

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо 28. септембра 2022. године на XI седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одређени у Комисију за преглед и оцену докторске дисертације “Транспорт електрона, развој лавина и пропација стримера у јако електронегативним гасовима” Јасмине М. Атић, студенткиње докторских студија Физичког факултета, доносимо следећи

РЕФЕРАТ

1. Основни подаци о кандидату

1.1. Биографија

Јасмина М. Атић (рођена Мирић) је рођена 3. фебруара 1987. године у Призрену. Првих шест разреда основне школе је завршила у родном граду док је наставак основног и средње образовање завршила у Београду. Основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду је уписала школске 2005/2006. године на одсеку за Физичку електронику и смеру за Биомедицински и еколошки инжењеринг. Дипломирала је школске 2011/2012. године са просечном оценом 8.62 одбравивши завршни рад под називом “Употреба гипсаних плоча за заштиту од Рентгенског зрачења” под менторством проф. др Предрага Маринковић. Исте школске године је уписала мастер студије које је, на поменутом одсеку и смеру, завршила у року од годину дана са просечном оценом 10.0. Мастер рад под називом “Примена транспортних коефицијената ројева електрона у моделовању извора светлости” је урађен у Институту за физику у Београду под менторством др Саше Дујка. Докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду је уписала школске 2013/2014. године на смеру Физика јонизованих гасова, плазме и технологија плазме. Положила је све предмете предвиђене планом и програмом а марта 2017. године је одбранила тему докторске дисертације пред Колегијумом докторских студија.

1.2. Научна активност

Научна активност Јасмине М. Атић обухвата истраживања неравнотежних плазми и ројева електрона у гасовима. Кандидаткиња је од фебруара 2014. године запослена као истраживач приправник у Лабораторији за неравнотежне процесе и примену плазме Института за физику у Београду док је у звање истраживач сарадник изабрана априла 2017. године. Радила је на пројектима ОИ 171037 “Фундаментални процеси и примене транспорта честица у неравнотежним плазмама, траповима и наноструктурама” и ИИИ 41011 “Примена нискотемпературних плазми у биомедицини, заштити човекове околине и нанотехнологијама” Министарства науке, просвете и технолошког развоја Републике Србије. Има пет публикованих радова.

2. Опис предатог рада

2.1. Основни подаци

Докторска дисертације кандидаткиње је урађена под менторством др Саше Дујка, научног саветника Института за физику у Београду. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење израдом докторске дисертације јер је у научном звању и аутор је великог броја радова из области неравнотежних плазми и ројева наелектрисаних честица у гасовима који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним конференцијама. Ова докторска дисертација има 164 стране не укључујући насловну страну, податке о ментору и члановима комисије, захвалницу, резиме, садржај, списак литературе, биографију аутора и неопходне изјаве о ауторству. Дисертација садржи 108 слика од којих се 4 слике односе на скупове пресека преузете из литературе који су коришћени као улазни подаци, једна слика приказује промену средње концентрације озона у стратосфери а нацртана је на основу података агенције НАСА, на једној слици је приказана шема итеративног поступка модификације пресека техником ројева, на једној слици је приказана молекуларна структура гасова CF_3I , $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ и SF_6 преузета са интернет странице PubChem док преостала 101 слика представља резултате који су одређени у оквиру ове дисертације. У дисертацији се налази 6 табела у којима су: сумиране супстанце које су штетне према Анексима Монреалног протокола и према Кјото протоколу, приказане су карактеристике гасова и гасних смеша које се користе у високо-напонској и средње-напонској опреми за пренос електричне енергије, сумиране су последице које дисоцијативни продукти гасних диелектрика остављају на људе, животну средину и индустријску опрему док су у последњој табели упоређене физичке и хемијске особине гасова CF_3I , $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ и SF_6 . У дисертацији је наведено 280 референци.

2.2. Предмет и циљ рада

Прва целина ове докторске дисертације је посвећена проучавању сударних и транспортних процеса електрона у јако електронегативним гасовима. У питању је специфична група гасова чија је једна од доминантних карактеристика велика тежња за захват слободних електрона. Како се овим процесом смањује број слободних електрона док истовремено настају дугоживећи негативни јони, отежан је развој лавинског процеса чиме се смањује могућност за појаву електричног пробоја у овим гасовима када су изложени дејству електричног поља. Ова карактеристика јако електронегативних гасова чини их веома погодним за изолацију појединачних компоненти у системима за пренос електричне струје као што су гасне трансмисионе линије, трансформатори, гасне потстанице и разни типови прекидача.

Један од најчешће коришћених гасних диелектрика је сумпор-хексафлуорид (SF_6), гас који се одликује изванредним диелектричним карактеристикама укључујући високо критично електрично поље од 361 Td ($1 \text{ Td} = 10^{21} \text{ Vm}^{-2}$) и ниску тачку кључања од $-64.0 \text{ }^\circ\text{C}$. Међутим, како је потенцијал глобалног загревања овог гаса изузетно висок (22800 пута већи од угљендиоксида- CO_2) а његово атмосферско време живота јако дуго (3200 година), SF_6 гас је сврстан у групу супстанци које у значајној мери утичу на глобално загревање и повећање ефекта стаклене баште на нашој планети. Из ових разлога, потрага за адекватном заменом SF_6 гаса у системима за пренос електричне

енергије је једна од најактуелнијих тема за истраживање у оквиру физике гасних диелектрика и физике плазме.

И поред вишедеценијске употребе SF_6 гаса у високо-напонској технологији, полупроводничкој индустрији и другим гранама примењене физике и технологије, проучавања транспорта електрона у овом гасу у присуству спољашњег електричног поља носе са собом читав низ потешкоћа, како са становишта експерименталног тако и са становишта нумеричког испитивања. Мерење транспортних коефицијената у експериментима са ројевима електрона у овом јако електронегативном гасу је компликовано не само због чињенице да дисоцијацијом молекула настају неутрални радикали који се могу накнадно рекомбиновати и формирати веома отровна једињења, већ и због чињенице да због веома интензивног процеса захвата електрона, струјни сигнали који се индукују у систему електрода су веома слаби па су потребне софистициране експерименталне вештине и знања као и осетљива бројачка електроника за детекцију и обраду сигнала. Са друге стране, у нумеричком моделовању транспорта електрона у SF_6 гасу на основу Монте Карло метода, интензиван губитак електрона може довести до драматичног смањења поузданости излазних величина у овим симулацијама на основу којих се израчунавају транспортни коефицијенти електрона. У екстремним случајевима, симулација може бити у потпуности заустављена због губитка свих електрона у симулацији. Један од циљева ове докторске дисертације је развој нумеричких процедура за компензацију броја електрона услед губитака проузрокованих захватом електрона у Монте Карло симулацијама. Ове процедуре се свде на надокнађивање броја електрона, а посебна пажња у овој дисертацији је посвећена тзв. континуалној техници рескалирања. Тестирање, верификација и имплементација ових процедура у иницијалан Монте Карло компјутерски код је био један од циљева ове докторске дисертације у погледу развоја методологије истраживања.

Поред Монте Карло методе, у овој дисертацији је коришћена временски разложена теорија за решавање Болцманове једначине. Уместо апроксимације два члана, која се налази у основи стандардне теорије за решавање ове једначине, у овој докторској дисертацији је коришћена теорија заснована на развоју функције расподеле у више чланова користећи математичку машинерију засновану на алгебри иредуцибилних тензора. На основу ове технике за нумеричко решавање Болцманове једначине и Монте Карло кода са имплементираним техникама за рескалирање ројева, проучавана су ограничења у погледу прецизности апроксимације два члана. Ово је од посебне важности за проучавање транспорта електрона у јако електронегативним гасовима где узајамно дејство нееластичних судара, захвата електрона и јонизације контролише понашање роја. Због великог броја нееластичних судара, функција расподеле у брзинском простору постаје изразито анизотропна а са друге стране, због интензивног губитка електрона услед великих пресека за захват електрона долази до појаве бушења рупа у функцији расподеле. Овакво неравнотежно понашање функције расподеле захтева софистициран методолошки приступ за проучавање и у том смислу у овој дисертацији је примењено напредно нумеричко моделовање и савремена кинетичка теорија за решавање Болцманове једначине.

Ова докторска дисертација се може посматрати као оригиналан и аутентичан допринос напорима који се улажу за проналазак адекватне алтернативе за SF_6 гас који се користи за изолацију гасом у системима за пренос електричне струје. У докторској дисертацији је проучаван транспорт електрона у трифлуорометил-јодиду (CF_3I) чији је потенцијал

за изолацију гасом предмет интензивног истраживања последњих десетак година. На истој линији истраживања, у овој дисертацији је проучаван транспорт електрона у гасним диелектрицима последње генерације које одликују ултра ниски потенцијали за глобално загревање, укључујући 1,3,3,3 тетрафлуоропропан или HFO-1234ze ($C_3H_2F_4$), и 2,3,3,3 тетрафлуоро-2-(трифлуорометил)пропан-нитрил или C4-PFN (C_4F_7N). Један од врхунаца овог истраживања је формирање скупова пресека за расејање електрона у овим гасовима примењујући технику ројева електрона. Иако пресеци за индивидуалне сударне процесе у појединим случајевима нису добијени на основу експерименталних мерења или у теоријским прорачунима већ су добијени у индиректној итеративној процедури каква је метода ројева електрона, резултујући ефективни скупови пресека се могу директно користити као улазни подаци у кинетичким моделима неравнотежне плазме јер обезбеђују добар баланс броја наелектрисаних честица, импулса и енергије у овим моделима. Развој пресека за расејање електрона у овим гасовима је омогућио проучавање кинетичких феномена у транспорту електрона који су индуковани имплицитним и експлицитним ефектима захвата електрона. У ове феномене спадају дуална природа транспортних коефицијената, грејање и хлађење роја услед неуниформног уклањања електрона из роја, опадање средње енергије са порастом електричног поља и присуство негативне диференцијалне проводности искључиво у балк брзини дрифта. Сви ови кинетички феномени су предмет истраживања ове дисертације. Тумачење и анализа ових феномена представљају оригиналне доприносе ове дисертације у оквиру фундаменталне транспортне теорије наелектрисаних честица у гасовима.

Диелектричне особине гасова које су разматране у овој дисертацији су проучаване на основу прорачуна транспортних коефицијената ројева електрона, критичних поља, брзина транзиције лавина електрона у стримере, концентрације електрона и расподеле електричног поља у стримерском пражњењу и коначно разматрајући њихове физичке и хемијске особине. Потенцијал ових гасова да се у виду гасних смеша са другим индустријски релевантним гасовима користе за изолацију је такође био предмет истраживања ове дисертације и у том смислу су предложена иновативна решења. Као пример, показано је да иако се $C_3H_2F_4$ одликује скоро двоструко нижим критичним електричним пољем у односу на SF_6 , у смеси ова два гаса долази до појаве ефекта *позитивне синергије* који обезбеђује пораст критичног поља гасне смеси при смањењу концентрације SF_6 гаса. У односу на чист SF_6 гас, овај ефекат са једне стране омогућава постизање бољих диелектричних перформанси гасне смеси, а са друге стране употреба ове гасне смеси у уређајима за пренос електричне струје има супериорније еколошке карактеристике, јер доводи до мањег глобалног загревања планете. За нови гасни диелектрик C_4F_7N је установљено да поседује 2.5 пута веће критично електрично поље у односу на SF_6 гас. На овај начин је показано да гасне смеси које поседују приближно 20% овог гаса и неког другог гаса као што су аргон (Ar), азот (N_2) или угљендиоксид (CO_2), имају диелектричне особине као чист SF_6 гас. Дизајнирање гасних смеша које се могу користити у системима за пренос електричне струје за изолацију гасом користећи технику ројева електрона и разумевајући сударне и транспортне процесе електрона у неутралним гасовима је био један од кључних предмета истраживања ове докторске дисертације.

Још један од циљева ове докторске дисертације је разумевање процеса транзиције лавине електрона у стример и пропација стримера у јако електронегативним гасовима. Да би се појава стримерског пробоја разумела, ограничила и контролисала, један од предмета истраживања је био развој стримера у електронегативним гасовима и њиховим смешама са другим индустријски релевантним гасовима. Основни

методолошки приступ у овом истраживању су флуидни модели различите комплексности у погледу имплементације физике микроскопских процеса расејања и транспорта наелектрисаних честица. Ове флуидне једначине су заправо парцијалне диференцијалне једначине које описују баланс концентрације наелектрисаних честица, импулса и енергије. Флуидне једначине су затворене примењујући апроксимацију локалног поља и спрегнуте са Пуасономом једначином да би се обезбедио самоусаглашени опис електричног поља. На основу детаљног испитивања у границама које намећу флуидни модели у 1.5 димензији (1.5D), проучавана је пропација стримера у функцији спољашњег електричног поља, природе транспортних коефицијената који се користе као улазни подаци, врсте флуидног модела и геометрије која је разматрана. Опажен је читав спектар занимљивих феномена који су интересантни са становишта фундаменталне транспортне теорије наелектрисаних честица и физике плазме, а са друге стране имају важне импликације за конкретне апликације у високо-напонској технологији за изолацију гасом.

Друга целина докторске дисертације се односи на проучавања сударних и транспортних особина електрона у парама живе и индијума. Истраживања сударних и транспортних особина електрона, лавинског процеса електрона и настанка стримерских пражњења у металним парама су од кључног значаја за развој извора светлости који функционишу на принципима електричних гасних пражњења. Један од предмета истраживања у овом делу дисертације је разматрање сударних и транспортних процеса електрона у парама живе, а посебна пажња је посвећена проучавању нехидродинамичког понашања транспортних коефицијената које се огледа у њиховој зависности од притиска и температуре паре. Пошто се као кандидати за замену токсичне живе издвајају једињења индијума у изворима светлости који функционишу како на ниском тако и на високом притиску, још један од циљева у овом делу дисертације је био развој скупа пресека за расејање електрона у парама овог метала. Поред скупа пресека који се односи на атоме индијума у основном стању, предмет истраживања је био и скуп пресека којим се описују судари електрона са гасовитим индијумом у првом побуђеном метастабилном стању имајући у виду велику концентрацију побуђених атома индијума на температурама и притисцима које одговарају оперативним условима електричних пражњења у изворима светлости. Проучаван је транспорт електрона у парама индијума у функцији електричног поља и температуре гаса. Израчунати транспортни коефицијенти су коришћени не само за размивање кинетике електрона у парама индијума, већ и као улазни подаци за решавање флуидних једначина којима су моделовани транзиција лавина електрона у негативан стример и пропација стримера у функцији електричног поља и температуре гаса.

2.3. Публикације

Резултати из ове докторске дисертације су представљени у пет радова од којих је први објављен у часопису M21a категорије, други у часопису M23 категорије док су преостала три у часописима M21 категорије.

[1] **J. Mirić, D. Bošnjaković, I. Simonović, Z. Lj. Petrović, S. Dujko**
“*Electron swarm properties under the influence of a very strong attachment in SF₆ and CF₃I obtained by Monte Carlo rescaling procedures*”
Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 065010 (2016)

[2] **J. Mirić, I. Simonović, Z.Lj. Petrović, R.D. White, S. Dujko,**

“Electron transport in mercury vapor: cross sections, pressure and temperature dependence of transport coefficients and NDC effects”
Eur. Phys. J. D **71**, 289 (2017)

[3] K.R. Hamilton, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M. S. Rabasović, D. Šević, B. P. Marinković, S. Dujko, **J. Atić**, D.V. Fursa, I. Bray, R.P. McEachran, F. Blanco, G. Garcia, P.W. Stokes, R.D. White, M.J. Brunger
“Electron-impact excitation of the $(5s^25p)^2P_{1/2} \rightarrow (5s^26s)^2S_{1/2}$ transition in indium: Theory and experiment”
Phys. Rev. A **102**, 022801 (2020)

[4] K.R. Hamilton, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M. S. Rabasović, D. Šević, B. P. Marinković, S. Dujko, **J. Atić**, D.V. Fursa, I. Bray, R.P. McEachran, F. Blanco, G. Garcia, P.W. Stokes, R.D. White, D.B. Jones, L. Campbell, M.J. Brunger
“Recommended Cross Sections for Electron-Indium Scattering”
J. Phys. Chem. Ref. Data **50**, 013101 (2021)

[5] S. Dujko, **J. Atić**, D. Bošnjaković, R. D. White, P. Stokes, K. R. Hamilton, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M. S. Rabasović, D. Šević, B. P. Marinković, D. V. Fursa, I. Bray, R. P. McEachran, F. Blanco, G. García, D. B. Jones, L. Campbell, M. J. Brunger,
“Transport of electrons and propagation of the negative ionisation fronts in indium vapour”
Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 115019 (2021)

2.4. Преглед дисертације и научних резултата изложених у дисертацији

2.4.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација садржи девет поглавља поред којих постоје увод и закључак. У прва два поглавља су дискутовани мотивациони фактори за истраживање и теоријске основе физике ројева наелектрисаних честица у гасовима. У наредна четири поглавља су приказани резултати истраживања сударних и транспортних процеса ројева електрона у јако електронегативним гасовима који су већ нашли примену у високо-напонској технологији, али и у гасовима који припадају последњој генерацији диелектрика са ултра ниским потенцијалом за глобално загревање и за које се очекује да ће имати важну улогу у будућим технологијама. У наредном поглављу су приказани резултати испитивања развоја и пропагације стримера у јако електронегативним гасовима и њиховим смешама са N_2 и CO_2 . У поглављу које следи, међусобно су упоређене физичке и хемијске особине гасова који су разматрани у дисертацији, а значајна пажња у истом поглављу је посвећена еколошким индикаторима који су повезани са употребом ових гасова у високо-напонској технологији. Последње поглавље дисертације је посвећено проучавању сударних и транспортних особина електрона, као и развоју и пропагацији стримера у парама живе и парама индијума.

У уводу докторске дисертације је изложена мотивација за испитивање транспорта електрона у јако електронегативним гасовима и металним парама. Идентификовани су актуелни проблеми, неконзистентности и пропусти у погледу методолошког приступа за истраживање у претходним радовима, али исто тако је уочен недостатак релевантних података за сударне и транспортне особине електрона у јако електронегативним гасовима на који се наилази прегледом до сада објављиване литературе. У уводу су

идентификовани правци истраживања у оквиру ове докторске дисертације са циљем превазилажења уочених недостатака, а на крају уводног дела дисертације је дат кратак преглед свих наредних поглавља.

У првом поглављу дисертације је дискутован процес електричног пробоја у гасовима са посебним акцентом на стримерски механизам. Значајна пажња је посвећена начинима за контролу и превенцију овог процеса са циљем спречавања оштећења индустријске опреме у којој се јако електронегативни гасови користе за изолацију. У кратким цртама је описан историјски развој диелектрика и приказан је преглед карактеристика које гасови требају да задовоље како би били размотрени као потенцијална алтернатива SF₆ гасу који и даље представља најважнији гасни диелектрик у системима за пренос електричне енергије упркос негативном утицају који има на атмосферу наше планете. Описане су физичке и хемијске особине гасних диелектрика последње генерације које одликује ултра ниски потенцијал за глобално загревање.

У другом поглављу дисертације су приказани основни елементи транспортне теорије ројева наелектрисаних честица у неутралним гасовима. Дата је дефиниција хидродинамичког режима и дефинисани су флуks и балк транспортни коефицијенти. У наставку поглавља је дискутована хидродинамичка кинетичка теорија и математички апарат за нумеричко решавање Болцманове једначине. Након овога су приказани основни кораци нумеричких симулација базираних на Монте Карло методи са посебним акцентом на дуалну природу транспортних коефицијената имајући у виду не само квантитативне већ и квалитативне разлике између флуks и балк транспортних коефицијената за електроне у јако електронегативним гасовима.

У трећем поглављу дисертације су приказани резултати нумеричког моделовања транспорта електрона у CF₃I гасу. Конструисан је комплетан и самоусаглашен скуп пресека за расејање електрона у овом гасу примењујући технику ројева. Транспортни коефицијенти ројева електрона су израчунати не само у чистом CF₃I гасу већ и у његовим смешама са Ar и CO₂. Транспортни коефицијенти су израчунати у Монте Карло симулацијама и јавно доступним кодом BOLSIG+ за решавање Болцманове једначине у апроксимацији два члана. У овом поглављу су проучавана ограничења апроксимације два члана у погледу прецизности прорачуна транспортних коефицијената за електроне у CF₃I гасу и његовим смешама са Ar и CO₂.

У четвртном поглављу дисертације су представљене технике за рескалирања електрона у Монте Карло симулацијама са посебним акцентом на технику континуалног рескалирања. Након имплементације ове технике у иницијалан Монте Карло код, по први пут су израчунати транспортни коефицијенти електрона у CF₃I и SF₆ гасовима у широком опсегу редукованог електричног поља, а посебна пажња је посвећена ситуацијама у којима захват електрона контролише понашање роја. На крају поглавља су дискутовани кинетички феномени у профилима транспортних коефицијената електрона чије тумачење није могуће на основу индивидуалних трајекторија електрона већ захтева пун кинетичку третман. Опадање средње енергије са порастом редукованог електричног поља и негативна диференцијална проводност која се манифестује искључиво у профилима балк брзине дрифта су феномени којима је посвећена највећа пажња.

У петом поглављу су приказани резултати испитивања сударних и транспортних особина електрона у C₃H₂F₄ гасу, првом од два диелектрика најновије генерације

проучаваним у овој дисертацији. Конструисан је скуп пресека за расејање електрона у овом гасу на основу кога су, путем Монте Карло симулација и решавањем Болцманове једначине, израчунати транспортни коефицијенти електрона у функцији спољашњег редукованог електричног поља у чистом гасу и његовим смешама са Ar, N₂, CO₂ и SF₆. Поред овог скупа пресека, конструисана је и његова варијанта која добро описује нехидродинамичко понашање брзинског коефицијента ефективне јонизације које је уочено у импулсном Таунзендовом експерименту групе са ЕТХ Универзитета у Цириху у Швајцарској. Као један од најзначајнијих уочених феномена у овој дисертацији, описан је ефекат *позитивне синергије* у смеси C₃H₂F₄ и SF₆ гасова који се огледа у порасту вредности критичног електричног поља смеше са смањењем концентрације SF₆. На крају овог поглавља је истакнуто да иако се C₃H₂F₄ одликује приближно двоструко нижим критичним пољем у односу на SF₆, управо се због појаве ефеката позитивне синергије ова гасна смеша може посматрати као један од кандидата за замену SF₆ гаса у системима за пренос електричне енергије.

У шестом поглављу дисертације су приказани резултати испитивања транспортних коефицијената електрона у C₄F₇N, другом испитиваном диелектрику најновије генерације који се одликује ултра ниским потенцијалом за глобално загревање. По први пут је конструисан скуп пресека за расејање електрона у овом гасу. Након тога су израчунати транспортни коефицијенти електрона у функцији редукованог електричног поља у чистом гасу и његовим смешама са Ar, N₂, CO₂ и SF₆ у опсегу поља у коме постоје резултати експерименталног истраживања. Истакнуто је да не само да је критично електрично поље овог гаса приближно 2.5 пута веће од критичног поља којим се одликује SF₆ него и да се при приближно 20% овог новог диелектрика у смеси, без обзира на природу друге компоненте смеше, достиже критично поље SF₆ гаса.

У седмом поглављу дисертације, приказани су резултати симулиција развоја и пропагације стримера у гасовима и гасним смешама анализираним у претходним поглављима. Приказани резултати флуидног моделовања се односе на CF₃I гас док се зависност резултата ових моделовања у функцији различитих улазних параметара симулација на генерички начин појављуја и код преосталих гасова. Дискутована је зависност процеса развоја и пропагације стримера од јачине спољашњег електричног поља, методе за израчунавање транспортних коефицијената електрона, дуалне природе транспортних коефицијената, састава гасне смеше, врсте флуидног модела и његове геометрије. У овом поглављу су тестирани резултати аналитичких теорија за пропагацију јонизационих планарних фронтова у неутралним гасовима. Уочено је да се аналитички изрази за брзину пропагације стримера нису у сагласности са брзинама пропагације које су добијене у флуидним симулацијама што је објашњено чињеницом да математичке теорије за опис пропагације стримера не узимају у обзир ефекте дифузије електрона и експлицитну и имплицитну модификацију транспорта електрона које су индуковане захватом електрона.

У осмом поглављу дисертације су међусобно упоређени резултати флуидног моделовања развоја и пропагације стримера у гасовима SF₆, CF₃I, C₃H₂F₄, и C₄F₇N. Поред овога, међусобно су упоређене структурне, физичке, хемијске, диелектричне и еколошке карактеристике ових гасова. На крају поглавља је закључено да C₄F₇N гас показује најбоље диелектричне особине уколико је критеријум што већа резистентност у погледу развоја стримера док се гас C₃H₂F₄ издваја као најпогоднији диелектрик уколико је мерило квалитета што краћи домет простирања стримера у гасу.

У деветом поглављу дисертације су приказани резултати истраживања транспорта електрона и развоја и пропагације негативних стримера у парама живе и индијума. Конструисан је скуп пресека за расејање електрона у парама живе у који је укључен ефективан пресек који описује ротационе и вибрационе сударне процесе електрона са димерима живе. Транспорт електрона у смеси мономера и димера живе је испитиван у функцији притиска и температуре гаса. Са порастом притиска, опажен је ефекат негативне диференцијалне проводности у профилу брзине дрифта електрона као последица пораста концентрације димера живе. У оквиру овог поглавља је по први пут представљен скуп пресека за расејање електрона у парама индијума који је конструисан за потребе ове докторске дисертације. Пресеци за еластичне и нееластичне сударе, укључујући и пресек за јонизацију, су добијени у теоријским прорачунима базираним на различитим варијантама Р-матричног метода. Поред скупа пресека који се односи на основно стање индијума, конструисан је и посебан скуп пресека којим се описује расејање електрона на атомима индијума који се налазе у првом побуђеном метастабилном стању $(5s^25p)^2P_{3/2}$. У оба скупа пресека су укључени пресеци за опис супереластичних сударних процеса електрона са атомима индијума који су израчунати према принципу детаљног баланса. Скупови пресека су искоришћени за израчунавање транспортних коефицијената електрона у парама индијума у функцији редукованог електричног поља и температуре гаса. Транспортни коефицијенти су затим искоришћени као улазни подаци у флуидним моделима стримерског пражњења у парама овог метала. Брзина фронта стримера је израчуната на основу резултата моделовања у 1Д геометрији као и на основу израза који је добијен на основу математичке теорије за пропагацију негативних планарних јонизационих фронтова у неутралном гасу.

У закључку докторске дисертације су, у кратким цртама, још једном изнети мотивациони фактори за проучавање транспорта електрона и развоја и пропагације стримера у јако електронегативним гасовима и металним парама. Затим је у кратким цртама описано стање ових истраживања у литератури и дат је преглед појединачних поглавља ове дисертације. Након тога су детаљно приказани оригинални научни доприноси ове докторске дисертације, указано је на њихов значај и потенцијалне примене у примењеној физици и технологији. На самом крају закључка су дискутовани могући правци будућих истраживања на основу резултата који су постигнути у овој дисертацији.

2.4.2. Научни резултати изложени у дисертацији

Примењујући технику ројева наелектрисаних честица, у овој докторској дисертацији је развијен комплетан и самоусаглашен скуп пресека за расејање електрона у CF_3I гасу. Коначан скуп пресека добро репродукује транспортне коефицијенте измерене у импулсном Таунзендовом експерименту не само у чистом гасу већ и у његовим смешама са N_2 и CO_2 . Да би овај резултат био постигнут, било је неопходно додатно модификовати пресеке за расејање електрона у CO_2 користећи технику ројева. Модификовани индивидуални пресеци имају вредности које се налазе унутар експерименталне грешке метода којима су инцијално одређени. Са друге стране, пресеци који су измерени са малом експерименталном грешком, као што је пресек за електронску сударну јонизацију, нису модификовани. Добро слагање експерименталних вредности и резултата моделовања за јонизациони коефицијент је постигнуто модификацијом пресека за електронску ексцитацију имајући у виду

значајну несигурност експерименталног мерења ових пресека и велику осетљивост коефицијента јонизације на пресеке за електронску ексцитацију. Као крајњи резултат, добијен је скуп пресека за расејање електрона у CF_3I гасу који обезбеђује добар баланс броја наелектрисаних честица, импулса и енергије у флуидним моделима стримерских пражњења.

Један од важних научних доприноса ове докторске дисертације је развој, имплементација и верификација технике континуалног рескалирања електрона у Монте Карло симулацијама транспорта електрона у јако електронегативним гасовима. У основи ове методе је динамичко подешавање колизионе фреквенце за фиктиван процес електронске сударне јонизације на основу брзинског коефицијента за захват електрона у сваком тренутку симулације. Ова метода не мења функцију расподеле током њене просторно-временске еволуције и омогућава проучавање имплицитних и експлицитних ефеката захвата електрона на транспортне особине електрона у јако електронегативним гасовима.

Применом техника дискретног и континуалног рескалирања електрона у Монте Карло симулацијама, по први пут су израчунати транспортни коефицијенти електрона у јако електронегативним гасовима CF_3I и SF_6 у широком опсегу редукованих електричних поља. По први пут су уочени кинетички феномени у опсегу поља у коме захват електрона доминантно контролише понашање роја: (1) опадања средње енергије електрона у SF_6 гасу са порастом редукованог електричног поља између приближно 10 Td и 60 Td и (2) негативна диференцијална проводност у профилима балк брзине дрифта у оба гаса али без знакова истог феномена у профилима флукс брзине дрифта. Ови кинетички феномени су интерпретирани на основу просторно-разложених карактеристика ројева електрона, укључујући просторно-разложену локалну средњу енергију и брзински коефицијент за захват електрона, као и функцију расподеле.

У овој докторској дисертацији је први пут конструисан комплетан и самоусаглашен скуп пресека за расејање електрона у 1,3,3,3 тетрафлуоропропану ($\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$), једном од гасова последње генерације диелектрика са ултра ниским потенцијалом за глобално загревање. На основу сличности у погледу молекуларне структуре, физичких и хемијских особина, као иницијалан скуп пресека су коришћени пресеци за расејање електрона у октафлуоропропану (C_3F_8) и 1,1,3,3,3 пентафлуоропропену (C_3HF_5). Примењујући технику ројева наелектрисаних честица, развијен је скуп пресека за расејање електрона у $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$ који добро репродукује транспортне коефицијенте измерене у импулсном Таунзендовом експерименту, како у чистом гасу, тако и у његовим смешама са Ar и N_2 . Поред основне верзије скупа пресека, конструисана је и варијанта која јако добро репродукује експериментално опажено нехидродинамичко понашање брзинског коефицијента ефективне јонизације са променом притиска које је уочено у другом скупу референтних мерења. У смешама гасова $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$ и SF_6 је уочен ефекат позитивне синергије према коме долази до пораста критичног поља гасне смеше смањујући концентрацију SF_6 гаса. Иако се $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$ одликује више него двоструко мањим критичним пољем од SF_6 , ефекат позитивне синергије отвара перспективе за будућа истраживања транспорта електрона у смешама гасова $\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_4$ и SF_6 , имајући у виду потенцијалне примене пре свега у домену високо-напонске технологије и индустрије за пренос електричне енергије. Ово је један од најзначајнијих резултата ове докторске дисертације.

У докторској дисертацији је по први пут конструисан комплетан и самоусаглашен скуп пресека за расејање електрона у 2,3,3,3 тетрафлуоро-2-(трифлуорометил)пропан-нитрилу (C_4F_7N), другом испитиваном гасу из групе најновијих гасних диелектрика са ултра ниским потенцијалом за глобално загревање. И у овом случају је примењена техника ројева: иницијални скуп пресека је модификован све док није постигнуто добро слагање са експериментално одређеним транспортним коефицијентима у импулсном Таунзендовом експерименту, како у чистом гасу тако и у његовим смешама са Ar и N_2 . Опажено је да овај гас има изузетно високо критично поље од 970 Td што отвара перспективе да се у гасним смешама са CO_2 , N_2 и SF_6 користи као гасни диелектрик у високо-напонској технологији. Иако је опажен већи број кинетичких феномена у овом гасу и његовим смешама са поменутих гасовима, за потребе овог извештаја навешћемо један резултат који је од потенцијалног значаја за примене. Опажено је да без обзира на састав гасне смеше, 20% C_4F_7N и једног од горе поменутих гасова даје критично поље које приближно одговара чистом SF_6 гасу. На овај начин, примењујући методологију ројева електрона у неутралним гасовима, пронађене су гасне смеше индустријских гасова које могу заменити SF_6 гас у системима за пренос електричне енергије.

Подаци о сударним и транспортним особинама електрона у испитиваним гасовима и гасним смешама су допуњени резултатима флуидног моделовања развоја и пропагације стримера. Потврђена је интуитивно очекивана чињеница да порастом спољашњег електричног поља долази до брже транзиције лавине електрона у негативан стример. Имајући у виду да транспортни коефицијенти добијени на основу апроксимације два члана за решавање Болцманове једначине имају систематски мање вредности од оних који су добијени на основу Монте Карло симулација, опажена је значајна осетљивост особина стримерске плазме на начин израчунавања транспортних коефицијената. Ово је добро илустровано за CF_3I гас. Такође, потврђена је и чињеница да резултати флуидних модела у 1Д и 1.5Д аранжманима дају различите резултате за концентрацију електрона и вредности електричног поља у стримерском каналу имајући у виду различит начин прорачуна електричног поља у овим геометријама. Уочена је велика сличност између резултата класичног флуидног модела са балк транспортним коефицијентима и резултата коригованог модела имајући у виду да су ова два модела суштински идентична у хомогеном електричном пољу. Сличност ова два модела се огледа у погледу доброг слагања брзине стримера и њиховог домета простирања. Са друге стране, уочено је да се концентрације електрона добијене у класичном и коригованом флуидном моделу добро међусобно слажу у унутрашњости стримера где је, због ефеката просторног наелектривања, спољашње електрично поље у значајној мери заклоњено.

У овој докторској дисертацији је формирана изузетно обимна база података која садржи пресеке за расејање и транспортне коефицијенте електрона као и резултате моделовања стримерских пражњења у јако електронегативним гасовима. Овако формирана база података као и додатне информације које се односе на молекуларну структуру, физичке и хемијске особине разматраних гасова као и еколошки релевантни подаци, омогућују критичку анализу у процесу идентификације алтернатива SF_6 гаса у системима за пренос електричне енергије.

У овој докторској дисертацији је конструисан комплетан и самоусаглашен скуп пресека за расејање електрона у парама живе. Опажено је нехидродинамичко понашање транспортних коефицијената које се огледа у њиховој зависности од температуре и притиска паре живе. Порастом притиска и/или температуре паре живе расте

концентрација димера чије присуство у значајној мери модификује транспорт електрона у областима нижих вредности редукованог електричног поља. Опажен је феномен негативне диференцијалне проводности у профилу брзине дрефта електрона као директна последица присуства димера живе у парама овог метала. Присуство димера је моделовано укључивањем ефективног пресека за нееластичне процесе који зависи од концентрације димера живе, а са друге стране, као што смо већ истакли, концентрација димера зависи од температуре и притиска паре живе. Постигнуто је одлично слагање између експерименталних резултата и резултата приказаних у овој дисертацији који су добијени на основу нумеричких решења Болцманове једначине и у Монте Карло симулацијама. Ова слагање недвосмислено потврђује коректност методолошког приступа за проучавање и нумерички интегритет комјутерских кодова који су коришћени.

Коначно, у овој дисертацији су проучавани сударни и транспортни процеси електрона у парама индијума. У сарадњи са колегама из земље и иностранства, формиран је комплетан скуп пресека за расејање електрона у парама индијума. Пресеци за еластичне и нееластичне сударе су израчунати на основу различитих варијанти Р-матричног метода. Пресеци су развијени како за атоме у основном стању тако и за атоме који се налазе у првом побуђеном метастабилном стању $(5s^25p)^2P_{3/2}$. Проучаван је транспорт електрона у зависности од температуре паре индијума, а за правилан опис утицаја температуре гаса на кинетику електрона су израчунати пресеци за супереластичне сударе на основу принципа детаљног баланса. Опажен је феномен негативне диференцијалне проводности и идентификовани су три основна режима у транспорту електрона у зависности од температуре паре индијума: (1) режим у коме су електрони и гасни атоми индијума у термодинамичкој равнотежи, (2) режим у коме функција расподеле електрона одступа од равнотежне Максвелове, али транспортни коефицијенти и даље зависе од температуре гаса, и (3) режим у коме температура гаса не утиче на транспортне коефицијенте, а њихово понашање контролише искључиво електрично поље. Израчунати флуks и балк транспортни коефицијенти су употребљени као улазни подаци флуидних модела стримерских пражњења. На основу класичног флуидног модела у 1Д и 1.5Д геометријама, проучавана је транзиција лавине електрона у негативни стример и пропација стримера у функцији спољашњег електричног поља и температуре паре индијума. Опажена је бржа транзиција лавине електрона у стример са порастом температуре паре индијума, односно са порастом концентрације атома који се налазе у првом побуђеном метастабилном стању. Уочено је да особине стримера, укључујући брзину пропације, појачање поља на фронту и ниво јонизације у унутрашњости стримера, јако зависе од температуре паре индијума наручито у области мањих електричних поља где постоје велике разлике између коефицијената јонизације на разним температурама паре индијума. Стримери који су моделовани са балк транспортним коефицијентима пропацирају брже у односе на оне са флуks транспортним коефицијентима, што је још један од показатеља значаја коректне имплементације сударних и транспортних особина у моделовању плазме.

3. Списак публикација

Радови у међународном часопису изузетних вредности (категорија M21a)

[1] J. Mirić, D. Bošnjaković, I. Simonović, Z. Lj. Petrović, S. Dujko

Electron swarm properties under the influence of a very strong attachment in SF₆ and CF₃I obtained by Monte Carlo rescaling procedures
Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 065010 (2016)

Радови у врхунском међународном часопису (категорија M21)

[1] K.R. Hamilton, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M.S. Rabasović, D. Šević, B.P. Marinković, S. Dujko, **J. Atić**, D.V. Fursa, I. Bray, R.P. McEachran, F. Blanco, G. Garsia, P.W. Stokes, R.D. White, M.J. Brunger,
Electron-impact excitation of the $(5s^25p)^2P_{1/2} \rightarrow (5s^26s)^2S_{1/2}$ transition in indium: Theory and experiment,
Phys. Rev. A **102**, 022801 (2020)

[2] K.R. Hamilton, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M.S. Rabasović, D. Šević, B.P. Marinković, S. Dujko, **J. Atić**, D.V. Fursa, I. Bray, R.P. McEachran, F. Blanco, G. Garcia, P.W. Stokes, R.D. White, D.B. Jones, L. Campbell, M.J. Brunger,
Recommended Cross Sections for Electron-Indium Scattering
J. Phys. Chem. Ref. Data **50**, 013101 (2021)

[3] S. Dujko, **J. Atić**, D. Bošnjaković, R. D. White, P. Stokes, K. R. Hamilton, O. Zatsarinny, K. Bartschat, M.S. Rabasović, D.Šević, B.P. Marinković, D. V. Fursa, I. Bray, R. P. McEachran, F. Blanco, G. García, D. B. Jones, L. Campbell, M. J. Brunger,
Transport of electrons and propagation of the negative ionisation fronts in indium vapour,
Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 115019 (2021)

Радови у међународном часопису (категорија M23)

[1] **J. Mirić**, I. Simonović, Z.Lj. Petrović, R.D. White, S. Dujko,
Electron transport in mercury vapor: cross sections, pressure and temperature dependence of transport coefficients and NDC effects,
Eur. Phys. J. D **71**, 289 (2017)

Предавање по позиву са међународног скупа штампано у целини (M31)

[1] S. Dujko, D. Bošnjaković, **J. Mirić**, I. Simonović, Z.M. Raspopović, R. D. White, A. H. Markosyan, U. Ebert, Z.Lj. Petrović,
9th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing and EU COST MP1101 Workshop on Atmospheric Plasma Processes and Sources (JSPP2014),
Recent results from studies of non-equilibrium electron transport in modeling of low-temperature plasmas and particle detectors
Bohinjska Bistrica, Slovenia, 19-23.01.2014.

Предавање по позиву са међународног скупа штампано у изводу (M32)

[1] Z.Lj. Petrović, S. Dujko, D. Marić, D. Bošnjaković, S. Marjanović, **J. Mirić**, O. Šašić, S. Dupljanin, I. Simonović, R. D. White,

XIX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms & XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2015), *Swarms as an exact representation of weakly ionized gases*
Lisboa, Portugal, 17-20.07.2015.

[2] S. Dujko, Z.Lj. Petrović, R. D. White, G. Boyle, A. Banković, I. Simonović, D. Bošnjaković, **J. Mirić**, A. H. Markosyan, S. Marjanović,
XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2015),
Transport processes for electrons and positrons in gases and soft-condensed matter: Basic phenomenology and applications
Toledo, Spain, 22-28.07.2015.

[3] Z.Lj. Petrović, D. Marić, S. Dujko, G. Malović, **J. Atić**, I. Simonović, O. Šašić,
QUANTEMOLQ-2018 Workshop Electron Scattering Cross Sections for Plasma Physics and Chemistry with Quantemol-N,
Using Quantemol to make more complete initial sets for swarm data normalization of cross sections
University College London, London, United Kingdom, 14.9.2018.

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

[1] **J. Mirić**, S. Dujko, Z.Lj. Petrović,
9th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing and EU COST MP1101 Workshop on Atmospheric Plasma Processes and Sources (JSPP2014),
Scattering Cross Sections and Transport Data for Electrons in CF₃I
Bohinjska Bistrica, Slovenia, 19-23.01.2014.

[2] **J. Mirić**, Z.Lj. Petrović, R. D. White, S. Dujko,
Proc. 27th Symposium on Physics of Ionized Gases, Contributed Papers and Abstracts of Invited Lectures, Topical Invited Lectures and Progress Reports (SPIG2014),
Electron Transport in Noble-Gas Metal-Vapor Mixtures
Belgrade, Serbia, 26-29.08.2014.

[3] **J. Mirić**, O. Šašić, S. Dujko, Z.Lj. Petrović,
Proc. 27th Symposium on Physics of Ionized Gases, Contributed Papers and Abstracts of Invited Lectures, Topical Invited Lectures and Progress Reports (SPIG2014),
Scattering Cross Sections and Transport Coefficients for Electrons in CF₃I
Belgrade, Serbia, 26-29.08.2014.

[4] **J. Mirić**, I. Simonović, D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, S. Dujko,
Proc. 28th Summer School and International Symposium on Physics of Ionized Gases (SPIG2016),
Electron transport in mercury vapor: dimer induced NDC and analysis of transport phenomena in electric and magnetic fields
Belgrade, Serbia, 28.08.-02.09.2016.

- [5] **J. Mirić**, D. Bošnjaković, I. Simonović, Z.Lj. Petrović, S. Dujko,
Proc. 28th Sumer School and International Symposium on Physics of Ionized Gases (SPIG2016),
Monte Carlo simulations of electron transport in CF₃I and SF₆ gases
Belgrade, Serbia, 28.08.-02.09.2016.
- [6] Z.Lj, Petrović, D. Marić, S. Dujko, G. Malović, **J. Atić**, I. Simonović, O. Šašić,
XXIV Europhysics Sectional Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized
gases (ESCAMPIG),
Overview of the procedure to obtain cross section data from the transport coefficients
Glasgow, United Kingdom, 17-21.07.2018.
- [7] **J. Atić**, D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, S. Dujko,
Book of Contributed papers & Abstracts of Invited Lectures, Topical Invited Lectures,
Progress Reports and Workshop Lectures of the 29th Summer School and International
Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG2018),
Electron Transport and Streamer Propagation in CF₃I-SF₆ Gas Mixtures
Belgrade, Serbia, 28.08.-01.09.2018.
- [8] **J. Atić**, D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, J. de Urquijo, R.D. White, S. Dujko,
Proceedings of the XXIInd International Conference on Gas Discharges and Their
Applications (GD2018),
Electron transport in strongly attaching gases in radio-frequency electric and magnetic fields
Novi Sad, Serbia, 02-07.09.2018.
- [9] S. Dujko, **J. Atić**, D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, J. de Urquijo,
IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL2019),
Electron transport coefficients and negative streamer dynamics in CF₃I-SF₆ mixtures
Roma, Italy, 23-27.06.2019.
- [10] **J. Atić**, D. Bošnjaković, I. Simonović, Z.Lj. Petrović, S. Dujko,
31st Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases
(SPIG2022),
Formation and propagation of streamers in CF₃I-SF₆ gas mixtures
Belgrade, Serbia, 05-09.09.2022.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

- [1] **J. Mirić**, Z.Lj. Petrović, R.D. White, S. Dujko,
XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & XVIII
International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL2013),
Transport coefficients for electrons in rare-gas metal-vapor mixtures
Kanazawa, Japan, 19-21.07.2013.
- [2] S. Dujko, D. Bošnjaković, **J. Mirić**, R.D. White, A.H. Markozan, U. Ebert,
XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & XVIII
International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL2013),
*Non-conservative electron transport in gases and its application in modelling of non-
equilibrium plasmas and particle detectors*

Kanazawa, Japan, 19-21.07.2013.

[3] Z.Lj. Petrović, S. Dujko, **J. Mirić**, D. Bošnjaković, A. Banković, S. Marjanović, D. Marić, J. Sivoš, N. Škoro, M. Savić, O. Šašić, G. Malović,

International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences (IS-NPCS2014),

Cross Sections for Scattering of Electrons and Positrons in Modeling of Ionized Gases and Non-Equilibrium Plasmas

Osaka, Japan, 26-28.02.2014.

[4] S. Dujko, G. Malović, D. Marić, S. Marjanović, **J. Mirić**, Z.Lj. Petrović, V. Stojanović, Gas/Plasma-Liquid Interface: Transport, Chemistry and Fundamental Data from Lorentz center,

Cross sections and transport coefficients for H₂O vapor and liquid water

Belgium, 04-08.08.2014.

[5] **J. Mirić**, D. Bošnjaković, O. Šašić, J. de Urquijo, S. Dujko, Z.Lj. Petrović,

42nd IEEE International Conference On Plasma Science (ICOPS2015),

Scattering cross sections and electron transport coefficients for electrons in CF₃I

Belek, Antalya, Turkey, 24-28.05.2015.

[6] D. Bošnjaković, **J. Mirić**, Z.Lj. Petrović, S. Dujko,

XIX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL2015),

Rescaling procedures for Monte Carlo simulations of electron transport in strong electronegative gases

Lisboa, Portugal, 17-20.07.2015.

[7] **J. Mirić**, D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, S. Dujko,

XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2015),

Transport coefficients and scattering cross sections for electrons in CF₃I

Toledo, Spain, 22-28.07.2015.

[8] Z. Petrović, **J. Mirić**, I. Simonović, S. Dujko,

Bulletin of the American Physical Society, 69th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2016),

Electron transport in mercury vapor: magnetic field effects, dimer induced NDC and multi-term analysis

Bochum, Germany, 10-14.10.2016.

[9] Z. Petrović, **J. Mirić**, I. Simonović, D. Bošnjaković, S. Dujko,

Bulletin of the American Physical Society, 69th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2016),

Monte Carlo simulations of electron transport in strongly attaching gases

Bochum, Germany, 10-14.10.2016.

[10] **J. Mirić**, I. Simonović, D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, R.D. White, S. Dujko,

XIX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics and XX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL2017), Book of Abstracts,
Hydrodynamic and non-hydrodynamic studies of electron transport in mercury vapor
Amaroo on Mondalay Resort, Magnetic Island, Queensland, Australia, 22-24.07.2017.

[11] Z.Lj. Petrović, T. Makabe, G. Malović, **J. Mirić**, S. Dujko,
XX International Summer School VEIT, 2017, Book of Abstracts,
Transport of charged particle swarms as a basic for plasma models
Sozopol, Bulgaria, 25-29.09.2017.

[12] Z.Lj. Petrović, **J. Atić**, D. Marić, S. Dujko, G. Malović, J. de Urquijo, M. Ise, T. Hammer,
XX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics and XXI International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms, POSMOL2019, Book of Abstracts,
Cross sections for scattering of electrons on Tetrafluoropropene HFO1234ze obtained from swarm data
Belgrade, Serbia, 18-21.07.2019.

[13] S. Dujko, **J. Atić**, D. Bošnjaković, R.D. White, P. Stokes, L. Cambell, M. Brunger,
74th Annual Gaseous Electronics Virtual Conference, Book of Abstracts,
Electron transport and negative streamers in indium vapor
USA, 04-08.10. 2021.

4. Провера оригиналности докторске дисертације

Провера оригиналности ове докторске дисертације је извршена од стране Универзитетске библиотеке Светозар Марковић у Београду применом програма *iThenticate*. Утврђено је да ова докторска дисертација садржи 3% преклапања са текстовима који су доступни у библиотеци (базе свих научних радова са SCI листе као и базе докторских дисертација и матер теза у Србији и иностранству). Највећи део преклапања се односи на опште термине, математичке изразе из радова кандидаткиње, навођење личних имена, назива институција, библиографских података о коришћеној литератури, хемијских формула једињења и ознака за елементарне сударне процесе у скуповима пресека који су коришћени као улазни подаци у оквиру ове докторске дисертације. Ово је у складу са чланом 9. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду. Поред тога, у потпуности је јасно да не постоје никаква преклапања резултата и дискусије физичких процеса који су приказани у овој дисертацији, са неким другим из литературе. Оригиналност ове дисертације се огледа и у чињеницама:

1. Да је у дисертацији презентован нови методолошки приступ за проучавање гасних диелектрика разматрањем сударних и транспортних особина електрона, развоја лавина електрона и пропагације негативних стримера;
2. Да су резултати ове дисертације били предмет предавања по позиву и оралних презентација које су кандидат и сарадници на пројекту презентовали на многим међународним конференцијама посвећеним физици ројева наелектрисаних честица и физици плазме.

На основу свега изнетог сматрамо да је докторска дисертација кандидаткиње Јасмине М. Атић у потпуности оригинална, што је и њен ментор др Саша Дујко потврдио, те се прописани поступак припреме за одбрану ове докторске дисертације може наставити.

Закључак

На основу изложеног, Комисија закључује да резултати кандидаткиње Јасмине М. Атић представљају оригиналан допринос кинетичкој теорији ројева наелектрисаних честица и неравнотежних плазми. Резултати кандидаткиње из ове докторске дисертације су публиковани у врхунским међународним часописима и приказани на многим међународним конференцијама. Сходно томе, Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију кандидаткиње Јасмине М. Атић под насловом

“Транспорт електрона, развој лавина и пропација стримера у јако електронегативним гасовима”

и предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри њену јавну одбрану.

У Београду, 24.10. 2022. године

др Саша Дујко, научни саветник
Институт за физику, Универзитет у Београду

др Горан Попарић, редовни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду

др Ђорђе Спасојевић, редовни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду