

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Дејана Вељковића

Одлуком бр. 951/3 од 28.04.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Дејана Вељковића под насловом

„Моделовање механичког напрезања у полупроводничким наноструктурама“

После прегледа достављене докторске дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Мр Дејан Вељковић магистрирао је 29.12.1997. године на Електротехничком факултету у Београду на тези „Симулација рада једне аналогне асоцијативне меморије са повратном спрегом“, под руководством проф. др. Дејана Раковића.

Кандидат је 28.05.2015. године пријавио тему за израду докторске дисертације. Комисија за студије трећег степена разматрала је 04.06.2015. године предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање, које је потом именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр 951/1 од 30.06.2015. године). Наставно-научно веће Електротехничког факултета је 10.07.2015. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 951/2), а Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је дало 15.09.2015. године сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука 61206-3781/2-15).

Кандидат је 07.04.2016. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена је 12.04.2016. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације, па је Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 951/3 од 28.04.2016. године).

##### 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Дејана Вељковића припада области Техничких наука - Електротехника, и ужој научној области Електротехнички материјали и технологије. За ментора докторске дисертације одређен је др Дејан Раковић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду, биран за ужу научну област Савремених материјала и технологија.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Дејан Велковић рођен је 26.10.1966. године у Урошевцу. Основну и средњу школу завршио је у Горњем Милановцу. У средњој школи је на републичким такмичењима из математике и физике више пута освајао једно од прва три места. У периоду 1985-1986 служио је војни рок. На Електротехнички факултет у Београду уписао се 1986. године, где је 04.03.1992. године дипломирао на Одсеку за електронику, са просечном оценом 9,20. На Електротехничком факултету у Београду магистрирао је 29.12.1997. године.

По завршетку факултета радио је кратко време у Дирекцији за развој и инвестиције ЈП ПТТ САОБРАЋАЈА "СРБИЈА", а у периоду 1993-2008 био је запослен на Електротехничком факултету у Београду, где је држао наставу из предмета Технологија електротехничких материјала, Електротехнички материјали, Физика материјала, Основи биофизике, Биоматеријали. Од 2008. године запослен је на месту предавача на Високој школи техничких струковних студија у Чачку, где ради и данас, као предавач из више предмета на Електротехничком одсеку школе.

Учествовао је на више научно-истраживачких пројеката Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије. Објавио је седам радова, од којих два у међународним часописима са Impact фактором, два на међународним конференцијама, два у националним часописима, и један на националној конференцији. Коаутор је две књиге.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на 101 страни, и садржи 30 слика и 3 табеле. Састоји се из насловне стране и кратког резимеа, написаних на српском и енглеском језику, садржаја, и текста дисертације подељеног на седам целина:

1. Увод;
2. Глава 1: Квантне тачке;
3. Глава 2: Механичко напрезање у анизотропним кристалним материјалима;
4. Глава 3: Утицај механичких деформација на електронску структуру полупроводника;
5. Глава 4: Механичка деформација унутар вертикалног стека квантних тачака;
6. Закључак;
7. Литература.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Увод приказује проблематику којом се бави докторска дисертација, мотив за њену израду, уз кратки опис садржаја сваког поглавља дисертације.

Глава 1 (Квантне тачке) описује основне појмове везане за квантне тачке и њихове особине. Објашњено је у чему се састоји њихова разлика у односу на класичне полупроводнике, описани су основни принципи инжињеринга оптичких особина квантних тачака, и представљене су перспективе њихове примене у областима физичке електронике, електронике и природних наука, а посебно наномедицине.

Глава 2 (Механичко напрезање у анизотропним кристалним материјалима) приказује полазне основе у области механичког напрезања у анизотропним срединама, потребне за даљу анализу у дисертацији.

Глава 3 (Утицај механичких деформација на електронску структуру полупроводника) описује кр пертурбациону теорију за израчунавање електронске структуре енергетских нивоа код полупроводника, као и њену примену у случају дејства механичких деформација, са утицајем

деформација на електронску структуру полупроводника, од којих се састоје вишеслојне III-V полупроводничке структуре које су предмет докторске дисертације.

Глава 4 (Механичка деформација унутар вертикалног стека квантних тачака) садржи допринос докторске дисертације. Предмет анализе докторске дисертацији су tzv. КТ стекови – наноструктуре у облику вертикално поравнатих полупроводничких квантних тачака без дислокација, уграђених у супстрат полупроводника друге врсте, за епитаксијални раст у кристалном правцу (001). Изведени су аналитички изрази за деформацију унутар оба полупроводника у случају када су дебљине квантних тачака и супстратских одстојника довољно мале у односу на попречне димензије стека. У конкретним случајевима, када се стек састоји од  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  квантних тачака унутар GaAs супстрата, где  $x$  узима вредности 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0, израчунати резултати приказани су графички. Од електронских својстава наноструктуре израчунате су и графички представљене промене растојања дна проводне зоне од врха зона лаких и тешких шупљина у случају свих испитаних наноструктура. У овој глави је дата и дискусија свих добијених резултата.

Закључак рекапитулира главне доприносе дисертације, у извођењу апроксимативних аналитичких изрази за деформацију унутар наноструктура КТ стекова, проналажењу параметра који је технолошки могуће лако контролисати за промену ефективног енергетског процепца наноструктуре, и перспективама коришћења оваквих КТ стекова у оптичким телекомуникацијама.

Литература садржи списак од 102 референце коришћене у изради дисертације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Дисертација проучава механичко напрезање унутар вертикалног стека квантних тачака, са последицама на промену фундаменталног параметра материјала – ефективног енергетског процепца. Тема дисертације је повезана са најсавременијим инжињерингом полупроводничким материјала – наноструктурама које садрже квантне тачке. Конкретно, тема дисертације су технолошки оствариве полупроводничке наноструктуре у облику вертикално и периодично поређаних квантних тачака – КТ стекова. Овакве наноструктуре могу наћи потенцијалну примену у полупроводничкој ласерској технологији, или за израду соларних ћелија.

Механичко напрезање, које потиче од разлике у параметрима кристалне решетке полупроводника из којих се наноструктура састоји, има велики утицај на електронске и оптичке особине наноструктуре. Зато је израчунавање деформације код наноструктура од фундаменталног значаја приликом пројектовања наноструктуре за конкретну примену.

До данас није објављен ниједан научни рад у коме су изведени аналитички изрази за израчунавање механичких деформација унутар КТ стекова. Известан број постојећих радова из ове области бавио се израчунавањем механичких деформација применом нумеричких метода, и то за КТ стекове састављене од мањег броја квантних тачака. У дисертацији су изведени аналитички изрази за деформацију унутар оба полупроводника унутар КТ стека, у зависности од параметра који је технолошки могуће контролисати – односа броја монослојева у квантној тачки и у периоду стека ( $\xi$ ). Изрази су изведени за случај најчешће коришћеног кристалног правца епитаксијалног раста (001), а у случају када су дебљине квантних тачака и супстратских одстојника довољно мале у односу на попречне димензије стека.

С обзиром на све наведено, добијени резултати представљају оригинални научни допринос, а односе се на најсавременији инжињеринг данас коришћених полупроводничких материјала, који у будућности може имати велику перспективу у разним применама.

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

У изради докторске дисертације коришћене су 102 референце.

Референце [1-44] односе се на појмове везане за квантне тачке, њихове особине и садашње примене, као и перспективе потенцијалних примена у будућности. Мањи број референци из ове групе повезан је са објашњењима везаним за конкретне појмове и природне феномене који се спомињу у тексту.

Референце [45-102] односе се на проблематику са којом је повезан допринос докторске дисертације.

Доста наведених референци објављено је последњих неколико година, и односе се на најновија достигнућа у области.

Све наведене референце кандидат је коректно цитирао, а њихов списак показује да је кандидат извршио детаљну анализу постојеће литературе из области, узимајући у обзир и најновије публикације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У дисертацији су изведени аналитички изрази за деформацију унутар КТ стека, на основу добро познатих израза из области анизотропних еластичних особина кристалних материјала, и на основу познатих чињеница везаних за кохерентни раст наноструктура састављених од моно-кристалних слојева различитих полупроводничких материјала. Независно променљива у изразима за деформацију је параметар који је могуће технолошки контролисати – однос  $\xi$  – броја моно-слојева унутар квантне тачке и броја монослојева у једном периоду стека.

Наведене су и све полазне претпоставке важне за применљивост коришћеног модела, а потпуно је образложена и оправданост модела у сваком његовом детаљу, битном за извођење аналитичких израза.

Изведени резултати примењени су на конкретне олупроводничке наноструктуре, КТ стехеове састављене од  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  квантних тачака унутар GaAs супстрата, где  $x$  узима вредности 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0, и резултати израчунати на основу добијених аналитичких израза приказани су графички.

Након тога, на основу добијених аналитичких израза за деформацију, као и у литератури познатих израза за енергије дна проводне зоне и врхова зоне лаких и тешких шупљина (који су последица добро познате кр пертурбационе теорије за израчунавање електронске структуре енергетских нивоа полупроводника, уз коришћени б-зонски модел), добијене се и графички представљене промене растојања дна проводне зоне од врха зона лаких и тешких шупљина, у зависности од односа  $\xi$ .

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени у облику изведених аналитичких израза за деформацију унутар КТ стека могу се користити свуда где се могу користити полупроводнички материјали са уграђеним квантним тачкама, а то су ласери, фотодетектори и сунчеве ћелије, и где је комерцијално исплативо и технолошки изводљиво решење са квантним тачкама распоређеним у КТ стехеове.

Резултати омогућавају тачан прорачун геометријских димензија наноструктуре, у случају конкретне примењене комбинације полупроводника, а додатна погодност је што се ови параметри могу фино подешавати путем параметра  $\xi$  који је технолошки могуће прецизно котролисати – односа броја монослојева унутар квантне тачке и броја монослојева у једном периоду стека.

Резултати добијени на конкретним КТ стехеовима састављеним од  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  квантних тачака унутар GaAs супстрата, показују да се у оваквом облику, уз веома лако налажење потребне вредности моларног удела  $x$ , могу потенцијално користити за различите примене.

На пример, наноструктура који би се састојала од стехеова  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  квантних тачака унутар GaAs супстрата, са различитим односима  $\xi$ , могла би се користити за израду активног слоја широкопојасног ласера у оптичким телекомуникацијама, где се користе материјали енергетског процепа  $0,7410 \div 0,9851$  eV, који одговарају таласним дужинама опсега  $1260 \div 1675$  nm. Квантне тачке у стехеовима са различитим односом  $\xi$ , које би се налазиле унутар активног слоја ласера,

представљале би групе у којима ефективни енергетски процес варира, покривајући читав континуални интервал таласних дужина, што би се могло користити и за генерисање оптичког сигнала модулисаног по таласним дужинама. На пријемној страни био би фотодетектор са активним слојем од истог материјала, чиме би била остварена могућност пријема широкопојасног сигнала.

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

На основу прегледане докторске дисертације, Комисија је оценила да је кандидат постигао висок степен способности за самостални научни рад. Кандидат је током израде дисертације показао:

- Систематичност у одабиру и коришћењу одговарајуће литературе за докторску дисертацију, где је коришћено и доста најновијих објављених радова;
- Научну зрелост у уочавању чињеница које недостају у објављеној литератури, а које би било веома корисно испитати;
- Способност у правилном постављању математичког модела за конкретан проблем, и његовог исправног решавања уз извођење одговарајућих аналитичких израза.

Кандидат је показао и одлично уочавање потенцијалних примена оваквих полупроводничких наноструктура, јер је на основу добијених и графички приказаних резултата исправно уочио где би оне потенцијално могле бити примењене.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Допринос докторске дисертације се састоји у:

(1) Извођењу апроксимативних аналитичких израза за деформацију унутар наноструктура облика вертикалног стека квантних тачака - КТ стека, у случају равних тачака, мале дебљине у односу на полупречник стека, а за најчешће коришћени кристални правац епитаксијалног раста (001), поготову што до сада није објављен ниједан научни рад у коме су изведени аналитички изрази за израчунавање механичких деформација унутар КТ стекова;

(2) Проналажењу параметра који је технолошки могуће лако контролисати (а то је управо  $\xi$  – однос броја монослојева унутар квантне тачке и броја монослојева у једном периоду стека), чијим би мењањем у неком интервалу била могућа промена ефективног енергетског процеса наноструктуре, што би омогућило читав низ примена које диктира величина енергетског процеса као фундаментални параметар у полупроводничким технологијама.

(3) Перспективи коришћења нових материјала на бази оваквих КТ стекова са променљивим односом  $\xi$  броја монослојева унутар квантне тачке и периода КТ стека. Материјал који би се састојао од стекова квантних тачака са различитим односима  $\xi$ , могао би се користити за израду активног слоја широкопојасног ласера у оптичким телекомуникацијама. Квантне тачке у стековима са различитим односом  $\xi$ , које би се налазиле унутар активног слоја ласера, представљале би групе у којима ефективни енергетски процес варира, покривајући читав континуални интервал таласних дужина, па би се то могло користити и за генерисање оптичког сигнала модулисаног по таласним дужинама. На пријемној страни би био фотодетектор са активним слојем од истог материјала, чиме би била остварена могућност пријема широкопојасног сигнала.

## 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Изведени апроксимативни аналитички изрази за деформацију унутар наноструктура облика вертикалног стека квантних тачака – КТ стека, имају велики практичан и теоретски значај. Практичан значај, јер је сада за овакве структуре, које се састоје од различитих врста полупроводника, веома лако могуће израчунати деформацију, а на основу ње и електронску структуру енергетских нивоа. Теоретски значај, јер су добијени готови аналитички изрази, што би истраживачима који би се бавили оваквом врстом полупроводничких наноструктура, у огромној мери олакшало посао. Раније се анализа оваквих структура по правилу вршила нумерички, и то за мањи број тачака у стеку, док је софтвер за конкретан прорачун од случаја до случаја био развијан најчешће од стране сваког појединачног истраживача, тако да су до сада били потребни велики напори у прављењу сопствених физичких модела, и писању и тестирању софтвера.

Проналажење параметра који је технолошки могуће лако контролисати – параметра  $\xi$ , има такође велики практични и теоретски значај. Наиме, контролом односа броја монослојева унутар квантне тачке и броја монослојева у једном периоду стека, као и експлоатацијом његових вредности из интервала где величину ефективног енергетског процепа одређују лаке шупљине (јер је динамика промене ефективног енергетског процепа у том интервалу доста већа), омогућује се лако и прецизно подешавање величине ефективног енергетског процепа, што је веома важно у многим применама.

На пример, израда широкопојасног ласера са активним слојем са уграђеним стековима варијабилног односа  $\xi$ , била би од великог значаја због могућности модулације оптичког сигнала по таласним дужинама, и самим тим и боље искоришћености преносних опсега оптичких влакана, а тиме и повећања преносног капацитета, тј. повећања брзине преноса дигиталног сигнала.

## 4.3. Верификација научних доприноса

Радови објављени у међународним часописима категорије М23:

1. D. Veljković, M. Tadić, F. M. Peeters, Intersublevel Absorption in Stacked n-Type Doped Self-Assembled Quantum Dots, *Materials Science Forum*, vol. 494, pp. 37-42, 2005; ISSN 1662-9752; DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.494.37; IF = 0.399.
2. D. Veljković, M. Tadić, F.M. Peeters, Magnetoexcitons in Type-II Self-Assembled Quantum Dots and Quantum-Dot Superlattices, *Materials Science Forum*, vol. 518, pp. 51-56, 2006; ISSN 1662-9752; DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.518.51; IF = 0.399.

Осим тога, очекује се публикавање још једног самосталног рада (D. Veljković, Analytical evaluation of strain inside vertical quantum dot stacks, 2016, submitted).

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Дејана Вељковића, под насловом „Моделовање механичког напрезања у полупроводничким наноструктурама“, бави се инжињерингом савремених полупроводничких наноструктура и представља оригиналан научни допринос у области Електротехничких материјала и технологија. Пошто механичка деформација има велики утицај на електронску структуру енергетских нивоа у полупроводницима, посебно велики значај дисертације је у аналитички изведеним изразима за механичку деформацију унутар класе полупроводничких наноструктура у облику вертикално поравнатог стека квантних тачака, које се интензивно проучавају током последње две деценије са огромним перспективама за савремене примене различите врсте. Тако изведени изрази се могу лако употребити за испитивања и многих других својстава ове класе полупроводничких наноструктура, од којих су нека испитана и у овој дисертацији.

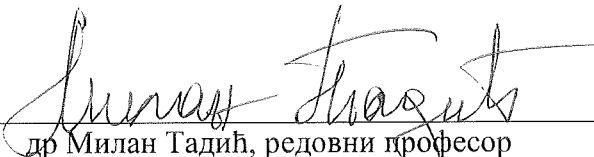
Комисија констатује да је кандидат испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, као и одговарајућим прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета. На основу свега изложеног, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Моделовање механичког напрезања у полупроводничким наноструктурама“ кандидата мр Дејана Вељковића изложи на увид јавности, прихвати, и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 05.05.2016.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Дејан Раковић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



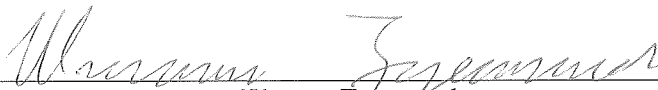
др Милан Тадић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Небојша Ромчевић, научни саветник  
Универзитет Београду – Институт за физику



др Јелена Поповић Божовић, доцент,  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Жељко Ћурчић, доцент,  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет