

НАУЧНОМ ВЕЋУ ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ

Извештај комисије за избор у звање др Борислава Васића у звање научни саветник

На седници Научног већа Института за физику у Београду одржаној 05. 09. 2023. године, именовани смо у комисију за избор др Борислава Васића у звање научни саветник.

Прегледом материјала који нам је достављен, као и на основу личног познавања кандидата и увида у његов рад и публикације, Научном већу Института за физику у Београду подносимо овај извештај.

1. БИОГРАФСКИ И СТРУЧНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Борислав Васић је рођен у Винковцима, Република Хрватска, 14. априла 1982. године. Дипломирао је на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру за Микрорачунарску електронику, септембра 2005. године, са просечном оценом 9,62 и дипломским радом на тему "Анализа нано-ЦМОС компоненти". Докторирао је на Електротехничком факултету у Београду, смер Наноелектроника и фотоника, децембра 2012. године, са тезом под насловом "Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала", која је израђена под менторством др Јелене Радовановић и ментора на Институту за физику у Београду, др Радоша Гајића. У периоду од јануара до маја 2013. године био је на кратком постдокторском усавршавању на Јоханес Кеплер универзитету у Линцу, у групи за нанофотонику под вођством др Томаса Клара.

Борислав Васић је од 1. јуна 2007. године запослен у Центру за физику чврстог стања и нове материјале, Института за физику у Београду, као истраживач-приправник. Фебруара 2010. године је изабран у звање истраживач-сарадник, септембра 2013. године у звање научни сарадник, а априла 2019. године у звање виши научни сарадник. Радио је оквиру три домаћа пројекта надлежног министарства под руководством академика Зорана Поповића и др Радоша Гајића: "Физика нискодимензионих и нанометарских структура и материјала", "Физика уређених наноструктура и нових материјала у фотоници" и "Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокompозити". Био је учесник два пројекта у оквиру Програма за изврсне пројекте младих истраживача ПРОМИС Фонда за науку Републике Србије: "Nanometer thin photovoltaics based on plasmonically enhanced van der Waals heterostructures" под руководством др Горана Исића и "Strain effects in iron chalcogenide superconductors" под руководством др Ненада Лазаревића.

У оквиру међународне сарадње, Борислав Васић је био руководилац два билатерална пројекта научне сарадње са Републиком Аустријом за период 2016-2017 (пројекат под називом "Дводимензионални материјали као подлога за раст органских полупроводника") и 2018-2020 (пројекат под називом "Електричне

особине ван дер Валсових хетероструктура на бази дводимензионалних материјала и органских полупроводника”). Учествовао је на два пројекта из седмог оквирног програма FP7-NMP: NanoCharM - “Multifunctional nanomaterials characterization exploiting ellipsometry and polarimetry” и NIM_NIL - “Large area fabrication of 3D negative index metamaterials by Nanoimprint Lithography”. Био је учесник више билатералних пројеката међународне сарадње (са Италијом, Немачком, Шпанијом, Белорусијом) и COST акција (MP1303 Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction, IC1208 Integrating devices and materials: a challenge for new instrumentation in ICT). Има научну сарадњу са групама из Аустрије (др Кристијан Тајхерт, Универзитет у Леобену), Шпаније (др Алберто Помар, Институт за науку о материјалима у Барселони), Италије (др Димитрис Зографопулос, Институт за микроелектронику и микросистеме у Риму), Белорусије (др Михаил Артемјев, Институт за физичку хемију у Минску) и Хрватске (др Марко Краљ, Институт за физику у Загребу).

Главне теме његовог истраживања су проучавање материјала и површина на микро- и нано-скали техникама скенирајуће микроскопије на бази атомских сила. Овај део истраживања обухвата топографско осликавање површине материјала, карактеризацију њихових механичких, електричних и оптоелектричних особина, као и локалну контролу морфологије и особина материјала применом одговарајућих техника нанолитографије, наноманипулације и сл. Други део истраживања обухвата проучавање оптичких структура на бази метаповршина и плазмонских структура, односно резонантних метало-диелектричних система. Рад на овим темама је базиран на нумеричким прорачунима, док је фокус истраживања на подесивим електромагнетским структурама (модулатори и прекидачи) и структурама намењеним за детекцију индекса преламања (електромагнетски сензори).

Кандидат је коаутор 71 рада који су цитирани укупно 1578 пута (1477 пута не рачунајући самоцитате) док је h-индекс кандидата 21 (20 без аутоцитата) према Scopus бази на дан 5. јуна 2023. године. Добитник је следећих награда: студентске награде Института за физику у Београду 2013. године за најбољу докторску дисертацију, награде фондације Покрени се за науку 2018. године за реализацију научног истраживања у области медицинских и природних наука и допринос развоју науке у Србији, два пута је добијао награду задужбине Ђоке Влајковића за најбољи научни рад младих научних радника Универзитета у Београду 2018. и 2022. године, а две године узастопно, 2020. и 2021. године, је био добитник стипендије јапанске ИТО фондације. Ангажован је на извођењу наставе на докторским студијама на Електротехничком факултету у Београду, на предмету “Скенирајућа микроскопија у наноуци и нанотехнологији”.

2. ПРЕГЛЕД НАУЧНЕ АКТИВНОСТИ

Истраживачки рад др Борислава Васића обухвата:

2.1 проучавање материјала и површина на микро- и нано-скали техникама скенирајуће микроскопије на бази атомских сила,

2.2 проучавање оптичких структура на бази метаповршина и плазмонских структура, односно резонантних метало-диелектричних система, коришћењем нумеричких прорачуна.

Научни рад кандидата се класификује на следећи начин:

- област науке: природно-математичке науке,
- грана науке: физика,
- научна дисциплина: кондензована материја (нанофизика и физика материјала).

Напомена: Научно веће Института за физику у Београду је 24. априла 2018. године донело одлуку о утврђивању предлога за избор кандидата у вишег научног сарадника. Комисија за стицање научних звања је донела решење о избору кандидата у звање виши научни сарадник 25. априла 2019. Године. У складу са Правилником, сви диференцијални услови се односе на период од 24. априла 2018. године, због чега се у наставку, под периодом од одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања кандидата, мисли на период од 24. априла 2018. године. У наставку текста ће се за “период од одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања кандидата“ користити скраћеница “изборни период“.

2.1 Физика материјала и површина

Овај део истраживања обухвата топографско осликавање површине материјала, карактеризацију њихових механичких, електричних и оптоелектричних особина, као и локалну контролу морфологије и физичких особина материјала применом одговарајућих техника нанолитографије, наноманипулације и сл. У наставку је дат преглед истраживања подељен на одговарајуће групе материјала.

2.1.1 Графен и графенски филмови

Наноманипулације микроскопом на бази атомских сила обухватају експерименте у којима се различити нано-објекти померају врхом микроскопа применом одговарајуће латералне силе. Оваква контрола распореда наночестица омогућава фабрикацију различитих наноструктура. Поред основне намене, овакви експерименти омогућавају и проучавање трења између наночестице и подлоге мерењем латералне силе приликом латералног померања. У овом раду је микроскоп на бази атомских сила коришћен за померање органских нанокристалита у форми иглица, који су депоновани ван дер Валсовом епитаксијом на графен и хексагонални борон нитрид. Оно што је интересантно приликом гурања иглица врхом микроскопа, јесте да се оне не померају дуж оригиналних праваца гурања. Уместо тога, оне клизе по дводимензионалним материјалима дуж праваца раста иглица, који делују као невидљиве шине дуж комензурабилних праваца. Друга група експеримената обухвата ротације нанокристалита. Овде је примећено повећање латералне

силе приликом преласка кристалита преко преференцијалних праваца клизања (комензурабилних праваца). У раду је дискутовано и како су анизотропија трења и преференцијални смерови клизања одређени сложеним епитаксијалним односом између нанокристалита и дводимензионалних материјала, тј. односом између њихових комензурабилних и некомензурабилних стања. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, I. Stanković, A. Matković, M. Kratzer, C. Ganser, R. Gajić, C. Teichert,** “Molecules on rails: friction anisotropy and preferential sliding directions of organic nanocrystallites on two-dimensional materials”, *Nanoscale* **10**, 18835-18845 (2018).

Хемијска депозиција из паре је метод који омогућава производњу графена великих димензија. Ипак, графен који расте на стандардним металним подлогама као што су бакар или никл је нехомоген на микроскопској скали што доводи до просторне варијације његових особина. Нехомогеност доминантно потиче од дугачких набора у графену. Они се формирају због скупљања металне подлоге (која се користи за раст) током хлађења, који је део производног циклуса. Молибден је алтернативни супстрат за раст графена због бољег подударача коефицијента топлотног ширења. У овом раду је испитиван квалитет вишеслојног графена на молибдену, однос између морфологије графена и његових механичких и електричних својстава на наноскали, као и њихова просторна хомогеност. Трење је мерено фриксионом микроскопијом, хабање је карактерисано гребанем врхом микроскопа на бази атомских сила, док су електрични површински потенцијали и струје мерени скенирајућом Келвиновом микроскопијом, односно скенирајућом проводном микроскопијом. Резултати мерења показују да графен који је растао на молибдену нема великих набора који су уобичајени за раст на другим металима, иако садржи густу мрежу малих набора. Као резултат ове јединствене морфологије, графен истовремено има ниско трење, високу отпорност на хабање и одличну хомогеност електричног површинског потенцијала и електричне проводности. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, U. Ralević, K. Cvetanović Zobenica, M. M Smiljanić, R. Gajić, M. Spasenović, S. Vollebregt,** “Low-friction, wear-resistant, and electrically homogeneous multilayer graphene grown by chemical vapor deposition on molybdenum”, *Appl. Surf. Sci.* **509**, 144792 (2020).

Ексфолиација из течне фазе је једноставна хемијска метода која омогућава производњу графенских филмова великих површина намењених за транспарентне проводнике. У пракси, неопходно је имати контролу над радном функцијом – излазним радом филма. У овој студији је демонстриран хемијски приступ којим се у једном кораку филмови производе и подешава им се радна функција. Да би се постигло хемијско допирање, уместо воде која се стандардно користи у течној ексфолиацији, уводе се стандардни раствори метала. Као н-допант коришћени су раствори литијума (LiCl , LiNO_3 , Li_2CO_3), а као п-допант је коришћен раствор злата $\text{H}(\text{AuCl}_4)$. Нивои допирања и промене радне функције су карактерисани скенирајућом Келвиновом микроскопијом. Показано је да соли на бази литијума смањују радну функцију, док соли на бази злата повећавају радну функцију целог филма. Максимално допирање у оба смера даје значајан опсег од око

0.7 eV за модулацију радне функције. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- I. R. Milošević, **B. Vasić**, A. Matković, J. Vujin, S. Aškračić, M. Kratzer, T. Griesser, C. Teichert, R. Gajić, “Single-step fabrication and work function engineering of Langmuir-Blodgett assembled few-layer graphene films with Li and Au salts”, *Sci. Rep.* **10**, 8476 (2020).

Електрохемијска редукција графен оксида је ефикасан и релативно једноставан начин за добијање графенских филмова. Кинетика овог процеса је комплексна и зависи од растварача, електролита, рН вредности и других фактора. Већина студија је базирана на макроскопским методама. У овом раду је коришћена циклична волтаметрија у комбинацији са скенирајућом проводном микроскопијом у циљу праћења промена проводности графен оксида и редуковане форме на микро скали. Резултати мерења показују да редукција графен-оксидних филмова почиње локално, док формирана проводна острва расту током редукције. Коначно, у случају потпуне редукције, проводна острва почињу да се спајају и формирају континуални проводни филм. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- D. Karačić, S. J. Gutić, **B. Vasić**, V. M. Mirsky, N. V. Skorodumova, S. V. Mentus, I. A. Pašti, „Electrochemical reduction of thin graphene-oxide films in aqueous solutions—Restoration of conductivity”, *Electrochim. Acta* **410**, 140046 (2022).

2.1.2 Дводимензионални филосиликати

Талк је ван дер Валсов и природно богат минерал са хемијском формулом $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$. Дводимензионални талк би могао бити алтернатива хексагоналном борон-нитриду, стандардном ван дер Валсовом диелектрику у дводимензионалним хетероструктурама. Штавише, због својих добрих механичких и фрикционих својстава, дводимензионални талк се може интегрисати у различите хибридне микро-електро-механичке системе или користити као функционални додатак у полимерима. У овом раду је фокус био на фрикционим особинама дводимензионалних флека талка на наноскали. Коришћењем фрикционе микроскопије и мерењем контактног угла, показано је да љуспице талка дебљине неколико нанометара имају сва својства неопходна за ефикасну лубрикацију у микро- и нано-механичким уређајима: ниску адхезију, хидрофобну природу и низак коефицијент трења од 0.10 ± 0.02 . Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić**, C. Czibula, M. Kratzer, B. R. A. Neves, A. Matković, C. Teichert, “Two-dimensional talc as a van der Waals material for solid lubrication at the nanoscale”, *Nanotechnology* **32**, 265701 (2021).

Пирофилит, са хемијском формулом $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$, је попут талка, природно богат ван дер Валсов минерал који припада групи филосиликата. То је веома мекан, слојевит кристал који се користи за вајање и одличан електрични и топлотни изолатор намењен за рад на високом притиску и температури. Овде је по први пут представљен и истражен дводимензионални пирофилит добијен механичком и течном ексфолиацијом.

Коришћењем фрикционе микроскопије показано је да слојевита структура обезбеђује низак коефицијент трења од око 0.1. Особине хабања, проучаване гребанем врхом микроскопа на бази атомских сила, изразито се разликују од графена. Пошто хабање почиње при ниским нормалним силама, дводимензионални пирофилит се може рутински резати врхом микроскопа тако да је веома погодан за нанолитографију. Према оптичким мерењима, дводимензионални пирофилит је изолатор са енергетским процепом од око 5.2 eV. Локална мерења струје помоћу проводне скенирајуће микроскопије показују да се пирофилитне љуспице понашају као ефикасни електрични изолатори са пробојним напоном од око 6 MV/cm. Добијени резултати указују на могућу примену дводимензионалног пирофилита као јефтиног електричног изолатора и лубриканта, као и материјала који се лако обрађује на наноскали. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, R. Gajić, I. Milošević, Ž. Medić, M. Blagojev, M. Opačić, A. Kremenović, D. Lazić**, “Natural two-dimensional pyrophyllite: Nanoscale lubricant, electrical insulator and easily-machinable material”, *Appl. Surf. Sci.* **608**, 155114 (2023).

2.1.3 Ван дер Ваалсове хетероструктуре

Ван дер Ваалсове хетероструктуре се добијају слагањем дводимензионалних материјала једних преко других тако да различите комбинације дају структуре са новим и јединственим физичким карактеристикама. Особине ван дер Ваалсових хетероструктура веома зависе од квалитета додирне површине између слојева. Уместо да имају атомски равне, чисте и хемијски инертне додирне површине без слободних веза, реалистичне ван дер Ваалсове хетероструктуре садрже мехуриће и интеркалиране слојеве који садрже различите контаминације које су се појавиле током процеса производње. У овом раду је истражен њихов утицај на локална електрична и механичка својства MoS₂/WS₂ хетероструктуре. Применом метода микроскопије на бази атомских сила, показано је да су домени који садрже мехуриће и интеркалиране слојеве локално мекши, са повећаним трењем и дисипацијом механичке енергије. Пошто спречавају директан контакт и ефикасан пренос наелектрисања између дводимензионалних слојева, електрична струја и разлика у електричном површинском потенцијалу (контактна разлика потенцијала) су значајно смањене. Да би се поново успоставио близак контакт између слојева MoS₂ и WS₂, ван дер Ваалсове хетероструктуре су локално спљоштене скенирањем у контактном моду или само локално притиснуте при повећаној нормалној сили. Накнадна електрична мерења показују да се контактна разлика потенцијала између два слоја снажно повећава услед омогућеног преноса наелектрисања, док локалне струјно-напонске карактеристике показују повећану проводност без нежељених потенцијалних баријера. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, U. Ralević, S. Aškrić, D. Čapeta, M. Kralj**, “Correlation between morphology and local mechanical and electrical properties of van der Waals heterostructures”, *Nanotechnology* **33**, 155707 (2022).

2.1.4 Танки филмови метал-оксида

Танки филмови различитих металних оксида имају потенцијалну примену у реализацији различитих електро-механичких прекидачких елемената. У оквиру овог дела истраживања испитиване су методе за локалну контролу електричних особина металних-оксида применом одговарајуће механичке силе и електричног напона. Локална механичка контрола локалних електричних особина је испитивана на танким манганитним филмовима $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$. У експериментима су коришћене методе скенирајуће атомске микроскопије. Механички притисак који се врши на филм је контролисан нормалном силом примењеном на врх микроскопа. Промене електричних особина, површинског потенцијала и електричне ступе, су мерене скенирајућом Келвиновом микроскопијом и скенирајућом проводном микроскопијом. Резултати мерења показују пад електричне проводности и прелаз у локално изолаторско стање за довољно велике притиске примењене на филмове. Мапе површинских потенцијала сугеришу да је овај прелаз доминантно одређен флексо-електричним пољем индукованим на површини узорка услед локалног нехомогеног напрезања. Процес релаксације електричног површинског потенцијала указује на то да је доминантан механизам дифузија кисеоничних ваканција из унутрашњости манганитних филмова према њиховој површини. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, Z. Konstantinović, E. Pannunzio-Miner, S. Valencia, R. Abrudan, R. Gajić, A. Pomar**, “Nanoscale mechanical control of surface electrical properties of manganite films with magnetic nanoparticles”, *Nanoscale Adv.* **1**, 1763-1771 (2019).

Локална електрична контрола локалних електричних особина је испитивана на танким филмовима полуметалног SrIrO_3 . Анализирана је појава Андерсоновог типа метал–изолатор прелаза услед смањења дебљине филма. За довољно танке филмове (испод ~ 3 нм) узорци се понашају као изолатори. Одликују се хистерезисним струјно-напонским карактеристикама које указују на реверзибилно пребацивање између два стања са различитим отпором. Прелаз у стање ниског отпора и нагло повећање интензитета струје је оштар. Детектује се за вредности изнад добро дефинисаног граничног напона. С друге стране, дебљи филмови показују полуметални карактер. Струјно-напонске карактеристике показују прогресивне промене локалне електричне отпорности, али без јасно дефинисаног граничног напона, што указује на одсуство метал-изолатор прелаза. На сличан начин, локална електрична контрола локалних електричних особина је испитивана и на танким филмовима изолаторске фазе Sr_2IrO_4 . И они се одликују хистерезисним струјно-напонским карактеристикама, са оштрим прелазом у стање ниске електричне отпорности изнад добро дефинисаног граничног напона. Резултати истраживања су приказани у следећим радовима:

- **V. Fuentes, B. Vasić, Z. Konstantinović, B. Martínez, Ll. Balcells, A. Pomar**, “Resistive Switching in Semimetallic SrIrO_3 Thin Films”, *ACS Appl. Electron. Mater.* **1**, 1981-1988 (2019),
- **V. Fuentes, B. Vasić, Z. Konstantinović, B. Martínez, Ll. Balcells, A. Pomar**, Resistive switching in Strontium iridate based thin films, *J. Magn. Magn. Mater.* **501**, 166419 (2020).

2.1.5 Полупроводнички нанокристали

Квантно конфинирање у дводимензионалним полупроводничким нано-плочицама је одређено њиховом дебљином која се може прецизно контролисати током синтезе. Нано-плочице стога имају веома узак спектар луминесценције што је од фундаменталне важности за изворе светлости са веома високом чистоћом боје. Практични извори светлости захтевају динамичку контролу луминесценције. Један ефикасан приступ за ову сврху је директно убризгавање носилаца наелектрисања у нано-плочице. У оквиру овог истраживања, процеси наелектрисавања/разелектрисавања и локалне електричне особине CdSe/CdS нано-плочица су испитивани електричним мерним методама заснованим на микроскопији атомских сила. Представљене су једноставне и ефикасне процедуре за операције писања, читања и брисања наелектрисања: наелектрисања се уписују врхом микроскопа који је у контакту са нано-плочицама и под напоном, просторна расподела утиснутих наелектрисања се мери/чита помоћу Келвинове скенирајуће микроскопије, док се убачена наелектрисања бришу помоћу врха микроскопа поларисаног напоном супротног поларитета у односу на процес уписа. Количина убризганих наелектрисања је добро контролисана интензитетом, поларитетом и трајањем примењеног напона, док је брзина накнадне спонтане релаксације наелектрисања доминантно одређена влажношћу околине. Скенирајућа микроскопија на бази атомских сила је коришћена и за мерење морфологије филмова изграђених од CdSe/CdS нано-плочица. Подаци о дебљини и храпавости филма су коришћени као улазни подаци за елипсометријски модел у циљу одређивања оптичких особина. Резултати истраживања су приказани у следећим радовима:

- **B. Vasić**, S. Aškračić, M. M. Jakovljević, M. Artemyev, “Local electrical properties and charging/discharging of CdSe/CdS core-shell nanoplatelets”, *Appl. Surf. Sci.* **513**, 145822 (2020),
- M. M. Jakovljević, S. Aškračić, G. Isić, **B. Vasić**, R. Gajić, M. Artemyev, “Pseudo-refractive index and excitonic features of single layer CdSe/CdS core-shell nanoplatelet films”, *Nanotechnology* **31**, 435708 (2020).

2.1.6 Биолошке ћелије

Дизајн наночестица за примену у медицинској дијагностици и терапији захтева темељно разумевање различитих аспеката интеракција између наночестица и ћелија. У овом раду, микроскопија на бази атомских сила је коришћена за праћење морфолошких промена узрокованих интеракцијом између HeLa ћелија добијених из карцинома грлића материце и две врсте наночестица церијум диоксида (CeO_2), са и без превлаке од декстрана. Резултати микроскопских мерења су показали јасне промене у храпавости и висини третираних и нетретираних ћелије. Микроскопске слике показују и визуелне промене третираних ћелија, пре свега у облику, као и директну потврду њихове деградације кроз фрагментацију и распадање ћелија. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- M. Miletić, S. Aškračić, J. Rüger, **B. Vasić**, L. Korićanac, A. Saif Mondol, J. Dellith, J. Popp, I. W. Schie, Z. Dohčević-Mitrović, “Combined Raman and AFM detection of changes

in HeLa cervical cancer cells induced by CeO₂ nanoparticles – molecular and morphological perspectives”, *Analyst* **145**, 3983-3995 (2020).

2.2 Електромагнетске метаповршине

Истраживања електромагнетских метаповршина су базирана на нумеричким прорачунима, а фокус је на дизајну структура намењених за детекцију индекса преламања (електромагнетски сензори) и подесивих електромагнетских структура (модулатори и прекидачи).

2.2.1 Електромагнетске структуре за детекцију индекса преламања – електромагнетски сензори

Стандардне метаповршине се састоје од паралелних металних трака, периодично распоређених у равни, које су од дебелог металног филма развојене танким слојем диелектрика (изолатора), дебљине далеко мање од таласне дужине упадне светлости. Овакве метал-изолатор-метал структуре се понашају као низ електромагнетских резонатора подталасних димензија. У оквиру овог дела истраживања, проучавани су сензори индекса преламања на бази шупљих метаповршина. Уместо диелектричног слоја, ове структуре имају ваздушни процеп који омогућава лаку инфилтрацију течног анализата у шупљине између два метална слоја. Тај простор унутар резонатора је област са максималним појачањем електричног поља. Услед преклапања ове области и анализата, шупље метаповршине су веома осетљиве на мале промене индекса преламања анализата.

У публикованим радовима су дате опште процедуре за постизање оптималног дизајна сензора у три конфигурације: структуре типа печурке са уским диелектричним постољима која носе горњи низ металних трака, шупље структуре са низом металних трака које се ослањају на удаљени бочни ослонац, и шупље структуре где су металне траке ослоњене на горњи енкапсулирајући слој. Показана је висока осетљивост на промену индекса преламања за три различите мерне методе: спектралну, рефлексивну и фазну. Осетљивост за спектрална мерења на терахерцним учестаностима је преко 700 гигахерца по јединици индекса преламања што је једна од максималних вредности до сада пријављених у литератури. Показано је да је осетљивост индекса преламања максимална у режиму критичног спрезања са једнаким брзинама радијативног и нерадијативног распада резонантног мода, при чему су ове брзине доминантно одређене дебљином метаповршине. Полуаналитичке формуле за осетљивости индекса преламања за три мерна метода су изведене из једначина теорије временски спрегнутог мода и модела резонанције стојећег таласа. За њих су потребна три нумерички израчуната параметра, резонантна фреквенција и брзине радијативног односно нерадијативног распада резонантног мода, који су добијени фитовањем одговарајућег рефлексивног спектра.

Шупље метаповршине су дизајниране и за детекцију апсорпције. Показано је да се максимална осетљивост постиже у режиму где је брзина радијативног распада резонантног мода већа од брзине нерадијативног распада. Период оптималне метаповршине треба да буде што већи, а радна фреквенција треба да буде једнака

резонантној фреквенцији метаповршина. Исти закључци важе и за шупље метаповршине намењене за површински побољшану инфрацрвену апсорпцију. Поред тога, њихова резонантна фреквенција треба да одговара фреквенцији вибрација анализата који се истражује. Дизајниране структуре поседују високу осетљивост која обезбеђује детекцију имагинарног дела индекса преламања мањег од 0.001.

Резултати у овом делу истраживања су приказани у следећим радовима:

- **B. Vasić and G. Isić**, “Refractive index sensing with hollow metal–insulator–metal metasurfaces”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, 285106 (2021),
- **B. Vasić**, “Semi-analytical approach for refractive index sensors based on reflective metasurfaces”, *J. Opt. Soc. Am. B* **38**, 1676-1683 (2021),
- **B. Vasić**, “Design of hollow metasurfaces for absorption sensors and surface enhanced infrared absorption” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55**, 315105 (2022).

2.2.2 Подесиве електромагнетске структуре – електромагнетски модулатори и прекидачи

Подесиве електромагнетске структуре су структуре чији се одзив може динамички контролисати у времену применом одговарајуће побуде. Типичан пример су електромагнетски модулатори и прекидачи - структуре са подесивом рефлексijом и/или трансмисијом. Основни начин за реализацију подесивих електромагнетских структура је спрезање основне структуре са одговарајућим подесивим елементом. У односу на тип подесивог елемента, овај део истраживања се може поделити на два дела: подесиве структуре са полупроводницима и подесиве структуре са течним кристалима.

У оквиру подесивих структура на бази полупроводника, проучавани су терахерцни модулатори са електричним подешавањем одзива. Дизајнирани су коришћењем електромагнетских метаповршина на бази метал-полупроводник-метал структуре, где се полупроводнички слој налази између низа паралелних металних трака са горње стране и дебелог металног филма - рефлектора, са доње стране. Функционисање оваквих метаповршина је засновано на инверзно поларисаним Шотки спојевима који се формирају између горњих металних трака и полупроводника n-типа који се налази испод. Електрични напон примењен између металних трака и металног рефлектора контролише дебљину слоја осиромашења електрона чиме се подешава Друдеова пермитивност полупроводничког слоја. Као резултат промене пермитивности средишњег слоја, могуће је контролисати и интензитет рефлектованог зрачења. Структуре дизајниране за рад на фреквенцијама око једног терахерца имају изузетно високу дубину модулације од преко 90%. Истовремено, процес модулације је веома брз, реда величине пикосекунди. Резултати истраживања су приказани у следећем раду:

- **G. Isić, G. Sinatkas, D. C. Zografopoulos, B. Vasić, A. Ferraro, R. Beccherelli, E. E. Kriezis, M. Belić**, Electrically tunable metal–semiconductor–metal terahertz metasurface modulators, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25**, 1-8 (2019).

У оквиру подесивих структура на бази течних кристала, проучаване су метаповршине са просторно променљивим фазним профилем. Овакве структуре омогућавају пројектовање компактних уређаја намењених усмеравању електромагнетног поља. У циљу постизања подесивог управљања снопом на терахерцним учестаностима, истраживане су метаповршине на бази метал-изолатор-метал резонатора инфилтрираних течним кристалима. Нематски течни кристали поседују велику бирефригенцију (разлика између ординарног и екстраординарног индекса преламања) која је истовремено и подесива електричним пољем, односно применом одговарајућег електричног напона. Као такви, течни кристали су веома погодни за реализацију подесивих терахерцних уређаја. Просторни фазни профил посматраних метаповршина је дефинисан напонам примењеним на једичне ћелије метаповршине. Помоћу електро-оптичког ефекта, напон контролише оријентацију молекула течног кристала и ефективни индекс преламања. Користећи овај приступ могуће је динамички мењати профил фазе. Разматрана су три карактеристична случаја, раван, бинарни и градијентни профил, при чему одговарајуће метаповршине са датим профилима функционишу као рефлексиона огледала, разделници снопа и дифракционе решетке (где је целокупна рефлектована светлост садржана у првом дифракционом реду). Подесиво усмеравање електромагнетног снопа се постиже променом угла дифракције првог реда, кроз реконфигурацију периода метаповршине путем одговарајућег подешавања примењеног напона. Резултати истраживања су приказани у следећим радовима:

- **B. Vasić**, G. Isić, R. Beccherelli, D. C. Zografopoulos, Tunable beam steering at terahertz frequencies using reconfigurable metasurfaces coupled with liquid crystals, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26**, 1-9 (2019),
- G. Isić, D. C. Zografopoulos, D. B. Stojanović, **B. Vasić**, M. R. Belić, Beam steering efficiency in resonant reflective metasurfaces, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **27**, 4700208 (2021).

3. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАЛИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

3.1 Квалитет научних резултата

3.1.1 Научни ниво и значај резултата, утицај научних радова

Др Борислав Васић је у свом досадашњем раду објавио 71 рад у међународним часописима са ISI листе. Од укупног броја радова, 10 је објављено у M21a категорији, 42 је објављено у M21 категорији, 16 је објављено у M22 категорији и 3 је објављено у M23 категорији. У изборном периоду, др Борислав Васић је објавио 28 радова у међународним часописима са ISI листе. Од тог броја радова, 4 је објављено у M21a категорији, 14 је објављено у M21 категорији, 9 је објављено у M22 категорији и 1 у M23 категорији. Списак свих радова груписаних по категоријама је дат у поглављу 5.

Као пет најзначајнијих радова кандидата у изборном периоду могу се узети следећи радови:

1. **B. Vasić**, G. Isić, R. Beccherelli, D. C. Zografopoulos, “Tunable beam steering at terahertz frequencies using reconfigurable metasurfaces coupled with liquid crystals”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26**, 1-9 (2019),
импакт фактор: 4.917,
категирија: M21,
број хетероцитата: 37,
doi: 10.1109/JSTQE.2019.2956856.
2. **B. Vasić**, U. Ralević, K. Cvetanović Zobenica, M. M Smiljanić, R. Gajić, M. Spasenović, S. Vollebregt, “Low-friction, wear-resistant, and electrically homogeneous multilayer graphene grown by chemical vapor deposition on molybdenum”, *Appl. Surf. Sci.* **509**, 144792 (2020),
импакт фактор: 6.707,
категирија: M21a,
број хетероцитата: 12,
doi: 10.1016/j.apsusc.2019.144792.
3. **B. Vasić**, C. Czibula, M. Kratzer, B. R. A. Neves, A. Matković, C. Teichert, “Two-dimensional talc as a van der Waals material for solid lubrication at the nanoscale”, *Nanotechnology* **32**, 265701 (2021),
импакт фактор: 3.874,
категирија: M21,
број хетероцитата: 9,
doi: 10.1088/1361-6528/abeffe.

4. **B. Vasić**, U. Ralević, S. Aškračić, D. Čapeta, M. Kralj, “Correlation between morphology and local mechanical and electrical properties of van der Waals heterostructures”, *Nanotechnology* **33**, 155707 (2022),
импакт фактор: 3.874,
категорија: M21,
број хетероцитата: 3,
doi: 10.1088/1361-6528/ac475a.
5. **B. Vasić**, R. Gajić, I. Milošević, Ž. Medić, M. Blagojev, M. Opačić, A. Kremenović, D. Lazić, “Natural two-dimensional pyrophyllite: Nanoscale lubricant, electrical insulator and easily-machinable material”, *Appl. Surf. Sci.* **608**, 155114 (2023),
импакт фактор: 7.392,
категорија: M21a,
број хетероцитата: 1,
doi: 10.1016/j.apsusc.2022.155114.

У првом раду, кандидат је предложио коришћење метаповршина инфилтрираних течним кристалима за подесиво усмеравање терахерцног зрачења. Проучаване су метаповршине са просторно променљивим фазним профилем који је дефинисан напоном примењеним на течни кристал. Разматрана су три карактеристична случаја, раван, бинарни и градијентни профил, при чему одговарајуће метаповршине са датим профилима функционишу као рефлексивна огледала, разделници снопа или дифракционе решетке (где је целокупна рефлексивна светлост садржана у првом дифракционом реду). Подесиво усмеравање електромагнетног снопа се постиже променом угла дифракције првог реда, кроз реконфигурацију периода метаповршине путем одговарајућег подешавања примењеног напона. Кандидат је био одговорни аутор рада, формулисао идеју, учествовао у извођењу нумеричких прорачуна, нацртао све слике, осмислио начин излагања и написао прву верзију рада.

У другом раду, кандидат је показао да вишеслојни графен добијен хемијском депозицијом из паре на молибдену има истовремено ниско трење, високу отпорност на хабање и одличну хомогеност електричног површинског потенцијала и електричне проводности. У ту сврху, користио је методе скенирајуће микроскопије на бази атомских сила. Трење је мерено фриксионом микроскопијом, хабање је карактерисано гребањем врхом микроскопа на бази атомских сила, док су електрични површински потенцијали и струје мерени скенирајућом Келвиновом микроскопијом односно скенирајућом проводном микроскопијом. Кандидат је био одговорни аутор рада, формулисао идеју, извршио сва експериментална мерења изузев мерења Раман спектроскопијом (слика 5), нацртао све слике, осмислио начин излагања и написао прву верзију рада.

У трећем раду, кандидат је показао да дводимензионални талк (ван дер Валсов минерал са хемијском формулом $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) дебљине неколико нанометара има сва својства неопходна за ефикасну лубрикацију у микро- и нано-механичким уређајима: ниску адхезију, хидрофобну природу и низак коефицијент трења од 0.10

± 0.02 . У ту сврху, користио је методе скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, скенирајућу фрикциону микроскопију и адхезиона мерења. Кандидат је био одговорни аутор рада, формулисао идеју, извршио сва експериментална мерења изузев мерења Раман спектроскопијом (слика 1) и мерења контактеног угла (слика 2), нацртао све слике, осмислио начин излагања и написао прву верзију рада.

У четвртој раду, кандидат је истражио утицај интеркалираних мехурића и слојева на локална електрична и механичка својства MoS_2/WS_2 хетероструктуре. Применом метода микроскопије на бази атомских сила, показао је да су домени који садрже мехуриће и интеркалиране слојеве локално мекши, са повећаним трењем и дисипацијом механичке енергије. Пошто спречавају директан контакт и ефикасан пренос наелектрисања између дводимензионалних слојева, електрична струја и разлика у електричном површинском потенцијалу (контактна разлика потенцијала) су значајно смањене. Да би се поново успоставио близак контакт између слојева MoS_2 и WS_2 , ван дер Ваалсове хетероструктуре су локално спљоштене скенирањем у контактном моду или само локално притиснуте при повећаној нормалној сили. Накнадна електрична мерења показују да се контактна разлика потенцијала између два слоја повећава услед омогућеног преноса наелектрисања, док локалне струјно-напонске карактеристике показују повећану проводност без нежељених потенцијалних баријера. Кандидат је био одговорни аутор рада, формулисао идеју, извршио сва експериментална мерења изузев Раман спектроскопије (слика 2), нацртао све слике са експерименталним резултатима изузев слике 2, осмислио начин излагања и написао прву верзију рада.

У петом раду, кандидат је показао да дводимензионални пирофилит (ван дер Валсов минерал са хемијском формулом $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) има низак коефицијент трења од око 0.1, да је веома погодан за нанолитографију засновану на гребању, и да се понаша као ефикасан електрични изолатор са пробојним напоном од око 6 MV/cm. У ту сврху, користио је методе скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, скенирајућу фрикциону микроскопију, гребањем врхом микроскопа на бази атомских сила у контактном моду, и проводну скенирајућу микроскопију. Кандидат је био одговорни аутор рада, формулисао идеју, извршио сва експериментална мерења изузев дифрактометрије (слика 1), Раман спектроскопије (слика 2), и оптичких мерења (слика 8), нацртао све слике, осмислио начин излагања и написао прву верзију рада.

Кандидат сматра да у групу најзначајнијих радова спада и следећи рад који није уврштен пошто га је други аутор искористио за свој избор у звање:

B. Vasić, I. Stanković, A. Matković, M. Kratzer, C. Ganser, R. Gajić, C. Teichert, “Molecules on rails: friction anisotropy and preferential sliding directions of organic nanocrystallites on two-dimensional materials”, *Nanoscale* **10**, 18835-18845 (2018), импакт фактор: 7.367, категорија: M21a, број хетероцитата: 7, doi: 10.1039/C8NR04865G.

У овом раду, кандидат је користио микроскоп на бази атомских сила за померање органских нанокристалита у форми иглица по дводимензионалном графену и хексагоналном борон нитриду. Показао је да се приликом гурања врхом микроскопа, нано-иглице не померају дуж оригиналних праваца гурања. Уместо тога, оне клизе по дводимензионалним материјалима првенствено дуж правца раста иглица, који делују као невидљиве шине дуж комензурабилних праваца. Друга група експеримената обухвата ротације нанокристалита које показују повећање латералне силе приликом преласка кристалита преко комензурабилних праваца. На тај начин, показано је постојање преференцијалних смерова клизања и анизотропије трења који су одређени сложеним епитаксијалним односом између нанокристалита и дводимензионалних материјала, тј. односом између њихових комензурабилних и некомензурабилних стања. Кандидат је био један од одговорних аутора рада, формулисао идеју, извршио сва експериментална мерења, нацртао све слике са експерименталним резултатима, осмислио начин излагања и написао прву верзију рада.

3.1.2 Позитивна цитираност научних радова кандидата

Према Scopus бази на дан 5. јуна 2023. године, радови кандидата су цитирани 1578 пута, док је број цитата без аутоцитата 1477. Према истој бази, h-индекс кандидата је 21, односно 20 без аутоцитата. Сви подаци о цитираности са интернет странице Scopus базе су дати након списка свих радова.

3.1.3 Параметри квалитета радова и часописа

Битан елемент за процену квалитета научних резултата је и квалитет часописа у којима су радови објављени, односно њихов импакт фактор – ИФ. У категорији M21a, M21, M22 и M23, кандидат је објавио радове у следећим часописима, где су подвучени они часописи (тј. одговарајући импакт фактори) у којима је кандидат објављивао у изборном периоду □

- 1 рад у *Nano Letters* (ИФ=13,198),
- 1 рад у *Journal of Power Sources* (ИФ=9.794),
- 1 рад у *2D Materials* (ИФ=9,611),
- 4 рада у *Applied Surface Science* (ИФ=7.392 за 1 рад, ИФ=6.707 за два рада, ИФ=3.150 за 1 рад),
- 1 рад у *Nanoscale* (ИФ=7.367),
- 1 рад у *Electrochimica Acta* (ИФ=7.336),
- 3 рада у *Carbon* (ИФ=6,337),
- 1 рад у *Journal of Alloys and Compounds* (ИФ=6.371),
- 1 рад у *Nanomaterials* (ИФ=5.719),
- 3 рада у *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* (ИФ=4.917),
- 1 рад у *Analyst* (ИФ=4.616),
- 1 рад у *Nanoscale Advances* (ИФ=4.553),
- 1 рад у *Scientific Reports* (ИФ=4.380),
- 2 рада у *Physical Review Applied* (ИФ=4,061),

- 3 рада у *Applied Physics Letters* (ИФ=3.844 за 2 рада, ИФ=3.844 за 1 рад),
- 1 рад у *Optics Express* (ИФ=3.88),
- 1 рад у *New Journal of Physics* (ИФ=3.786),
- 6 радова у *Nanotechnology* (ИФ=3.874 за 3 рада, ИФ=3.573 за 2 рада, ИФ=3.979 за 1 рад),
- 1 рад у *Physical Review B* (ИФ=3.475),
- 2 рада у *Optics Letters* (ИФ=3.416 за 1 рад, ИФ=3.385 за 1 рад),
- 2 рада у *Physica E: Low Dimensional Systems and Nanostructures* (ИФ=3.369 за 1 рад, ИФ=3.176 за 1 рад).
- 1 рад у *ACS Applied Electronic Materials* (ИФ=3.314).
- 6 радова у *Journal of Physics D: Applied Physics* (ИФ=3.409 за 1 рад, ИФ=3.169 за 1 рад, ИФ=2.772 за 2 рада, ИФ=2.721 за 1 рад, ИФ=2.544 за 1 рад),
- 1 рад у *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (ИФ=2.993),
- 1 рад у *Journal of Raman Spectroscopy* (ИФ=2.809),
- 7 радова у *Journal of Applied Physics* (ИФ=2.328 за 1 рад, ИФ=2.068 за 1 рад, ИФ=2.185 за 1 рад, ИФ=2.210 за 1 рад, ИФ=2.210 за 2 рада, ИФ=2.168 за 1 рад),
- 1 рад у *Journal of Biotechnology* (ИФ=2.871),
- 1 рад у *Biotechnology Progress* (ИФ=2.167),
- 3 рада у *Journal of Optical Society of America B* (ИФ=2.210 за 2 рада, ИФ=2.180 за 1 рад),
- 1 рад у *Optical and Quantum Electronics* (ИФ=2.084).
- 3 рада у *Journal of Nanophotonics* (ИФ=1.899),
- 1 рад у *Journal of Vacuum Science and Technology B* (ИФ=1.358),
- 2 рада у *Optical Materials* (ИФ=2.238),
- 2 рада у *Physica Scripta* (ИФ=1.088),
- 2 рада у *Acta Physica Polonica A* (ИФ=0.767),
- 1 рад у *Optoelectronics and Advanced Materials* (ИФ=0.452).

Укупан фактор утицаја радова кандидата је 268.85, а у изборном периоду, тај фактор је 126.6. Часописи у којима је кандидат објављивао су по свом угледу веома цењени у областима којима припадају. У областима нано наука, наука о материјалима и површинама посебно се истичу: *Applied Surface Science*, *Nanoscale*, *Carbon* и *Nanotechnology*, док се у областима фотонице и примењене физике посебно истичу *Physical Review Applied*, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, *Applied Physics Letters*, *Optics Express* и *Optics Letters*.

Додатни библиометријски показатељи квалитета часописа у којима је кандидат објављивао радове је дат у следећој табели. Она садржи импакт факторе (ИФ) радова, М поене радова по српској категоризацији научноистраживачких резултата, као и импакт фактор нормализован по импакту цитирајућег чланка (СНИП). У табели су дате укупне вредности, као и вредности свих фактора усредњених по броју чланака и по броју аутора по чланку.

	ИФ	М	СНИП
Укупно	126.6	200	31.03
Усредњено по чланку	4.52	7.14	1.11
Усредњено по аутору	26.78	44.34	7.32

3.1.4 Степен самосталности и степен учешћа у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству

Кандидат је водећи аутор 33 рада, други аутор 9 радова, трећи аутор 7 радова и четврти аутор 7 радова (укупан број радова кандидата је 71). На радовима који су објављени у изборном периоду, кандидат је водећи аутор 11 радова, други аутор 4 рада, трећи аутор 3 рада и четврти аутор 6 радова (укупни број радова кандидата који су објављени у периоду након претходног избора у звање је 28).

У случају чланака где је кандидат водећи аутор, кандидат је формулисао проблем, самостално добио експерименталне резултате коришћењем скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, самостално или у сарадњи са коауторима извршио нумеричке електромагнетске прорачуне, нацртао све или већину слика, осмислио начин излагања и самостално или у сарадњи са коауторима написао рад. У случају радова где је кандидат други, трећи или четврти аутор, допринос је следећи: формулација проблема или учешће у истој, експериментална мерења коришћењем скенирајуће микроскопије на бази атомских сила или учешће у истим, учешће у дискусији и анализи резултата, учешће у писању рада. Преостали радови (где кандидат није међу прва четири аутора) су настали као резултат сарадње са другим колегама и групама у земљи и иностранству на темама које су они дефинисали, док допринос кандидата у овим радовима обухвата мерења узорака коришћењем различитих метода скенирајуће микроскопије на бази атомских сила и одговарајућу анализу добијених експерименталних резултата.

Кандидат има активну научну сарадњу са истраживачким групама из Аустрије (др Кристијан Тајхерт и др Маркус Крацер, Монтан универзитет у Леобену), Шпаније (др Алберто Помар, Институт за науку о материјалима у Барселони), Италије (др Ромео Бечерели и др Димитрис Зографопулос, Институт за микроелектронику и микросистеме у Риму), Белорусије (др Михаил Артемјев, Институт за физичку хемију у Минску) и Хрватске (др Марко Краљ, Институт за физику у Загребу). Као резултат ових сарадњи, настали су следећи радови: [4, 14, 42, 66] у сарадњи са групом из Аустрије, [16, 19, 23, 27, 33] у сарадњи са групом из Италије, [55, 56, 57] у сарадњи са групом из Шпаније, [3, 21] у сарадњи са групом из Белорусије, и [11] у сарадњи са групом из Хрватске. Рад [39] је настао током боравка кандидата на постдокторском усавршавању на Јоханес Кеплер универзитету у Линцу. Осим резултата у раду [39], сви остали експериментални и нумерички резултати кандидата су постигнути на Институту за физику у Београду.

3.1.5 Награде

Кандидат је добитник следећих награда (награде добијене у изборном периоду су означене звездом):

[1] студентске награде Института за физику у Београду 2013. године за најбољу докторску дисертацију,

[2*] награде фондације Покрени се за науку 2018. године за реализацију научног истраживања у области медицинских и природних наука и допринос развоју науке у Србији,

[3*] награду задужбине Ђоке Влајковића за најбољи научни рад младих научних радника Универзитета у Београду 2018. године,

[4*] награду задужбине Ђоке Влајковића за најбољи научни рад младих научних радника Универзитета у Београду 2022. године,

[5*] стипендије јапанске ИТО фондације две године узастопно, 2020. и 2021. године.

Докази о добијеним наградама и стипендијама се налазе у Прилогу 1.

3.1.6 Елементи применљивости научних резултата

У оквиру истраживања физике материјала и површина коришћењем метода скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, фокус је на проучавању оних особина материјала које омогућавају потенцијлану примену. У наставку је дат кратак опис применљивости резултата за истраживане класе материјала:

- Графен, као добар проводник и оптички транспарентан материјал, је интересантан за израду ултра-танких, транспарентних електрода. Стога је фокус истраживања био на његовим електричним особинама, електричној проводљивости и излазном раду, на њиховој просторној хомогености, утицају механичких дефеката, као и контроли електричних особина путем допирања.
- Графен и дводимензионални филосиликати, талк и пирофилит, су ван дер Ваалсови материјали са ламеларном структуром која омогућава лако смицање дводимензионалних слојева једног преко друго. Резултујуће треће је стога мало што омогућава примену ових материјала као чврстих лубриканата у нано- и микро-механичким системима. Истраживања су зато била фокусирана на фрикционе особине, пре свега на мерење коефицијента трења.
- Дводимензионални талк и пирофилит су диелектрици са великим електронским процепом. Њихова потенцијална примена је за израду гејт-оксида (диелектрични слој испод гејта у класичној метал-оксид-полупроводник структури) у транзисторима на бази дводимензионалних материјала и генерално, за израду танких изолаторских слојева у ван дер Ваалсовим

хетероструктурама. Истраживања су зато била усмерена ка мерењу пробнојног напона ових диелектрика.

- Танки филмови металних оксида имају особину да се електрична проводност може контролисати применом одговарајућег електричног напона или механичке силе. Ове особине су биле истраживане у контексту реализације нове класе електро-механичких прекидачких елемената на микро- и нано-скали.
- Полупроводнички кристали зраче светлост чија се таласна дужина може подешавати количином наелектрисуња у кристалима. Стога је било природно истражити микроскопске методе за ефикасно утискивање наелектрисуња у полупроводничке нано-плочице (операција “писања”), затим “читање” уписаног наелектрисуња мерењем промене електричног површинског потенцијала, и на крају “брисање” утиснутог наелектрисуња применом напона супротног поларитета у односу на писање.

У оквиру проучавања оптичких структура на бази метаповршина и плазмонских структура, односно резонантних метало-диелектричних система, истраживања су усмерена ка дизајну подесивих електромагнетских структура (модулатори и прекидачи) и структура намењених за детекцију индекса преламања (електромагнетски сензори). Испитиване су:

- терахерцне модулаторске структуре за контролу интензитета рефлектованог поља од мале вредности блиске нуле, па до велике вредности блиске јединици, чиме се реализује функција оптичког прекидачког елемента,
- терахерцне модулаторске структуре за контролисано усмеравање зрачења, где се контролише интензитет и угао усмереног рефлектованог зрачења, чиме се реализује подесива терахерцна антена,
- електромагнетске сензорске структуре за детекцију малих промена реалног и имагинарног (детекција апсорпције) дела индекса преламања течних и гасовитих анализата,
- електромагнетске сензорске структуре за површином побољшану инфрацрвену апсорпцију намењених за детекцију карактеристичних вибрационих модова анализата у инфрацрвеном делу спектра.

3.2 Ангажованост у формирању научних кадрова

Кандидат је остварио следеће ставке (ставке у којима је постојала активност у изборном периоду су означене звездом):

[1*] Сарађивао је и помагао (кроз обуку, заједничка мерења, анализу и дискусију резултата) др Виктору Фуентесу (тада докторанту на Институту за науку о материјалима у Барселони, Шпанија), у истраживању танких филмова полуметалног SrIrO_3 и изолаторске фазе Sr_2IrO_4 коришћењем метода скенирајуће микроскопије на бази атомских сила. Резултат ове сарадње су два рада на којима је Борислав Васић други аутор:

- V. Fuentes, **B. Vasić**, Z. Konstantinović, B. Martínez, Ll. Balcells, A. Pomar, “Resistive Switching in Semimetallic SrIrO_3 Thin Films”, *ACS Appl. Electron. Mater.* **1**, 1981-1988 (2019),

- V. Fuentes, **B. Vasić**, Z. Konstantinović, B. Martínez, Ll. Balcells, A. Pomar, Resistive switching in Strontium iridate based thin films, *J. Magn. Magn. Mater.* **501**, 166419 (2020).

Горе наведени радови су укључени у докторску дисертацију (поглавље 5) др Виктора Фуентеса под називом “Resistive Switching in Strontium Iridates” (Universtat Autnoma de Barcelona, 2020. година).

[2] Сарађивао је и помагао (кроз обуку, заједничка мерења, анализу и дискусију резултата) др Бојану Стојадиновићу (тада студенту докторских студија на Физичком факултету Универзитета у Београду, запосленом на Институту за физику у Београду), у истраживању танких филмова бизмут-ферита коришћењем метода скенирајуће микроскопије на бази атомских сила. Резултат ове сарадње је рад

- B. Stojadinović, **B. Vasić**, D. Stepanenko, N. Tadić, R. Gajić, Z. Dohčević-Mitrović "Variation of electric properties across the grain boundaries in BiFeO₃ film", *J. Phys. D: Appl. Phys* **49**, 045309 (2016),

где је Борислав Васић други аутор и одговорни аутор поред менторке др Бојана Стојадиновића, др Зоране Дохчевић-Митровић, научног саветника Института за физику у Београду. Горе наведени рад је укључен у докторску дисертацију (поглавље 6.3) др Бојана Стојадиновића под називом “Утицај 4f допаната на мултифероичне особине BiFeO₃ наноструктура” (Физички факултет Универзитета у Београду, 2018. година).

[3] Сарађивао је и помагао (кроз обуку, заједничка мерења, анализу и дискусију резултата) др Урошу Ралевићу (тада студенту докторских студија Електротехничког факултета Универзитета у Београду, запосленом на Институту за физику у Београду) у истраживању графена коришћењем амбијенталног микроскопа на бази атомских сила. Као резултат ове сарадње, произашао је одељак 4.2.2 "Kelvin Probe Force Microscopy Study of Graphene" у докторској дисертацији др Уроша Ралевића под називом “Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems” (Електротехнички факултет Универзитета у Београду, 2017. година).

[4*] Био је ангажован на извођењу наставе на предмету “Скенирајућа микроскопија у наноуци и нанотехнологији” на докторским академским студијама, на Катедри за микроелектронику и техничку физику Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Докази о ангажованости у формирању научних кадрова се налазе у Прилогу 2.

3.3 Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења

28 радова кандидата публикованих у изборном периоду спадају у следеће категорије:

- у категорију експерименталних радова у природно-математичким наукама који се признају са пуним бројем бодова до седам коаутора спадају радови [2-4, 11-14, 17, 18, 21, 24, 55-58, 60],
- у категорију радова са нумеричким симулацијама који се признају са пуним бројем бодова до пет коаутора спадају радови [15, 16, 19, 53, 54],
- у категорију експерименталних радова у природно-математичким наукама са више од седам коаутора спада рад [1] из категорије M21a, радови [20, 22] из категорије M21, радови [59, 61] из категорије M22 и рад [69] из категорије M23, и они су нормирани у складу са правилом о нормирању броја коауторских радова,
- у категорију радова са нумеричким симулацијама са више од пет коаутора спада рад [23] из категорије M21, и он је нормиран у складу са правилом о нормирању броја коауторских радова,

Према томе, нормирањем према Правилнику, број бодова које је кандидат остварио током изборног периода, а по основу категорија M20, је 186.47. Пре нормирања, овај број је 200. Дакле, удео нормираних поена у оквиру категорије M20 чини око 7% укупног броја поена. Број бодова које је кандидат остварио током изборног периода у категорији укупно је 196,11. Пре нормирања, овај број је 210. Дакле, удео нормираних поена у оквиру категорије укупно чини око 7% укупног броја поена.

3.4 Руковођење пројектима, потпројектима и пројектним задацима

Кандидат је био руководиоца два пројекта у оквиру програма билатералне научне и технолошке сарадње између републике Србије и републике Аустрије под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, односно аустријске агенције за међународну мобилност и сарадњу у образовању, науци и истраживању (енгл. OeAD-Austrian Agency for international mobility and cooperation in education, science and research). У наставку су наведени пројекти (они у којима је постојала активност у изборном периоду су означени звездицом):

[1] "Дводимензионални материјали као подлога за раст органских полупроводника", период 2016-2017, руководиоца са аустријске стране проф. Кристијан Тајхерт,

[2*] "Електричне особине ван дер Валсових хетероструктура на бази дводимензионалних материјала и органских полупроводника", период 2018-2020, руководиоца са аустријске стране др Маркус Крацер.

Докази о руковођењу пројектима се налазе у Прилогу 3.

3.5 Активност у научним и научно-стручним друштвима

Научни одбори (друштва, часописи), рецензије (часописи, пројекти), научна тела (министарство, држава)

Кандидат је остварио следеће ставке (ставке у којима је постојала активност у изборном периоду су означене звездицом):

[1*] Кандидат је рецензирао више десетина научних радова за следеће међународне часописе □

- Часописе које издаје Elsevier: Carbon*, Applied Surface Science*, Materials Today Nano*,
- Часописе које издаје Wiley: Advanced Materials Interfaces*, Advanced Optical Materials, Advanced Science*, Annalen der Physik,
- Часописе које издаје Institute of Physics (IOP): Nanotechnology, Journal of Physics D: Applied Physics*, Journal of Optics,
- Часописе које издаје American Institute of Physics (AIP): Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics*,
- Часописе које издаје Royal Society of Chemistry (RSC): Nanoscale, Physical Chemistry Chemical Physics, Journal of Materials Chemistry C,
- Часописе које издаје American Chemical Society (ACS): ACS Applied Materials and Interfaces*,
- Часописе које издаје Optical Society of America (OSA): Optics Letters, Optics Express, Journal of Optical Society of America B, Applied Optics,
- Часописе које издаје Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*,
- Часописе које издаје Springer (Nature Portfolio): Scientific Reports*,
- Часописе које издаје MDPI: Nanomaterials*, Photonics*.

[2*] Кандидат је током 2018. године рецензирао две пројектне пријаве из области фотонице у оквиру HORIZON2020-FETOPEN-01-2018-RIA позива.

[3] Кандидат је био заменик у Управном одбору (енг. Managing Committee - MC) COST Акције MP1303 "Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction".

Докази о рецензијама и учешћу у научним одборима се налазе у Прилогу 4.

Научни одбори конференција, предавања по позиву

Кандидат је остварио следеће ставке (ставке у којима је постојала активност у изборном периоду су означене звездицом):

[1*] Кандидат је био члан научних одбора следећих конференција:

- (*) Научни одбор међународне конференције "14th Photonics Workshop" одржане од 14. до 17. марта 2021. године на Копаонику, Србија.

Кандидат је био члан организационих одбора следећих конференција:

- (*) Организациони одбор међународне конференције “4th International Meeting on Materials Science for Energy Related Applications” одржане од 22. до 23. септембра 2021. године у Београду, Србија,
- (*) Организациони одбор међународне конференције “Workshop in strongly correlated electron systems” одржане од 9. до 10. јуна 2022. године у Београду, Србија.

Докази о учешћу у научним и организационим одборима међународних научних конференција се налазе у Прилогу 5.

[2*] Кандидат је одржао следећа предавања по позиву:

- (*) Borislav Vasić, “Nanofriction of Two-Dimensional Materials Studied by Atomic Force Microscopy”, International Symposium on Nanoscale Research, 20th - 21st September 2021, Leoben, Austria (категорија M32),
- (*) Borislav Vasić, “Nanoscale Electrical And Mechanical Control Of Resistive Switching In Iridates And Manganites”, The 20th Symposium on Condensed Matter Physics, 7th - 11th October 2019, Belgrade, Serbia (категорија M32),
- (*) Borislav Vasić, “Exploring Functional Properties Of Two Dimensional Materials By Atomic Force Microscopy”, The 21st Symposium on Condensed Matter Physics, 26th - 30th June 2023, Belgrade, Serbia (категорија M32),
- Borislav Vasić, "Mechanical and electrical properties of graphene studied by atomic force microscopy", ICMAV Periodical Lectures, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Barcelona, Spain, 29. 01. 2018. (семинари института),
- Borislav Vasić, "Nanoscale properties of graphene studied by atomic force microscopy", Seminar aus Halbleiterphysik und Nanotechnologie, Institut für Physik, Montanuniversität Leoben, Austria, 07. 12. 2017. (семинари института).

Докази о одржаним предавањима по позиву се налазе у Прилогу 6.

3.6 Утицајност научних резултата

Утицај научних резултата огледа се пре свега кроз цитираност. Овај податак је је наведен у одељку 3.1.2 “Позитивна цитираност научних радова кандидата” овог документа. Пун списак радова је дат у секцији 5, а сви подаци о цитираности са интернет странице Scopus базе су дати након списка радова.

3.7 Конкретан допринос кандидата у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству

Кандидат је значајно допринео сваком раду на којем је учествовао. Као што је већ поменуто, Борислав Васић је водећи аутор са кључним доприносом на 33 рада, што чини скоро половину од укупно 71 рада кандидата. Поред тога, други аутор је на 9 радова. Истовремено, готово све резултате, и експерименталне и нумеричке (осим рада [39]), кандидат је постигао радећи на Институту за физику у Београду. Рад [39]

је настао у оквиру постдокторског усавршавања на Јоханес Кеплер Универзитету у Линцу. Детаљан преглед конкретног доприноса кандидата у реализацији научних резултата који су основ за стицање звања научног саветника је дат под тачком 3.1.4 "Степен самосталности и степен учешћа у реализацији радова у научним центрима у земљи и иностранству".

Кандидат је самостално покренуо и нову експерименталну технику на Институту за физику у Београду, скенирајућу микроскопију на бази атомских сила (енгл. atomic force microscopy). Амбијентални микроскоп NTEGRA Prima, компаније NT-MDT, је купљен 2010. године у оквиру лабораторије којом је руководио др Радош Гајић. Од тада, кандидат користи и развија бројне микроскопске методе које омогућавају не само топографско осликавање површине на микро- и нано-скали, већ и карактеризацију механичких, електричних и оптоелектричних особина, као и различите манипулације саме површине узорка, у смислу промене њене топографије или физичко-хемијских особина. У оквиру ПРОМИС пројекта Фонда за науку Републике Србије "Nanometer thin photovoltaics based on plasmonically enhanced van der Waals heterostructures" (пројекат под руководством др Горана Исића), кандидат је осмислио и саставио додатну експерименталну поставку која постојећи атомски микроскоп повезује са спољашњим изворима светлости што омогућава мерење оптоелектричних особина, што је неопходно за карактеризацију материјала за фотонапонске уређаје и соларне ћелије.

3.8 Уводна предавања на конференцијама, друга предавања и активности

Кандидат је одржао следећа предавања по позиву (предавања одржана у изборном периоду су означена звездицом):

[1*] Borislav Vasić, "Nanofriction of Two-Dimensional Materials Studied by Atomic Force Microscopy", International Symposium on Nanoscale Research, 20th - 21st September 2021, Leoben, Austria, (категорија M32),

[2*] Borislav Vasić, "Nanoscale Electrical And Mechanical Control Of Resistive Switching In Iridates And Manganites", The 20th Symposium on Condensed Matter Physics, 7th - 11th October 2019, Belgade, Serbia, (категорија M32),

[3*] Borislav Vasić, "Exploring Functional Properties Of Two Dimensional Materials By Atomic Force Microscopy", The 21st Symposium on Condensed Matter Physics, 26th - 30th June 2023, Belgade, Serbia, (категорија M32),

[4] Borislav Vasić, "Mechanical and electrical properties of graphene studied by atomic force microscopy", ICMAB Periodical Lectures, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Barcelona, Spain, 29. 01. 2018. (семинари института),

[5] Borislav Vasić, "Nanoscale properties of graphene studied by atomic force microscopy", Seminar aus Halbleiterphysik und Nanotechnologie, Institut für Physik, Montanuniversität Leoben, Austria, 07. 12. 2017. (семинари института).

Докази о одржаним предавањима по позиву се налазе у Прилогу 6.

4. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАНТИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

Остварени резултати у периоду након претходног избора у звање:

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M21a	10	4	40	38.33
M21	8	14	112	103.71
M22	5	9	45	42.29
M23	3	1	3	2.14
M32	1.5	3	4.5	4.5
M34	0.5	11	5.5	5.14

Поређење са минималним квантитативним условима за избор у звање научни саветник:

Минимални број М бодова	Неопходно	Остварено, број М бодова без нормирања	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	70	210	196.11
M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90	50	204.5	190.97
M11+M12+M21+M22+M23	35	200	186.47

5. ЗАКЉУЧАК

Анализом изложеног материјала о научној активности кандидата, Комисија је закључила да научни рад др Борислава Васића представља оригинални допринос у пољима истраживања којима се он бави: проучавање материјала и површина на микро- и нано-скали техникама скенирајуће микроскопије на бази атомских сила и проучавање оптичких структура на бази метаповршина и плазмонских структура, коришћењем нумеричких прорачуна. Кандидат је током досадашње каријере објавио 71 рад у међународним часописима који су цитирани 1578 пута уз h-индекс 21, што показује да су постигнути резултати остварили значајан утицај у одговарајућој научној заједници. Треба истаћи да је кандидат самостално покренуо нову експерименталну технику на Институту за физику у Београду, скенирајућу микроскопију на бази атомских сила, где је користио и развијао бројне микроскопске методе. Кандидат је руководио међународним пројектима билатералне сарадње, сарађивао са студентима током рада на њиховим докторским дисертацијама, учествовао у извођењу наставе на докторским студијама, одржао предавања по позиву на међународним конференцијама, рецензирао бројне радове у врхунским међународним часописима, рецензирао научне пројекте, учествовао у програмским и организационим одборима међународних конференција. Сматрамо да је кандидат својим досадашњим радом остварио значајан допринос у научним областима којима се бави, да се развио у самосталног истраживача и да је резултатима постигнутим у изборном периоду задовољио све квантитативне и квалитативне услове за избор у звање научни саветник прописане Правилником о стицању истраживачких и научних звања Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије. На основу свега наведеног, предлагемо Научном већу Института за физику у Београду да донесе одлуку о прихватању предлога за избор др Борислава Васића у звање научни саветник.

У Београду, 7. септембра 2023. године

Чланови комисије:

др Радош Пајић, научни саветник у пензији
Институт за физику у Београду, Универзитет у Београду

др Горан Исић, научни саветник
Институт за физику у Београду, Универзитет у Београду

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