

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

На V седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 28.02.2018. године одређени смо за чланове Комисије за припрему извештаја о докторској дисертацији “Проучавање облика спектралних линија Ne I и Ne II у прикатодној области абнормалног тињавог пражњења” из уже научне области Физика јонизованог гаса и плазме, коју је кандидат Никола Ивановић предао Физичком факултету у Београду. Након увида у материјал докторске дисертације, подносимо следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Основни подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Никола (Веселин) Ивановић, рођен је 22.08.1986. године у Беранама, Република Црна Гора. Средњу електротехничку школу “Никола Тесла” завршио је 2005. године у Београду. Дипломирао је 2011. године на Физичком факултету Универзитета у Београду на смеру Примењена физика и информатика са просечном оценом 8,20 (осам и 20/100). Исте године уписао је мастер студије и завршио их наредне године са просечном оценом 9,80 (девет и 80/100). Након завршетка мастер студија, 2012. године је уписао докторске студије на смеру Физика јонизованог гаса и плазме на Физичком факултету, Универзитета у Београду. Од 2012. године је запослен као асистент на Пољопривредном факултету Универзитета у Београду.

#### 1.2. Научна активост

Никола Ивановић се бави научноистраживачким радом у Лабораторији за спектроскопију електричних гасних пражњења на Физичком факултету Универзитета у Београду и од 1. јула 2012. године је укључен на пројекат 171014 – „Спектроскопска дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења: облици спектралних линија и интеракција са површинама“, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. До сада је био коаутор на три рада у врхунским међународним часописима (M 21) са ИФ > 1, шест саопштења у зборницима међународних научних скупова и два саопштења у зборницима скупова националног значаја. Укупан импакт фактор публикованих радова је 9,11, односно просечан импакт фактор публикованих радова је 3,04. Радови Николе Ивановића су цитирани три пута. На позив уредника рецензирао је један рад у међународном часопису *Plasma Sources, Science and Technology*.

## 2. Опис предатог рада

### 2.1 Основни подаци

Ова дисертација је рађена под руководством др Николе Шишовића, доцента Физичког факултета Универзитета у Београду, који се већ дужи низ година успешно бави спектроскопским истраживањима електричних гасних пражњења и коаутор је 30 радова у водећим међународним часописима. Доцент др Никола Шишовић је у последњих пет година објавио 12 радова у водећим међународним часописима који за тему имају развој метода за спектроскопску дијагностику електричних гасних пражњења и испуњава све услове предвиђене за ментора. Истраживања приказана у оквиру ове докторске дисертације су извршена у Лабораторији за спектроскопију електричних гасних пражњења Физичког факултета Универзитета у Београду, а делом у оквиру сарадње пројеката 171014 и 171027 (проф. др Ђ. Спасојевић) које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Докторска дисертација “Проучавање облика спектралних линија Ne I и Ne II у прикатодној области абнормалног тињавог пражњења” кандидата Николе Ивановића је изложена у оквиру седам поглавља са 54 слике, 18 табела и 133 референце на укупно 139 страница.

### 2.2. Предмет и циљ рада

Предмет истраживања ове докторске дисертације је проучавање облика спектралних линија неутралног атома неона (Ne I), аргона (Ar I),  $H_{\alpha}$  линије Балмерове серије атома водоника и једноструко јонизованог атома неона (Ne II) у прикатодној области Гримовог абнормалног тињавог пражњења са циљем да се тестира примена нове спектроскопске дијагностичке методе за мерење расподеле јачине електричног поља.

Прикатодна област представља најважнији део тињавих пражњења (ТП), јер се у њој јављају различити процеси релевантни и за рад и за примену тињавог пражњења. То је област у којој се тешке наелектрисане честице услед присуства електричног поља катоду убрзавају и сударају са другим конституентима пражњења, генеришући наелектрисане и неутралне честице у основном или ексцитованом стању пре судара са површином катоду. Број судара честица зависи од радних услова ТП (притиска, густине струје, састава гаса итд). Након бомбардовања површине катоду брзим јонима, неутралима и фотонима јавља се секундарна емисија електрона. Ови електрони и њихови сударни производи у прикатодној области и области негативног светљења (НС) су најважнији конституенти за рад ТП. Поред електрона, рефлектоване брзе неутралне честице (произведене на катоди процесом неутрализације или процесима неутрализације и фрагментације катјона такође играју важну улогу у одржавању рада

ТП. Према томе, не може се пренагласити значај прикатодне области за описивање или моделирање ТП.

Један од најважнијих карактеристика прикатодне области је просторна расподела јачине електричног поља  $E$ , које је од пресудног значаја за убрзавање наелектрисаних честица, њихове путање, кинетичке енергије и сударе са другим честицама, као и распршивање материјала катоде након удара тешких честица гаса. Сви ови процеси су значајни за рад ТП и његове примене у области спектроскопске анализе, депозиције танких слојева, као и за дубинско профилирање и нагризање катодног материјала плазмом. Према свему поменутом, лако је објаснити потребу за развојем нових непертурбујућих техника за мерење електричног поља  $E$  у узаној прикатодној области.

Први задатак истраживања у оквиру ове докторске дисертације је био да се експериментално потврди постојање аномално проширених спектралних линија атома аргона и неона које су примећене у комерцијалним изворима пражњења за спектрохемијску анализу металних узорака. Након изведеног експеримента, требало је објаснити порекло, односно механизме ширења линија који доводе до појаве проширених и сложених профила линија аргона и неона.

После успешног објашњења порекла проширених и сложених профила спектралних линија атома аргона и неона, на основу резултата теоријских израчунавања (Ziegelbecker R Ch and Schnizer B, 1987, *Z. Phys. D - Atoms, Molecules and Clusters* **6**, 327-335), снимљени су профили спектралних линија Ne I са значајно израженим Штарковим цепањем/померањем у условима малих јачина електричног поља, а за које до сада нису објављени експериментални резултати.

Ради што тачнијег мерења Штаркових помераја изабраних спектралних линија Ne I у прикатодној области тињавог пражењења требало је: (а) одредити расподелу јачине електричног поља помоћу новоразвијене моделне функције за прецизно фитовање профила  $H_{\alpha}$  линије Балмерове серије; и (б) побољшати и прилагодити методу за мерење Штаркових помераја спектралних линија у условима малих јачина електричног поља.

Осим спекралних линија атома неона, у овој докторској дисертацији истраживани су и аномално проширени профили спектралних линија једанпут јонизованог атома неона Ne II.

### 2.3. Публикације

Из рада на докторској дисертацији Николе Ивановића директно су произашла три научна рада објављена у водећим међународним часописима (ИФ > 1):

- 1) Majstorović G Lj, **Ivanović N V**, Šišović N M, Djurović S and Konjević N (2013), *Plasma Source Sci. Technol.* **22**, 045015. [M21 IF 3,056/2013]
- 2) Šišović N M, **Ivanović N V**, Majstorović G Lj and Konjević N (2014), *J. Anal. At. Spectrom.* **29**, 2058-2063. [M21 IF 3,466 /2014]
- 3) **Ivanović N V**, Šišović N M, Spasojević Dj and Konjević N (2017), *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 125201 (8pp). [M21 IF 2,588 /2016]

## 2.4. Преглед научних резултата изложених у тези

Докторска дисертација Николе Ивановића је изложена у седам делова: Увод, Основни појмови, Преглед истраживања прикатодне области и области негативног светљења код Гримовог пражњења, Проучавање механизма ширења и померања спектралних линија у гасном пражњењу, Опис експеримента, Резултати и Закључак.

У уводном делу докторске дисертације су на јасан и концизан начин описани тема рада, циљеви истраживања, као и експерименталне, теоријске и нумеричке методе које су коришћене при посматрању и анализи облика спектралних линија атома и јона неона.

У првом поглављу дато је објашњење основних физичких процеса везаних за електрична гасна пражњења, док је друго поглавље посвећено опису процеса у прикатодној области и области негативног светљења Гримовог абнормалног тињавог пражњења (АТП).

Након детаљног прегледа метода и резултата ранијих теоријских и експерименталних истраживања ове две области пражњења, у трећем поглављу указано је на механизме који доводе до ширења и померања спектралних линија атома водоника, аргона и неона. У истом поглављу описане су и основе мерења расподеле јачине електричног поља помоћу мерења Штаркових помераја спектралних линија атома неона Ne I и аргона Ar I у прикатодној области Гримовог АТП.

Коришћени извор абнормалног тињавог пражњења, израђен по узору на модификовано Гримово пражњење који су предложили Фереира и сарадници, а унапредили и користили Кураица и сарадници, приказан је у четвртном поглављу. За проучавање Штаркових помераја и облика спектралних линија аргона и неона у прикатодној области АТП примењена је једноставна техника заснована на стандардној оптичкој емисионој спектроскопији (ОЕС) у лабораторији са типичном опремом. Ово је у суштини, добро позната Ло Сурдо техника која се користи за проучавање Штарковог ефекта, али унапређена модерним CCD детектором.

У петом поглављу детаљно су разматрани и дискутовани резултати спектроскопског посматрања облика спектралних линија водоника, аргона и неона. Спектроскопским посматрањем са краја пражњења детектоване су релативно велике спектралне ширине и сложени профили линија атома неона Ne I и атома аргона Ar I који су претходно детектовани у комерцијалним Гримовим изворима пражњења. Претпостављено је да, теоријски гледано, постоје два могућа узрока за ширење и померање неводоничних спектралних линија у Гримовим изворима АТП када се посматрање врши нормално на површину катоде. То су: (i) Штарков ефекат у прикатодној области; и (ii) ширење спектралних линија услед утицаја плазме у области негативног светљења. Штарково ширење услед дејства микропоља наелектрисних честица у плазми се користи за проверу теорије Штарковог ширења линија у плазми и за мерење концентрације електрона. Штарково цепање и померање линија услед постојања макроскопског електричног поља у прикатодној области користи за мерење јачине овог поља.

Да би се утврдило порекло ширења и померања Ne I и Ar I линија, извршена су мерења и са стране извора пражњења. Током посматрања са стране извора, детектован

је утицај оба ефекта на облике спектралних линија: Штарков ефекта услед електричног поља у прикатодној области, као и Штарково ширење индуковано микропољем плазме у области негативног светљења. У потпоглављима од 5.1 до 5.3, постојање проширених сложених профила линија Ne I и Ar I објашњено је као резултат суперпозиције профила који се емитује из прикатодне области пражњења под утицајем Штарковог ефекта макропоља и проширеног профила емитованог из области негативног светљења услед дејства микропоља наелектрисаних честица. Овој чињеници у прилог иде и то да су ширине спектралних линија снимљене са краја извора пражњења веће од ширина спектралних линија које су снимљене са стране извора пражњења у негативном светљењу.

Осим објашњења порекла проширених и сложених профила спектралних линија Ne I и Ar I, истраживања су указала на могућност коришћења облика спектралних линија Ar I и Ne I за дијагностику електричног поља у прикатодне области Гримовог АТП-а. Први покушаји одређивања расподеле јачине електричног поља постигнути су мерењем Штаркових помераја спектралних линија атома аргона Ar I 522,127 nm и Ar I 518,775 nm. Посматрањем сложених профила спектралних линија аргона снимљених са стране извора пражњења, уочено је постојање две компоненте унутар укупног профила проучаваних спектралних линија Ar I. Прва компонента је спектрална линија која је емитована из области која није под дејством електричног поља, односно дела пражњења унутар анодног прореза. Линија има непомерену таласну дужину, а њен облик се може описати Гаусовим профилем са инструменталном ширином. Овај феномен је раније примећен при проучавању облика спектралних линија атома хелијума у Гримовом АТП-у (Kuraisa M M, Konjević N and Videnović I R, 1997, *Spectrochim. Acta B* **52**, 745). Друга компонента профила се емитује из области пражњења под дејством електричног поља и зато је померена и проширена услед Штарковог ефекта макропоља. На овај начин, извршено је мерење Штаркових помераја, а коришћењем релевантних података и једначина из литературе (Jäger H and Windholz L, 1984, *Physica Scripta* **29**, 344), извршено је индиректно мерење расподеле јачине електричног поља. Постигнути резултати су детаљно приказани у потпоглављу 5.1. Посматране спектралне линије неона (Ne I 503,775 nm; 508,038 nm; 511,367 nm; 534,109 nm; и 588,190 nm) као и резултати приказани су у одељку 5.2. Почетна истраживања су показала да су Штаркови помераји већи него измерени помераји код спектралних линија Ar I 522,127 nm и Ar I 518,775 nm.

На основу резултата теоријских израчунавања (Ziegelbecker R Ch and Schnizer B 1987, *Z. Phys. D - Atoms, Molecules and Clusters* **6**, 327), извршено је посматрање профила спектралних линија Ne I са значајно израженим Штарковим цепањем и померањем у условима малих јачина електричног поља, а за које до сада не постоје експериментални резултати. Као радни гас коришћен је неон са малим додатком водоника, што нам је обезбедило посматрање не само профила Ne I линија, већ и облика спектралне линије  $H_{\alpha}$  Балмерове серије водоника. Спектралне линије Ne I, као и спектрална линија  $H_{\alpha}$ , посматране су на различитим аксијалним позицијама нормално на осу цилиндричног Гримовог извора АТП-а. Расподела јачине електричног поља одређена је коришћењем унапређене моделне функције за прецизно фитовање профила  $H_{\alpha}$  линије.

Ради мерења Штаркових помераја спектралне линије Ne I 511,367 nm, експериментални профили су фитовани наменском моделном функцијом. Резултати истраживања су поређени са резултатима других аутора (Jäger H and Windholz L (1984), *Physica Scripta* **29**, 344) и показују добро слагање са резултатима предвиђеним за трећу Штаркову компоненту поменуте спектралне линије. Преостале спектралне линије неона (Ne I 503,135 nm; 507,421 nm; 515,196 nm; 515,443 nm; 520,390 nm; и 520,886 nm) су показале вишекомпонентну структуру. С обзиром да компоненте имају различите релативне интензитете, претпостављено је да компонента која има највећи интензитет одређује максимум помереног дела профила линије услед Штарковог ефекта макропоља. При мерењу Штаркових помераја коришћене су две технике. Прва је побољшана метода за мерење Штаркових помераја фитовањем на погодну изабрану моделну функцију. Осим ове методе на позицијама где се јасно види сепарација непомерене и померене компоненте коришћена је добро позната метода сепарације максимума.

Треба истаћи да су помоћу просте квадратне формуле, добијени коефицијенти за шест спектралних линија атома неона, захваљујући чему се мерењем Штаркових помераја поменутих спектралних линија неона могу извршити мерења јачине електричног поља на брз и једноставан начин. Развијена је веома једноставна спектроскопска метода за мерење јачине електричног поља у прикатодној области абнормалног тињавог пражњења, коришћењем Штаркових помераја спектралних линија неона. Постигнути резултати су детаљно приказани у потпоглављу 5.4.

Спектроскопским посматрањем са стране извора пражњења уочено је постојање аномално проширених профила линија једнострукто јонизованог атома неона (Ne II 369,421 nm; 370,962 nm; 371,308 nm; и 372,711 nm) у блиској ултраљубичастој области спектра. Профили линија Ne II, снимљени са стране на свим позицијама у прикатодној области пражњења, имају узак централни максимум и аномално проширена крила. Овакав профил спектралних линија је последица низа елементарних процеса који се одигравају у прикатодној области. У потпоглављу 5.5 дата су основна теоријска разматрања и квалитативни модел порекла аномално проширених облика јонских линија неона. Закључено је да у формирању укупног облика профила јонских линија учествују најмање две групе ексцитованих јона неона Ne II, са значајно различитим енергијама. Највећи допринос узаном централном максимуму даје јонизација атома неона из основног стања електронским ударом, док највећи допринос аномално проширеним крилима дају процеси ексцитације јона услед судара са атомима матричног гаса. Посматрања облика јонских линија која су извршена са краја извора пражњења указала су да је црвено крило израженије него плаво крило. Ово доводи до закључка да се деексцитација брзих јона одвија доминантно при кретању брзих јона ка површини катодe, јер у супротном смеру електрично поље зауставља јоне неона и на тај начин им онемогућава да стекну довољну енергију и да дају допринос аномално проширеним крилима.

Поступком деконволуције добијене су Доплерове полуширине аномално проширених компоненти јонских линија. Коришћењем једноставне формуле добијени су коефицијенти за три проучаване јонске линије. Мерењем Доплерових полуширина

проучаваних линија Не II може се такође одредити расподела јачине електричног поља на брз и једноставан начин.

Иако квалитативни модел који указује на порекло и могуће механизме ширења спектралних линија Не II и емпиријске формуле за одређивање расподеле електричног поља представљају значајан искорак, даља истраживања аномално проширених профила јонских линија неона захтевају успостављање потпунијег квантитавног модела, за чији развој у литератури у овом тренутку не постоје сви релевантни подаци.

У Закључку је дат резиме метода и резултата истраживања облика спектралних линија атома аргона, неона и водоника, као и једноструко јонизованих атома неона.

### 3. СПИСАК ПУБЛИКАЦИЈА КАНДИДАТА

#### A. Радови у међународним часописима

##### Радови у врхунским међународним часописима (импакт фактор >1)

- [A1] G Lj Majstorović, N V Ivanović, N M Šišović, S Djurović and N Konjević (2013), Plasma Source Sci. Technol. 22, 045015. [M21 IF 3,056/2013]
- [A2] N M Šišović, N V Ivanović, G Lj Majstorović and N Konjević (2014), J. Anal. At. Spectrom. 29, 2058-2063. [M21 IF 3,466 /2014]
- [A3] N V Ivanović, N M Šišović, Dj Spasojević and N Konjević (2017), J. Phys. D: Appl. Phys. 50 125201 (8pp). [M21 IF 2,588 /2016]

#### Радови у зборницима међународних конференција

- 1) "Ar I and Ne I spectral line shapes in cathode fall region of Grimm-type glow discharge", Nikola M Šišović, Gordana Lj Majstorović, Nikola V Ivanović and Nikola Konjević, 2nd International Glow Discharge Spectroscopy Symposium (IGDSS) Czech Technical University, April 7-9, Prague, Czech Republic (2014), **M34**.
- 2) "Spectral line shapes for Grimm type glow discharge diagnostics" G Lj Majstorović, N V Ivanović, N M Šišović, S Djurović and N Konjević, The X Symposium of Belarus and Serbia on Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas, Belgrade, Serbia, 25-27 August 2014, 62-65, **M62**.
- 3) "The estimation of electric field in cathode fall region of neon Grimm glow discharge" N V Ivanović, G Lj Majstorović, N M Šišović and N Konjević, 27<sup>th</sup> Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG2014), 26-29.08.2014, Belgrade, Serbia, Contributed papers, 359-362, **M33**.
- 4) "The method for electric field distribution measurement in cathode fall region of an abnormal glow discharge in neon", N V Ivanović, G Lj Majstorović and N M Šišović, 9<sup>th</sup> International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU-9), Istanbul, Turkey, 24-27. August 2015, AIP Conf. Proc. 1722, 240002-1–240002-4; doi: 10.1063/1.4944264© 2016 AIP Publishing LLC 978-0-7354-1369-6, **M33**.
- 5) "A routine for demixing of polarization components in profile of hydrogen Balmer spectral lines", N V Ivanović, Dj Spasojević, N M Šišović and N Konjević, 28<sup>th</sup>

Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG2016), Aug. 29-Sep. 2, 2016, Belgrade, *Serbia*, Contributed papers, 288-291, **M33**.

- 6) "Model function for measuring neon line Stark shift", N V Ivanović, N M Šišović, Dj Spasojević, and N Konjević, 12<sup>th</sup> Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics (FLTPD XII ), 23-27 April 2017, Zlatibor, Serbia, 20/41, **M34**.

#### Радови у зборницима домаћих конференција

- 1) "Облици спектралних линија атома неона у прикатодној области тињавог пражњења", Н В Ивановић, Г Љ Мајсторовић, Н М Шишовић и Н Коњевић, (2013), XII Конгрес физичара Србије, 28.04.-02.05.2013 Врњачка Бања, Зборник радова, 329-332, **M63**.
- 2) "The method for mapping electric field distribution in cathode fall region of an abnormal glow discharge using neutral neon spectral line shapes" N V Ivanović, G Lj Majstorović, N M Šišović 10th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (10th SCSLSA) Srebrno jezero, Serbia, June 15 - 19, (2015), **M64**.

#### 4. ЦИТАТИ

[A1] G Lj Majstorović, **N V Ivanović**, N M Šišović, S Djurović N and Konjević (2013), Plasma Source Sci. Technol. 22, 045015. [M21 IF 3,056/2013]

B Eshel, C A Rice and G P Perram, "*Saturation spectroscopy of an optically opaque argon plasma*", Appl. Phys. B 124, 33 (2018).

[A2] N M Šišović, **N V Ivanović**, G Lj Majstorović and N Konjević (2014), J. Anal. At. Spectrom. 29, 2058-2063. [M21 IF 3,466 /2014]

S Ray, J Pisonero, P Robinson and C Venzago, "*A special JAAS issue devoted to the second International Glow Discharge Spectroscopy Symposium*", J. Anal. At. Spectrom. 29, 11 1966-1968 (2014).

[A3] **N V Ivanović**, N M Šišović, Dj Spasojević and N Konjević (2017), J. Phys. D: Appl. Phys. 50, 125201 (8pp). [M21 IF 2,588 /2016]

N Cvetanović, S S Ivković, B M Obradović and M M Kuraica. "*Simultaneous influence of Stark effect and excessive line broadening on the H-alpha line*", European Physical Journal D **71**, 12 (2017).



## ЗАКЉУЧАК

Имајући у виду актуелност теме, као и оригиналне резултате добијене у докторској дисертацији, Комисија је закључила да докторска дисертација “Проучавање облика спектралних линија Ne I и Ne II у прикатодној области абнормалног тињавог пражњења” коју је предао Никола Ивановић, представља значајан допринос из уже научне области Физике јонизованог гаса и плазме и да су задовољени сви прописани услови за одобравање одбране дисертације. Стога предлажемо Наставно-научном већу Физичког факултета да одобри њену усмену одбрану.

У Београду, 02. март 2018. године

др Никола Шишовић

Доцент Физичког факултета Универзитета у Београду

др Ђорђе Спасојевић

Ванредни професор Физичког факултета Универзитета у Београду

др Никола Коњевић

Професор емеритус Физичког факултета Универзитета у Београду

др Иван Виденовић

Виши научни сарадник Физички факултет Универзитета у Београду

др Стевица Ђуровић

Редовни професор Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду