

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Извештај Комисије о урађеној докторској дисертацији кандидата Борислава Васића, дипл. инж. електротехнике.

На 753. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду од 25. 9. 2012. године, одређени смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Борислава Васића, дипл. инж. електротехнике, под насловом **„Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала”**. Након прегледа урађене докторске дисертације, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

Наслов и обим дисертације

Докторска дисертација Борислава Васића, дипл. инж. електротехнике, под називом **„Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала”**, је написана на 151 страни латиничним писмом и састоји се од 9 поглавља, 57 слика и 242 библиографске референце.

Хронологија одобравања и израде дисертације

На седници Комисије за трећи степен студија Електротехничког факултета одржаној 6. 10. 2011. године констатовано је да је Борислав Васић пријавио докторску дисертацију под насловом **„Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала”**, и у складу са Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета, Наставно-научном већу Електротехничког факултета је предложена Комисија за оцену услова и прихватање теме у саставу: др Јелена Радовановић, ванр. проф. (Електротехнички факултет у Београду), др Радош Гајић, научни саветник (Институт за физику), др Витомир Милановић, ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду). За ментора дисертације предложена је др Јелена Радовановић, ванр. проф.

На 737. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 11. 10. 2011. године, прихваћен је предлог Комисије за трећи степен студија, као и предложени ментор, с тим што је предложена Комисија за оцену услова и прихватање теме проширена једним чланом и то са др Слободаном Вуковићем, научним саветником (Институт за физику).

На основу извештаја Комисије за оцену услова и прихватање теме и пратеће документације докторске дисертације **„Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала”** предложена тема је

усвојена на 739. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 15. 11. 2011. године, а 26. 12. 2011. године од стране Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду.

На седници Комисије за трећи степен студија одржаној 19. 9. 2012. године констатовано је да је кандидат Борислав Васић, дипл. инж. електротехнике, предао урађену докторску дисертацију, па је на основу увида у дисертацију и пратећих докумената, а у складу са Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета, Комисија за трећи степен студија потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Комисија за трећи степен студија је предложила Наставно-научном већу Електротехничког факултета Комисију за преглед и оцену у саставу: др Јелена Радовановић, ванр. проф. (Електротехнички факултет у Београду), др Радош Гајић, научни саветник (Институт за физику), др Витомир Милановић, ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду) и др Милан Тадић ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду). На 753. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 25. 9. 2012. године, прихваћен је предлог Комисије за трећи степен студија.

Место докторске дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација под насловом „**Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала**” покрива научну област Наноелектроника и фотоника, а у ужем домену научно је актуелна у области фотонских кристала, плазмоники и метаматеријала.

Биографски подаци о кандидату

Кандидат 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. 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. Од јуна 2007. године је запослен у Центру за физику чврстог стања и нове материјале Института за физику у Београду као истраживач-приправник. Фебруара 2010. је изабран у звање истраживач-сарадник.

Борислав Васић је до сада као први аутор објавио шест радова у врхунским међународним научним часописима са SCI листе [M21], два у водећим међународним часописима [M22], један у међународним часописима [M23], а још један рад је недавно послат у врхунски међународни научни часопис са SCI листе. Борислав Васић је као коаутор објавио још један рад у врхунском међународном научном часопису са SCI листе [M21], два у водећим међународним часописима [M22] и један у међународним часописима [M23].

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „**Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала**” поред садржаја и литературе има девет поглавља и то: 1. Увод, 2. Трансформациона оптика реализована једнодимензионалним градираним плазмонским кристалима, 3. Средине са нехомогеним индексом преламања реализоване дводимензионалним градираним фотонским кристалима, 4. Подесиве оптичке средине са нехомогеним индексом преламања реализоване градираним плазмонским кристалима са полупроводничким штапићима, 5. Терахерцни модулатори реализовани подесивим плазмонским кристалима са полупроводничким штапићима, 6. Утицај неуређености на фотонске зонске процепе у дводимензионалним плазмонским кристалима, 7. Осетљивост плазмонских резонанција у графенским тракама у односу на диелектрично окружење у инфрацрвеном делу спектра, 8. Манипулација графена микроскопом на бази атомских сила коришћењем литографије у динамичком моду и електрична карактеризација микроскопом на бази електричних сила и 9. Закључак.

Кратак приказ појединачних поглавља

У првом делу Увода дат је кратак историјски преглед развоја вештачких електромагнетских структура, а затим и дефиниција фотонских и плазмонских кристала као и рада у режиму метаматеријала. У наставку су дате основне оптичке особине материјала, метала, полупроводника, диелектрика и графена, који чине фотонске и плазмонске кристале разматране у дисертацији. Затим је дата теорија хомогенизације фотонских и плазмонских кристала коришћењем Максвел Гарнетове теорије ефективног медијума. Након тога, описане су методе за контролу простирања електромагнетског у простору на бази нехомогеног индекса преламања и трансформационе оптике, односно методе за управљање електромагнетског поља на бази фотонских зонских процепа – плазмонског и Браговог. На крају увода дат је преглед метода за динамичко подешавање одзива фотонских структура променом геометрије или оптичких особина саставних елемената.

У другом поглављу метод трансформационе оптике је примењен за дизајн електромагнетске кривине. Идеални параметри кривине који захтевају реализацију анизотропне и нехомогене диелектричне пермитивности и магнетске пермеабилности, су поједностављени одговарајућим избором редукованих параметара или применом трансформација са јединичним Јакобијаном. Као резултат обе методе, добијена је немагнетска кривина која је затим реализована једнодимензионалним градираним плазмонским кристалима. Анализирана су два случаја: реализација градирањем диелектричне пермитивности плоча у кристалу и градирање дебљине плоча константних пермитивности. Нумеричке симулације реалног простирања електромагнетског поља

показују да диелектрична електромагнетска кривина функционише готово исто као и идеална кривина.

У трећем поглављу дводимензионални градиранни фотонски кристали су коришћени за реализацију 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 реализована ефективна пермитивност у свакој тачки буде једнака пермитивности задатог оптичког уређаја. Фокус овог поглавља је на проучавању фреквенцијског опсега у коме дизајнирани градиранни фотонски кристали обављају предвиђену функцију. Показано је да су они широкопојасни, док је горњи фреквенцијски лимит одређен Браговим условом у тачки градираног фотонског кристала са највећим ефективним индексом преламања.

У четвртном поглављу подесиви оптички уређаји са нехомогеним индексом преламања су реализовани градираним плазмонским кристалима са полупроводничким штапићима променљивих полупречника. Као и код градиранних фотонских кристала, променљиви полупречници у кристалу омогућавају реализацију нехомогеног индекса преламања. У исто време, полупроводници омогућавају динамичку промену њихове пермитивности променом температуре. На тај начин су реализована сочива са подесивим фокусом и антене са подесивим углом скретања електромагнетског поља.

У петом поглављу је приказан дизајн терахерцних модулатора и прекидача на бази дводимензионалних плазмонских кристала са полупроводничким штапићима. Модулатори раде за електрично поље нормално на штапиће које у њима побуђује локализоване површинске плазмон поларитоне. Поларитони доводе до апсорпције и рефлексије упадног електромагнетско поља што доводи до одсуства трансмисије и стварања плазмонских фотонских зонских процепа. Променом концентрације електрона у полупроводничким штапићима, мења се положај плазмонских резонанција и плазмонских зонских процепа. Показано је да је су плазмонски фотонски зонски процепи далеко осетљивији у односу на Брагове фотонске процепе при истој промени концентрације електрона у полупроводничким штапићима.

У шестом поглављу анализирана је осетљивост плазмонског и Браговог фотонског зонског процепа на неуређеност самог кристала. Анализирана су четири случаја неуређености: неуређеност просторне позиције штапића, неуређеност полупречника штапића, неуређеност попречног пресека штапића и неуређеност због одсуства штапића. Показано је да су плазмонски фотонски зонски процепи у дводимензионалним плазмонским кристалима робустни на неуређеност структуре и да у том погледу имају далеко боље особине у поређењу са Браговим фотонским зонским процепима.

У седмом поглављу су анализирани једнодимензионални плазмонски кристали на бази графенских трака као платформа за сензоре 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 нанометар 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.

У осмом поглављу су приказани експериментални резултати литографије графена микроскопом на бази атомских сила. Коришћен је динамички мод, тј. полуконтактни мод при јако увећаној амплитуди осцилација 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 цепања графена. Иако метод није погодан за фабрикацију графенских наноструктура због неконтролисаног кидања графена, показано је да се веома успешно може користити за генерисање локалног напрезања у графену.

У Закључку су наведени главни доприноси дисертације и анализиране могућности за примену.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Савременост, оригиналност и значај

Проблематика дисертације се односи на изузетно актуелне области фотонских и плазмонских кристала и метаматеријала. Значај дисертације огледа се у томе да предложене методе омогућавају реализацију широкопојасних електромагнетских уређаја са нехомогеним индексом преламања у оптичком делу спектра што до сада није било могуће. Значај подесивих електромагнетских уређаја на бази полупроводника је у томе да они омогућавају реализацију различитих филтара, модулатора и прекидача на терахерцним учестаностима. Показана је робустност плазмонског фотонског зонског процепа што може омогућити широку примену јефтиних и једноставних тзв. "одоздонавише" метода за фабрикацију фотонских структура који увек дају неуређену структуру. Предложена је и нова врста инфрацрвених сензора на бази графена која омогућава детекцију диелектричних филмова неколико хиљада пута мањих од таласне дужине. Оригиналност дисертације проистиче из чињеница да према доступној научној литератури, нико није третирао наведене проблеме на начин на који је то урађено у дисертацији Борислава Васића; другим речима, приступ проблематици и добијени резултати су потпуно оригинални.

Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у раду садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, али садржи и класичне радове, као и одговарајуће књиге.

Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

У дисертацији под насловом „**Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала**” примењене су различите аналитичке и нумеричке методе за добијање потребних резултата. У примени метода трансформационе оптике коришћене су одговарајућа аналитичка пресликавања дводимензионалних домена, као и конформна пресликавања функција две променљиве. Максвел-Гарнетова теорија коришћена је за аналитичко моделовање ефективних параметара фотонских и плазмонских кристала. За симулације реалног простирања електромагнетског поља кроз различите комплексне структуре коришћен је COMSOL Multiphysics програмски пакет који је заснован на методи коначних елемената (енгл. FEM – Finite Element Method). За израчунавање коефицијената рефлексije планарних кристала на бази графена коришћен је RETICOLO програмски пакет базиран на методи спрегнутих таласа (енгл. RCWA – Rigorous Coupled Wave Analysis). У експерименталном делу дисертације коришћен је микроскоп на бази атомских сила NTEGRA Prima и то следећи модови: полуконтактни мод (мерење топографије и фазе), електрична микроскопија и литографски мод. Наведени приступ, односно научни метод, примењен у дисертацији у потпуности одговара проблему и постављеном циљу дисертације.

Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Резултати приказани у дисертацији, везани за градиране фотонске кристале имаће примену за реализацију интегрисаних оптичких компоненти за вођење светлости. Резултати везани за плазмонске зонске процепе могу се применити за фабрикацију тродимензионалних компоненти са фотонским зонским процепом у видљивом и инфрацрвеном делу спектра. Резултати везани за плазмонске зонске процепе у кристалима са полупроводничким штапићима имаће примену за реализацију терахерцних модулятора, прекидача и сензора. Резултати везани за плазмонске кристале на бази графенских трака омогућиће реализацију инфрацрвених сензора танких диелектричних филмова као и молекуларних филмовима са вибрационим модовима.

Параметри коришћених материјала су у складу са експерименталним подацима, док су геометрије анализираних структура оствариве тренутно доступним методама фабрикације. Нумеричке симулације су рађене тако да веродостојно представе експеримент што се пре свега односи на постављање одговарајућих граничних услова. Стога се сви резултати у дисертацији могу експериментално верификовати коришћењем реалних материјала.

Оцена способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане докторске дисертације Комисија процењује да је кандидат Борислав Васић, дипл. инж. електротехнике, способан за самостални научни рад што је доказано и чињеницом да постоји већи број научних радова у којима се појављује као први аутор.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији Борислава Васића су остварени следећи научни доприноси:

- дизајн конфинираних електромагнетских структура на бази трансформационе оптике и метода за њихову реализацију слојевитим диелектричним структурама тј. једнодимензионалним градираним плазмонским кристалима,
- метода за реализацију оптичких уређаја са нехомогеним индексом преламања помоћу дводимензионалних градираних фотонских кристала,
- метода за дизајн и реализацију подесивих оптичких уређаја са нехомогеним индексом преламања помоћу дводимензионалних градираних плазмонских кристала са полупроводничким штапићима,
- метода за дизајн терахерцних модулятора на бази дводимензионалних плазмонских кристала са полупроводничким штапићима,
- показано је да су плазмонски фотонски зонски процепи робустни на неуређеност кристала,
- метода за дизајн инфрацрвених сензора на бази графенских трака,
- метода за генерисање локалног напрезања у графену врхом микроскопа на бази атомских сила.

Кратка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и добијених резултата, констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из обрађиване проблематике. Развијене методе представљају значајан научни и стручни допринос у области Наноелектронике и фотоники.

Очекивана примена резултата у пракси

Добијени резултати ће своју потенцијалну примену наћи у развоју интегрисаних оптичких компоненти за вођење светлости, инфрацрвених сензора диелектричне околине, терахерцних модулятора и прекидача као и нових наноелектронских компоненти на бази графена.

Верификовани научни доприноси

Кандидат Борислав Васић је до сада као први аутор објавио шест радова у врхунским међународним научним часописима са SCI листе [M21], два у водећим међународним часописима [M22] и један у међународним часописима [M23]. Још један рад је недавно послат у врхунски међународни научни часопис са SCI листе (Nanotechnology). Борислав Васић је као коаутор објавио још један рад у врхунском међународном научном часопису са SCI листе [M21], два у водећим међународним часописима [M22] и један у међународним часописима [M23]. Ужој области научне дисертације припадају следећи радови:

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Coordinate transformation based design of confined metamaterial structures", *Phys. Rev. B* **79**, 085103 (2009).
Impakt faktor: 3.691, ISSN: 1098-0121
2. **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime", *Opt. Express* **18**, 20333 (2010).
Impakt faktor: 3.587, EISSN: 1094-4087
3. **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).
Impakt faktor: 2.168, ISSN: 0021-8979
4. **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).
Impakt faktor: 2.185, ISSN: 0740-3224
5. **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).
Impakt faktor: 2.544, ISSN: 0022-3727
6. **B. Vasić** and R. Gajić, "Plasmonic photonic bandgaps robust to disorder in two-dimensional plasmonic crystals", *J. Opt. Soc. Am. B* **29**, 2964, (2012).
Impakt faktor: 2.185, ISSN: 0740-3224

Радови у водећим међународним часописима (M22):

1. **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).
Impakt faktor: 1.204, ISSN: 0031-8949
2. **B. Vasić**, R. Gajić, and K. Hingerl, "Graded photonic crystals for implementation of gradient refractive index media", *J. Nanophotonics* **5**, 051806 (2011).
Impakt faktor: 1.570, E-ISSN: 1934-2608

Радови у међународним часописима (M23):

1. **B. Vasić**, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Confined metamaterial structures based on coordinate transformations", *Acta Phys. Pol. A*, Vol. **116**, No. 1, 96 (2009).
Impakt faktor: 0.444, ISSN: 0587-4246

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Борислава Васића под насловом „**Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала**” представља оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање проблема дизајнирања фотонских и плазмонских кристала у применама за вођење, прекидање и модулацију светлости, и у сензорима. Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирана проблематика веома актуелна и савремена са аспекта научног и стручног доприноса, верификована објављивањем у више релевантних часописа са SCI листе, а и податак да су најважнији резултати добијени самосталним радом, Комисија констатује да је кандидат Борислав Васић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду, те са задовољством, предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да овај Извештај прихвати и у складу са законском процедуром, упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

У Београду,
29. 9. 2012. године

Комисија:

др Јелена Радовановић, ванредни професор
(Електротехнички факултет Универзитета у Београду)

др Радош Гајић, научни саветник
(Институт за физику, Универзитет у Београду)

др Витомир Милановић, редовни професор
(Електротехнички факултет Универзитета у Београду)

др Милан Тадић, редовни професор
(Електротехнички факултет Универзитета у Београду)