

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Милана Станојевића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком бр. 2300/30 од 10.12.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милана Станојевића, мастер инжењера под насловом

„Анализа и моделовање струјно-напонске карактеристике органских соларних ћелија“

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

Милан Станојевић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду школске 2018/2019 године, на модулу Наноелектроника и фотоника. Током студија положио је све испите са просечном оценом 10,00 и испунио све обавезе везане за студијски истраживачки рад.

Кандидат је тему докторске дисертације под насловом **„Анализа и моделовање струјно-напонске карактеристике органских соларних ћелија“** пријавио 25.04.2024. године. Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду је одобрила предлог теме за израду докторске дисертације 07.05.2024. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је именovalo Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (Одлука бр. 920/30 од 14.05.2024. године) у саставу:

1. др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. др Катарина Цветановић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за хемију, технологију и металургију – Центар за микроелектронске технологије,
3. др Наташа Ћировић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора докторске дисертације предложена је др Јована Гојановић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Кандидат је 29.05.2024. године

положио јавну усмену одбрану теме (докторски испит). Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације 11.06.2024. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Решење број 61206-2575/2-24 од 08.07.2024. године).

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао на преглед и оцену 28.11.2024. године. Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације 03.12.2024. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је именовало Комисију за оцену докторске дисертације (Одлука бр. 2300/30 од 10.12.2024. године) у саставу:

1. др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Наташа Ћировић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
3. др Катарина Цветановић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за хемију, технологију и металургију – Центар за микроелектронске технологије.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Електротехничког факултета Универзитета у Београду и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехника и рачунарство, у ужем смислу научној области Физичка електроника – оптоелектроника (органска оптоелектроника). За ове научне области матичан је Електротехнички факултет. Ментор дисертације је др Јована Гојановић, ванредни професор на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, која предаје више предмета на основним, мастер и докторским студијама, и аутор је бројних научних радова из уже научне области ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милан Станојевић рођен је 07.08.1993. године у Шапцу. Основну школу завршио је у Дебрцу, а средњу у Београду. Електротехнички факултет уписао је 2012. године. Дипломирао је на одсеку за Физичку електронику 2017. године на смеру за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику са просечном оценом 7,87. Дипломски рад на тему "Моделовање ИЦ сигнатуре авиона" одбранио је у септембру 2017. године са оценом 10. Мастер академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Модулу за Наноелектронику и фотонику уписао је у октобру 2017. године. Положио је све испите са просечном оценом 10. Мастер рад на тему "Утицај серијске отпорности и отпорности шанта на температурску зависност органских соларних ћелија" одбранио је у септембру 2018. године са оценом 10. Докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Модулу за Наноелектронику и фотонику, уписао је у октобру 2018. године. Положио је све испите са просечном оценом 10.

Од децембра 2018. до јануара 2020. године запослен је у предузећу Утва Авио Индустрија д.о.о., а од јануара 2020. године у Војнотехничком институту у Београду.

Аутор/коаутор је три рада публикована у међународним часописима са *JCR* листе.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом, на 163 страна (146 страна ефективног текста), и садржи 60 слика, 9 табела и 151 библиографске референце. Текст докторске дисертације чине следећа поглавља: 1. Увод (6 страна), 2. Једнодиодни модел примењен на РЗНТ:РСВМ соларне ћелије (17 страна), 3. Битни процеси у органским соларним ћелијама (17 страна), 4. Моделовање ОСћ (13 страна), 5. Моделовање J-V карактеристике РЗНТ:РСВМ соларних ћелија (31 стране), 6. Закључак (3 стране), Додатак 1 (20 страна), Додатак 2 (1 страна), Додатак 3 (24 стране), Додатак 4 (5 страна), Литература (8 страна), Биографија (1 страна). Дисертација садржи и уобичајене уводне (непагиниране) стране са неопходним информацијама о докторској дисертацији: резиме са кључним речима и подацима о научној области на српском (1 страна) и енглеском језику (1 страна), садржај (1 страна), листу слика (3 стране), листу табела (1 страна) и листу акронима (3 стране). Поред наведеног, на крају докторске дисертације налазе се и обавезне изјаве (Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу).

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **Уводу** је дат преглед тренутног стања у свету по питању утрошка енергије, производње из фотонапонских панела, истакнуте су органске соларне ћелије (ОСћ) са својим предностима и манама уз историјски осврт на постигнуте резултате. Изложене су методе и истакнути су главни циљеви као и организација докторске дисертације.

У другој глави **Једнодиодни модел примењен на РЗНТ:РСВМ соларне ћелије** представљени су конјуговани полимери и упоређени са неорганским полупроводницима, дат је принцип рада и осврт на историјски развој двослојних (БЛ) и хетероструктурних (БХЈ) ОСћ, изложени су једнодиодни модели, а идеални једнодиодни модел примењен је на мноштво струјно-напонских (J-V) карактеристика добијених из литературе.

У трећој глави **Битни процеси у органским соларним ћелијама** представљени су различити модели који описују процесе фотогенерације, транспорта, рекомбинације и екстракције носилаца наелектрисања.

У четвртој глави докторске дисертације **Моделовање ОСћ** изложен је дрифт-дифузиони модел (ДДМ) и технике за његово нумеричко решавање. Детаљно је обрађено нумеричко решавање помоћу методе коначних разлика и Њутнове методе. Изложен је аналитички облик J-V криве добијен изменом Шоклијевог модела како би се прилагодио специфичностима ОСћ. Дата је и релација за инверзну струју засићења у случају када је доминантна рекомбинација носилаца преко центара захвата на донор-акцептор слоју.

Пета глава **Моделовање J-V карактеристике РЗНТ:РСВМ соларних ћелија** садржи детаље о фабрикацији и мерењима експериментално добијених узорака, са активним слојем од РЗНТ:РСВМ смеше материјала, који су разматрани у даљем раду. Приказани су резултати анализе утицаја различитих облика генерације, транспорта, рекомбинације и профила електричног поља унутар направе коришћењем ДДМ-а. Дато је детаљно извођење аналитичког облика за J-V криву неосветљене направе. Изложена је анализа зависности спектра фотострује и J-V криве фотонапонских уређаја од дебљине слоја РЗНТ:РСВМ смеше кроз три различита модела базирана на ДДМ-у. Моделом кластера донорско-акцепторских (Д/А) слојева моделоване су струје кратког споја и инверзна струје засићења за посматране БЛ и БХЈ ОСћ.

У шестом поглављу **Закључак** сумирани су резултати из претходних поглавља и истакнути су доприноси ове дисертације. Представљени су и могући правци будућих истраживања.

У Прилозима 1, 2, 3 и 4 дати су Matlab кодови којим су вршени прорачуни J-V кривих ОСЋ.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Разматрана докторска дисертација представља оригиналан научни рад у области ОСЋ. Због све веће потрошње електричне енергије у свету и све мањих залиха фосилних горива интензивно се истражују обновљиви извори енергије од којих соларна енергија има изузетан потенцијал. ОСЋ могу да доведу до реализације јефтених фотонапонских панела високе ефикасности.

Истраживања у овој тези везана су за анализу J-V карактеристика ОСЋ. Коришћењем идеалног једнодиодног модела добијене су вредности параметара модела за случајеве осветљених и неосветљених БЛ и БХЈ ОСЋ и извршена је статистичка обрада добијених података. Уочене разлике у вредностима параметара осветљених и неосветљених ОСЋ и понуђено је објашњење оваквог понашања. Коришћењем ДДМ-а извршена је анализа појединачних утицаја различитих облика генерације, покретљивости, рекомбинације и профила електричног поља како би се разложили утицаји на облик J-V криве. Узимајући у обзир резултате ове анализе развијен је аналитички облик зависности струје од напона за неосветљену ОСЋ. Анализом спектра фотострује и J-V кривих експериментално реализованих РЗНТ:РСВМ ОСЋ дошло се до закључака да интерференциони ефекти нису значајни, али да дебљина активног слоја и морфологија јесу. Уведен је модел кластера Д/А спојева и успешно су репродуковане струја кратког споја и инверзна струја засићења за одабрану БЛ и БХЈ ОСЋ.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде дисертације, кандидат је истражио доступну, релевантну литературу и коректно цитирао 152 референце које су од значаја за тему дисертације. Литература обухвата широк опсег публикација од радова који одражавају хронолошки развој ОСЋ, публикација које се баве процесима генерације, транспорта и рекомбинације као и мноштва радова где су изложене J-V криве експериментално реализованих ОСЋ. Литература укључује и 2 публикације у међународним часописима (М22 категорије) на којима је кандидат првопотписани аутор и једну публикацију (М21 категорије) на којој је кандидат један од коаутора, а које су произашле током научно-истраживачког рада на дисертацији.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Проучавање релевантне литературе која се тиче моделовања J-V карактеристике ОСЋ као и физичких процеса генерације, транспорта и рекомбинације,
- Одређивање параметара идеалног једнодиодног модела за J-V криве из литературе и статистичка обрада добијених резултата,
- Одређивање параметара референтног ДДМ-а који подразумева нехомогено електрично поље, нехомогени профил генерације добијен применом трансфер

матричног модела, бимолекуларне рекомбинације и константних вредности за покретљивост електрона и шупљина који је адекватно репродуковао експериментално добијену J-V криву,

- Анализа утицаја различитих облика генерације, покретљивости, рекомбинације и профила електричног поља на J-V криву,
- Извођење аналитичког израза за струју неосветљене ОСЋ која има облик Шоклијево једначине,
- Применом ДДМ-а паралелно је вршена анализа спектра фотострује и J-V кривих,
- Извођење модела кластера Д/А слојева и његова верификација одређивањем густине струје отвореног кола и инверзне струје засићења за вредности пријављене у литератури,

На основу изложеног Комисија констатује да су примењене научне методе адекватне за анализу физичких процеса који се одвијају у активној области ОСЋ. Статистичком обрадом вредности добијених применом идеалног једнодиодног модела уочена је разлика између параметара осветљених и неосветљених ОСЋ. Расветљени су утицаји генерације, транспорта, рекомбинације и профила електричног поља на J-V криву. Показано је да ефекти интерференције у ОСЋ нису значајни, али је зато битна дебљина активног слоја и морфологија. Објашњена је висока вредност ефикасности појединих БЛ ОСЋ пријављених у литератури.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати истраживачког рада проистекли из ове дисертације расветљавају појединачне утицаје генерације транспорта, рекомбинације и профила електричног поља. Показано је да интерференцијски утицаји нису доминантни у ОСЋ. Утицај морфологије и дебљине активне области показао се као веома битан. Изведен је аналитички израз за неосветљену ОСЋ који има облик Шоклијево једначине. Уведен је модел кластера Д/А спојева којим је објашњена висока вредност ефикасности појединих БЛ ОСЋ пријављених у литератури. Ови закључци су од великог значаја за унапређење ефикасности и оптимизацију ОСЋ на путу ка комерцијализацији. Верујемо да могу да расветле до сад нејасне механизме и физичке процесе који се одвијају у ОСЋ и тако омогуће будуће унапређење истих.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане докторске дисертације Комисија процењује да је кандидат Милан Станојевић демонстрирао спремност за самостални научно-истраживачки рад, почевши од систематичног прегледа актуелне литературе, преко показане креативности и темељности у осмишљавању истраживачких метода, до детаљног тумачења добијених резултата. Резултати истраживања су верификовани у еминентним међународним часописима. Анализом очекиваних научних доприноса предложене теме за израду дисертације, а на основу постигнутих резултата, Комисија констатује да је кандидат успешно одговорио на све изазове и недоумице постављене на почетку израде ове дисертације. Такође, кандидат је уочио и предвидео могућности за будућа истраживања.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси које је кандидат Милан Станојевић остварио у овој докторској дисертацији су:

- Сагледане су разлике у вредностима параметара идеалног једнодиодног модела за осветљене и неосветљене ОСЋ.
- Сагледан је утицај појединачних модела за генерацију, транспорт, рекомбинацију и профил електричног поља на облик J-V криве ОСЋ.
- Изведен је аналитички модел за облик J-V криве у случају неосветљене ОСЋ.
- Показано је да трансфер матрични модел не даје добре резултате при моделовању спектра фотострује.
- Показано је да дебљина активног слоја и морфологија утичу на параметре ОСЋ.
- Развијен је модел кластера Д/А домена узимањем у обзир угла између вектора електричног поља и нормале на елементарни Д/А спој. Применом овог модела добијено је слагање са вредностима струје кратког споја и инверзне струје засићења за БЛ и БХЈ ОСЋ.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Моделовање J-V карактеристике ОСЋ помоћу ДДМ-а, у општем случају, не даје увид у сложене физичке процесе који се одвијају у овим направама услед нумеричког решавања модела. У овој дисертацији сагледан је утицај појединачних модела за генерацију, транспорт, рекомбинацију и профил електричног поља који улазе у оквир ДДМ-а чиме је добијена представа о томе како поменуте физичке појаве доприносе облику J-V криве. Ова анализа показала је да је могуће користити једноставније моделе за генерацију, транспорт и профил електричног поља што је искоришћено при извођењу аналитичког израза за струју мрака ОСЋ.

Утицај дебљине активног слоја БХЈ ОСЋ испитан је кроз моделовање спектра фотострује и J-V криве помоћу ДДМ-а. Установљено је да употреба трансфер матричног модела који узима у обзир интерференционе ефекте не даје добре резултате већ је коришћен константан профил генерације уз употребу Пол-Френкелове зависности интерне квантне ефикасности од примењеног напона. Такође, уочена је зависност оптичких параметара и покретљивости од дебљине активне области. Ово је значајан резултат с обзиром да се у научној литератури води дебата око утицаја интерференције на ефикасност ОСЋ са танким активним слојем.

Модел кластера Д/А домена развијен је имајући у виду неубичајено високе вредности ефикасности појединих БЛ ОСЋ пријављених у литератури. Узимајући у обзир угао између вектора електричног поља и нормале на елементарни Д/А спој добијено је слагање са вредностима струје кратког споја и инверзне струје засићења за БЛ и БХЈ ОСЋ.

Резултати дисертације представљају значајан искорак у расветљавању физичких процеса на којима је базиран рад ОСЋ, а самим тим и искорак ка њиховој оптимизацији и комерцијализацији. Резултати су публиковани у три међународна часописа, од којих један категорије M21, а два категорије M22.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације верификовани су у следећим радовима (приказаним према категоријама):

Категорија М21:

1. J. Влаховић, М. Станојевић, Ј. Гојановић, J. Melancon, A. Sharma, С. Живановић, Thickness dependent photocurrent spectra and current-voltage characteristics of PЗНТ:PCBM photovoltaic devices, *Optics Express*, 29, pp. 8710-8724, 2021. (I.F. 3.8, ISSN: 1094-4087), DOI: 10.1364/OE.418082

Категорија М22:

1. М. Станојевић, Ј. Гојановић, П. Матавуљ, С. Живановић, Organic solar cell physics analyzed by Shockley diode equation, *Optical and Quantum Electronics*, 52, pp. 345 (1-10), 2020. (I.F. 3, ISSN: 1572-817X), DOI: 10.1007/s11082-020-02459-6

2. М. Станојевић, Ј. Гојановић, С. Живановић, A cluster of bilayer diodes model for bulk heterojunction organic solar cells, *Optical and Quantum Electronics*, 55, pp. 508 (1-10), 2023. (I.F. 3, ISSN: 1572-817X), DOI: 10.1007/s11082-023-04781-1

Категорија М34:

1. М. Станојевић, Ј. Гојановић, П. Матавуљ, С. Живановић, Organic solar cell physics analyzed by Shockley diode equation, *The Seventh International School and Conference on Photonics – Photonica2019*, Belgrade, Serbia, 26-30. Август, 2019.

2. М. Станојевић, Ј. Гојановић, С. Живановић, A cluster of bilayer diodes model for bulk heterojunction organic solar cells, *VIII International School and Conference on Photonics – Photonica2021*, Belgrade, Serbia, 23-27. Август, 2021.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

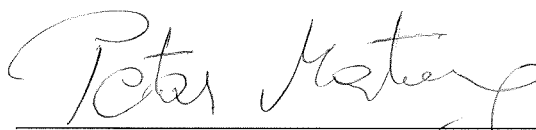
Докторска дисертација кандидата Милана Станојевића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „Анализа и моделовање струјно-напонске карактеристике органских соларних ћелија“ представља савремени научни допринос у области Електротехнике и рачунарства, односно уже научне области Физичка електроника – оптоелектроника (органска оптоелектроника).

Текст дисертације је написан у научном маниру, садржај правилно конципиран, а поглавља приказана адекватно. Циљеви дисертације су јасно профилисани, методологија исправно примењена, а публиковани резултати су потврдили испуњеност постављених циљева, чиме је кандидат показао способност за самостални научни рад. Анализа физичких процеса моделовањем струјно-напонске карактеристике извршена је систематично са правилно изведеним закључцима који су верификовани у три рада публикована у међународним часописима са *JCR* листе.

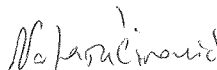
Комисија констатује да докторска дисертација кандидата Милана Станојевића испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се примењују приликом вредновања докторске дисертације на Универзитету у Београду, и на Електротехничком факултету. Узимајући у обзир све остварене резултате и оригинални научни допринос, комисија за задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација **Милана Станојевића** под насловом „Анализа и моделовање струјно-напонске карактеристике органских соларних ћелија“ изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а кандидату одобри јавна усмена одбрана.

У Београду, 29.01.2025. године

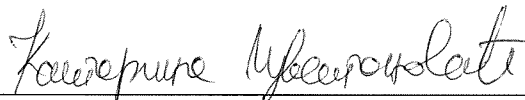
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Петар Матавуљ, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Наташа Тировић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Катарина Цветановић, научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за хемију, технологију и металургију
– Центар за микроелектронске технологије