

Факултет за физичку хемију

(Број захтева)

(Датум)

Образац 2.
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Веће научних области
природних наука

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на извештај о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно члану 46. став 5. тачка 3. Статута Универзитета у Београду (Гласник Универзитета", број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата: **дипл. физикохем. Милоша (Драган) Момчиловића, студента докторских студија.**

КАНДИДАТ: дипл. физикохем. Милош (Драган) Момчиловић, студент докторских студија, пријавио је докторску дисертацију под називом: **"Интеракција зрачења импулсног ТЕА СО₂ ласера са бакарном метом: спектроскопија плазме и морфолошки ефекти".**

Универзитет је, дана 12.09.2013. године, својим актом, 02 број: 61206-3985/2-13 МЦ од 12.09.2013. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила: **"Интеракција зрачења импулсног ТЕА СО₂ ласера са бакарном метом: спектроскопија плазме и морфолошки ефекти".**

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације **дипл. физикохем. Милоша (Драган) Момчиловића, студента докторских студија,** образована је на седници Наставно-научног већа Факултета одржаној 20.06.2014. године, одлуком Наставно-научног већа Факултета, број 677/1 од 20.06.2014. године, у саставу:

Име и презиме члана Комисије	звање	научна област
1) др Мирослав Кузмановић	ванредни професор	физичка хемија - спектрохемија
2) др Милан Тртица	научни саветник	физичка хемија - ласери и њихова примена
3) др Иванка Холцлајтнер-Антуновић	редовни професор	физичка хемија - спектрохемија
4) др Шћепан Миљанић	редовни професор	физичка хемија - радиохемија и нуклеарна хемија
5) др Јелена Савовић	виши научни сарадник	физичка хемија - спектрохемија

Наставно-научно веће Факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **11.09.2014.** године.

Прилог:

1. Извештај Комисије са предлогом,
2. Одлука Наставно-научног већа Факултета о усвајању извештаја,
3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

Д е к а н
Факултета за физичку хемију

Проф. др Шћепан Миљанић

Na osnovu članova 103. i 104. Statuta Univerzitet u Beogradu - Fakulteta za fizičku hemiju, Nastavno-naučno veće Fakulteta, na XI redovnoj sednici, održanoj 11.09.2014. godine, donosi sledeću

O D L U K U

1.- Prihvata se pozitivni izveštaj Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **dipl. fizikohem. Miloša (Dragan) Momčilovića, studenta doktorskih studija**, pod nazivom: "**Interakcija zračenja impulsnog TEA CO₂ lasera sa bakarnom metom: spektroskopija plazme i morfološki efekti**", Komisije u sastavu:

- 1) dr Miroslav Kuzmanović, vanredni profesor, Fakultet za fizičku hemiju,
- 2) dr Milan Trtica, naučni savetnik, INN "Vinča",
- 3) dr Ivanka Holclajtner-Antunović, redovni profesor, Fakultet za fizičku hemiju,
- 4) dr Šćepan Miljanić, redovni profesor, Fakultet za fizičku hemiju,
- 5) dr Jelena Savović, viši naučni saradnik, INN "Vinča".

2.- Univerzitet je, dana 31.10.2013. godine, svojim aktom 02 broj: 61206-3985/2-13 MC od 12.09.2013. godine, dao saglasnost na predlog teme doktorske disertacije koja je glasila: "**Interakcija zračenja impulsnog TEA CO₂ lasera sa bakarnom metom: spektroskopija plazme i morfološki efekti**".

3.- Objavljeni rezultati koji čine deo doktorske disertacije:

Radovi u vrhunskim međunarodnim časopisima (M₂₁):

1. **M. Momčilović**, M. Trtica, J. Ciganović, J. Savović, J. Stašić, M. Kuzmanović, Analysis of copper surface features obtained using TEA CO₂ laser at reduced air pressure, Appl. Surf. Sci. **270** (2013) 486-494.
2. **M. Momcilovic**, J. Limpouch, V. Kmetik, R. Readelli, J. Savovic, D. Batani, J. Stasic, P. Panjan, M. Trtica, Surface modification of copper using high intensity, 10¹⁵ W/cm², femtosecond laser in vacuum, Appl. Surf. Sci. **258** (2012) 8908-8914.

Rad u međunarodnom časopisu (M₂₃):

1. M. Kuzmanovic, **M. Momcilovic**, J. Ciganovic, D. Rankovic, J. Savovic, D. Milovanovic, M. Stoilkjovic, M.S. Pavlovic and M. Trtica, Properties of plasma induced by pulsed CO₂ laser on a copper target under different ambient conditions, Phys. Scripta, рад прихваћен за штампу 2014. године.

4.- Izveštaj Komisije za ocenu i odbranu o urađenoj doktorskoj disertaciji dostavlja se Univerzitetu u Beogradu – Veću naučnih oblasti prirodnih nauka, radi davanja saglasnosti na isti.

5.- Po dobijenoj saglasnosti iz tačke 2., kandidat može da pristupi odbrani doktorske disertacije.

Odbrana doktorske disertacije je javna. Datum i mesto odbrane se oglašavaju na Web lokaciji Fakulteta i oglasnoj tabli Fakulteta, najmanje tri dana pre odbrane.

Doktorska disertacija se brani pred komisijom, koja po završenoj odbrani ocenjuje kandidata, utvrđujući da je "odbranio" ili "nije odbranio" disertaciju.

Odluku dostaviti:

- kandidatu,
- Komisiji,
- Stručnom veću
Univerziteta,
- Arhivi Fakulteta.

D e k a n
Fakulteta za fizičku hemiju

Prof. dr Šćepan Miljanić

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Факултет за физичку хемију

Београд

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милоша Д. Момчиловића, дипломираног физикохемичара

Одлуком Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију, на седници одржаној 20. VI 2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милоша Момчиловића, дипломираног физикохемичара, под насловом: **Интеракција зрачења импулсног ТЕА СО₂ ласера са бакарном метом: спектроскопија плазме и морфолошки ефекти.**

Ова тема одобрена је одлуком Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију на седници од 13. јуна 2013. године, а сагласност на предлог теме докторске дисертације Милоша Момчиловића добијена је на седници Већа научних области природних наука Универзитета у Београду која је одржана 12. септембра 2013. године. Кандидат Милош Момчиловић је урађену докторску дисертацију предао Факултету за физичку хемију 20. јуна 2014. године.

На основу прегледа и анализе дисертације подносимо Наставно-научном већу следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Општи подаци о докторској дисертацији

Докторска дисертација **Милоша Д. Момчиловића** написана је на 142 стране и садржи седам поглавља: **Увод** (2 стране), **Теоријски део** (36 страна), **Експериментални део** (17 страна), **Резултати и дискусија** (56 страна), **Закључак** (5 страна), **Литература** (13 страна) и **Прилози** (13 страна). У Прилозима је дата кратка биографија аутора и списак до сада објављених научних радова из области тезе. Такође, Прилози садрже и Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и

електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу, како је прописано правилима Универзитета о подношењу докторских теза на одобравање.

Рад садржи укупно 64 слике и 14 табела. Списак литературе садржи 125 референце које су поређане по редоследу појављивања у тексту.

У уводу је дат кратак приказ значаја и актуелности проблематике рада и предмет и циљ урађених истраживања.

У теоријском делу описани су најзначајнији процеси који прате интеракцију ласерског зрачења са метом, са посебним освртом на интеракцију зрачења импулсног ТЕА CO_2 ласера са бакарном метом. Дефинисани су основни појмови везани за ласерски индуковану плазму и њену примену као спектрохемијског извора. Такође, дат је опис карактеристичних морфолошких промена на чврстим метама које настају под дејством ласерског зрачења, као и приказ техника које су у овој дисертацији коришћене за карактеризацију површине бакарне мете пре и након озрачивања. На крају овог поглавља, укратко је дат преглед литературе везане за проблематику ове дисертације.

У експерименталном делу детаљно је описана реализована експериментална поставка. Наведене су основне карактеристике коришћених ласерских система, монохроматора и уређаја за детекцију светлости, као и уређаја који су коришћени за испитивање морфолошких и хемијских промена на површини бакарне мете пре и након озрачивања. Такође, детаљно је описана временски-интеграљена просторно-разложена емисиона спектроскопија ласерски индуковане плазме, метода која је коришћена у овој тези.

У делу резултати и дискусија, приказани су и дискутовани добијени резултати. Ово поглавље састоји се из две целине. Најпре су презентовани резултати испитивања морфолошких промена насталих на површини бакарне мете под дејством зрачења ТЕА CO_2 ласера. Такође, приказани су и ефекти дејства фемтосекундног ласерског зрачења на бакар. У другом делу дати су резултати спектроскопског испитивања плазме индуковане наносекундним ласерским зрачењем на бакарној мети. Приказани резултати односе се на испитивање утицаја састава и притиска околног гаса и анализу спектралне емисије плазме у циљу проналажења оптималних услова за добијање плазме. Могућност аналитичке примене плазме индуковане на притиску од 0,1 mbar ваздуха показана је на примеру одређивања трагова елемената у узорцима бакра и месинга.

У закључку су сумирани резултати докторске дисертације и указано је на могуће даље правце истраживања као и на евентуалну примену добијених резултата.

2. Приказ постигнутих резултата

Најпре су приказани и дискутовани резултати везани за морфолошке и хемијске промене изазване дејством зрачења импулсног наносекундног ТЕА СО₂ ласера на бакарну мету. Уочено је да при малом броју акумулираних импулса оштећења на површини бакарне мете имају скоро површински карактер. Са повећањем броја акумулираних импулса повећава се површина оштећених области, тако да оне добијају облик кратера. Дијаметар оштећења расте до 350 импулса, након тога долази до засићења. Кумулативно деловање ласерских импулса на храпавој површини метала доводи до формирања релативно глатких региона (условљених топљењем метала), што резултује у некој врсти ласерског полирања. Висока температура на бакарној мети индукује местимично присуство мехурића који су последица интензивног и брзог кључања загрејане површине праћене веома брзим хлађењем. Елементна анализа је показала да постоји тенденција пораста садржаја бакра и смањења садржаја кисеоника како се иде од неозраченог дела преко периферије озраченог дела до самог центра озрачивања. Са порастом броја акумулираних импулса укупан ефекат добијен озрачивањем је “чишћење” мете, које може бити од значаја за примену у електроници.

Ефекти деловања зрачења импулсног фемтосекундног ласера на бакарну мету зависе од интензитета примењеног ласерског зрачења. У режиму максималног ласерског интензитета ($5 \times 10^{15} \text{ W cm}^{-2}$) оштећења на мети су у форми кратера и њихова дубина и пречник се повећавају са бројем акумулираних ласерских импулса (након 50 импулса долази до засићења). Елементна анализа је показала да је кисеоник потпуно или у великој мери уклоњен са озрачене површине на којој остаје практично чист бакар. Са постепеним смањивањем густине енергије ласерског импулса оштећења на мети од облика кратера постају скоро површинска. При интензитету ласерског зрачења од $5 \times 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ на површини бакарне мете долази до појаве периодичних структура само на периферији озраченог региона. У случају великог слабљења интензитета ($5 \times 10^{12} \text{ W cm}^{-2}$) периодичне структуре простиру се по целој озраченој површини. Присуство периодичних структура на целој површини има значајну практичну примену у процесима фото литографије. Елементна анализа је показала да је

концентрација бакра смањена у региону обода кратера, док се концентрација кисеоника на ободу кратера повећала.

Други део дисертације односи се на спектроскопију плазме индуковане дејством зрачења наносекундног ТЕА CO_2 ласера на бакарну мету. За карактеризацију плазме коришћена је метода временски-интеграљене просторно-разложене оптичке емисионе спектроскопије. Испитиван је утицаја састава (ваздух, азот, аргон и хелијум) и притиска околног гаса на услове за стварање плазме и њене спектралне карактеристике. На константном притиску интензитет атомских линија бакра опада у редоследу $\text{He} > \text{Ar} > \text{N}_2 > \text{ваздух}$. Пораст притиска ваздуха, Ar и N_2 доводи до опадања интензитета спектралних линија бакра. Са друге стране, у атмосфери хелијума интензитет линије бакра петоструко расте са порастом притиска од 1 до 25 mbar. Највећи део истраживања ласерски индуковане плазме извршен је у атмосфери ваздуха. Спектрална емисија плазме на атмосферском притиску садржи углавном линије елемената конституената ваздуха док су од линија бакра идентификоване само ултимне. На притиску мањем од 10 mbar, у спектру су се јављале само линије бакра, што указује на то да се плазма индуковала јонизацијом испареног материјала мете и да није било јонизације околног ваздуха. Поређењем интензитета карактеристичне емисије плазме на различитим притисцима, дошло се до закључка да је 0,1 mbar оптимални притисак при којем се индукује бакарна плазма јер је праг енергије ласерског зрачења за формирање плазме најмањи, а интензитет емисије бакра највећи. На овом притиску плазма је полусферног облика, интензивно зелене боје и састоји се из две просторно одвојене области, које се у литератури уобичајено називају примарна и секундарна плазма. У емисионом спектру плазме индуковане на притиску ваздуха од 0,1 mbar идентификован је велики број атомских и јонских линија бакра. Примарна плазма је богатија јонским линијама бакра у односу на секундарну јер су повољнији услови побуђивања. На већим растојањима од мете емисиони спектар чине добро разложене интензивне линије са ниским интензитетом позадинског зрачења. Коришћењем методе Болцманове праве процењена температура плазме на растојању 8 mm од површине мете износила је 7700 K.

Просторно разложена временска еволуција спектралне емисије ласерски индуковане плазме коришћена је да се добију информације о временској еволуцији интензитета изабране спектралне линија бакра (324,75 nm) као и позадинског континуалног зрачења, на различитим растојањима од површине мете. У примарној плазми (на растојању ~ 2 mm од мете бакра) емисионим спектром доминира

континуално зрачење које потиче од закочног зрачења и рекомбинације електрона. У секундарној плазми (на растојањима већим од 5 mm од површине мете) континуално зрачење је слабог интензитета са скоро равним временским профилем. Са ширењем плазме концентрација високо енергетских честица и електрона опада. Као последица тога, на већим растојањима од зоне пробоја интензитет континуума у секундарној плазми драстично опада. Захваљујући дугом трајању ласерског импулса ($\sim 2 \mu\text{s}$) и ниском притиску околног ваздуха, дужина простирања плазме је релативно велика (15 mm) а интензитет емисије плазме споро опада. То је омогућило добијање добро разложених спектралних линије посматрањем емисије из одређених зона плазме без временског разлагања сигнала.

Прелиминарна мерења су показала да се плазма индукована ласерским зрачењем на металној мети, на притиску ваздуха од 0,1 mbar, може успешно применити за анализу садржаја трагова елемената присутних у узорцима бакра као и месинга. Добијене су ниске границе детекције реда величине до 10 ppm за све елементе присутне у узорцима.

3. Упоредна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе

Генерација плазме бакра под дејством импулсног ТЕА CO_2 ласера који ради у режиму интензитета од 30 до 110 MW cm^{-2} (интензитети коришћени у овој тези) релативно је тешко изводљива, и није забележена у литератури. Било је неких покушаја, али је плазма на бакарној мети добијена само са високим интензитетом ласерског импулса (430 MW cm^{-2}) на мети никла на коју је наносен слој/филм бакра (L.M. Cabalin, J.J. Laserna, *Spectrochim. Acta Part B*, **53** (1998) 723-730). Рад Хермана и др. (J. Hermann, C. Boulmer-Leborgne, I.N. Mihailescu, B. Dubreuil, *J. Appl. Phys.* **73** (1993) 1091-1100) бави се поред осталог и теоријским прорачуном енергије ТЕА CO_2 ласерског импулса која је потребна за испаравање бакарне мете и индуковање плазме. Добијене су вредности далеко веће од прага за стварање плазме пробојем у околном гасу и то за све испитиване атмосфере (Ar, N_2 и He). Због тога је закључено да су енергије ласерског импулса од 100 до 200 mJ довољне само за уклањање нечистоћа са површине бакарне мете и тренутно индуковање плазме у околном гасу, без даљег испаравања узорка.

Интеракција ласерског зрачења других типова ласера са бакарном метом је много чешће проучавана. У овим истраживањима најчешће је коришћен Nd:YAG ласер (R.W. Dreyfus, J. Appl. Phys. 69, (1991), 1721-1729). Овај тип ласера коришћен је и за спектроскопско проучавање карактеристика бакарне плазме у атмосфери неона (V. Kumar and R. K. Thareja, J. Appl. Phys. 67, (1990); 3260).

Због високе рефлективности бабра у инфрацрвеном делу спектра, модификација површине бакарне мете дејством зрачења ТЕА CO₂ ласера ретко је проучавана. У објављеним радовима испитане су могућности за повећање апсорптивности променом стања површине бакарне мете. Показано је да наношење танких слојева бакарних оксида повећава апсорптивност бакарне мете и самим тим могућност модификације површине бабра (G. Daurelio, G. Giorleo, Mater. Manuf. Process. 6 (1991) 577-603). Један од начина за повећање апсорптивности бабра је и наношење специјалних танких превлака црне боје које се лако уклањају (X.Y. Fang, K.C. Yung, Interconnection Printed Circuit Board, IEEE Transac. Electr. Packag. Manufactur. 29 (2006) 145-149). Присуство корозије, изазване хемијским третманом азотном киселином, такође повећава апсорптивност бакарне мете за CO₂ ласерско зрачење (C.A. Cottam, D.C. Emmony, Corrosion Sci. 41 (1999) 1529-1538). Међутим, интензитети ласерског зрачења у овим експериментима кретали су се од 10⁹ до 10¹⁴ W cm⁻², док је типичан интензитет ласерског зрачења коришћеног у овој дисертацији износио око 10⁸ W cm⁻². У литератури нема података о интеракцији тако малих интензитета ТЕА CO₂ ласерског зрачења са бакарном метом. Повећање апсорптивности бакарне мете, на таласној дужини рада CO₂ ласера (10.6 μm), је у овој докторској дисертацији остварено повећањем храпавости површине мете, као и снижењем притиска околног ваздуха што представља оригиналан научни допринос.

Интеракција импулсног фемтосекундног ласерског зрачења чији је интензитет реда величине 10¹⁵ W cm⁻² са бакарном метом готово да није позната у литератури. Са друге стране, све су важнија истраживања интеракције ласерског зрачења и металне површине услед развоја индустријских примена ласера (S. Bruneau, J. Hermann, G. Dumitru, M. Sentis, E. Axente, Appl. Surf. Sci. 248 (2005) 299-303).

4. Објављени радови који чине део тезе

Радови у врхунским међународним часописима (M₂₁):

3. **M. Momčilović**, M. Trtica, J. Ciganović, J. Savović, J. Stašić, M. Kuzmanović, Analysis of copper surface features obtained using TEA CO₂ laser at reduced air pressure, Appl. Surf. Sci. **270** (2013) 486-494.
4. **M. Momcilovic**, J. Limpouch, V. Kmetik, R. Readelli, J. Savovic, D. Batani, J. Stasic, P. Panjan, M. Trtica, Surface modification of copper using high intensity, 10¹⁵ W/cm², femtosecond laser in vacuum, Appl. Surf. Sci. **258** (2012) 8908-8914.

Рад у међународном часопису (M₂₃):

2. M. Kuzmanovic, **M. Momcilovic**, J. Ciganovic, D. Rankovic, J. Savovic, D. Milovanovic, M. Stoiljkovic, M.S. Pavlovic and M. Trtica, Properties of plasma induced by pulsed CO₂ laser on a copper target under different ambient conditions, Phys. Scripta, рад прихваћен за штампу 2014. године.

Саопштења на међународним скуповима

1. **M. Momčilović**, Dragan Ranković, B. Kuzmanović, M. Kuzmanović, M. Trtica, Optical emission measurements of plasma generated by infrared laser beam with Cu target, 10th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, September 21-24, 2010, Belgrade, Serbia, Proceedings, Volume I, B-P-10, p. 84-86.
2. M. Trtica, M. Kuzmanovic, **M. Momcilovic**, J. Ciganovic, D. Rankovic, M. Pavlovic, J. Savovic, M. Stoiljkovic, Laser induced optical emission spectroscopy, The IX Belarusian-Serbian symposium "Physics and diagnostics of laboratory and astrophysical plasmas", Minsk, Belarus September 16–21, 2012. Proceedings O3, p. 21-24.

5. Закључак комисије

На основу материјала изложеног у овом извештају сматрамо да резултати кандидата Милоша Момчиловића представљају оригиналан и значајан научни допринос проучавању интеракције ласерског зрачења са металним метама посебно у области спектроскопије ласерски индуковане плазме и модификације материјала. Обзиром на технолошки значај бакра и његових легура, посебно у електроници, добијени резултати могу бити од практичног интереса за модификацију и елементну анализу површина. Делови докторске дисертације кандидата публиковани су у виду три међународна рада.

Због свега наведеног предлажемо Наставно-научном већу Универзитет у Београду - Факултета за физичку хемију да докторску дисертацију кандидата Милоша Момчиловића под насловом „**Интеракција зрачења импулсног ТЕА СО₂ ласера са бакарном метом: спектроскопија плазме и морфолошки ефекти**“ прихвати и одобри њену одбрану, чиме би били испуњени сви услови да кандидат стекне звање доктора физичкохемијских наука.

У Београду, 4. јула 2014. године

Комисија

Др Мирослав Кузмановић, ванредни професор
Факултет за физичку хемију, Универзитет у Београду

Др Милан Тртица, научни саветник
Институт за нуклеарне науке Винча, Универзитет у Београду

Др Иванка Холцлајтнер Антуновић, редовни професор
Факултет за физичку хемију, Универзитет у Београду

Др Шћепан Миљанић, редовни професор
Факултет за физичку хемију, Универзитет у Београду

Др Јелена Савовић, виши научни сарадник
Институт за нуклеарне науке Винча, Универзитет у Београду
