

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Марка Опачића за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр.5022/12-1 од 04.07.2017. године именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Марка Опачића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под радним насловом „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије” (енг. „Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy”).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Марко Опачић је рођен 30.06.1988. године у Београду, где је 2007. године завршио Пету београдску гимназију. Исте године уписао је основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Дипломирао је на смеру Сигнали и системи септембра 2011. године са просечном оценом 9.44. Мастер студије завршио је септембра 2012. године на истом факултету, смер Сигнали и системи, са просечном оценом 10.00. Октобра исте године започео је докторске студије на смеру Наноелектроника и фотоника на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

1.2 Стечено научноистраживачко искуство

У тренутку пријаве теме кандидат има статус активног студента са уписаном школском 2016/17. годином.

У току докторских студија, до подношења захтева за одобрење теме докторске дисертације, Марко Опачић је испунио све обавезе предвиђене студијским планом и програмом. Положио је следеће испите:

1. Линеарни робусни системи (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
2. Моделовање наноструктура (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
3. Оптичке особине полупроводничких хетероструктура (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
4. Специјалне функције (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),

5. Енглески језик (Оцена: 10, ЕСПБ: 6),
6. Електричне и оптичке карактеристике материјала у наноелектроници и фотоници (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
7. Простирање оптичких таласа у комплексним срединама (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
8. Нелинеарни мултиваријабилни системи (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
9. Скенирајућа микроскопија у нанонауци и нанотехнологији (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),
10. Спектроскопија чврстих материјала (Оцена: 10, ЕСПБ: 9),

и испунио следеће обавезе:

1. Научно-стручни рад (ЕСПБ: 3),
2. Студијски истраживачки рад I (ЕСПБ: 15),
3. Студијски истраживачки рад II (ЕСПБ: 15),

остваривши укупно 120 ЕСПБ и просечну оцену 10.00. Кандидат је такође успешно положио испит о подобности теме и кандидата (докторски испит), пред комисијом у саставу:

1. др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Ненад Лазаревић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за физику
3. др Миодраг Тасић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Јавно усмено излагање је одржано 25.08.2017. године, при чему је добио оцену „задовољно“.

Кандидат је научно-истраживачки рад започео октобра 2012. године у Центру за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику, где је запослен од 01.11.2012. године као истраживач приправник. Ангажован је на пројекту ИИИ45018 „Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокompозити“, којим руководи академик Зоран В. Поповић, финансираном од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. У звање истраживач сарадник изабран је септембра 2014. године.

Марко Опачић је коаутор шест радова у међународним часописима са СЦИ листе (четири рада су у ужој области дисертације), од којих је пет објављено у врхунским међународним часописима категорије M21, а један у међународном часопису категорије M23. До сада је учествовао на више међународних конференција.

Радови у врхунским међународним часописима – M21

- 1) N. Lazarević, E. S. Božin, M. Šćepanović, M. Opačić, Hechang Lei, C. Petrovic and Z. V. Popović, Probing IrTe₂ crystal symmetry by polarized Raman scattering, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 224301 (DOI: 10.1103/PhysRevB.89.224301, IF = 3.718, ISSN: 2469-9969)
- 2) Z. V. Popović, M. Šćepanović, N. Lazarević, M. Opačić, M. M. Radonjić, D. Tanasković, H. Lei, and C. Petrovic, Lattice dynamics of BaFe₂X₃ (X = S; Se) compounds, *Phys. Rev. B* **91** (2015) 064303 (DOI: 10.1103/PhysRevB.91.064303, IF = 3.718, ISSN: 2469-9969)

- 3) M. Opačić, N. Lazarević, M. Šćepanović, H. Ryu, H. Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Evidence of superconductivity-induced phonon spectra renormalization in alkali-doped iron selenides, *Journal of Physics: Condensed Matter* **27** (2015) 485701 (DOI: 10.1088/0953-8984/27/48/485701, IF = 2.209, ISSN: 0953-8984)
- 4) H. Ryu, K. Wang, M. Opačić, N. Lazarević, J. B. Warren, Z. V. Popović, E. S. Bozin, and C. Petrovic, Sustained phase separation and spin glass in Co-doped $K_xFe_{2-y}Se_2$ single crystals, *Phys. Rev. B* **92** (2015) 174522 (DOI: 10.1103/PhysRevB.92.174522, IF = 3.718, ISSN: 2469-9969)
- 5) M. Opačić, N. Lazarević, M. M. Radonjić, M. Šćepanović, H. Ryu, A. Wang, D. Tanasković, C. Petrovic, and Z. V. Popović, Raman spectroscopy of $K_xCo_{2-y}Se_2$ single crystals near the ferromagnet-paramagnet transition, *Journal of Physics: Condensed Matter* **28** (2016) 485401 (DOI: 10.1088/0953-8984/28/48/485401, IF = 2.209, ISSN: 0953-8984)

Рад у међународном часопису – М23

- 1) M. Opačić and N. Lazarević, Lattice dynamics of iron chalcogenides – Raman scattering study, *J. Serb. Chem.Soc.* (2017), (DOI: 10.2298/JSC170321077O, IF = 0.822, ISSN: 1820-7421)

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу – М34

- 1) M. Opačić, N. Lazarević, M. M. Radonjić, M. Šćepanović, H. Lei, D. Tanasković, C. Petrovic, and Z. V. Popović, “Raman scattering study of KCo_2Se_2 ”, *Twelfth Young Researchers' Conference - Materials Science and Engineering*, p. 29, Belgrade, Serbia, December 11th-13th, (2013).
- 2) N. Lazarević, M. Opačić, M. Šćepanović, H. Ryu, H. Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović: “Raman Scattering in Iron-Based Superconductors and Related Materials”, *XLIX Symposium on Condensed Matter Physics, SFKM 2015*, p. 29, Belgrade, Serbia, September 7th - 11th, (2015).
- 3) M. Opačić, N. Lazarević, M. Šćepanović, H. Ryu, H. Lei, C. Petrovic, and Z. V. Popović: “Suppression of vacancy ordering and phonon energy renormalization in Co-doped $K_xFe_{2-y}Se_2$ single crystals”, *Fourteenth Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering*, p. 33, Belgrade, Serbia, December 9th-11th, (2015).
- 4) N. Lazarević, M. Opačić, M. Radonjić, D. Tanasković, H. Ryu, M. Šćepanović, C. Petrovic, and Z. V. Popović: “Vacancies and phase separation in pure and transitional metal doped $K_xFe_{2-y}Se_2$ ”, *International Workshop on Iron-based superconductors*, p. 67, Munich, Germany, September 13th-16th, (2016).

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу научно-истраживачке и стручне активности и до сада остварених резултата може се закључити да је Марко Опачић подобан кандидат за израду докторске дисертације на тему:

„Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије" („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy"). Број објављених научних радова и положен докторски испит, као и претходно наведене истраживачке активности у оквиру теме докторске дисертације показују спремност за самосталан рад и посвећеност датој теми, што иде у прилог одобрења за рад на поменутој теми.

2. Предмет и циљ истраживања

У протеклом периоду технолошки напредак био је условљен развојем полупроводничке електронике. Направе су постајале све мањих димензија, комплексније структуре и брже. Даље повећање фреквенције рада полупроводничких уређаја онемогућено је услед губитака снаге. Овај проблем могуће је превазићи преласком на нову, суперпроводну електронику. Поред температуре прелаза у суперпроводно стање, друга два параметра кључна за примену суперпроводних материјала су критична густина струје и критично магнетно поље. Материјали на бази FeSe се због својих јединствених својстава намећу као логичан избор. Данас су $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ најшире коришћени материјали у електроенергетским системима, док су материјали из ове групе погодни и за примену код МАГЛЕВ возила. У области електронике широка могућност примене Џозефсонових спојева (SQUID) пружа огромну перспективу овим материјалима. Свеобухватно проучавање суперпроводника на бази гвожђа даје потребну основу на том путу.

Кандидат се превасходно бави испитивањем вибрационих особина материјала из групе суперпроводника на бази гвожђа. Први познати материјал из ове групе, $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$, прелази у суперпроводно стање на температурама испод 30 K и има јасно одвојену антиферромагнетну фазу са уређеним ваканцијама гвожђа и металну/суперпроводну кристалну фазу без уређења ваканција. Када се атоми гвожђа потпуно замене атомима кобалта, материјал губи суперпроводна својства, али поседује феромагнетно уређење на ниским температурама. У склопу свог истраживања, кандидат проучава и утицај температуре и допирања на фононска својства наведених материјала.

Циљ истраживања је испитивање еволуције двеју кристалних фаза у монокристалима $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ допираним кобалтом у зависности од допирања. На основу анализе фононских спектра утврдиће се детаљна кристална структура ових материјала. Поред тога, циљ је утврђивање међусобне корелисаности магнетног уређења и електронске структуре са вибрационим особинама испитиваних материјала.

Истраживање у оквиру ове теме базираће се на следећој литератури:

1. E. Dagotto „Colloquium: The unexpected properties of alkali metal iron selenide superconductors”, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 849 (2013).
2. A. M. Zhang, Q. M. Zhang „Electron-phonon coupling in cuprate and iron-based superconductors revealed by Raman scattering”, *Chin. Phys. B* **22**, 087103 (2013).
3. A. M. Zhang, Q. M. Zhang „Raman scattering in iron-based superconductors”, *Mod. Phys. Lett. B* **26**, 1230020 (2012).
4. M. K. Wu, P. M. Wu, Y. C. Wen, M. J. Wang, P. H. Lin, W. C. Lee, T. H. Chen, C. C. Chang „An overview of the Fe-chalcogenide superconductors”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 323001 (2015).
5. Wei Bao „Structure, magnetic order and excitations in the 245 family of Fe-based superconductors”, *J. Phys.: Cond. Matter* **27**, 023201 (2015).

6. G. R. Stewart „Superconductivity in iron compounds”, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1589 (2011).
7. J. Guo, S. Jin, G. Wang, S. Wang, K. Zhu, T. Zhou, M. He, X. Chen „Superconductivity in the iron selenide $K_xFe_2Se_2$ ($0 < x < 1$)”, *Phys. Rev. B* **82**, 180520 (2010)
8. N. Lazarević, M. Abeykoon, P. W. Stephens, H. Lei, E. S. Bozin, C. Petrovic, Z. V. Popovic „Vacancy-induced nanoscale phase separation in $K_xFe_{2-y}Se_2$ single crystals evidenced by Raman scattering and powder x-ray diffraction”, *Phys. Rev. B* **86**, 054503 (2012).
9. M. Cardona, *NATO ASI Ser. B*, **372**, 257 (2002).
10. H.-M. Eiter, P. Jaschke, R. Hackl, A. Bauer, M. Gangl, C. Pfleiderer „Raman study of the temperature and magnetic-field dependence of the electronic and lattice properties of MnSi”, *Phys. Rev. B* **90**, 024411 (2014).
11. H. Lei, H. Ryu, A. Frenkel, C. Petrovic „Anisotropy in $BaFe_2Se_3$ single crystals with double chains of FeSe tetrahedra”, *Phys. Rev. B* **84**, 214511 (2011).
12. Z. S. Gönen, P. Fournier, V. Smolyaninova, R. Greene, F. M. Araujo-Moreira, B. Eichhorn „Magnetic and transport properties of $Ba_6Fe_8S_{15}$ and $BaFe_2S_3$: Magnetoresistance in a spin-glass-like Fe(II) system”, *Chem. Mater.* **12**, 3331 (2000).

3. Полазне хипотезе

Хипотезе које ће бити испитиване и провераване у оквиру овог истраживања су следеће:

1. Монокристал $K_xFe_{2-y}Se_2$ има раздвојене структурне фазе на наноскали: антиферомагнетну са уређеним ваканцијама гвожђа и металну/суперпроводну без ваканција. Температура уређења ваканција и антиферомагнетног прелаза је око 560 K, док материјал у суперпроводно стање улази на температури од 30 K.
2. Код монокристала $K_xCo_{2-y}Se_2$ нема фазног раздвајања; овај материјал није суперпроводник, али испољава феромагнетно уређење испод 74 K.
3. Промене кристалне структуре материјала рефлектују се у раманским спектрима кроз промену броја фононских модова.
4. Квази-једнодимензионални материјали са специфичном структуром спинских лествица ($BaFe_2S_3$, $BaFe_2Se_3$, $TaFe_{1.25}Te_3$) имају антиферомагнетно уређење на ниским температурама. Поред тога, $BaFe_2S_3$ испољава суперпроводне особине испод 14 K при високом притиску.
5. Појава магнетног уређења и/или промена електронске структуре материјала на некој температури може утицати на сопствену енергију фонона, што се у спектрима јасно види кроз температурску зависност енергије и полуширине уочених фононских модова.

4. Научне методе истраживања

Сви резултати кандидата током рада на дисертацији биће добијени експерименталним мерењем Рамановог расејања и анализом добијених спектра. Ови резултати биће подржани нумеричким симулацијама у оквиру теорије функционала густине (DFT) у програмском пакету Quantum Espresso, у сарадњи са колегама из Лабораторије за примену рачунара у науци Института за физику Београд.

Мерења Рамановог расејања спроводиће се на свеже цепаним, оријентисаним монокристалним узорцима. Због осетљивости узорака на ваздух, сва мерења вршиће се у високом вакууму (реда

10^{-6} mbar). Током рада користиће се два експериментална уређаја: TriVista 557 и Jobin Yvon T64000, у микро-раманској конфигурацији са расејањем уназад. Системи су опремљени CCD детектором који се хлади течним азотом, као и микроскопом који служи за фокусирање ласерског снопа на површину реда неколико μm^2 и за прикупљање расејане светлости. Као извори светлости користиће се Ar^+/Kr^+ јонски гасни ласер и чврстотелни Nd:YAG ласер. Радиће се са малим снагама ласера (а које дају сигнал прихватљивог интензитета) да би се минимизирало локално загревање узорака. Нискотемпературска мерења вршиће се помоћу KONTI CryoVac криостата у коме се узорак хлади течним азотом (за минималне температуре до 80 K), односно течним хелијумом (за минималне температуре до 10 K).

Анализа и обрада измерених спектра вршиће се у програмском пакету Origin 2015. Она подразумева усредњавање и нормирање спектра, као и теоријско моделовање фононских модова одговарајућим профилима линија у циљу одређивања њихове енергије и полуширине, као најважнијих параметара за даљу анализу и интерпретацију добијених резултата.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни допринос ове дисертације може се поделити у следеће ставке:

1. Извршиће се означавање фононских модова који се појављују у спектрима монокристала $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ допираних различитим концентрацијама кобалта, као и у чистом $\text{K}_x\text{Co}_{2-y}\text{Se}_2$.
2. Испитаће се да ли се прелаз у суперпроводну фазу одражава на вибрационе раманске спектре $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ и на који начин.
3. Проучавање се промене кристалне структуре монокристала $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ допираних Со-атомима у зависности од нивоа допирања.
4. Утврдиће се да ли постоји утицај феромагнетног уређења у $\text{K}_x\text{Co}_{2-y}\text{Se}_2$ на фононски спектар и анализа тог утицаја.
5. Извршиће се означавање фононских модова у монокристалу $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$.
6. Испитаће се да ли постоје промене у фононским спектрима $\text{TaFe}_{1.25}\text{Te}_3$ при преласку у антиферомагнетно уређење и анализа тих промена.

6. План истраживања и структура рада

Најпре је потребно да се кандидат упозна са литературом везаном за Раманово расејање и опремом у лабораторији, као и са програмским пакетом Origin.

У првој фази истраживања кандидат ће вршити раманска мерења у широком температурском опсегу и обраду добијених спектра, како би овладао основама технике мерења Рамановог расејања и анализе резултата. Након тога, упознаће се са интерпретацијом добијених резултата и писањем научног чланка.

У другој фази кандидат ће се бавити мерењем фононских спектра на монокристалима $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ и $\text{K}_x\text{Co}_{2-y}\text{Se}_2$. Мерења је потребно вршити почев од ниских температура, због ниске температуре суперпроводног прелаза, односно феромагнетног уређења. У близини поменутих

критичних температура корак промене температуре је потребно смањити на највише 10 K, док је на температурама удаљеним од критичних довољно мерити са кораком од 20 K. Након обраде експерименталних резултата, температурску зависност параметара интензивних раманских пикова (енергије и полуширине) потребно је фитовати помоћу модела развијених у литератури који узимају у обзир анхармонијске ефекте и утицај топлотног ширења решетке. Уколико се уоче значајна одступања добијених температурских зависности од постојећих модела, потребно је анализирати њихово порекло на основу литературних података о могућем утицају прелаза у суперпроводно, односно феромагнетно стање на раманске спектре.

У трећој фази биће извршена мерења серије узорака $K_xFe_{2-y-z}Co_zSe_2$ на собној температури у циљу утврђивања структурних промена у овим материјалима са допирањем, на основу праћења промене броја раманских модова у измереним спектрима. Означавање модова биће извршено на основу литературно познате асигнације за $K_xFe_{2-y}Se_2$ и оне која ће бити спроведена за $K_xCo_{2-y}Se_2$ у другој фази.

У последњој фази кандидат ће мерити фононске спектре квази-једнодимензионалног монокристала $TaFe_{1.25}Te_3$ са магнетном структуром спинских ланаца. Мерења је потребно вршити у температурском опсегу од 80 K до собне температуре, што обухвата температуру преласка у антиферомагнетно уређење. У близини критичне температуре (око 200 K) корак треба смањити на 10 K, док се изван овог опсега он може повећати. Обзиром да монокристал има моноклиничну симетрију, у циљу асигнације раманских модова потребно је мерити у три поларизационе конфигурације. Након обраде добијених спектра, температурску зависност параметара јасно уочених раманских модова потребно је фитовати као у другој фази. У случају значајних одступања од модела (која се могу очекивати око критичне температуре) анализираће се њихово порекло, пре свега у светлу анализе утицаја успостављања магнетног уређења на вибрационе спектре.

7. Закључак и предлог

До сада објављени научни резултати кандидата Марка Опачића из области предложене теме докторске дисертације потврђују значај и актуелност предмета истраживања. Овакво истраживање захтева поседовање широког спектра знања из физике (превасходно физике чврстог стања, физике материјала и оптике), као и обученост и спретност потребне за експерименталан рад. Имајући у виду изузетне резултате кандидата у фази истраживања на докторским студијама, Комисија сматра да је кандидат показао изражену способност за научно-истраживачки рад и за реализацију наведеног плана истраживања.

Комисија је мишљења да је предложена тема докторске дисертације „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије“ („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy“) одговарајућа у смислу наведених циљева рада, очекиваних резултата и научног доприноса, имајући у виду савремена истраживања у одговарајућој области и могућности практичне примене резултата.

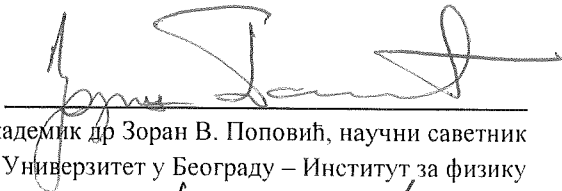
Комплетно истраживање кандидата у оквиру теме вршено је у Центру за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику у Београду, у оквиру пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ИИИ45018 „Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокомпозити“. Комисија констатује да предложена тема

припада ужој научној области Физичка електроника за коју је Електротехнички факултет у Београду матичан. За менторе ове докторске дисертације предлажу се академик Зоран В. Поповић, научни саветник Института за физику у Београду и др Милан Тадић, редовни професор Електротехничког факултета.

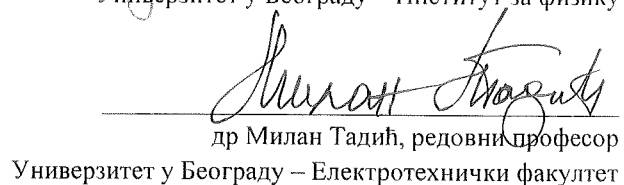
Узимајући у обзир чињенице наведене у овом извештају, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да прихвати тему докторске дисертације „Раздвајање фаза на наноскали у суперпроводницима на бази гвожђа коришћењем Раманове спектроскопије" („Nanoscale phase separation in iron-based superconductors investigated by Raman spectroscopy") и да кандидату Марку Опачићу омогући приступ њеној изради.

Београд, 12.септембар 2017. године

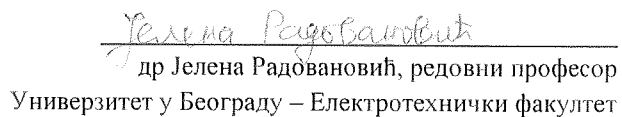
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



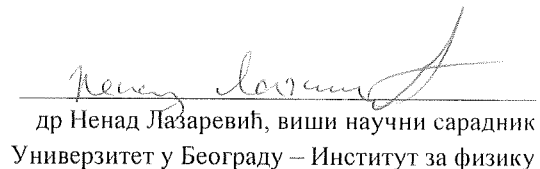
академик др Зоран В. Поповић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за физику



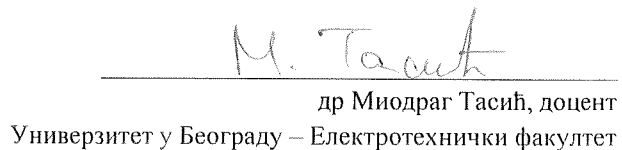
др Милан Тадић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



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



др Ненад Лазаревић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за физику



др Миодраг Тасић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет