

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

На III седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 22. децембра 2021. године одређени смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације „**Нееластично расејање светлости на квази-двостандимензионалним материјалима**” (наслов на енглеском језику: “**Inelastic light scattering in Quasi-two-dimensional materials**”) из научне области Физика кондензоване материје, коју је кандидаткиња Сања Ђурђић Мијин предала Физичком факултету у Београду. Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидаткињом подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Сања Ђурђић Мијин рођена је у Београду 29. 9. 1993. године. Након завршене основне школе и гимназије, 2012. године уписује Физички факултет Универзитета у Београду, смер *Примењена и компјутерска физика*, на коме дипломира 2016. године са просечном оценом 9,57. Након успешно завршених основних студија, исте године уписује мастер студије на Физичком факултету, смер *Теоријска и експериментална физика*. У оквиру пројекта 2015-2-ES01-KA107-022648 програма ERASMUS+ мастер тезу под називом „*Компаративна студија поларизоване оптичке емисије из поларних и неполарних квантних тачака у GaN/InGaN наножицама*” ради на Техничком Универзитету у Мадриду, под менторством др Жарка Гачевића, као и на Самосталном Универзитету у Мадриду, под менторством др Снежане Лазић. Мастер рад, под менторством др Славице Малетић и коменторством др Снежане Лазић, брани 5. јула 2017. године, чиме завршава мастер студије са просечном оценом 10. У фебруару 2018. свој научно-истраживачки рад наставља на Институту за физику у Београду, где је од 3. 12. 2018. запослена у Центру за чврсто стање и нове материјале у групи академика Зорана В. Поповића. Докторске студије на Физичком факултету у Београду, ужа научна област *Физика кондензоване материје и статистичка физика*, уписује у октобру 2018. године. На докторским студијама положила је све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 10.

1.2. Научна активност

Научно-истраживачки рад Сање Ђурђић Мијин, у области експерименталне физике кондензованог стања материје, одвија се у Центру за физику чврстог стања и нове материјале, Института за физику у Београду, под менторством др Ненада Лазаревића. Сања Ђурђић Мијин је од децембра 2018. до децембра 2019. године била ангажована на пројекту „**Наноструктурни мултифункционални наноматеријали и нанокомпозити**” (III450018) Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под руководством академика Зорана В. Поповића, а од августа 2020. ангажована је и на пројекту „**StrainedFeSc**”, број 6062656, Фонда за науку Републике

Србије, чији је руководиоца др Ненад Лазаревић. Учесник је билатералних пројеката са Валтер Мајснер институтом Баварске академије наука у Минхену. У току мастер студија, Сања Ђурђић Мијин бавила се испитивањем квантних тачака у GaN/InGAN наножицама. Од фебруара 2018. године њен истраживачки рад усредсређен је на испитивање вибрационих особина квази-дводимензионалних материјала методом Раманове спектроскопије. До сада је објавила 4 научна рада: 1 из категорије M21a и 3 из категорије M21, од којих је водећи аутор на 3 рада, као и шест саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (M34). Докторска дисертација Сање Ђурђић Мијин заснована је на три научна рада, од којих су два из категорије M21 и једна из категорије M21a. Њени радови до сада су цитирани 47 пута уз h-индекс 2 (Google Scholar).

2. Опис предмета рада

2.1. Основни подаци

Докторска дисертација Сање Ђурђић Мијин под називом „Нееластично расејање светлости на квази-дводимензионалним материјалима“ (наслов на енглеском језику: “Inelastic light scattering in Quasi-two-dimensional materials”) урађена је под менторством вишег научног сарадника Института за физику у Београду др Ненада Лазаревића. Др Ненад Лазаревић испуњава све услове за руковођење израдом докторске дисертације, те је на седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 27. октобра 2021, именован за ментора ове докторске дисертације. Тема докторске дисертације под називом „Нееластично расејање светлости на квази-дводимензионалним материјалима“ прихваћена је на Колегијуму докторских студија Физичког факултета одржаног 29. 09. 2021, а затим и на седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду која је одржана 24. новембра 2021. године. Веће научних области природно-математичких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 13. децембра 2021. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације Сање Ђурђић Мијин.

Дисертација се састоји од 113 страна (без насловне стране, захвалнице, сажетка на српском и енглеском језику, садржаја, ауторове биографија и изјава) и написана је на српском језику. Дисертација је подељена у осам поглавља. У тексту се налази 52 слике и 11 табела. У библиографији је наведено 197 референци.

2.2. Предмет и циљ докторског рада

Предмет истраживања ове докторске дисертације је испитивања вибрационих особина квази-дводимензионалних материјала. С обзиром на то да је физика квази-дводимензионалних материјала млада област експерименталне физике чврстог стања, свако ново сазнање може бити од изузетног значаја за даљи ток њеног развоја. Сходно томе, не чуди да је откриће физичких феномена, експериментално недоступних код њихових тродимензионалних аналога, изнедрило велики број истраживања усмерених ка дубљој спознаји транспортних, магнетних и хемијских карактеристика ових система.

У циљу давања доприноса тренутним сазнањима о нискодимензионом магнетизму, као и објашњења механизма формирања колективног електронског феномена таласа густине наелектрисања, у оквиру ове дисертације испитавани су тренутно најзначајнији представници квази-дводимензионалних слојева. У оквиру магнетних квази-дводимензионалних материјала испитивани су CrI₃, VI₃ и Mn₃Si₂Te₆. Истраживања на трихалидима прелазних метала CrI₃ и VI₃ су урађена због магнетног уређења које у овим материјалима опстаје до монослоја, док Mn₃Si₂Te₆

представља изузетно комплексан систем у ком долази до конкуренције између четири различита магнетна стања. Због изузетно богатог фазног дијаграма и чињенице да се три различита фазе таласа густине наелектрисања формирају на експериментално доступним температурама, утицај феномена таласа густине наелектрисања на динамику решетке испитиван је у $1T-TaS_2$.

2.3. Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Ова докторска дисертација састоји се од осам поглавља. У првом поглављу пружен је кратак увод о развоју области квази-дводимензионалних материјала и значајних феномена који се у њима јављају, а који представљају главну мотивацију за израду ове дисертације. У оквиру истог поглавља укратко је објашњен разлог одабира Раманове спектроскопије као главне методе истраживања, након чега је дат преглед кључних резултата дисертације.

Друго поглавље дисертације посвећено је методи истраживања. У оквиру овог поглавља, које је започето историјским развојем Раманове спектроскопије, дат је теоријски опис (класични и квантни) Рамановог расејања, као и преглед свих теоријских основа неопходних за разумевање представљених резултата. На крају поглавља детаљно су описане експерименталне поставке које су коришћене у оквиру представљених истраживања.

У оквиру трећег поглавља дат је преглед најбитнијих теоријских и експерименталних резултата из области квази-дводимензионалних материјала, са посебним освртом на две велике и значајне фамилије – трихалиде прелазних метала и дихалкогениде прелазних метала. У истом поглављу представљени су и најбитније карактеристике испитиваних материјала - CrI_3 , VI_3 , $1T-TaS_2$ и $Mn_3Si_2Te_6$.

Резултати раманске анализе структурног фазног прелаза у квази-дводимензионалном CrI_3 приказани су у четвртом поглављу. Нискотемпературски и високотемпературски спектри анализирани су у складу са одговарајућом просторном групом симетрије. У обе фазе, сви симетријом предвиђени модови, сем једног, успешно су асигнирани, потврђујући да код вишеслојне структуре CrI_3 долази до структурног фазног прелаза између нискотемпературске ромбедарске $R\bar{3}$ фазе и високотемпературске $C2/m$ моноклиничне фазе. Добијени експериментални резултати обе фазе у доброј су сагласности са DFT прорачунима. Анализом симетрија кристалних структура нискотемпературске и високотемпературске фазе одређена је група симетрије слоја $\bar{r}31/m$. На основу температурски зависних мерења утврђено је да до фазног прелаза долази на температури од 180 K. Примећено је да на поменутој температури долази до цепања ромбедарских E_g модова на моноклиничне A_g и B_g модове. На температурама изнад температуре фазног прелаза не постоје доприноси ромбедарске фазе, на основу чега је закључено да у кристалима CrI_3 не долази до коегзистенције две фазе, сем потенцијално у оквиру 5 K око температуре фазног прелаза, колико је износио корак мерења.

У петом поглављу приказани су резултати Раманове спектроскопије квази-дводимензионалног VI_3 . Поларизовани рамански спектри добијени на 100 K анализирани су у сагласности са три предложене симетрије кристалне структуре: $C2/m$, $R\bar{3}$ и $P\bar{3}1c$. На основу поларизационе зависности експерименталних модова, утврђено је да кристална структура VI_3 не припада просторној групи симетрије $C2/m$. С обзиром на то да преостале две симетрије предвиђају исту поларизациону зависност Раман активних модова, експериментални резултати упоређени су са DFT прорачунима, на основу чега је утврђено да примећени фононски модови потичу од $P\bar{3}1c$ кристалне структуре. Да би се утврдило зашто рамански спектри указују на ову симетрију, док резултати XRD експеримента, рађени на истим узорцима, на групу симетрије $R\bar{3}$, урађена је PDF (функција дистрибуције пара) анализа резултата добијених у синхротронском XRD експерименту. Најбољи резултат добијен је коришћењем модела сачињеног од 75% доприноса дугодометно уређене $R\bar{3}$ фазе и 25% краткодметно уређене $P\bar{3}1c$ фазе. Овај резултат указује на две могућности:

коегзистенцију дугодоментног $R\bar{3}$ и кракодометног $P\bar{3}1c$ уређења, или на насумично распоређене краткодометне $P\bar{3}1c$ домене унутар дугодоментне $R\bar{3}$ кристалне решетке. Резултати овог истраживања пружили су одговор на питање кристалне структуре квазо-дводимензионалне структуре Vl_3 и разрешиле питање неслагања различитих XRD студија.

Резултати добијени испитивањем утицаја формирања различитих фаза таласа густине наелектрисања (CDW) на динамику решетке, као и отварање Мотовог процепа приликом метал-изолатор прелаза у кристалима $1T-TaS_2$, представљени су у шестом поглављу дисертације. Поларизовани рамански спектри несамерљиве (*incommensurate*) CDW фазе, добијени на температури од 370 K, упоређени су са *ab initio* прорачунима за нормалну металну фазу $1T-TaS_2$. Показано је да експериментални резултати одговарају прорачинима фононске густине стања. До пројекције фононске густине стања у раманским спектрима несамерљиве фазе долази због нарушења трансляционе инваријантности, услед формирања CDWа у кристалима $1T-TaS_2$. Приликом преласка из приближно самерљиве (*nearly commensurate*) фазе у самерљиву (*commensurate*), формира се суперструктура која је сачињена од упакованих тзв. „Давидових звезда“. Питање на које је истраживање у оквиру ове дисертације дало одговор јесте тачан начин њиховог паковања. На основу симетријске анализе и моделовања спектра снимљених на температури од 4 K линијама Воитовог профила, утврђено је да се у спектрима јавља $19 A_g$ модова и $19 E_g$ модова. Овакав резултат у сагласности је са претпостављеним тригоналним / хексагоналним начином паковања „Давидових звезда“. У поларизованим раманским спектрима приближно самерљиве фазе примећени су доприноси самерљиве и несамерљиве фазе, потврђујући претпоставку да је приближно самерљива фаза сачињена од самерљивих домена унутар несамерљиве структуре. Резултати експеримента електронског Рамановог расејања показали су да се поред отварања CDW процепа, карактеристичног за све материјале у којима долази до формирања CDW-а, у самерљивог фази отвара и Мотов процеп који је последица метал-изолатор прелаза. Процењена величина процепа 170-190 meV у сагласности је са резултатима ARPES студија. Један од главних резултата овог истраживања јесте успешна демонстрација да нееластично расејање светлости може да се користи за испитивање импулсне зависности и енергетске скале промене електронске структуре изазваних нискотемпературским кватним феноменима.

Седмо поглавље посвећено је испитивању феримагнетног $Mn_3Si_2Te_6$. Поларизовани рамански спектри анализирани су у сагласности са $P\bar{3}1c$ симетријом кристалне решетке. У раманским спектрима идентификовано је свих пет симетријом предвиђених A_{1g} модова и осам од једанаест предвиђених E_g модова. Изостанак три мода E_g симетрије највероватније је последица њиховог слабог интензитета. У спектрима су уочена и три додатна пика, која се понашају у складу са селекционим правилима A_{1g} модова, а који су идентификовани као *overtone* стања. Температурска зависност фононских енергија A^3_{1g} и A^5_{1g} модова, као и зависност ширине и Фано параметра A^5_{1g} мода, показује три дисконтинуитета на температурама $T_1 = 142,5$ K, $T_2 = 190$ K и $T_3 = 280$ K. Сваки од њих је праћен наглим променама Фано параметра на основу чега је закључено да ове промене имају јак утицај на спин-фонон спаривања у $Mn_3Si_2Te_6$. Претпоставка је да су примећени дисконтинуитети највероватније последица конкуренције у магнетним флукуацијама, на шта указује и дисконтинуитет примећен у температурској зависности извода магнетне суспенцибилности добијене применом наизменичног магнетног поља у истој равни у којој се уређују магнетни моменти.

Сумирани закључци дисертације представљени су у осмом поглављу.

3. Списак публикација

Из докторске тезе произашли су чланци 1, 3, и 4, док су резултати који су изложени у седмој глави у припреми за публикавање.

Радови у међународним часописима:

1. **S. Djurdjić Mijin**, A. Šolajić, J. Pešić, M. Šćepanović, Y. Liu, A. Baum, C. Petrovic, N. Lazarević, and Z. V. Popović, *Lattice dynamics and phase transition in CrI₃ single crystals*, Phys. Rev. **B 98**, 104307 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevB.98.104307, ISSN: 2469-9950 (M21, IF (2018): 3.736)
2. A. Milosavljević, A. Šolajić, **S. Djurdjić Mijin**, J. Pešić, B. Višić, Yu Liu, C. Petrovic, N. Lazarević, Z.V. Popović, *Lattice dynamics and phase transitions in Fe_{3-x}GeTe₂*, Phys. Rev. **B 99**, 214304 (2019), DOI: 10.1103/PhysRevB.99.214304, ISSN: 2469-9950 (M21, IF (2018): 3.736)
3. **S. Djurdjić Mijin**, A.M. Milinda Abeykoon, A. Šolajić, A. Milosavljević, J. Pešić, Yu Liu, C. Petrovic, Z. V. Popović, N. Lazarević, *Short-range order in VI₃*, Inorg Chem. **59** (22):16265-16271 (2020), DOI: 10.1021/acs.inorgchem.0c02060, ISSN: 0020-1669 (M21a, IF (2019): 4.852)
4. **S. Djurdjić Mijin**, A. Baum, J. Bekaert, A. Šolajić, J. Pešić, Y. Liu, Ge He, M. V. Milošević, C. Petrovic, Z. V. Popović, R. Hackl, and N. Lazarević, *Probing charge density wave phases and the Mott transition in 1T-TaS₂ by inelastic light scattering*. Physical Review **B 103**(24), 245133 (2021), DOI: 10.1103/PhysRevB.99.214304, ISSN: 2469-9950 (M21, IF (2018): 3.736)

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34):

5. **S. Djurdjić**, A. Šolajić, J. Pešić, M. Šćepanović, Y. Liu, A. Baum, Č. Petrović, N. Lazarević, Z. V. Popović, *Raman Spectroscopy Study on phase transition in CrI₃ single crystals*, Seventeenth Young Researchers Conference – Materials Science and Engineering December 5-7, 2018, Belgrade, Serbia
6. **S. Djurdjić Mijin**, A. Šolajić, J. Pešić, M. Šćepanović, Y. Liu, A. Baum, C. Petrovic, N. Lazarević, and Z. V. Popović, *The Vibrational Properties of CrI₃ Single Crystals*, The 20th Symposium on Condensed Matter Physics BOOK OF ABSTRACTS, pp. 21 - 21, Belgrade, 7. - 11. Oct, 2019
7. A. Milosavljević, A. Šolajić, **S. Djurdjić Mijin**, J. Pešić, B. Višić, Y. Liu, C. Petrovic, N. Lazarević, Z. V. Popović *Lattice dynamics and phase transitions in Fe_{3-x}GeTe₂*, The 20th Symposium on Condensed Matter Physics BOOK OF ABSTRACTS, pp. 84 - 84, Belgrade, 7. - 11. Oct, 2019
8. **S. Djurdjić Mijin**, J. Bekaert, A. Šolajić, J. Pešić, Y. Liu, M. V. Milosevic, C. Petrovic, N. Lazarević, and Z. V. Popović, *Probing subsequent charge density waves in 1T-TaS₂ by inelastic light scattering*, Eighteenth Young Researchers Conference – Materials Science and Engineering December 4-6, 2019, Belgrade, Serbia
9. **S. Djurdjić Mijin**, AM Milinda Abeykoon, A. Šolajić, A. Milosavljević, J. Pešić, M. Šćepanović, Y. Liu, A. Baum, C. Petrovic, N. Lazarević, and Z. V Popović, *Raman Spectroscopy of Quasi-two-dimensional transition metal trihalides*, Nineteenth Young Researchers' Conference - Materials Science and Engineering, December 1-3, 2021,
10. **S. Djurdjić Mijin**, A. Baum, A. M. Milinda Abeykoon, J. Bekaert, A. Milosavljević, J. Pešić, M. Šćepanović, Y. Liu, Ge He, M. V Milošević, C. Petrovic, Z. V Popović, R. Hackl, N. Lazarević, *Raman Spectroscopy of quasi-two-dimensional materials*, Lattice-based Quantum Simulation 726. WE-Heraeus-Seminar, 29 November - 01 December 2021, Bad Honnef, Germany

4. Провера оригиналности докторске дисертације

Извештај о оригиналности докторске дисертације ће бити накнадно достављен.

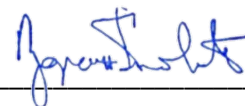
Закључак

На основу свега изложеног закључује се да су резултати кандидаткиње Сање Ђурђић Мијин оригинални и да представљају значајан научни допринос у области физике кондензоване материје. Из области дисертације кандидаткиња је објавила три научна рада, од којих два у међународним часописима категорије M21 и један у међународном часопису категорије M21a. У складу с тим, Комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану докторске дисертације кандидаткиње Сање Ђурђић Мијин под насловом:

Нееластично расејање светлости на квази-двострумензионалним материјалима
(Inelastic light scattering in Quasi-two-dimensional materials)

У Београду, децембар 2021. године

Чланови комисије:



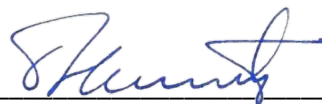
Академик Зоран В. Поповић
Научни саветник
Институт за Физику у Београду



проф. др Ђорђе Спасојевић
Редовни професор
Универзитет у Београду - Физички факултет



проф. др Татјана Вуковић
Редовни професор
Универзитет у Београду - Физички факултет



др Божидар Николић
Ванредни професор
Универзитет у Београду - Физички факултет



др Славица Малетић
Доцент
Универзитет у Београду - Физички факултет