

НАУЧНОМ ВЕЋУ ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ

Извештај комисије за избор др Борислава Васића у звање виши научни сарадник

На седници Научног већа Института за физику у Београду одржаној 20. 03. 2018. године именовани смо у комисију за избор др Борислава Васића у звање виши научни сарадник.

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, у чијем прилогу се налази списак публикација кандидата.

1. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ КАНДИДАТА

Борислав Васић је рођен у Винковцима, Република Хрватска, 14. априла 1982. године. Основну школу је похађао у Винковцима, Београду и Свилајнцу, док је гимназију завршио у Свилајнцу. После две године проведене на Војно-техничкој академији у Београду, школовање је наставио на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру за Микрорачунарску електронику. Ту је и дипломирао септембра 2005. године са просечном оценом 9,62 и дипломским радом на тему "Анализа нано-ЦМОС компоненти". Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Наноелектроника и фотоника, уписао је октобра 2007. године. Докторат под насловом "Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала" урађен је под менторством др Јелене Радовановић и ментора на Институту за физику у Београду, др Радоша Гајића. Докторска дисертација је одбрањена децембра 2012. године. У периоду од јануара до маја 2013. године био је на кратком усавршавању на Јоханес Кеплер универзитету у Линцу, у групи за нанофотонику под вођством др Томаса Клара. У звање научни сарадник је изабран 25. септембра 2013. године.

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. Од 2007. године до 2011. године кандидат ради у оквиру пројекта тадашњег Министарства науке и технолошког развоја бр. ОИ141047 "Физика нискодимензионих и нанометарских структура и материјала" (пројектом је руководио др Зоран Поповић). Почевши од новог пројектног циклуса (од јануара 2011.), запослен је на пројекту Министарства просвете и науке бр. ОИ171005 „Физика уређених наноструктура и нових материјала у фотоници” (руководилац др Радош Гајић) са 8 истраживач-месеци и пројекту бр. ИИИ45018 „Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокompозити” (руководилац академик др Зоран Поповић) са 4 истраживач-месеци. У свом досадашњем раду, у оквиру међународне сарадње, кандидат је учествовао 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”. Такође, учесник је у неколико COST акција (MP1303 Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction, IC1208 Integrating devices and materials: a challenge for new instrumentation in ICT), више билатералних пројеката (билатералне сарадње са Италијом, Немачком, Шпанијом, Белорусијом), док је био руководилац билатералног пројекта са Аустријом за период 2016-2017 "Дводимензионални материјали као подлога за раст органских полупроводника" (сарадња са групом проф. Кристијана Тајхерта у Леобену, Аустрија).

Главне теме његовог истраживања су проучавање (осликавање, карактеризација и манипулација) материјала на нано-скали техникама скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, као и проучавање нових оптичких структура на бази фотонских кристала, метаматеријала, и плазмонских структура, односно резонантних металних система. У тренутку подношења овог извештаја, кандидат је коаутор укупно 43 рада који су цитирани укупно 534 пута, а 492 пута не рачунајући самоцитате. Добитник је студентске награде Института за физику у Београду 2013. године за најбољу докторску дисертацију у претходној години. Има научну сарадњу са групама из Аустрије, Шпаније и Италије.

2. ПРЕГЛЕД НАУЧНЕ АКТИВНОСТИ

Научно-истраживачка активност кандидата обухвата теоријске и експерименталне методе и обухвата следеће области:

1. дизајн, моделовање и нумеричке симулације оптичких структура на бази фотонских кристала, метаматеријала и плазмонских структура (секције 2.1, 2.2 и 2.3),
2. осликавање, карактеризација и манипулација материјала на микро- и нано-скали коришћењем метода скенирајуће микроскопије на бази атомских сила (секција 2.4).

У наредним секцијама су укратко приказани главни научни резултати добијени у оквиру ових тема.

2.1 Структуре са градираним индексом преламања за вођење и усмеравање електромагнетског поља

2.1.1 Структуре на бази трансформационе оптике

Метод трансформационе оптике се заснива на инваријантности Максвелових једначина при координатним трансформацијама при чему постоји једнакост између метричких трансформација и промене материјалних параметара простора. Овај метод је примењен за дизајн кривине електромагнетског поља. Идеални параметри кривине захтевају реализацију анизотропне и нехомогене диелектричне

пермитивности и магнетске пермеабилности, што је практично неизводљиво. Зато су они поједностављени одговарајућим избором редукованих параметара, чиме је добијена диелектрична (немагнетска) кривина. Она је затим реализована реалистичном, слојевитом диелектричном хетероструктуром са градираном диелектричном пермитивношћу слојева или са градираном дебелином слојева константних пермитивности. Нумеричке симулације реалног простирања електромагнетског поља показују да диелектрична електромагнетска кривина функционише готово исто као и идеална. Ови резултати су представљени у следећим радовима:

- **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Coordinate transformation based design of confined metamaterial structures", *Phys. Rev. B* **79**, 085103 (2009) [M21, ИФ=3.475],
- **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Optical design of 2D confined structures with metamaterial layers based on coordinate transformations", *Phys. Scr.* **T135**, 014045 (2009) [M22, ИФ=1.088],
- **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Confined metamaterial structures based on coordinate transformations", *Acta Phys. Pol. A* **116**, 96 (2009) [M23, ИФ=0.767].

2.1.2 Структуре на бази градираних фотонских кристала

Дводимензионални градирани фотонски кристали су проучавани у контексту реализације оптичких уређаја са нехомогеним и изотропним индексом преламања - електромагнетске кривине (дизајниране коришћењем трансформационе оптике на бази конформних пресликавања), Лунебурговог и самофокусирајућег сочива. Реализација је заснована на просторној промени полупречника штапића у градираном фотонском кристалу тако да ефективна пермитивност у свакој тачки буде једнака пермитивности задате оптичке структуре. Коришћењем нумеричких симулација, показано је да градирани фотонски кристали омогућавају ефикасну реализацију горе наведених оптичких структура у широком фреквенцијском опсегу. Горњи фреквенцијски лимит је одређен Браговим условом у тачки градираног фотонског кристала са највећим ефективним индексом преламања. Ови резултати су представљени у следећим радовима:

- **B. Vasić** and R. Gajić, "Self-focusing media using graded photonic crystals: Focusing, Fourier transforming and imaging, directive emission, and directional cloaking", *J. Appl. Phys.* **110**, 053103 (2011) [M21, ИФ=2.168],
- **B. Vasić**, R. Gajić, and K. Hingerl, "Graded photonic crystals for implementation of gradient refractive index media", *J. Nanophotonics* **5**, 051806 (2011) [M21, ИФ=1.899],

- **B. Vasić, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime", *Opt. Express* **18**, 20321 (2010) [M21a, ИФ=3.88].**

2.2 Подесиве електромагнетске структуре

Реалне примене захтевају оптичке уређаје чији се одзив (као што је нпр. рефлексија и трансмисија) или сама функција (као што је на пример угао усмерености оптичког снопа) могу динамички контролисати у времену. Основни начин за конструкцију подесивих оптичких уређаја је њихово спрезање са подесивим елементима, као што су на пример полупроводници или течни кристали. Овај део истраживања је базиран на нумеричким прорачунима и симулацијама. У односу на тип подесивих елемената, овај део истраживања се може поделити на следеће делове:

2.2.1 Подесиве електромагнетске структуре на бази полупроводника

Реализација подесивих терахерцних структура са нехомогеним индексом преламања је разматрана коришћењем градираних дводимензионалних фотонских кристала са полупроводничким штапићима просторно променљивих полупречника. Променљиви полупречници штапића омогућавају реализацију нехомогеног индекса преламања. Истовремено, променом температуре се контролише концентрација електрона у полупроводнику, што омогућава динамичку промену пермитивности штапића. На тај начин, коришћењем нумеричких симулација, приказане су могуће реализације сочива са подесивим фокусом и антене са подесивим углом скретања електромагнетског поља. С друге стране, терахерцни модулатори и прекидачи су дизајнирани на бази дводимензионалних фотонских кристала са полупроводничким штапићима. Електрично поље упадног електромагнетског поља је нормално на штапиће и у њима побуђује локализоване површинске плазмон поларитоне. Као резултат, упадно електромагнетско бива апсорбовано, што доводи до стварања плазмонских фотонских зонских процепа са нултом трансмисијом упадног поља. Променом концентрације електрона у полупроводничким штапићима, мења се спектрални положај плазмонских резонанција и плазмонских зонских процепа, што омогућава потенцијалну примену ових структура као подесивих терахерцних филтера. Резултати су приказани у следећим радовима:

- **B. Vasić and R. Gajić, "Tunable gradient refractive index optic using graded plasmonic crystals with semiconductor rods", *J. Opt. Soc. Am. B* **29**, 79 (2012) [M21, ИФ=2.210],**
- **B. Vasić and R. Gajić, "Broadband and subwavelength terahertz modulators using tunable plasmonic crystals with semiconductor rods", *J. Phys. D: Appl. Phys* **45**, 095101 (2012) [M21, ИФ=2.544].**

2.2.2 Подесиве електромагнетске структуре на бази графена

Слично као и код полупроводника, применом напона између графена и позадинске електроде, могуће је контролисати положај Фермијевог нивоа и концентрацију носилаца наелектрисања у графену. На тај начин, могуће је контролисати и интеракцију графена са упадним електромагнетским пољем, подешавајући ниво апсорпције и рефлексије/трансмисије. Графен као дводимензионалан материјал је изразито погодан за спрезање са планарним оптичким структурама, као што су Фабри-Пероови резонатори и планарни метаматеријали на бази металних елемената (метаматеријали на бази прекинутих металних прстенова и апсорбери на бази метал-изолатор-метал структуре). Коришћењем нумеричких прорачуна, показано је да је на терахерцним и блиско-инфрацрвеним фреквенцијама, доминантна амплитудна модулација рефлексије, као последица напоном контролисана апсорпције у графену услед унутарзонских (терахерцна област) и међузонских прелаза (блиско-инфрацрвена област). Са друге стране, модулација у средњој-инфрацрвеној области је заснована на спектралном померању резонанција пошто се графен у овој области понаша као диелектрик са малим губицима и подесивом диелектричном пермитивношћу. Резултати су приказани у следећим радовима:

- **B. Vasić** and R. Gajić, "Tunable Fabry-Perot resonators with embedded graphene from terahertz to near-infrared frequencies", *Opt. Lett.* **39**, 6253 (2014) [M21a, ИФ=3.385],
- **B. Vasić** and R. Gajić, "Graphene induced spectral tuning at mid-infrared frequencies", *Appl. Phys. Lett.* **103**, 261111 (2013) [M21, ИФ=3.844],
- **B. Vasić**, M. M. Jakovljević, G. Isić and R. Gajić, "Tunable metamaterials based on split ring resonators and doped graphene", *Appl. Phys. Lett.* **103**, 011102 (2013) [M21, ИФ=3.844].

2.2.3 Подесиве електромагнетске структуре на бази течних кристала

Нематски течни кристали поседују велику бирефригенцију која је уз то и подесива електричним пољем. Као такви, они су веома погодни за реализацију подесивих терахерцних уређаја. Дебљина стандардних ћелија са течним кристалом је реда таласне дужине, што на терахерцним учестаностима, доводи до високих напона неопходних за контролу као и споре модулације. У циљу решавања овог проблема, предложено је коришћење резонантних метаматеријала на бази метал-изолатор-метал структуре при чему је изолаторски слој у структури замењен течним кристалом, тако да се цела структура понаша као подесиви терахерцни поларизатор. Уместо природне бирефригенције течног кристала, зависност одзива структуре од поларизације потиче од оптичке анизотропије веома танких и дубоко подталасних метал-изолатор-метал структура. Истовремено, динамичка електро-оптичка контрола индекса преламања течног кристала омогућава спектрално

померање резонантних модова метал-изолатор-метал структуре, и подешавање фазне разлике између две ортогоналне компоненте упадног поља. Као резултат свега, коришћењем нумеричких прорачуна, показано је да се за одговарајуће изабрану линеарну поларизацију упадног поља, поларизација рефлектованог поља на одабраној радној фреквенцији може континуирано пребацити између северног и јужног пола Поинкареове сфере (промена од лево до десно кружно поларисане светлости), док предложени поларизатор ради при напонима испод 10V и са милисекундним временима прекидања. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, D. C. Zografopoulos, G. Isić, R. Beccherelli, R. Gajić**, "Electrically tunable terahertz polarization converter based on overcoupled metal-isolator-metal metamaterials infiltrated with liquid crystals", *Nanotechnology* **28**, 124002 (2017) [M21, ИФ=3.573].

2.2.4 Подесиве оптичке структуре са оптичким појачањем

Подесиви метаматеријали и плазмонске структуре су највећим делом реализоване подешавањем диелектрине пермитивности или губитака у придруженом подесивом елементу. У овом делу истраживања, предложени су оптички модулатори са великим тзв. ON-OFF односом (однос рефлексије упадног поља при укљученом и искљученом стању) - подесиви метаматеријали спрегнути са средином која поседује оптичко појачање. Они се састоје од диелектричног филма допираног бојом (који има улогу средине са оптичким појачањем) која је смештена унутар метал-изолатор-метал резонатора. Плазмонски модови овог резонатора са појачаним електричним пољем, значајно побољшавају и апсорпцију и емисију светлости од стране молекула боје. Као резултат, могуће је постићи да предложена структура функционише као савршени апсорбер са нултом рефлексијом, а с друге стране, могуће је потпуно компензовати губитке у структури и постићи јединичну рефлексију. Као резултата, коришћењем нумеричких прорачуна показано је да се постиже ON-OFF однос већи од 100. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić and R. Gajić**, "Optical modulation based on tunable light absorption and amplification in metasurfaces coupled with gain medium", *Opt. Lett.* **42**, 2181 (2017) [M21, ИФ=3.416].

2.3 Оптичке структуре за детекцију

2.3.1 Плазмонске структуре на бази графенских трака за детекцију диелектричне средине у инфрацрвеном делу спектра

У овом делу истраживања, коришћењем нумеричких прорачуна, анализирани су једнодимензионални низови паралелних графенских трака као плазмонски сензори у инфрацрвеном делу спектра. Структурисање графена у траке омогућава спрезање

упадног електромагнетског поља и локализованих површинских плазмона у графену. Површински плазмони у графену имају две битне карактеристике: јако конфинирање и подесивост положаја плазмонске резонанције. Прва особина омогућава снажну интеракцију упадног зрачења и средине у околини графенских трака. Показано је да је осетљивост графенских трака у инфрацрвеном делу спектра упоредива са осетљивошћу металних наночестица у видљивом делу спектра. Најбоље карактеристике графенски сензори имају у средње инфрацрвеном делу спектра где је могуће детектовати диелектричне филмове свега пар нанометара дебљине на таласној дужини од око десет микрометара. Друга особина, подесивост положаја плазмонских резонанција у графенским тракама, је искоришћена за дизајн широкопојасних и подесивих супстрата за површином увећану инфрацрвену апсорпцију. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, G. Isić and R. Gajić, "Localized surface plasmon resonance in graphene ribbon arrays for sensing of dielectric environment at infrared frequencies", *J. Appl. Phys.* **113**, 013110 (2013) [M21, ИФ=2.210].**

2.3.2 Графеном прекривени Фабри-Пероови резонатори за оптичку хемијску детекцију

Примене графена у хемијским сензорима се заснивају на његовом хемијском допирању. У овом процесу, молекули адсорбовани на графену служе као донори или акцептори наелектрисања, чиме мењају његову проводност. Док су претходне студије биле усредсређене на хемијске сензоре са електричном детекцијом, у овом делу истраживања, коришћењем нумеричких прорачуна је предложен метод детекције на бази оптичких структура прекривених графеном. Посматрајући хемијско допирање графена као малу пертурбацију, показано је да оптималне оптичке структуре функционишу на терахерцним фреквенцијама, при чему је интензитет рефлексије излазни сигнал детектора. Ради постизања ефикасне хемијске детекције, оптичке структуре треба да обезбеде увећање електричног поља дуж равни графена. Као резултат тога, предложена структура се састоји од металног огледала и диелектричног слоја дебљине четвртине таласне дужине са графеном на врху. Узимајући резолуцију за мерење рефлексије од 1%, показано је да предложена структура може да детектује допирање графена за 150 електрона/шупљина по квадратном микрометру, у динамичком опсегу од око 3000 носилаца наелектрисања по квадратном микрометру. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić and R. Gajić, "Graphene covered photonic structures for optical chemical sensing", *Phys. Rev. Appl.* **4**, 024007 (2015) [M21, ИФ=4.061].**

2.3.3 Електромагнетски апсорбери на бази метаматеријала као плазмонски сензори

Плазмонске резонанције су праћене великим променама фазе. Коришћење овог фазног сигнала и генерално, ниског интензитета шума при мерењу фазе, може побољшати резолуцију плазмонских сензора за детекцију промене индекса преламања. У овом делу истраживања, коришћењем нумеричких прорачуна показано је да се максимална промена фазе у фреквенцијском домену постиже у тачки минималне (готово нулте) рефлексije. Пошто апсорбери на бази електромагнетских метаматеријала имају по дефиницији рефлексiju близу нулте у околини резонантне учестаности, одговарајући фазни сигнал се може користити за детекцију. Посматрани су апсорбери који се састоје од паралелних металних трака, диелектричног слоја и доњег, оптички дебелог, металног слоја. Оптимизацијом дебљине диелектричног слоја и ширине металних трака, као и прилагођавањем угла инциденције, показано је да се може постићи фазна осетљивост већа од 10^4 степени по јединичном индексу преламања у динамичком опсегу од 2×10^{-2} јединица индекса преламања. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić and R. Gajić**, "Enhanced phase sensitivity of metamaterial absorber near the point of darkness", *J. Appl. Phys.* **116**, 023102 (2014) [M21, ИФ=2.210].

2.4 Осликавање, карактеризација механичких и електричних особина, и литографија графена коришћењем метода скенирајуће атомске микроскопије

Графен је једно-атомски слој који се састоји од атома угљеника у хексагоналној решетки. То је флексибилан, проводан, дводимензионални материјал, који је транспарентан у видљивом делу спектра. Ове особине чине графен погодним за производњу транспарентних електрода са применама у оптоелектроници, пре свега за соларне ћелије. С друге стране, графен има изузетне механичке особине, веома велик Јунгов модул еластичности од око 1 ТПа, графен је једноатомски слој графита који је добро познат лубрикант у чврстом стању, а графен је и непропустљив за различите молекуле и гасове што га чини погодним за заштиту од различитих видова корозије. Све ове особине представљају одличну основу за коришћење графена као заштитног омотача у различитим нано-електро-механичким системима. Обе примене графена, као транспарентне електроде и као заштитног омотача, захтевају његову детаљну карактеризацију на микро- и нано-скали. У ту сврху, коришћене су методе скенирајуће микроскопије на бази атомских сила (енгл. atomic force microscopy).

Први део истраживања је био посвећен литографији графена. Коришћен је динамички, тј. полуконтактни мод (енгл. tapping mode) при јако увећаној амплитуди осцилација врха микроскопа као и увећаној интеракцији између графена и врха микроскопа. Показано је да се применом механичке силе осцилаторног врха

може модификовати графен на супстрату и то на двојак начин: при средњим силама долази до локалне деформације графена, док при веома јаким силама долази до сечења графена дуж линија дефинисаних у току литографије. Иако метод није погодан за фабрикацију графенских наноструктура због неконтролисаног цепања графена (ивице графена нису добро дефинисане), показано је да се веома успешно може користити за генерисање локалног напрезања у графену. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, M. Kratzer, A. Matković, A. Pavitschitz, U. Ralević, Dj. Jovanović, C. Ganser, C. Teichert, and R. Gajić, "Atomic force microscopy based manipulation of graphene using dynamic plowing lithography", *Nanotechnology* **24**, 015303 (2013) [M21, ИФ=3.979].**

Хемијска депозиција из паре (енгл. chemical vapour deposition) је једноставан и јефтин метод за синтезу графена велике површине. Ипак, графен добијен овим методом је поликристални материјал, који се састоји од монокристалних зрна раздвојених границама зрна. Поред ових дефеката, овај тип графена је карактеристичан и по наборима који настају приликом процеса раста (различити термички коефицијент ширења графена и бакра на којем графен расте) или трансфера са бакра на жељени супстрат (набори самог бакра остају утиснути у графену и после трансфера). Електричне особине графена добијеног хемијском депозицијом из паре, електрични површински потенцијал и локална електрична проводност, проучаване су помоћу скенирајуће Келвинове микроскопије (енгл. Kelvin probe force microscopy) и скенирајуће микроскопије проводности (енгл. conductive atomic force microscopy). Показано је да набори деградирају електричне особине графена доводећи до: 1. нехомогене расподеле електричног површинског потенцијала, услед тога што долази до делимичне локализације наелектрисања у доменима који су потпуно оивичени наборима у графену, и 2. смањења електричне проводности и повећања контактне отпорности између графена и врха микроскопа тачно дуж набора. Обе промене су дискутоване у светлу дефеката и промене хибридације дуж набора, чиме они постају центри расејања наелектрисања доводећи до делимичне локализације наелектрисања и смањене проводности. Резултати су приказани у следећем раду:

- **B. Vasić, A. Zurutuza, R. Gajić, "Spatial variation of wear and electrical properties across wrinkles in chemical vapour deposition graphene", *Carbon* **102**, 304 (2016) [M21a, ИФ=6.337].**

Механичка стабилност и отпорност на хабање графена су предуслов за његове примене у нано-механичким уређајима. Хабање самог графена и ефикасност графена за заштиту подлоге (на којој лежи графен) од хабања је испитивано коришћењем микроскопије на бази атомских сила у контактном моду при увећаној нормалној сили. Показано је да се хабање графена састоји од два процеса: 1. пластичне деформације за мања нормална оптерећења, након чега следи 2. изненадно цепање графена за довољно велика нормална оптерећења, уз накнадно љуштење графена са подлоге. Током ових процеса, праћена је и промена трења и

уочено је да треће почиње од ниских вредности на пластично деформисаном графену, а затим се снажно повећава за кратко време током киданја графена и завршава се на нижим вредностима на непокривеној подлози након љуштења графена. Након ове анализе самог графена, проучавана је и заштита подлоге помоћу графена и показано је да графенски слојеви дебљине око 5 nm (преко десет слојева) заиста обезбеђују заштиту од хабања подлоге. У овом случају одбојне ван дер Валсове силе између слојева графена спречавају трансфер деформације са врха микроскопа ка унутрашњости подлоге. С друге стране, танки графенски слојеви дебљине од око само 1 nm (једнослојни и двослојни графен) могу само побољшати механички капацитет подлоге (доводећи до смањене дубине хабања), али није могуће заштитити подлогу од самог хабања. Поред разматрања хабања хомогених графенских слојева, проучаване су и графенске ивице као и графенски набори који додатно смањују отпорност на хабање. Резултати су приказани у следећим радовима:

- **B. Vasić, A. Matković, R. Gajić, I. Stanković,** "Wear properties of graphene edges probed by atomic force microscopy based lateral manipulation", *Carbon* **107**, 723 (2016) [M21a, ИФ=6.337].
- **B. Vasić, A. Matković, U. Ralević, M. Belić, R. Gajić,** "Nanoscale wear of graphene and wear protection by graphene", *Carbon* **120**, 137 (2017) [M21a, ИФ=6.337].

Такође, показано је да графен врло добро реплицира облик ДНК оригами наноструктура и да се може користити као заштитни слој за побољшање њихове структурне стабилности, као и да енкапсулација графеном пружа заштиту ДНК оригами наноструктура у води, због продужене изложености у дејонизованој води при вишеструким урањањима. Кроз ове резултате је показано да су ДНК оригами наноструктуре енкапсулиране графеном довољно јаке да издрже различите литографске процесе на бази само-изградње чиме се проширују границе примене ових наноструктура као супстрата за наночестице. Резултати су приказани у следећем раду:

- Matković, **B. Vasić, J. Pešić, J. Prinz, I. Bald, A. R. Milosavljević, R. Gajić,** "Enhanced structural stability of DNA origami nanostructures by graphene encapsulation", *New J. Phys.* **18**, 025016 (2016) [M21, ИФ=3.786].

У даљем истраживању, показано је да снимање фазног контраста током мерења графена у полуконтактном моду скенирајуће атомске микроскопије на бази атомских сила може омогућити добијање слика високог контраста, који није могуће постићи конвенционалним, топографским мерењима. Фазне мапе су затим трансформисане у мапе дисипације механичке енергије, које су важне за примене графена у различитим нано-механичким системима. Истовремено, са фундаменталне тачке гледишта, дисипација енергије даје додатни увид у механичка својства. Поуздана мерења, добијена у режиму одбојне интеракције између врха микроскопа и графена, показују да је дисипација енергије на графену покривеном супстрату нижа од оне на непокривеном супстрату. Ови резултати

показују да се графен понаша као одређени штит у интеракцији врха микроскопа и супстрата. Добијени резултати су дискутовани у контексту промене ван дер Валсоове интеракције, адхезије и квашења саме површине, и приказани су у следећем раду:

- **B. Vasić**, A. Matković, R. Gajić, "Phase imaging and nanoscale energy dissipation of supported graphene using amplitude modulation atomic force microscopy", *Nanotechnology* **28**, 465708 (2017) [M21, ИФ=3.573].

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 43 рада у међународним часописима са ISI листе. Од укупног броја радова, 6 је објављено у M21a категорији, 28 је објављено у M21 категорији, 7 је објављено у M22 категорији и 2 је објављено у M23 категорији.

У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, др Борислав Васић је објавио 26 радова у међународним часописима са ISI листе. Од тог броја радова, 5 је објављено у M21a категорији, 16 је објављено у M21 категорији и 5 је објављено у M22 категорији.

Као пет најзначајнијих радова кандидата могу се узети:

1. **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Coordinate transformation based design of confined metamaterial structures", *Phys. Rev. B*, **79**, 085103 (2009), [M21, ИФ=3.475, цитиран 40 пута],
2. **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime", *Opt. Express*, **18**, 20321 (2010), [M21a, ИФ=3.88, цитиран 82 пута],
3. **B. Vasić**, G. Isić and R. Gajić, "Localized surface plasmon resonance in graphene ribbon arrays for sensing of dielectric environment at infrared frequencies", *J. Appl. Phys.* **113**, 013110 (2013), [M21, ИФ=2.210, цитиран 57 пута],
4. **B. Vasić**, A. Zurutuza, R. Gajić, "Spatial variation of wear and electrical properties across wrinkles in chemical vapour deposition graphene", *Carbon* **102**, 304 (2016), [M21a, ИФ=6.337, цитиран 9 пута],
5. **B. Vasić**, A. Matković, U. Ralević, M. Belić, R. Gajić, "Nanoscale wear of graphene and wear protection by graphene", *Carbon* **120**, 137 (2017), [M21a, ИФ=6.337, цитиран 2 пута].

У првом раду, метод трансформационе оптике је примењен за дизајн кривине електромагнетског поља. Затим су параметри идеалне кривине поједностављени тако да је добијена немагнетска кривина која је затим реализована слојевитим диелектричним структурама. Нумеричке симулације реалног простирања електромагнетског поља показују да диелектрична електромагнетска кривина функционише готово исто као и идеална.

У другом раду је показано како се дводимензионални градиранни фотонски кристали могу користити за реализацију широкопојасних оптичких уређаја са нехомогеним и изотропним индексом преламања. Реализација је заснована на просторној промени полупречника штапића у градираном фотонском кристалу тако да реализована ефективна пермитивност у свакој тачки буде једнака пермитивности задатог оптичког уређаја.

У трећем раду је показано да се једнодимензионални низови паралелних, графенских трака понашају као одлични плазмонски сензори у инфрацрвеном делу спектра. Сензори се могу користити за детекцију промене индекса преламања диелектричне средине изнад графенских трака или као широкопојасни и подесиви супстрати за површином увећану инфрацрвену апсорпцију.

У четвртном раду је показано како набори у графену добијеним методом хемијске депозиције из паре (који је практично главни метод за производњу графена велике површине), деградирају његове електричне и механичке особине доводећи до: 1. нехомогене расподеле електричног површинског потенцијала, 2. смањене електричне проводности, и 3. смањене отпорности на хабање.

У петом раду су анализирани механичке особине графена на нано скали коришћењем микроскопије на бази атомских сила. Показано је да графенски слојеви дебљине око 5 nm обезбеђују потпуну заштиту подлоге од хабања. У овом случају одбојне ван дер Валсове силе између слојева графена спречавају трансфер деформације са врха микроскопа ка унутрашњости подлоге.

3.1.2 Позитивна цитираност научних радова кандидата

Према Scopus бази на дан 15. фебруара 2018. године, радови кандидата су цитирани 534 пута, док је број цитата без аутоцитата 492. Према истој бази, h-индекс кандидата је 12. Сви подаци о цитираности са интернет странице Scopus базе су дати након списка свих радова (секција 6).

3.1.3 Параметри квалитета 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 у којима је кандидат објављивао у периоду након одлуке научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања:

- 1 рад у Nano Letters (ИФ=13,198),
- 1 рад у 2D Materials (ИФ=9,611),
- 3 рада у Carbon (ИФ=6,337),

- 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),
- 3 рада у Nanotechnology (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),
- 1 рад у Applied Surface Science (ИФ=3,150),
- 4 рада у Journal of Physics D: Applied Physics (ИФ=2,772 за 2 рада, ИФ=2,721 за 1 рад, ИФ=2,544 за 1 рад),
- 6 радова у Journal of Applied Physics (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),
- 2 рада у Journal of Optical Society of America B (ИФ=2,210),
- 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).

Укупан фактор утицаја радова кандидата је 142.25, а у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, тај фактор је 104.113. Часописи у којима је кандидат објављивао су по свом угледу веома цењени у областима којима припадају. Међу њима, посебно се истичу: Carbon, Nano Letters, Physical Review Applied, Physical Review B, Applied Physics Letters, Optics Express, Nanotechnology и Optics Letters.

Додатни библиометријски показатељи квалитета часописа у којима је кандидат објављивао радове је дат у следећој табели према упутству Матичног научног одбора за физику. 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	104.1130	203	32.9440
Усредњено по чланку	4.0043	7.8077	1.2671
Усредњено по аутору	24.5795	51.0847	8.6127

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

Кандидат је водећи аутор 22 рада, други аутор 5 радова и трећи аутор 4 рада (укупан број радова кандидата је 43). На радовима који су објављени у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања, кандидат је водећи аутор 11 радова, други аутор 3 рада и трећи аутор 3 рада (укупни број радова кандидата који су објављени у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања је 26).

У случају чланака где је кандидат водећи аутор, кандидат је формулисао проблем, самостално добио све експерименталне резултате коришћењем скенирајуће микроскопије на бази атомских сила [1-3, 7, 24], самостално [5, 13, 18, 20, 28, 29, 30, 31] или у сарадњи са коауторима [6, 8, 9, 22, 23, 26, 34, 41, 43] извршио нумеричке прорачуне, и самостално [1-3, 5, 7, 8, 13, 18, 20, 26, 28, 29, 30, 31] или у сарадњи са коауторима [6, 9, 22, 23, 24, 34, 41, 43] написао рад.

У случају преосталих чланака допринос кандидата је следећи: формулација проблема, експериментални резултати добијени коришћењем скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, учешће у дискусији и писању рада [10], учешће у формулацији проблема, добијању експерименталних резултата коришћењем скенирајуће микроскопије на бази атомских сила, и писању рада [11], учешће у формулацији проблема, дискусији и анализи резултата [14, 15, 19, 27, 32, 39, 42]. Радови [4, 12, 16, 17, 21, 25, 35-38, 40] 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 сарадњу са истраживачким групама у Аустрији (др Кристијан Тајхерт и др Маркус Крацер, Монтан универзитет у Леобену), Шпанији (др Алберто Помар, Институт ИЦМАБ у Барселони), и Италији (др Ромео Бечерели и др Димитрис Зографопулос, Институт ЦНР у Риму). Као резултат ове сарадње настали су радови [24, 39] (сарадња са групом у Леобену), [9, 15] (сарадња са колегама из Рима), рад [21] је настао током боравка кандидата на усавршавању на Јоханес Кеpler универзитету у Линцу, док је неколико радова насталих као резултат ових сарадњи тренутно у припреми и ускоро ће бити послати на рецензију. Осим резултата у раду [21], сви остали експериментални и нумерички резултати кандидата су постигнути на Институту за физику у Београду.

3.1.5 Награде

Кандидат је добитник студентске награде Института за физику у Београду 2013. године за најбољу докторску дисертацију током претходне године.

Прилог 1: диплома студентске награде Института за физику у Београду.

3.2 Ангажованост у формирању научних кадрова

Кандидат Борислав Васић је сарађивао и помагао (кроз обуку и анализу резултата) студенту докторских студија Бојану Стојадиновићу, у истраживању танких филмова бизмут-ферита коришћењем метода скенирајуће микроскопије на бази атомских сила. Резултат ове сарадње је рад

- В. Stojadinović, **В. 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 и одговорни аутор поред менторке студента Бојана Стојадиновића, др Зоране Дохчевић-Митровић, научног саветника Института за физику у Београду.

Прилог 2: насловна страна горе поменутог рада са листом свих аутора и листом одговорних аутора.

Борислав Васић је сарађивао и помагао (кроз обуку и анализу резултата) др Урошу Ралевићу (тада студенту докторских студија Електротехничког факултета 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", стр. 55-65, у тези др Уроша Ралевића.

Прилог 3: захвалница у тези др Уроша Ралевића, као и почетна страна горе поменутог одељка 4.2.2.

Такође, Борислав Васић је сарађивао и помагао (кроз обуку, формулацију проблема, мерења и анализу резултата) Славену Тепшићу, (тада мастер студенту Електротехничког факултета у Београду, сада докторанту на ИЦФО институту у Барселони, Шпанија) у истраживању графена коришћењем амбијенталног микроскопа на бази атомских сила. Као резултат ове сарадње, произашао је Славенов мастер рад "Карактеризација механичких и електричних својстава графена коришћењем микроскопије атомских сила", одбрањен јула 2016. године.

Прилог 4: одлука о Комисији за усмену одбрану мастер рада Славена Тепшића, као и насловна страна и захвалница у мастер раду Славена Тепшића.

3.3 Нормирање броја коауторских радова, патената и техничких решења

26 чланака кандидата, публикованих након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања, спадају у следеће категорије:

- у категорију експерименталних радова у природно-математичким наукама који се признају са пуним бројем бодова до седам коаутора спадају радови [1-3, 7,

10, 11, 21, 36, 39], а пошто сваки од ових радова има седам или мање коаутора, сви они се признају са пуним бројем бодова,

- у категорију радова са нумеричким симулацијама који се признају са пуним бројем бодова до пет коаутора спадају радови број [5, 8, 9, 13-15, 18-20, 22], а пошто сваки од ових радова има пет или мање коаутора, сви они се признају са пуним бројем бодова,
- у категорију експерименталних радова у природно-математичким наукама са више од седам коаутора спада рад [4] из категорије M21a, радови [12, 16, 17] из категорије M21, и радови [35, 37, 38] из категорије M22, и они су нормирани у складу са правилом о нормирању броја коауторских радова.

Према томе, нормирањем према Правилнику, број бодова које је кандидат остварио након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања по основу категорија M20 је 185,67 (пре нормирања, овај број је 203).

3.4 Руковођење пројектима, потпројектима и пројектним задацима

Кандидат је руководио пројектом "Дводимензионални материјали као подлога за раст органских полупроводника" у оквиру програма билатералне научне и технолошке сарадње између републике Србије и републике Аустрије за период 2016-2017, 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). Руководилац са аустријске стране је био проф. Кристијан Тајхерт.

Прилог 5: званично обавештење о одобравању финансирања билатералног пројекта под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја.

3.5 Активност у научним и научно-стручним друштвима

- Кандидат је рецензент у следећим часописима: Nanoscale, ACS Applied Materials and Interfaces, Carbon, Nanotechnology, Applied Physics Letters, Annalen der Physik, Advanced Optical Materials, Optics Letters, Optics Express, Scientific Reports, Physical Chemistry Chemical Physics, Journal of Materials Chemistry C, Journal of Optical Society of America B, Applied Optics, Journal of Optics.

Прилог 6: изводи са рецензентских страница кандидата као и писма едитора о извршеним рецензијама.

- Кандидат је био заменик у Управном одбору (енг. Managing Committee - MC) COST Акције MP1303 "Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction" у чијим активностима је редовно учествовао са колегом др Игором Станковићем са Института за физику у Београду. За детаље акције видети <http://www.nanofriction.org/>,

http://www.cost.eu/COST_Actions/mpns/MP1303.

Прилог 7: копија званичне интернет странице COST Акције MP1303 са листом чланова акције.

3.6 Утицајност научних резултата

Утицај научних резултата кандидата је наведен у одељку 4.1 овог документа. Пун списак радова је дат у секцији 6, а подаци о цитираности са интернет странице Scopus базе су дати након списка свих 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, кандидат је водећи аутор са кључним доприносом на 22 рада (други аутор на 5 радова и трећи аутор на 4 рада) од укупно 43 рада кандидата. Истовремено, готово све резултате (осим једног, рад [21]), кандидат је постигао радећи на Институту за физику у Београду. Детаљан преглед (дат за све радове из поглавља 6) конкретног доприноса кандидата у реализацији научних резултата који су основ за стицање звања вишег научног сарадника је дат под тачком 4.1.4 "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). Бројни методи засновани на овој техници омогућавају осликавање површине на микро- и нано-скали (топографска визуализација површине узорка), карактеризацију механичких и електричних особина, као и различите манипулације саме површине узорка, у смислу промене њене топографије или физичко-хемијских особина. На тај начин, ове технике омогућавају експериментална истраживања на микро- и нано-скали у нашој земљи.

3.8 Уводна предавања на конференцијама и друга предавања

У периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног звања, кандидат је одржао и следеће предавање (енгл. Progress Report):

- Borislav Vasić, "Graphene based tunable metamaterials", Progress Report, IV International School and Conference on Photonics, Photonica2013, 26-30 August 2013, Belgrade, Serbia.

Прилог 8: списак предавача у секцији "Progress Reports", као и распоред предавања на конференцији Photonica2013.

Након претходног избора у звање, кандидат је одржао следећа предавања током посета истраживачким институцијама:

- 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.
- 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.

Прилог 9: позивна писма др Кристијана Тајхерта (за посету и предавање у Институту за физику у Леобену, Аустрија) и др Алберта Помара (за посету и предавање у ИЦМАВ институту у Барселони, Шпанија).

4. ЕЛЕМЕНТИ ЗА КВАНТИТАТИВНУ ОЦЕНУ НАУЧНОГ ДОПРИНОСА КАНДИДАТА

Остварени резултати у периоду након одлуке Научног већа о предлогу за стицање претходног научног звања:

Категорија	М бодова по раду	Број радова	Укупно М бодова	Нормирани број М бодова
M21a	10	5	50	44,5
M21	8	16	128	120,4
M22	5	5	25	20,77
M34	0.5	7	3.5	3,18

Поређење са минималним квантитативним условима за избор у звање виши научни сарадник:

Минимални број М бодова		Остварено, број М бодова без нормирања	Остварено, нормирани број М бодова
Укупно	50	206,5	188,85
M10+M20+M31+M32+M33+M41+M42+M90	40	203	185,67
M11+M12+M21+M22+M23	30	203	185,67

Укупан број цитата радова кандидата на дан 15. фебруара 2018. године према Scopus бази је 534, односно 492 не рачунајући аутоцитате. Према истој бази, Hirsch-ов индекс кандидата истог дана је 12.

ЗАКЉУЧАК

На основу анализе научних резултата које је кандидат остварио након претходног избора у звање, закључили смо да кандидат има јасно дефинисане теме научноистраживачког рада које је самостално развио током протеклих пет година. Кандидат је у свом досадашњем раду користио и експерименталне и нумеричке методе, при чему је највећи допринос кандидат дао у заснивању и развоју нове научне проблематике - проучавању материјала на нано- и микро-скали коришћењем техника скенирајуће микроскопије на бази атомских сила. Анализом показатеља рада, као што су број радова, цитираност, квалитет часописа, међународна научна сарадња, рецензије у врхунским часописима, сарадње са младим истраживачима и вођење међународног пројекта билатералне сарадње, види се да кандидат задовољава све квантитативне и квалитативне услове за избор у звање виши научни сарадник који су прописани Правилником о поступку, начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

На основу свега наведеног, Научном већу Института за физику у Београду предлажемо да донесе одлуку о прихватању предлога за избор др Борислава Васића у звање виши научни сарадник.

У Београду,

Чланови комисије:

др Радош Гајић
научни саветник
Институт за физику у Београду

др Игор Станковић
виши научни сарадник
Институт за физику у Београду

проф. др Јелена Радовановић
редовни професор Електротехничког факултета
Универзитета у Београду