

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ - ФАКУЛТЕТ ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

На Х редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, одржаној 11.07.2023. године именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидаткиње Јасне М. Вујин, мастер физикохемичара, под насловом:

„Физичкохемијска карактеризација хетероструктура дводимензионалних материјала (графен, волфрам-дисулфид) и биолошких молекула (цистеин, 1,2-дипалмитоил-*sn*-глицеро-3-фосфохолин)“

Одлуком Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, на редовној седници одржаној 14.02.2019. године, одобрена је израда докторске дисертације под претходно наведеним насловом. Веће научних области природних наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 28.02.2019. године дало је сагласност о прихватању предложене теме докторске дисертације.

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

ИЗВЕШТАЈ

1. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација кандидаткиње Јасне М. Вујин припремљена је према упутству за обликовање докторске дисертације Универзитета у Београду. Докторска дисертација написана је на 93 стране и садржи следеће делове: насловне стране на српском и енглеском језику (2 стране), информације о менторима и члановима комисије (1 страна), захвалницу (2 стране), сажетак на српском и енглеском језику (4 стране), садржај (2 стране). Текст рада подељен је по следећим поглављима: **Увод** (2 стране), **Општи део** (12 страна), **Циљ рада** (1 страна), **Експериментални део** (8 страна), **Резултати и дискусија** (38 страна), **Закључак** (2 стране) и **Литература** (185 навода, 11 страна). Такође, приложена је биографија (1 страна) и библиографија (3 стране) кандидаткиње као и изјаве прописане од стране Универзитета (4 стране). Дисертација садржи укупно 56 слика од којих 41 слика приказује истраживање кандидаткиње.

У поглављу **Увод** описана је актуелност истраживања дводимензионалних (2D) материјала, посебно графена и волфрам-дисулфида (WS_2), у различитим научним областима са акцентом на могућност њихове примене у биосензорима и сензорима влажности.

У поглављу **Општи део** дат је преглед примене одабраних 2D материјала у (био)хемијским сензорима и сензорима влаге, истичући физичкохемијска својства које одређују улогу графена и WS_2 као активних компонената оваквих уређаја. Укратко су

представљене методе синтезе и технике депозиције 2D материјала, при чему је истакнута метода ексфолијације из течне фазе (енгл. *Liquid Phase Exfoliation*, LPE) као и Лангмир-Блоцет (енгл. *Langmuir-Blodgett*, LB) и Лангмир-Шефер (енгл. *Langmuir-Schaefer*, LS) методе депозиције филмова које су у експерименталном раду биле коришћене. Приказан је значај и утицај дефеката на особине графена и WS₂. Такође, представљен је хемијски и биолошки значај цистеина и липида 1,2-дипалмитоил-*sn*-глицеро-3-фосфохолин (енгл. *1,2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine*, DPPC), као и њихове улоге анализата и/или биорецептора у биолошким сензорима. Дат је преглед тренутних истраживања која се односе на испитивање интеракције биолошких молекула и 2D материјала.

У поглављу **Циљ рада** представљени су јасно дефинисани кораци у експерименталном истраживању које се односи на испитивање и разумевање интеракције на међуфазној граници биолошки молекул/2D материјал као и утицај молекула воде на структуру филмова течно ексфолираног графена и WS₂.

У поглављу **Експериментални део** дат је детаљан опис методе и услова синтезе одабраних 2D материјала; технике које су коришћене за формирање и депозицију филмова графена и WS₂ као и начин припреме хетероструктура биолошки молекул (цистеин, DPPC)/2D материјал (графен, WS₂). Такође, наведене су експерименталне технике које су примењене за физичкохемијску карактеризацију узорака, уређаји који су коришћени за одговарајуће анализе као и експериментални параметри и услови под којим су мерења вршена.

Поглавље **Резултати и дискусија** подељено је на три дела. Први део обухвата физичкохемијску карактеризацију течно ексфолираних графенских и WS₂ филмова формираних на међуфазној граници ваздух/вода, односно толуен/вода, и њихов трансфер на одабране супстрате применом LB и LS депозиционе методе. Такође, акценат је стављен на испитивање утицаја присуства молекула воде на површину филмова. Резултати указују да једноставне и економски исплативе технике припреме графенских и WS₂ филмова омогућавају репродуцибилност у добијању танких, хомогених, компактних и изразито транспарентних филмова љуспичасте структуре код којих су ивични дефекти преференцијална места за адсорпцију молекула воде. Други и трећи део докторског рада односе се на припрему хетероструктура биолошки молекул/2D материјал и испитивање њихових хемијских и физичких својстава. Анализом морфолошких карактеристика хетероструктура утврђено је да се методом накапавања на једноставан и врло ефикасан начин постиже потпуна покривеност површина графенских и WS₂ филмова, у виду формирања танких слојева биолошких молекула, али уз неизоставни процес њихове агломерације. За испитивање интеракције биолошких молекула са површином филмова 2D материјала коришћена је Раманска спектроскопија. Резултати показују да хемијска својства 2D материјала, али и површине филмова које су дефинисане самоорганизацијом нанољуспица, утичу на конформационе промене биолошких молекула, што доводи до фаворизовања интеракција са одређеним функционалним групама биолошких молекула. Ове интеракције имају за последицу промене у хемијској и електронској структури

филмова, што указује на могућност примене графенских и WS₂ филмова за детекцију испитиваних биолошких молекула.

У поглављу **Закључак** сумирани су главни закључци изведени на основу анализе и дискусије резултата приказаних у овој докторској дисертацији, а у складу са постављеним циљевима истраживања.

У поглављу **Литература** наведени су најзначајнији радови и књиге из области, по редоследу њиховог навођења у тексту дисертације.

2. Кратак преглед остварених резултата

Циљ докторске дисертације је експериментално проучавање интеракције танких филмова течно ексфолираних 2D материјала (графена и WS₂) и биолошких молекула (цистеина и DPPC) са којима чине хетероструктурни танки филм. С обзиром на то да се припрема хетероструктура изводила у амбијенталним условима и да су коришћени водени раствори биолошких молекула, испитивање утицаја молекула воде на структуру графенских и WS₂ филмова представља неизоставни део овог истраживања.

У првом делу рада приказана је ексфолијација 2D материјала (графен, WS₂), поступак формирања и депозиције филмова као и њихова физичка и хемијска карактеризација. Метода течне ексфолијације представља сонохемијску синтезу почетног материјала у растварачу (у овом случају коришћен је NMP (енгл. *N-methyl-2-Pyrrolidone*), омогућавајући добијање дисперзије монослојних и вишеслојних љуспица наноматеријала (графена и WS₂). Дисперзије су коришћене за припрему графенских филмова на граници фаза ваздух/вода и WS₂ филмова на граници фаза толуен/вода, док су се за њихову депозицију на одабране супстрате користиле Лангмир-Блоџет и Лангмир-Шефер технике. На основу резултата добијених испитивањем оптичких, морфолошких, структурних и хемијских својстава графенских и WS₂ филмова, применом UV/VIS (енгл. *Ultraviolet-Visible*) спектроскопије, скенирајуће електронске микроскопије (енгл. *Scanning Electron Microscopy*, SEM), микроскопије атомских сила (енгл. *Atomic Force Microscopy*, AFM) и Раманске спектроскопије, закључује се да су добијени компактни, хомогени, танки и транспарентни графенски и WS₂ филмови релативно великих димензија (величина филма одређена је величином површине међуфазне границе). Такође, у овом делу докторског рада испитиван је ефекат присуства молекула воде на хемијску структуру LB графенских и LS WS₂ филмова. За те потребе коришћена је фотоелектронска спектроскопија X зрачења (енгл. *X-ray Photoelectron Spectroscopy*, XPS), при чему су филмови излагани притиску водене паре од 1 mbar и 5 mbar, што одговара релативној влажности ваздуха околине од 4 и 22%, редом. На основу анализе XPS резултата, могуће је закључити да дефекти графенских и WS₂ филмова представљају активна места за адсорпцију молекула воде (било да је вода пореклом из атмосфере и/или да је компонента међуфазне границе) и њених дисосованих компоненти (H⁺ и OH⁻ јона). При минималном притиску водене паре (1 mbar) интеракција молекула воде и графена је елекстростатичке природе у којој графен има улогу донора електрона. Због своје поларне природе, молекули воде привлаче π

делокализоване електроне графена што је праћено повећањем енергије везе електрона код С атома и смањењем енергије везе електрона код О атома. Такође, хемијски помераји сугеришу да кисеоничне функционалне групе на графенском филму активно учествују у интеракцији са молекулима H_2O , која се остварује кроз формирање водоничних веза. Повећањем притиска водене паре (на 5 mbar), молекули воде немају могућност директне адсорпције на површини графенског филма припремљеног Лангмир-Блоцет методом, већ се физисорбују на постојећи слој, формирајући тако додатне слојеве путем водоничних веза. У случају филма WS_2 припремљеног Лангмир-Шефер техником, услед излагања притисцима водене паре на 1 и 5 mbar, поред оксидације W^{5+} и физисорпције молекула воде као доминантног процеса, оксиди волфрама (WO_3 , WO_{3-x}) имају улогу дефеката тј. постају потенцијална места за адсорпцију воде било у дисосованом или молекулском облику, услед чега долази до настајања додатних $\text{WO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ врста.

У другом и трећем делу докторске тезе приказана је припрема хетероструктура биолошки молекул/2D материјал методом накапавања (енгл. *drop casting*) и испитивање њихових физичкохемијских својстава. Оптичка и скенирајућа електронска микроскопија примењена је како би се анализирале морфолошке и структурне карактеристике хетероструктура: цистеин/графенски филм, цистеин/ WS_2 филм, DPPC/графенски филм и DPPC/ WS_2 филм. На основу добијених резултата утврђено је да биолошки молекули формирају танак филм који у потпуности прекрива површину танких филмова 2D материјала. Агломерација цистеина и DPPC липида на ободу капи (енгл. *coffee ring effect*) и по површини графенских и WS_2 филмова је такође присутна.

За испитивање интеракције биолошких молекула са површином филмова 2D материјала коришћена је Раманска спектроскопија. Код хетероструктура са цистеином, интензивна интеракција тиолне групе са графенским и WS_2 филмом директно утиче на конформационе промене биолошког молекула. Односно, *trans* ротамери се јављају као доминантна конформација на површини графенских филмова, док је у случају WS_2 филмова то *gauche* конформација. Раскидање $\text{SH} \cdots \text{O}$ водоничних веза, чиме је омогућена интеракција графена са карбоксилном групом и формирање $\text{SH} \cdots \text{C}$ водоничних веза, настаје као последица физисорпције цистеина. С друге стране, код WS_2 филмова интеракција са аминоксидном групом постаје знатно израженија.

Приликом формирања хетероструктура са DPPC молекулима долази до фаворизовања интеракција графенских односно WS_2 филмова са одређеним делом липида. Интеракција графена са хидрофобним делом молекула DPPC остварује се путем *van der Waals*-ових сила, при чему липиди на површини филма заузимају *trans* конформацију као доминантну. Ова интеракција доводи до преноса неелектрисања са графенског филма на липидне молекуле, с тим што је допринос молекула H_2O овом ефекту неопходно узети у обзир. Код хетероструктуре DPPC/LPE-LS WS_2 , интеракција WS_2 филма се остварује са хидрофилним делом DPPC молекула успостављањем хемијске везе $\text{W}-\text{O}-\text{W}$, која се остварује између кисеоника фосфатне групе липидног молекула са атомом волфрама, било да је он дефинисан као ивични дефект или се налази у склопу WO_{3-x} . Наведене интеракције имају за последицу промене у хемијској

и електронској структури филмова, омогућавајући тиме њихову употребу за детекцију одабраног фосфолипида. Такође, хетероструктуре DPPC/графенски филм и DPPC/WS₂ филм могу послужити као активне компоненте за селективну детекцију других биолошких молекула, зависно од њиховог афинитета везивања према хидрофилном или хидрофобном делу липида који остаје изузет у реакцији са графенским, односно WS₂ филмом.

3. Упоредна анализа резултата дисертације са подацима из литературе

Потреба да се 2D материјали користе у практичне сврхе, подстакла је развој и примену различитих метода синтезе, од којих су најзаступљенији: епитаксијални раст, физичка и хемијска депозиција из гасне фазе (енгл. *Chemical Vapor Deposition, CVD*) [1]. Ове технике представљају скуп начин добијања 2D материјала. Иако омогућавају контролу броја слојева, процес преноса на жељене супstrate је сложен и најчешће доводи до увођења нечистоћа и оштећења структуре слоја 2D материјала. У докторској дисертацији, за синтезу графена и WS₂ коришћена је једноставна и економски исплатива техника - хемијска ексфолијација из течне фазе, LPE [1]. За припрему танких филмова 2D материјала добијених LPE техником уобичајено се користе конвенционалне методе као што су вакуумска филтрација, спреј метода, метода накапавања, метода центрифугирања [1], чији недостаци у виду формирања неуниформних филмова и агрегације нанољуспица за последицу имају немогућност постизања одговарајуће дебљине филмова и представљају кључну препреку за практичну примену филмова 2D материјала, посебно у области сензора, где истакнуте мане директно утичу на квалитет сензорског одзива. Да би се избегли наведени проблеми, за формирање графенских и WS₂ филмова, у раду су коришћене Лангмир-Блоџет (LB) и Лангмир-Шефер методе (LS) [2]. На основу резултата добијених физикохемијском карактеризацијом LPE-LB графенских и LPE-LS WS₂ филмова, може се закључити да техника ексфолијације из течне фазе у комбинацији са LB (LS) методом која омогућава добијање филмова на граници фаза ваздух/вода (толуен/вода) и њихову депозицију на различите супstrate, показала висок ниво репродукцибилности добијања танких, транспарентних, хомогених и компактних филмова.

Испитивање утицаја адсорбованих молекула воде на површину графенских и WS₂ филмова сматра се важном и актуелном темом у научним истраживањима. Разумевање интеракције графен-вода разматрано је са теоријског и есперименталног аспекта [3]. Досадашња истраживања су показала да присуство молекула H₂O доводи до *p*-допирања графена добијеног различитим техникама синтезе (методом епитаксијалног раста, механичком ексфолијацијом и CVD техником), али да интеракција графенског филма и воде зависи од многобројних фактора (позиције и оријентације молекула воде, дебљине и слагања слојева H₂O, избора супstrate за депозицију графенског филма, хидрофилности/хидрофобности графенског филма и супstrate) [3]. С обзиром на то да су истраживања базирана на мерењу транспорта наелектрисања и испитивању електричних својстава графена као активне компоненте сензора влажности, информације о механизму интеракције графена и воде добијене су

индиректним путем и уз претпоставке аутора [3,4]. У докторској тези, испитивање утицаја молекула воде на LPE-LB графенске филмове извршено је применом XPS технике која је омогућила разумевање интеракције LPE-LB графенски филм-H₂O на молекулском нивоу. Резултати су показали да ивични дефекти LPE-LB графенских филмова представљају места адсорпције молекула воде (било да она потиче из атмосфере и/или да је компонента међуфазне границе) и њених дисосованих компоненти (H⁺ и OH⁻ јона) формирајући тако карактеристичне кисеоничне функционалне групе (-OH, -COOH, епоксидну групу). У присуству молекула H₂O из гасне фазе (при 1 mbar), долази до формирања водоничних веза са кисеоничним функционалним групама, али и до електростатичке интеракције са површином LPE-LB графенских филмова, што је потврђено присуством максимума на енергији везе од 535,7 eV у XPS O1s спектру. Поларна природа физисорбованих молекула H₂O одговорна је за промене у електронској структури графенског филма, односно за његово *p*-допирање. Накнадно повећање притиска водене паре (5 mbar) доводи до додатне физисорпције молекула на већ постојеће слојеве воде, чиме се ефекат *p* допирања смањује и практично одговара његовом засићењу.

У многобројним експерименталним радовима приказана је изразита осетљивост WS₂ филмова на присуство молекула воде, чиме је указано на њихову потенцијалну примену за детекцију влажности [5]. *Jha* и сарадници [6] су показали да сензори за детекцију влажности на бази WS₂, ексфолираног LPE методом, а чији су филмови добијени методом накапавања, имају одличан електрични одзив услед адсорпције молекула воде, као и да поседују стабилност, поновљивост као и врло брзе карактеристике одговора и опоравка приликом излагања WS₂ филмова различитим нивоима релативне влажности. За објашњење интеракција између WS₂ филма и молекула H₂O, *Jha* и сар. [6] су предложили Гротусов механизам. Према овом моделу, присуство оксидованих места на WS₂ нанољускама је последица процеса ексфолијације, где ацетонски кетил слободни радикали делују као редукционо средство [6]. Међутим, нису пружени директни докази о постојању кисеоничних врста у таквим узорцима и механизму адсорпције H₂O на WS₂ нанољускама. У поглављу 4.1.4 (Резултати и дискусија) докторске тезе, представљене су информације и докази који у наведеном раду [6] недостају. Наиме, анализа XPS резултата показала је да услед интеракције LPE-LS WS₂ филмова са водом (која је поред толуена компонента међуфазне границе) долази до формирања стехиометријских (WO₃), нестехиометријских (WO_{3-x}) и хидратисаних (WO₃·*n*H₂O) оксида волфрама. Места настајања наведених хемијских врста су ивични дефекти волфрама настали током ексфолијације WS₂. Излагање LPE-LS WS₂ филмова притисцима водене паре од 1 и 5 mbar, има за последицу оксидацију W⁵⁺ (формирање WO₃) и физисорпцију молекула воде. Наведени процеси се сматрају доминантним и праћени су настајањем додатних WO₃·*n*H₂O врста. Хидратисани оксиди волфрама формирају се при адсорпцији воде у дисосованом и/или молекулском облику на WO₃ и WO_{3-x} који у овом случају имају улогу активних места.

Постоји значајан број теоријских радова (заснованих на теорији функционала густине (енгл. *Density Functional Theory*, DFT) и молекулској динамици) код којих су

2D материјали (графен, графен-оксид, редуковани графен-оксид) проучавани као потенцијални активни слојеви за функционализацију и детекцију аминокиселина као што су цистеин, глицин, хистидин, тирозин [7,8]. Резултати указују да у зависности од тога да ли је у питању базална равна или дефекти (ивични, или унутар структуре) графена, може доћи до физичке адсорпције (π - π интеракције) или успостављање хемијских веза (водоничне везе, дисулфидни мостови и др.) са неком од функционалних група анализата (NH_2 , COOH , SH) [7,8]. Имајући у виду да тренутно не постоје експериментални радови који испитују интеракцију и могућност детекције цистеина графенским филмовима (без обзира на примењену технику синтезе и методу депозиције), наведени теоријски радови коришћени су као смернице у експерименталним истраживањима које се односе на физичкохемијску карактеризацију хетероструктура цистеин/LPE LB графенски филм, која је приказана у докторској дисертацији. Резултати добијени применом Раманске спектроскопије, потврђују интеракцију функционалних група цистеина (COO^- , NH_3^+ , $-\text{SH}$) и π електрона графена. Посебно се истиче интеракција тиолне групе са графенским филмом, која директно утиче на конформационе промене биолошког молекула, односно *trans* ротамери цистеина се јављају као доминантна конформација на површини графенских филмова. Такође, као последица физисорпције цистеина и раскидања $\text{SH}\cdots\text{O}$ водоничних веза, омогућена је интеракција карбоксилне групе са LPE-LB графенским филмом.

Испитивање и разумевање интеракције фосфолипида и 2D материјала (графен, графен-оксид) представљено је у експерименталним и теоријским радовима [9]. *Lima* и сарадници [10] су приказали DPPC липидне монослојеве, формиране LB методом и трансфероване на SiO_2/Si супстрат, као структурно уређену подлогу за депозицију CVD графена. DPPC липиди испод графенског филма представљају кристалну структуру са веома ограниченом дифузионом покретљивошћу, која се може објанити променом конформације липидних ланаца из *gauche* у *trans*, насталу услед интеракције DPPC-графен. Такође, као последица интеракције долази до *p*-допирања графенског филма. Слични закључци су изведени и у поглављу 4.2.2.1 (Резултати и дискусија) у докторској дисертацији. На основу резултата добијених Раманском спектроскопијом, у хетероструктури DPPC/LPE-LB графенски филм *van der Waals*-овим силама интерагује са угљоводоничним ланцем палмитинске киселине који представља хидрофобни део DPPC молекула. Ово за последицу има заузимање *trans* конформације липидног молекула као доминантне и *p*-допирање LPE-LB графенског филма. За сада не постоје експериментални и теоријски радови чији се фокус истраживања односи на испитивање интеракција цистеина и DPPC липида са WS_2 филмом. Стога није могуће извршити упоредну анализу резултата дисертације са подацима из литературе.

Референце:

- [1] H. Zhang, Ultra thin Two-Dimensional Nanomaterials, ACS Nano. 9 (2015) 9451–9469. doi:10.1021/acsnano.5b05040.
- [2] M.M. Velázquez, T. Alejo, D. López-Díaz, B. Martín-García, M.D. Merchán,

- Langmuir-Blodgett Methodology: A Versatile Technique to Build 2D Material Films, Two-Dimensional Materials - Synthesis, Characterization and Potential Applications. (2016). doi:10.5772/63495.
- [3] C. Melios, C.E. Giusca, V. Panchal, O. Kazakova, Water on graphene: Review of recent progress, 2D Materials. 5 (2018) 022001. doi:10.1088/2053-1583/aa9ea9.
- [4] S. Andrić, T. Tomašević-Ilić, M. V. Bošković, M. Sarajlić, D. Vasiljević-Radović, M.M. Smiljanić, M. Spasenović, Ultrafast humidity sensor based on liquid phase exfoliated graphene, Nanotechnology. 32 (2021) 025505. doi:10.1088/1361-6528/abb973.
- [5] S.J. Choi, I.D. Kim, Recent Developments in 2D Nanomaterials for Chemiresistive-Type Gas Sensors, The Korean Institute of Metals and Materials, 2018. doi:10.1007/s13391-018-0044-z.
- [6] R.K. Jha, P.K. Guha, Liquid exfoliated pristine WS₂ nanosheets for ultrasensitive and highly stable chemiresistive humidity sensors, Nanotechnology. 27 (2016) 475503. doi:10.1088/0957-4484/27/47/475503.
- [7] H. Luo, H. Li, Q. Fu, Y. Chu, X. Cao, C. Sun, X. Yuan, L. Liu, Density functional theory study on the interactions of l-cysteine with graphene: Adsorption stability and magnetism, Nanotechnology. 24 (2013). doi:10.1088/0957-4484/24/49/495702.
- [8] S.J. Rodríguez, L. Makinistian, E.A. Albanesi, Graphene for amino acid biosensing: Theoretical study of the electronic transport, Applied Surface Science. 419 (2017) 540–545. doi:10.1016/j.apsusc.2017.05.031.
- [9] S. Bratakou, S. Karapetis, N. Tzamtzis, Biosensors Based on Lipid Modified Graphene Microelectrodes, (n.d.). doi:10.3390/c3010009.
- [10] L.M.C. Lima, W. Fu, L. Jiang, A. Kros, G.F. Schneider, Graphene-stabilized lipid monolayer heterostructures: A novel biomembrane superstructure, Nanoscale. 8 (2016) 18646–18653. doi:10.1039/c6nr05706c.

4. Научни радови и саопштења публиковани из резултата дисертације

Из резултата докторске дисертације кандидаткиње Јасне М. Вујин објављено је:

4.1. Рад у истакнутом међународном часопису (категорије M22)

- 4.1.1. J. Vujin, W. Huang, J. Ciganović, S. Ptasinska, R. Panajotović, *Direct Probing of Water Adsorption on Liquid-Phase Exfoliated WS₂ Films Formed by the Langmuir–Schaefer Technique*, Langmuir 39, 8055–8064 (2023) DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00107

4.2. Рад у међународном часопису (категорије M23)

- 4.2.1. J. Pešić, J. Vujin, T. Tomašević-Ilić, M. Spasenović, R. Gajić, *DFT study of optical properties of MoS₂ and WS₂ compared to spectroscopic results on liquid phase exfoliated nanoflakes*, Optical and Quantum Electronics, 50:291 (2018) DOI: 0.1007/s11082-018-1553-6

4.3. Саопштење са међународног скупа штампано у целости (категирије М33)

4.3.1. J. Vujin, Đ. Jovanović, R. Panajotović, *Electron-beam damage from SEM to lipid-(graphene, MoS₂, WS₂) heterostructures*, Fourth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD4, May 23-27, 2016, Niš, Serbia (2016), p. 305

4.4. Саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (категирије М34)

4.4.1. J. Vujin, R. Gajić, A. Matković, I. Milošević, J. Pešić, M. Spasenović, T. Tomašević-Ilić, *Transparent and conductive films from liquid phase exfoliated graphene*, Photonica 2015, August 24-28, Belgrade, Serbia, (2015), p. 191

4.4.2. J. Vujin, R. Panajotović, *Modifications of lipid/2D material heterostructures by SEM*, 28th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG 2016), Aug 29 – Sept 2, Belgrade, Srbija, (2016), p. 182

4.4.3. J. Vujin, Đ. Jovanović, R. Panajotović, *Physico-chemical characterization of lipid-2D materials self-assembly for biosensors*, The Fourth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2016), May 23-27, Niš, Serbia, (2016), p. 58

4.4.4. J. Pešić, J. Vujin, T. Tomašević-Ilić, M. Spasenović, R. Gajić, *Ab-initio study of optical properties of MoS₂ and WS₂ compared to spectroscopic results of liquid phase exfoliated nanoflakes*, Photonica 2017, 28.8 - 1.9.2017., Beograd, Srbija, (2017), p. 94

4.4.5. J. Vujin, W. Huang, S. Ptasinska, R. Panajotovic, *Effects of water on thin films consisting of biomolecules and 2D materials*, Seventh International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD7, June 10-14, Herceg Novi, Montenegro, (2019) p. 24

4.4.6. J. Vujin, M. Gilić, R. Panajotović, *Application of 2D materials in building biomolecular heterostructures*”, Seventh International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD7, June 10-14, Herceg Novi, Montenegro, (2019) p. 25

4.4.7. J. Vujin, R. Panajotović, *Spectroscopic insight into the structure of biomolecule-2D material thin films*, 12th Photonics Workshop: Kopaonik, March 10-14, Serbia, (2019)

5. Провера оригиналности докторске дисертације

Према процедуралној корекцији бр. 612-2380/1-23, од 28. јуна 2023. године, провера оригиналности ће се извршити након обнављања лиценце за софтвер *iThenticate*, а пре слања тезе и овог извештаја на коначно одобрење надлежној комисији Универзитета у Београду.

6. Закључак комисије

На основу изложеног може се закључити да резултати кандидаткиње Јасне М. Вујин представљају оригинални и значајан научни допринос у области физичке хемије,

посебно у ужој научној области физичка хемија материјала. Део резултата докторске дисертације кандидаткиња је публиковала у научним часописима и то један рад у истакнутом међународном часопису (категирије М22), један рад у међународном часопису (категирије М23), једно саопштење са међународног скупа штампано у целости (категирије М33), седам саопштења са међународних скупова штампаноих у изводу (категирије М34). У складу са наведеним, Комисија сматра да кандидаткиња испуњава услове за прихватање завршене докторске дисертације прописане од стране Универзитета у Београду и услове дефинисане Правилником о изради и оцени докторске дисертације на Факултету за физичку хемију Универзитета у Београду. На основу изнетог садржаја, Комисија даје позитивну оцену докторске тезе под насловом

„Физичкохемијска карактеризација хетероструктура дводимензионалних материјала (графен, волфрам-дисулфид) и биолошких молекула (цистеин, 1,2-дипалмитоил-*sn*-глицеро-3-фосфохолин)“

ауторке Јасне М. Вујин и препоручује Наставно-научном већу Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду да прихвати ову оцену Комисије, чиме би били испуњени сви услови за одобрење јавне одбране докторске дисертације и стицање звања кандидата доктор физичкохемијских наука.

У Београду, 02.08.2023. године

Чланови комисије:

др Немања Гаврилов, ванредни професор
Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију

др Ана Доброта, доцент
Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију

др Ивана Милошевић, научни сарадник,
Институт за физику Београд, Универзитет у Београду