

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације Ане Калинић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5018/17-1 од 19.03.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата магист. инж. електр. и рачунар. Ане Калинић под насловом **„Интеракција јона са графен-изолатор-графен композитним системима“** („*Interaction of ions with graphene-insulator-graphene composite systems*“).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Ана Калинић је рођена 2.12.1993. године у Београду. Завршила је Основну школу „Деспот Стефан Лазаревић” у Београду и Шесту београдску гимназију као носилац Вукове дипломе. Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписала је 2012. године. Дипломирала је на одсеку за Физичку електронику, смер Биомедицински и еколошки инжењеринг, 2016. године са просечном оценом 9,13. Дипломски рад под називом „Дволанчани прекиди ДНК и дицентрични хромозоми настали дејством зрачења” одбранила је у септембру 2016. године са оценом 10. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за биомедицинско и еколошко инжењерство, уписала је у октобру 2016. године. Положила је све испите са просечном оценом 10,00 и у септембру 2017. године је одбранила мастер рад под називом „Карактеризација радијационо синтетисаних хидрогел нанокompозита”. Исте године уписује докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Нуклеарна, медицинска и еколошка техника. До краја школске 2018/2019. године положила је све испите са просечном оценом 10,00 и испунила све обавезе предвиђене студијским програмом скупивши предвиђених 120 ЕСПБ.

Од 1.1.2018. године запослена је у Лабораторији за атомску физику Института за нуклеарне науке „Винча” – Института од националног значаја за Републику Србију, Универзитета у Београду (у наставку Институт за нуклеарне науке „Винча”). У звање истраживач приправник изабрана је 24.5.2018. године. Током прве половине 2019. године држала је лабораторијске вежбе из предмета Техничка физика II на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду.

1.2. Сечено наукоистраживачко искуство

Ана Калинић је 12.10.2017. године уписала докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Нуклеарна, медицинска и еколошка техника. До краја школске 2018/2019. године положила је следеће испите и испунила следеће обавезе предвиђене студијским програмом скупивши предвиђених 120 ЕСПБ:

Редни број	Шифра испита	Назив испита	Оцена	ЕСПБ
1.	13Д061МЈНЗ	Мерење јонизујућег и нејонизујућег зрачења	10	9
2.	13Д061РЕКЕ	Радијациона и електромагнетна компатибилност електротехничких компоненти и уређаја	10	9
3.	13Д061БМНМ	Биофизичке методе у наномедицини	10	9
4.	13Д061ФТКБ	Физика, технологија и карактеризација биоматеријала	10	9
5.	13Д061СМНН	Скенирајућа микроскопија у наноауци и нанотехнологији	10	9
6.	13Д061НСРН	Нумеричка симулација радијационих и нуклеарних процеса	10	9
7.	13Д061ДЗЗО	Дозиметрија, заштита од зрачења и нуклеарни отпад	10	9
8.	13Д061МНМЕ	Мерне методе у нуклеарној, медицинској и еколошкој техници	10	9
9.	13Д061СЧМ	Спектроскопија чврстих материјала	10	9
10.	13Д091УНР	Увод у научни рад	10	6
Редни број	Назив обавезе			ЕСПБ
1.	Научно стручни рад			3
2.	Студијски истраживачки рад I			15
3.	Студијски истраживачки рад II			15

Од 1.1.2018. до 31.12.2019. године била је ангажована на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Функционални, функционализовани и усавршени наноматеријали” (ИИИ 45005).

Од 1.1.2020. године ангажована је на програму Института за нуклеарне науке „Винча” под називом „Нови материјали и наноауке”, у оквиру потпрограма под називом „Угљенични наноматеријали”, у склопу истраживачке теме под називом „Теоријско испитивање интеракција наелектрисаних честица са угљеничним наноматеријалима” (0402110) чији је руководиоца др Иван Радовић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча”.

Тренутно је учесник пројекта под називом „Теоријско истраживање интеракција јона са графеном и графен/изолатор/графен композитима”, у оквиру програма билатералне научне и технолошке сарадње између Републике Србије и Републике Хрватске за период 1.5.2019. - 30.4.2021. године, чији је руководиоца са српске стране др Иван Радовић.

У периоду од 5. до 8.6.2018. године била је учесник Летње школе у Бечу у склопу COST акције CA15107 под називом „Multi-Functional Nano-Carbon Composite Materials Network (MultiComp)”.

Тренутно је члан радне групе под називом „Design through computational modelling“ у склопу COST акције CA19118 под називом „High-performance Carbon-based composites with Smart properties for Advanced Sensing Applications (EsSENce)”.

До сада је објавила следеће радове:

Категорија M21 (Рад у врхунском међународном часопису):

1. V. Despoja, I. Radović, L. Karbunar, **A. Kalinić**, Z. L. Mišković: “Wake potential in graphene-insulator-graphene composite systems,” - *Phys. Rev. B*, vol. 100, no. 3, p. 035443, 2019. (IF (2019) = 3.575) (ISSN 2469-9950)

Категорија M22 (Рад у истакнутом међународном часопису):

1. **A. Kalinić**, I. Radović, L. Karbunar, V. Despoja, Z. L. Mišković: “Wake effect in interactions of ions with graphene-sapphire-graphene composite system,” - *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 126, p. 114447, Feb. 2021. (IF (2019) = 3.570) (ISSN 2470-0045)

Категорија M33 (Саопштење са међународног скупа штампано у целини):

1. **A. Kalinić**, I. Radović, L. Karbunar, V. Despoja, Z. L. Mišković: “Interactions of ions with graphene-sapphire-graphene composite system: Stopping force and image force,” - *Publ. Astron. Obs. Belgrade 99, SPIG 2020*, Šabac, Serbia, 2020, pp. 97–100.

Категорија M34 (Саопштење са међународног скупа штампано у изводу):

1. **A. Kalinić**, I. Radović, L. Karbunar, V. Despoja, Z. L. Mišković: “Wake effect in interactions of ions with graphene-sapphire-graphene structure,” - *COST Action CA15107 meeting, Book of Abstracts*, Slovenj Gradec, Slovenia, 2020, p. 43.

Категорија M63 (Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини):

1. **A. Kalinić**, M. Vujisić: “Analiza dejstva jonskih snopova na GFET strukture simulacijom transporta zračenja,” - *62. Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2018*, Palić, Srbija, 2018, pp. 370–375.

Категорија M64 (Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу):

1. **A. Kalinić**, I. Radović, V. Despoja, L. Karbunar, Z. L. Mišković: “Wake potential in graphene-sapphire-graphene composite systems,” - *The 20th Symposium on Condensed Matter Physics, Book of Abstracts, SFKM 2019*, Belgrade, Serbia, 2019, p. 43.

Дана 22.3.2021. године Ана Калинић је успешно одбранила тему докторске дисертације на усменој одбрани у присуству Комисије: др Милош Вујисић, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду (председник Комисије), др Иван Радовић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке „Винча”, др Јелена Радовановић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата остварених у досадашњем раду (објављени радови у врхунском (M21) и истакнутом (M22) међународном часопису, радови на домаћим и међународним конференцијама, учешће на домаћим и међународним пројектима, и учешће на две различите COST акције), као и на основу усмене одбране теме докторске дисертације, Комисија је стекла веома позитиван утисак о способностима и научно-истраживачком раду кандидата. Осим тога, кандидат има прецизно дефинисане циљеве и план истраживања. Узимајући у обзир све наведено, Комисија сматра да кандидат Ана Калинић задовољава све потребне услове и да може да приступи раду на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Дводимензионални (2Д) материјали се интензивно истражују од открића *графена* 2004. године. Графен је слој угљеникових атома у равни распоређених у правилну хексагоналну 2Д структуру. Сваки атом угљеника формира по једну σ везу преко sp^2 хибридованих орбитала са три најближа атома. Електрони који би градили π везе преко четврте, нехибризоване орбитале се колективизују и образују валентну (π) и проводну (π^*) енергетску зону. Валентна и проводна зона се додирују у тзв. Дираковим тачкама у Брилуеновој зони, што значи да је енергетски процеп графена једнак нули [1]. Носиоци наелектрисања у овом равном слоју угљеникових атома су безмасени Диракови фермиони [2, 3]. У недопираном графену нема слободних носилаца наелектрисања, те су могући само међузонски прелази, док се у допираном графену јављају и међузонски и унутарзонски прелази електрона. Колективна електронска побуђења у графену, тј. плазмони, последњих година привлаче пажњу и са експерименталне и са теоријске тачке гледишта [4–14]. Посебно је интересантан Дираков плазмон који се појављује при динамичкој поларизацији графена на ниским учестаностима, а кога карактеришу унутарзонски, нискоенергетски прелази електрона [15, 16]. Једно занимљиво својство графена јесте баш могућност контролисања Дираковог плазмона променом густине допирања, што омогућава његову примену у фотоници, оптоелектроници, трансформационој оптици и плазмоници [17–20]. С друге стране, графен је и биокompatibilан, те, као и остали наноматеријали на бази угљеника, има потенцијалну примену у биомедицини за транспорт лекова, у терапији лечења тумора, као и у пољу нанотераностике [21–24]. Такође, графен испољава одлична оптичка, електронска и физичка својства која би му омогућила да се користи као биосензор [25–27]. Међутим, у наведеним применама, графен не може самостално да стоји, већ је потребно да се нађе на одређеном изолаторском слоју [28–30]. Предмет истраживања ове докторске дисертације јесу управо композити који се састоје из слојева графена и изолатора, тј. графен-изолатор-графен композитни системи. Као изолатор разматраће се алуминијум(III)-оксид (хемијска ознака Al_2O_3 , у кристалној форми сафира). Сафир је изабран јер се често користи као диелектрик у експериментима [31–35], а уз то је и биокompatibilан [36, 37].

Изолаторски слојеви који раздвајају слојеве графена обично подржавају јаке оптичке површинске фононске модове који су активни у истој области учестаности као и Дираков плазмон (од терагерца до средње инфрацрвене) па самим тим могу да га пригуше или да се хибридују са њим [38, 39]. Таква плазмон-фонон хибридизација може да измени дисперзију колективних модова у графену и, последично, да утиче на примену уређаја који би садржали графен [40]. За побуђивање плазмон-фонон хибридизације може да се искористи интеракција јона са посматраним системом. Наиме, наелектрисана честица која се креће паралелно металној или поларној кристалној површини узрокује једночестичне екситације и екситације колективних модова у тој површини. Настанак колективних осцилација у поларизацији посматраног медијума је окарактерисан осцилаторним потенцијалом, који је познат под називом *ефекат таласа*. Овај ефекат се јавља у

индукованом електростатичком потенцијалу када брзина упадне честице достигне фазну брзину колективних осцилација [41, 42]. Ефекат таласа у индукованом потенцијалу код дводимензионалних материјала први пут је изучаван теоријски на примеру 2Д електронског гаса [43], а затим и на разним угљеничним наноструктурама, укључујући и графен [44–50]. Утицај хибридизације плазмона и фонона на ефекат таласа проучаван је у случајевима графена и поларног супстрата када се наелектрисана честица креће паралелно графенском слоју [40, 51, 52]. Главни циљ ове дисертације је да се спроведе детаљна анализа утицаја хибридизације Дираковог плазмона у графену и површинских оптичких фононских модова у Al_2O_3 слоју на ефекат таласа у индукованом потенцијалу. Поред тога, испитиваће се и ефекти плазмон-фонон хибридизације на *силу лика* (конзервативна сила која настоји да савије путању јона ка површини система) и *зауоставну силу* (дисипативна сила која се противи кретању честице) које делује на упадну наелектрисану честицу.

3. Полазне хипотезе

При динамичкој поларизацији графена на високим учестаностима доминирају високоенергетски међузонски прелази електрона, тј. π и $\pi + \sigma$ плазмони, док приликом споријег кретања упадне честице Дираков плазмон даје главни допринос формирању таласа у индукованом потенцијалу [16, 53–55]. На основу претходних истраживања [44–47] установљено је да се ефекат таласа у случају слободног графена јавља само за брзине упадних честица већих од Фермијеве брзине у графену ($\sim 10^6$ m/s) јер при тим брзинама долази до побуђења Дираковог плазмона. Међутим, слагањем графена на изолаторску подлогу долази до хибридизације Дираковог плазмона и фонона из подлоге. На основу анализе плазмон-фонон хибридних модова у графен- Al_2O_3 -графен композитним системима [56], као и на основу проучавања ефеката у случају интеракције јона [40, 51] и јонског пара [52] са графеном на полубесконачним подлогама које подржавају један [51], односно два трансверзална оптичка фононска мода [40, 52], очекује се да ће се у случају интеракције јона са графен- Al_2O_3 -графен композитима ефекат таласа јавити и за брзине мање од Фермијеве брзине услед хибридизације Диракових плазмона у слојевима графена и трансверзалних оптичких фононских модова са обе стране слоја Al_2O_3 . У овој дисертацији ће бити претпостављено да поларизација Al_2O_3 потиче углавном од ексцитација два оптичка мода највеће осцилаторне снаге [38, 57]. Обзиром на такву претпоставку, композитни систем графен- Al_2O_3 -графен би могао да има и до шест интересантних плазмон-фонон хибридних модова у ниској терахерцној области: два слоја допираног графена подржавају по један Дираков плазмон, а по један пар оптичких фонона је локализован на горњој и на доњој површини Al_2O_3 слоја [56].

Очекује се да на облик, амплитуду, период осцилација и просторни домет таласног ефекта у индукованом потенцијалу утичу концентрација носилаца наелектрисања у графену, дебљина изолаторског слоја и његова диелектрична својства, фактор пригушења Дираковог плазмона, али и брзина упадне наелектрисане честице, као и њена удаљеност од графена [53, 58–60]. Такође, на основу проучавања зауоставне силе и силе лика приликом интеракције јона са системима који садрже графен [40, 51, 61–63], очекују се значајни ефекти плазмон-фонон хибридизације на посматране силе и у случају интеракције јона са графен- Al_2O_3 -графен композитима. Утицај свих ових фактора ће бити систематично образложен у овој дисертацији, како на ефекат таласа у индукованом потенцијалу, тако и на зауоставну силу и силу лика које делују на упадну честицу.

4. Научне методе истраживања

При израчунавању величина које карактеришу интеракције јона са графен-изолатор-графен композитним системима поћи ће се од Фуријеове трансформације екраниране Кулонове

интеракције [56] у којој се појављује израз за ефективну диелектричну функцију система графен- Al_2O_3 -графен. Ефективна диелектрична функција система се изражава преко локалне диелектричне функције Al_2O_3 слоја [64] и поларизационих функција неинтерагујућих електрона у слојевима графена.

Користиће се поларизационе функције одзива неинтерагујућих електрона у графену добијене на два начина: методом на бази безмасених Диракових фермиона и проширеним хидродинамичким моделом. Први метод ће се користити у опсегу ниских учестаности, где доминира Дираков плазмон, и он укључује примену апроксимације случајних фаза узимајући у обзир само π електронску зону у апроксимацији Дираковог конуса [65, 66], док су ефекти пригушења, тј. електронских судара одређени Мерминовом процедуром [61]. Овај модел тачно описује и међузонске и унутарзонске прелазе електрона до инфрацрвених учестаности за типичне густине допирања графена. Други метод ће се користити у опсегу високих учестаности где ефекти допирања не долазе до изражаја. Он описује високоенергетске међузонске прелазе у графену помоћу двофлуидног модела за σ и π електроне и додатно узима у обзир нискоенергетске Диракове доприносе који описују $\pi \rightarrow \pi^*$ прелазе близу K тачака у Бриуленовој зони [14, 67, 68]. Оба наведена модела имају својих предности и мана које ће бити детаљно објашњене у дисертацији њиховим поређењем са моделом већ познатим у литератури који почива на првим принципима (*ab initio* метод) и који укључује прелазе између свих валентних и проводних зона у графену [56, 59].

Укупни и индуковани потенцијал у области слоја графена најближем упадној наелектрисаној честици ће затим бити одређени помоћу Фуријеове трансформације екраниране Кулонове интеракције [59, 60], док ће зауставна сила и сила лика бити израчунате преко одговарајућих извода индукованог потенцијала [69].

У циљу нумеричког израчунавања наведених величина биће написани програмски кодови у *FORTTRAN* програмском језику и *MATLAB* софтверском пакету.

Референце

- Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV., et al (2004) *Electric field effect in atomically thin carbon films*. Science 306:666–669
- Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV., et al (2005) *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*. Nature 438:197–200
- Zhang Y, Tan YW, Stormer HL, Kim P (2005) *Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene*. Nature 438:201–204
- Kaydashev V, Khlebtsov B, Miakonkikh A, et al (2021) *Excitation of localized graphene plasmons by aperiodic self-assembled arrays of metallic antennas*. Nanotechnology 32:035201
- Lyon K, Mowbray DJ, Mišković ZL (2020) *Conductivity models for electron energy loss spectroscopy of graphene in a scanning transmission electron microscope with high energy resolution*. Ultramicroscopy 214:113012
- Despoja V, Jakovac J, Golenić N, Marušić L (2020) *Bias-controlled plasmon switching in lithium-doped graphene on dielectric model Al_2O_3 substrate*. npj 2D Materials and Applications 4:19
- Despoja V, Radović I, Politano A, Mišković ZL (2020) *Insights on the Excitation Spectrum of Graphene Contacted with a Pt Skin*. Nanomaterials 10:703
- Zhang N, Jiang X, Fan J, et al (2019) *Experimental observed plasmon near-field response in isolated suspended graphene resonators*. Nanotechnology 30:505201
- Fan Y, Shen NH, Zhang F, et al (2019) *Graphene Plasmonics: A Platform for 2D Optics*. Advanced Optical Materials 7:1800537
- Despoja V, Novko D, Lončarić I, et al (2019) *Strong acoustic plasmons in chemically doped graphene induced by a nearby metal surface*. Physical Review B 100:195401
- Politano A, Yu HK, Farias D, Chiarello G (2018) *Multiple acoustic surface plasmons in graphene/Cu(111) contacts*. Physical Review B 97:035414
- Politano A, Radović I, Borka D, et al (2017) *Dispersion and damping of the interband π plasmon in graphene grown on Cu(111) foils*. Carbon 114:70–76
- Politano A, Radović I, Borka D, et al (2016) *Interband plasmons in supported graphene on metal substrates: Theory and experiments*. Carbon 96:91–97
- Djordjević T, Radović I, Despoja V, et al (2018) *Analytical modeling of electron energy loss spectroscopy of graphene: Ab initio study versus extended hydrodynamic model*. Ultramicroscopy 184:134–142
- Politano A, Chiarello G (2014) *Plasmon modes in graphene: Status and prospect*. Nanoscale 6:10927–10940
- Despoja V, Novko D, Dekanić K, et al (2013) *Two-dimensional and π plasmon spectra in pristine and doped graphene*. Physical Review B 87:075447
- Jablan M, Buljan H, Soljačić M (2009) *Plasmonics in graphene at infrared frequencies*. Physical Review B 80:245435
- Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari AC (2010) *Graphene photonics and optoelectronics*. Nature Photonics 4:611
- Vakil A, Engheta N (2011) *Transformation optics using graphene*. Science 332:1291–1294
- Low T, Avouris P (2014) *Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications*. ACS Nano 8:1086–1101
- Song S, Shen H, Wang Y, et al (2020) *Biomedical application of graphene: From drug delivery, tumor therapy, to theranostics*. Colloids

- and Surfaces B: Biointerfaces 185:110596
22. Gupta BD, Pathak A, Semwal V (2019) *Carbon-based nanomaterials for plasmonic sensors: A review*. Sensors 19:3536
23. Maiti D, Tong X, Mou X, Yang K (2019) *Carbon-Based Nanomaterials for Biomedical Applications: A Recent Study*. Frontiers in Pharmacology 9:1401
24. Omar NAS, Fen YW, Saleviter S, et al (2019) *Development of a graphene-based surface plasmon resonance optical sensor chip for potential biomedical application*. Materials 12:1928
25. Li Z, Zhang W, Xing F (2019) *Graphene Optical Biosensors*. International journal of molecular sciences 20:2461
26. Dash S, Patnaik A (2021) *Impact of silicon-based substrates on graphene THz antenna*. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures 126:114479
27. Novodchuk I, Bajcsy M, Yavuz M (2021) *Graphene-based field effect transistor biosensors for breast cancer detection: A review on biosensing strategies*. Carbon 172:431–453
28. Yan H, Li X, Chandra B, et al (2012) *Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks*. Nature Nanotechnology 7:330–334
29. Gomez-Diaz JS, Moldovan C, Capdevila S, et al (2015) *Self-biased reconfigurable graphene stacks for terahertz plasmonics*. Nature Communications 6:6334
30. Francescato Y, Giannini V, Yang J, et al (2014) *Graphene Sandwiches as a Platform for Broadband Molecular Spectroscopy*. ACS Photonics 1:437–443
31. Niu J, Jun Shin Y, Lee Y, et al (2012) *Graphene induced tunability of the surface plasmon resonance*. Applied Physics Letters 100:061116
32. Liu M, Yin X, Zhang X (2012) *Double-layer graphene optical modulator*. Nano Letters 12:1482–1485
33. Xiao B, Sun R, Xie Z, Wang X (2015) *A terahertz modulator based on double-layer graphene*. Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications 9:692–695
34. Shirdel M, Mansouri-Birjandi MA (2020) *A broadband graphene modulator based on plasmonic valley-slot waveguide*. Optical and Quantum Electronics 52:36
35. Shiga K, Komiyama T, Fuse Y, et al (2020) *Electrical transport properties of gate tunable graphene lateral tunnel diodes*. Japanese Journal of Applied Physics 59:S1D03
36. Rahmati M, Mozafari M (2019) *Biocompatibility of alumina-based biomaterials—A review*. Journal of Cellular Physiology 234:3321–3335
37. Denes E, Barrière G, Poli E, Lévêque G (2018) *Alumina biocompatibility*. Journal of Long-Term Effects of Medical Implants 28:9–13
38. Fischetti MV., Neumayer DA, Cartier EA (2001) *Effective electron mobility in Si inversion layers in metal-oxide-semiconductor systems with a high- κ insulator: The role of remote phonon scattering*. Journal of Applied Physics 90:4587–4608
39. Yan H, Low T, Zhu W, et al (2013) *Damping pathways of mid-infrared plasmons in graphene nanostructures*. Nature Photonics 7:394–399
40. Marinković T, Radović I, Borka D, Mišković ZL (2015) *Probing the plasmon-phonon hybridization in supported graphene by externally moving charged particles*. Plasmonics 10:1741–1749
41. García de Abajo FJ, Echenique PM (1992) *Wake potential in the vicinity of a surface*. Physical Review B 46:2663–2675
42. Mowbray DJ, Mišković ZL., Goodman FO, Wang YN (2004) *Wake effect in interactions of fast ions with carbon nanotubes*. Physics Letters A 329:94–99
43. Wang YN, Ma TC (1995) *Wake potential of a charged particle in a strongly coupled two-dimensional electron gas*. Physical Review B 52:16395–16399
44. Radović I, Borka D, Mišković ZL (2011) *Wake effect in doped graphene due to moving external charge*. Physics Letters A 375:3720–3725
45. Despoja V, Dekanić K, Šunjić M, Marušić L (2012) *Ab initio study of energy loss and wake potential in the vicinity of a graphene monolayer*. Physical Review B 86:165419
46. Radović I, Borka D, Mišković ZL (2012) *Dynamic polarization of graphene by external correlated charges*. Physical Review B 86:125442
47. Radović I, Borka D, Mišković ZL (2013) *Wake effect in interactions of dipolar molecules with doped graphene*. Physics Letters A 377:2614–2620
48. Shi X, Lin X, Gao F, et al (2015) *Caustic graphene plasmons with Kelvin angle*. Physical Review B 92:081404
49. Chaves AJ, Peres NMR, Smimov G, Asger Mortensen N (2017) *Hydrodynamic model approach to the formation of plasmonic wakes in graphene*. Physical Review B 96:195438
50. Kolomeisky EB, Straley JP (2018) *Kelvin-Mach Wake in a Two-Dimensional Fermi Sea*. Physical Review Letters 120:226801
51. Radović I, Borka Jovanović V, Borka D, Mišković ZL (2012) *Interactions of slowly moving charges with graphene: The role of substrate phonons*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. pp 165–168
52. Marinković T, Radović I, Borka D, Mišković ZL (2015) *Wake effect in the interaction of slow correlated charges with supported graphene due to plasmon-phonon hybridization*. Physics Letters A 379:377–381
53. Hwang EH, Das Sarma S (2009) *Plasmon modes of spatially separated double-layer graphene*. Physical Review B 80:205405
54. Das Sarma S, Adam S, Hwang EH, Rossi E (2011) *Electronic transport in two-dimensional graphene*. Reviews of Modern Physics 83:407–470
55. Novko D, Šunjić M, Despoja V (2016) *Optical absorption and conductivity in quasi-two-dimensional crystals from first principles: Application to graphene*. Physical Review B 93:125413
56. Despoja V, Djordjević T, Karbunar L, et al (2017) *Ab initio study of the electron energy loss function in a graphene-sapphire-graphene composite system*. Physical Review B 96:075433
57. Frederick BG, Apai G, Rhodin TN (1991) *Surface phonons in thin aluminum oxide films: Thickness, beam-energy, and symmetry-mixing effects*. Physical Review B 44:1880–1890
58. Stauber T (2014) *Plasmonics in Dirac systems: From graphene to topological insulators*. Journal of Physics Condensed Matter 26:123201
59. Despoja V, Radović I, Karbunar L, et al (2019) *Wake potential in graphene-insulator-graphene composite systems*. Physical Review B 100:035443
60. Kalinić A, Radović I, Karbunar L, et al (2021) *Wake effect in interactions of ions with graphene-sapphire-graphene composite system*. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures 126:114447
61. Allison KF, Borka D, Radović I, et al (2009) *Dynamic polarization of graphene by moving external charges: Random phase approximation*. Physical Review B 80:195405
62. Radović I, Hadžievski L, Mišković ZL (2008) *Polarization of supported graphene by slowly moving charges*. Physical Review B 77:075428
63. Radović I, Hadžievski L, Bibić N, Mišković ZL (2007) *Dynamic-polarization forces on fast ions and molecules moving over supported graphene*. Physical Review A 76:042901
64. Ong ZY, Fischetti MV. (2012) *Theory of interfacial plasmon-phonon scattering in supported graphene*. Physical Review B 86:165422
65. Wunsch B, Stauber T, Sols F, Guinea F (2006) *Dynamical polarization of graphene at finite doping*. New Journal of Physics 8:318
66. Hwang EH, Das Sarma S (2007) *Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene*. Physical Review B 75:205418
67. Mowbray DJ, Segui S, Gervasoni JL, et al (2010) *Plasmon excitations on a single-wall carbon nanotube by external charges: Two-dimensional two-fluid hydrodynamic model*. Physical Review B 82:035405
68. Borka Jovanović V, Radović I, Borka D, Mišković ZL (2011) *High-energy plasmon spectroscopy of freestanding multilayer graphene*. Physical Review B 84:155416
69. Kalinić A, Radović I, Karbunar L, et al (2020) *Interactions of ions with graphene-sapphire-graphene composite system: Stopping force and image force*. Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade 99. pp 97–100

5. Очекивани научни допринос

- Извешће се изрази за посматране величине које карактеришу интеракцију јона са графен-изолатор-графен композитним системима (укупан и индукован потенцијал у равни горњег графенског слоја, зауставна сила и сила лика);
- Биће дат детаљан опис и опсежно поређење модела заснованог на безмасеним Дираковим фермионима и проширеног хидродинамичког модела са *ab initio* методом за различите брзине упадног јона;
- За брзине јона испод Фермијеве брзине показаће се да трансверзални оптички фонони у слоју изолатора дају једини допринос ефекту таласа у индукованом потенцијалу;
- За брзине јона изнад Фермијеве брзине показаће се да главни допринос ефекту таласа дају хибридизовани Диракови плазмони у слојевима графена;
- За брзине јона знатно изнад Фермијеве брзине показаће се да поред Диракових плазмона допринос у виду брзих осцилација одмах иза наелектрисане честице даје и високоенергетски π плазмон у графену;
- Установиће се како амплитуда, период осцилација, облик и просторни димет ефекта таласа у индукованом потенцијалу зависе од концентрације носилаца наелектрисања у графену, дебљине изолаторског слоја и његових диелектричних својстава, процеса пригушења колективних модова, али и од брзине упадне наелектрисане честице, као и њене удаљености од графена;
- Установиће се како наведени параметри и ефекти плазмон-фонон хибридизације утичу и на зауставну силу и силу лика при интеракцији јона са посматраним системима.

6. План истраживања и структура рада

- У првој фази истраживања испитиваће се ефекат таласа у индукованом потенцијалу при интеракцији јона са структурама типа $sy_1\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}sy_2$, где sy_i ($i = 1,2$) може бити вакуум, допирани или недопирани графен, за брзине јона испод, изнад и знатно изнад Фермијеве, при константним вредностима удаљености јона од структуре, дебљине Al_2O_3 слоја, фактора пригушења Диракових плазмона и густине допирања графена;
- У другој фази испитиваће се ефекат таласа у индукованом потенцијалу при интеракцији јона са графен- Al_2O_3 -графен композитима, за брзине јона испод и изнад Фермијеве, за различите вредности удаљености јона од система, дебљине Al_2O_3 слоја, фактора пригушења и густине допирања;
- У трећој и последњој фази истраживања испитиваће се ефекти плазмон-фонон хибридизације на зауставну силу и силу лика при интеракцији јона са системом графен- Al_2O_3 -графен, за различите вредности брзине јона, његове удаљености од површине посматране структуре, дебљине Al_2O_3 слоја, фактора пригушења Диракових плазмона и густине допирања графена.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и увида у досадашњи научно-истраживачки рад кандидата Ане Калинић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија је закључила да кандидат испуњава све услове да приступи раду на предложеној теми докторске дисертације под насловом „Интеракција јона са графен-изолатор-графен композитним системима“.

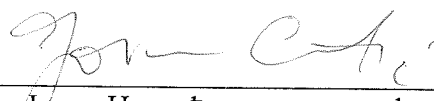
Кандидат је у свом студијском и научно-истраживачком раду доказао да познаје област којој припада предложена дисертација и испољио је висок степен самосталности и креативности при аналитичком и нумеричком решавању теоријских проблема.

Предложена тема припада ужој научној области Физичка електроника и односи се на теоријско разматрање интеракције јона са графен-изолатор-графен композитним системима. Значај предложеног истраживања је првенствено теоријске природе, тј. доприноси фундаменталном разумевању ефеката који се јављају приликом интеракције јона са поменутим системима. Добијени резултати могу бити од интереса и при проучавању расејања јона под малим углом са површина, као и у случају спектроскопије енергетских губитака електрона слојевитих структура које садрже графен користећи сноп електрона који се креће изнад њихових површина без додира, односно без трансмисије и рефлексије. Поред тога, значај предложеног истраживања огледа се и у развоју свеобухватног програма компјутерске симулације за моделовање интеракција наелектрисаних честица са графенским наноструктурама.

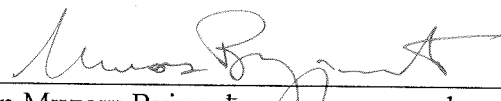
Обзиром на образложења и позитивне оцене наведене у овом извештају, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Ани Калинић одобри израду докторске дисертације под горе наведеним насловом. За ментора израде докторске дисертације предлаже се др Јован Цветић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.

У Београду, 23.03.2021. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Јован Цветић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милош Вујисић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Иван Радовић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“



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