

Примљено	24.04.2012		
Орг. јед.	Број	Прилог	Вредност
	26/2		

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

1. Датум и орган који је именовео комисију
Наставно-научно веће Природно-математичког факултета Универзитета у Приштини
27. 02. 2012. (одлука бр. 26/1)
2. Састав комисије:
 1. проф. др Драган Петковић, Природно-математички факултет, Косовска Митровица,
(ужа научна област: примењена физика, година избора 2004.)
 2. др Зоран Павловић, ванредни професор, Природно-математички факултет, Ниш,
(ужа научна област: примењена физика, година избора 2009.)
 3. др Михајло Одаловић, доц., Природно-математички факултет, Косовска Митровица,
(ужа научна област: примењена физика, година избора 2010.)

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:
Тијана (Слободан) Кевкић
2. Датум рођења, општина, држава:
26.06.1974., Косовска Митровица, Србија
3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија –
мастер, стечени стручни назив:
Природно-математички факултет Универзитета у Приштини
Физика
Професор физике
4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских
студија:
Одобрена израда докторске дисертације одлуком Сената Универзитета у
Приштини број 08-2/200 од 08.10.2008.
5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:
Природно-математички факултет Универзитета у Крагујевцу
'Третман повратне тачке у ADK теорији укључујући не-нулти почетни импулс'
Примењена физика
15. 07. 2004.
6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:
Примењена физика

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

**Класични и квантно-механички модели расподеле и транспорта
носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника**

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација је написана ћирилицом на 153 стране А4 формата компјутерски обрађеног текста (фонт Times New Roman, 12pt, једноструки проред), садржи 63 слика, дијаграма и графикона и 7 табела, и у њој аутор цитира 128 референци од чега 10 својих.

Докторска дисертација је подељена на седам глава и то:

1. Увод
2. Физика површинских појава у полупроводнику
3. Класични модели који описују површински слој полупроводника
4. Квантно механички ефекти у површинском слоју полупроводника
5. Методе за самосагласно решавање Шредингерове и Пуасонове једначине у инверзном слоју
6. Експлицитни модел површинског потенцијала који узима у обзир квантно механичке ефекте у површинском слоју
7. Закључак

Све главе, осим уводне и закључне, подељене су на више поглавља, а нека поглавља на одељке.

Поред тога, у оквиру три додатка, изложени су неки резултати, до којих се дошло током истраживања, али нису непосредно везани за основну тему ове докторске дисертације.

На крају докторске дисертације дат је списак коришћене литературе.

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

У уводној глави кандидат концизно и директно износи разлоге који су определили избор теме истраживања. Посебно је назначена актуелност теме обзиром да је савремена CMOS технологија омогућила развој полупроводничких компонената до димензија које су биле незамисливо мале до пре само неколико година. Као главни циљ својих истраживања кандидат је поставила потребу да се модификују постојећи и развију нови класични и квантномеханички модели расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у слојевима уз површину полупроводника који би омогућили тачно и брзо израчунавање свих карактеристика важних за функционисање MOS транзистора.

У другој глави изложени су основни принципи рада MOS структуре, дефинисана су три основна стања на површини полупроводника и параметри важни за њен рад.

У оквиру треће главе анализирани су класични модели MOS транзистора који се заснивају на одређеним физичким параметрима и развијен је нов експлицитан модел расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника заснован на анализи површинског потенцијала у функцији примењеног напона.

Квантно механички третман расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника и анализа услова када је он неопходан предмет су разматрања у четвртој глави.

Пета глава описује методе за самосагласно решавање здружене Шредингерове и Пуасонове једначине у инверзном слоју. Највећа пажња посвећена је апроксимацији варијације параметара таласне функције која је применљива у граничном случају електричног квантног лимита у којем се може сматрати да је само најнижа подзона насељена електронима.

У шестој глави развијен је квантно механички модел расподеле и транспорта носилаца наелектрисања заснован на анализи површинског потенцијала. Корекција површинског потенцијала услед квантно механичких ефеката унета је у класичан модел преко модификовања одговарајуће функције површинског потенцијала. Предложен је нови облик за параметар који контролише континуалност зависности површинског потенцијала од примењеног напона у областима прелаза између слабе и умерене, као и између умерене и јаке инверзије. Поређење резултата за површински потенцијал, наелектрисање и капацитивност MOS структуре добијених из аналитичког квантно механичког модела са нумеричким самосагласним решењима здружене Шредингерове и Пуасонове једначине показује одлично слагање у случајевима када је за параметар глаткости узета функција предложена у овој дисертацији. Резултати изложени у овој глави су главни допринос ове докторске дисертације.

На крају, у оквиру седме главе, дат је кратак преглед најважнијих закључака који се односе на разматрану проблематику, истакнути су најзначајнији резултати и назначене идеје за даља истраживања.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Радови у међународним часописима

1. **Tijana S. Kevkić**, Mhajlo T. Odalović, Dragan M. Petković: "A stochastic model of gamma-ray induced oxide charge distribution and threshold voltage shift of MOS transistor", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, Vol. XXVII, No. 1, (March 2012) (M23, IF 0,706)

Радови у зборницима радова са међународних конференција штампани у целини

2. **T. S. Kevkić** and D. M. Petković: "Resistivity of Polycrystalline Silicon Films with Grain and Grain Boundary Trapping States", *Proc. of XVII Symposium on Condensed Matter Physics - SFKM 2007*, pp. 209-212. Vršac – Serbia 2007.
3. **T. S. Kevkić** and D. M. Petković: "An Analysis of Some Semi-Classical and Quantum Mechanical Surface Potential Models of MOS Inversion Layer", *Proc. of 26th International Conference on Microelectronics (MIEL 2008)*, vol. 1, pp. 197-200. Niš, Serbia 2008.
4. **T. S. Kevkić**, D. M. Petković: "Some analytical solutions of nonlinear poisson equation for inversion layer of mos structure", *Proc. of International Conference "Mathematical and Informational Technologies" (VIII Conference "Computational and Informational Technologies for Science, Engineering and Education") – MIT 2009*, Kopaonik, Serbia
5. D. Z. Mitic, **T. S. Kevkić**, D. M. Petković: "Characterization of the heavy doped semiconductors using the analytical approximations of the fermi integrals", *Proc. of International Conference "Mathematical and Informational Technologies" (VIII Conference "Computational and Informational Technologies for Science, Engineering and Education") – MIT 2009*, Kopaonik, Serbia
6. **T. S. Kevkić** and D. M. Petković: "A Quantum Mechanical Correction of Classical Surface Potential Model of MOS Inversion", *Proc. of 27th International Conference on Microelectronics (MIEL 2010)*, vol. 1, pp. 115-118. Niš, Serbia 2010.

Радови у зборницима радова са међународних конференција штампани у изводу

7. **T. Kevkić**, D. Petković: "An Advanced Surface Potential Model of MOS Inversion Layer Incorporating the Quantum Mechanical Effects", Abstract PSB 44, *Twelfth Annual Conference of The Yugoslav Materials Research Society YUCOMAT 2010, Herceg Novi, Montenegro*, p. 132 sept. 2010.

Радови у зборницима радова са домаћих конференција штампани у целини

8. **T. S. Kevkić** and D. M. Petković, "Класични и квантномеханички модели за површински потенцијал и капацитивност MOS структуре у условима јаке инверзије", *Зборник радова 53. Конф. ETRAN, MO1.4. Врњачка бања, Србија, 2009.*
9. **Tijana S. Kevkić** and Dragan M. Petković: "Resistance of Polysilicon Films with Grain Trapping States", *Proc. of IX International Scientific Opencast Mining Conference (OMC 2010)*, pp. 70-75. Vrnjačka banja, Serbia 2010.
10. **Tijana S. Kevkić** and Dragan M. Petković: "Approximate Analytic Results for Surface Potential in n-type Si Inversion", *Proc. of IX International Scientific Opencast Mining Conference (OMC 2010)*, pp. 76-83. Vrnjačka banja, Serbia 2010.

VII ZAKЉUČCI OДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Најважнији резултати које је кандидат мр Тијана Кевкић изложила у својој докторској дисертацији „**Класични и квантно-механички модели расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника**“ могу се систематизовати на следећи начин:

- Проучавајући физику површинских појава у полупроводницима кандидат је дошла до следећих закључака:
 - Зависно од примењеног напона и знака већинских носилаца наелектрисања на површини полупроводника се могу јавити три стања: акумулација, осиромашење и инверзија;
 - Да би се формирао инверзни слој на металну електроду MOS структуре потребно је довести напон (напон прага) довољан да у површинском слоју полупроводника концентрација мањинских носилаца наелектрисања постане већа од концентрације већинских носилаца у унутрашњости;
 - Капацитивност идеалне MOS структуре мења се са величином примењеног напона, при чему је код MOS структура са тањим слојем оксида јаче изражена зависност капацитивности од примењеног напона;
 - Разлика излазних радова метала и полупроводника као и наелектрисања или центри захвата који могу постојати у оксиду мењају напон прага MOS структуре.
- Развијајући експлицитан модел расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника заснован на анализи површинског потенцијала кандидат је:
 - Полазећи од Пуасонове једначине за електростатички потенцијал и применом Гаусовог закона добила релације за густину наелектрисања индукованог у површинском слоју полупроводника и јачину површинског електричног поља;
 - Извела имплицитну релацију између површинског потенцијала и напона на гејту која описује површински слој полупроводника;
 - Предложила итеративан поступак за нумеричко решавање добијене имплицитне једначине;
 - Усвајањем апроксимације стрмог канала и раздвајањем области слабе инверзије од области јаке инверзије добила апроксимативне изразе за површински потенцијал у слабој и јакој инверзији;
 - Уводећи емпиријску функцију $f(V_G, V_{ch})$ и параметар глаткости ε добила експлицитну релацију за површински потенцијал која важи у целој активној области рада MOS транзистора, тј. од осиромашења до јаке инверзије.
- Разматрајући случај високих концентрација примеса у полупроводничкој основи и танких оксида гејта, што доводи до интензивног кривљења енергетских зона у полупроводнику, кандидат је:
 - Анализирао услове за стварање потенцијалне јаме у површинском слоју полупроводника која је довољно уска да изазове значајно квантовање енергије носилаца наелектрисања у правцу нормалном на површину основе;
 - Описала кретање носилаца наелектрисања које је слободно у две просторне димензије (паралелно површини полупроводника), а квантовано у трећој просторној димензији (нормално на површину полупроводника);
 - Утврдила да свака својствена вредност енергије добијена решавањем Шредингерове једначине представља енергетски ниво за кретање електрона у правцу нормале на површину полупроводника и да сваки од тих нивоа формира дводимензионалну параболичку подзону;

- Показала да се концентрација носилаца наелектрисања у инверзном слоју може одредити решавањем система здружене Шредингерове и Пуасонове једначине;
 - Предложила поступак аналитичког решавања система здружене Шредингерове и Пуасонове једначине у граничном случају електричног квантног лимита преко увођења одговарајућих бездимензионалних променљивих, што омогућава одређивање енергије најнижег стања електрона у инверзном слоју, средњег растојања електрона од међуповршине и површинског потенцијала у функцији бездимензионалне величине – односа наелектрисања инверзног и осиромашеног слоја.
- Анализирајући апроксимативне методе за самосагласно решавање здружене Шредингерове и Пуасонове једначине у инверзном слоју кандидат је закључила:
- Решење Шредингерове и Пуасонове једначине у апроксимацији троугаонog потенцијала добија се у облику Airy-јевих функција;
 - Добијене својствене вредности енергије задовољавајуће се слажу са резултатима нумеричких израчунавања нарочито за више енергетске нивое, али је задовољавајуће слагање пронађено и за три најнижа нивоа.
 - Решење Шредингерове и Пуасонове једначине у апроксимацији варијације параметара таласне функције, која претпоставља да је само најнижа енергетска зона насељена електронима, даје енергију најнижег дозвољеног нивоа која се одлично слаже са резултатима нумеричких израчунавања.
- Узимајући у обзир квантно механичке ефекте модификовањем одговарајуће функције површинског потенцијала, односно новим обликом релације за параметар ε који контролише континуалност зависности површинског потенцијала од примењеног напона у областима прелаза између слабе и умерене, као и између умерене и јаке инверзије кандидат је:
- Анализирала пораст површинског потенцијала у условима јаке инверзије код MOS структура са повећаном концентрацијом примеса у супстрату и смањеном дебљином оксида;
 - Упоредила концентрацију електрона у инверзном слоју у случају када је проводна зона због квантовања носилаца наелектрисања подељена на подзоне са концентрацијом електрона у случају када се проводна зона посматра као континуум стања, при истом напону на гејту;
 - Објаснила да се исти ниво инверзије у случају када се узме у обзир квантовање носилаца наелектрисања у инверзном слоју може достићи ако се површински потенцијал увећа за одговарајућу квантно механичку корекцију;
 - Пронашла најбољи начин за укључивање квантномеханичке корекције у постојећи класичан експлицитан модел који описује површински слој полупроводника, модификовањем одговарајуће функције глаткости;
 - У модификованој функцији глаткости предложила нови израз за параметар ε који контролише континуалност површинског потенцијала у целој активној области рада MOS структуре.
- На основу израчунатих зависности површинског потенцијала у функцији напона на гејту, наелектрисања инверзног слоја у функцији површинског потенцијала и капацитивности MOS структуре у функцији напона на гејту помоћу класичног имплицитног модела користећи нумерички итеративни метод, класичног експлицитног модела са константним параметром ε и параметром ε модификованим према предложеним релацијама и узимањем у обзир квантно механичке поправке површинског потенцијала и квантно механичког нумеричког CV симулатора, кандидат је:
- Учила да се резултати које даје апроксимативни експлицитни модел са

параметром ϵ према предложеној релацији добро слажу са резултатима добијеним нумеричким решавањем одговарајуће класичне једначине, односно здружене Пуасонове и Шредингерове једначине у случају када квантномеханички ефекти долазе до изражаја;

- Запазила да је у случају нижих концентрација примеса квантовање енергије носилаца у инверзном слоју слабије изражено тако да израчунате зависности површинског потенцијала од напона на гејту, капацитивности од напона на гејту и наелектрисања инверзног слоја од површинског потенцијала мање одступају једна од друге, као и да је у условима слабије инверзије, то одступање чак у задовољавајућим границама;
- Закључила да у случају веће концентрације примеса одступање израчунатих вредности површинског потенцијала, наелектрисања инверзног слоја и капацитивности према класичним моделима и моделима који узимају у обзир квантомеханичке ефекте није занемарљиво;
- Утврдила да је то одступање нарочито изражено у условима јаке инверзије, што значи да се квантовање енергије носилаца у инверзном слоју не може занемарити и да у том случају квантомеханички модел даје боље слагање.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Резултати изложени у овој докторској дисертацији су приказани на јасан и прегледан начин, користећи велики број дијаграма који сликовито и експлицитно приказују добијене и анализиране зависности. Добијени резултати су анализирани у складу са научним правилима. Изведени закључци су концизни, директни и у потпуности одговарају резултатима презентираних истраживања. Чињеница да је прегледана веома обимна литература, омогућила је кандидату детаљно поређење својих резултата са резултатима других аутора. Презентација и анализа резултата показују да је кандидат у потпуности овладао научним методама и проблемима којима се ова дисертација бави.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:

✓ Након прегледа урађене докторске дисертације под насловом „Класични и квантно-механички модели расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника“, кандидата мр Тијана Кевкић, комисија је утврдила следеће:

1. Докторска дисертација је урађена у складу са образложењем датим у пријави теме.
2. Докторска дисертација садржи све битне елементе: увод, централни део (подељен у пет глава), закључак и обиман списак коришћене литературе.
3. Ова докторска дисертација представља оригиналан научни допринос јер:
 - а) Даје обиман и детаљан литературни преглед физике површинских појава у полупроводницима које су битне за функционисање MOS транзистора и утичу на његове карактеристике;
 - б) Садржи потпуно и детаљно извођење свих релација које су битне за одређивање расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника и које описују класични модел MOS транзистора заснован на анализи површинског потенцијала у функцији примењеног напона;
 - в) Даје анализу услова при којима је потенцијална јама у површинском слоју полупроводника довољно уска да изазове значајно квантовање енергије носилаца наелектрисања у правцу нормалном на површину и показује да је у том случају концентрација носилаца наелектрисања у инверзном слоју одређена решењем система здружене Шредингерове и Пуасонове једначине;

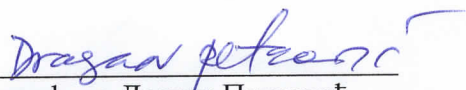
- г) Упоредњује апроксимативне методе за самосагласно решавање здружене Шредингерове и Пуасонове једначине у инверзном слоју полупроводника;
- д) Предлаже најбољи начин за укључивање квантномеханичке корекције у постојећи класичан експлицитан модел који описује површински слој полупроводника, модификовањем одговарајуће функције глаткости и коришћењем нових израза за параметар ε који контролише континуалност површинског потенцијала у целој активној области рада MOS структуре;
- е) На основу израчунатих зависности показује да се резултати које даје апроксимативни експлицитни модел са параметром ε према предложеним релацијама добро слажу са резултатима добијеним нумеричким решавањем одговарајуће класичне једначине, односно здружене Пуасонове и Шредингерове једначине у случају када квантномеханички ефекти долазе до изражаја;
- ж) Отвара нове правце у развоју класичних и квантно-механичких модела расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника.
4. У овој докторској дисертацији нису уочени недостаци који би битно угрозили њену вредност. Наравно, да је кандидат имала бар елементарне услове за експериментални рад то би у сваком случају подигло, и овако висок, квалитет овог рада.

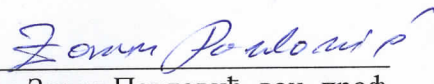
X ПРЕДЛОГ:

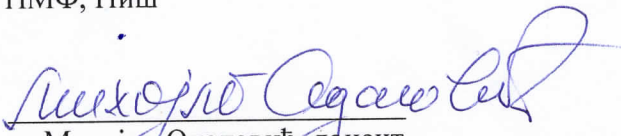
- ✓ На основу укупне оцене дисертације, комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Природно-математичког факултета Универзитета у Приштини да **ПРИХВАТИ** докторску дисертацију *“Класични и квантно-механички модели расподеле и транспорта носилаца наелектрисања у површинским слојевима полупроводника”* кандидата **мр Тијане Кевкић** и **ОДОБРИ** њену одбрану.

У Косовској Митровици
23. 04. 2012.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


1. проф. др Драган Петковић,
ПМФ, Косовска Митровица


2. др Зоран Павловић, ван. проф.,
ПМФ, Ниш


3. др Михајло Одаловић, доцент,
ПМФ, Косовска Митровица