

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Милке Јаковљевић

Одлуком бр. 5055/08-3 од 29.04.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Милке Јаковљевић под насловом

### **„Проучавање плазмонских наноструктура коришћењем спектроскопске елипсометрије“**

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

- **12.06.2014. године** - пријављена је тема за израду докторске дисертације
- **18.06.2014. године** - Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање
- **28.10.2014. године** - Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације
- **23.12.2014. године** - Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације
- **09.02.2015. године** - Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом: “Проучавање плазмонских наноструктура коришћењем спектроскопске елипсометрије“. (број одлуке 61206-389/2-15 од 9.2.2015. године).
- **26.03.2015. године** - предата је докторска дисертација на преглед и оцену
- **31.03.2015. године** - Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације
- **21.04.2015. године** - Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације.

Кандидаткиња се уписала на програм докторских академских студија на Електротехничком факултету у Београду, модул Наноелектроника и фотоника у школској 2008/2009. години, при чему је у школској 2013/2014. години имала статус мировања.

### 1.2. Научна област дисертације

Предмет ове дисертације је карактеризација плазмонских наноструктура коришћењем спектроскопске елипсометрије. Изучавање плазмонских наноструктура припада области нанофотонице, док се експериментална метода, тј. елипсометрија сврстава међу технике за оптичку карактеризацију материјала. Предмет истраживања ове дисертације припада докторским академским студијама на студијском програму Електротехника и рачунарство у оквиру модула „Наноелектроника и фотоника“.

Ментор у изради ове дисертације је др Радош Гајић, научни саветник у Институту за физику у Београду, који има богато искуство у области нанофотонице и елипсометрије. Поред тога, др Радош Гајић је вођа групе за физику уређених наноструктура и нових материјала (<http://www.graphene.ac.rs/>). Аутор је или коаутор великог броја научних радова, што у часописима са SCI листе, што саопштених на домаћим и међународним конференцијама. Као један од стручњака са великим искуством у области метаматеријала и фотонских кристала, али и у карактеризацији материјала коришћењем различитих спектроскопских техника, био је вођа два пакета на два европска ФП 7 пројекта, из којих је директно произашла ова докторска дисертација. Поред научног доприноса, др Радош Гајић је извео 2 доктораната и 3 мастер студента.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Милка М. Јаковљевић (Мирић) рођена је у Ваљеву 8. Маја 1984. године, где је похађала основну и средњу школу. Матурирала је у Ваљевској гимназији, на специјализовано математичком смеру. На Електротехничком факултету Универзитета у Београду, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, дипломирала је јула 2007. године са просечном оценом 9.76, док је једногодишње мастер студије похађала у школској 2007/2008. године на истом факултету и завршила са просечном оценом 10. Докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Наноелектроника и фотоника, уписала је у фебруару 2009. год. Од 1. Октобра 2008. године запослена је у „Центру за физику чврстог стања и нове материјале“ Института за физику у Београду као истраживач приправник, а 2010. год је унапређена у звање истраживач сарадник. Током докторских студија. Била је учесница више међународних конференција из области елипсометрије и плазмонице. Такође, учествовала је на два европска ФП 7 пројекта и то „NIM\_NIL“ и „Nanocharm“ који су директно утицали на ток израде ове дисертације.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 130 страна куцаног текста са 59 слика. Садржи насловну страну, изразе захвалности, кратак резиме рада на српском и енглеском језику, садржај, шест поглавља и списак коришћене литературе, која обухвата 90 референци. Наслови поглавља су следећи: 1. Увод, 2. Спектроскопска елипсометрија, 3. Дисперзија конфинираних површинских плазмона у правоугаоним фишнет структурама, 4. Спектроскопска

елипсометрија златних прекинутих прстенова у инфрацрвеном делу спектра, 5. Елипсометрија и корелационе тенике, 6. Закључак.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Дисертација даје приказ коришћења спектроскопске елипсометрије за изучавање плазмонских структура нанометарских димензија, како у блиском инфрацрвеном тако и у средње инфрацрвеном делу спектра. У уводном поглављу дат је кратак преглед плазмоники који укључује основне појмове везане за површинске плазмон поларитоне, као и за локализоване површинске плазмоне.

У Поглављу 2 представљена је спектроскопска елипсометрија. Дефинисани су основни појмови и дат преглед принципа ове технике, од концепта поларизације светлости, до рефлексије и трансмисије светлости на равним површинама, за две карактеристичне поларизације. Описане су основне елипсометријске конфигурације у оптичким и средње инфрацрвеном делу електромагнетског спектра. На примеру високо оријентисаног пиролитичког графита, приказана је примена елипсометрије за одређивање компоненти диелектричног тензора полупроводничких супстрата на инфрацрвеним учестаностима. На самом крају поглавља, описана је поставка елипсометријског експеримента коришћена у овом раду.

У Поглављу 3, приказано је како се коришћењем спектроскопске елипсометрије у блиском инфрацрвеном делу спектра може одредити дисперзија јако конфинираних површинских плазмон поларитона у фишнет структурама. На основу геометрије и састава фишнет структуре, а помоћу одговарајућег модела, оцењено је на којим учестаностима се могу очекивати оптичке екситације у фишнету при нормалној инциденцији. Затим су анализирани елипсометријски спектри из којих су издвојене дисперзије јако конфинираних површинских плазмон поларитона и то за две ортогоналне упадне равни. За потпунију интерпретацију елипсометријских резултата, израчуната су појачања поља на целом спектру и то на различитим местима у структури.

У Поглављу 4 приказана је спектроскопска елипсометрија златних прекинутих прстенова, чије се карактеристичне резонанце јављају у средње инфрацрвеном делу спектра. Ради интерпретације елипсометријских спектра израчунати су коефицијенти рефлексије за дату геометрију структуре у четири карактеристичне конфигурације. Централни део поглавља заузима анализа елипсометријских спектра за две ортогоналне упадне равни, при чему је једна равна симетрије структура. На крају поглавља, приказана је једна од могућих примена златних прекинутих прстенова за појачану инфрацрвену елипсометрију танког филма силицијум диоксида. Поглавље 5 говори о корелационим техникама које потпомажу или допуњују елипсометријске резултате, а последње Поглавље 6 представља закључак овог рада.

## **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 3.1. Савременост и оригиналност

Плазмоники је грана нанофотоники која се бави манипулацијом светлости на наноскали, при чему долази до кохерентног спрезања фотона са слободним електронима који осцилују на површини неког метала. При том спрезању, долази до конфинирања светлости у нанометарске запремине, док се манипулација светлосћу на наноскали базира на особинама простирућих и локализованих површинских плазмона. Са најновијим развојем

нанотехнологије, дошло је до интензивирања истраживања на пољу плазмонице, а то се пре свега односи на усавршавање финих процеса израде структура нанометарских димензија. Развој рачунара омогућава имплементацију снажних нумеричких алата, за које нису потребни суперрачунари и специјални ресурси, а који омогућавају адекватно моделовање плазмонских наноструктура. Нова открића су покренула неке нове примене плазмонских материјала, а за контролу процеса израде веома су важне технике за њихову карактеризацију.

У оквиру ове дисертације, формирана је стратегија и оригиналан приступ у карактеризацији плазмонских наноструктура коришћењем спектроскопске елипсометрије. За разлику од стандардних техника које су засноване на мерењима амплитуде рефлектованог или трансмитованог таласа, елипсометрија сама по себи мери однос амплитуда и разлику фаза за две карактеристичне поларизације, те на излазу даје две величине уместо једне. То је веома брза, недеструктивна, неинвазивна, апсолутна и веома прецизна техника, али захтева сложено моделовање за правилну интерпретацију експерименталних података. Одговарајуће нумеричке симулације омогућавају приступ неким информација које нису доступне у експерименту.

Тема ове дисертације је итекако актуелна и савремена. Приликом њене израде, до изражаја су дошли сви фактори који су и довели до модернизације плазмонице. Плазмонске наноструктуре великих површина су израђене у коришћењем наноимпринт литографије, затим су коришћени најсавременији нумерички алати (COMSOL Multiphysics, RETICOLO-2D) и истакнуте су неке од њихових могућих примена. Ипак, главно достигнуће се огледа у томе што је развијена методологија проучавања плазмонских наноструктура коришћењем спектроскопске елипсометрије.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Приликом израде ове дисертације, кандидаткиња је детаљно истражила постојећу релевантну литературу везану за проблематику којом се бави ова дисертација. Наведено је укупно 90 библиографских референци, укључујући и радове чији је аутор или коаутор кандидаткиња.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру предложене дисертације обухвата:

- Мерење елипсометријског одзива фишнет структура у блиском инфрацрвеном и видљивом делу спектра коришћењем SOPRA GES5E IR спектроскопског елипсометра (у конфигурацији са ротирајућим поларизатором);
- Симулације елипсометријских одзива фишнет структура у комерцијалном програмском пакету COMSOL Multiphysics, при чему се геометријски параметри оквирно узети на основу слика добијених помоћу скенирајуће електронске микроскопије (СЕМ). Поређење вишеструких симулација са експериментом, на основу најбољег слагања, омогућило је да се одреде одговарајући параметри структуре;
- Симулације (поново у пакету COMSOL Multiphysics) расподела поља за резонантне учестаности у фишнет структурама да би се одредила њихова природа, као и симулације коефицијената рефлексије и трансмисије за две различите поларизације ради недвосмислене интерпретације елипсометријских спектра;
- Вишеструке симулације елипсометријског одзива дводимензионално-периодично распоређених златних прекинутих прстенова, у комерцијалном програмском пакету RETICOLO-2D, при чему се геометријски параметри одређени на основу СЕМ слика,

док је диелектрична функција за злато одабрана на основу најбољег слагања симулација и експеримента;

- Рачунање расподеле струја и поља на резонантним учестаностима, које употпуњује интерпретацију елипсометријских спектра златних прекинутих прстенова.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Фишнет структуре су по свом саставу наизменично сложени танки слојеви метала и диелектрика у којима су дводимензионално избушене рупе. Ове структуре подржавају различите врсте електромагнетских модова, при чему су јако конфинирани плазмон поларитони у диелектричном слоју посебно занимљиви јер обећавају доста у нанооптици и интегрисаној оптоелектроници. Тренутно, једно од важних спорних питања за експлоатацију ових плазмона је њихово директно побуђивање и спрезање са упадном светлошћу. Један од начина да се превазиђе овај проблем је да се упадна светлост расеје у површинске плазмоне помоћу дводимензионалне решетке, као што су фишнет структуре. Зависност спрезања од поларизације упадне светлости је кључна ставка при адекватном дизајну фишнет структура, а у оквиру ове дисертације та особина је проучавана помоћу спектроскопске елипсометрије.

За разлику од фишнет структура у којима се јављају простирући плазмон поларитони, златни прекинути прстенови су плазмонске наноструктуре у којима се могу побудити локализовани површински плазмони. Велико појачање поља на резонантним учестаностима сугерише да се ове структуре могу користити за појачање сигнала у инфрацрвеној спектроскопији. Са друге стране, стрми скокови у спектрима фазе на резонанцијама повећавају осетљивост елипсометријског одзива на различите факторе из средине у којој се налазе прстенови, те се они у комбинацији са елипсометријом, могу користити као сензори индекса преламања.

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

На основу резултата произашлих из ове дисертације, може се рећи да је кандидаткиња показала способност да сагледа дату проблематику са више аспеката. Такође, показала је једнаку посвећеност експерименталном и теоријском раду и да до закључака долази комбиновањем ова два приступа. Овладала је научно-истраживачком методологијом и испољила иницијативу за самостално проналажење и решавање актуелних проблема, као и способност за самостални рад и за рад у истраживачком тиму.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Елипсометрија је спектроскопска техника која се традиционално примењује за веома прецизну недеструктивну карактеризацију хомогених танких филмова. Кандидаткиња је кроз дисертацију дала препознатљив методолошки допринос развоју елипсометрије као технике за проучавање сложених оптичких наноструктура, а конкретни доприноси су:

- 1) Примена елипсометрије за одређивање дисперзије јако конфинираних површинских плазмона у диелектричном слоју фишнет структура.
- 2) Одређивање динамичких варијабли које карактеришу површинске плазмон поларитоне у фишнет структурама на основу нумеричких симулација.

- 3) Примена елипсометрије за карактеризацију златних прекинутих прстенова, тј. одређивање резонантних учестаности, како за основни локализовани мод тако и за локализоване модове вишег реда.

Дат је одговор на кључна питања, као што су зависност учестаности, дисперзије и локалног појачања поља плазмонских резонанција од геометријских параметара и особина материјала (метал и супстрат) и начин на који се ове карактеристике манифестују у далеком пољу.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Допринос 1) је значајан јер фишнет структуре обећавају пуно у области нано-фотонице и интегрисане оптоелектронике управо због тога што се у њима могу побудити и водити јако конфинирани површински плазмони у диелектричном слоју. Нумеричко моделовање експерименталних спектра и њихова правилна интерпретација описана кроз ставку 2), омогућава приступ неким параметрима који се не могу добити експериментално, а веома су важни за експлоатацију фишнет структура.

Допринос наведен кроз тачку 3) се огледа у појачању поља на резонантним учестаностима, које омогућава појачани сигнал у инфрацрвеној спектроскопији. Ова особина се може користити при карактеризацију веома малог броја молекула. Са друге стране, оштри скокови у фази, такође на резонантним учестаностима сугеришу да се златни прекинути прстенови у комбинацији са СЕ могу користити како сензори загађења ваздуха, на њима формираних слојева итд.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Током своје досадашње научне каријере, Милка Јаковљевић (рођена Мирић) је била аутор или коаутор 11 радова у часописима од међународног значаја (са импакт фактором). Доприноси објављени у радовима [1]-[4], [12]-[16], представљају део основних резултата истраживања који су изложени у докторској дисертацији кандидаткиње.

#### Радови у врхунским међународним часописима ( $M_{21}$ ):

1. Jakovljević M. M., Isić G., Vasić B., Oates T. W. H., Hinrichs K., Bergmair I., Hingerl K., Gajić R.: *Spectroscopic ellipsometry of split ring resonators at infrared frequencies*, Applied Physics Letters, Vol 100, 2012, pp. 161105. (IF = 3.794)(ISSN: 0003-6951) doi: 10.1063/1.4703936
2. Jakovljević M. M., Isić G., Dastmalchi B., Bergmair I., Hingerl K., Gajić R.: *Polarization-dependent optical excitation of gap plasmon polaritons through rectangular hole arrays*, Applied Physics Letters Vol 106, 2015, pp. 143106. (IF = 3.515)(ISSN: 0003-6951) doi: 10.1063/1.4917510
3. Jakovljević M. M., Vasić B., Isić G., Gajić R., Oates T. W. H., Hinrichs K., Bergmair I., Hingerl K.: *Oblique incidence reflectometry and spectroscopic ellipsometry of split-ring resonators in infrared*, Journal of Nanophotonics, Vol 5, 2011, pp. 051815. (IF = 1.570) (ISSN: 1934-2608) doi: 10.1117/1.3601359
4. Humlíček J., Nebojsa A., Munz F., Mirić M., Gajić R.: *Infrared ellipsometry of highly oriented pyrolytic graphite*, Thin Solid Films, Vol 519, 2011, pp. 2624. (IF = 1.890)(ISSN: 0040-6090) doi: 10.1016/j.tsf.2010.12.091

5. Vasic B., Jakovljevic M. M., Isic G., Gajic R. B.: *Tunable metamaterials based on split ring resonators and doped graphene*, Applied Physics Letters, Vol 103, 2013, pp. 011102. (IF = 3.515)(ISSN: 0003-6951) doi: 10.1063/1.4812989
6. Matkovic A., Ralevic U., Chhikara M., Jakovljevic M. M., Jovanovic Dj., Bratina G., Gajic R.: *Influence of transfer residue on the optical properties of chemical vapor deposited graphene investigated through spectroscopic ellipsometry*, Journal of Applied Physics, Vol. 114, 2013, pp. 093505. (IF = 2.185)(ISSN: 0021-8979) doi: 10.1063/1.4819967
7. Isic G., Jakovljevic M.M., Filipovic M., Jovanovic Dj., Vasic B., Lazovic S., Puac N., Petrovic Z. Lj., Kostic R., Gajic R. B., Humlicek J., Losurdo M., Bruno G., Bergmair I., Hingerl K.: *Spectroscopic ellipsometry of few-layer graphene*, Journal of Nanophotonics, Vol 5, 2011, pp. 051809.(IF = 1.570) (ISSN: 1934-2608) doi: 10.1117/1.3598162
8. Bergmair I., Hackl W., Losurdo M., Helgert C., Isic G., Rohn M., Jakovljevic M. M., Mueller T., Giangregorio M., Kley E. B., Fromherz T., Gajic R., Pertsch T., Bruno G., Muehlberger M.: *Nano- and microstructuring of graphene using UV-NIL*, Nanotechnology, Vol 23, 2012, pp. 335301.(IF = 3.842) (ISSN: 0957-4484) doi: 10.1088/0957-4484/23/33/335301

Рад у међународном часопису (M<sub>22</sub>):

9. Matkovic A., Ralevic U., Isic G., Jakovljevic M. M., Vasic B., Milosevic I., Markovic D. M., Gajic R. B.: *Spectroscopic ellipsometry and the Fano resonance modeling of graphene optical parameters*, Physica Scripta, Vol T149, 2012, pp. 014069.(IF = 1.032)(ISSN: 0031-8949) doi: 10.1088/0031-8949/2012/T149/014069

Рад у међународном часопису (M<sub>23</sub>):

10. Kostic R. S., Miric M. M., Radic T., Radovic M. B., Gajic R. B., Popovic Z. V.: *Optical Characterization of Graphene and Highly Oriented Pyrolytic Graphite*, Acta Physica Polonica A, Vol 116, 2009, pp. 718.(IF = 0.433)(ISSN: 0587-4246)
11. Isic G., Vasic B., Miric M. M., Jokanovic B., Bergmair I., Gajic R. B., Hingerl K.: *Modelling the Variable Angle Reflection and Transmission from Metamaterial Slabs*, Acta Physica Polonica A, Vol 116, 2009, pp. 631.(IF = 0.433)(ISSN: 0587-4246)

Поглавље у књизи (M<sub>14</sub>):

12. Gajić R., Jakovljević M.: *Ellipsometry at nanoscale, Ellipsometry and Correlation Measurement*, Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 669-703. (ISBN: 978-3-642-33956-1)

Радови саопштени на међународним скуповима штампани у изводу (категирија M34):

13. Miric M., Vasic B., Isic G., Gajic R., Oates T., Hinrichs K., Bergmair I., Hingerl K.: *Analysis of the ellipsometric spectra of split ring resonators*, 3<sup>rd</sup> Mediterranean Conference on Nanophotonics MediNano-3, Belgrade 2010, Serbia, pp. 67.(ISBN: 978-86-8244-128-1)

14. Jakovljevic M. M., Isic G., Vasic B., Gajic R., Bergmair I., Hingerl K.: *Variable angle ellipsometry and polarized reflectometry of the fishnet metamaterials*, Photonica 2011, Belgrade 2011, Serbia, P.MM., pp. 85.(ISBN: 978-86-7306-110-8)
15. Jakovljevic M, Isic G., Vasic B., Gajic R., Oates T., Hinrichs K., Bergmair I., Hingerl K.: *Characterization of split ring resonators using spectroscopic ellipsometry*, Metamaterials 2011, Barcelona 2011, Spain, pp. 62.(ISBN: 978-952-67611-0-7)
16. Jakovljevic M. M., Isic G., Gajic R.: *Influence of hole size on angular dependence of rectangular fishnet structure's optical response*, Photonica 2013, Belgrade 2013, Serbia, pp. 148.(ISBN: 978-86-82441-36-6)



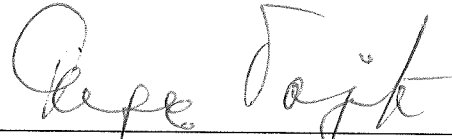
## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација кандидаткиње Милке Јаковљевић (рођене Мирић), под насловом „Проучавање плазмонских наноструктура применом спектроскопске елипсометрије“ представља актуелан и оригиналан научни допринос у области плазмонице и наноматеријала. Овај допринос се огледа у томе што је формулисана методологија карактеризације плазмонских наноструктура коришћењем спектроскопске елипсометрије. Посматрана су оба типа површинских плазмона и то простирућих, који се могу побудити у фишнет наноструктурама и локализованих, који се јављају у резонаторима на бази прекинутих прстенова. Оба типа плазмонских наноструктура су веома актуелна у нанофотоници, грани оптике која се интензивно развија. За њихов правилан дизајн и употребу неопходна је одговарајућа карактеризација коју, како увиђамо кроз рад кандидаткиње, управо и нуди спектроскопска елипсометрија. Кандидаткиња је током израде дисертације радила самостално, али и у оквиру истраживачког тима, што се најбоље огледа у објављеним научним радовима.

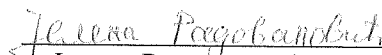
Оцењујући докторску дисертацију и имајући у виду да је анализирана проблематика актуелна и савремена с аспекта научног и стручног доприноса, верификована објављивањем чланака у више врхунских часописа са SCI листе и податак да су најважнији резултати добијени самосталним радом, Комисија констатује да је кандидаткиња Милка Јаковљевић испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Стога, са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Проучавање плазмонских наноструктура применом спектроскопске елипсометрије“ кандидаткиње Милке Јаковљевић (рођене Мирић) прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду,  
06.05.2015. год.

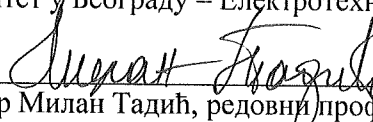
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



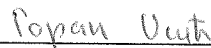
др Радош Гајић, научни саветник  
Универзитет у Београду – Институт за физику



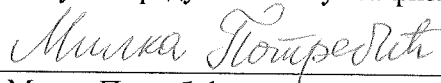
др Јелена Радовановић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



др Горан Исић, научни сарадник  
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Милка Потребнић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

