

Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду

Предмет: Извештај Комисије о урађеној докторској дисертацији мр Јоване Петровић

На 746. Седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 24.04.2012. године, одређени смо за чланове *Комисије за преглед и оцену докторске дисертације* мр Јоване Петровић под насловом *“Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе”*. Ментор докторске дисертације је др Петар Матавуљ, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Након прегледа достављеног материјала подносимо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Наслов и обим дисертације

Наслов докторске дисертације је *“Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе”*. Дисертација је написана на 115 страна, садржи 6 поглавља са 23 слике и 3 табеле, списак коришћене литературе (154 библиографске референце), 2 прилога и списак скраћеница и ознака.

1.2 Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је тему под насловом *“Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе”* пријавио 14.02.2011. Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је 08.03.2011. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: проф. др Петар Матавуљ, проф. др Сандра Живановић (Louisiana Tech University, USA), проф. др. Јован Радуновић и проф. др Милан Тадић. Извештај Комисије је усвојен на Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду 29.03.2011. године, а Веће области техничких наука Универзитета у Београду дало је на то сагласност 09.05.2011. године (број одлуке 06-5642/16-11).

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцену 29.03.2012. године, а Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је 24.04.2012. године именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Петар Матавуљ, проф. др Сандра Живановић (Louisiana Tech University, USA), проф. др. Јован Радуновић, проф. др Јован Елазар и проф. др Милан Тадић.

1.3 Место дисертације у одговарајућој научној области

Дисертација припада научној области Оптоелектроника, а у ужем домену научно је актуелна у области полимерске оптоелектронике.

1.4 Биографски подаци о кандидату

Јована Петровић је рођена је 18. августа 1978. године у Београду. Основну школу и гимназију завршила је у Београду. Електротехнички факултет у Београду уписала је 1997. године. На основу постигнутог успеха за време студија у септембру 2002. године добила је једнократну стипендију норвешке владе. Дипломирала је у фебруару 2003. године на Смеру за оптоелектронику и ласерску технику са просечном оценом 9,30. По завршетку студија постала је стипендиста Министарства за науку Србије. У јулу 2003. године изабрана је у звање асистента-приправника на Катедри за микроелектронику и техничку физику Електротехничког факултета у Београду. Магистарски рад под насловом "Моделовање фотодетектора на бази проводних полимера" (ментор: Проф. др Петар Матавуљ) одбранила је у децембру 2007. године. Унапређена је у звање асистента у јуну 2008. године.

У току рада на Електротехничком факултету била је ангажована на предметима Физика 1, Физика 2, СИ Физика, Лабораторијске вежбе из физике 1, Физичка електроника чврстог тела, Оптоелектроника и Физичко техничка мерења. Учествовала је у 5 пројеката Министарства за науку и технолошки развој Србије.

Током своје досадашње каријере Јована Петровић је била аутор 4 рада у часописима од међународног значаја (са *impact* фактором) и то 2 рада у категорији M21 (ИФ: 2,173 и 1,889) и 2 рада у категорији M23 (ИФ: 0,433 и 0,117). Такође, аутор је или коаутор 2 рада у часописима од националног значаја, 3 рада на међународним конференцијама и 2 рада на домаћим конференцијама. Сви радови су уско повезани са темом докторске дисертације.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Структура и садржај дисертације

Дисертација садржи насловну страну и кратак резиме рада на српском и енглеском језику, захвалницу, садржај, 6 поглавља, списак коришћене литературе, 2 прилога, списак скраћеница и ознака и кратку биографију аутора. Поглавља су насловљена: 1. Увод, 2. Фотогенерација, транспорт и рекомбинација носилаца наелектрисања, 3. Моделовање полимерског фотодетектора, 4. ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al фотодетектор, 5. Анализа спектра фотострује ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al фотодетектора и 6. Закључак. У оквиру прилога дат је *MATLAB* код који представља имплементацију развијеног модела полимерског фотодетектора у програмски пакет *MATLAB R2009b*, као и графички приказ овог модела са применом на ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al структуру.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У оквиру увода истакнут је велики потенцијал који органски материјали, превасходно проводни полимери, имају са становишта примене у модерној оптоелектроници. Изложена су достигнућа у области полимерске оптоелектронике и дефинисани кључни проблеми које је неопходно решити у циљу даљег напретка. Посебно су размотрени полимерски фотодетектори кроз кратак преглед њиховог развоја, тренутну актуелност и издвајање основних задатака које треба решити ради унапређења перформанси ових направа. Укратко су изложени резултати и доприноси дисертације у светлу претходно дефинисаних циљева и задатака.

Друго поглавље се бави проблемом фотогенерације, транспорта и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима. Најпре је описан механизам проводности код ових материјала и истакнут велики степен њихове просторне и енергетске неуређености. С тим у вези, указано је на постојање мноштва неусаглашених резултата досадашњих истраживања и изложене су најбитније контроверзе. На бази опсежног и детаљног прегледа литературе размотрена су примарна и секундарна фотоекситована стања у овим материјалима. Извршена је систематизација могућих механизма фотогенерације носилаца наелектрисања при чему је сваки од механизма посебно размотрен. Нарочита пажња посвећена је утицају

спољних величина, интензитета и таласне дужине светлости, електричног поља и температуре на фотогенерационе процесе у проводним полимерима. За сваки од наведених механизма генерације фотоносилаца дефинисани су услови при којима он постаје значајан, размотрени су физички модели предложени у литератури, којима је третиран и квалитативно је описана зависност квантне ефикасности од спољних величина. Кратак преглед транспорта носилаца наелектрисања, као и систематизација рекомбинационих процеса ових носилаца дати су на крају поглавља.

Треће поглавље посвећено је моделовању полимерских фотодетектора. Извршен је преглед литературе у овој области. У оквиру поменутог прегледа изложени су резултати који се односе на моделовање полимерских фотодетектора применом постојећих модела, развијених за неорганске фотодетекторе и органске фотодетекторе на бази малих молекула, као и модели полимерских соларних ћелија. Резултати доступни у литератури су анализирани, уочени су присутни недостаци и изведени корисни закључци за развој адекватног модела. Предложен је и описан екситонско-поларонски модел полимерског фотодетектора. Истакнут је значај утврђивања доминантног механизма фотогенерације носилаца наелектрисања у конкретној фотодетекторској направи и одређивања зависности квантне ефикасности овог процеса од спољних величина приликом моделовања.

У четвртном поглављу представљен је ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al фотодетектор. Описан је процес фабрикации направи са различитим дебљинама MEH-PPV филма. Изложен је експериментални поступак одређивања спектра фотострује ових направи при различитим интензитетима упадне светлости и напонима поларизације. Екситонско-поларонски модел, развијен у склопу дисертације, примењен је на ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al фотодетектор. Симулирани спектри фотострује упоређени су са измереним и уопштено су дефинисани могући узроци уочених одступања.

Пето поглавље садржи детаљну анализу спектра фотострује ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al фотодетектора. Анализа је спроведена у три корака. Најпре је разматрана позиција максимума спектра фотострује и показано је да коефицијент апсорпције MEH-PPV полимера зависи од дебљине танког филма. Уочена појава је експериментално истражена. Поступак мерења и добијени резултати дати су у оквиру поглавља. У другом кораку анализиран је облик спектра фотострује и изведен закључак о дисперзивном карактеру рекомбинације носилаца наелектрисања у MEH-PPV-у. На крају поглавља размотрен је интензитет спектра фотострује. Као резултат овог корака уочена је зависност квантне ефикасности фотогенерације носилаца наелектрисања од дебљине полимерског филма.

Шесто поглавље је закључак. Полазећи од изузетне актуелности и перспективности полимерске оптоелектронике сагледани су њени тренутни домети као и препреке на путу даљег напретка. Дат је кратак преглед резултата у области полимерских фотодетектора. Наглашена је неопходност осветљавања фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима да би потенцијал ових материјала био у потпуности искоришћен у фотодетекторским применама. Набројани су и јасно истакнути резултати и доприноси дисертације како у погледу разјашњења фотофизике проводних полимера, тако и у смислу моделовања направи. Дефинисани су правци будућег истраживачког рада.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација припада данас, веома атрактивној области полимерске оптоелектронике. Проводни полимери поседују читав низ предности у односу на класичне полупроводнике: ниску цену материјала, јефтине и једноставне технике процесирања, флексибилност, компатибилност са постојећим технологијама, бројне нове физичке феномене

на којима је могуће засновати, исто тако нове примене. Међутим, поред наведеног низа предности, ови материјали се одликују високим степеном неуређености и изузетно комплексном физиком. Расветљавање процеса фотогенерације, транспорта и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима представља један од најбитнијих задатака у овој области, и од пресудног је значаја за развој бројних оптоелектронских направа, посебно полимерских фотодетектора и соларних ћелија. Тема дисертације ***“Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе”*** управо одговара наведеним, савременим потребама и захтевима.

Као што је већ речено, физика проводних полимера је изузетно комплексна. Поред тога, разноврсност испитиваних полимерских материјала, различити услови њихове производње (проводни полимери су изузетно осетљиви на процес производње), као и различити услови под којим су вршени експерименти, довели су до појаве мноштва контроверзних закључака и становишта у овој области. Када је у питању фотогенерација носилаца наелектрисања у проводним полимерима мишљења различитих група научника до данас нису усаглашена. У оквиру дисертације дат је сумаран и систематизован преглед резултата досадашњих истраживања. Овакав преглед је неопходан за стицање пуног увида у тренутно стање у разматраној области као и за правилно тумачење резултата будућих истраживања. Као такав, он представља изразито значајан и оригиналан допринос дисертације.

Превасходно због сложене и нерасветљене фотофизике проводних полимера, у доступној литератури се не може наћи пример модела полимерског фотодетектора. Екситонско-поларонски модел развијен у оквиру ове дисертације, према томе, представља још један, јако важан и оригиналан допринос.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

У својој дисертацији, кандидат је детаљно претражио постојећу литературу и коректно навео референце на радове који су у вези са темом дисертације. Наведене су 154 библиографске референце. Литература садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, класичне радове, као и радове чији је аутор или коаутор Јована Петровић.

3.3 Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације под насловом ***“Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе”*** састојала се у следећем:

- детаљно је проучена литература која се бави процесима фотогенерације, транспорта и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима,
- резултати објављени у доступној литератури су сумирани и систематизовани,
- претражена је и анализирана литература везана за моделовање полимерских фотодетектора,
- развијен је екситонско-поларонски модел полимерског фотодетектора,
- извршена је фабрикација ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al фотодетектора са три различите дебљине полимерског MEH-PPV филма,
- измерени су спектри фотострује фабрикованих направа у широком опсегу интензитета упадне светлости и напона поларизације,
- модел полимерског фотодетектора, развијен у раду, примењен је на ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al направу,
- симулирани и експериментално добијени спектри фотострује су упоређени,

- спроведена је детаљна анализа позиције максимума спектралних кривих, њиховог облика и интензитета,
- уочени су феномени који дају нови увид у физику проводних полимера и изведени су закључци корисни за оптимизацију полимерских фотодетектора, као и за унапређење развијеног модела.

Екситонско-поларонски модел је заснован на претпоставци да се фотоструја састоји од две компоненте. Прва компонента потиче од дисоцијације синглетних екситона на електродама, а друга од секундарно генерисаних наелектрисаних честица, шупљинских поларона. Екситонски допринос фотоструји добијен је решавањем стационарне, једнодимензионе једначине континуитета и дифузионе једначине за синглетне екситоне. Овај систем једначина има аналитичко решење. Прорачун поларонске компоненте фотострује базиран је на решавању стационарне, једнодимензионе једначине континуитета и дрифт-дифузионе једначине за шупљинске полароне. Разматрана су два механизма рекомбинације шупљинских поларона, мономолекуларан и бимолекуларан. У случају мономолекуларне рекомбинације систем једначина је линеаран и даје аналитичко решење. Када се претпостави да је рекомбинација поларона бимолекуларна, систем постаје нелинеаран и неопходно је нумеричко решавање. Приликом решавања коришћена је метода коначних разлика и Њутнова метода за систем нелинеарних алгебарских једначина. Модел је имплементиран у програмски пакет MATLAB R2009b.

3.4 Оцена применљивости и верификације остварених резултата

Модел полимерског фотодетектора развијен у оквиру дисертације примењен је на ITO/PEDOT:PSS/МЕН-PPV/Al направе. Поређењем експерименталних резултата са резултатима симулације модел је указао на зависност коефицијента апсорпције МЕН-PPV полимера од дебљине танког филма. Ова неочекивана зависност је, у склопу дисертације, и експериментално потврђена, а докази за њено постојање пронађени су и у литератури. Такође, квалитативна зависност квантне ефикасности фотогенерације поларона од електричног поља предвиђена моделом је у потпуној сагласности са литературом. Модел одлично репродукује спектар фотострује ITO/PEDOT:PSS/МЕН-PPV/Al фотодетектора и то за различите интензитета упадне светлости и у широком опсегу напона поларизације. На овај начин модел полимерског фотодетектора је вишеструко верификован. Основна примена развијеног модела огледа се у оптимизацији полимерских фотодетектора и унапређењу њихових перформанси. Модел може бити употребљен и за истраживање физике проводних полимера и мешавина које чине активни, фотоосетљиви слој детектора.

3.5 Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је у својој дисертацији показао систематичност, свеобухватност и зрелост. Посебно треба истаћи да је научна област полимерске оптоелектронике, нарочито тема моделовања полимерских фотодетектора којом се кандидат бави, слабо истражена, да су сви добијени резултати потпуно нови, тако да су доприноси дисертације у овој области оригинални и потврђују способност кандидата за самосталан истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији под насловом **“Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе”** остварени су следећи научни доприноси:

- на основу опсежног и детаљног преглед литературе формиран је свеобухватни шематски приказ процеса фотогенерације носилаца наелектрисања у проводним полимерима,
- сумирани су и систематизовани резултати из области транспорта и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима, објављени у доступној литератури,
- развијен је екситонско-поларонски модел полимерског фотодетектора,
- применом модела на ITO/PEDOT:PSS/МЕН-PPV/Al фотодетектор откривена је зависност коефицијента апсорпције МЕН-PPV полимера од дебљине танког филма,
- теоријским и експерименталним истраживањем зависности коефицијента апсорпције МЕН-PPV-а од дебљине танког филма установљено је да су интерференциони ефекти основни узрок ове појаве,
- поређењем експерименталних резултата са резултатима симулације одређена је квантна ефикасност фотогенерације поларона у функцији електричног поља и дебљине полимерског филма примењеног у фотодетектору,
- добијена квантна ефикасност фотогенерације поларона може се одлично описати *Poole-Frenkel*-овим изразом у коме се један параметар мења са дебљином.

4.2 Кратка анализа резултата истраживања

Сагледавањем циљева истраживања, постављених хипотеза и остварених резултата констатујемо да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из обрађиване проблематике. Свеобухватан, шематизован приказ фотогенерације носилаца наелектрисања у проводним полимерима и развијени екситонско-поларонски модел полимерског фотодетектора представљају значајан научни допринос у области полимерске оптоелектронике.

4.3 Очекивана примена резултата у пракси

Свеобухватан и систематизован преглед процеса фотогенерације носилаца наелектрисања у проводним полимерима, развијен у оквиру дисертације, може бити коришћен као полазиште за даља истраживања у овој области. Због мноштва различитих резултата и неусаглашених становишта заступљених у литератури, овакав преглед је неопходан за правилно тумачење будућих резултата и решавање постојећих контроверзи. Предложени модел полимерског фотодетектора своју основну примену може наћи у оптимизацији полимерских фотодетектора и унапређењу њихових перформанси. Такође, као што је показано у дисертацији, модел може бити употребљен за истраживање физике полимерских материјала који се користе у детекторским направама. У нешто измењеном облику, модел се може користити за опис рада полимерских соларних ћелија, док је примењени теоријски приступ адекватан и када су у питању полимерске LED (PLED) диоде.

4.4 Верификација научних доприноса

У току свог истраживачког рада, у ужој области теме докторске дисертације Јована Петровић објавила је четири рада у међународним часописима са SCI листе, и то два рада у врхунским часописима категорије M21 и два рада у часописима категорије M23. Такође, теми докторске дисертације припадају и два рада објављена на међународним конференцијама, као и два рада представљена на домаћим конференцијама.

Радови објављени у међународним часописима

[1] J. P. Petrović, P. S. Matavulj, L. R. Pinto, S. R. Živanović, “The interplay of device structure and intrinsic polymer photophysics and its effects on the ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al photocurrent spectra,” *Journal of Nanophotonics*, Vol. 5, 051808 (2011). (ISSN: 1934-2608) [IF 1,899, M21]

[2] J. Petrović, P. Matavulj, L. Pinto, S. Živanović Šelmić, “Field induced singlet exciton dissociation and exciton-exciton annihilation in MEH-PPV films studied by photocurrent spectra,” *Acta Physica Polonica A* Vol. 116, pp. 595-597 (2009). (ISSN: 0587-4246) [IF 0,433; M23]

[3] J. P. Petrović, P. S. Matavulj, D. Qi, S. R. Šelmić, “Charge carrier recombination in the ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al photodetector,” *Chemical Industry* Vol. 63, pp. 177-181 (2009). (ISSN: 0367-598X) [IF 0,117; M23]

[4] J. Petrović, Petar Matavulj, Difei Qi, David Keith Chambers and S. Šelmić, “A Model for Current-Voltage Characteristics of ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al Photodetectors,” *IEEE Photonic Technology Letters*, Vol. 20, pp. 348-350 (2008). (ISSN: 1041-1135) [IF 2,173; M21]

Радови објављени на конференцијама од међународног значаја

[5] Leon Rohan Pinto, Jovana Petrovic, Petar Matavulj, David Keith Chambers, Fauzia Khatkhatay, and Sandra Zivanovic Selmic, “*Photovoltaic Device Based on Poly(2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylene vinylene) Polymer,*” Solar 2009- ASES (American Solar Energy Society) National Solar Conference, Buffalo, NY, May 12-16, 2009.

[6] Leon Rohan Pinto, Jovana Petrovic, Petar Matavulj, David Keith Chambers, and Sandra Zivanovic Selmic, “*Experimental & Theoretical Investigation of Photosensitive ITO/PEDOT:PSS/ MEH-PPV/ Al Detector,*” 2009 MRS (Materials Research Society) Spring Meeting , Symposium NN Active Polymers, San Francisco, CA, April 13-17, 2009. (ISBN: 978-1-60511-163-6).

Радови објављени на конференцијама од националног значаја

[7] J. Petrović, P. Matavulj, S. Šelmić, “*Modeling of the photocurrent spectra of the ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al photodetectors*”, Zbornik 51. Konferencije ETRAN-a, секција MO, Herceg Novi-Igalo, 4-8. juna 2007.

[8] J. Petrović, P. Matavulj, L. Pinto, S. Šelmić, “*Charge generation and recombination in ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/Al photodiode studied by photocurrent dependence on light intensity*”, Zbornik 53. Konferencije ETRAN-a, секција MO, Vrnjačka Banja, 15-18. juna 2009.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација кандидата Јоване Петровић, под насловом “*Анализа фотогенерације и рекомбинације носилаца наелектрисања у проводним полимерима са применом на фотодетекторе*” представља савремен, оригиналан и значајан научни допринос. Сprovedена је детаљна анализа процеса фотогенерације носилаца наелектрисања у проводним полимерима и формиран свеобухватан и систематизован преглед. Полазећи од овог прегледа, развијен је модел полимерског фотодетектора који је потврђен применом на направљеној

ITO/PEDOT:PSS/MEH-PPV/AI структури кроз одлично слагање резултата симулације са експериментом. Добијени резултати су верификовани и објављивањем у више релевантних часописа са SCI листе. На основу претходног, Комисија констатује да је Јована Петровић 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 Извештај прихвати и, у складу са законском процедуром, упути Већу области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

У Београду, 11. 05. 2012. године

Чланови Комисије:

др Петар Матавуљ, ванредни професор (ментор)
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Сандра Живановић, ванредни професор
(Institute for Micromanufacturing, Louisiana Tech University, Ruston, USA)

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

др Јован Елазар, ванредни професор
(Електротехнички факултет Универзитета у Београду)

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