

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Ане Калинић

Одлуком бр. 883/28 од 13.06.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ане Калинић под насловом

### **Интеракција јона са графен-изолатор-графен композитним системима**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Ана Калинић је уписала докторске студије школске 2017/2018 године на модулу Нуклеарна, медицинска и еколошка техника. Пријавила је тему за израду докторске дисертације 25.02.2021. године. Комисија за студије трећег степена је на својој седници дана 02.03.2021. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и Наставно-научном већу факултета дала препоруку за именовање састава Комисије за оцену услова и прихватање теме. Наставно-научно веће је одлуком број 5018/17-1 дана 19.03.2021. године именовало Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

1. др Милош Вујисић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
2. др Иван Радовић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча“ и
3. др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

За ментора је предложен др Јован Цветић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду. Усмена одбрана теме докторске дисертације је одржана 22.03.2021. године. Наставно-научно веће факултета је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације одлуком број 5018/17-2 дана 16.04.2021. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Ане Калинић под насловом „Интеракција јона са графен-изолатор-графен композитним системима“ одлуком број 61206-1758/2-21 дана 28.04.2021. године.

Кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену 30.05.2023. године. Комисија за студије трећег степена је на седници 06.06.2023. године дала препоруку за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно-научно веће факултета је одлуком број 883/28 дана 13.06.2023. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у следећем саставу:

1. др Владимир Арсоки, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
2. др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
3. др Иван Радовић, научни саветник, Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча“.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада широј научној области Електротехника и рачунарство и ужој научној области Физичка електроника за коју је матичан Електротехнички факултет. Ментор докторске дисертације је др Јован Цветић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, аутор више научних и стручних радова везаних за ужу научну област којој припада дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Ана Калинић је рођена 02.12.1993. 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 нанокомпозита“. 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 01.01.2018. године запослена је у Лабораторији за атомску физику Института за нуклеарне науке „Винча“. Била је учесник билатералног пројекта између Републике Србије и Републике Хрватске под називом „Теоријско истраживање интеракција јона са графеном и графен/изолатор/графен композитима“. У јуну 2018. године била је учесник Летње школе у Бечу у склопу *COST* акције под називом „*Multi-Functional Nano-Carbon Composite Materials Network*“. Током прве половине 2019. године држала је лабораторијске вежбе из предмета Техничка физика II на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Интеракција јона са графен-изолатор-графен композитним системима“ је написана на српском језику. На почетку се налазе насловне стране на српском и енглеском језику, страна са подацима о ментору и члановима комисије, захвалница, апстракт на српском и енглеском језику и садржај. Дисертација има 91 страну и садржи 50 слика, две табеле, листу од 176 референци, један прилог и биографију аутора. Текст дисертације је организован у оквиру седам поглавља (Увод, Теоријске основе, Графен, Алуминијум оксид, Моделовање система, Резултати и дискусија, Закључак). На крају се налазе неопходне изјаве које нису нумерисане.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је дат историјски приказ развоја научне мисли о плазмонима, кратак опис својстава графена и његових примена, као и преглед литературе која се бави проблематиком хибридизације плазмона из графена и фонона из супстрата. Уведени су појмови ефекта таласа, зауставне силе и силе лика, који су уско повезани са проблематиком којом се бави дисертација.

У другом поглављу су укратко приказана теоријска објашњења појмова који се користе у главном тексту, али који нису уско повезани са темом тезе. Ту спадају основни описи структуре материјала, колективних осцилација и њихових међусобних интеракција, као и полазне тачке метода који су коришћени за моделовање диелектричне функције посматраних система.

Поглавља три и четири су посвећена градивним елементима испитиваних композита, тј. графену и  $Al_2O_3$  супстрату, са посебним освртом на њихове плазмонске и фононске модале.

У петом поглављу је описано моделовање система графен-изолатор-графен методом на бази безмасених Диракових фермиона и проширеним хидродинамичким моделом, до добијања коначних израза који се користе приликом нумеричких прорачуна посматраних величина.

У шестом поглављу су изложени добијени резултати. Прво су објашњене функције губитака појединачних система на основу којих су дискутовани ефекат таласа у потенцијалу, зауставна сила и сила лика које делују на упадну наелектрисану честицу. Показано је како на размотрене ефекте 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 самог система. Добијени резултати су упоређени са *ab initio* методом, која је дата у прилогу.

У седмом поглављу је дат закључак, тј. приказани су најважнији резултати истраживања и наглашена је потенцијална примена посматраних система.

У прилогу су дати теоријски основи *ab initio* методе, вредности коришћених параметара и технички детаљи везани за прорачун.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Дводимензионални материјали се интензивно истражују од 2004. године, када је једноставном техником механичког раслојавања изолован монослој графита, познат под називом графен. Због изузетних електронских, електричних, механичких, термичких и оптичких својстава графен је убрзо нашао потенцијалне примене у многим областима, а посебно у наноелектроници и фотоници. Као и већина материјала заснованих на угљенику графен је биокompatибилан, те има потенцијалну примену у биомедицини за транспорт лекова, у терапији лечења тумора, у пољу нанотераностике, као и за биосензоре. Последњих година посебну пажњу са експерименталне и теоријске тачке гледишта привлаче ефекти у графену везани за побуде колективних осцилација електрона, које се у формализму квантизације описују квазичестицама познатим под називом плазмони. Посебно је интересантан Дираков плазмон који се појављује при динамичкој поларизацији графена на ниским учестаностима. Једно занимљиво својство графена јесте баш могућност контролisaња Дираковог плазмона променом густине допирања, што омогућава његову ширу примену у фотоници, оптоелектроници и плазмоници.

У већини примена графен не може самостално да стоји, већ је потребно да се нађе на одређеном потпорном слоју. Најчешће, овај слој не треба да буде проводан. Изолаторски слојеви који служе као подлога или да раздвајају слојеве графена обично подржавају јаке оптичке површинске фононске модове који су активни у истој области учестаности као и Дираков плазмон (од терахерцне до средње инфрацрвене), те самим тим могу да га пригуше или да се хибридују са њим. Таква плазмон-фонон хибридизација може да измени дисперзију колективних модова у графену и, последично, да утиче на примену уређаја који би садржали графен. Сходно томе, главни циљ ове дисертације је да се спроведе детаљна анализа утицаја хибридизације Дираковог плазмона у графену и површинских оптичких фононских модова у слоју изолатора. За побуђивање плазмон-фонон хибридизације је искоришћена интеракција јона са посматраним системом, тако да је њен утицај испитан кроз анализу ефекта таласа у индукваном потенцијалу, као и зауставне силе и силе лика које делују на упадну честицу. Оригиналност тезе је потврђена објављивањем два рада у престижном врхунском међународном часопису *Physical Review B* и рада у истакнутом међународном часопису *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* који су директан резултат рада на дисертацији.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током рада на дисертацији кандидат је обавио опсежну претрагу релевантне литературе и цитирао 176 библиографских референци. Цитирана литература обухвата различите типове публикација који укључују књиге, часописе, и зборнике са домаћих и међународних конференција. Велики део цитата је новијег датума, али су укључени и историјски наслови да би се употпунила слика о анализираној проблематици. У оквиру наведене литературе налазе се и радови кандидата који су проистекли из рада на докторској дисертацији (референце 68-70, 95, и 173), као и рад у врхунском међународном часопису који је повезан са темом дисертације али чији резултати нису укључени у тезу (референца 14).

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

При израчунавању величина које карактеришу интеракцију јона са графен-изолатор-графен композитним системима користи се Фуријеова трансформација екраниране Кулонове интеракције у којој се појављује израз за ефективну диелектричну функцију система графен- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -графен. Ефективна диелектрична функција система се изражава преко локалне диелектричне функције  $\text{Al}_2\text{O}_3$  слоја и поларизационних функција неинтерагујућих електрона у слојевима графена. Коришћене су поларизационе функције одзива неинтерагујућих електрона у графену добијене на два начина: методом на бази безмасених Диракових фермиона и проширеним хидродинамичким моделом. Први метод се користи у опсегу ниских учестаности, где доминира Дираков плазмон, и он укључује примену апроксимације случајних фаза узимајући у обзир само  $\pi$  електронску зону у апроксимацији Дираковог конуса, док су ефекти пригушења, тј. електронских судара одређени Мерминовом процедуром. Овај модел тачно описује и међузонске и унутарзонске прелазе електрона до инфрацрвених учестаности за типичне густине допирања графена. Други метод се користи у опсегу високих учестаности где ефекти допирања не долазе до изражаја. Он описује високоенергетске међузонске прелазе у графену помоћу двофлуидног модела за  $\sigma$  и  $\pi$  електроне и додатно узима у обзир нискоенергетске Диракове доприносе који описују  $\pi \rightarrow \pi^*$  прелазе близу  $K$  тачака у Бриуленовој зони. Оба наведена модела имају својих предности и мана које су 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. Укупни и индуковани потенцијал у области слоја графена најближем упадној наелектрисаној честици су затим одређени помоћу Фуријеове трансформације екраниране Кулонове интеракције, док су зауставна сила и сила лика израчунате преко одговарајућих извода индукованог потенцијала.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати у дисертацији јесу првенствено теоријске природе, тј. доприносе фундаменталном разумевању ефеката који се јављају приликом интеракције јона са графен-изолатор-графен композитним системом. Међутим, они могу бити од интереса и при проучавању расејања јона под малим углом са површина, као и у случају спектроскопије енергетских губитака електрона (скр. *EELS*; енгл. *Electron Energy Loss Spectroscopy*) слојевитих структура које садрже графен користећи снап електрона који се креће изнад њихових површина, без додира, односно без трансмисије и рефлексије (енгл. *aloof beam EELS*).

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу резултата остварених у досадашњем раду (објављени радови у врхунским (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 систематичности коју је кандидат исказао током писања докторске дисертације, Комисија је стекла веома позитиван утисак о способностима и научно-истраживачком раду кандидата.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- Изведени су 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);
- Дат је 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 показало се да трансверзални оптички фонони у слоју изолатора дају једини допринос ефекту таласа у индукованом потенцијалу;
- За брзине јона изнад Фермијеве брзине показало се да главни допринос ефекту таласа дају хибридизовани Диракови плазмони у слојевима графена;
- За брзине јона знатно изнад Фермијеве брзине показало се да поред Диракових плазмона допринос у виду брзих осцилација одмах иза наелектрисане честице даје и високоенергетски  $\pi$  плазмон у графену;
- Установило се како амплитуда, период осцилација, облик и просторни домет 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 површине система;
- Установило се како наведени параметри и ефекти плазмон-фонон хибридизације утичу и на зауставну силу и силу лика при интеракцији јона са посматраним системима.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу увида у циљеве истраживања постављене приликом пријаве теме докторске дисертације, постављених хипотеза и остварених резултата, Комисија констатује да је кандидат успешно одговорио на све постављене задатке. У оквиру дисертације је приказан утицај плазмон-фонон хибридизације на ефекат таласа у потенцијалу који се индукује у горњој површини система графен-изолатор-графен, као и њен утицај на зауставну силу и силу лика које делују на упадну честицу. Динамичко екранирање наелектрисања електронима и фононима које се користи у тези је већ позната тема у физици површина, али је научно знање унапређено коришћењем графена као гравитног елемента посматраних система. Резултати до којих је кандидат дошао доприносе фундаменталном разумевању ефеката који се јављају при интеракцији јона са графен-изолатор-графен композитним системима. Веома висок квалитет остварених резултата верификован је, између осталог, публикавањем два рада у престижном врхунском међународном часопису *Physical Review B*.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Ана Калинић је као коаутор објавила следеће научне радове у вези са темом дисертације:

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)

2. L. Marušić, **A. Kalinić**, I. Radović, J. Jakovac, Z. L. Mišković, V. Despoja: “Resolving the Mechanism of Acoustic Plasmon Instability in Graphene Doped by Alkali Metals,” – *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 9, p. 4770, 2022. (**IF (2021) = 6.208**) (ISSN 1422-0067)
3. **A. Kalinić**, V. Despoja, I. Radović, L. Karbunar, Z. L. Mišković: “Stopping and image forces acting on a charged particle moving near a graphene-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-graphene heterostructure,” - *Phys. Rev. B*, vol. 106, no. 11, p. 115430, 2022. (**IF (2020) = 4.036**) (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.
2. **A. Kalinić**, I. Radović, L. Karbunar, V. Despoja, Z. L. Mišković: “Analytical expression for stopping force acting on a slow charged particle moving parallel to a thick graphene-sapphire-graphene structure,” - *Publ. Astron. Obs. Belgrade 102, SPIG 2022*, Belgrade, Serbia, 2022, pp. 117-120.

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 20<sup>th</sup> Symposium on Condensed Matter Physics, Book of Abstracts, SFKM 2019*, Belgrade, Serbia, 2019, p. 43.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

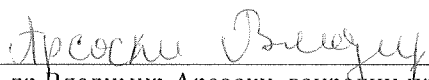
Докторска дисертација кандидата Ане Калинић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, написана је на српском језику, прегледно је организована по поглављима и придржава се упутства о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду. Садржај тезе је изнесен на јасан, методичан и разумљив начин. Кандидат је у свом студијском и научно-истраживачком раду доказао да познаје област којој припада дисертација и испољио је висок степен самосталности и креативности при аналитичком и нумеричком решавању теоријских проблема. Истраживање спроведено у оквиру рада на тези је високог квалитета, што је потврђено радовима објављеним у међународним научним часописима.

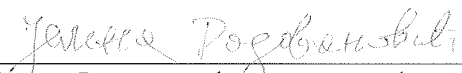
Дисертација припада ужој научној области Физичка електроника и односи се на теоријско разматрање интеракције јона са графен-изолатор-графен композитним системима. Значај предложеног истраживања је првенствено теоријске природе, тј. доприноси фундаменталном разумевању ефеката који се јављају приликом интеракције јона са поменутих 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.


Обзиром на образложења и позитивне оцене наведене у овом извештају, Комисија предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом „Интеракција јона са графен-изолатор-графен композитним системима“ кандидата Ане Калинић прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 12.07.2023. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Владимир Арсоки, ванредни професор  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

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

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