

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Данке Стојановић за израду докторске дисертације

Одлуком 5023/12-1 бр. од 9.11.2016 године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Данке Стојановић за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **"Простирање електромагнетних таласа кроз хиралне метаматеријале у терахерцном фреквентном опсегу"** (енг. **"Propagation of electromagnetic waves through chiral metamaterials in the terahertz frequency range"**).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Данка Стојановић је рођена 22.10.1987. године у Београду, Република Србија. Основну школу и гимназију је завршила у Београду. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2006. године, а дипломирала је маја 2011. године на смеру за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику. Експериментални део дипломског рада "Синтеза и карактеризација графенских филмова" урадила је у оквиру ИАЕСТЕ праксе на Универзитету Дуизбург-Есен. Исте године је уписала мастер студије на Електротехничком факултету у Београду на смеру Наноелектроника и фотоника. Завршила их је јула 2012. године одбравивши мастер радом под насловом "Анализа и карактеризација Раманових спектра графена". Експерименте у вези са мастер радом је радила на Институту за физику у Београду. У новембру 2012. године је уписала докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Наноелектроника и фотоника. Од децембра исте године је запослена као истраживач приправник у Институту за нуклеарне науке "Винча" у Лабораторији за атомску физику, где је 2013. године унапређена у звање истраживач сарадник.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Преглед положених испита

1. Електричне и оптичке карактеристике материјала у наноелектроници и фотоници (оцена: 10, ЕПС: 9)
2. Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара (оцена: 10, ЕПС: 9)
3. Моделовање наноструктура (оцена: 10, ЕПС: 9)

4. Простирање оптичких таласа у комплексним срединама (оцена: 10, ЕПС: 9)
5. Оптиелектронске мерне методе (оцена: 10, ЕПС: 9)
6. Оптичке особине полупроводничких наноструктура (оцена: 10, ЕПС: 9)
7. Квантна оптика (оцена: 10, ЕПС: 9)
8. Фотонски кристали и оптички метаматеријали (оцена: 10, ЕПС: 9)
9. Физика, технологија и карактеризација биоматеријала (оцена: 10, ЕПС: 9)
10. Иновације, трансфер технологије и заштита интелектуалне својине (оцена: 10, ЕПС: 6)

Кандидаткиња је и успешно одбранила тему докторске дисертације под насловом "Простирање електромагнетних таласа кроз хиралне метаматеријале у терахерцном фреквентном опсегу", дана 14.11.2016, пред Комисијом за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу:

1. Др Јелена Радовановић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду
2. Др Петра Беличев, научни сарадник, Институт за нуклеарне науке Винча
3. Др Милан Илић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду
4. Др Витомир Милановић, професор емеритус.

Учешће на пројектима

По завршетку мастер студија, Данка Стојановић се запослила у Институту за нуклеарне науке "Винча" у оквиру пројекта *Функционални, функционализовани и усавршени наноматеријали, Министарство просвете, науке и технологије Републике Србије, ИИИ 45005*.

У оквиру тог пројекта стекла је знање о аналитичким и нумеричким методама за решавање проблема простирања таласа кроз хиралне метаматеријале. Поред тога, бавила се и различитим методама синтезе само-уређених колоидних структура као и њиховом карактеризацијом. У циљу едукације и усавршавања на ту тему, добила је стипендију Италијанског министарства спољних послова за посету Институту за фотонику и нанотехнологије у Тренту (мај и новембар 2015. године).

Списак радова

Радови у врхунским међународним часописима (M_{21}):

1. D. B. Stojanović, J. Radovanović, V. Milanović, "Time delay in a terahertz chiral metamaterial slab", Phys. Rev. A, Vol 94, No 2, 2016, pp. 023848 (7) (DOI: 10.1103/PhysRevA.00.003800, IF: 2.765, ISSN: 2469-9926).

Радови у истакнутим међународним часописима (M_{22}):

2. D. Stojanović, N. Woehrl, V. Buck, "Synthesis and characterization of graphene films by Hot Filament CVD", Phys. Scr., Vol 2012, No T149, 2012, pp. 014068(3) (DOI: 10.1088/0031-8949/2012/T149/014068, IF:1.194, ISSN: 1402-4896).
3. D. Stojanović, A. Matković, S. Aškračić, U. Ralević, A. Beltaos, Dj. Jovanović, D. Bajuk-Bogdanović, I. Holclajtner-Antunović, R. Gajić, "Raman spectroscopy of

graphene: doping and mapping", Phys. Scr., Vol 2013, No T157, 2013, pp. 014010(4) (DOI: 10.1088/0031-8949/2013/T157/014010, IF:1.194, ISSN: 1402-4896).

4. D. B. Stojanović, J. Radovanović, V. Milanović, "*Influence of geometry of terahertz chiral metamaterial on transmission group delay*", Opt. Quant. Electron., Vol 48, No 4, 2016, pp.272(6) (DOI: 10.1007/s11082-016-0533-y, IF: 1.290, ISSN: 0306-8919).

Рад у часопису националног значаја (M₅₂):

5. D. Stojanović, J. Radovanović, V. Milanović, Z. Rakočević, "*Ellipsometric data analysis and calculation of ellipsometric parameters of complex materials*", Tehnika, Vol 69, No 2, 2014, pp. 185-189 (DOI: 10.5937/tehnika1402185S, ISSN: 0040-2176).

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

6. G. Bratina, M. Chikkara, E. Pavlica, A. Matković, A. Beltaos, Đ. Jovanović, D. Stojanović, R. Gajić, "*Initial stages of growth of pentacene on graphene*", Bulletin of the American Physical Society, APS March Meeting 2013, Vol 58, No 1, Baltimore 2013.
7. D. Stojanović, A. Chiappini, G. Korićanac, M. Nenadović, M. Ferrari, Z. Rakočević, "*Assessment of structural and optical properties of self-assembled photonic structures*", Photonica 2015-Book of abstracts, Beograd 2015, pp. 189 (ISBN: 978-86-7306-131-3).

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

8. Đ. Jovanović, A. Matković, A. Beltaos, D. Stojanović, R. Gajić, "*Ramanova spektroskopija temperaturno indukovanog naprezanja u jednoslojnom grafenu prekrivenog poli(metil metakrilatom)*", Zbornik apstrakata - Radionica Fotonike, Kopaonik 2013, str. 33.
9. M. Milićević, A. Matković, D. Stojanović, A. Beltaos, G. Isić, R. Gajić, "*Infracrvena spektroskopija jednoslojnog i višeslojnog grafena*", Zbornik apstrakata- Radionica Fotonike, Kopaonik 2013, str. 24.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидаткиња поседује одговарајући ниво знања и искуства из области фотонице, а познаје и аналитичке и нумеричке методе потребне за реализацију задатака и решавање проблема у вези са израдом докторске дисертације. Поред тога, кандидаткиња поседује самосталност у истраживању и брзо и ефикасно усваја нова знања. Кандидаткиња је предложила веома актуелну тему која обухвата испитивање хиралних метаматеријала за уређаје примењиве у терахерцној фреквентној области. На основу свега изложеног и досадашњих резултата, наша је процена да је кандидаткиња у стању да успешно реализује и заврши израду докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предложена дисертација ће се бавити простирањем електромагнетних (ЕМ) таласа кроз метаматеријале, који представљају посебну врсту вештачки направљених структура чије се особине не могу срести у природи. Ти материјали се обично састоје од периодично распоређених резонантних металних елемената, при чему сваки од њих представља мало електрично коло са расподелом напона и струја аналогно ситуацији у конвенционалним електричним колима. Флексибилност у дизајнирању омогућава геометријску скалабилност, а тиме и подесивост радног фреквенцијског опсега, што је од посебног значаја за технолошки релевантан терахерцни (THz) фреквенцијски опсег. У поређењу са конвенционалним материјалима, интеракција са THz зрачењем је у случају метаматеријала појачана, што омогућава израду уређаја који раде у овом опсегу а неопходни су за бројне примене: од имиџинга и спектроскопије, па до мерења различитих параметара релевантних за биомедицинска истраживања и дијагностику. Посебна класа метаматеријала који су тема овог истраживања су хирални метаматеријали који поседују неуобичајене оптичке карактеристике погодне за контролу поларизације светлости, што је од великог значаја за рад активних компоненти у THz опсегу. Хирални медијум је објекат који се не може поклопити са својим ликом у огледалу при било којој операцији ротације или трансације и постоји у два облика – објекат и његов лик у огледалу – који се називају енантиомери. У зависности од типа енантиомера од кога је структура састављена разликује се интеракција ЕМ таласа десне и леве кружне поларизације. Услед тога долази до појаве циркуларног дихроизма и оптичке активности и до неколико редова величине већих у односу на одговарајуће ефекте у природним материјалима.

Предмет истраживања ове дисертације биће испитивање ефеката који се јављају као последица простирања ЕМ таласа кроз хиралне метаматеријале различитих геометрија. Први од испитиваних ефеката биће времена кашњења (групна кашњења и времена задржавања) ЕМ таласа кроз структуре базиране на Ω -металним елементима смештеним у диелектрику. Други део истраживања укључиваће моделовање и дизајн хиралних метаматеријала чији основни елемент представља метална жица у облику осмице која се добија увртањем металног прстена на једну страну, док се хирални пар добија увртањем прстена на супротну страну. Због поменуте геометрије, овај елемент у облику броја 8 можемо назвати резонатор са уврнутим прстеном (*Twisted Ring Resonator* – TRR). Нагласак истраживања биће на испитивању карактеристика леве и десне кружно поларизоване светлости приликом интеракције упадног снопа са хиралним метаматеријалом, с обзиром на чињеницу да хирални метаматеријали индукују велике промене у поларизацији трансмитованог и рефлектованог таласа.

Циљ ове дисертације биће одређивање оптималних параметара за постизање максималне оптичке активности и циркуларног дихроизма посматраних структура, чији је основни градивни блок Ω -метални елемент или резонатор са уврнутим прстеном. Анализираће се структуре које ће омогућити највећу разлику у временима кашњења за леву и десну кружно поларизовану светлост у THz опсегу учестаности. Додатно, утврдиће се оправданост коришћења ефективних параметара за опис предложених хиралних структура на основу поређења резултата времена кашњења добијених на основу нумеричких симулација и помоћу апроксимације ефективног медијума (*Effective Medium Approximation* - ЕМА). У случају структура састављених од резонатора са уврнутим прстеном, кренуће се од приступа еквивалентног кола да би се добили нови изрази за конститутивне параметре за апроксимацију оваквих структура. Након тога ће се извршити целокупна анализа интеракције ЕМ таласа са периодичном структуром састављеном од уврнутих прстенова у циљу испитивања резонантних ефеката који ће бити релевантни за примене у THz опсегу.

Релевантни библиографски извори

У овом истраживању, кандидаткиња ће користити релевантне библиографске изворе везане за простирање електромагнетних таласа кроз хиралне метаматеријале од којих је неколико најбитнијих наведено у наставку:

1. I. V. Lindell, A. H. Shivola, S. A. Tretyakov, A. J. Viitenen, *Electromagnetic Wave in Chiral and Bi-isotropic Media*, Artech House, Boston, 1994.
2. B. Ferguston, X-C. Zhang, *Metamaterials for terahertz science and technology*, Nat. Mater., Vol 1, No 1, 2002, pp. 26-33.
3. N. Engheta, *Circuits with light at nanoscales: optical nanocircuits inspired by metamaterials*, Science, Vol 317, No 5845, 2007, pp. 1698-1702.
4. L. D. Barron, *Molecular Light Scattering and Optical Activity*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
5. R. Zhao, T. Koschny, C. Soukoulis, *Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate*, Opt. Express, Vol 18, No 14, 2010, pp. 14553-67.
6. H. G. Winful, *Tunneling time, the Hartman effect, and superluminality: A proposed resolution of an old paradox*, Phys. Rep., Vol 436, No 1, 2006, pp. 1-68.
7. S.S. Oh, O. Hess, *Chiral metamaterials: enhancement and control of optical activity and circular dichroism*, Nano Convergence, Vol 2, No 1, 2015, pp. 1-14.
8. P.-G. Luan, Y.-T. Wang, S. Zhang, X. Zhang, *Electromagnetic energy density in a single-resonance chiral metamaterial*, Opt. Lett., Vol 36, No 5, 2011, pp. 675-677.
9. J. Gansel et al, *Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer*, Science, Vol 325, No 5947, 2009, pp. 1513-5.
10. R. Marques, F. Medina, R. Ruffi-El-Idrissi, *Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials*, Phys. Rev B, Vol 65, No 14, 2002, pp. 144440.
11. X. Cheng, H. Chen, L. Ran, B.-I. Wu, T. M. Grzegorzcyk, J. A. Kong, *Negative refraction and cross polarization effects in metamaterial realized with bianisotropic S-ring resonator*, Phys. Rev B, Vol 76, No 2, 2007, pp. 024402.
12. G. Kenanakis, R. Zhao, N. Katsarakis, M. Kafesaki, C. M. Soukoulis, E. N. Economou, *Optically controllable THz chiral metamaterials*, Opt. Express, Vol 22, No 10, 2014, pp. 12149-12159.
13. T. Kan et al, *Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals*, Nat. Commun., Vol 6, 2015, pp. 8422.
14. G. Kenanakis, E. N. Economou, C. M. Soukoulis, M. Kafesaki, *Controlling THz and far-IR waves with chiral and bianisotropic metamaterials*, EPJ Appl. Metamat., Vol 2, 2015, pp. 1-12.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе за испитивање интеракције ЕМ таласа са хиралним метаматеријалима у THz опсегу су:

- да би се добили јаки хирални ефекти тј. оптичка активност и циркуларни дихроизам неопходно је постојање резонантних елемената у структурама (у овом случају су у питању структуре које се састоје од Ω -елемената или резонатори са уврнутим прстеном) који имају одређени међусобни просторни распоред;
- метални елементи који се налазе у јединичној ћелији хиралног метаматеријала представљају мала електрична кола и на основу тога се постижу резонантне карактеристике при интеракцији са ЕМ таласима;
- у зависности од геометрије и димензија металних елемената и материјала од кога су направљени може се подешавати радни опсег фреквенција (на овај начин се може постићи функционалност у THz фреквентном опсегу);
- испитивања времена кашњења у хиралним метаматеријалима могу бити корисна за будуће примене за уређаје у THz фреквентном опсегу.

4. Научне методе истраживања

Методе истраживања у оквиру предложене дисертације састојаће се од следећих корака:

- нумеричке симулације интеракције ЕМ таласа са хиралним структурама, које се састоје од Ω -елемента или резонатора са уврнутим прстеном, биће рађене методом коначних елемената у фреквентном домену у софтверу COMSOL Multiphysics;
- аналитичко одређивање простирања ЕМ таласа у хомогеним хиралним структурама ће бити урађено коришћењем ЕМА и применом трансфер-матричне методе;
- ефективни параметри ће бити добијени на основу Nicholson-Ross-Weir методе (коришћењем параметара расејања добијених у нумеричким симулацијама) и биће фитовани помоћу Lorentz-ове формуле;
- за аналитичко одређивање параметара хомогене хиралне структуре која представља апроксимацију структуре која се састоји од резонатора са уврнутим прстеном користиће се приступ еквивалентног електричног кола.
- за извођење израза за групно кашњење ће се користити апроксимација стационарне фазе, а за извођење времена задржавања електродинимички приступ;
- сви прорачуни времена кашњења и простирања ЕМ поља ће бити извршени коришћењем аналитичких извођења за хомогене хиралне медијуме и применом ЕМА у програму Matlab.

5. Очекивани научни допринос

Основни научни доприноси који се очекују од предложеног истраживања су:

- утврдиће се утицај различитих геометријских параметара структуре, избора метала и диелектрика на простирање кружно поларисаних таласа кроз хиралну структуру и одредиће се параметри којима ће се постићи вредности оптичке активности, циркуларног дихроизма и разлике у временима кашњења кружно поларисаних таласа на резонантним фреквенцијама, адекватне за будуће примене за уређаје у THz опсегу;
- добијање нових аналитичких израза за времена задржавања за случај хомогеног хиралног метаматеријала: ови изрази су базирани на извођењу енергије у случају модела са губицима које је знатно сложеније од случаја када губитака нема;

- поређењем времена кашњења добијених на основу нумеричких симулација и помоћу аналитичких израза коришћењем ЕМА утврдиће се оправданост коришћења ЕМА у случају хиралног метаматеријала који се састоји од Ω -елемената;
- биће представљена нова геометрија хиралних елемената – резонатори са уврнутим прстеном - чије ће карактеристике бити први пут испитиване; очекује се постизање израженијих ефеката циркуларног дихроизма и оптичке активности на резонантним фреквенцијама, као и других феномена битних за примене у THz опсегу;
- помоћу приступа еквивалентног електричног кола извешће се аналитички изрази за ефективне параметере за анизотропни хомогени хирални медијум којима ће бити апроксимирана структура састављена од резонатора са уврнутим прстеном.

6. План истраживања и структура рада

У првој фази истраживања ће бити рађене нумеричке симулације за случај хиралних метаматеријала који се састоје од металних Ω -елемента уроњених у диелектрик. Првобитно ће бити испитиван утицај промене геометрије елемената, варирањем различитих параметара и њиховог међусобног распореда, на циркуларни дихроизам и оптичку активност. Утврдиће се промена групног кашњења лево и десно циркуларно поларисаног таласа са малим варијацијама геометрије Ω -елемента. Из нумеричких симулација ће бити добијени параметри расејања, густина енергије, као и времена задржавања. Параметри расејања ће даље бити коришћени за добијање ефективних параметара помоћу Nicholson-Ross-Weir методе и они ће бити примењени за прорачун густине енергије и времена кашњења за случај хомогеног хиралног медијума. Да би се добили аналитички изрази за густину енергије, а потом и времена задржавања за случај хомогеног хиралног метаматеријала, потребно је одредити везу између електричне поларизације и магнетизације, што ће бити урађено коришћењем електродинимичког приступа. На крају ће бити упоређени резултати времена кашњења добијених помоћу аналитичких израза применом ЕМА и времена добијених из нумеричких симулација.

У другој фази ће бити по први пут испитивана геометрија хиралних метаматеријала који се састоје од резонатора са уврнутим прстеном. Прво ће се радити анализа ових металних елемената приступом еквивалентног електричног кола, при чему ће се одређивати аналитичке формуле за конститутивне параметре ове структуре. Нумеричке симулације ће се извршавати у програмском пакету COMSOL Multiphysics, при чему ће се за модел користити поменута геометрија структуре која ће бити скалирана, а врста метала ће бити одабрана тако да се добије хирални метаматеријал функционалан у THz опсегу. Вршиће се испитивања простирања ЕМ таласа кроз структуру, као и у случају Ω -елемента, при чему ће се испитати и ефекти који настају приликом промене упадног угла ЕМ таласа, као што су појава дифракције, плазмонских резонанција и екситације површинских таласа.

Планирана структура рада ће се састојати од уводног дела о хиралним метаматеријалима и њиховој примени у THz фреквентном опсегу. Поред тога, биће приказане хиралне структуре које ће бити испитиване, а састоје се од резонатора са уврнутим прстеном и од Ω -елемената. Затим ће бити објашњене нумеричке и аналитичке методе којима ће бити прорачунати коефицијенти расејања, расподела електричних и магнетних поља и времена кашњења електромагнетних таласа кроз хиралне метаматеријале који се састоје од поменутих резонантних елемената. У наредном делу ће бити приказани резултати времена кашњења добијени нумеричким и аналитичким методама и биће анализирани разлике између њих. Такође, биће представљена промена ефеката хиралности и групних кашњења са променом геометрије резонантног елементa. У финалном делу ће бити изведени општи закључци и биће анализирани даљи правци истраживања у овој области.

7. Закључак и предлог

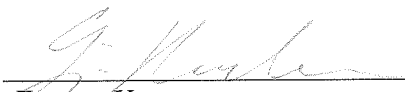
На основу приложене документације, као и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Данке Стојановић, **мастер инжењера електротехнике**, Комисија је закључила следеће:

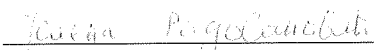
1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за одобрење теме за израду докторске дисертације;

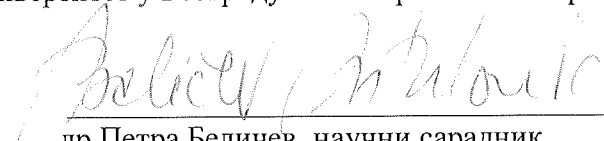
2. Предложена тема **"Простирање електромагнетних таласа кроз хиралне метаматеријале у терахерцном фреквентном опсегу "** је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације биће значајан и оригиналан допринос овој области. Због тога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Данки Стојановић одобри израду докторске дисертације под наведеним називом, а под менторством др Љупча Хациевског, научног саветника Института за нуклеарне науке "Винча" у Београду.

Београд, 16. новембар 2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Љупчо Хациевски, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча


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


др Петра Беличев, научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча


др Милан Илић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Витомир Милановић, професор емеритус
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет