

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14 · Поштански фах 73
18000 Ниш · Србија
Телефон 018 529 105 · Телефакс 018 588 399
E-mail: einfo@elfak.ni.ac.rs; http://www.elfak.ni.ac.rs
Текући рачун: 840-1721666-89; ПИБ: 100232259



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING

Aleksandra Medvedeva 14 · P.O. Box 73
18000 Niš - Serbia
Phone +381 18 529 105 · Fax +381 18 588 399
E-mail: einfo@elfak.ni.ac.rs
http://www.elfak.ni.ac.rs

ДЕКАН

15.01.2021. године

О Б А В Е Ш Т Е Њ Е
НАСТАВНИЦИМА И САРАДНИЦИМА ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА

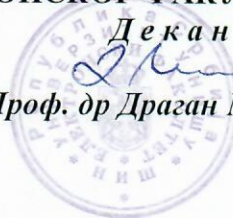
Докторска дисертација кандидата професора физике и општетехничког образовања Драгане Китан Маркушев под насловом „Утицај фотогенерисаних носилаца наелектрисања на термалне и еластичне особине силицијума п-типа“ и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације доступни су на увид јавности у електронској верзији на званичној интернет страници Факултета и налазе се у штампаном облику у Библиотеци Електронског факултета у Нишу, и могу се погледати до **14.02.2021. године**.

Примедбе на наведени извештај достављају се декану Електронског факултета у Нишу у напред наведеном року.

Председник Наставно-научног већа
ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА У НИШУ

Декан

Проф. др Драган Манчић



ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља и име	Драгана Китан Маркушев
Датум и место рођења	03.07.1973. Ниш
Основне студије	
Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	ПМФ, Одсек за физику
Студијски програм	Физика
Звање	Професор физике и опшетехничког образовања
Година уписа	Школска 2003/2004
Година завршетка	14.02.2005.
Просечна оцена	7.33

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ
 У НИШУ

Примљено	15.01.21
Број	07/03-004/21

Магистарске студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена
Научна област
Наслов завршног рада

Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Електронски факултет
Студијски програм	Електротехника и рачунарство – модул – нанотехнологије и микросистеми
Година уписа	2015
Остварен број ЕСПБ бодова	150
Просечна оцена	10.00

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	Утицај фотогенерисаних носилаца наелектрисања на термалне и еластичне особине силицијума n-типа
Име и презиме ментора, звање	
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	НСВ број 8/20-01-007/20-002 од 14.09.2020. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	130
Број поглавља	7
Број слика (шема, графикона)	55
Број табела	4
Број прилога	3

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категор
1	<p><u>D.K. Markushev, D.D. Markushev, S.M. Aleksic, D.S. Pantic, S.P. Galovic, D.M. Todorovic, and J. Ordonez-Miranda, "Effects of the photogenerated excess carriers on the thermal and elastic properties of n-type silicon excited with a modulated light source: Theoretical analysis", <i>Journal of Applied Physics</i>, 126, 185102 (2019), doi: 10.1063/1.5100837</u></p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Теоријски је испитан утицај вишка фотогенерисаних носилаца на расподелу температура и термоеластичне фотоакустичке сигнале силицијума n-типа побуђеног светлосним извором модулисаног интензитета за фреквенције модулације у распону од 1 до 10⁷ Hz. Ово је урађено поређењем амплитуде и фазе температурних и фотоакустичних сигнала са и без присуства фотогенерисаних носилаца, посвећујући посебну пажњу присутности карактеристичних пикова код односа амплитуда и разлика фаза на предњој и задњој површини узорка. Показано је да се ови пикови могу схватити као доказ постојања вишка носилаца у полупроводнику. Поред тога, квантификована је јака зависност расподела температура од површинских рекомбинација носилаца код танких узорака и њихов снажан утицај на флексибилност узорка кроз промену термоеластичне компоненте фотоакустичког сигнала.</p>	
2	<p><u>Dragana K. Markushev, Dragan D. Markushev, Slobodanka Galović, Sanja Aleksić, Dragan S. Pantić, Dragan M. Todorović, "The surface recombination velocity and bulk lifetime influences on photogenerated carrier density and temperature distributions in n-type silicon excited by a frequency-modulated light source", <i>FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics</i> Vol. 31, No 2, June 2018, pp. 313 – 328, https://doi.org/10.2298/FUEE1802313M</u></p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Испитиване су температурне расподеле у фреквентном домену кружне плоче силицијума n-типа побуђене са једне стране фреквентно модулисаним извором светлости. Разматран је утицај фотогенерисаног вишка носилаца на температурне расподеле у односу на дебљину узорка, квалитет његове површине и времена живота носилаца. У обзир је узето присуство процеса термализације и рекомбинације носилаца. Препознато је постојање брзих и спорих извора топлоте у узорку. Показано је да температурске расподеле на површини узорка јесу врло осетљиве функције густине вишка носилаца током запреминске и површинске рекомбинације. Установљене су најпогодније вредности односа површинских брзина рекомбинације и времена живота носилаца помоћу којих се, на једноставнији и ефикасан начин, види утицај вишка носилаца у полупроводнику. Предложена је трансмисиона детекциона конфигурација као најпогоднија експериментална поставка, у оквирима фототермалних и фотоакустичких наука, за истраживања утицаја вишка носилаца на површинске температурне расподеле силицијума.</p>	
3	<p><u>Sanja M. Aleksić, Dragana K. Markushev, Dragan S. Pantić, Mihajlo D. Rabasović, Dragan D. Markushev, Dragan M. Todorović, "Electro-acoustic influence of measuring system on the photoacoustic signal amplitude and phase in frequency domain", <i>FACTA UNIVERSITATIS Series: Physics, Chemistry and Technology</i> Vol. 14, No 1, 2016, pp. 9 – 20, DOI: 10.2298/FUPCT1601009A</u></p> <p>У овом раду су разматрани најчешћи утицаји мерног система на амплитуду и фазу фотоакустичних сигнала у фреквенцијском домену коришћењем експерименталне поставке отворене ћелије. Највећа дисторзија сигнала откривена су на крајевима фреквенцијског опсега модулације од 20 Hz до 20 kHz. Пригушење сигнала се примећује на нижим фреквенцијама, узроковано електронским филтрирањем микрофона и звучне картице, са карактеристичним фреквенцијама од 15 Hz и 25 Hz. На вишим фреквенцијама доминантна изобличења сигнала настају акустичким филтрирањем микрофона, које имају карактеристичне фреквенције око 9 kHz и 15 kHz. Утврђено је да је шум микрофона, такозвани flicker шум, занемарљиво мали у поређењу са сигналом и не утиче на облик сигнала. Међутим, кохерентан шум који потиче од система за модулацију интензитета извора светлости значајно утиче на облик сигнала у распону већем од 10 kHz. Показано је да се утицаји кохерентног шума у потпуности могу елиминисати коришћењем одговарајућег поступка корекције сигнала да би се добио прави сигнал генерисан узорком.</p>	
4	<p><u>Dragana K. Markushev, Marica N. Popović, Slobodanka P. Galović, Katarina Lj. Djordjević, Dragan D. Markushev, Jose Ordonez-Miranda, "Steady-state temperature component within an n-type silicon plate illuminated with a laser beam of modulated intensity", 18th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, July 6-10, 2019, Moscow, ICPPP20 Book of Abstracts, Eds. Mikhail Proskurin, (2019) 325-326</u></p>	

Као што је познато, динамичка компонента температуре у узорку генерише фотоакустички сигнал полупроводника. Међутим, у многим случајевима статичка компонента је такође битна како би имали комплетну слику комплексних физичких појава у узорку и правилно тумачили фотоакустички одзив у присуству фотогенерисаних носилаца. У овом раду дат је кратак резиме прелиминарних резултата за статичку и динамичку компоненту температуре са циљем детаљне процене утицаја фотогенерисаних носилаца на температурне расподеле у полупроводнику.

D. K. Markushev, S. Aleksic, D.S. Pantic, D. D. Markushev, M. D. Rabasovic, D. M. Todorovic, "Theoretical study of silicon membranes by solid state photoacoustics: thermoelastic properties in frequency domain", 18th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, September 6-10, 2015, Novi Sad, Serbia ICPPP18 Book of Abstracts, Eds. Dragan Markushev and Dragan Todorovic, (2015) 177

5

У оквирима фотоакустичних мерења силицијумски носачи (вејфери) су препознати као најприкладнији материјал за испитивање својства танких филмова, мембрана и вишеслојних система. Уочено је да је детаљна анализа еластичних својстава силицијумских мембрана веома важна за разумевање понашања компоненти МЕМС у фреквентном домену. У те сврхе у овом раду је примењен стандардни једнодимензионални термоеластични модел савијања плоче сталне дебљине која је подвргнута површинском загревању. Ови резултати омогућавају препознавање понашања термоеластичне компоненте као дела укупног фотоакустичког сигнала у областима модулативне фреквенције од 1 Hz до 5×10^6 Hz.

НАПОМЕНА: уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА

Кандидаткиња Драгана Китан Маркушев (1) положила је све испите предвиђене наставним планом и програмом на докторским студијама на Електронском факултету у Нишу (са просечном оценом 10.00), (2) успешно презентовала резултате истраживања у вези са научном заснованошћу теме за пријаву докторске дисертације, (3) пријавила тему докторске дисертације за коју је добијена сагласност од стране Електронског факултета и Универзитета у Нишу (*Одлука НСВ број 8/20-01-007/20-002 од 14.09.2020. године*) и (4) објавила потребан број радова из научне области у оквиру које је урађена докторска дисертација у предвиђеним научним часописима. Као првопотписани аутор, кандидаткиња има један научни рад објављен у часопису који издаје Универзитет у Нишу. Кандидаткиња је Факултету поднела захтев за одређивање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, као и одговарајући број примерака урађене докторске дисертације.

Имајући у виду претходне чињенице констатујемо да кандидаткиња Драгана Китан Маркушев испуњава све услове за оцену и одбрану докторске дисертације предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу, Статутом Електронског факултета и Стандардима и процедурама за обезбеђење квалитета у поступку уписа, организовања и завршетка докторских академских студија и израде и одбране завршног рада - докторске дисертације Електронског факултета у Нишу.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

У првом поглављу, *Увод*, кандидат даје кратак осврт на развој индустрије и примену силицијумских узорака, образлаже мотивацију тезе и развој фотоакустике у карактеризацији чврстих узорака, посебно полупроводника.

У другом поглављу, *Теорија транспортних процеса*, су разматране теоријске основе транспортних процеса у физици. Посебно је разматран транспорт честица, а посебно транспорт енергије у узорцима осветљеним модулисаним изворима зрачења. Дати су основи појмови дифузионих процеса и изведене основне дифузионе једначине које се користе за описивање транспорта честица преко промена њихових концентрација и за описивање транспорта енергије преко температурских расподела. Дат је општи приказ карактеристика полупроводника са описима процеса фотогенерације носилаца – електрона и шупљина, и њихове рекомбинације. Описан је модулисани транспорт фотогенерисаних носилаца, као основни транспорт честица у осветљеном полупроводнику без утицаја њиховог наелектрисања.

У трећем поглављу, *Температурне расподеле и полупроводнику*, представљен је преглед топлотних расподела у полупроводнику услед његовог осветљавања и утицаја фотогенерисаних носилаца на исте. Дате су основне карактеристике модулисаног транспорта топлоте. Изведене су основне температурске компоненте полупроводника: термализациона и рекомбинациона - површинска и запреминска. Указано је на велики

утицај фотогенерисаних носилаца кроз рекомбинационе компоненте на температурну слику полупроводника, како на осветљеној, тако и на неосветљеној страни.

У четвртом поглављу, *Фотоакустика полупроводника*, дат је опис теоријских основа фотоакустичке спектроскопије полупроводника. Објашњене су основе фототермалних наука као наука базираних на интеракцији светлости и материје, и конверзији апсорбоване енергије у топлоту. Дат је приказ различитих термалних ефеката карактеристичних за одређени начин трансфера енергије. Дефинисани су основни термални параметри узорка на основу којих се бирају физичке величине које се мере у експериментима и дефинишу детекционе методе фототермалних наука. Издвојена је фотоакустичка спектроскопија као неструктивна метода погодна за карактеризацију најразличитијих материјала, а посебно полупроводника. Теорија композитног клипа дата је у кратким цртама као основни теоријски модел којим се описује фотоакустика. Изведене су термодифузиона, термоеластична и плазмаеластична компонента укупног фотоакустичког сигнала помоћу којих се може описати двојако дејство фотогенерисаних носилаца у полупроводнику: као носилаца топлоте и као носилаца наелектрисања. Дати су основни принципи карактеризације полупроводника.

У петом поглављу, *Експериментална поставка*, дат је приказ најчешће коришћене експерименталне поставке у фотоакустици, тзв. методе отворене ћелије у трансмисионој конфигурацији. Осим основних делова, приказана су и уводна разматрања корекције експерименталног сигнала, неопходне методе за уклањање утицаја мерних инструмената на осетљива амплитудно-фазна мерења фотоакустичког одзива осветљеног узорка, ради добијања неискривљеног сигнала који се користи за карактеризацију материјала.

У шестом поглављу, *Резултати и дискусија*, обједињени су теоријски и експериментални резултати који се тичу утицаја фотогенерисаних носилаца на фотоакустички и температурски одзив полупроводника осветљених модулисаним изворима светлости. Анализа се заснива на проналажењу најповољнијих услова за уочавање ефеката фотогенерисаних носилаца у односу на дебљине узорка, стања њихових површина, квалитета полупроводничких материјала у односу на дефекте и концентрације нечистоћа, и понашање еластичног савијања као последице различитих температура или различитих концентрација носилаца на осветљеној и неосветљеној страни испитиваног узорка. Показана је непосредна веза између температурних расподела и фотоакустичког одзива узорка, као и различити обрасци понашања сигнала и температура у зависности од дебљине полупроводника повезаних са дифузионом дужином носилаца.

У седмом поглављу, *Закључна разматрања и правци будућих истраживања*, дата су закључна разматрања и предлози за могуће правце будућих истраживања.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Доказивањем истраживачких хипотеза ове докторске дисертације остварени су сви циљеви њене израде. Теоријска анализа концентрација фотогенерисаних носилаца и извора топлоте у силицијуму n-типа побуђеном фреквентно модулисаним извором светлости утврђене су најповољније вредности површинских брзина и времена живота носилаца за испитивање њиховог утицаја као носилаца топлоте на температурне расподеле на полупроводничким површинама. Показано је да њихова концентрација јако зависи од карактеристика површине и квалитета материјала узорка описаних брзином површинских рекомбинација и величином вредности времена живота носилаца. Извршена је детаљна анализа извора топлоте у узорку, чиме је показано да ефекти фотогенерисаних носилаца на расподеле површинских температура. Ова врста анализе омогућава лакши одговор на питање која врста експерименталне поставке, трансмисиона или рефлексiona, је погодна за анализу утицаја слободних носилаца као носиоца топлоте. Извршена теоријска анализа утицаја фотогенерисаних носилаца на динамичку расподелу температуре и термоеластичну компоненту фотоакустичког сигнала силицијума n-типа за различите дебљине показује је да се пикови, који се појављују на вишим фреквенцијама модулације генеришући снажне термоеластичне ефекте, могу сматрати поузданим показатељима постојања фотогенерисаних носилаца и њиховог утицаја као носилаца топлоте у посматраним узорцима. Експериментално су потврђене теоријске претпоставке да фотогенерисани носиоци делују на термоеластичну компоненту фотоакустичког сигнала на два начина, што је изузетно значајно за анализу промене осетљивости MEMS уређаја заснованих на силицијумским мембранама. Утицај носилаца као носилаца наелектрисања најбоље се огледа код плазма-танких узорка, где је по први пут детектован утицај плазмаеластичне компоненте на укупни фотоакустички сигнал на довољно високим фреквенцијама модулације.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

У овој тези представљена је комплетна теоријска и експериментална анализа утицаја фотогенерисаних носилаца на динамичку компоненту расподела температура и термоеластичну компоненту фотоакустичког сигнала силицијума *n*-типа осветљеног модулисаним извором монохроматске светлости за различите дебљине узорка, различите квалитете њихових површина и различито време живота фотогенерисаних носилаца. Највећи део анализе заснива се на поређењу амплитуде и фазе температурних и фотоакустичних сигнала са и без присуства фотогенерисаних носилаца. Посебна пажња посвећена је проналажењу карактеристичних образаца понашања који су уочени кроз присутност јасно изражених пикова односа амплитуда и разлика фаза између температура на предњој и задњој површини узорка. Постојање ових пикова се може тумачити као недвосмислени показатељи присуства фотогенерисаних носилаца у полупроводничком узорку. Резултати приказани у овој тези указују на то да се ово смањење амплитуде термоеластичне компоненте може одразити на промену термоеластичног одзива узорка тј. на различити интензитет његовог савијања. Потенцијална примена овог истраживања може се наћи унутар контроле осетљивости Микро-Електро-Механичких Система (MEMS). Осветљавањем мембрана могу да променити њихова термоеластична својства, тј. флексибилност, а самим тим и осетљивост самог уређаја.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидаткиња је током процеса израде докторске дисертације показала висок степен самосталности, те можемо констатовати да је докторска дисертација резултат њеног самосталног научног рада. У прилог овој констатацији говори чињеница да је кандидаткиња самостално дефинисала структуру докторске дисертације, циљеве истраживања и опис предмета истраживања, као и истраживачка питања - хипотезе.

На основу систематизације теоријских сазнања и примене адекватне експерименталне поставке, кандидаткиња је самостално спровела истраживање и формулисала аргументоване, корисне и применљиве закључке. Након обављеног истраживања, кандидаткиња је јасно указала на постојећа ограничења, као и правце будућих истраживања. Читав поменути процес праћен је уважавањем сугестија и коментара чланова Комисије.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

У докторској дисертацији су пронађени оптимални услови коришћења силицијумских МЕМС мембрана због њихове способности провођења топлоте и одржања еластичних особина током осветљавања и генерације слободних носилаца у њима.

На основу свега претходно наведеног Комисија констатује да је докторска дисертација квалитетно урађена у складу са Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Електронског факултета у Нишу.

Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију кандидаткиње Драгане Китан Маркушев под називом “Утицај фотогенерисаних носилаца наелектрисања на термалне и еластичне особине силицијума *n*-типа” и предлаже Наставно-научном већу Електронског факултета у Нишу да прихвати Извештај о оцени докторске дисертације и одобри њену јавну одбрану.




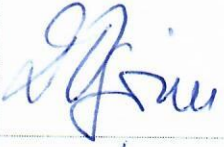

КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о
именовању Комисије

НСВ број 8/20-01-010/20-025

Датум именовања Комисије

22.12.2020.

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	др Сања Аексић, доцент Микроелектроника и микросистеми (Научна област)	Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	председник 
2.	др Весна Пауновић, ванредни професор Материјали за електронику (Научна област)	Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 
3.	др Слободанка Галовић, научни саветник Физичка електроника (Научна област)	Институт за нуклеарне науке "Винча" у Београду (Установа у којој је запослен)	члан 
4.	др Војкан Давидовић, доцент Микроелектроника и микросистеми (Научна област)	Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 
5.	Др Драган Пантић, редовни професор Микроелектроника и микросистеми (Научна област)	Електронски факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	члан 

Датум и место:

.....