

НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ  
СТУДЕНТСКИ ТРГ 12  
11000 БЕОГРАД

На седници Наставно-научног већа Физичког факултета у Београду одржаној 25. фебруара 2015. године одређени смо за чланове комисије за преглед и оцену докторске дисертације под насловом: **„ИСПИТИВАЊЕ ОПТИЧКИХ ОСОБИНА ГРАФЕНА ПОМОЋУ СПЕКТРОСКОПСКЕ ЕЛИПСОМЕТРИЈЕ”** коју је Физичком факултету Универзитета у Београду пријавио Александар Матковић, дипломирани инжењер - мастер електротехнике и рачунарства. Докторска дисертација је предата Физичком факултету 23. фебруара 2015. године.

Након прочитане дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи

## **ИЗВЕШТАЈ**

### **Биографски подаци о кандидату**

Александар Матковић се као истраживач сарадник бави испитивањем оптичких особина графена на пројекту „Физика уређених наноструктура и нових материјала у фотоници“ под менторством др Радоша Гајића, научног саветника Института за Физику у Београду. Такође је учесник на три међународна и два билатерална пројекта, и руководи иновационим пројектом „Функционална мастила на бази графена и штампање радиофреквентних идентификатора“. До сада је као водећи аутор објавио пет радова из области истраживања за докторску дисертацију. Такође, Александар Матковић је коаутор на још десет публикованих радова из области физике графена. Осам радова су публиковани у међународним часописима категорије M21, четири у часописима категорије M22 и три рада публикована у међународним часописима категорије M51. Учествовао је до сада на седам домаћих и међународних конференција. Листа публикација је приказана на крају извештаја.

### **Предмет докторске дисертације**

Предмет докторске дисертације је испитивање оптичких особина графена у видљивом и ултраљубичастом делу спектра, помоћу техника спектроскопске елипсометрије. Осим саме диелектричне функције графена, испитује се и утицај који различити супстрати, средина којој је графен изложен, технике синтезе и допирање имају на диелектричну функцију графена. Такође испитује се могућност коришћења елипсометрије за контролу процеса трансфера графена као и контролу квалитета контакта између графена и металних (златних) електрода.

## Садржај и закључци дисертације

Докторска дисертација је организована у пет поглавља уз три прилога и списак коришћене литературе. Дисертација има две стотине и педесет страна и садржи педесет и седам слика, шеснаест табела и две стотине и четрдесет осам референци.

У уводном поглављу је представљена је електронска структура и оптичке особине графена. Дат је хронолошки преглед досадашњег истраживања оптичких особина графена и описана технолошка мотивација истраживања, као и значај и циљ дисертације.

У другом поглављу је приказано неколико метода за синтезу графена и уређаја на бази графена, са фокусом на технике коришћене у дисертацији. Такође у оквиру овог поглавља приказане су и технике карактеризације графена које су коришћене за корелацију са елипсомертарским мерењима.

У трећем поглављу дате су теоријске основе техника спектроскопске елипсометрије које су коришћене у дисертацији. Описан је процес интерпретације елипсомертарских мерења. Такође, у овом поглављу се анализира поузданост елипсомертарских мерења и интерпретације података, у случају када се мере атомски танки филмови, као што је графен. Дискутује се правилан избор супстрата, углава инциденције, корелационих мерења и функција минимизације.

Четврто поглавље садржи резултате и дискусију. Резултати су груписани у четири логичке целине. Најпре су приказани резултати везани за комплексни индекс преламања ексфолираног графена, затим су приказани резултати везани за елипсомертарско мапирање дебљине графена и слоја воде формираног између графена и супстрата при амбијенталним условима. Последње две целине овог поглавља испитују могућност коришћења елипсометрије за контролу квалитета трансфера графена и квалитета контакта графена са златним електродама.

У петом поглављу укратко су сумирани закључци истраживања везаних за дисертацију.

Прилози су подељени у три целине. У првом прилогу приказани су детаљи извођења који се користе у првом поглављу дисертације. У другом прилогу су детаљно приказани кораци свих техника синтезе коришћених у дисертацији. Трећи прилог приказује нумеричке кôдове коришћене за интерпретацију елипсомертарских мерења.

Оптичке особине ексфолираног графена и графена добијеног депозицијом из гасне фазе испитиване су користећи технике спектроскопске елипсометрије. Процес интерпретације елипсомертарских података је оптимизован за случај када се испитују моно-атомски филмови на различитим супстратима (танки  $\text{SiO}_2$  филмови, транспарентни или метални супстрати). Такође истакнут је значај коришћења корелационих мерења за формирање оптичких модела. Комплексни индекс преламања графена добијен је помоћу математичке инверзије (енг. *point-by-point inversion*). Предложена је функција за параметризовање комплексног индекса преламања графена која се заснива на Фано резонантном профилу. Такође, коришћено је елипсомертарско мапирање помоћу кога је реконструисана просторна расподела атомски танког слоја воде који остаје заробљен између графена и супстрата при амбијенталним условима синтезе.

Осим наведеног, дисертација испитује и могућности коришћења елипсометрије за контролу квалитета у процесима синтезе уређаја на бази графена. Испитан је утицај који остаци од резиста имају на оптичке особине графена при трансферу на транспарентне супстрате. Овај проблем је значајан и за оптимизацију саме технике мерења, као и за технологију трансфера графена. Наиме, мерења веома танких слојева (неколико нанометара) остатака трансфер резиста на транспарентним супстратима је веома захтевно, пошто долази до готово занемарљиве промене у фази поларизације која је од кључног значаја за елипсомертарска мерења ултра-танких филмова. Са стране технологије трансфера графена, ови резултати су значајни за примене графена као транспарентне електроде. Примера ради, за примене графенских електрода у флексибилним органским диодама потребно је трансферовати графен добијен депозицијом из гасне фазе неколико пута на транспарентну подлогу. За развој ове технологије неопходно је имати уређај који може брзо и поуздано да детектује присуство остатака резиста након трансфера сваког слоја графена, јер свега неколико нанометара резиста може значајно да повећа отпорност транспарентне електроде. У дисертацији је показано да праћењем промене индекса преламања графена је могуће детектовати присуство остатака трансфер резиста.

Осим утицаја остатака трансфер резиста, у дисертацији се испитује и утицај интеракције графена са металним супстратом на оптичке особине графена. Ова истраживања су значајна и за испитивање фундаменталних особина графена, као и за контролу квалитета у процесу синтезе графенских уређаја. Показано је да су промене у оптичким особинама графена у ултраљубичастом делу спектра последица више-честичне интеракције између ексцитонског стања у околини  $M$ -тачке и електронских стања у графену у близини Ферми нивоа. Показано је да у случају када графен интерагује са металним супстратом долази до супресије интеракција између електрона и шупљина у  $M$ -екситону за чак неколико стотина  $meV$ , што за последицу има плави померај апсорбционог максимума у ултраљубичастом делу спектра. Такође, показано је да је графен на златном супстрату  $p$ -допиран, као и да је померај Ферми нивоа у графену неколико пута мањи од теоријски очекиване вредности. Умањени трансфер наелектрисања између графена и златног супстрата је последица слоја воде заробљеног између графена и супстрата при процесу трансфера. Са стране контроле квалитета уређаја на бази графена, ови резултати су значајни јер демонстрирају како је помоћу без-контактне технике могуће проверити квалитет контакта између графена и златних електрода.

На основу истраживања изведених у оквиру докторске дисертације објављена су три рада у врхунским међународним часописима, један рад у истакнутом међународном часопису и један рад у ревијалном међународном часопису (импакт фактори су наведени за годину у којој је рад објављен):

1.  $M_{21}$ , импакт фактор: 2.259 (ISSN: 0021-8979)  
**A. Matković, M. Chhikara, M. Milićević, U. Ralević, B. Vasić, Dj. Jovanović, M. R. Belić, G. Bratina, and R. Gajić, "Influence of a gold substrate on the optical properties of graphene", J. Appl. Phys. 117, 015305, (2015).**
2.  $M_{21}$ , импакт фактор: 2.259 (ISSN: 0021-8979)  
**A. Matković, U. Ralević, M. Chhikara, M. M. Jakovljević, Dj. Jovanović, G. Bratina, and R. Gajić, "Influence of transfer residue on the optical properties of chemical vapor deposited graphene investigated through spectroscopic ellipsometry", J. Appl. Phys. 114, 123523 (2013).**
3.  $M_{21}$ , импакт фактор: 2.210 (ISSN: 0021-8979)  
**A. Matković, A. Beltaos, M. Milićević, U. Ralević, B. Vasić, Dj. Jovanović, and R. Gajić, "Spectroscopic imaging ellipsometry and Fano resonance modeling of graphene", J. Appl. Phys. 112, 123523 (2012).**
4.  $M_{22}$ , импакт фактор: 1.032 (ISSN: 0031-8949)  
**A. Matković, U. Ralević, G. Isić, M. M. Jakovljević, B. Vasić, I. Milošević, D. Marković, and R. Gajić, "Spectroscopic ellipsometry and the Fano resonance modeling of graphene optical parameters", Phys. Scr. T149, 014069, (2012).**
5.  $M_{51}$ , импакт фактор: / (ISSN 1818-2259)  
**A. Matković, and R. Gajić, "Spectroscopic imaging ellipsometry of graphene", SPIE Newsroom, doi: 10.1117/2.1201311.005227, (2013).**

На основу претходно изнетих података и имајући у виду досадашњи рад и постигнуте резултате, оригиналност и квалитет резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да кандидату Александру Матковићу прихвати докторску дисертацију „ **ИСПИТИВАЊЕ ОПТИЧКИХ ОСОБИНА ГРАФЕНА ПОМОЋУ СПЕКТРОСКОПСКЕ ЕЛИПСОМЕТРИЈЕ** ” и одобри јавну одбрану.

**Комисија:**

---

Др Радош Гајић,  
научни саветник Института за физику

---

Проф. др Иванка Милошевић, редовни професор  
Физичког факултета

---

Проф. др Иван Белча, ванредни професор  
Физичког факултета

---

Проф. др Зоран Радовић, редовни професор  
Физичког факултета у пензији

Прилог. Spisak objavljених радова Александра Матковића:

**A. Matković**, M. Chhikara, M. Milićević, U. Ralević B. Vasić, Dj. Jovanović, M. R. Belić, G. Bratina, and R. Gajić, "Influence of a gold substrate on the optical properties of graphene", J. Appl. Phys. **117**, 015305 (2015).

M. Kratzer, B. C. Bayer, P. R. Kidambi, **A. Matković**, R. Gajić, A. Cabrero-Vilatela, R. S. Weatherup, S. Hofmann, and C. Teichert, "Effects of PMMA transfer residues on the growth of organic semiconductor molecules on CVD graphene", Appl. Phys. Lett. **106**, 103101, (2015). (issue cover)

M. Chhikara, E. Pavlica, **A. Matković**, R. Gajić, and G. Bratina, "Effect of water layer at SiO<sub>2</sub>/graphene interface on pentacene morphology", Langmuir **30**, 11681-11688, (2014).

M. Chhikara, E. Pavlica, **A. Matković**, A. Beltaos, R. Gajić, and G. Bratina, "Pentacene on graphene: differences between single layer and bilayer", Carbon **69**, 162-168, (2014).

A. Beltaos, A. G. Kovačević, **A. Matković**, U. Ralević, S. Savić-Šević, Dj. Jovanović, B. M. Jelenković, and R. Gajić, "Femtosecond laser induced periodic surface structures on multi-layer graphene", J. Appl. Phys. **116**, 204306, (2014).

A. Beltaos, A. Kovačević, **A. Matković**, U. Ralević, Dj. Jovanović, B. Jelenković, and R. Gajić, "Damage Effects on Few-layer Graphene from Femtosecond Laser Interaction", Phys. Scr. **T162**, 014015, (2014).

M. Kratzer, S. Klima, C. Teichert, B. Vasić, **A. Matković**, M. Milićević, and R. Gajić, "Layer dependent wetting in parahexaphenyl thin film growth on graphene", E-Jour. Surf. Sci. and Nanotech. **12**, 31-39, (2014).

D. Todorović, I. Salom, Dj. Jovanović, **A. Matković**, M. Milićević, and M. Radosavljević, "Graphene microphone", AES Convention **136**, 9063, (2014).

**A. Matković**, U. Ralević, M. Chhikara, M. M. Jakovljević, Dj. Jovanović, G. Bratina, and R. Gajić, "Influence of transfer residue on the optical properties of chemical vapor deposited graphene investigated through spectroscopic ellipsometry", J. Appl. Phys. **114**, 123523 (2013).

**A. Matković**, and R. Gajić, "Spectroscopic imaging ellipsometry of graphene", SPIE Newsroom, doi: 10.1117/2.1201311.005227, (2013).

B. Vasić, M. Kratzer, **A. Matković**, A. Nevsad, U. Ralević, Dj. Jovanović, C. Ganser, C. Teichert, and R. Gajić, "Atomic force microscopy based manipulation of graphene using dynamic plowing lithography", Nanotechnology **24**, 015303, (2013).

D. Stojanović, **A. Matković**, S. Aškračić, A. Beltaos, U. Ralević, Dj. Jovanović, D. Bajuk-Bogdanović, I. Holclajtner-Antunović, and R. Gajić, "Raman spectroscopy of graphene: doping and mapping", Phys. Scr. **T157**, 014010, (2013).

M. Kratzer, S. Klima, C. Teichert, B. Vasić, **A. Matković**, U. Ralević, and R. Gajić, "Temperature dependent growth morphologies of parahexaphenyl on SiO<sub>2</sub> supported exfoliated graphene", J. Vac. Sci. Technol. B **31**, 04D114, (2013).

**A. Matković**, A. Beltaos, M. Milićević, U. Ralević, B. Vasić, Dj. Jovanović, and R. Gajić, "Spectroscopic imaging ellipsometry and Fano resonance modeling of graphene", *J. Appl. Phys.* **112**, 123523 (2012).

**A. Matković**, U. Ralević, G. Isić, M. M. Jakovljević, B. Vasić, I. Milošević, D. Marković, and R. Gajić, "Spectroscopic ellipsometry and the Fano resonance modeling of graphene optical parameters", *Phys. Scr.* **T149**, 014069, (2012).

Предавања:

**A. Matković**, "Story of graphene", (two part lecture), Texas A&M University at Qatar, (2014).

**A. Matković**, A. Beltaos, M. Milićević, U. Ralević, B. Vasić, Dj. Jovanović, and R. Gajić, "Spektroskopska nulirajuća elipsometrija grafena", (talk), 6. Radionica Fotonike, Kopaonik, Serbia, (2013).

**A. Matković**, U. Ralević, A. Beltaos, M. M. Jakovljević, G. Isić, B. Vasić, Dj. Jovanović, and R. Gajić, "Spektroskopska Elipsometrija Grafena", (talk), 5. Radionica Fotonike, Kopaonik, Serbia, (2012).

Постер презентације:

**A. Matković**, U. Ralević, M. Chhikara, M. M. Jakovljević, Dj. Jovanović, G. Bratina, and R. Gajić, "Spectroscopic ellipsometry of chemical vapor deposited graphene transferred onto a dielectric substrate", (poster presentation), Photonica 2013, Belgrade, Serbia, (2013).

**A. Matković**, A. Beltaos, U. Ralević, M. M. Jakovljević, G. Isić, B. Vasić, Dj. Jovanović, Z. Lazić, M. M. Smiljanić, D. Vasiljević-Radović, and R. Gajić, "Spectroscopic ellipsometry measurements of doped graphene", (poster presentation - best poster award), Graphene 2012, Brussels, Belgium, (2012).

**A. Matković**, U. Ralević, G. Isić, M. M. Jakovljević, B. Vasić, I. Milošević, D. Marković, and R. Gajić, "Spectroscopic ellipsometry and the Fano resonance modeling of graphene optical parameters", (poster presentation), Photonica 2011, Belgrade, Serbia, (2011).

**A. Matković**, U. Ralević, G. Isić, M. M. Jakovljević, and R. Gajić, "Optical Characterization of Single Layer and Few Layer Graphene", (poster presentation), XVIII Symposium on Condensed Matter Physics SFKM 2011, Belgrade, Serbia, (2011).

**A. Matković**, U. Ralević, G. Isić, M. M. Jakovljević, and R. Gajić, "Optical Characterization of Single Layer and Few Layer Graphene", Graphene 2011 (Imaginenano 2011), Bilbao, Spain, (2011).