

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на III седници Наставно-научног већа Физичког факултета одржаној 22. децембра 2021. године у Београду одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације „Динамика и експанзија ласерски произведене плазме“ (наслов на енглеском језику: *Dynamics and expansion of laser induced plasma*) из научне области Физика јонизованог гаса и плазме, коју је кандидат Дејан Дојић предао Физичком факултету Универзитета у Београду, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Дејан (Милан) Дојић је рођен **25.12.1992.** године у Лозници, Република Србија. Вере је православне. Основну школу "Боривоје Ж. Милојевић" завршио је у Крупњу, као и средњу електротехничку школу на смеру "Електротехничар рачунара" где је матурирао **2011.** године. Исте године уписује основне студије на Физичком факултету Универзитета у Београду на смеру "Теоријска и експериментална физика" на којем је дипломирао **2016.** године са просечном оценом **8,97 (осам и 97/100)**. На истом факултету уписује мастер студије **2016.** године из уже научне области "Физика јонизованог гаса и плазме" које је завршио исте године са просечном оценом **9,75 (девет и 75/100)**. Мастер рад под називом "Дијагностика ласерски индуковане плазме и утицај Доплеровог ефекта на ширење спектралних линија" урадио је под руководством проф. др Срђана Буквића и одбранио га са оценом **10** у јулу месецу **2017.** године. Из исте научне области уписао је докторске студије октобра месеца **2017.** године на Физичком факултету Универзитета у Београду. Све испите на докторским студијама предвиђене планом и програмом положио је са просечном оценом **10**. Од 29.11.2017. године запослен је као истраживач-приправник на Физичком факултету Универзитета у Београду, на пројекту "Одређивање атомских параметара на основу облика спектралних линија" (ев. бр. 171008), који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Од 25.11.2020. године је запослен као истраживач-сарадник на Физичком факултету Универзитета у Београду. Од школске 2016/2017 године ангажован је на Физичком факултету за извођење експерименталних и рачунских вежби у својству сарадника у настави.

1.2 Наставна активност

Као сарадник у настави на Физичком факултету Универзитета у Београду од школске 2016/2017 године Дејан Дојић учествује у извођењу наставе на предметима: Лабораторија физике 3 и Лабораторија физике 4, који припадају Катедри за опште курсеве на другој години, као и на предмету Физика атома и молекула који припада катедри за Физику атома, молекула, јонизованих гасова, плазме и квантну оптику.

За потребе рачунских вежби из предмета Физика атома и молекула написао је нерецензиран рукопис под називом „Увод у атомску физику кроз проблеме“.

1.3 Научна активност

Досадашњи истраживачки рад Дејана Дојића одвијао се у Лабораторији за Физику јонизованих гасова на Физичком факултету Универзитета у Београду, под менторством проф. др Срђана Буквића. Дејан Дојић је од новембра 2017. године био ангажован на пројекту „Одређивање атомских параметара на основу облика спектралних линија“ (ОН171008) Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под руководством проф. др Стевана Ђенижеа. Област истраживања кандидата је оптичка емисиона спектроскопија и дијагностика пробоја насталог у интеракцији снажних наносекундних ласерских импулса са чврстим метама (ласерски произведена плазма). Сви објављени научни радови Дејана Дојића припадају области ласерски произведене плазме. Током рада на проблематици Дејан Дојић је исказао интересовање за експериментално проучавање динамике и експанзије ласерски произведене плазме на металним метама, као и проблематици апсорпције ласерског зрачења у плазми. Поред поменуте проблематике, Дејан Дојић се бави и мерењима Штаркових ширина и помераја спектралних линија у ласерски произведеној плазми. Коаутор је на 8 научних радова објављених у водећим међународним часописима, од којих је 7 из категорије M21 а један рад је из категорије M22, са укупним импакт фактором од 24.831, као и четири саопштења са међународних скупова штампана у изводу (M34).

2. Опис предатог рада

2.1 Основни подаци

Докторска дисертација кандидата Дејана Дојића под називом „Динамика и експанзија ласерски произведене плазме“ (наслов на енглеском језику: *Dynamics and expansion of laser induced plasma*) урађена је у Лабораторији за физику јонизованих гасова на Физичком факултету Универзитета у Београду под менторством др Срђана Буквића, редовног професора Физичког факултета. Проф. др Срђан Буквић испуњава све услове за руковођење израдом поменуте докторске дисертације, те је на I седници Наставно-научног већа Физичког факултета одржаној 21. октобра 2020. године именован за ментора докторске дисертације. Тема докторске дисертације под називом „Динамика и експанзија ласерски произведене плазме“ прихваћена је на Колегијуму докторских студија Физичког факултета одржаног 30. септембра 2020. године, а затим и на седници Наставно-научног већа Физичког факултета одржаној 25. новембра 2020. године.

Дисертација има 102 стране (без насловне стране, захвалнице, сажетка на српском и енглеском језику, садржаја, ауторове биографије и изјава) и написана је на српском језику. Дисертација је подељена у шест поглавља. У библиографији је наведено 103 референце.

2.2 Предмет и циљ рада

Циљ рада из ког је произишла ова докторска дисертација је разматрање проблема везаних за експанзију плазме настале у интеракцији снажних наносекундних ласерских импулса на металној (бакарној) мети. С тога је овај рад посвећен унапређењу досадашњих

сазнања о експанзији ласерски произведене плазме добијених кроз њено експериментално проучавање.

У циљу давања доприноса тренутним научним сазнањима које се превасходно односе на велике брзине експанзије ласерски произведене плазме у наносекундној аблацији метала и објашњења механизма формирања дуплог слоја спроведена су опсежна мерења на ласерски произведеној плазми бакра заснована на оптичкој емисионој спектроскопији.

2.3 Преглед научних резултата приказаних у дисертацији

Ова докторска дисертација се састоји из шест поглавља.

У оквиру првог (уводног) поглавља дат је кратак преглед о мотивацији кандидата за изложену проблематику, направљен је историјски преглед најранијих научних резултата који су увели плазму у домен научног изучавања. Такође су дефинисане основне особине плазменог стања материје као и кратак преглед неких плазми које се могу наћи у природи и лабораторији. Дат је детаљан опис појма „ласерски произведена плазма“ са посебним нагласком на ласерски произведену плазму на металним метама.

Друго поглавље се односи на дијагностичке методе за карактеризацију плазме. У први план је стављена атомска емисиона спектроскопија као главна метода која је коришћена за добијање резултата у оквиру ове тезе. Уопштено је описан проблем термодинамичке равнотеже плазме, а посебно је посвећен ласерски произведеној плазми. Изложен је проблем нехомогености ласерски произведене плазме и сходно томе примена инверзне Абелове трансформације на цилиндрично симетричне, спектрално разложене бочне профиле добијене у емисији плазме, је детаљно описана. Изнете су основне методе за одређивање електронске температуре и концентрације засноване на оптичкој емисионој спектроскопији (Болцман плот и Саха-Болцман плот). У кратким цртама дат је преглед основних механизма који доводе до формирања профила спектралних линија.

Посебна пажња посвећена је опису експерименталне поставке у оквиру трећег поглавља. Детаљно су изнети принципи рада и особине основних елемената експерименталне поставке који су коришћени у истраживању (ICCD камера, McPherson спектрометар, EKSPLA Nd:YAG ласер), а затим је представљено функционисање експерименталне поставке у целини. Експериментална процедура је подељена на два дела: у првом делу је мерена брзина експанзије ласерски произведене плазме, док је у другом делу мерена апсорпција ласерског зрачења у плазми. Велики део мерних резултата добијен је током трајања наносекундног импулса Nd:YAG ласера због чега је било неопходно снимити ласерски импулс са што већом резолуцијом. Сноп ласерског импулса снимљен је директно на ICCD камери са експозицијом од 1 ns, при чему је испитан временски дрифт самог импулса за различите нивое појачања. Детектован је дрифт од 3 ns између минималног и максималног нивоа појачања, због чега је снага ласерског импулса подешавана употребом сета неутралних филтера са различитим оптичким густинама. У првом делу експеримента, брзине експанзије ласерски произведене плазме, у аргону као радном гасу на притиску од 50 Pa, мерене су на основу Доплеровог цепања спектралних линија у ударном таласу експандујућег плазменог фронта. На основу спектралних слика направљених у нултом реду употребом интерференционих филтера који пропуштју зрачење које одговара резонантној линији атома бакра Cu I на 327.39 nm и линији која припада јону бакра Cu II на 254.48 nm, употребом инверзне Абелове трансформације показано је да су сви емитери зрачења расподељени по јонизационим стањима груписани у танком слоју експандујућег плазменог фронта. За квалитативну процену брзине експанзије јонских врста примењена су мерења оптичког времена прелета (Optical Time Of Flight, OTOF). Такође, извршено је директно

посматрање наелектрисаних честица у плазми мерењима времена прелета (Time of Flight, TOF) конструкцијом једноставне електричне сонде. У другом делу експеримента извршено је мерење апсорпције ласерског зрачења у плазми. Највећи део мерења је извршен док траје ласерски импулс, за његове три различите снаге са временом експозиције од 1 ns. Праћење апсорпције извршено је употребом континуалног He-Ne ласера (633 nm) који обасјава плазму са стране, а на камери се детектује његов трансмитовани интензитет. Пре мерења је извршена провера временске стабилности интензитета He-Ne ласера. Мерења апсорпције су спроведена за различита времена кашњења у односу на ласерски импулс и на различитим растојањима од бакарне мете. На основу трансмитованог интензитета, уз претпоставку да се апсорпција покорава експоненцијалном закону са растојањем кроз апсорбер, за свако појединачно мерење добијен је профил апсорпције у плазми. Профил апсорпције подразумева просторну расподелу оптичке дебљине плазме. Применом инверзне Абелове трансформације на профил оптичке дебљине добијена је радијална расподела апсорпције, односно апсорпциони коефицијент у плазми. У случајевима када због присутности шума није могуће спровести инверзну Абелову трансформацију на профил оптичке дебљине, израчуната је средња вредност апсорпционог коефицијента. Знајући радијални профил апсорпције, уз претпоставку да доминантан механизам апсорбовања ласерског импулса долази од електрона у пољу јона, тзв. инверзни bremsstrahlung, одређени су коефицијенти апсорпције ласерског импулса Nd:YAG ласера на таласној дужини од 1064 nm.

У оквиру четвртог поглавља приказани су најважнији експериментални и теоријски резултати који су остварени у претходним истраживања у оквиру дате проблематике, а затим су представљени резултати ове тезе. Добијене су брзине експанзије плазменог фронта бакра у ударном таласу од око 50 km/s, што одговара енергији јона бакра од око 770 eV, на основу Доплеровог цепања неколико спектралних линија јона бакра Cu II на централној таласној дужини од 506 nm. Такође је установљено убрзање јона. На релативно великом растојању од мете, док плазмени фронт још увек није експандовао до тог места констатовано је светљење радног гаса (аргона), снимањем линије јона аргона Ar II на 506.20 nm. Светљење околног гаса приписано је тзв. prompt електронима који за време трајања ласерског импулса бивају емитовани из плазме и који су одговорни за екситацију и јонизацију атома аргона. Процењена је вредност енергије електрона од око 50 eV. Велике енергије и убрзање јона бакра приписани су ефекту дуплог слоја који се формира услед бежања електрона из граничног слоја плазме током интеракције са ласерским импулсом. TOF мерењима су детектовани prompt електрони. OTOF мерењима је показано да јони већег наелектрисања имају веће брзине експанзије. Велике вредности брзине неутралних атома су последица рекомбинације јона током експанзије. У мерењима апсорпције одређени су временски профили апсорбованог интензитета Nd:YAG ласерског импулса за три мерене снаге. Показано је да апсорбована енергија ласерског импулса линеарно зависи од његове упадне енергије. Установљено је да апсорпциони коефицијент узима највеће вредности у близини мете, а да са повећањем растојања од мете монотono опада. Такође је утврђено да вредност оптичке дебљине плазме достиже максималну вредност на крају ласерског импулса, а да након тога монотono опада. У дискусији је приказан једноставан квантитативни модел који описује могућност добијања термалних електрона велике енергије у граничном слоју плазме услед апсорпције ласерског импулса кроз механизам инверзног bremsstrahlung-a и на тај начин обезбеђује формирање дуплог слоја, што за последицу има убрзавање јона до великих брзина.

У петом поглављу изнети су закључци дисертације.

Шесто поглавље је посвећено додатку одређених целина. Детаљно је описана примена инверзне Абелове трансформације за системе са неодређеном границом, затим су

описане основне особине дисперзионог система са дифракционом решетком као и једноставан класичан опис пропације електромагнетних таласа у плазми.

3. Списак публикација

Из докторске дисертације произишли су чланци под редним бројевима 3 и 8.

1. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, *Characteristics of laser-induced plasma under reduced background pressure with Doppler spectroscopy of excited atomic species near the shockwave front*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 207 (2018) 73-77.

M21 [IF = 2.599]

doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.12.025

2. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, S. Djeniže, *Stark broadening and shift of selected Ge II spectral lines*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 484 (3) (2019) 3419-3424.

M21 [IF = 5.231]

doi: 10.1093/mnras/stz251

3. M. Skočić, **D. Dojić**, S. Bukvić, *Formation of double-layer in the early stage of nanosecond laser ablation*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 227 (2019) 57-62.

M21 [IF = 2.599]

doi: 10.1016/j.jqsrt.2019.02.007

4. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, S. Djeniže, *Experimental Stark widths of Mo I and Mo II spectral lines in visible region*, Journal of Physics B - Atomic, Molecular and Optical physics, 53 (7) (2020).

M22 [IF = 1.833]

doi: 10.1088/1361-6455/ab5547.

5. M. Skočić, **D. Dojić**, S. Bukvić, *Consideration of optical time of light measurement in laser induced plasmas*, Spectrochimica Acta Part B, 165 (2020).

M21 [IF = 3.109]

doi: 10.1016/j.sab.2020.105786

6. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, S. Djeniže, *Stark broadening measurements of Al II, Al III and He I 388.86 nm spectral lines at high electron densities*, Spectrochimica Acta Part B, 166 (2020).

M21 [IF = 3.109]

doi:10.1016/j.sab.2020.105816

7. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, S. Djeniže, *Experimental Stark broadening parameters for singly ionized molybdenum spectral lines in near UV*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 248 (2020).

M21 [IF = 2.599]

doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.106997

8. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, *Shielding effects in interaction of nanosecond laser pulses with solid target*, Spectrochimica Acta Part B 186 (2021). **M21 [IF = 3.752]**

doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.106997

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу:

1. M. Skočić, **D. Dojić**, S. Bukvić, *Shock Wave Expansion in Laser induced Plasma*, 29th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, 2018 **M34**

2. M. Skočić, **D. Dojić**, S. Bukvić, *Uncommon Line shapes of Cu I lines in Laser Induced Plasma*, 11th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, 2017 **M34**

3. M. Skočić, **D. Dojić**, S. Bukvić, *Model function for optical time of flight signal in Laser Induced plasma*, EMSLIBS 2019 **M34**

4. **D. Dojić**, M. Skočić, S. Bukvić, *Doppler spectroscopy of shock waves in laser induced plasma*, 29th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, 2018 **M34**

4. Провера оригиналности докторске дисертације

Извештај о оригиналности докторске дисертације ће бити накнадно достављен.

ЗАКЉУЧАК

На основу изложеног комисија закључује да је кандидат ДЕЈАН ДОЈИЋ у докторској дисертацији под називом „ДИНАМИКА И ЕКСПАНЗИЈА ЛАСЕРСКИ ПРОИЗВЕДЕНЕ ПЛАЗМЕ“ представио оригиналне научне резултате са значајним научним доприносом у области ФИЗИКЕ ЈОНИЗОВАНИХ ГАСОВА. Делови тезе кандидата су публиковани у истакнутим међународним часописима. Стога сматрамо да овај рад може да буде прихваћен као докторска дисертација и

ПРЕДЛАЖЕМО

Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану предате дисертације.

У Београду јануара 2022. године

Чланови комисије:



др Ђорђе Спасојевић
редовни професор
Универзитет у Београду – Физички факултет

др Милош Скочић
доцент
Универзитет у Београду – Физички факултет

др Мирослав Кузмановић
редовни професор
Универзитет у Београду – Факултет за Физичку Хемију