

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 737. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 11. 10. 2011. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације Борислава Васића, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом "Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала". На основу увида у приложени материјал, Наставно-научном већу подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. 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.

Списак објављених радова:

1. 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).
2. B. Vasić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Graded photonic crystals for implementation of gradient refractive index media", J. Nanophotonics **5**, 051806 (2011).
3. B. Vasić, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime", Opt. Express **18**, 20321 (2010).
4. B. Vasić, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Coordinate transformation based design of confined metamaterial structures", Phys. Rev. B **79**, 085103 (2009).
5. 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).
6. B. Vasić, G. Isić, R. Gajić, and K. Hingerl, "Confined metamaterial structures based on coordinate transformations", Acta Phys. Pol. A, Vol. **116**, 96, (2009).

2. Предмет и циљ истраживања

Фотонски кристали су вештачки електромагнетски медијуми добијени периодичним понављањем јединичних ћелија које садрже само диелектричне елементе. Плазмонски кристали су металодиелектрични фотонски кристали што значи да јединичне ћелије садрже и металне и диелектричне елементе. Рад фотонских и плазмонских кристала у режиму метаматеријала подразумева њихов рад у режиму ефективног медијума при чему таласна дужина не мора да буде далеко већа од димензија јединичних ћелија већ је довољно да буде свега неколико пута већа. То омогућава њихову фабрикацију постојећим методама. Фотонски и плазмонски кристали се у овом режиму могу описати ефективним параметрима, у разматраном случају, ефективном диелектричном пермитивношћу. Ове структуре ће бити употребљене за имплементацију средина са градираним индексом преламања и медијума са фотонским зонским процепима.

Средине са градираним индексом преламања ће бити дизајниране методом трансформационе оптике, методом конформних пресликавања или ће бити коришћени стандардни медијуми са градираним индексом преламања дизајнирани помоћу једначине ајконала. Њихова имплементација је заснована на једнодимензионалним и дводимензионалним градираним фотонским кристалима који се састоје од просторно променљивих јединичних ћелија, паралелних слојева променљивих дебљина и штапића променљивих полупречника, респективно. Основна идеја реализације је да се просторна промена индекса преламања реализује просторном променом геометрије јединичних ћелија.

Коришћењем дводимензионалних градираних плазмонских кристала са полупроводничким штапићима променљивих полупречника, биће реализоване подесиве и активне структуре са градираним индексом преламања на терахерцним учестаностима. Основна идеја реализације је да се променом концентрације електрона у полупроводничким штапићима мења Друдеовски део њихове пермитивности. Уз просторну промену геометрије штапића, могуће је реализовати подесиве и активне структуре са градираним индексом преламања.

Медијуми са фотонским зонским процепима ће бити реализовани плазмонским кристалима са металним штапићима. Фотонски зонски процепи се јављају као последица апсорпције и рефлексије у околини плазмонских резонанција у штапићима када је електрично поље нормално на њих или услед негативне ефективне пермитивности када је електрично поље паралелно штапићима. Додатно, коришћењем полупроводничких штапића или полупроводничке основне фазе плазмонских кристала, могуће је реализовати активне плазмонске кристале са подесивим фотонским зонским процепима.

Током целокупног истраживања, посебна пажња ће бити посвећена избору самих материјала за реализацију фотонских структура. Циљ је пре свега изабрати материјале са минималним губицима где диелектрици имају велику предност. Међутим, у реализацији индекса преламања мањег од један, реализацији фотонских зонских процепа на бази плазмонских резонанција и реализацији активних плазмонских кристала, неопходно је користити материјале са Друдеовом дисперзијом, тј. метале и/или полупроводнике.

Коришћење нових материјала као што је графен ће такође бити разматрано у циљу реализације фотонских структура – плазмонских кристала и метаматеријала. Графенски плазмонски кристали се састоје од паралелних трака графена на супстрату. Резонанције у кристалу су последица Фабри-Пероових резонанција површинских плазмона који су конфинирани у тракама графена.

Осврт на релевантне библиографске изворе

Теме проучаване у овој дисертацији, трансформациона оптика, градирани фотонски кристали, плазмонски кристали и активна фотонске компоненте, су данас веома актуелне о чему говори и опсежна литература:

Трансформациона оптика и трансформациона оптика конформним пресликавањима:

1. T. J. Cui, D. R. Smith, and R. Liu, "Metamaterials: Theory, Design, and Applications", Springer (2010)
2. J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling Electromagnetic Fields", Science **312**, 1780–1782 (2006).
3. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", Science **314**, 977–980 (2006).
4. W. Cai, U. K. Chettiar, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, "Optical cloaking with metamaterials", Nat. Photonics **1**, 224–227 (2007).
5. U. Leonhardt, "Optical Conformal Mapping", Science **312**, 1777–1780 (2006).
6. J. Li and J. B. Pendry, "Hiding under the carpet: A new strategy for cloaking", Phys. Rev. Lett. **101**, 203901 (2008).
7. J. Valentine, J. Li, T. Zentgraf, G. Bartal, and X. Zhang, "An optical cloak made of dielectrics", Nat. Mater. **8**, 569–571 (2009).

Фотонски кристали у режиму ефективног медијума:

1. A. Sihvola, "Electromagnetic mixing formulas and applications", The Institution of Electrical Engineers, (1999).
2. S. Datta, C. T. Chan, K. M. Ho, and C. M. Soukoulis, "Effective dielectric constant of periodic composite structures", Phys. Rev. B **48**, 14936–14943 (1993).
3. P. Halevi, A. A. Krokhin, and J. Arriaga, "Photonic Crystal Optics and Homogenization of 2D Periodic Composites", Phys. Rev. Lett. **82**, 719–722 (1999).
4. P. Halevi, A. A. Krokhin, and J. Arriaga, " Photonic crystals as optical components", Appl. Phys. Lett. **75**, 2725–2727 (1999).

Плазмонски кристали:

1. U. Kreibig and M. Vollmer, "Optical Properties of Metal Clusters", Springer (1995).
2. V. Yannopapas, A. Modinos, and N. Stefanou, "Optical properties of metallodielectric photonic crystals", Phys. Rev. B **60**, 5359 (1999).
3. J. M. Pitarke, J. E. Inglesfield, and N. Giannakis, "Surface-plasmon polaritons in a lattice of metal cylinders", Phys. Rev. B **75**, 165415 (2007).
4. E. Lidorikis, S. Egusa, and J. D. Joannopoulos, "Effective medium properties and photonic crystal superstructures of metallic nanoparticle arrays", J. Appl. Phys. **101**, 054304 (2007).
5. C.-p. Huang, X.-g. Yin, Q.-j. Wang, H. Huang, and Y.-y. Zhu, "Long-wavelength optical properties of a plasmonic crystal", Phys. Rev. Lett. **104**, 016402 (2010).
6. J. Leon and T. Taliercio, "Large tunable photonic band gaps in nanostructured doped semiconductors", Phys. Rev. B **82**, 195301 (2010).
7. T. V. Teperik, F. J. Garcia de Abajo, V. V. Popov, and M. S. Shur, "Strong terahertz absorption bands in a scaled plasmonic crystal", Appl. Phys. Lett. **90**, 251910 (2007).

Градирани фотонски кристали:

1. Y. Jiao, S. Fan, and D. A. B. Miller, "Designing for beam propagation in periodic and nonperiodic photonic nanostructures: Extended Hamiltonian method", Phys. Rev. E **70**, 036612 (2004).
2. E. Centeno, D. Cassagne, and J.-P. Albert, "Mirage and superbending effect in two-dimensional graded photonic crystals", Phys. Rev. B **73**, 235119 (2006).
3. H. Kurt and D. S. Citrin, "Graded index photonic crystals", Opt. Express **15**, 1240–1253 (2007).
4. U. Levy, M. Abashin, K. Ikeda, A. Krishnamoorthy, J. Cunningham, and Y. Fainman, "Inhomogeneous dielectric metamaterials with space-variant polarizability", Phys. Rev. Lett. **98**, 243901 (2007).

Подесиви и активни фотонски/плазмонски кристали и метаматеријали:

1. J.-M. Liu, "Photonic Devices", Cambridge University Press (2005).
2. A. Figotin, Y. A. Godin, and I. Vitebsky, "Two-dimensional tunable photonic crystals", Phys. Rev. B **57**, 2841 (1998).
3. S. W. Leonard, H. M. van Driel, J. Schilling, and R. B. Wehrspohn, "Ultrafast band edge tuning of a two-dimensional silicon photonic crystal via free-carrier injection", Phys. Rev. B **66**, 161102 (2002).
4. P. Halevi and F. Ramos-Mendieta, "Tunable photonic crystals with semiconducting constituents", Phys. Rev. Lett. **85**, 1875 (2000).
5. C.-S. Kee and H. Lim, "Tunable complete photonic band gaps of two-dimensional photonic crystals with intrinsic semiconductor rods", Phys. Rev. B **64**, 121103 (2001).
6. H.-T. Chen, J. F. O'Hara, A. K. Azad, A. J. Taylor, R. D. Averitt, D. B. Shrenkenhamer, and W. J. Padilla, "Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials", Nat. Photon. **2**, 295 (2008).
7. N.-H. Shen, M. Massaouti, M. Gokkavas, J.-M. Manceau, E. Ozbay, M. Kafesaki, T. Koschny, S. Tzortzakis, and C. M. Soukoulis, "Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime", Phys. Rev. Lett. **106**, 037403 (2011).

Површински плазмони у структурисаном графену:

1. A. Vakil and N. Engheta, "Transformation Optics Using Graphene", Science **332**, 1291 (2011).
2. F. H. L. Koppens, D. E. Chang, and F. J. G. De Abajo, "Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light-Matter Interactions", Nano Lett. **11**, 3370 (2011).
3. L. Ju, B. Geng, J. Horng, C. Girit, M. Martin, Z. Hao, H. A. Bechtel, X. Liang, A. Zettl, Y. Y. Shen, and F. Wang, "Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials", Nat. Nanotech. **6**, 630 (2011).

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе за реализацију фотонских структура у овој дисертацији су следеће:

- оптичка средина са нехомогеним индексом преламања се може реализовати просторном променом геометрије јединичних ћелија, дебљине слојева и полупречника штапића,
- оптичка средина са анизотропном диелектричном пермитивношћу се може реализовати једнодимензионалним фотонским кристалом који се у режиму метаматеријала може посматрати као униаксијални диелектрик,
- фотонски зонски процеп се може реализовати помоћу металних наноструктура у околини њихових плазмонских резонанција као резултат изражене рефлексије и/или апсорпције упадног електромагнетског поља,
- активне фотонске компоненте се могу реализовати модулацијом диелектричне пермитивности полупроводничких штапића или полупроводничке основне фазе у плазмонским кристалима.

4. Научне методе истраживања

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

- преглед постојећих резултата у области фотонских и плазмонских кристала,
- аналитичке методе координатних трансформација и конформних пресликавања за дизајн конфинираних електромагнетских структура,
- аналитичка Максвел-Гарнет теорија ефективног медијума за опис фотонских и плазмонских кристала,

- на основу аналитичких теорија биће одређени геометријски и материјални параметри јединичних ћелија структура:
 - дебљине и диелектричне пермитивности слојева код једнодимензионалних фотонских и плазмонских кристала,
 - полупречници и диелектричне пермитивности штапића код дводимензионалних фотонских и плазмонских кристала,
- за нумеричке прорачуне фотонских и плазмонских кристала и проверу тачности аналитичких теорија, биће коришћени софтвер COMSOL Multiphysics на бази методе коначних елемената (енг. Finite Element Method - FEM), а за прорачуне рефлексије и трансмисије периодичних структура, биће коришћен софтвер RETICOLO базиран на методи ригорозне анализе спрегнутих таласа (енг. Rigorous Coupled Wave Analysis - RCWA).

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси ове докторске дисертације обухватају:

- методе за дизајн конфинираних електромагнетских структура (електромагнетска кривина) на бази координатних трансформација и конформних пресликавања и њихову реализацију слојевитим диелектричним структурама тј. градираним једнодимензионалним фотонским кристалима,
- методе за реализацију оптичких структура са нехомогеним индексом преламања (Лунебургово сочиво, Максвелово рибље око (енг. Maxwell fisheye), електромагнетска кривина, самофокусирајући медијум, антена за усмерено зрачење, плашт невидљивости за један правац) помоћу дводимензионалних градираних фотонских кристала,
- методе за дизајн подесивих структура са нехомогеним индексом преламања (сочиво са подесивим фокусом, антена са подесивим углом скретања електромагнетских поља, Лунебургово сочиво и половина Максвеловог рибљег ока као антена са подесивим пољем зрачења) и њихову реализацију помоћу дводимензионалних градираних плазмонских кристала са полупроводничким штапићима,
- методе за дизајн дводимензионалних плазмонских кристала са фотонским зонским процепима који су аналитички предвидиви, робустни на неуређеност структуре, апсолутни, тј. за све углове инциденције у равни симетрије плазмонских кристала, вишеструки у случају више-компонентних плазмонских кристала и подесиви у случају коришћења полупроводничких елемената,
- методе за дизајн различитих подесивих филтара, модулатора и прекидача на бази подесивих плазмонских кристала.

6. План истраживања и структура рада

У првом делу рада биће дате теоријске основе трансформационе оптике и биће изведени изрази за параметре анизотропног трансформационог медијума. Изложена теорија ће бити примењена за дизајн електромагнетске кривине са идеалним и редукованим параметрима. Затим ће електромагнетска кривина са редукованим параметрима бити реализована градираним једнодимензионалним фотонским кристалом.

У другом делу рада биће дате теоријске основе трансформационе оптике на бази конформних пресликавања и дизајна оптичких компоненти помоћу једначине ајконала. Применом обе методе дизајнирају се оптичке компоненте са изотропним индексом преламања. Изложена теорија ће бити примењена за дизајн електромагнетске кривине (трансформациона оптика на бази конформних пресликавања) и Лунебурговог и самофокусирајућег сочива (једначина ајконала). Електромагнетска кривина, Лунебургово и самофокусирајуће сочиво ће затим бити реализовани дводимензионалним градираним фотонским кристалима.

У трећем делу рада биће приказан метод за дизајн подесивих електромагнетских структура са градираним индексом преламања. У основи метода су градирани плазмонски кристали са

полупроводничким штапићима променљивих полупречника. Изложена теорија ће бити примењена за реализацију сочива са подесивим фокусом, антена са подесивим углом скретања електромагнетских поља, Лунебурговог сочива и половине Максвеловог рибљег ока као антена са подесивим пољем зрачења.

У четвртом делу рада биће проучени дводимензионални плазмонски кристали са фотонским зонским процепима. Плазмонски кристали ће бити описани аналитичком Максвел-Гарнет теоријом ефективног медијума која ће затим бити упоређена са резултатима нумеричких прорачуна. Основне особине плазмонских кристала које ће бити проучаване су следеће: робустност на неуређеност структуре (неуређеност просторне позиције штапића и неуређеност полупречника штапића), постојање омнидирекционог и комплетног фотонског зонског процепа, подесивост фотонског зонског процепа и вишеструки фотонски зонски процепи у вишекомпонентним плазмонским кристалима.

У петом делу рада биће проучени плазмонски кристали на бази структурисаног графена. Коришћењем нумеричких прорачуна и аналитичког модела на бази Фабри-Пероових резонанција, биће објашњене резонанције у овим плазмонским кристалима и њихова употреба као подесивих метаматеријала.

7. Закључак и предлог

На основу свега изложеног, Комисија сматра да кандидат Борислав Васић, дипломирани инжењер електротехнике, испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. Резултати до којих ће кандидат доћи, имаће значајан допринос у области фотонских и плазмонских кристала. Стога Комисија предлаже Научно-наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Бориславу Васићу одобри израду дисертације под насловом "Моделовање градираних фотонских и плазмонских кристала који раде у режиму метаматеријала".

У Београду, 31. 10. 2011.

Чланови комисије

др Јелена Радовановић, ванредни професор

др Радош Гајић, научни саветник (ИФ)

др Витомир Милановић, редовни професор

др Слободан Вуковић, научни саветник (ИФ)