

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Извештај Комисије о урађеној докторској дисертацији кандидата Игора Илића, маг. инж. електр. и рачунар.

На 741. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду од 27.12.2011. године, одређени смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Игора Илића, маг. инж. електр. и рачунар., под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**”. Након прегледа урађене докторске дисертације, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

Наслов и обим дисертације

Докторска дисертација Игора Илића, маг. инж. електр. и рачунар., под називом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**”, је написана на 125 страна латиничним писмом и састоји се од пет поглавља, 53 слике и 124 библиографске референце.

Хронологија одобравања и израде дисертације

На седници Комисије за трећи степен студија Електротехничког факултета одржаној 12.04.2011. године констатовано је да је Игор Илић пријавио докторску дисертацију под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**”, 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 Витомир Милановић, ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду), др Љупчо Хациевски, научни саветник (Институт за нуклеарне науке „Винча“). За ментора дисертације предложена је др Јелена Радовановић, ванр. проф. На 731. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 19.4.2011. 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 са два члана и то са др Милутином Степићем, научни сарадник (Институт за нуклеарне науке „Винча“) и др Јованом Радуновићем, ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду), а замењен је и редослед чланова, тако да је за другог члана Комисије за оцену услова и прихватање теме изабран др Љупчо Хациевски, научни саветник, а за трећег члана др Витомир Милановић, ред. проф. На основу извештаја Комисије за оцену услова и прихватање теме и пратеће документације докторске дисертације „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**” предложена тема је усвојена на 732. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 24.05.2011. године, а

6.6.2011. године од стране Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду.

На седници Комисије за трећи степен студија одржаној 14.12.2011. године констатовано је да је кандидат Игор Илић, магистар инжењерства и рачунарске технике, 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 Љупчо Хациевски, научни саветник (Институт за нуклеарне науке „Винча“), др Витомир Милановић, ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду). На 741. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 27.12.2011. године, прихваћен је предлог Комисије за трећи степен студија, с тим што је Комисија за преглед и оцену урађене докторске дисертације проширена са два члана, и то са др Јованом Петровић, научни сарадник (Институт за нуклеарне науке „Винча“) и др Јованом Радуновићем, ред. проф. (Електротехнички факултет у Београду).

Место докторске дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**“ покрива научну област Наноелектроника и фотоника, а у ужем домену научно је актуелна у области електромагнетног тунеловања и метаматеријала.

Биографски подаци о кандидату

Кандидат Игор Илић је рођен 11.11.1984. године у Београду. Основну и средњу школу завршио је у Београду. Након завршене средње школе уписао је Електротехнички факултет Универзитета у Београду 2003. године, где је дипломирао 2007. године на Одсеку за Физичку електронику са просечном оценом 9.02 одбраном дипломског рада са темом "Карактеристична времена при тунеловању у метаматеријалима". Исте године уписао је дипломске академске (мастер) студије на Групи за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, које је завршио 2008. године са просечном оценом 10,00 одбраном мастер рада са темом "Одређивање времена тунеловања у дисперзивним и апсорпционим фотонским хетероструктурама".

Од 2008. године запослен је као истраживач приправник у Институту за нуклеарне науке "Винча", у Лабораторији за атомску физику, где је 2009. године унапређен у звање истраживача сарадника. У својој научној каријери Игор Илић је до сада објавио шест радова у врхунским међународним научним часописима са SCI листе [M21], један у водећим међународним часописима [M22], два у међународним часописима [M23] и три у зборницима апстраката и радова са међународних конференција [M33], а један рад [M22] је недавно прихваћен за објављивање у часопису Physica Scripta.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**” поред садржаја, литературе и додатака има пет поглавља и то: 1. Увод, 2. Тунеловање у нелинеарним дисперзивним апсорптивним срединама, 3. Утицај Гус-Хенкеновог помераја на времена тунеловања, 4. Карактеристике тунеловања у анизотропним материјалима и 5. Закључак.

Кратак приказ појединачних поглавља

Увод је подељен на три дела. У првом се дефинише појам квантног тунеловања, затим појам електромагнетног тунеловања и уводи се аналогија између ова два феномена. У другом делу се дефинишу времена тунеловања: време задржавања, групно кашњење и време самоинтерференције. Овде је извршена анализа модела времена тунеловања познатих у литератури и њихових ограничења у циљу формирања комплетнијег модела који би омогућио урачунавање апсорпције, анизотропије, нелинеарности и дисперзије и Гус-Хенкеновог помераја при израчунавању различито дефинисаних времена тунеловања. Последњи део Увода посвећен је дефинисању и опису различитих типова метаматеријала са негативним индексом преламања.

У другом поглављу се детаљно испитује феномен тунеловања раванских електромагнетских таласа у дисперзивној средини унутар које се налази оптички ређа баријера. Описан је разматрани модел који обухвата баријеру састављену од апсорптивног нелинеарног дисперзивног материјала за који су, затим, изведене одговарајуће Хелмхолцове једначине за ТЕ и ТМ модове. Ради израчунавања времена тунеловања, потребно је знати изразе за средњу енергију унутар баријере и упадну снагу зрачења на баријеру. Израз за средњу електромагнетну енергију је изведен помоћу методе густине енергије (ED – *energy density method*), а затим је, преко упадног Поинтинговог вектора, изведен израз и за упадну снагу на баријеру. Како је време задржавања једнако количнику ове две величине, након ових извођења приказан је и израз за израчунавање ове величине, а даље у овом поглављу је изведен и израз који повезује различите дефиниције времена тунеловања: време задржавања, групно кашњење и време самоинтерференције преко кашњења повезаних са губицима, нелинеарношћу и површинским ефектима. На крају другог поглавља приказани су нумерички резултати за неколико различитих типова баријере: линеарну дисперзивну апсорптивну баријеру, затим нелинеарну недисперзивну неапсорптивну баријеру, као и за нелинеарну дисперзивну апсорптивну баријеру. У овом делу је, између осталог, показана директна пропорционалност између времена задржавања и апсорпције у баријери, затим постојање Хартмановог ефекта, као и могућност постојања негативног групног кашњења у фреквентним опсезима у којима баријера исказује негативан реални део индекса преламања.

Треће поглавље дисертације посвећено је утицају Гус-Хенкеновог помераја на времена тунеловања. У првом делу овог поглавља дефинисан је Гус Хенкенов померај, а дате су и његове главне особине. Затим је описан разматрани модел који је идентичан оном који је

коришћен у другом поглављу, али уз урачунавање Гус-Хенкеновог помераја. Даље се аналитички изводе изрази за релативни допринос овог ефекта на величине карактеристичне за тунеловање, док се у последњем делу поглавља приказују нумерички резултати утицаја Гус-Хенкеновог помераја на времена тунеловања у којима је показано да овај померај може повећати времена тунеловања и до 100% у фреквентним опсезима у којима баријеру карактерише позитиван индекс преламања, а приказане су и могућности за његово минимизирање у фреквентним опсезима у којима је реални део индекса преламања баријере негативан.

Четврто поглавље се састоји из два дела. У првом делу су дати дефиниција и опис полупроводничких метаматеријала, а приказан је и дизајн новог типа ове врсте материјала, базиран на различито допираним слојевима InGaAs. Показано је, нумеричким симулацијама и изведеним аналитичким изразима, да овај полупроводнички метаматеријал, захваљујући својим анизотропним својствима, може имати негативан индекс преламања у широком опсегу фреквенција у инфрацрвеном домену. Други део овог поглавља бави се извођењем израза за времена тунеловања у полупроводничким метаматеријалима помоћу методе еквивалентног кола (EC – *equivalent circuit method*), као и нумеричким прорачунима њихових вредности на постојећем полупроводничком метаматеријалу.

У Закључку су наведени главни доприноси дисертације и анализиране могућности за примену и даљи правци истраживања у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Савременост, оригиналност и значај

Проблематика дисертације се односи на изузетно актуелне области електромагнетног тунеловања и развоја метаматеријала са негативним индексом преламања. Тренутни тренд испитивања различитих ефеката при електромагнетном тунеловању и дизајнирања нових метаматеријала који би омогућили развој нових оптичких система чини дисертацију под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**” изузетно савременом. Значај теме се огледа у прорачуну времена тунеловања у дисперзивним, апсорптивним, нелинеарним и анизотропним срединама, што омогућава моделовање електромагнетног тунеловања у највећем броју постојећих оптичких материјала. Такође, развој полупроводничког метаматеријала на бази различито допираних слојева InGaAs може довести до једноставне и јефтине производње оптичких компоненти са негативним реалним делом индекса преламања. Значај дисертације проистиче из савремености и актуелности третиране проблематике, као и чињеница да, према доступној научној литератури, нико није третирао наведене проблеме на начин на који је то урађено у дисертацији Игора Илића; другим речима, приступ проблематици и добијени резултати су потпуно оригинални.

Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у раду је пажљиво одабрана. Она садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, али садржи и класичне радове. У наведеним референцама се налази и већи број научних радова чији је коаутор Игор Илић.

Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

У дисертацији под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**” примењене су различите теоријске, математичке и нумеричке методе за добијање потребних резултата. Теоријски су разматране различите структуре, те су за њих, коришћењем бројних математичких метода, изведени изрази за времена тунеловања у: (1) нелинеарним дисперзивним анизотропним структурама, (2) линеарним анизотропним структурама (полупроводничким метаматеријалима), а прорачунат је и утицај Гус-Хенкеновог помераја на ова времена. Времена тунеловања за различите, постојеће, структуре су израчунате коришћењем нумеричке методе под називом метода погађања (*shooting method*), која је одговарајућа за ову проблематику. Такође, теоријски је разматрана пропација електромагнетног зрачења у анизотропним структурама састављеним од наизменично постављених слојева два различита полупроводника, те је, на основу ове анализе, дизајниран полупроводнички метаматеријал састављен од наизменично постављених слојева различито допираних InGaAs. Могућност негативног преламања у овим материјалима потврђена је применом FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) нумеричке методе, која омогућава симулацију реалног простирања електромагнетног зрачења кроз различите структуре. Наведени приступ, односно научни метод, примењен у дисертацији у потпуности одговара проблему и постављеном циљу дисертације, а свакако је и најадекватнији у том смислу.

Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Резултати приказани у тези, везани за времена тунеловања, имаће примену, са даљим смањивањем димензија интегрисаних оптичких компоненти, при конструкцији свеоптичких система, пре свега у смислу узимања у обзир приказаних ефеката ради предупређивања потенцијалних проблема насталих као последица електромагнетног тунеловања. Развој полупроводничких метаматеријала на бази широко распрострањеног полупроводника InGaAs има потенцијалну примену у производњи оптичких компоненти са негативним индексом преламања, због својих предности као што су једноставна фабрикација, ниска цена и мали губици.

Оцена способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане докторске дисертације Комисија процењује да је кандидат Игор Илић, маг. инж. електр. и рачун., у потпуности 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 Игора Илића су остварени следећи научни доприноси:

- Изведени су изрази за време задржавања и веза између времена задржавања и групног кашњења у случају електромагнетног тунеловања кроз нелинеарну дисперзивну апсорптивну баријеру.
- Изведени су изрази за израчунавање утицаја Гус-Хенкеновог помераја на групно кашњење.
- Изведен је израз за време задржавања, као и релација која повезује време задржавања и групно кашњење у случају електромагнетног тунеловања кроз линеарну дисперзивну анизотропну средину (полупроводнички метаматеријал).
- Развијена је нумеричка метода, базирана на методи погађања, која омогућава израчунавање горе наведених времена и утицаја Гус-Хенкеновог помераја за различите структуре.
- Дизајниран је полупроводнички метаматеријал састављен од наизменично постављених слојева различито допираних $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, који показује могућности добијања негативног реалног дела индекса преламања у инфрацрвеном домену фреквенција.
- Изведен је израз за ефективни индекс преламања апсорптивног полупроводничког метаматеријала.
- Конструисана је нумеричка метода базирана на FDTD техници, која омогућава симулирање простирања електромагнетног зрачења кроз полупроводничке метаматеријале.

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. Развијени теоријски, математички и нумерички алгоритми представљају значајан научни и стручни допринос у области Наноелектронике и фотонице.

Очекивана примена резултата у пракси

Добијени резултати ће своју потенцијалну примену наћи у развоју интегрисаних оптичких компоненти и, генерално, оптичких система микро и нано димензија, коришћених у различитим оптичким и фиброоптичким сензорима, као и у будућој производњи оптичких рачунара.

Верификовани научни доприноси

Кандидат Игор Илић је до сада објавио шест радова у врхунским међународним научним часописима са SCI листе [M21], један у водећим међународним часописима [M22], два у међународним часописима [M23] и три у зборницима апстраката и радова са међународних конференција [M33], један рад [M22] је недавно прихваћен у часопису Physica Scripta, а објавио је и шест радова на домаћим конференцијама. Ужој области научне дисертације припадају следећи радови:

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. I. Ilić, P.P. Beličev, V. Milanović, and J. Radovanović, *Analysis of tunneling times in absorptive and dispersive media*, Journal of Optical Society of America B, vol. 25, 1800-1804 (2008), IF: 2,181.
2. P.P. Beličev, I. Ilić, V. Milanović, J. Radovanović, and Lj. Hadžievski, *Tunneling times in metamaterials with saturable nonlinearity*, Physical Review A, vol. 80, 023821-7 (2009), IF: 2,908.
3. I. Ilić, P.P. Beličev, V. Milanović, J. Radovanović and Lj. Hadžievski, *Goos-Hänchen shift and time delay in dispersive nonlinear media*, Physics Letters A, vol. 375, 1357-1361 (2011), IF: 2,009.
4. J. Radovanović, I. Ilić, P. P. Beličev, Lj. Hadžievski and V. Milanović, *On tunneling times in dispersive and nonlinear metamaterials*, Journal of Nanophotonics, vol. 5, 051802(9) (2011), IF: 1,899.

Радови у водећим међународним часописима (M22):

1. I. Ilić, P.P. Beličev, V. Milanović, and J. Radovanović, *Modeling of dwell time and group delay in dispersive and absorptive media*, Physica Scripta, T135, 014040-4 (2009), IF: 1,088.
2. I. Ilić, P. P. Beličev and V. Milanović, *Modelling of tunneling times in anisotropic nonmagnetic metamaterials*, Physica Scripta, прихваћен за објављивање (2012), IF: 0,985

Радови у међународним часописима (M23):

1. P.P. Beličev, I. Ilić, J. Radovanović, V. Milanović, and Lj. Hadžievski, *Time delay in thin dielectric slabs with saturable nonlinearity*, Acta Physica Polonica A, vol. 115, 834-837 (2009), IF: 0,433.
2. I. Ilić, P.P. Beličev, V. Milanović, J. Radovanović, and Lj. Hadžievski, *Influence of the Goos-Hänchen shift on tunneling times in dispersive nonlinear media*, Acta Physica Polonica A, vol. 116, 638-641 (2009), IF: 0,433.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Игора Илића, под насловом „**Тунеловање електромагнетских таласа кроз комплексне оптичке средине**” представља савремен и

оригиналан научни допринос кроз свеобухватно сагледавање проблема израчунавања времена тунеловања у нелинеарним, дисперзивним, апсорптивним и анизотропним срединама, као и дизајнирања полупроводничког метаматеријала базираног на различито допираним слојевима InGaAs. 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 Игор Илић 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,
9.1.2012. године

Комисија:

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

др Љупчо Хациевски, научни саветник
(Институт за нуклеарне науке “Винча”)

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

др Јована Петровић, научни сарадник
(Институт за нуклеарне науке “Винча”)

др Јован Радуновић, редовни професор
(Електротехнички факултет Универзитета у Београду)