

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Сабине Рамовић.

Одлуком 771. седнице Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржане 25. 02. 2014. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње маг. инж. електр. и рачунар. Сабине Рамовић под насловом

Реализација нових метаматеријала на бази квантних каскадних ласера у врло јаком магнетном пољу.

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

Кандидаткиња је тему под насловом „**Реализација нових метаматеријала на бази квантних каскадних ласера у врло јаком магнетном пољу**” пријавила 30.08.2012. Научно-веће Електротехничког факултета у Београду је на седници одржаној 04.09.2012. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Витомир Милановић, ред. проф (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др. Јелена Радовановић, ванр. проф (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Љупчо Хациевски, научни саветник (Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча”), др Милан Тадић, ред. проф. (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет) и др Јован Радуновић, ред. проф (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет). Извештај Комисије је усвојен на Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду

25.09.2012.године, а 22.10.2012. године од стране Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду (одлуком бр. 06-20782/44). На седници Комисије за трећи степен студија одржаној 20.2.2014. године, констатовано је да је кандидаткиња Сабина Рамовић, маг. инж. електр. и рачунар. предала урађену дисертацију, па је на основу увида у дисертацију и пратећих докумената, а у складу с 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 дисертације. Комисија за трећи степен студија је предложила Наставно-научном већу Електротехничког факултета Комисију за преглед и оцену у саставу: др Витомир Милановић, професор емеритус (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Јелена Радовановић, ванр. проф. (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет) и др Љупчо Хаџиевски, научни саветник (Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча“). На 771. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 25.02.2014. године, прихваћен је предлог Комисије за трећи степен студија, тим да је Комисија проширена са др Јованом Радуновићем, ред. проф (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет) и др Дејаном Раковићем ред. проф (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет).

1.2. Научна област дисертације

Дисертација припада научној области наноелектронике, а у ужем домену предмет дисертације су полупроводничке наноструктуре на бази квантних јама. Ментор дисертације је др Витомир Милановић, професор емеритус.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидаткиња Сабина Рамовић је рођена 26.05.1985. године у Београду, где је завршила основну школу и гимназију. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2004. године на којем је и дипломирала 2008. године, са просечном оценом 9,20 (оцена дипломског рада 10), на Одсеку за Физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника. Исте године је уписала дипломске академске-мастер студије на Групи за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, које је завршила одбраном мастер рада „Дизајн метаматеријала на бази квантно каскадног ласера у врло јаком магнетном пољу“ 2010. године са просечном оценом 10. Докторске студије на Електротехничком факултету уписала је 2010. године. Од 01.08.2010. године ангажована је на пројекту Министарства за науку Србије „Наноструктуре и наномпоненте у физичкој електроници“ бр.141006 (пројекат припада групи основних истраживања – Физика) и запослена је на Електротехничком факултету у Београду као истраживач-приправник, а од 01. 01. 2011. је ангажована на пројекту Министарства за просвету и науку „Фотоника микро и нано структурних материјала“ бр.ИИИ45010 (пројекат припада групи интегралних и

интердисциплинарних истраживања). У Институту за нуклеарне науке „Винча“ 04.03.2011 стиче звање истраживач-сарадник.

У ужој области тезе Сабина Рамовић је била аутор или коаутор четири рада у међународним часописима (са импакт фактором) и то једног рада у категорији M21, два рада у категорији M22 и једног рада у категорији M23. Такође је аутор или коаутор три рада презентована на међународним конференцијама и три рада презентована на домаћим конференцијама.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 188 страна куцаног текста латиничним писмом и садржи 54 слике и 105 библиографских референци. Садржи насловну страну, захвалницу, кратак резиме рада на српском и енглеском језику, садржај, 7 глава, списак коришћене литературе и 2 додатка. Поглавља су насловљена: 1. Увод, 2. Метаматеријали, 3. Полупроводнички метаматеријали, 4. Квантни каскадни ласери, 5. Одређивање компоненти тензора диелектричне пермитивности квантног каскадног ласера, 6. Нумерички резултати и 7. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У оквиру уводног поглавља дат је преглед основних појмова везаних за метаматеријале. Објашњена је мотивација за анализу ових структура, као и разлог великог интересовања шире научне заједнице за проучавање таквих вештачких материјала и њихових особина. Укратко је описана идеја дизајнирања полупроводничког метаматеријала и објашњена улога квантних каскадних ласера у томе. У кратким цртама су описане квантне структуре које су разматране, принцип њиховог функционисања и улога врло јаког спољашњег магнетног поља. У овом поглављу су, такође, изнети предмет дисертације, циљ истраживања, као и структура дисертације.

Друго поглавље је посвећено метаматеријалима. Дат је кратак историјски преглед науке о метаматеријалима. Изложена је општа структура и дат је преглед различитих категорија метаматеријала и њихових карактеристика.

Треће поглавље је посвећено посебној категорији метаматеријала, а то су немагнетни, полупроводнички метаматеријали. У првом делу овог поглавља дат је увид у особине ових материјала и детаљно је размотрен пролаз светлости кроз анизотропну средину. Такође, представљена је идеја дизајна таквог чисто полупроводничког метаматеријала која одговара структури квантног каскадног ласера. Други део овог поглавља је посвећен детаљном приказу одређивања индекса преламања са посебним освртом на одређивање знака реалног дела, односно услова при којима анизотропни материјал има позитиван/негативан реални део индекса преламања, као и услова „деснорукости/леворукости“.

На почетку четвртог поглавља дат је преглед основних појмова везаних за квантне каскадне ласере и укратко је описан њихов развој. Описан је принцип функционисања ових направа које представљају изворе кохерентног зрачења велике снаге, а покривају средњи инфрацрвени и терахерцни део оптичког спектра. Даље, акценат је стављен и на одређивање електронске структуре квантног каскадног ласера у јаком магнетном пољу. Објашњена је структура и начин решавања система брзинских једначина, које у овом случају представљају систем нелинеарних (квадратних) једначина. Детаљно су изведени израз за брзину расејања електрона на лонгитудиналним оптичким фононима, који представљају доминантни механизам расејања у средњој инфрацрвеној области, и израз за расејање на неравнинама, које је од значаја у прорачунима везаним за терахерцну структуру. На крају је приказано извођење израза за индекс преламања квантног каскадног ласера.

Одређивање електронске структуре (распоред енергетских нивоа и њихова популација) омогућило је израчунавање нормалне компоненте диелектричне пермитивности, кључне величине за одређивање знака реалног дела индекса преламања, па је у петом поглављу посвећена пажња детаљном извођењу, односно одређивању компоненти тензора диелектричне пермитивности квантног каскадног ласера.

У шестом поглављу су приказани нумерички резултати уз одговарајућу дискусију. На примеру AlGaAs квантног каскадног ласера показано је да је могуће дизајнирати метаматеријал на бази немагнетних (тачније неметалних) метаматеријала и да се променама јачине магнетног поља, које делује на метаматеријал, може вршити подешавање знака и интензитета нормалне компоненте диелектричне пермитивности. Поред тога анализиран је и утицај допираности, температуре и јачине магнетног поља на величину опсега таласних дужина, при којима метаматеријал има негативни реални део индекса преламања. Ова анализа је спроведена на структури која емитује зрачење у средњем инфрацрвеном делу спектра и на терахерцним квантним каскадним ласерима.

Осмо поглавље, односно закључак, садржи издвојене главне доприносе дисертације. Анализиране су могућности примене добијених резултата и изложене идеје везане за будуће прорачуне у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Ова дисертација припада атрактивној области наноелектронике, која се бави електронским, транспортним и оптичким особинама квантних полупроводничких наноструктура. У ужем смислу дисертација се бави метаматеријалима дизајнираним тако да обезбеђују реализацију унапред задатих карактеристика које се не могу наћи код природних материјала. Предмет овог истраживања је анализа анизотропног, немагнетног (прецизније неметалног) метаматеријала који у

одређеним опсезима таласних дужина (средњи инфрацрвени и терахерцни део спектра) има позитиван/негативан реални део индекса преламања. Ова анализа је спроведена на теоријском нивоу полазећи од Максвелових једначина. Анизотропни материјал може се реализовати на више начина, а један је путем активних полупроводничких наноструктура. У овој докторској дисертацији одабран је квантни каскадни ласер као наноструктура која се последњих двадесет година налази на самом фронту, како теоријских, тако и експерименталних истраживања у области наноелектронике. Квантни каскадни ласер је анализиран у присуству нормалног магнетног поља, чиме спектар електронских конфигурација добија на својој разноврсности. Нумеричка израчунавања на AlGaAs квантном каскадном ласеру су показала да квантни каскадни ласер, са експериментално могућим параметрима, може да се ефикасно користи као метаматеријал са негативним/позитивним реалним делом индекса преламања у одређеним опсезима фреквенција/таласних дужина. Пошто се конфигурација енергијских нивоа, а тиме и насељеност нивоа, мењају променама интензитета магнетног поља, што за последицу има и мењање опсег фреквенција на којима метаматеријал показује негативно/позитивно преламање, идеја је користити ту зависност, те променама магнетног поља контролисати режим рада метаматеријала (пребацити из активног у пасивни режим и обрнуто) и вршити фино померање и мењање опсега фреквенција. Како је истраживање у овој проблематици модерно и актуелно, а теоријска анализа урађена детаљно, сматрамо да дисертација кандидаткиње Сабине Рамовић задовољава све прописане стандарде у вези израде докторске дисертације. Резултати које је кандидаткиња добила током рада на дисертацији приказани су на високом научном нивоу и представљају вредан допринос у разматраној области отварајући простор за даља истраживања.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература која је коришћена у раду је пажљиво одабрана. Она на сасвим адекватан начин покрива посматрану област и садржи бројне радове везане за проблематику дисертације - од класичних референци до најновијих радова релевантних за дисертацију. У наведеним референцама се налазе и научни радови чији је коаутор кандидаткиња Сабина Рамовић.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији „**Релативизација нових метаматеријала на бази квантних каскадних ласера у врло јаком магнетном пољу**“ унапређени су и развијени нови модели и примењене одговарајуће нумеричке методе за добијање потребних резултата.

Аналитички приступ се састоји од детаљне анализе услова при којима анизотропни метаматеријал има негативан, односно позитиван реални део индекса преламања, а који прате одговарајућа извођења. Урађена је анализа квантног каскадног ласера као активног метаматеријала, одређене су компоненте тензора диелектричне пермитивности ласера и формиран је детаљни теоријски

модел за одређивање нормалне компоненте пропустљивости који се заснива на пуном систему нелинеарних брзинских једначина које описују расподелу електрона по нивоима структуре. Такође, изведени су одговарајући изрази за брзину релаксације носилаца услед расејања на лонгитудиналним оптичким фононима и на неравнинама спојева, са посебним нагласком на случај када је на структуру, у смеру њеног раста, примењено магнетно поље.

Нумерички део истраживања обухвата коришћење нумеричких метода и писање одговарајућих програмских кодова за решавање нелинеарног система брзинских једначина, као и Шредингерове једначине за квантни каскадни ласер у магнетном пољу (коришћен је непараболични модел за дисперзиону зависност материјала који чине квантно каскадни ласер). Код свих анализираних структура нумерички је одређивана зависност нормалне компоненте диелектричне пермитивности од примењеног магнетног поља, за различите параметре структуре, а у ту сврху решаван је потпун систем нелинеарних брзинских једначина. Програмски пакет коришћен за све прорачуне је MATLAB.

3.4. Применљивост остварених резултата

Одређени су услови при којима анизотропни метаматеријал има позитивни/негативни реални део индекса преламања, и урађена је теоријска и нумеричка анализа могућности (експериментално реализабилног) AlGaAs квантног каскадног ласера као метаматеријала који има жељену вредност индекса преламања у одређеним областима таласних дужина.

Теоријски модел, извођења и услови за постизање режима негативног преламања који су развијени у дисертацији, могу се применити и на друге комбинације полупроводничких материјала, што отвара могућности даљег развоја полупроводничких метаматеријала који за постизање истог ефекта не би захтевали јака магнетна поља или примену спољашњег поља. Такође, везано за терахерцне структуре, ова разматрања могу помоћи да се премосте проблеми рада на собним температурама.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане дисертације Комисија процењује да је кандидаткиња Сабина Рамовић, маг. инж. електр. и рачун., у потпуности способна за самостални научни рад, што је доказано и чињеницом да је објавила низ научних радова у којима се појављује као први аутор. Кандидаткиња је приликом израде дисертације показала систематичност у раду, истрајност у решавању насталих проблема и иницијативу за овладавање новим научним сазнањима и методама.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси који су остварени у оквиру ове докторске дисертације су следећи:

- На основу детаљног проучавања литературе, дат је преглед развоја метаматеријала и основних идеја за дизајн таквих структура како би оне на одређени начин интераговале са електромагнетним таласима обезбеђујући унапред задате карактеристике.
- Представљен је модел неметалног метаматеријала који се састоји од полупроводничких квантних структура субмикронских димензија чији распоред одговара структури квантног каскадног ласера.
- Детаљно и прецизно су изведени услови при којима метаматеријал има негативан реални део индекса преламања.
- Анализиран је квантни каскадни ласер у јаком магнетном пољу као анизотропна структура, и испитан је утицај карактеристика квантног каскадног ласера на нормалну компоненту диелектричне пермитивности.
- Изведени су одговарајући изрази за брзине релаксације електрона при прелазу између подзона активне области услед интеракција са лонгитудиналним оптичким фононима и расејања на неравнинама спојева, при утицају јаког спољашњег магнетног поља.
- Одређене су компоненте тензора пермитивности квантног каскадног ласера.
- Формиран је комплетан теоријски модел за одређивање нормалне компоненте диелектричне пермитивности који се заснива на пуном систему нелинеарних брзинских једначина које описују расподелу електрона по нивоима структуре.
- На бројним нумеричким примерима је приказано да се променом јачине магнетног поља, нивоа допираности и температуре, знак и интензитет реалног дела нормалне компоненте диелектричне пермитивности може подешавати у прилично широком опсегу.
- Остварени резултати су објављени у реномираним међународним часописима и презентовани на међународним и домаћим конференцијама.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата констатујемо да је кандидаткиња успешно одговорила на сва битна питања која суштински произилазе из обрађене проблематике. Систематичан и

детаљан приказ прорачуна спроведених за решавање брзинских једначина, одређивање распореда Ландауових нивоа и њихове насељености и одређивање негативне/позитивне вредности нормалне компоненте диелектричне пермитивности, анализа њихове зависности од јачине примењеног магнетног поља, као и анализа зависности реалног дела нормалне компоненте диелектричне пермитивности и од нивоа допираности и температуре, представља значајан научни допринос у области квантних наноструктура, што је верификовано објављивањем резултата истраживања у престижним часописима са SCI листе.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидаткиња Сабина Рамовић је до сада објавила један рад у врхунском међународном научном часопису са SCI листе [M21], два рада у водећим међународним часописима [M22], један у међународном часопису [M23], један рад на међународној конференцији штампан у целини [M33] и два у зборницима апстраката са међународних конференција [M34], а објавила је и један рад на домаћој конференцији штампан у целини [M63] и два на домаћим конференцијама објављена у форми апстракта [M64].

Категорија M21:

1. **Ramović S.**, Radovanović J., Milanović V., Tunable semiconductor metamaterials based on quantum cascade laser, *-Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 12, pp. 123704(1-5), 2011 (**IF=2.168**) (ISSN= 0021-8979).

Категорија M22:

1. Milanović V., Radovanović J., **Ramović S.**, Influence of nonparabolicity on boundary conditions in semiconductor quantum wells, *-Physics Letters A*, vol. 373, no. 34, pp. 3071-3074, 2009 (**IF=2.009**) (ISSN= 0375-9601).
2. Radovanović J., **Ramović S.**, Dančić A., Milanović V., Negative refraction in semiconductor metamaterials based on quantum cascade laser design for the mid-IR and THz spectral range, *-Applied Physics A*, vol. 109, no. 4, pp. 763-768, 2012 (**IF=1.545**) (ISSN= 0947-8396).

Категорија M23:

1. **Ramović S.**, Radovanović J., Milanović V., Mid-infrared semiconductor metamaterials utilizing intersubband transitions in quantum cascade laser structure, *-Physica Scripta*, vol. T149, pp. 014049-1-014049-3, 2012 (**IF=1.032**) (ISSN= 0031-8949).

Категорија M33:

1. Radovanović J., Timotijević D., **Ramović S.**, Milanović V., Modeling of optical gain in quantum cascade laser subjected to strong magnetic field, *-The Proceedings of 5th*

European Conference on Circuits and Systems for Communications, ECCSC'10, pp.302-305, 2010.

Категорија М34:

1. **Ramović S.**, Radovanović J., Milanović V., Metamaterials based on quantum cascade laser structures in strong magnetic field, *Second International Conference on Physics of Optical Materials and Devices, ICOM2009, Book of Abstracts, Herceg Novi, p.57, 2009.*
2. Radovanović J., **Ramović S.**, Milanović V., Ikonić Z., Indjin D., Advanced dispersion engineering for metamaterial applications by using quantum cascade laser in strong magnetic field, *International Quantum Cascade Lasers School & Workshop, IQCLSW 2010, Florence, 2010.*

Категорија М63:

1. **Ramović S.**, Milanović V., Radovanović J., Egzaktno određivanje granicnih uslova za talasne funkcije u poluprovodnickim, kvantnim nanostrukturama, *54. Konferencija ETRAN-a, Zbornik apstrakata, p. MO3.2., 2010.*

Категорија М64:

1. **Ramović**, Radovanović J., Milanović V., Mogucnost podešavanja karakteristika metamaterijala na bazi kvantnih kaskadnih lasera putem jakog magnetnog polja, *Konferencija Fotonika 2010 – teorija i eksperiment u Srbiji, Zbornik apstrakata, st. 45, 2010.*
2. **Ramović S.**, Radovanović J., Daničić A., Milanović V., Poluprovodnički metamaterijali na bazi kvantnih kaskadnih lasera u jakom magnetnom polju, *Peta Radionica Fotonike 2012, Zbornik apstrakata, st.35, 2012.*

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација кандидаткиње Сабине Рамовић, под насловом „**Реализација нових метаматеријала на бази квантних каскадних ласера у врло јаком магнетном пољу**“ представља савремен и оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање проблема подешавања вредности ефективних параметара ових медијума, а пре свега реалног дела нормалне компоненте диелектричне пермитивности и могућности његове модулације путем врло јаког спољашњег магнетног поља. Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирана проблематика веома актуелна и савремена с 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 кандидаткиња Сабина Рамовић испунила 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 Реферат 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.

ЧЛАНОВИ КОМИСЈЕ


Београд, 3. март 2014




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



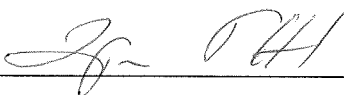
др Јелена Радовановић., ванредни професор
(Универзитет у Београду – Електротехнички факултет)



др Љупчо Хациевски., научни саветник
(Универзитет у Београду – Институт .за нуклеарне науке,„Винча“)



др Јован Радуновић. редовни професор
(Универзитет у Београду – Електротехнички факултет)



др Дејан Раковић. редовни професор
(Универзитет у Београду – Електротехнички факултет)