

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марије Пуач

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5048/09-03 од 22.03.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Марије Пуач под насловом

Моделовање пробоја у гасовима Монте Карло техником

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња Марија Пуач уписала је докторске академске студије 2009. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Кандидаткињи је одобрено мировање права и обавеза у школској 2014/2015. години и школској 2015/2016. години. По истеку законског рока за завршетак докторских студија, на захтев кандидаткиње, одобрено је продужење рока за завршетак студија за два семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева кандидаткиње, одобрено је продужење рока

за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

Тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Моделовање пробоја у гасовима Монте Карло техником“ пријавила је 31.05.2018. године. Комисија за студије III степена на седници одржаној 05.06.2018. године разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће је, на седници одржаној 12.06.2018. године, именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5048/09-1 од 22.06.2018. године) у саставу:

- др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
- др Драгана Марић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт за физику,
- др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

За менторе су предложени академик Зоран Љ. Петровић, научни саветник Института за физику, Универзитета у Београду и др Јован Цветић, редовни професор Електротехничког факултета, Универзитета у Београду. Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације одржана је 02.07.2018. године на Електротехничком факултету, пред именованом комисијом, а у одсуству ментора Зорана Љ. Петровића. Кандидаткиња је одговорила на сва питања комисије и добила оцену „задовољила“. Комисија за оцену подобности теме и кандидата је поднела извештај који је Комисија за студије III степена размотрила и упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће је на својој седници одржаној 11.09.2018. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5048/09-2). Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидаткиње Марије Пуач под насловом „Моделовање пробоја у гасовима Монте Карло техником“ (број 61206-4048/2-18 од 24.09.2018. године).

Кандидаткиња је 28.02.2019. године предала дисертацију на преглед и оцену. На седници одржаној 05.03.2019. године, Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност свих потребних услова и Наставно-научном већу упутила предлог за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно-научно веће је именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5048/09-3 од 22.03.2019. године), у саставу:

- др Зоран Љ. Петровић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт за физику,
- др Јован Цветић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
- др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње припада научној области електротехнике и ужој научној области физике пражњења у гасовима, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Дисертација припада и другим областима, попут транспорта наелектрисаних честица и моделовања физичких феномена Монте Карло техником.

Дисертација је урађена под руководством др Зорана Љ. Петровића, научног саветника Института за физику Универзитета у Београду, и др Јована Цветића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Др Зоран Љ. Петровић је руководио Центром за неравнотежне процесе Института за физику у Београду, Центра изврности Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Др Зоран Љ. Петровић је познати страживач у области физике електричних гасних пражњења и физике неравнотежног транспорта наелектрисаних честица у гасовима. У досадашњем раду, објавио је преко 280 публикација у часописима са SCI листе, одржао је преко 100 предавања по позиву на међународним конференцијама и аутор је једне од најзначајнијих монографија у својој области истраживања, *Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication*. Био је ментор и руководио великом бројем докторских дисертација (око 20) и магистарских теза (преко 15) које су одбрањене на Електротехничком факултету и Физичком факултету Универзитета у Београду. Ангажован је као предавач на докторским студијама Електротехничког и Физичког факултета Универзитета у Београду, а био је гостујући професор на Кеио Универзитету у Јокохами у Јапану. Добитник је великог броја домаћих и интернационалних награда и признања за научни рад и технолошка достигнућа. Редовни је члан Српске академије наука и уметности и Академије инжењерских наука Србије.

Др Јован М. Цветић је редовни професор Електротехничког факултета у Београду и шеф Катедре за Микроелектронику и техничку физику у истој установи. Др Јован М. Цветић је један од водећих светских истраживача у оквиру физике електричних гасних пражњења посебно у области атмосферских пражњења у тропосфери. Објавио је преко 80 научних радова и преко 20 публикација са SCI листе, а одржао је више предавања по позиву на међународним конференцијама. Коаутор је три уџбеника и збирке задатака из општег курса физике. Био је руководио више тржишних пројеката, а руководио је и пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом „Електродинамика атмосфере у урбаним срединама Србије“. Био је ментор и руководио две докторске дисертације и више магистарских теза.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марија Пуач (рођена Савић) је рођена 10.06.1985. године у Параћину. Електротехнички факултет – модул Физичка електроника, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, уписала је 2004. године на Универзитету у Београду и завршила са просечном оценом 8,89. Дипломирала је 28.10.2008. године са темом „Анализа интегрисаних таласовода специфичне геометрије са шупљим језгром“ са оценом 10 под менторством проф. др Петра Матавуља.

Мастер академске студије уписала је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на смеру Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника и завршила их 2009. године са просечном оценом 10. Мастер рад на тему „Монте Карло симулација пробоја у гасовима“ одбранила је 22.12.2009. године под менторством проф. др Зорана Љ. Петровића.

Од 2009. године је студент докторских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду – смер Наноелектроника и фотоника. Положила је све изборне испите са просечном оценом 9,80.

Марија Пуач је у радном односу од 30.10.2008. године у Институту за физику у Београду у Лабораторији за гасну електронику под руководством и менторством др Зорана Љ. Петровића. Коаутор је једанаест научних радова објављених у међународним часописима, као и већег броја радова на научним конференцијама, укључујући уводна предавања.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је обликована према Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14.12.2011. године. Састоји се од насловне стране на српском и енглеском језику, стране са подацима о ментору и члановима комисије, резимеа на српском и енглеском језику, садржаја, текста рада подељеног у поглавља, списка коришћене литературе и стране са биографијом аутора. Дисертација обухвата 151 страну (укључујући биографију) са 96 слика, 2 табеле и 80 библиографских референци. Текст дисертације обликован је кроз следећа поглавља:

1. Увод
2. Монте Карло техника
3. Електронски подржан пробој у аргону у променљивом електричном пољу
4. Пробој у променљивом електричном пољу при различитим фреквенцијама поља – закон скалирања пробојних кривих
5. Функције расподеле по енергијама при РФ пробоју
6. Брзина дрифта при РФ пробоју и поређење са једноставним моделом
7. Ефекти на површинама електрода при РФ пробоју
8. Пробој у различитим гасовима у РФ пољима
9. Пробој у смешама гасова у РФ пољима
10. Закључак и преглед научних доприноса

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном делу дисертације дат је преглед историјског развоја радиофреквенцијског (РФ) пробоја и плазми. Почетак дисертације ослања се на преглед основне феноменологије пробоја у гасовима. То укључује пробој при једносмерним електричним пољима, помоћу кога су дефинисани коефицијент јонизације и принос секундарних електрона. Након осврта на Пашенов закон и увођења појма пробојне напонске криве, излагање је настављено физиком пробоја у радиофреквенцијском пољу. Овај одељак обухвата преглед постојећих теорија, пре свега, једноставну теорију коју је предложио фон Енгел. Ова теорија представља основу разумевања РФ пробоја која се није значајно мењала све до сада. Један облик фон Енгелове теорије јесте мало модификована теорија од стране Јевгенија Лисовског (који се

бави експерименталним мерењем пробојних напонских кривих при РФ пробоју). Ради бољег разумевања пробоја у РФ електричним пољима, дат је осврт на основне феномене физике ројева, на које су надовезани специфични феномени који су карактеристични искључиво за транспорт наелектрисаних честица у РФ пољима.

Друго поглавље посвећено је опису Монте Карло технике транспорта наелектрисаних честица у гасовима. Разматран је начин на који се рој наелектрисаних честица моделује у Монте Карло рачунарским симулацијама. Детаљан опис Монте Карло кода коришћеног у изради дисертације је дат кроз одељке који описују моделовање путање електрона у РФ електричном пољу, процедуре за одређивање тренутка и типа судара наелектрисане честице и атома/молекула позадинског гаса, као и одређивања особина честице после расејања и после неконзервативних судара.

Треће поглавље представља почетак дела дисертације који се бави искључиво резултатима до којих је кандидаткиња дошла. У овом поглављу детаљно је испитан тренутак у ком долази до пробоја анализом електронски подржаног пробоја у аргону у променљивом електричном пољу, при фреквенцији од 13,56 MHz. За разлику од пробоја при једносмерним пољима, у случају РФ-а могуће је одржати пробој само електронима. Разматрана је област двоструких вредности РФ пробојне напонске криве, у којој једној вредности притиска (помноженог са одстојањем између електрода) одговарају два напона. Двоструке вредности пробојног напона су примећене у експериментима, а у овом поглављу је показано да су електрони „одговорни“ за постојање области двоструких вредности, односно да се област двоструких вредности пробојних напона може остварити и када су искључиво електрони одговорни за пробој.

Анализу настављамо у четвртном поглављу фокусом на фреквенцију примењеног РФ извора. Велики број примена РФ плазми у наноелектроници укључује изворе који се напајају на две учестаности, па је напон генератора збир два синусна сигнала, од којих је један на нижој, а други на вишој фреквенцији. Посматрањем пробојних напонских кривих код којих су вариране само нижа, а затим само виша фреквенција, препознат је и издвојен њихов утицај. Најзначајнији закључак у овом делу јесте ревидиран закон скалирања пробојних кривих, применљив на криве РФ пробоја.

У петом поглављу је посматран РФ пробој из другог угла, анализом функција расподеле по енергијама. Детаљна анализа је урађена за фреквенцију 13,56 MHz, праћена прегледом како промена фреквенције утиче на расподелу по енергијама, када није одржан закон скалирања. Шесто поглавље даје критички осврт на методу одређивања брзине дрифта из пробојних напонских кривих, предложено од стране истраживача Јевгенија Лисовског.

У седмом поглављу надограђен је модел РФ пробоја укључивањем електрода, прецизније, ефеката на површинама електрода. На почетку дат је преглед релевантних процеса, као и начин њихове имплементације у моделу. Разматрани су утицаји ефеката на површинама на облик пробојних напонских кривих. Затим је дато поређење просторно-временских профила, функција расподела по енергијама и брзина дрифта са и без ових ефеката.

Сва сазнања стечена у претходним поглављима нашла су примену кроз анализу пробоја у различитим гасовима. Осмо поглавље описује и анализира пробој у РФ пољима у хелијуму и кисеонику. Иако се спектри аргона и хелијума не разликују пуно, упоређивањем сетова пресека за ова два гаса може се приметити да пресек за еластични судар у аргону има Рамзауеров минимум, док он не постоји у еластичном пресеку за хелијум. Поређењем просторно-временских профила и релаксације 95% максимума расподеле по енергијама за хелијум и аргон, једнозначно је показано да постојање Рамзауеровог минимума утиче на број еластичних судара. Са друге стране, кисеоник је одабран јер његов двоатомски молекул може доживети процес електронског захвата. Појава електронског захвата у гасу представља механизам губитака електрона, чиме, наравно, утиче на пробој, а самим тим на положај пробојне напонске криве у V - p равни.

Девето поглавље разматра РФ пробој у смешама гасова. У овом поглављу је даље надограђен модел укључивањем тешких честица (пре свега јона). Усвојен је модел којим је сваки настанак јона праћен настанком секундарног електрона на некој од електрода у произвољном тренутку у току наредног временског периода. На примеру синтетичког ваздуха показано је да се прихватањем једноставног модела за репрезентовање рефлексија, производње секундарних електрона и праћење транспорта јона може добити добро поклапање са расположивим експерименталним резултатима пробојних напонских кривих. Оно што је изгубљено, јесте временска разложеност утицаја јона на РФ пробој, која се не може приметити поређењем просторно-временских профила са и без укључених јона. У кратком одељку деветог поглавља дато је поређење модела који укључује јоне са експерименталним резултатима у случају кисеоника и азота. Након синтетичког ваздуха, посматран је и анализиран РФ пробој у атмосфери Марса.

Десето, уједно и последње поглавље, даје кратак и конкретан преглед научних доприноса ове докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Тема докторске дисертације припада савременим областима истраживања и кроз примарно теоријски приступ анализи РФ пробоја, нуди увид у механизме и фундаменталне физичке процесе који га одређују. РФ пробој претходи формирању РФ плазми. Као такав, његова анализа је битна како за разумевање механизма формирања РФ плазми, тако и за њихову применљивост у индустрији. Анализа се базира на појединачним бинарним сударима, сударима са површинама и посматрању транспорта електрона, јона, фотона и метастабилна.

Прве теорије које су се бавиле пробојем у променљивим електричним пољима јавиле су се 1940-их година. Први су Маргенау и Хартман објавили серију од четири рада под насловом „Теорија високофреквенцијских пробоја у гасовима“. Сва четири рада представљају теоријска истраживања и имају за основу прорачуне и описе електронских функција расподеле по енергијама, њихових хармонијских компоненти, пробој у високофреквенцијским пољима и осврт на законе скалирања. Готово истовремено, јављају се и истраживања фон Енгела. Он је дефинисао основну феноменологију (теорију) РФ пробоја, назвавши је „Једноставна теорија“. Управо једноставна феноменологија фон Енгела остала је прихваћена до данашњих дана, уз јако мале модификације. У овој дисертацији нуде се другачији принципи описа пробоја.

Све шира индустријска примена РФ плазми захтевала је ревизију теорије фон Енгела, па се 1990-их поново јављају експериментална мерења РФ пробојних кривих. Експериментална мерења РФ кривих Јевгенија Лисовског, у овом периоду, обухватају велики спектар гасова, широк опсег растојања између електрода и неколико различитих фреквенција, са фокусом на фреквенцију од 13,56 MHz (због њене велике заступљености у привреди). Иако је Лисовски представио велики број експерименталних резултата, он је прихватио гледиште фон Енгелове теорије, без њене значајне ревизије. На први поглед, основни допринос физици РФ пробоја Лисовски је дао кроз нову методу одређивања брзина дрифта из снимљених пробојних кривих за РФ. Међутим, у овој дисертацији је детаљно анализиран метод и показано је да његова примена нема физичку оправданост.

Након 2000-те појавила су се два експериментална истраживања која се баве РФ пробојем. Прво је урађено од стране Золтана Донка. Поред пробојних кривих за синтетички ваздух, водоник и деутеријум, Донко је дао и резултате Монте Карло симулације који се веома лепо

слажу са експерименталним резултатима. Са друге стране, његово истраживање није залазило у детаљнију анализу физичких процеса и њиховог утицаја на пробој.

Други експеримент РФ пробоја је постављен у Лабораторији за гасну електронику Института за физику. Урађена су почетна мерења која дају основана очекивања да ће, уз рачунарски модел пробоја представљен у овој дисертацији, представљати најкомплетнију анализу РФ пробоја која је до сада урађена.

Иако истраживање РФ пробоја датира пре више од 80 година, теорија (за коју се показало да има доста отворених питања на која не може да одговори) није значајније ревидирана. Уз значајан напредак компјутерских технологија, створени су услови да се развије детаљан модел РФ пробоја урађен Монте Карло техником. Под „детаљно“ подразумева се модел који може објаснити двоструку природу пробојне криве на ниским притисцима, издвојити физичке процесе релевантне за пробој, објаснити природу другог минимума и анализирати утицаје природе материјала од ког су израђене електроде, као и утицај тешких честица на пробој. Са друге стране, такав модел РФ пробоја, урађен Монте Карло техником, није пронађен у литератури (осим у радовима Донка и сарадника и то у ограниченој мери и без довољне анализе којом би се описали основни механизми). Оригинални допринос ове дисертације је систематско изучавање РФ пробоја на основу најбољих података за елементарне сударне процесе, пре свега електрона, али и јона и тешких честица, уз опис процеса на површинама и праћење транспорта честица и њихових особина у току периода. Савременост се огледа у томе да је за развој неравнотежних плазми на атмосферском притиску (које су данас основа низа технологија, од плазма медицине, примена у пољопривреди па до активације површина и третмана термолабилних материјала) неопходно детаљно контролисати РФ пробој у гасовима како би се остварио настанак плазме.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у дисертацији наведена је кроз 80 референци. Цитирани су актуелни радови из угледних међународних часописа, саопштења са конференција, прегледни радови и докторске дисертације. Наведени списак литературе указује да је кандидаткиња прегледао и цитирао референтне изворе из области физике пражњења, транспортне теорије ројева наелектрисаних честица у гасовима и физике материјала, који су релевантни за тему дисертације. У дисертацији су такође цитирани и радови саме кандидаткиње.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Дисертација се бави нумеричким симулацијама транспорта наелектрисаних честица у гасу између две бесконачне напајане електроде. У ту сврху коришћена је Монте Карло техника. Монте Карло симулација је један од начина да се имплицитно реши Болцманова једначина и опише понашање роја електрона у гасу, у електричном пољу. Истовремено, Монте Карло симулација представља нумерички експеримент у који се могу директно укључити гранични услови. Иако је мање ефикасна, или временски захтевнија, нумеричка метода од конкурентних метода решавања Болцманове једначине, као што су *two-term* и *multi-term* моментне методе, Монте Карло техника је у стању да опише рој у нехидродинамичким условима који се јављају у системима описаним у дисертацији. Нехидродинамичност у описаним системима је последица неконзервативности процеса јонизације или захвата, ефеката граница, временске и просторне релаксације и неуравнотежених баланса броја, импулса и енергије честица, уз временски развој функције расподеле и временске релаксације особина роја које понекад не могу да прате брзину промене поља.

Друга метода која се намеће када је моделовање РФ пробоја (плазми) у питању је PIC (*particle-in-cell*). Основна предност PIC методе је могућност израчунавања вредности електричног поља у свакој тачки на одабраној мрежи по којој се врше прорачуни. На тај начин може се прецизно квантификовати деловање поља на посматрану наелектрисану честицу. Ова особина PIC методе долази до пуног изражаја у моделовању РФ плазми (и плазми уопште) када постоје области просторног наелектрисања у близини електрода, јер нагомилана наелектрисања у тим областима свакако утичу на профил и интензитет електричног поља. Са друге стране, РФ пробој се дешава у тренутку када ове области нису још увек формиране, па можемо рећи да се електрони крећу једино под утицајем спољашњег електричног РФ поља. Иако PIC кодови могу укључивати Монте Карло део обраде судара, значајно прецизнија израчунавања кретања роја електрона између две електроде напајане РФ електричним извором се могу добити чистим Монте Карло кодом без захтевног дела за само-конзистентно рачунање електричног поља услед просторне расподеле наелектрисања.

Из наведених разлога одабрана техника Монте Карло симулације, којом је описан РФ пробој разматран у дисертацији, јесте у потпуности одговарајућа метода која је омогућила детаљно праћење временског и просторног развоја роја електрона између две напајане електроде и постизања пробоја.

3.4. Применљивост остварених резултата

Израда било ког доброг и свеобухватног модела претпоставља његову лаку применљивост. Тако и модел развијен у овој дисертацији има потенцијал да буде широко коришћен у области пробоја у гасовима. Иако је анализа представљена у дисертацији донекле ограничена на фреквенције примењеног електричног поља реда MHz, уз јако мале модификације (у неким случајевима и без икаквих промена) могуће је испитивати пробоје и на другим фреквенцијама, чиме се значајно проширује опсег примене кода. Структура кода је развијена тако да се типови честица могу готово бесконачно додавати. Наравно, ограничења су искључиво у количини расположивих компјутерских ресурса. Развијени модел пружа велику флексибилност и када је реч о примењеним гасовима, материјалима од ког су изграђене електроде, облика примењеног поља и донекле геометрије коморе која се моделује. Ова метода се може применити и за сложене геометрије у временски променљивим пољима имајући у виду да је једноставна модификација кода да се кретање честица разматра и у тродимензионој геометрији.

Поред применљивости развијеног кода у облику једноставности његове модификације како би одговарао захтевима корисника, постоји и применљивост конкретних резултата приказаних у овој дисертацији. Применом модела на гасове за које постоје доступни експериментални резултати показано је да се може добити добро квалитативно слагање за све гасове (и експерименте), чиме је недвосмислено доказано да модел укључује све релевантне физичке процесе који учествују у РФ пробоју. Квалитативно неслагање са резултатима добијеним експериментом може бити последица непознавања детаљне конструкције експеримента и начина одређивања пробојних напона/притисака, али и грешака у експерименту и у принципима интерпретације резултата. Апсолутно добро слагање са експериментом Донка и сарадника је добијено у случају синтетичког ваздуха.

Уколико погледамо ширу слику, једноставном применом модела на смеше гасова лако се могу одредити услови пробоја за конкретан случај, али и испитати гранични услови у случају формирања нежељених плазми (када је њихово присуство има негативне последице). Из наведеног, може се закључити да дисертација омогућава свестрану примену, како применом развијеног кода и његовом даљом модификацијом, тако и анализом представљених резултата.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидаткиње за самостални научни рад

Од почетка истраживања до реализације дисертације, кандидаткиња је прошла кроз неколико фаза. Изабрана је актуелна тема из области физике пробоја у гасовима чије истраживање доприноси различитим областима, у фундаменталним истраживања и у физици честица. Наведена литература указује да је кандидаткиња пажљиво прегледала и проучила релевантне и савремене изворе из области физике пражњења, транспортне теорије ројева наелектрисаних честица у гасовима и физике материјала, као и теорије и нумеричких метода потребних за моделовање. Нумеричка реализација ових модела захтевала је посебно програмерско умеће, као и примену савремених мултипроцесорских рачунарских система високих перформанси. Како се дисертација бави моделовањем пробојне напонске криве за РФ пробој, као и идентификовањем основних физичких процеса одговорних за паљење РФ плазми, објављени резултати су релевантни за поље теоријске анализе пробоја у гасовима, али и за поље практичне примене РФ плазми. Добијени резултати су објављени у врхунским међународним часописима и презентовани на више међународних конференција. Коначно, сама докторска дисертација је припремљена и обликована у складу са добром праксом у светској научној заједници. На основу наведеног, комисија сматра да је кандидаткиња показала високи степен способности за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Из резултата приказаних у дисертацији могу се издвојити следећи оригинални научни доприноси:

- Развијен је модел РФ пробоја и одговарајућа рачунарска симулација која описује све релевантне физичке процесе.
- Недвосмислено је одређена природа РФ пробоја. Досадашња феноменологија заснивала се на претпоставци да електрони осцилују између електрода и, крећући се кроз гас (и у додиру са електродама), производе нове електроне. Анализом просторно-временских профила концентрације електрона показано је да је ова теорија подржана у области ниских притисака, али никако не важи у области високих притисака пробојне напонске криве.
- Проширен је закон скалирања пробојних напонских кривих. Да би закон важио за РФ криве, мора се узети у обзир и фреквенција РФ извора одржавањем производа fd константним, поред услова да је производ pd константан.
- Модел РФ пробоја развијен у овој дисертацији је истакао и квантификовао утицај материјала од ког су израђене електроде на облик пробојне напонске криве.
- Поред утицаја површина, разматран је и утицај електронског захвата у гасу, који је последица природе молекула коришћеног гаса. Показано је да електронски захват пре свега утиче на десну грану пробојне напонске криве условљавајући повећање пробојног напона које је последица губитака електрона у гасу.
- Објашњена је природа другог минимума који се може јавити лево од минимума пробојне напонске криве. Овај минимум је директна последица утицаја тешких честица, односно избацивања секундарних електрона са површина електрода у тренутку удара тешких честица.

- Применљивост развијеног модела тестирана је на смешама гасова. На примеру синтетичког ваздуха показано је да развијени модел укључује све релевантне физичке процесе, што је поткрепљено чињеницом да је добијено готово савршено слагање са доступним експерименталним резултатима.
- Значај развијеног модела описан је кроз његову примену на РФ пробој у атмосфери Марса. Поред корисних примена РФ плазми, значај примене модела сагледан је и из угла формирања нежељених плазми (плазме које могу негативно утицати на системе неопходне за истраживачки рад на Марсу).
- Критички је анализирана метода одређивања брзина дрифта из измерених пробојних напонских кривих.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

РФ плазме се дуги низ година користе у различитим областима, почев од плазма нагризања полупроводничких материјала, депоновања танких филмова, преко примене у медицини и стоматологији, затим агрономији и преради хране. Развоју индустријске примене РФ плазми није увек претходила детаљна научна анализа. Симулација представљена у овој дисертацији анализира физичке процесе који су одговорни за формирање РФ плазми и одређује ниво њиховог значаја уз детаљан нумерички прорачун интеракције електрона са честицама позадинског гаса. Први корак изградње модела РФ пробоја укључивао је посматрање једино кретања електрона између две напајане електроде. Оправданост коришћења овако једноставног модела лежи у чињеници да РФ пробој може бити одржан само помоћу електрона (алфа мод РФ плазми), чије кретање од једне ка другој електроди и назад, под дејством спољашњег РФ електричног поља, обезбеђује неопходну повратну спрегу, кроз процесе јонизације у гасу.

Једноставна теорија РФ пробоја, предложена пре више деценија, посматрала је РФ пробој као реализацију услова да се у једном полупериоду електрони помере од прве до друге електроде, а у другом полупериоду да се врате до прве и тако обезбеде континуалан раст броја електрона. Наравно, општи услов за пробој је да је он последица баланса електрона насталих у сударним јонизацијама позадинског гаса и њихових губитака на површинама електрода. У овој дисертацији скренута је пажња да ова теорија не важи у свим условима, већ постоји одређен опсег у којем се може користити да опише РФ пробој. Посматрањем пробојних напонских кривих, одговарајућих просторно-временских профила и расподела по енергијама показано је да се теорија може применити једино при ниским притисцима, који обухватају леву грану пробојне криве. Са друге стране, при условима високих пробојних притисака (десна грана) теорија није подржана. Посматрањем положаја роја електрона између две електроде очигледно је да електрони готово у занемарљивом броју долазе до електроде, из чега следи да електроде не играју одлучујућу улогу у РФ пробоју при овим условима. Благи пораст напона у десној грани криве је неопходан само да би се повећао пренос енергије од поља ка електронима како би им се обезбедила довољна количина енергије да изврше јонизацију атома (молекула) позадинског гаса.

Разматрањем постојања два различита услова да би се пробој догодио, може се објаснити и двострука природа леве гране РФ пробојне напонске криве. Област двоструких вредности, где једном пробојном притиску одговарају два пробојна напона, примећена је на великом броју експериментално снимљених пробојних напонских кривих. Од тога је и потекла мотивација да се објасни узрок настанка ове области.

Иако је највећи број приказаних резултата урађен на фреквенцијама поља од 13,56 MHz, разматран је и утицај промене фреквенције на пробојне криве. Из ове анализе произашла је

допуна закона о скалирању пробојних кривих. Поред захтева за одржањем производа pd константним, код РФ пробоја мора бити задовољен услов који укључује фреквенцију, односно да производ fd , такође, остане константан. Практична примена закона скалирања огледа се у томе да уколико је познат облик пробојне криве за услове одређене растојањем између електрода (d) и фреквенцијом (f), свакако можемо одредити било коју криву жељене фреквенције и/или међуелектродног растојања, под условом да се држимо услова одређених законом скалирања.

Даљом надоградњом модела у смеру укључивања природе површина материјала од ког су изграђене електроде, посматране су електроде као активан елемент који утиче на пробој. Резултатима симулације показано је да је утицај површина најизраженији у области ниских притисака. То је поткрепљено и просторно-временским профилима концентрације електрона где се може уочити преклапање роја са електродама. Преклапање претпоставља да се електрони у значајном броју сударају са електродама, чиме се укључује додатни извор електрона, односно емисија секундарних електрона са површина. У области високих притисака, као што је већ поменуто, ово преклапање не постоји.

Природа гаса свакако игра значајну улогу. У дисертацији овај аспект је разматран кроз одабир гасова који имају неку карактеристичну особину или због њихове сложености (посебно се односи на смеше). Опште је познато да се у нанотехнологијама користе смеше гасова које садрже електронегативне гасове, чији атом/молекул може да веже електрон кроз процес електронског захвата. Овај процес, гледано са тачке пробоја, представља механизам губитка електрона у гасу и у дисертацији је анализиран на примеру кисеоника. Изведени закључак је прилично једнозначан: већи губици повлаче веће пробојне напоне и притиске. Са друге стране, РФ пробојне напонске криве, у неким случајевима, показале су значајна одступања у облику. Пре свега се мисли на други минимум, лоциран на ниским притисцима. Да би израђен модел показао валидност, морао је да објасни природу јављања другог минимума. На примеру синтетичког ваздуха модел је проширен и тестиран. Проширење обухвата укључивање тешких честица које при удару у електроде избацују секундарне електроне. Примењени модел, иако једноставан, дао је јако добро слагање са расположивим експерименталним резултатима. Недостак модела за тешке честице је чињеница да се транспорт јона до површине електроде одвија у неколико редова величине дужем времену од транспорта електрона те је јако тешко добити реално репрезентовање процеса који су последица удара са површинама

За крај, применљивост модела РФ пробоја, који је циљ ове дисертације, поткрепљена је чињеницом да за тестиране гасове и смеше гасова симулација даје добро квалитативно слагање са доступним експерименталним резултатима. На основу овога се може закључити да модел садржи све релевантне процесе, а да је кроз примену анализиран и квантификован њихов утицај. Применом модела на сложену смешу атмосфере Марса истакнуте су могуће примене, али и могућност контроле формирања нежељених РФ плазми.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси остварени у оквиру докторске дисертације објављени су у следећим публикацијама сврстаним у категорије према Правилнику о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије:

Категорија M21a:

1. **Marija Puač**, Dragana Marić, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov and Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo modeling of radio-frequency breakdown in argon* – Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 27, pp. 075013.

ИФ 3.939 DOI: 10.1088/1361-6595/aacc0c

ISSN 0963-0252

Категорија M21:

1. Zoran Lj Petrović, Dragana Marić, **Marija Savić**, Srđan Marjanović, Saša Dujko, Gordana Malović: *Using swarm models as an exact representation of ionized gases* – Plasma Process Polymers, Vol. 14, 2016, pp. 1600124

ИФ 2.846 DOI: 10.1002/ppap.201600124

ISSN 1612-8850

Категорија M22:

1. Dragana Marić, **Marija Savić**, Jelena Sivoš, Nikola Škoro, Marija Radmilović-Radjenović, Gordana Malović and Zoran Lj. Petrović: *Gas breakdown and secondary electron yields: – Eur. Phys. J. D*, Vol. 68, 2014, pp. 155

ИФ 1.240 DOI: 10.1140/epjd/e2014-50090-x

ISSN 1434-6060

2. **M. Savić**, M. Radmilović-Radjenović, M. Šuvakov, S. Marjanović, D. Marić and Z. Lj. Petrović: *On Explanation of the Double-Valued Paschen-Like Curve for RF Breakdown in argon* – IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 39, 2011, pp. 2556-2557

ИФ 1.174 DOI: 10.1109/TPS.2011.2159244

ISSN 0093-3813

3. Srđan Marjanović, Milovan Šuvakov, Ana Banković, **Marija Savić**, Gordana Malović, Stephen J. Buckman, and Zoran Lj. Petrović: *Numerical Modeling of Thermalization of Positrons in Gas-Filled Surko Traps* – IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 39, 2011, pp. 2614-2615

ИФ 1.174 DOI: 10.1109/TPS.2011.2159129

ISSN 0093-3813

Категорија M23:

1. Marija Radmilović-Radjenović, Branislav Radjenović, **Marija Savić**: *Microwave field strength computing for the resonator designs and filters* – Acta Physica Polonica A, Vol 129, 2016, pp. 289-292
ИФ 0.469 DOI: 10.12693/AphysPolA.129.289
ISSN 0587-4246
2. Š. Matejčik, M. Klas, B. Radjenović, M. Durian, **M. Savić** and M. Radmilović-Radjenović: *The Role of the Field Emission Effect in the Breakdown Mechanism of Direct-Current Helium Discharges in Micrometer Gaps* – Contrib. Plasma Phys., Vol. 53, 2013, pp. 573-579
ИФ 0.983 DOI: 10.1002/ctpp.201300032
ISSN 0863-1042
3. M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović and **M. Savić**: *The surface charging effects in three-dimensional simulation of the profiles of plasma-etched nanostructures* – International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 24, 2011, pp. 535-544
ИФ 0.600 DOI: 10.1002/jnm.798
ISSN 0894-3370
4. A. Bojarov, M. Radmilović-Radjenović and **M. Savić**: *Influence of the secondary electron emission on the characteristics of radio frequency plasmas* – Hemijska Industrija, Vol. 65, 2011, pp. 1-8
ИФ 0.205 DOI: 10.2298/HEMIND100810063B
ISSN 0367-598X
5. **Marija B. Savić**, Marija Radmilović-Radenović: *Modelovanje proboja u gasovima na niskim pritiscima Monte Karlo tehnikom (Gas discharges modeling by Monte Carlo technique)* – Hemijska Industrija, Vol. 64, 2010, pp. 171-175
ИФ 0.137 DOI: 10.2298/HEMIND091221022S
ISSN 0367-598X
6. Marija Radmilović-Radjenović, Branislav Radjenović, **Marija Savić**: *Breakdown phenomena in water vapor microdischarges* – Acta Physica Polonica A, Vol. 117, 2010, pp. 752-755
ИФ 0.467 DOI: 10.12693/AphysPolA.117.752
ISSN 0587-4246

Категорија M14:

1. Zoran Lj Petrović, Jelena Sivoš, **Marija Savić**, Nikola Škoro, Marija Radmilović-Radjenović, Saša Gocić, Dragana Marić: *New phenomenology of gas breakdown in DC and RF fields* – Journal of Physics: Conference Series, Vol. 514, 2014, pp. 012043
DOI: 10.1088/1742-6596/514/1/012043

Kategorija M31:

1. **Marija Puač**, Zoran Lj Petrović: *Modeling of radio-frequency breakdown by Monte Carlo technique*, 22nd International Conference on Gas Discharges and their Applications, 2nd to 7th September 2018. Novi Sad, Serbian Academy of Science and Arts, pp. 335-338.

Kategorija M32:

1. Zoran Lj Petrović, Antonije Djordjević, **Marija Puač**, Jana Petrović, Jelena Sivoš, Gordana Malović, Dragana Marić: *Measurements and simulations of RF breakdown in gases – 7th International Conference on Advanced Plasma Technologies*, Plasmadis Ltd, Teslova ulica 30, 1000 Ljubljana, Slovenia, 24th February – 1st March 2019. Hue, Vietnam
ISBN 978-961-290-061-8
2. Z. Lj Petrović, A. Djordjević, J. Petrović, J. Sivoš, **M. Puač**, G. Malović, D. Marić: *RF breakdown as a swarm experiment – 82nd IUUVISTA Workshop*, Osaka University, Japan, 04.-07. Decembre 2017.
3. Z. Lj Petrović, S. Marjanović, **M. Puač**, S. Dujko, I. Simonović, D. Marić: *Transport theory as a foundation of nonequilibrium plasma models – 81st IUUVISTA Workshop on Response of Biological Materials to Plasma Treated Medium*, Rogla, Slovenia, 12th to 16th March 2017.
ISBN 978-961-285-628-1
4. Saša Dujko, Gordana Malović, Dragana Marić, Srdjan Marjanović, Zoran Lj Petrović, Marija Radmilović-Radjenović, **Marija Savić**, Ilija Adžić, Antonije Djordjević: *Avalanches of electrons and positrons in Atmospheres of Planets and Satellites of the Solar System: Basic Phenomenology and Application to Gas Breakdown in DC and RF Fields*, National Symposium on Plasma Science and Technology & International Conference on Plasma Science and Technology (PLASMA 2014), Mahatma Gandhi University, 8th to 11th December 2014.
5. Zoran Lj Petrović, Saša Dujko, Jasmina Mirić, Danko Bošnjaković, Ana Banković, Srdjan Marjanović, Dragana Marić, Jelena Sivoš, Nikola Škoro, **Marija Savić**, Olivera Šašić, Gordana Malović: *Cross Sections for Scattering of Electrons and Positrons in Modeling of Ionized Gases and Non-Equilibrium Plasmas*, International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences (IS-NPCS), Osaka University, 26th to 28th February 2014.
6. Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović, **Marija Savić**, Milovan Šuvakov: *Modelling of a breakdown phenomena in radio-frequency discharges in micro gaps*, 6th International Workshop on Microplasmas – 6th International Workshop on Microplasmas, CNRS and Universite Parys-Sud, Orsay, France, 3. - 6. Apr. 2011, pp. 33
7. Zoran Lj Petrović, Jelena Sivoš, **Marija Savić**, Nikola Škoro, Marija Radmilović-Radjenović, Dragana Marić: *New phenomenology in description of Townsend discharges and gas breakdown: from standard size to micro discharges – The 4th International Conference on Plasma Nanotechnology and Science (IC-PLANTS)*, Plasma Nanotechnology Research Center, Nagoya University, Gifu, Japan, 10. - 12. Mar, 2011, pp. I-07_1 - I-07_2.
8. D. Marić, **M. Savić**, S. Marjanović, N. Škoro, M. Šuvakov, M. Radmilović-Radjenović, G. Malović and Zoran Lj. Petrović: *Plasma breakdown: Experiments and simulation – 38th EPS Conference on Plasma Physics*, European Physical Society & Institute for Magnetic Fusion Research, 27. 06. - 01. 07. 2011. Strasbourg, France, pp. I4.316

Категорија M33:

1. **Marija Puač**, Dragana Marić, Zoran Lj Petrović: *Electron energy distribution functions in a radio-frequency argon discharge - Monte Carlo simulations* -29th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, University of Belgrade, Faculty of Physics, Serbia
Belgrade, Serbia, 22. Aug - 1. Sep, 2018, pp. 218-221.
ISSN 978-86-7306-146-7
2. **Marija Savić**, Dragana Marić, Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo simulation of radio-frequency breakdown in air and oxygen* – 28th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, University of Belgrade, Faculty of Physics, Serbia
Belgrade, Serbia, 29. Aug - 2. Sep, 2016, pp. 312-315.
ISSN 978-86-84539-14-6
3. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *Modeling of the radio frequency breakdown Paschen like curves by Monte Carlo technique* – 27th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG 2014), Institute of Physics, Belgrade, 26.-29. Aug. 2014. Serbia, pp. 411-414
ISSN 978-86-7762-600-6
4. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Dragana Marić, Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo simulation of radio-frequency breakdown in argon* – 20th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Orleans, France, 6.-11. Jul 2014, pp. 28511, sciencesconf.org:gd2014:28511
5. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *The influence of the surface effects on argon radio-frequency discharge characteristics* –3rd National Conference on Electronic, Atomic, Molecular and Photonic Physics, University of Belgrade, Faculty of Physics, Serbia, 25. - 25. Aug, 2013, pp. 25-28
ISBN 978-86-84539-10-8
6. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Branislav Radjenović: *Theoretical Predictions of the Microwave Breakdown Field* – 26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, University of Novi Sad, Zrenjanin, Serbia, 27. - 31. Aug, 2012, pp. 325-328
7. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Dragana Marić, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo simulations of RF breakdown* – 26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, University of Novi Sad, Zrenjanin, Serbia, 27. - 31. Aug, 2012, pp. 329-332
8. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *Modeling of breakdown behavior in radio-frequency argon discharges* – International Conference on Advanced Plasma, Slovenian Society for Vacuum Technique, Strunjan, Slovenia, 9. - 13. Sep, 2011, pp. 144-147
9. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *The breakdown voltage curves and spatial profiles of ionization rates in argon rf discharges* – 30th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Queen's University Belfast
Belfast, Northern Ireland, UK, 28. Aug - 2. Sep, 2011, pp. C9-149-1 – C9-149-3

10. Marija Radmilović-Radjenović, **Marija Savić**, Milovan Šuvakov, Branislav Radjenović, Stefan Matejček, M. Klas: *The breakdown voltage curves in argon dc and rf discharges from large to small gap sizes* – 18th Symposium on Application of Plasma Processes

Workshop on Plasmas as a Planetary Atmosphere Mimics, Comenius University in Bratislava; Society for Plasma Research and Applications, Vratna, Mala Fatra, Slovakia, 15. - 20. Jan, 2011, invited lecture, pp. 70-74.

11. Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović, **Marija Savić**, Aleksandar Bojarov: *Interakcija plazme sa površinama* – Naučni skup Physics 2010 BL, Prirodno-matematički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, 22. - 24. Sep, 2010.

ISSN: 978-99955-21-21-9

12. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović: *Uticaj sekundarne emisije elektrona na vrednost probnog napona kod pražnjenja u argonu* – Naučni skup Physics 2010 BL, Prirodno-matematički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, 22. - 24. Sep, 2010, str. 101-110.

ISSN: 978-99955-21-21-9

13. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović: *The effect of metastable atoms on the secondary electron production in argon* – 25th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Astronomical Observatory of Belgrade, Donji Milanovac, Serbia, 30. Aug - 3. Sep, 2010, No 89, pp. 269-272.

ISSN 0373-3742

Категорија M34:

1. **Marija Puač**, Antonije Djordjević, Zoran Lj Petrović: *The role of electron-electrode collisions and secondary electrons in radio-frequency breakdown* – 71st Annual Gaseous Electronics Conference, American Physical Society, Portland, Oregon, USA, 5 - 9. Nov. 2018, poster ID: GT1.00071.

http://www.apsgec.org/gec2018/all_GEC18.pdf

2. Zoran Petrović, Antonije Djordjević, Jana Petrović, Jelena Sivoš, **Marija Puač**, Gordana Malović, Dragana Marić: *RF Breakdown as a Swarm Experiment* – 82nd IUVESTA Workshop, Osaka University, Japan, Bankoku Shinryokan, Okinawa, Japan, 4. - 7. Dec, 2017, pp. O2

3. Zoran Lj Petrović, Srdjan Marjanović, **Marija Savić**, Saša Dujko, Ilija Simonović, Dragana Marić: *Transport theory as a foundation of nonequilibrium plasma models* – 81st IUVESTA Workshop on Response of Biological Materials to Plasma Treated Medium, 12-16. March 2017, Slovenia, pp. 22-23

4. **Marija Savić**, Dragana Marić, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo simulation of radio-frequency breakdown in oxygen and air* – 69th Annual Gaseous Electronics Conference, American Physical Society, Bochum, Germany, 10. - 14. Oct, 2016, poster ID: BAPS.2016.GEC.MW6.74.

<http://meetings.aps.org/link/BAPS.2016.GEC.MW6.74>

5. Saša Dujko, Gordana Malović, Dragana Marić, Srdjan Marjanović, Zoran Lj Petrović, Marija Radmilović-Radjenović, **Marija Savić**, Ilija Adžić, Antonije Djordjević: *Avalanches of electrons and positrons in Atmospheres of Planets and Satellites of the Solar System: Basic Phenomenology and Application to Gas Breakdown in DC and RF Fields* – National Symposium on Plasma Science and Technology & International Conference on Plasma Science and Technology (PLASMA 2014), Mahatma Gandhi University, 8-11. Dec.2014. India, pp. 18.

6. Zoran Lj Petrović, Saša Dujko, Jasmina Mirić, Danko Bošnjaković, Ana Banković, Srdjan Marjanović, Dragana Marić, Jelena Sivoš, Nikola Škoro, **Marija Savić**, Olivera Šašić, Gordana Malović: *Cross Sections for Scattering of Electrons and Positrons in Modeling of Ionized Gases and Non-Equilibrium Plasmas* – International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences (IS-NPCS), Osaka University, Icho Kaikan, Osaka, Japan, 26. - 28. Feb, 2014.
7. Zoran Lj Petrović, Jelena Sivoš, **Marija Savić**, Nikola Škoro, Marija Radmilović-Radjenović, Dragana Marić: *New Phenomenology of Gas Breakdown In DC And RF Fields* – 18th International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies (VEIT 2013) Sozopol, Bulgaria, 7. - 11. Oct, 2013, PP. 37-38.
8. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović: *The rf breakdown voltage curves-similarity law* – 66th Annual Gaseous Electronics Conference, American Physical Society, USA, 30. Sep - 4. Oct, 2013, pp. CT1.23
ISSN 0003-0503
9. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *First steps in obtaining Monte Carlo model of RF breakdown* – ESCAMPIG XXI, Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear from Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Universidade do Porto, Universidade do Minho and Universidade da Madeira Portugal, 10. - 14. Jul, 2012, pp. T6-296-1 – T6-296-2
10. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo simulations of breakdown in radio-frequency discharges* – 64th Annual Gaseous Electronics Conference, Bulletin of the American Physical Society, Salt Lake City, Utah, 14. - 18. Nov, 2011, pp. 36-36
11. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Milovan Šuvakov, Zoran Lj Petrović: *Monte Carlo simulation of RF discharges* – 2nd National Conference on Electronic, Atomic, Molecular and Photonic Physics, Institute of Physics, Belgrade, Serbia, 21. - 25. Jun, 2011, pp. 134-134
12. Branislav Radjenović, Marija Radmilović-Radjenović, **Marija Savić**: *Two-dimensional simulations of the microhollow cathode discharges in argon at atmospheric pressures* – VI International Workshop on Microplasmas, Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas CNRS& University of Paris-Sud, Orsay, France, 3. - 6. Apr, 2011, pp. 94-94
13. Z. Lj. Petrović, M. Radmilović-Radjenović, **M. Savić**, D. Marić, M. Šuvakov, N. Škoro and S. Dujko: *Basic phenomenology and experimental techniques for gas breakdown from DC to RF and from few cm to micrometers* – High Frequency Gas Breakdown Workshop Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France, 4. Oct. 2010 France, pp. 4
14. **Marija Savić**, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj Petrović: *Modeling of low pressure breakdown by Monte Carlo technique* – 20th European Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, European Physical Society, Novi Sad, Serbia, 13. - 17. Jul, 2010, pp P2.58

ISSN 2-914771-63-0

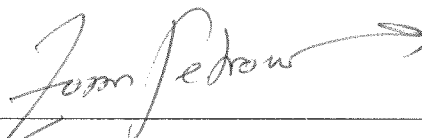
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Током истраживања и рада на дисертацији кандидаткиња је показала висок степен способности за самосталан научноистраживачки рад. Докторска дисертација садржи бројне оригиналне научне доприносе у виду нових модела резултата и закључака из области пробоја у гасовима у РФ електричним пољима, са акцентом на изградњи комплетног модела. Из тог разлога и добијени резултати имају велику примењивост. Наведени резултати објављени су у врхунским међународним часописима и приказани на угледним међународним конференцијама. Материјал добијен у оквиру рада на овој дисертацији биће основа за још неколико радова у водећим часописима.

На основу изложеног, Комисија сматра да су испуњени сви суштински и сви формални услови предвиђени Законом о високом образовању и правилницима Електротехничког факултета и Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Моделовање пробоја у гасовима Монте Карло техником“ кандидаткиње Марије Пуач прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 27. марта 2019. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



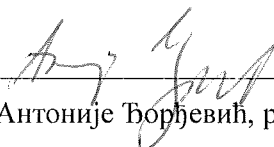
др Зоран Љ. Петровић, научни саветник

Универзитет у Београду – Институт за физику



др Јован Цветић, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Антоније Ђорђевић, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет