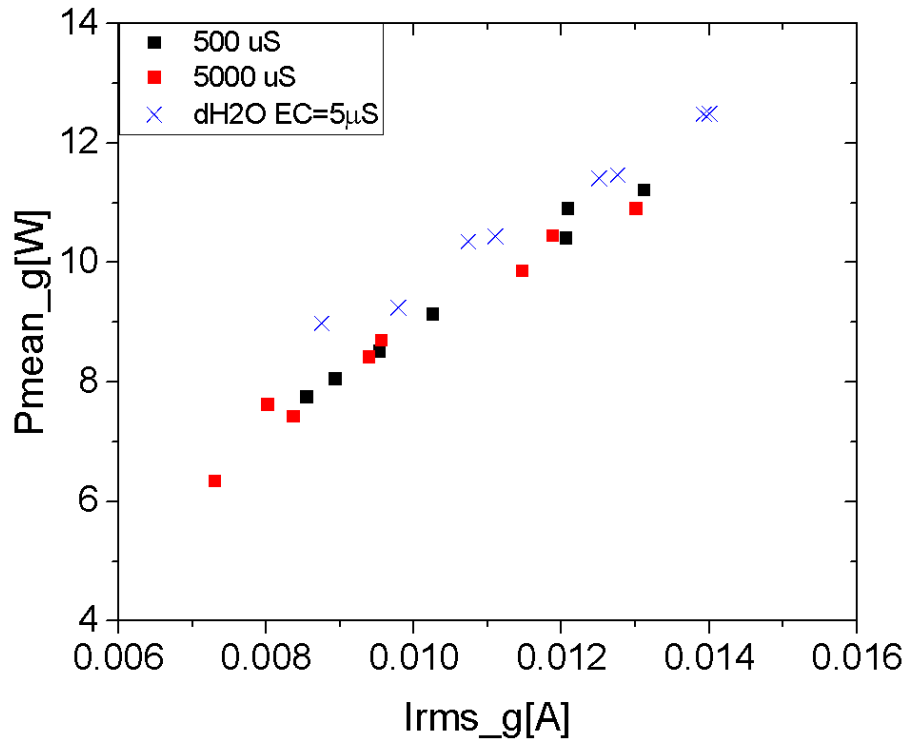
На слици 14 приказане су средње вредности снаге предате извору плазме у зависности од струје кроз плазма извор. Подаци на графику приказани су само за тачке у којима је плазма била упаљена. Црни симболи представљају резултате добијене са узорком од $500\mu\text{S}/\text{cm}$, а црвени симболи за узорак са проводношћу $5000\mu\text{S}/\text{cm}$, док је крстићима приказано мерење са узорком дестиловане воде чија је проводност $5\mu\text{S}/\text{cm}$. Измерене вредности снага крећу се у опсегу од 6 W до скоро 12 W и практично се не разликују за обе течности. У случају узорка од $5000\mu\text{S}/\text{cm}$ исте снаге се постижу на нешто већим струјама него у случају узорка од $500\mu\text{S}/\text{cm}$.

Са друге стране, вредности снага добијених са узорком дестиловане воде су знатно веће и крећу се између 14 W и 18 W , при чему су и струје у плазма млазу готово дупло веће у односу на узорке високе проводљивости. Добијени резултат је последица мале проводљивости дестиловане воде, услед чега се наелектрисања задржавају на површини воде екранирајући електрично поље које ствара напајана електрода. Због тога је потребно подесити већу снагу на напајачу како би се формирао и стабилно радио стример.

На слици 15 приказане су средње вредности снаге у плазми у зависности од струје кроз уземљену грану кола. Израчунате средње снаге у самој плазми су између 6 W и 11 W и нешто су ниже него снаге предате извору (слика 14). Ово је последица губитака услед отпора у електричном колу као и дисипације због благог грејања гаса у плазми. У поређењу са вредностима снага у плазми добијених са узорком дестиловане воде, разлика је максимално до 1 W на истим вредностима струја. Резултат показује да и поред драстичне разлике у проводљивости узорака, снаге које се из плазме предају узорку нису превише различите. Добијени ефекат је последица самоприлагођења плазме да функционише у најоптималнијем режиму – на одређеном напону и јачини струје.



Слика 14: Средње вредности снаге предале извору плазме у зависности од струје кроз извор



Слика 15: Средње вредности снаге у плазми у зависности од струје кроз уземљену грану кола

4.3 Оптички емисиони спектар плазма млаза

Користећи поставку описану у делу 3.5 Оптичка емисиона спектроскопија, снимљен је просторно и временски усредњен спектар емисије из пражњења. Снимање је вршено са течностима израчунате проводности који су симулирали загађену воду као мету. Приказани спектри кориговани су у складу са функцијом ефикасности детекције оптичког система.

На слици 16 је приказан спектар снимљен у широком опсегу таласних дужина, од 200nm до 1000nm. Иако је просторни угао снимања обухватао област канала пражњења изнад течности и граничну површину где плазма додирује течност, уочене линије припадају само побуђеним честицама из гасне фазе.

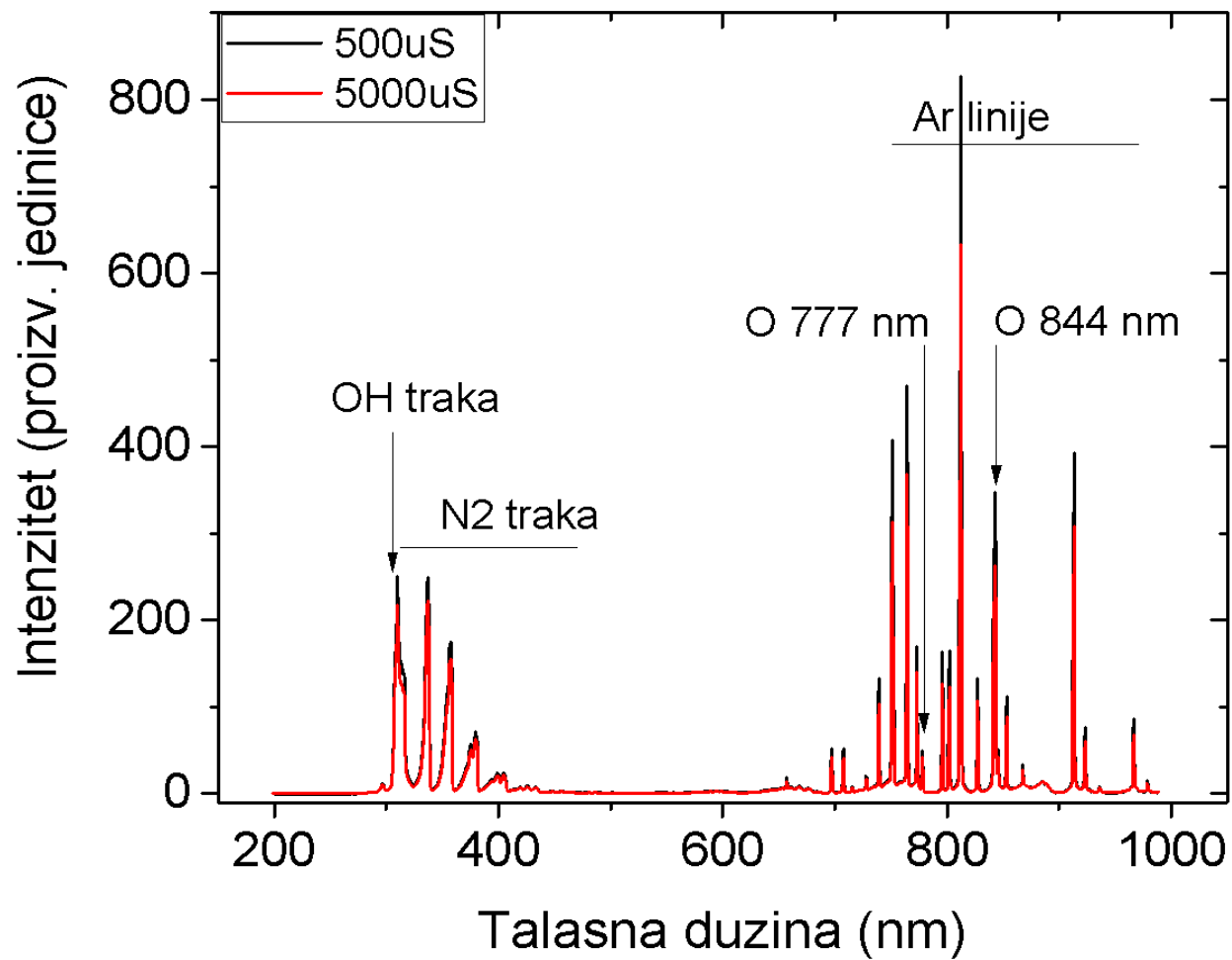
У опсегу таласних дужина од 315nm до 400nm, у UV (ултраљубичастој) области видљива је емисиона трака молекулског азота. Такође, у овој области уочавамо и пик који нам показује присуство траке ОН радикала.

У области видљивог зрачења јављају се линије аргона Ar од којих су најинтензивније: 696 nm, 706 nm, 714 nm, 750 nm, 763 nm, 772 nm, 794 nm, 801 nm, 811 nm, 842 nm, 912 nm, 922 nm. У IR (инфрацрвеној) области детектовано је и зрачење атомског кисеоника O, на таласној дужини од 777nm. Такође, детектовано је зрачење насцентног кисеоника и на таласној дужини од 844nm.

Поређењем резултата оптичке емисионе спектроскопије са резултатима из литературе не уочавају се одступања измереног спектра зрачења плазме од спектра који су добијени у другим експериментима у којима је коришћен плазма млаз на атмосферском притиску.

На графику су представљени спектри снимљени изнад течности различитих проводности. Црном бојом је исцртана линија снимљена изнад течности проводности 500 μ S/cm, а црвеном бојом за узорак са проводношћу 5000 μ S/cm. Како можемо закључити са графика, нема скоро никакве разлике у врстама створених реактивних атома и молекула. То нам говори да се независно од врсте загађивача стварају исте реактивне врсте, и то чак у приближно истој количини.

Добијени резултати показују да у плазми доминирају побуђени молекули и молекулски јони азота као и побуђени атоми аргона који је коришћен као радни гас. Поред тога, присутни су и ОН радикали и побуђени атоми кисеоника. Последње две врсте честица играју значајну улогу у процесима разградње пестицида у води, па је њихово присуство у плазми значајно за ову примену.



Слика 16: Оптички емисиони спектар плазма млаза који ради у контакту са течним узорцима две различите електричне проводљивости

5. Закључак

У овом матурском раду урађена су експериментална мерења плазма млаза који ради на атмосферском притиску са аргоном као радним гасом. Извршена је електрична карактеризација и снимљен оптички спектар плазма млаза који је у контакту са течним узорцима различите електричне проводљивости. Ово испитивање урађено је са циљем проучавања утицаја проводљивости на особине плазма млаза и са идејом да симулира ситуацију у којој се плазма млаз примењује за пречишћавање воде од органских загађивача (нпр. пестицида). Сопствена проводљивост загађивача обично је знатно већа од чисте воде, па се њиховим присуством знатно мења укупна проводљивост загађене воде.

Из измерених временски променљивих сигнала напона и струја одређене су RMS вредности и затим добијене струјно-напонске карактеристике плазма млаза који је радио у контакту са два различита узорка: од $500\mu\text{S}/\text{cm}$ и од $5000\mu\text{S}/\text{cm}$. Карактеристике су добијене у зависности од струје која је предата самом плазма извору и струје плазме – која је протекла кроз узорак ка уземљеном делу кола. У оба случаја за карактеристике, на нижим напонима када плазма није била упаљена, добијена је линеарна зависност која представља ефективну импедансу тог дела кола. Након паљења плазме радни напон се смањује у односу на ситуацију без плазме. Даљим повећањем снаге на напајачу примећен је пораст само струје, док напон пражњења остаје приближно константан. Повећање јачине струје значи већу концентрацију наелектрисаних честица у плазми, али и других неаутралних реактивних честица које су значајне за хемијске реакције у течном узорку. У принципу, ово у практичној примени може да резултује већим брзинама хемијских реакција које су одговорне за уништавање молекула загађивача.

У поређењу са мерењима урађеним са узорком дестиловане воде ниске проводљивости, примећено је да је радни напон у нашем случају нижи, као и струја у самом плазма извору. Тај ефекат је последица високе проводљивости течних узорака услед чега је могуће да плазма ради у ефикаснијем режиму.

Одређене су и одговарајуће средње снаге – предате плазма извору и течном узорку за узорке различите проводљивости. Снага је значајан параметар за процену ефикасности пречишћавања воде плазмом. Израчунате снаге предате плазма извору мање су него у случају узорка дестиловане воде. То у принципу значи да би се за третман

загађене воде плазмом могла употребити мања снага на извору плазме. Снаге у плазми и течном узорку за узорке високе проводљивости и дестиловану воду су сличне. Тај резултат показује да, и поред драстичне разлике у проводљивости, снаге које се из плазме предају узорку нису превише различите. Добијени ефекат је последица самоприлагођења плазме да функционише у најоптималнијем режиму – на одређеном напону и јачини струје.

Поред електричне карактеризације измерен је оптички емисиони спектар. Анализом снимљеног спектра показали смо да постоје линије у UV, видљивој и IR области електромагнетног зрачења. UV зрачење такође утиче на разградњу молекула органских загађивача. Поред тога у спектру су идентификоване хемијски високо-реактивне врсте OH и O које ефикасно оксидују молекуле загађивача у води.

У овом раду експериментално је показано да знатно повећање проводности течног узорка не утиче значајно на електричне и оптичке особине плазма млаза на атмосферском притиску у поређењу са случајем када је узорак дестилована вода. У случају испитаног стримерског пражњења види се да је повећана проводљивост узорка чак и добра, јер пражњење ради ефикасније тј. уз утрошак мање снаге што је значајно за примене. Такође је показано да су у плазми која функционише у контакту са узорцима високе проводљивости присутне реактивне хемијске честице битне за разградњу молекула органских загађивача. Зато добијени резултати представљају битну информацију за даље кораке ка примени плазме у пречишћавању воде.

6. Литература

1. Никола Шкоро: *Пробој и формирање гасних пражњења од стандардних до микроскопских димензија*, Физички факултет Универзитета у Београду, 2012.
2. Горан Б. Сретеновић: *Спектроскопска истраживања динамике развоја стримера у хелијуму*, Физички факултет Универзитета у Београду, 2015.
3. Лабат Ј., *Физика јонизованих гасова*, Физички факултет Универзитета у Београду 1991.
4. A.Fridman: *Plasma Chemistry*; Cambridge University Press; 2008.
5. Andreas Schutze, James Y. Jeong, Steven E. Babayan, Jaeyoung Park, Gary S. Selwyn, and Robert F. Hicks: *The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources*; IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE; 1998.
6. Christian Wilke, Klaus-Dieter Weltmann, Ronny Brandenburg, Torsten Gerlinga: *Power measurement for an atmospheric pressure plasma jet at different frequencies*; Leibniz Institute for Plasma Science and Technology, Germany; 2017.
7. John E. Foster: *Plasma-based water purification: Challenges and prospects for the future*; American Institute of Physics; 2017.
8. Mechanical, Electrical, Electronics Engineering: *The Study of Root Mean Square (RMS) Value*; The Royal Academy of Engineering
9. Silvia Grande, Francesco Tampieri, Anton Nikiforov and Agata Giardina: *Radicals and Ions Formed in Plasma-Treated Organic Solvents: A Mechanistic Investigation to Rationalize the Enhancement of Electrospinnability of Polycaprolactone*; Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University, Ghent, Belgium; 2019.
10. Yuri P. Raiser: *Gas Discharge Physics*; Berlin – Heidelberg; 1991.
11. Winter J. , Brandenburg R. and Weltmann K-D.: *Plasma Sources Sci. Technol.* 24, 064001,19; 2015.

12. <http://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
13. <https://www.singularityweblog.com/the-water-plasma-purifier-clean-safe-water-for-billions-of-people/>
14. [https://sh.wikipedia.org/wiki/Plazma_\(fizika\)](https://sh.wikipedia.org/wiki/Plazma_(fizika))
15. <http://physics.kg.ac.rs/fizika/files/predmeti/fizika%20plazme/1.%20agregatno%20stanje%20plazme.pdf>
16. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representations-of-various-APPJ-configurations-a-jet-with-two-ring_fig4_280554511
17. <https://nasport.pmf.ni.ac.rs/materijali/2042/Rastvori.%20pH.%20%20Energetika%20hemijskih%20reakcija%20%5b2-1%5d.pdf>
18. <https://www.alatshop.rs/blog/tekst/true-rms-i-rms-merenje/17>
19. <https://www.oceaninsight.com/products/spectrometers/>
20. <https://hannaservice.eu/product/research-grade-meter-ph-orp-and-ec-tds-resistivity-salinity-and-temperature-hi5521-02/>