

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марка Цвејића, дипл. инж. електротехнике.

Одлуком 5002/08-3 бр. од 20.5.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Цвејића, дипл. инж. електротехнике под насловом „**Просторна и временски разложена спектроскопска дијагностика ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску**”

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Тема за израду докторске дисертације пријављена је 14.10.2013. године. Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације именована је на седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета 5.11.2013. године у саставу: др Јован Цветић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, др Соња Јовићевић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за физику, др Милан Тадић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет. Извештај о подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржаној 4.12.2013. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Одлуком бр. 61206-6063/2-13 од 16.12.2013. године. Докторска дисертација предата је 24.4.2014. године.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације Одлуком бр. 5002/08-3 од 20.5.2014. године, у саставу: др Јован Цветић, редовни професор, Универзитет у Београду-Електротехнички факултет др Милан Тадић, редовни професор, Универзитет у Београду-Електротехнички факултет др Соња Јовићевић, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за физику.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Просторна и временски разложена спектроскопска дијагностика ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску” покрива научну област Физика плазме, а у ужем домену научно је актуелна у области Спектроскопије ласерски индуковане плазме. Докторска дисертације је написана на 188 страна латиничним писмом и састоји се од 6 поглавља, 106 слика и 133 библиографске референце.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Цвејић рођен је у Пожаревцу 09.08.1982. године. Пожаревчку гимназију завршио је 2001. године. У августу 2007. године, дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру за Физичку електронику – одсек за Оптиелектронику и ласерску технику. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Наноелектроника и фотоника, уписао је 2008. године.

Током основних студија учествовао је на пројекту израде Теслиног трансформатора и изложби о Николи Тесли поводом 150 година рођења у Галерији САНУ (2006). Од децембра 2007. до августа 2008. одслужио је цивилни војни рок на Електротехничком факултету. Од новембра 2008. до јуна 2009. године био је запослен на Физичком факултету Универзитета у Београду на експерименту тињавог пражњења са микро шупљином, у лабораторији академика Николе Коњевића. Тренутно је запослену Институту за физику (од јула 2009. године) у Лабораторији за спектроскопију плазме и физику ласера где је ангажован на експериментима тињавог пражњења на атмосферском притиску и експерименту спектроскопије ласерски индуковане плазме. Од јула 2009. године био је ангажован на пројекту 141032 „Нискотемпературне плазме и гасна пражњења: Радијативна својства и интеракција са површинама“, које је финансирао Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије. Тренутно је ангажован на пројектима: (1) из области основних истраживања ОН171014 под насловом „Спектроскопска дијагностика нискотемпературне плазме и гасних пражњења: облици спектралних линија и интеракција са површинама“; (2) из области технолошког развоја ТР 37019 „Електродинамика атмосфере у урбаним срединама Србије“. Оба пројекта финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Остварена сарадња и посете иностраним лабораторијама:

- мај 2010 и октобар 2011, посета лабораторији ЛПЗ (Laboratoire Lasers, Plasmas et Procédés Photoniques, LP3 UMR 6182 CNRS - Université Aix-Marseille II Campus de Luminy, Marseille), учешће на пројекту „Measurements of Stark broadening parameters in laser-produced plasmas” финансираном од стране LaserLab-Europe (<http://www.laserlab-europe.net/>), бр. пројекта CNRS-LP3 001575 и CNRS-LP3 001720

- билатерални пројекат сарадње са Француском „Павле Савић“ број 680-00-132/2012-09/03, под називом „Measurements of Stark broadening parameters in laser produced plasma”.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Просторна и временски разложена спектроскопска дијагностика ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску” поред садржаја и литературе има шест посебних глава и то: 1. Увод, 2. Теорија, која је подељена у четири дела, 3. Опис експерименталне поставке, 4. Опис компјутерских

програма у којој је представљено пет посебних програма, 5. Резултати мерења који су подељени у четири дела, 6. Закључак

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Увод-у је дат кратак осврт на основну проблематику са објашњењем важности теме и могућности примена резултата рада, као и кратки преглед садржаја сваког од наредних поглавља

У другој глави у првом делу разматрани су физички процеси који се дешавају приликом ласерске аблације, као основног процеса ЛИБС-а, од кога зависи настајање плазме као и њене карактеристике. Разумевање процеса аблације је од пресудног значаја за одређивање оптималних услова за мерење параметара ласерски индуковане плазме. У другом делу су дате основне релације термодинамичке равнотеже почевши од Saha једначине за случај комплетне термодинамичке равнотеже, преко локалне термодинамичке равнотеже до концепта парцијалне локалне термодинамичке равнотеже и услов њеног важења. У наставку је дат приказ методе Boltzman-ове праве за одређивање електронске температуре плазме која је коришћена у овој дисертацији. Трећи део је посвећен ширењу спектралних линија у плазми уз приказивање најчешћих функција профила линија (Gauss, Lorentz, Voigt). Поред тога, објашњени су механизми ширења спектралних линија у плазми, са акцентом на ефекат Старк-овог ширења што је од значаја за одређивање електронске густине плазме испитиване у овој дисертацији. У четвртој глави описан је транспорт зрачења кроз плазму: корекција на присуство самоапсорпције и Абелова инверзија, неопходних за добијање реалних вредности фундаменталних параметара испитиване ласерски индуковане плазме.

У трећој глави је дат преглед експерименталне поставке и опис експерименталних мерења коришћених у овом раду. Дате су карактеристике сваког елемента експерименталне поставке. Описан је начина рада ИЦЦД камере, начин снимања спектралних линија елемената присутних у испитиваној плазми. Детаљно је описан и поступак снимања за корекцију на присуство самоапсорпције. Такође је приказана поставка за снимање фотографија плазме методом брзе фотографије.

У четвртој глави дат је опис програма који су написани у сврху обраде експерименталних резултата. Програми су: програм за обраду спектралних снимака који укључује процедуру провере на само-апсорпцију и процедуру Абел-ове инверзије. Програм за фитовање неутралних линија, програм за фитовање јонских линија, програм за фитовање Балмерове  $H_{\alpha}$  линије и програм за фитовање  $Li I$  за одређивање параметара наведених спектралних линија.

У петој глави која се састоји из четири дела дати су резултати одређивања просторне и временске расподеле основних параметара ласерски индуковане плазме на чврстој мети (пелет:  $Al_2O_3$  900 mg;  $Li_2CO_3$  400 mg;  $MgCO_3$  100 mg; алумина) у ваздуху на атмосферском притиску. У првом делу техником брзе фотографије одређено је оптимално време посматрања плазме за мерење облика и интензитета спектралних линија присутних у плазми, како би се избегле тешкоће везане за нехомогеност и временску променљивост ЛИБС плазме. У другом делу су дати резултати одређивања електронске температуре,  $T_e$ , и њене просторне и временске расподеле ласерски индуковане плазме методом Болтзман-ове праве (БП) из релативних интензитета линија  $Mg I$ ,  $Al II$  и  $Li I$ , уз примену претходно описаних програма корекције на самоапсорпцију и Абел-ове инверзије. У трећем делу су дати резултати одређивања електронске густине,  $N_e$ . Фитован је укупни профил већ поменутих линија, како би се добила вредност електронске густине. Коришћена су два сета теоријских Штарк-ових параметара: Griem –ов сет података (Г) и сет података који су дали М. Димитријевић и S. Sahal-Bréchet (ДСБ). Како би се проверило слагање експерименталних Штарк-ових полуширина са теоријом,  $N_e$  је прво одређена из полуширине Балмер-ове  $H_{\alpha}$  линије, на временима кашњења где се ова линија појављује заједно са осталим линијама од значаја, присутних у ЛИП. Како су теоријски Штарк-ови подаци за линије водоника веће тачности, електронска густина одређена из  $H_{\alpha}$  линије узета је за

референтну. На овај начин је одређена електронска густина независном методом што је од посебне важности за тачност одређених параметара. Експерименталне вредности Штарк-ових полуширина за вредности електронске густине одређене из  $H_{\alpha}$  упоређене су са постојећим теоријским подацима -  $\Gamma$  и ДСБ. Ефекат Дебајевог екранирања који се јавља код линије  $Mg\ I\ 383.53\ \text{nm}$  утиче на смањење Штарк-ове полуширине у датим експерименталним условима и њему је посвећена пажња. Коришћењем оба сета теоријских података,  $\Gamma$  и ДСБ одређене су просторне расподеле електронске густине на каснијим временима кашњења. Такође је електронска густина одређена је и коришћењем јонских линија једноструко јонизованог  $Al$ . Експерименталне Штарк-ове полуширине упоређене су са постојећим теоријским вредностима. У четвртом делу посебна пажња посвећена је атомској линији литијума са забрањеном компонентом,  $Li\ I\ 460.28\ \text{nm}$ . Ова линија има веома сложен облик који је веома погодан за брзо одређивање електронске густине. Како се ова линија најбоље види на каснијим временима, где линија  $H_{\alpha}$  није екситована, за независну методу одређивања електронске густине узета је друга атомска линија литијума  $Li\ I\ 497.17\ \text{nm}$  заједно са одговарајућим теоријским Штарк-овим параметрима.

У Закључку су наведени главни доприноси дисертације и анализиране могућности за примену и даљи правци истраживања у овој области.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Проблематика дисертације се односи на изузетно актуелну област спектроскопије ласерски индуковане плазме, аналитичке технике за мулти елементарну анализу широког опсега применљивости, у индустрији, медицини, контроли загађености околине, истраживањима на Марсу и великим потенцијалом за нове примене. Разумевање основних процеса у овој врсти плазме чини докторску дисертацију под насловом **„Просторна и временски разложена спектроскопска дијагностика ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску”** изузетно савременом. Значај дисертације је свакако и у томе што је то прва докторска теза код нас која се бави спектроскопском дијагностиком ласерски индуковане плазме на чврстој мети на атмосферском притиску. Оно што ову докторску тезу свакако чини оригиналном је одређивање електронске густине коришћењем Штаркових параметара линије  $Li\ I\ 460.28\ \text{nm}$  са забрањеном компонентом, што досада није примењивано у дијагностици ласерски индукованих плазми.

#### **3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу**

Литература коришћена у раду је пажљиво одабрана. Она садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, али садржи и класичне радове. У наведеним референцама се налазе и научни радови Марка Цвејића.

#### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

У дисертацији под насловом **„Просторна и временски разложена спектроскопска дијагностика ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску”** примењене су различите експерименталне технике и постојеће теоријске методе за добијање потребних резултата. Од експерименталних техника примењена је техника брзе фотографије за оптимално време посматрања плазме док је метода оптичке емисионе спектроскопије коришћена за регистровање облика спекралних линија елемената присутних у плазми. За обраду линија коришћених за одређивање просторних и временских расподеле

електронске температуре,  $T_e$ , и електронске густине,  $N_e$ , употребљена су два сета теоријских Штарк-ових параметара: Griem-ов сет података ( $\Gamma$ ) и сет података који су дали М. Димитријевић и S. Sahal-Bréchet (ДСБ).

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

Резултати приказани у овој дисертацији, имају примену у дијагностици и моделовању ласерски индукованих плазми а тиме и боље разумевање сложених физичких процеса, што води до остваривање услова за још ширу примену ЛИБС-а у различитим областима.

### **3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад**

На основу прегледане докторске дисертације Комисија процењује да је кандидат Марко Цвејић, дипл. инж. електртехнике, у потпуности способан за самостални научни рад, што је доказано и радом са другим изворима гасних пражњења (тињаво пражњење са микро шупљином, тињаво пражњење на атмосферском притиску) и чињеницом да постоји већи број научних радова у којима се појављује као први аутор.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

У дисертацији Марка Цвејића су остварени следећи научни доприноси:

- Експерименталном поставком је било могуће извршити проверу самоапсорпције методом приме задњег огледала.
- Написани програми за обраду експерименталних резултата представљају јасан пут потребан за добијање параметара потребних за дијагностику ласерски индуковане плазме.
- Одређени су Штарк-ови параметари линија Mg I, Mg II, Al II, Li I, што је допринос проширењу базе података са новим експерименталним подацима за параметре Штарк-овог ширења потребних за одређивање електронске густине у плазми.
- Указано је на значај корекције Debye-овог екранирања на полуширине спектралних линија.
- Извршена је процена добрих и лоших особина ласерски индуковане плазме као извора плазме за проучавање параметара Штарк-овог ширења
- Одређене су просторне и временске расподеле основних параметара ласерски индуковане плазме: електронске температуре,  $T_e$ , и електронске густине,  $N_e$ .
- Тестирана је по први пут могућност примене линије са забрањеном компонентом Li I 460 28 nm за одређивање електронске густине ласерски индуковане плазме

### **4.2. Критичка анализа резултата истраживања**

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и добијених резултата, констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из обрађиване проблематике. Развијене експерименталне процедуре, програми за обраду мерењем добијених података, њихова провера са одговарајућим теоријама и тако добијени резултати у овој дисертацији представљају значајан научни и стручни допринос у области дијагностике ласерски индуковане плазме

### 4.3. Верификација научних доприноса

#### Категорија M21 Радови у врхунским међународним часописима

1. M. Cirisan, **M. Cvejić**, M.R. Gavrilović, S. Jovićević, N. Konjević, J. Hermann; Stark broadening measurements of Al II lines in a laser-induced plasma (2014) Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 133, pp. 652-662, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.10.002 ISSN 0022-4073, Impakt faktor 2.394

2. **M. Cvejić**, M.R. Gavrilović, S. Jovićević, N. Konjević,; Stark broadening of Mg I and Mg II spectral lines and Debye shielding effect in laser induced plasma (2013) Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy, 85, pp. 20-33., DOI: 10.1016/j.sab.2013.03.011 ISSN 0584-8547, Impakt faktor 3.047

#### Категорија M33 Радови саопштени на скупу међународног значаја штампана у целини

1. M. Ćirišan, **M. Cvejić**, J. Hermann, S. Jovićević, N. Konjević,; Study of the optical thickness of laser-induced plasma for improved calibration-free LIBS analysis, Publ. University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Contributed Paper, SPIG 2012, p147 ISSN 978-86-7031-242-5

2. **M. Cvejić**, M. Gavrilović, S. Jovićević,; Procedure for processing spectral images and self-absorption correction Publ. University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Contributed Paper, SPIG 2012, p151 ISSN 978-86-7031-242-5

3. M. Gavrilović, **M. Cvejić**, S. Jovićević, N. Konjević,; Characterization of laser-induced plasma by optical emission spectroscopy, Publ. University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Contributed Paper, SPIG 2012, p171 ISSN 978-86-7031-242-5

#### Категорија M34 Радови саопштени на скупу међународног значаја штампани у изводу

1. **M. Cvejić**, M. Ćirišan, M.R. Gavrilović, S. Jovićević, N. Konjević, J. Hermann,; Stark broadening parameters of Al II line 704.9 nm measured in laser-induced plasma, EMSLIBS 2013 Euro Mediterranean Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Bari, Italy, Book of Abstracts, p129

2. M. R. Gavrilović, **M. Cvejić**, S. Jovićević, N. Konjević; Stark broadening of Pb II lines in laser induced plasma, EMSLIBS 2013 Euro Mediterranean Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Bari, Italy, Book of Abstracts, p.137

3. M. Vinić, **M. Cvejić**, M. Ivković,; Spatial and temporal characterization of combined laser induced plasma and spark technique, EMSLIBS 2013 Euro Mediterranean Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Bari, Italy, Book of Abstracts, p.151

4. **M. Cvejić**, M. Gavrilović, S. Jovićević, M. Ivković, N. Konjević,; Li I 460.3 nm line with forbidden component for LIBS electron number density diagnostics, EMSLIBS 2011 Euro

5. E. Mothe, **M. Cvejić**, S. Jovićeвић, L. Mercadier, S. Beldjilali, N. Konjeвић, J. Hermann ; Time- and space-resolved laser plasma diagnostics for Stark broadening measurements in laser plasma, LIBS 2010 Laser Induced Breakdown Spectroscopy Memphis, Tennessee, USA, Book of Abstracts, p084

6. Emilien Mothe, **M. Cvejić**, S. Jovićeвић, , N. Konjeвић, L. Mercadier, S. Beldjilali, J. Hermann ; Mesures d'élargissement Stark dans un plasma produit par ablation laser PamoJSM-2010 29 juin-2 juillet 2010, Campus Univerité Paris-Sud 11 – Orsay, Book of Abstracts

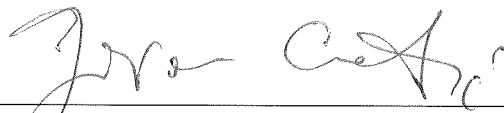
Категорија М61 Предавања по позиву на скупу националног значаја штампана у целини

1. **M. Cvejić**, M.R. Gavrilović, S. Jovićeвић, N. Konjeвић,; Diagnostics of laser induced plasma by optical emission spectroscopy, CEAMP2013, 3<sup>rd</sup> National Conference of Electronic, Atomic, Molecular and Photonic Physics, Contributed papers & abstracts of invited lectures and progress reports, Publ. University of Belgrade, Faculty of Physics, p. 11

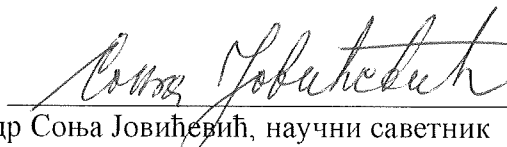
## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Марка Цвејића, под насловом „Просторна и временски разложена спектроскопска дијагностика ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску” представља савремен и оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање проблема у области дијагностике ласерски индуковане плазме на чврстој мети у ваздуху на атмосферском притиску. Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирана проблематика веома актуелна и савремена са аспекта научног и стручног доприноса, верификована објављивањем радова у релевантним часописима са SCI листе, а и податак да су најважнији резултати добијени самосталним радом, Комисија констатује да је кандидат Марко Цвејић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду, те, са задовољством, предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да овај Извештај прихвати и, у складу са законском процедуром, упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

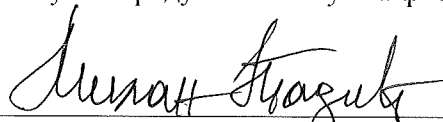
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Јован Цветић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Соња Јовићевић, научни саветник  
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Милан Тадић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет