

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Али Калфа (Ali Ramadan Ahmed Khalf), магистра електротехнике.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета 5053/14-3 бр. од 27.11.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Али Калфа, магистра електротехнике, под насловом

**„Influence of surface processes on the current-voltage characteristic of organic solar cells“**

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

Али Калф је магистрирао 15. октобра 1997. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду одбравивши магистраску тезу под насловом: „Design and development of optical gathering system“, израђену под менторством проф. др. Миодрага В. Поповића.

Али Калф је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду школске 2014/2015 године, на модулу Наноелектроника и фотоника. Школску 2016/17 годину кандидат је провео у статусу мировања. Школске 2017/18 Али Калф је поново постао активан студент докторских студија. Током студија положио је све испите са просечном оценом 9,50 и испунио све обавезе везане за студијски истраживачки рад.

Кандидат је тему докторске дисертације под насловом **„Influence of surface processes on the current-voltage characteristic of organic solar cells“** пријавио 14.5.2020. године. Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду је одобрила предлог теме за израду докторске дисертације 19.5.2020. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5053/14-1 од 9.6.2020. године) у саставу:

1. др Петар Матавуљ, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
2. др Милица Гвозденовић, редовни професор, Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду,

3. др Иван Поповић, доцент ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

За ментора докторске дисертације предложена је др Јована Гојановић, доцент Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Кандидат је 22.6.2020. године положио јавну усмену одбрану теме (докторски испит). Након тога, Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5053/14-2 од 9.9.2020. године).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука број 61206-2982/2-20 од 28.9.2020. године).

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао на преглед и оцену 5.11.2020. 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 10.11.2019. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је именovalo Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5053/14-3 од 27.12.2020. године) у саставу:

1. др Јована Гојановић, доцент, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
2. др Петар Матавуљ, редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
3. др Милица Гвозденовић, редовни професор, Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду.

Кандидат је докторске студије уписа школске 2014/15 године. Пошто је школску 2016/17 годину провео у статусу мировања, текућа 2020/21 година је шеста година докторских студија кандидата Али Калфа.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Техничких наука – електротехника, у ужем смислу научној области Физичка електроника – оптоелектроника (органиска оптоелектроника). За ове научне области матичан је Електротехнички факултет. Ментор дисертације је др Јована Гојановић, доцент на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, која предаје више предмета на свим нивоима студија, и аутор је бројних научних радова из уже научне области ове докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Али Калф рођен је 26. марта 1966. године у Триполију, Либија. Основну и средњу школу завршио је у Триполију након чега је 1985. године уписао Природно-математички факултет на Универзитету у Триполију у Либији, где је 1990. године стекао титулу дипломираног физичара. Радио је у истраживачко-развојном центру у Триполију (R&D center, Tripoly) као инжењер од 1991. до 1995. године. Затим је, 1995. године уписао магистарске студије на Смеру за оптоелектронику и ласерску технику на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, а дипломирао је са просечном оценом 8,4. Магистарску тезу под називом „Design and development of optical gathering system“ под менторством проф. др. Миодрага В. Поповића одбранио је 15. октобра 1997. године. У периоду од 1997. до 2011. године радио је поново у истраживачко-развојном центру у Триполију као истраживач-сарадник за развој оптичког система за контролу дивергенције снопа ласерске диоде као јединице бежичног телекомуникационог линка. У истом периоду радио је хонорарно и као предавач на Факултету за науку Универзитета у Триполију, Одсек за физику, и Високом институту рачунарства у Триполију. Али Калф је 2014. године уписао докторске студије на

модулу Наноелектроника и фотоника на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Резултати досадашњег научно-истраживачког рада Али Калфа објављени су у два рада са *JCR* листе, као и у једном саопштењу на скупу међународног значаја.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на енглеском језику, на 134 стране (123 стране ефективног текста), и садржи 53 слике, 4 табеле и 135 библиографских референци. Текст докторске дисертације чине следећа поглавља: 1. *Introducion* (4 стране), 2. *The physics of metal/semiconductor interfaces* (25 страна), 3. *Organic solar cells* (26 страна), 4. *The surface recombination and thermal injection influences on J-V characteristics of organic solar cells* (23 стране), 5. *Conclusion* (3 стране), 6. *Appendix A (The Scharfetter–Gummel discretization)* (6 страна), 7. *Appendix B (The MATLAB code)* (21 страна) и 8. *Bibliography* (10 страна). Дисертација садржи и уобичајене уводне (непагиниране) стране са неопходним информацијама о докторској дисертацији: резиме са кључним речима и подацима о научној области на енглеском (1 страна) и српском језику (1 страна) и садржај (2 стране). Поред наведеног, на крају докторске дисертације налази се кратка биографија аутора 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 уводном поглављу је указано на савремени проблем у вези са изворима енергије, ограниченошћу њихових залиха и загађењем. Истакнут је значај обновљивих извора енергије, а међу њима посебно соларних ћелија. Такође, изнесени су недостаци данас најзаступљенијих технологија соларних ћелија и предности које органске соларне ћелије (ОСћ) нуде као и проблеми које треба решити на путу њиховог даљег усавршавања.

У другој глави описана су физички процеси на споју метал/неоргански полупроводник као и на споју метал/органски полупроводник. Детаљно је обрађена тема површинске рекомбинације. Такође, размотрен је начин моделовања утицаја површинских процеса на рад електронских и оптоелектронских направа.

У трећој глави изложен је кратак историјски развој ОСћ. Представљене су њихове основне структуре и принципи рада. Дат је преглед битних открића која су довела до унапређења ефикасности ОСћ. Детаљно је описан дрефт-дифузиони модел ових направа. Посебна пажња посвећена је појави S-девијације у струјно-напонској (I-V) карактеристици ОСћ.

У четвртој глави докторске дисертације описана је фабрикација ИТО/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al и ИТО/PEDOT:PSS/P3HT:ICBA/Al соларних ћелија као и њихова карактеризација кроз мерење I-V карактеристике ових направа осветљених светлошћу соларног симулатора. Приказана је анализа утицаја површинске рекомбинације и термионске емисије носилаца наелектрисања на I-V карактеристику ОСћ извршена помоћу дрефт-дифузионог модела, који утицај ових површинских процеса укључује кроз граничне услове. Изолован утицај површинске рекомбинације на I-V криву ОСћ сагледан је занемаривањем концентрације термички генерисаних носилаца на аноди и катоди у граничним условима. Утицај термички генерисаних носилаца сагледан је у другом кораку анализе када су и њихове концентрације укључене у граничне услове. Примењени модел је

верификован поређењем симулираних и експериментално одређених I-V карактеристика ITO/PEDOT:PSS/PЗНТ:PCBM/Al и ITO/PEDOT:PSS/PЗНТ:ICBA/Al соларних ћелија. Уочено је да размотрени површински процеси могу довести до S-девијације I-V криве ОСћ. Такође је примећено да постоје два различита типа S-девијације. Први тип је последица редуковане брзине површинске рекомбинације носилаца наелектрисања на било којој електроди, док други тип потиче од постојања значајне инјекционе баријере за електроне на катоди. Насупрот тврдњама на које се наилази у литератури, закључено је да се остваривањем редуковане брзине површинске рекомбинације за мањинске носиоце на електродама не постиже селективност контаката.

У последњој глави сумирани су резултати и закључци ове докторске дисертације који имају како фундаментални тако и практични значај. Такође, укратко су представљени и могући праваци будућих истраживања у овој проблематици.

У прилогу А приказан је поступак дискретизације дрефт-дифузионог система једначина применом Scharfetter-Gummel методе.

У прилогу Б дат је код у МАТЛАБ R2013b пакету који је коришћен за прорачун I-V карактеристике ОСћ.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Обновљиви извори енергије, а нарочито соларне ћелије и панели, су изразито актуелна савремена тема. Да би се постигла масовна употреба соларних панела, потребно је развити технологију која ће обезбедити истовремено високу ефикасност и малу цену ових направа. ОСћ су један од главних кандидата за замену скувих силицијумских соларних ћелија, међутим, неопходно је у потпуности расветлити физичке принципе на којима је базиран њихов рад како би њихови потенцијали били у потпуности искоришћени. Резултат и закључци дисертације представљају значајан корак напред на овом путу.

У дисертацији је развијена оригинална SML (*Small Medium Large*) анализа којом се брзине површинске рекомбинације носилаца наелектрисања на електродама ОСћ сврставају према својој вредности у три категорије S-*Small*, M-*Medium* и L-*Large*. Свакој категорији се придружује одговарајући тип контакта блокирајући (S), проводан (L) или нити блокирајући нити проводан (M). На овај начин извршена је анализа и систематизација I-V карактеристика симулираних помоћу дрефт-дифузионог модела истовременом варијацијом четири параметра (брзина површинске рекомбинације електрона на аноди, електрона на катоди, шупљина на аноди и шупљина на катоди) при чему сваки параметар узима вредности из опсега од 0 до  $\infty$ . Закључци описане анализе представљају оригиналан научни допринос.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде дисертације, кандидат је истражио доступну, релевантну литературу и коректно цитирао 135 референци које су од значаја за тему дисертације. Литература обухвата широк опсег публикација, од књига које су посвећене физици на споју метла и полупроводника, преко књига који се баве основним принципима рада ОСћ и радова који одражавају хронолошки развој ОСћ, до најсавременијих публикација које се баве S-деформацијом I-V карактеристике ОСћ и физичким механизмима који до ње доводе. Литература укључује и 2 публикације у међународним часописима (M21 и M23) на којима је

кандидат првопотписани аутор, 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 доступне литературе посвећене S-деформацији I-V карактеристике код ОСћ и физичким механизмима који до ње доводе.
- Развој дрефт-дифузионог модела ОСћ који је базиран на Поасоновој једначини и једначини континуитета за шупљине и електроне. Сматрано је да се транспорт носилаца наелектрисања одвија кроз дрефт и дифузију при чему су покретљивости носилаца константне. Профил брзине фотогенерације рачунат је узимајући у обзир вишеструку интерференцију у активном слоју ОСћ применом трансфер матричног формализма. Рекомбинација носилаца је посматрана као бимолекуларни процес Ленжевеновог типа. Добијени систем једначина решаван је нумерички применом Шафетер-Гамел (Scharfetter-Gummel) дискретизације и Њутнове методе.
- Урачунавање утицаја површинске рекомбинације и термичке генерације носилаца наелектрисања на катоди и аноди у дрефт-дифузиони модел ОСћ кроз граничне услове.
- Разматрање издвојеног утицаја површинске рекомбинације на I-V карактеристику ОСћ занемаривањем концентрација термички генерисаних носилаца на електродама у граничним условима и варијацијом брзина површинске рекомбинације електрона на катоди, електрона на аноди, шупљина на катоди и шупљина на аноди у опсегу од 0 до  $\infty$ .
- Осмишљавање *SML* анализе у циљу сагледавања и систематизације огромног броја симулираних I-V кривих. Брзине површинске рекомбинације су сврстане у три категорије *S-small*, *M-medium* и *L-large* тако да је број разматраних I-V кривих са теоријски бесконачно великог сведен на  $4^3=81$  криву.
- Сагледавање утицаја процеса површинске рекомбинације на I-V карактеристику ОСћ уочавањем да редукована вредност било које од четири брзине површинске рекомбинације доводи до појаве S-деформације па је за правилан рад направе неопходно да све четири брзине површинске рекомбинације имају вредност *L*.
- Разматрање утицаја висине инјекционе баријере за електроне на катоди и шупљине на аноди на I-V карактеристику ОСћ узимањем у обзир концентрација термички генерисаних носилаца наелектрисања на електродама кроз граничне услове и варијацијом висина инјекционих баријера. Приликом ове анализе утицај површинске рекомбинације је искључен узимајући да све четири брзине површинске рекомбинације имају вредност *L*.
- Сагледавање утицаја висине инјекционе баријере за електроне на катоди као и утицаја висине инјекционе баријере за шупљине на аноди на I-V криву ОСћ уочавањем да само инјекциона баријера за електроне на катоди може довести до појаве S-деформације у I-V карактеристици при чему се облик S-деформације у овом случају разликује од оног који је изазван редукованом брзином површинске рекомбинације.
- Верификацију модела поређењем симулираних и експериментално добијених I-V кривих за ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al и ITO/PEDOT:PSS/P3HT:ICBA/Al соларне ћелије. У случају ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al соларне ћелије измерена I-V крива је имала регуларан J облик док је измерена I-V карактеристика ITO/PEDOT:PSS/P3HT:ICBA/Al соларне ћелије садржала S-деформацију. Експериментални резултати су добро репродуковани моделом.

На основу изложеног Комисија констатује да су примењене научне методе адекватне за извођење валидних закључака о утицају процеса површинске рекомбинације и термионске емисије носилаца наелектрисања на I-V карактеристику ОСЋ. Уочено је да је оригинални научни допринос дисертације управо у осмишљеном аналитичком приступу којим је могуће раздвојити утиције ове две појаве и независно их сагледати.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати и закључци ове дисертације расветљавају утицај површинске рекомбинације и термионске емисије носилаца наелектрисања на електродним контактима ОСЋ на њихове перформансе. Указано је на чињеницу да површинска рекомбинација има искључиво негативан утицај на рад ОСЋ и да се селективност контаката не може постићи остваривањем значајне површинске рекомбинације мањинских носилаца на електродама као што се сматра у литератури. Показано је да постојање инјекционих баријера за већинске носиоце на електродама такође доводи до деградације рада ОСЋ као и да се селективност контаката постиже управо отклањањем (или минимизацијом) инјекционих баријера за електроне на катоди и шупљине на аноди. Ови закључци су од великог значаја за унапређење ефикасности и оптимизацију ОСЋ на путу ка њиховој комерцијализацији.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане докторске дисертације Комисија процењује да је кандидат Али Калф у потпуности демонстрирао спремност и способност за самостални научно-истраживачки рад, почевши од систематичног прегледа актуелне литературе, преко показане креативности у осмишљавању истраживачких метода, до детаљног тумачења добијених резултата. Резултати истраживања су верификовани у еминентним међународним часописима и презентовани на научном скупу од међународног значаја. Сагледавањем предмета и циља истраживања, а на основу остварених резултата, Комисија констатује да је кандидат успешно одговорио на изазове постављене на почетку израде ове дисертације. Такође, кандидат је уочио и предвидео могућности за даља истраживања.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси које је кандидат Али Калф остварио у својој докторској дисертацији су:

- Осмишљена је оригинална *SML* анализа утицаја површинске рекомбинације на I-V карактеристику ОСЋ.
- Сагледан је издвојени утицај површинске рекомбинације на I-V криву ОСЋ применом развијеног *SML* приступа. Разматран је утицај површинске рекомбинације за оба типа носилаца (електрона и шупљина) на обе електроде (аноди и катоди).
- Сагледан је издвојени утицај висина инјекционих баријера за електроне на катоди и за шупљине на аноди на I-V карактеристику ОСЋ.
- Утврђено је да постоје два различита типа S-деформације I-V криве код ОСЋ, један који потиче од редуковане брзине површинске рекомбинације и други који се јавља услед постојања значајне баријере за инјекцију електрона на катоди.

- Установљено је да површинска рекомбинација има искључиво негативан утицај на рад ОСћ и да се селективност контаката не може постићи остваривањем значајне површинске рекомбинације мањинских носилаца на електродама као што се сматра у доступној литератури.
- Показано је да се селективност контаката постиже отклањањем (минимизацијом) инјекционих баријера за електроне на катоди и шупљине на аноди.
- Дрифт-дифузиони модел коришћен за симулацију I-V кривих ОСћ је верификован поређењем симулираних и експериментално добијених I-V карактеристика ITO/PEDOT:PSS/PЗНТ:PCBM/Al и ITO/PEDOT:PSS/PЗНТ:ICBA/Al соларних ћелија. Модел је у стању да репродукује и регуларну J криву измерену у случају ITO/PEDOT:PSS/PЗНТ:PCBM/Al соарне ћелије као и S-деформисану I-V карактеристику измерену у случају ITO/PEDOT:PSS/PЗНТ:ICBA/Al соларне ћелије.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Појава S-деформације у I-V карактеристици ОСћ је веома актуелна истраживачка тема данас. Велики број научних радова посвећених утврђивању физичких процеса који доводе до ове појаве је публикован у последње време. Међутим, резултати који су доступни у литератури су разноврсни, неусаглашени, а често и контроверзни. Разлог за ово је постојање више механизма и физичких процеса који се преплићу и суделују доводећи до појаве такозване S-криве. У овој дисертацији сагледан је издвојен утицај два доминантна физичка процеса на електродним контактима који могу довести до S-деформације I-V карактеристике ОСћ, површинске рекомбинације и термионске емисије носилаца наелектрисања. Такође, установљено је да селективност контаката не потиче од редуковане брзине површинске рекомбинације за мањинске носиоце на њима, као што се сматра у доступној литератури, већ се постиже минимизацијом инјекционих баријера за већинске носиоце уз услов да је површинска рекомбинација скоро потпуно отклоњена. На послетку, резултати дисертације представљају значајан корак напред у расветљавању физичких процеса на којима је базиран рад ОСћ, а самим тим и корак напред ка њиховој оптимизацији и комерцијализацији. Резултати су публиковани у два међународна часописа, од којих је један категорије M21, а други категорије M23, и на једној престижној међународној конференцији.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

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

##### Категорија M21:

1. **A. Khalf**, J. Гојановић, Н. Ћировић, S. Živanović, P. Matavulj, : The Impact of Surface Processes on the J-V Characteristics of Organic Solar Cells, - *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 2, pp. 514-521, 2020. (IF=3.052) ISSN: 2156-3381  
DOI: [10.1109/JPHOTOV.2020.2965401](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2965401)

##### Категорија M23:

1. **A. Khalf**, J. Гојановић, Н. Ћировић, S. Živanović, : Two different types of S-shaped J-V characteristics in organic solar cells, - *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 121(1-10), 2020. (IF=1.416), ISSN: 0306-8919, DOI: [10.1007/s11082-020-2236-7](https://doi.org/10.1007/s11082-020-2236-7)

Категорија М34:

1. **A. Khalf**, J. Гојановић, Н. Ћировић, М. Ислам, С. Живановић, П. Матавуљ,,: Analysis of the Surface Recombination Influence on Organic Solar Cell J-V curve, - *OSA Advanced Photonics Congress (APC)*, Burlingame, California United States, 2019., ISBN: 978-1-943580-64-4

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ


Докторска дисертација кандидата Али Калфа, магистра електротехнике, под насловом „**Influence of surface processes on the current-voltage characteristic of organic solar cells**“ представља савремени научни допринос у области Електротехнике и рачунарства, односно уже научне области Физичке електронике –оптоелектронике.

Текст дисертације је написан јасно и разумљиво, са добром организацијом поглавља. Циљеви дисертације прецизно су формулисани и дефинисани, а објављени резултати су потврдили испуњеност тих циљева, чиме је кандидат показао способност за самостални научни рад. Анализа утицаја површинске рекомбинације и термионске емисије носилаца наелектрисања на I-V карактеристику ОСћ извршена је детаљно и систематично са правилно изведеним закључцима који су верификовани у два рада публикована у међународним часописима са *JCR* листе и на једној реномираној међународној конференцији.

Комисија констатује да докторска дисертација кандидата Али Калфа 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 **Али Калфа** под насловом „**Influence of surface processes on the current-voltage characteristic of organic solar cells**“ 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 01.12.2020. године.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Јована Гојановић, доцент

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Петар Матавуљ, редовни професор

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милица Гвозденовић, редовни професор

Универзитет у Београду – Технолошко-металуршки факултет