

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

На IX седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 01.07.2015. смо одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације под називом:

"ДИЈАГНОСТИКА И ЕФЕКТИ ЕКРАНИРАЊА ЛАСЕРСКИ-ИНДУКОВАНЕ ПЛАЗМЕ"

из научне области Физика јонизованих гасова и плазме, коју је кандидат Милош Бургер, дипломирани физичар, предао Физичком факултету Универзитета у Београду дана 29. јуна 2015. године.

После прочитане дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи

РЕФЕРАТ

1. Основни биографски подаци кандидата

Милош Бургер је рођен 30.10.1985. године у Београду. Основно образовање је завршио као добитник Вукове дипломе. Завршио је Електротехничку школу "Никола Тесла" у Београду 2004. године. Дипломирао је на Физичком факултету 2010. године на смеру Примењена физика и информатика са просечном оценом 9,00. Дипломски рад под називом: "Паралелено процесирање употребом графичког процесора и примена у холографији" урадио је у Институту за физику, под руководством др Дејана Пантелића, и одбранио са оценом 10. Тренутно је у статусу студента докторских студија на смеру Физика јонизованих гасова и плазме. Испите на докторским студијама је положио са просечном оценом 10,00.

Запослен је на Физичком факултету од септембра 2010. године. Још у прошлом пројектном циклусу (2006-2010) био је укључен на пројекат 141010, финансиран од стране Министарства за науку и технолошки развој. Тренутно је ангажован на пројекту 171008 ("Одређивање атомских параметара на основу облика спектралних линија"), који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. У звање истраживач сарадник изабран је 2012. године.

1.1 Научна активност

Области научног интересовања кандидата везују се за проучавање процеса у плазми и дијагностику плазме настале како у лучном пражњењу, тако и ласерском побудом. До сада је био коаутор осам научних радова (са импакт фактором од 1,4 до 3,2), који су укупно цитирани седам пута, без аутоцитата и цитата коаутора. Резултати ових истраживања су презентовани на неколико међународних и домаћих конференција и штампани у изводу или целини. Списак публикованих радова дат је при крају реферата. Актуелност тематике истраживања кандидата је потврђена додељеним првим местом од стране научног жирија, на постер секцији, најзначајније светске конференције посвећене спектроскопији ласерски-индукованих плазми под називом: "*8th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)*", одржаној у Пекингу (Кина) 2014. године. Рецензент је часописа *Plasma Science and Technology* (IOP Publishing) и *Journal of Hazardous Materials* (Elsevier).

1.2 Наставна активност

Укључен је у наставне активности, на Физичком факултету, од летњег семестра 2011/2012. године, за предмет Базе података. У зимском семестру 2012/2013. године је ангажован на предмету Увод у информационе системе, а од летњег семестра исте календарске године за експерименталне вежбе из Основа атомске физике за студенте Примењене и компјутерске физике и Астрофизике.

Обављао је наставне активности и у летњем семестру 2012/2013. године, за предмет Базе података и експерименталне вежбе из Основа атомске физике, а у зимском семестру 2013/2014. је ангажован за држање експерименталних вежби из предмета Физике јонизованих гасова, Акустике и Савремене физике I.

У периоду календарских 2011/2012. и 2012/2013. год. је учествовао у раду Комисије за израду и прегледање задатака на такмичењима из физике за ученике разреда основних школа.

2. Опис, предмет и садржај докторске дисертације

Докторска дисертација је написана на српском језику на две стотине тридесет три стране, не рачунајући насловну страну, захвалнице, сажетак и садржај. Организована је у пет поглавља, садржи стотину четрдесет осам слика, десет табела и две стотине седамдесет две референце. Дисертација је доминантно експерименталног карактера и у целини је урађена у Лабораторији за физику јонизованих гасова, на Физичком факултету Универзитета у Београду.

У уводу је дат преглед досадашњих истраживања на пољу интеракције импулсног ласерског зрачења са материјом, како на фундаменталном, тако и нивоу аспеката неких од бројних примена. Представљена је мотивација за истраживања кандидата, као и циљеви саме дисертације. Фокус је усмерен на тзв. наносекундну ласерску аблацију, на чијим се основима заснивају спектроскопија ласерски-индуковане плазме, депозиција танких филмова, формирање микроструктура, продукција нано-честица, ласерска хирургија, итд. Указано је на бројне предности које плазма створена на овакав начин доноси, али и на потешкоће које се могу сусрести у карактеризацији и дијагностици њених параметара.

У првом поглављу су укратко наведене теоријске основе како за процес формирања ласерски-индуковане плазме, тако и за апсорпцију дела ласерског импулса (интеракције ласерског зрачења са плазмом), која се одвија у временском интервалу од неколико наносекунди. Осврт је дат и на актуелне моделе и њихове лимите. Указано је на неопходност укључивања додатних комплексних процеса, као и на скроман број постојећих експерименталних резултата, са којима би се поменути модели упоредили.

У другом поглављу је изложен детаљан приказ и карактеристике коришћене експерименталне опреме. Структура апаратуре, као и сама поставка система су доминатно оријентисани ка методама оптичке спектроскопије у циљу истраживања карактеристика континуалне и дискретне емисије зрачења ласерски-индуковане плазме.

Треће поглавље садржи теоријске основе емисионе спектроскопије, метода и релације које су коришћене за остваривање и интерпретацију резултата везаних за дијагностиковање морфолошких карактеристика и термодинамичких параметара плазме. Интерес за дијагностику је вишеструк, али треба истаћи да опсивање елементарних процеса у плазми и њихове међусобне спрегнутости захтева познавање поменутих параметра. Резултати ових истраживања су такође саставни део овог поглавља. Посебна пажња је усмерена на утврђивање оптималних просторно-временских интервала у функцији интензитета ласерског зрачења, врсте и притиска околног гаса [A3,A4], који су адекватни за одређивање атомских параметара. Методама оптичке емисионе спектроскопије су добијене расподеле како неутралних, тако и јонизованих честица. Испитивани су и утицаји просторне униформности, важност утврђивања локалних параметара, као и

самоапсорпције на облике профила спектралних линија [A2,A3]. Из параметара полуширине спектралних линија узрокованих Штарковим и Доплеровим ефектом одређене су вредности електронске концентрације. Екситационе температуре су одређене методом Болцмановог, односно Саха-Болцмановог дијаграма, или из Саха једначине у случају да је утврђено стање локалне термодинамичке равнотеже, односно парцијалне локалне термодинамичке равнотеже. Поред наведених ефеката ширења спектралних линија утврђен је допринос природног, резонантног, ван дер Валсовог, ширења услед јонских ефеката, као и доприноса хиперфине структуре и изотопског ефекта за различите вредности ел. концентрације. Од посебног интереса је проучавање специфичних линија из емисионих спектра плазми бакра и индијума. То су интензивне и репродуцибилне резонантне линије: 324.7 nm и 327.4 nm из Cu I спектра и 410.2 nm и 451.1 nm из In I спектра. Утврђено је да допринос утицаја хиперфине структуре и изотопског ефекта облицима профила поменутих линија зависи од електронске концентрације и температуре. При већим вредностима тих параметара се допринос хиперфине структуре и изотопског ефекта може занемарити, што је од значаја за поуздану дијагностику. Сprovedена су и опсежна истраживања великог броја осталих атомских (Cu I) и једноструко јонизованих (Cu II) спектралних линија у широком интервалу (од ултраљубичасте до инфрацрвене области) таласних дужина, чиме су се стекли предуслови за остваривање детаљне спектроскопске карактеризације како бакарног, тако и арбитрарних узорака. У случају присуства хелијума, као носећег гаса у ласерски-индукованим плазмама, потврђена је могућност свеобухватности примене He I 587.6 nm и He I 447.1 nm, као и He II 468.6 nm (P_{α}) линије у дијагностичке сврхе. Показано је и да коришћење хидратних једињења (соли) у виду пресованих "таблета", који у себи садрже испитиване метале, може бити погодно за одређивање неопходних атомских параметара. Наиме, због мањих концентрација испитиваних квалитета, улога самоапсорпције се своди на минимум. То је остварено у спектрима $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Поред тога, коришћење ових једињења пружа могућност укључивања водоникових линија у дијагностичке сврхе, независно од амбијенталне средине. Нарочито је погодна примена Балмерових H_{α} и H_{β} линија водониковог спектра.

У четвртном поглављу су представљени аспекти интеракције ласерског зрачења са формираном плазмом и тзв. екранирања плазме. Екранирање се у многим случајевима сматра изузетно неповољном околношћу, јер се њоме ефективно редукује ефикасност ласерске аблације, тј. интеракције ласер-узорак. У спектроскопији ласерски-индуковане плазме, екранирање може утицати на редуковање интензитета спектралних линија елемената узорка, а тиме и на тачност аналитичких метода заснованих на калибрационим кривама концентрације. У областима медицине које се заснивају на методама ласерске хирургије (офталмологија, стоматологија, неурохирургија, итд.) намеће се услов потпуног одсуства ове појаве, јер додатно загревање плазме и ударни таласи, који настају у тренутку екранирања могу довести до оштећења околног ткива. Могућност предвиђања и евентуалног параметризованог контролисања ове појаве представља и даље отворено

питање. С обзиром на потребу познавања ефективне вредности енергије предате материји од стране ласера, у дисертацији је урађена детаљна анализа одређивања критичних вредности састава плазме при којој поменута енергија доживљава значајно смањење. У сагледавању ефекта екранирања пронађена је корелисаност на основу понашања различитих физичких величина као што су: интензитети линија атомског и јонизованог спектра и прецизно утврђене количине аблиране масе металне мете. Утврђена је вредност прага интензитета ласерског зрачења на коме долази до значајније апсорпције у плазми на датим просторно-временским условима и дато тумачење ове појаве са аспекта могућих одговорних механизма.

Пето поглавље се односи на проучавање акустичке емисије ласерски-индуковане плазме [A1]. Резултати ових истраживања су показали линеарну зависност између излазне енергије ласерског импулса и акустичног одзива система до нивоа флукуације енергије од импулса до импулса. Испитивани су и облици профила ових сигнала у зависности од интензитета ласерског зрачења, као и врсте изложеног материјала узорка (мете). Применама детаљне статистичке анализе и одговарајућих нумеричких критеријума, утврђено је да постоје карактеристичне варијације акустичког одзива, својствених за различите врсте материјала мете (ваздух, алуминијум, бакар и злато). Поред ових истраживања, испитиване су и временски интегралне и временски разложене промене параметара доминантних учестаности акустичких сигнала са интензитетом ласерског зрачења, те је утврђено да се ови резултати могу користити за добијање додатних информација о стању плазме. Показано је, да се поред спектралне, акустичка емисија плазме може користити у дијагностичке сврхе, као и за бројне потенцијалне примене.

3. Списак публикација кандидата

Радови у међународним часописима:

- A[1] M. Burger, Z. Nikolić, *Frequency domain and wavelet analysis of the laser-induced plasma shock waves*, Spectrochim. Acta Part B: Atomic Spectroscopy, **110** (M21, 2015, IF = 3.18) 70
- A[2] M. Burger, M. Skočić, S. Bukvić, *Study of self-absorption in laser induced breakdown spectroscopy*, Spectrochim. Acta Part B: Atomic Spectroscopy, **101** (M21, 2014, IF = 3.14) 51
- A[3] M. Burger, M. Skočić, M. Ljubisavljević, Z. Nikolić and S. Djeniže, *Spectroscopic study of laser-induced indium plasma*, Eur. Phys. J. D, **68** (M22, 2014, IF = 1.40) 223
- A[4] M. Burger, M. Skočić, Z. Nikolić, S. Bukvić and S. Djeniže, *Broadening of the resonance Cu I lines in the laser-induced copper spectrum*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, **133** (M21, 2014, IF = 2.29) 589
- A[5] M. Skočić, M. Burger, Z. Nikolić, S. Bukvić and S. Djeniže, *Stark broadening in the laser-induced Cu I and Cu II spectra*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **46** (M21, 2013, IF = 1.92) 185701
- A[6] M. Skočić, M. Burger, S. Bukvić and S. Djeniže, *Line intensity and broadening in the In III spectrum*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **45** (M21, 2012, IF = 2.03) 225701
- A[7] M. Burger, M. Skočić, M. Gavrilov, S. Bukvić and S. Djeniže, *Experimental transition probabilities in the Ar III and Ar IV UV spectra*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **113** (M21, 2012, IF = 2.39) 1662
- A[8] M. Gavrilov, M. Skočić, M. Burger, S. Bukvić and S. Djeniže, *Line broadening in the neutral and ionized mercury spectra*, New Astronomy **17** (M22, 2012, IF = 1.86) 624

Радови представљени и штампани у целини или изводу у зборницима међународних конференција:

- 1) M. Burger, M. Skočić, Z. Nikolić and S. Djeniže, *Resonance indium spectral lines behavior in a laser-induced plasma*, 8th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), Beijing, China (2014)

- 2) M. Burger, M. Skočić, Z. Nikolić, S. Bukvić and S. Djeniže, *Plasma diagnostics of hydrogen-containing compounds using laser-induced breakdown spectroscopy*, 8th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), Beijing, China (2014)
- 3) M. Burger, Z. Nikolić, *Frequency domain and wavelet analysis of the laser-induced plasma acoustic waves*, 8th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), Beijing, China (2014)
- 4) M. Burger, M. Skočić, Z. Nikolić, S. Bukvić and S. Djeniže, *On the population processes in the In III*, 26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Zrenjanin, Serbia (2012) 281
- 5) M. Skočić, M. Burger, S. Bukvić and S. Djeniže, *Stark broadening in the In III spectrum*, 26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Zrenjanin, Serbia (2012) 285

Радови штампани у целини у зборницима домаћих конференција:

- 1) M. Burger, S. Bukvić, Z. Nikolić, A. Srećković, S. Djeniže, *Stark shift of the 305.2 nm and 322.1 nm Pb IV line*, VIII Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (2011) 44
- 2) M. Burger, A. Srećković, Z. Nikolić, S. Djeniže, *On The Energy Transfer Into The Cadmium Energy Diagram*, VIII Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (2011) 44
- 3) M. Gavrilov, M. Burger, M. Skočić, S. Bukvić, Z. Nikolić, S. Djeniže, *On the Lead Spectrum in the Laser Generated Plasma*, VIII Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (2011) 50
- 4) M. Burger, M. Skočić, M. Gavrilov, S. Bukvić, S. Djeniže, *Spectral Line Characteristics in the Sn IV Spectrum*, XVI National Conference of Astronomers of Serbia (2011) 13
- 5) M. Skočić, M. Burger, M. Ljubisavljević, S. Bukvić, *Profile of the 404.6 nm Hg I Line*, VIII Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (2011) 59
- 6) M. Skočić, M. Burger, M. Gavrilov, S. Bukvić, S. Djeniže, *Behavior of the 398.4 nm Hg II Spectral Line in the Helium and Argon Plasmas*, XVI National Conference of Astronomers of Serbia (2011) 14

ЗАКЉУЧАК

На основу поменутих чињеница, квалитета и оригиналности остварених резултата, Комисија сматра да докторска дисертација под називом:

"ДИЈАГНОСТИКА И ЕФЕКТИ ЕКРАНИРАЊА ЛАСЕРСКИ-ИНДУКОВАНЕ ПЛАЗМЕ"

представља значајан допринос научној области Физика јонизованих гасова и плазме, као и да су задовољени сви остали, Законом прописани, услови за одобравање њене одбране. Сходно томе, Комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да кандидату Милошу Бургеру одобри јавну одбрану докторске дисертације.

Београд, 10.07.2015.

Комисија:

Проф. др Зоран Петровић

редовни члан САНУ

научни саветник Института за физику

Проф. др Владимир Милосављевић

редовни професор Физичког факултета

Проф. др Стеван Ђениже

редовни професор Физичког факултета