

# **Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu**

**Predmet:** Izveštaj Komisije o urađenoj doktorskoj disertaciji mr Jasne Crnjanski

Na 758. Sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu održanoj 22.01.2013. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije mr Jasne Crnjanski pod naslovom **“Spektralne karakteristike kvantnih crta u srednjoj infracrvenoj oblasti”** (odluka br. 846/2). Mentor doktorske disertacije je dr Dejan Gvozdić, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala, Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu sledeći

## **IZVEŠTAJ**

### **1. UVOD**

#### **1.1. Naslov i obim disertacije**

Naslov doktorske disertacije je **„Spektralne karakteristike kvantnih crta u srednjoj infracrvenoj oblasti“**. Disertacija je napisana na 190 strana, sadrži 7 poglavlja sa 85 slika i 2 tabele i spisak korišćene literature (112 bibliografskih referenci).

#### **1.2. Hronologija odobravanja i izrade disertacije**

Kandidat je temu pod naslovom **„Spektralne karakteristike kvantnih crta u srednjoj infracrvenoj oblasti“** prijavio 11.10.2010. godine. Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je 02.11.2010. godine imenovalo Komisiju za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije u sastavu: prof. dr Dejan Gvozdić, prof. dr Jovan Radunović i naučni savetnik Instituta za fiziku, dr Nebojša Romčević. Izveštaj Komisije je usvojen na Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu 07.12.2010. godine, a Veće naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu dalo je na to saglasnost 07.02.2011. godine (Odluka br. 06-4089/27-11 od 08.02.2011. godine).

Kandidat je urađenu disertaciju podneo na pregled i ocenu 15.01.2013. godine, a Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu je 22.01.2013. godine imenovalo komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije u sastavu: prof. dr Dejan Gvozdić, prof. dr Jovan Radunović, naučni savetnik dr Nebojša Romčević, prof. dr Milan Tadić i prof. dr Vitimir Milanović, redovni profesor u penziji.

#### **1.3. Mesto disertacije u odgovarajućoj naučnoj oblasti**

Disertacija pripada naučnoj oblasti nanoelektronike i fotonike, a u užem domenu naučno je aktuelna u oblasti optoelektronike i optoelektronskih komunikacija.

### **1.3. Biografski podaci o kandidatu**

Jasna Crnjanski je rođena 10. maja 1978. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju je završila u Beogradu. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisala je 1997. godine. Diplomirala je novembra 2002. godine, na smeru za Optoelektroniku i lasersku tehniku, ostvarivši prosečnu ocenu tokom studija 8,78. Maja 2004. godine izabrana je u zvanje asistent-pripravnik na Katedri za mikroelektroniku i tehničku fiziku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. U julu 2007. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu odbranila je magistarski rad pod naslovom: "Zonska struktura i unutarzonska apsorpcija u V-olučnim kvantnim žicama" (mentor prof. dr Dejan Gvozdić). Unapređena je u zvanje asistenta u decembru 2007. godine.

U toku rada na Elektrotehničkom fakultetu bila je angažovana na izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi na predmetima Fizika 1, Fizika 2, Fizika, Laboratorijske vežbe iz Fizike, Praktikum iz Fizike 2, Osnovi fizičke elektronike, Optičke telekomunikacije, Optičke telekomunikacije 2. Učestvovala je u realizaciji više projekata Ministarstva za nauku i dva međunarodna projekta.

Tokom svoje dosadašnje karijere Jasna Crnjanski je bila autor ili koautor 12 radova u časopisima sa impakt faktorom, od toga 6 u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21), 3 u istaknutim međunarodnim časopisima (M22) i 3 u međunarodnim časopisima (M23). Takođe je autor ili koautor 1 rada u vodećem časopisu od nacionalnog značaja (M51), 4 na međunarodnim konferencijama i 4 rada na domaćim konferencijama.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### **2.1. Struktura i sadržaj disertacije**

Disertacija sadrži naslovnu stranu i kratak rezime rada na srpskom i engleskom jeziku, sadržaj, 7 poglavlja, spisak korišćene literature i kratku biografiju autora. Poglavlja su naslovljena: Uvod, 1. Samo-organizujuće kvantne crte, 2. Kvantne crte u fotonskim komponentama, 3. Modelovanje zonske strukture i unutarzonske apsorpcije u kvantnim crtama, 4. Numerička implementacija modela, 5. Rezultati i diskusija, i Zaključak.

### **2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja**

U okviru uvodnog poglavlja predstavljen je značaj i potencijalne primene fotonskih komponenata za srednju infracrvenu spektralnu oblast. Kroz pregled trenutnih dostignuća u realizaciji poluprovodničkih izvora i detektora, pozicionirane su naprave na bazi kvantnih crta, kao jedno od mogućih rešenja za unapređenje performansi postojećih uređaja i realizaciju uređaja sa novim funkcionalnostima. Definisana je cilj rada disertacije i izložene su osnovne hipoteze na bazi kojih će biti realizovano istraživanje.

Prvo poglavlje daje osnovne informacije o kvantnim nanostrukturama oblika crta, kroz odgovore na pitanja: šta su kvantne crte, kako su otkrivene i na koji način se formiraju

ansamblu kvantnih crta. Zatim, kroz pregled relevantne literature opisuje najvažnije geometrijske i optičke osobine ansambla ovih samo-organizujućih nanostrukture.

Drugo poglavlje pravi presek kroz do sada realizovane primene kvantnih crta u fotonskim komponentama. Pregled primena je dominantno fokusiran na realizacije poluprovodničkih lasera i optičkih pojačavača za blisku infracrvenu spektralnu oblast, u okolini  $1.55 \mu\text{m}$ , jer su, zbog nagle ekspanzije telekomunikacione industrije, istraživanja do sada mahom bila orijentisana ka mogućnostima eksploatacije međuzonskih prelaza u kvantnim crtama. Pored toga, u ovom poglavlju predstavljani su i sasvim novi, nedavno objavljeni rezultati, koji analiziraju mogućnost primene kvantnih crta u kvantno-kaskadnim laserima za emisiju u srednjoj infracrvenoj oblasti.

U okviru trećeg poglavlja predstavljena je teorijska osnova na kojoj se zasniva model elektronske zonske strukture i unutarzonske apsorpcije ansambla kvantnih crta. Model obezbeđuje samosaglasno određivanje elektronske zonske strukture i, van aproksimacije totalnog osiromašenja, uzima u obzir prisustvo prostornog naelektrisanja neophodnog za odvijanje optičkih prelaza. Model unutarzonske apsorpcije se bazira na Fermijevoj zlatnom pravilu i dipolnoj aproksimaciji. Apsorpcija ansambla kvantnih crta određuje se usrednjavanjem spektara pojedinačnih kvantnih crta, uz ponderisanje pretpostavljenom raspodelom kvantnih crta po dimenzijama.

Četvrto poglavlje se fokusira na numeričku implementaciju predloženog modela. U ovom poglavlju su dati detalji implementacije metoda korišćenih za određivanje elektronske zonske strukture kvantnih crta asimetričnog profila, baziranih na konačnim elementima i na kombinaciji transformacija koordinata i konačnih razlika, kao i poređenje predloženih metoda u pogledu efikasnosti izračunavanja.

U petom poglavlju predstavljani su rezultati simulacija elektronske strukture i unutarzonske apsorpcije i izvršena je njihova analiza sa stanovišta uticaja debljine vlažećeg sloja, debljine sloja koji definiše koncentraciju nosilaca u kvantnim crtama i fluktuacije dimenzija struktura u ansamblu. Posebno je razmatran uticaj Hartrijeveg potencijala za izolovane kvantne crte i uticaj međusobne kvantno-mehaničke sprege između susednih struktura u periodičnom nizu kvantnih crta, na elektronsku zonsku strukturu. Uočen je i analiziran fenomen nultog mini-zonskog energetskog procepa u elektronskoj strukturi periodičnog niza kvantnih crta. Definisani su kriterijumi ekvivalencije različitih geometrijskih oblika koji se mogu koristiti za modelovanje profila poprečnog preseka kvantnih crta, a zatim je analizirano kako izbor ekvivalentnog geometrijskog oblika utiče na apsorpcijski spektar. Izvršena je optimizacija debljine sloja koji definiše koncentraciju nosilaca u cilju postizanja maksimalne apsorpcije.

Konačno, zaključak daje kratak pregled disertacije sa posebnim naglaskom na održivost polaznih hipoteza i osnovne doprinose rada.

### 3. OCENA DISERTACIJE

#### 3.1. Savremenost, originalnost i značaj

Na zvaničnom internet sajtu Evropske unije, "Europa.eu" još od 30. septembra 2009. godine, pod referentnim brojem IP/09/1394 moguće je pristupiti dokumentu koji pod naslovom „Ovladavanje ključnim tehnologijama u oblikovanju industrijske budućnosti Evropske unije“ ([http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-09-1394\\_en.htm?locale=en](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-09-1394_en.htm?locale=en)), vrlo eksplicitno navodi listu ključnih tehnologija, koje Evropska komisija vidi kao prioritete i osnovu za stabilne i dobro plaćene poslove i održiv i širokodostupan ekonomski razvoj. Te ključne tehnološke discipline, koje se kriju iza akronima KET (*Key Enabling Technologies*) su nanotehnologije, mikro i nanoelektronika koje uključuju poluprovodnike i napredne materijale, biotehnologije i fotonika. Identične stavove zastupa i portal Evropske tehnološke platforme za fotoniku, „Photonics21“, koji uređuje i vodi asocijacija industrijskih preduzetnika i drugih akcionara u oblasti fotonike u Evropi.

Disertacija kandidata Jasne Crnjanski je u svakom pogledu vezana za dve oblasti koje Evropska komisija prepoznaje kao KET discipline od značaja u oblikovanju industrijske budućnosti, a to su nanoelektronika i fotonika. Veza disertacije, KET disciplina i savremenih naučnih trendova ogleda se kroz literaturu koju je kandidat koristio u izradi disertacije. Veliki broj referenci koje kandidat navodi su skorijeg datuma, a potiču iz vrhunskih međunarodnih časopisa sa visokim impakt faktorom. Među njima se posebno izdvajaju časopisi kao što su Nature, Nature Materials i Nature Photonics. Pored toga, naučni radovi koje je kandidat objavio iz oblasti disertacije, takođe su prihvaćeni za objavljivanje od strane vrlo uglednih časopisa koji pokrivaju naučnu aktivnost u ove dve oblasti.

Disertacija kandidata Jasne Crnjanski razmatra nanostrukturne kvantne crte i njihove optičke osobine u srednjem infracrvenom delu elektromagnetskog spektra. Ove nanostrukture dobijaju se nanotehnološkim postupkom samo-organizujućeg rasta. Danas je proučavanje ovih i sličnih samo-organizujućih struktura, kao što su kvantne tačke, vrlo popularna istraživačka tema. Međutim, fokus istraživanja do sada je bio usmeren na međuzonske elektronske i optičke osobine samo-organizujućih nanostrukture. Razlog za to leži u činjenici da je prethodna generacija elektronskih i fotonihkih naprava, pre svega onih koje su koristile u informaciono-telekomunikacionim tehnologijama, u velikoj meri bazirala svoj rad na elektronima u provodnoj i valentnoj zoni poluprovodnika. Prethodna istraživanja su predviđala, što je u velikoj meri danas potvrđeno, da samo-organizujuće strukture poseduju daleko superiornije osobine od jednodimenzionalno konfiniranih i masivnih poluprovodničkih struktura i naprava. Poslednjih godina prošlog veka, došlo se do zaključka da je moguće realizovati uređaje koji su u potpunosti bazirani na elektronima iz samo jedne od zona poluprovodnika, tzv. unipolarnim napravama, kao i do njihove konkretne realizacije. Istraživanja sprovedena pre samo par godina, dala su nadu da samo-organizujuće strukture mogu u velikoj meri da unaprede postojeće unipolarne, tj. jednozonske uređaje, pre svega kroz činjenicu da mogu da pruže veći stepen konfiniranja i time obezbede mogućnost detekcije normalno incidentne svetlosti, veće vreme života fotoeksitovanih elektrona usled smanjenog elektron-fonon rasejanja i manje struje mraka, a time i rad uređaja na višim

temperaturama. Ovi rezultati su podstakli kandidata da usmeri svoju pažnju upravo na istraživanje unipolarnih karakteristika samo-organizujućih kvantnih crta. Detaljnom analizom literature došlo se zaključka da su u slučaju kvantnih crta samo malim delom istraženi međuzonski optički prelazi, dok su unutarzonski optički prelazi u kvantnim crtama u potpunosti i neopravdano zanemareni. Na osnovu toga, kandidat je u saradnji sa mentorom došao do zaključka da bi istraživanje unutarzonskih optičkih prelaza otvorilo jednu sasvim novu oblast istraživanja samo-organizujućih nanostrukture na bazi kvantnih crta, koja bi pri tome mogla značajno da unapredi postojeće fotonske unipolarne naprave bazirane na jednodimenzionalnom konfiniranju. Kandidat je predložio efikasne i originalne numeričke metode za proračun elektronske strukture izdvojenih i spregnutih nanocрта i samosaglasno izračunavanje elektrostatičkog naelektrisanja u kome se elektroni u crtama nalaze. Iz proračunate elektronske strukture, kandidat je, koliko je poznato, prvi u svetu uspeo da izračuna i teorijski opiše karakteristike spektra unutarzonske apsorpcije kvantnih crta, koji leži u srednjoj infracrvenoj oblasti elektromagnetskog zračenja. Vrlo brzo nakon objavljivanja kandidatovog koautorskog rada, pojavio se rad, u kome su kvantne crte korišćene kao aktivna oblast kvantno-kaskadnog lasera u istoj spektralnoj oblasti.

Značaj ove disertacije ogleda se upravo u činjenici da je ovim istraživanjem započeto proučavanje unutarzonskih optičkih karakteristika samo-organizujućih kvantnih crta koje mogu naći primenu u mnogim tehnološkim rešenjima, pre svega u oblasti fotonike srednjeg infracrvenog zračenja. Disertacija je pokazala uticaj tehnoloških parametara rasta strukture na apsorpcioni spektar, kao i načine da se apsorpcija u ovim strukturama maksimizuje. Pored toga, otkrivena su i neka nova svojstva elektronske strukture ansambla kvantnih crta, koja do sada nisu bila primećena, kao što je pojava nultog mini-zonskog energetskog procepa, koji se karakteriše fenomenom antiukrštanja. Rezultati ove disertacije mogu naći primenu u oblasti optičkih komunikacionih sistema u slobodnom prostoru, zatim u oblasti termalne vizuelizacije, spektroskopije hemijskih veza, astronomije, u realizaciji senzora gasova i biosenzora, u uređajima na bazi svetlosnih sila i pritiska, u silicijumskoj nanofotonici i procesorskim komunikacijama na nivou fotonskih integrisanih kola, kao i u vojnim primenama, kao što su one koje se koriste u raketnim protivmerama.

### **3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu**

U svojoj disertaciji, kandidat je detaljno proučio postojeću literaturu i korektno naveo reference na radove koji su u vezi sa temom disertacije. Navedeno je 112 bibliografskih referenci. Literatura sadrži veliki broj skoro objavljenih radova iz vrhunskih međunarodnih časopisa, kao što su Nature, Nature Materials i Nature Photonics, koji su usko vezani za razmatrani problem, što svedoči o aktuelnosti i značaju istraživanja. Pored radova drugih autora, u listi referenci nalazi se 9 autorskih i koautorskih radova kandidata.

### **3.3. Analiza primenjenih naučnih metoda i njihova adekvatnost za sprovedeno istraživanje**

U okviru doktorske disertacije pod naslovom „Spektralne karakteristike kvantnih crta u srednjoj infracrvenoj oblasti“ kandidata Jasne Crnjanski, primenjen je veći broj naučnih

metoda, od kojih su neke dobro poznate naučnoj javnosti, dok su neke doprinos samog kandidata. Primenjene metode se mogu podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju metode koje se primenjuju za određivanje elektronske strukture kvantno-konfiniranih poluprovodničkih nanostrukture, zatim metoda za proračun elektrostatičkog potencijala u Hartree aproksimaciji (Hartrijev potencijal), metoda za samosaglasno određivanje elektronske strukture u prisustvu elektrostatičkog potencijala i konačno metoda za proračun unutarzonske apsorpcije bazirana na Fermijevom zlatnom pravilu i dipolnoj aproksimaciji. Drugu grupu metoda čine numeričke metode za rešavanje dvodimenzionalnih svojstvenih problema i parcijalnih diferencijalnih jednačina. U okviru ove druge grupe metoda, kandidat je predložio novu i efikasnu numeričku metodu koja kombinacijom koordinatnog preslikavanja domena rešavanja parcijalne jednačine i metode konačnih razlika omogućava efikasno rešavanje Šredingerove jednačine u strukturama sa smanjenim stepenom simetrije. Pored toga kandidat je predložio efikasan metod proračuna unutarzonskog spektra apsorpcije ansambla kvantnih crta, čija se fluktuacija dimenzija može opisati nekom od raspodela verovatnoće. U nastavku će biti analizirane metode iz obe grupe, kao i adekvatnost njihove primene u rešavanju postavljenog problema.

#### 1. Metode proračuna elektronske zonske strukture i unutarzonske apsorpcije

##### A. Metoda za izračunavanje elektronske strukture kvantno-konfiniranih poluprovodničkih nanostrukture (metoda efektivne mase)

Metoda efektivne mase (MEM) je relativno jednostavna, ali široko korišćena metoda za izračunavanje elektronske strukture kvantno-konfiniranih poluprovodničkih nanostrukture. Metoda pripada grupi metoda slojeva, tj. anvelopnih funkcija, koja slojeve u okviru heterostrukture tretira pojedinačno, a talasne funkcije elektronskih stanja prikazuje u obliku linearnih kombinacija talasnih funkcija homogenog poluprovodnika (Blochovih funkcija), i to najčešće u obliku anvelopnih (sporopromenljivih) funkcija koje modulišu Blohove funkcije. Za razliku od složenijih anvelopnih metoda, kao što je višezonska  $k \cdot p$  metoda, koje pri izračunavanju elektronske strukture u obzir uzimaju i provodnu i valentnu zonu, a u okviru valentne zone, zonu lakih i teških šupljina i spin-orbitno otcepljenu zonu šupljina, metoda efektivne mase je ograničena na uticaje samo jedne od pomenutih zona. U praksi se gotovo uvek radi o provodnoj zoni, dok se valentna zona, zbog prisustva degeneracije i generalno jake sprege između zone teških i zone lakih šupljina, ređe i samo grubo opisuje metodom efektivne mase. Izuzetak su situacije u kojima su zone raspregnute, što se dešava u slučaju mehanički napregnutih struktura ili onda kada se posmatraju vrednosti talasnog vektora u okolini centra Brillouinove zone.

Osnovna pretpostavka na kojoj se bazira ova metoda je da je varijacija potencijala sporo-promenljiva funkcija na domenu čija je dimenzija reda veličine konstante kristalne rešetke, što je u slučaju kvantnih crta uglavnom ispunjeno. Prednosti i numerička efikasnost MEMa proističu iz činjenice da se može izbeći eksplicitno uzimanje u obzir periodičnog potencijala kristalne rešetke i da samo njegova sporo-promenljiva perturbacija ulazi u Hamiltonijan. U konkretnom slučaju, razmatranje je ograničeno na elektronsku strukturu provodne zone, pa je potrebno rešiti jednozonsku dvodimenzionalnu Šredingerovu jednačinu koja uključuje samo sporo-promenljivi deo

talasne funkcije. Šredingerova jednačina za anvelopnu talasnu funkciju, izvedena je pod pretpostavkama metode efektivne mase, što uvodi određena ograničenja u njenu primenljivost. Prvo ograničenje je posledica parabolične aproksimacije energetskih zona, što pri razmatranju iole većih opsega energija, može uvesti značajna numerička odstupanja u rezultate modelovanja. Drugo, razmatranje uticaja samo jedne zone na talasne funkcije u okviru modela poluprovodničke strukture, onemogućava primenu ove metode za materijale koji u provodnoj zoni imaju više ekvivalentnih dolina (na primer, silicijum), ili ukoliko je u razmatranju neophodno zadržati više od jedne zone. I pored svih ovih ograničenja, metoda efektivne mase je daleko najčešće korišćena za analizu mnogih osobina poluprovodničkih heterostruktura, zahvaljujući svojoj jednostavnosti, mogućnosti analitičkog tretmana i tačnosti koja je u velikom broju slučajeva sasvim dovoljna za praktičan rad. Budući da se u ovoj disertaciji analizira elektronska struktura u provodnoj zoni kvantnih crta, primena metode efektivne mase je u potpunosti opravdana i dovoljna da se elektronska struktura kvantnih crta precizno opiše.

Iako postoje metode kao što su empirijski metod pseudo-potencijala i metod jake veze koje se mogu koristiti za izračunavanje zonske strukture kvantnih crta uzimajući u obzir potencijal individualnih atoma, ove metode su veoma zahtevne sa stanovišta izračunavanja, zbog čega i nisu korišćene u ovoj disertaciji.

#### B. Metoda za proračun elektrostatičkog potencijala u Hartrijevoj aproksimaciji

U odnosu na heterostrukturu prirodu kvantnih crta i uobičajeno dopiranje materijala primesama, profil provodne zone i konfinirajući potencijal određuju prostorna zavisnost diskontinuiteta provodne zone (kao posledica postojanja heterospojeva) i elektrostatički potencijal u Hartrijevoj aproksimaciji koji potiče od nosilaca naelektrisanja prisutnih u strukturi. Prostornu zavisnost diskontinuiteta zone uglavnom nije teško odrediti, jer zavisi samo od elektronskih afiniteta i energetskih procepa materijala koji čine heterostrukturu, a za uobičajeno korišćene materijale (III-V ili II-IV jedinjenja) ove vrednosti su eksperimentalno utvrđene. Sa druge strane, elektrostatički potencijal u kome se nalaze vezani elektroni, a koji potiče od jonizovanih primesa i samih vezanih elektrona, je daleko teže odrediti. Metoda za proračun elektrostatičkog potencijala bazira se na poznavanju distribucije jonizovanih primesa i koncentracije vezanih elektrona u kvantnim crtama, koja je dobijena iz prethodno određene elektronske strukture i odgovarajućih talasnih funkcija za sve relevantne vrednosti slobodnog talasnog vektora elektrona, za koje je svojstvena energija ispod i u okolini Fermijevog nivoa. Onda kada je poznata raspodela naelektrisanja, elektrostatički potencijal u kvantnim crtama i njihovoj okolini može se odrediti rešavanjem dvodimenzionalne Poasonove jednačine, za koju se u zavisnosti od raspodele naelektrisanja i razmatrane geometrije mogu primenjivati Dirihleovi ili Nojmanovi (prirodni) granični uslovi ili njihova kombinacija. Problem u rešavanju ove jednačine je i to što se u njenom razmatranju ne polazi od aproksimacije totalnog osiromašenja, kojom bi se problem donekle pojednostavio, već se jednačina postavlja kao nelinearna, pri čemu raspodela primesa i vezanih nosilaca zavisi od raspodele potencijala koji se upravo određuje rešavanjem Poasonove jednačine. Ova jednačina je eliptička parcijalna diferencijalna jednačina i nju je moguće rešavati

različitim numeričkim metodama, koje se u ovoj analizi razmatraju kao druga grupa korišćenih naučnih metoda. Međutim, sam metod za njeno rešavanje nije dovoljan da se dođe do finalnog rezultata, već je potrebno alternativno primenjivati i kombinovati prethodno opisane metode (A i B) da bi se odredila finalna raspodela potencijala i profila provodne zone. O tome govori sledeća metoda.

#### C. Samosaglasni metod određivanja elektronske strukture

Prethodno navedene metode dovode do integro-diferencijalne Šredingerove i Poasonove jednačine u kojima je jedna od ključnih nepoznatih profil provodne zone određen delovanjem Hartrijevog potencijala vezanih elektrona i jonizovanih primesa. Način da se dođe do rešenja ovih jednačina je primena samosaglasnog postupka, koji podrazumeva alternativnu primenu obe pomenute metode uz stalnu korekciju izračunatih rezultata, a sve sa ciljem da se nakon određenog broja iteracija dođe do jedinstvene raspodele Hartrijevog potencijala, koja bi zadovoljila obe pomenute jednačine proistekle iz prethodno opisanih metoda. U osnovi samosaglasne metode leži proces relaksacije inicijalnog potencijala, za koji se obično uzima nulta vrednost. Samosaglasni metod predviđa određivanje raspodele potencijala iz Poasonove jednačine, zatim korekciju ovog potencijala putem ponderisanog usrednjavanja dobijenog potencijala i potencijala iz prethodne iteracije i vraćanje novodobijene vrednosti potencijala u Šredingerovu jednačinu. Nakon toga, postupak se ponavlja gde se polazeći od rešenja za talasne funkcije iz Šredingerove jednačine određuje nova raspodela vezanih elektrona, koja se ponovo vraća u Poasonovu jednačinu sa ciljem da se dođe do nove, tačnije vrednosti Hartrijevog potencijala. Ovaj metod je od ključne važnosti za određivanje elektronske strukture i unutarzonske apsorpcije. Problem vezan za ovaj metod je brzina konvergencije koja zavisi od relaksacionog faktora korekcije potencijala, ali i dimenzionalnosti problema. U slučaju jednodimenzionalnih problema ovaj proces je prilično efikasan, ali je u slučaju dvodimenzionalnih problema, kao što je problem kvantnih crta kojim se bavi ova disertacija, proces konvergencije usporen činjenicom da se potencijal usaglašava u dve dimenzije. Kandidat je ovaj problem rešio, tako što je umesto samo jednog korekcionog potencijala iz poslednje iteracije, iskoristio veći broj korekcionih potencijala iz nekoliko prethodnih iteracija, čime je prevaziđen problem konvergencije samosaglasnog metoda i omogućeno uspešno i precizno određivanje Hartrijevog potencijala sa odstupanjem manjim od 1 meV i sa relativno malim brojem iteracija koji ide od 20 do 35. Ova inovacija je originalni rezultat, koji do sada nije korišćen u sličnim razmatranjima.

#### D. Metoda određivanja unutarzonske apsorpcije

Proračun unutarzonske apsorpcije sprovodi se primenom Fermijevog zlatnog pravila u dipolnoj aproksimaciji. Ovaj proračun zahteva precizno poznavanje naseljenosti energetskih nivoa unutar kvantnih crta, tačnije poznavanje pozicije Fermijevog nivoa za svaku od struktura, kao i primenu Fermi-Dirakove raspodele. Pored toga, potrebno je za svaki optički prelaz odrediti dipolni matrični element, koji se bazira na integralu preklapanja talasnih funkcija inicijalnog i finalnog stanja. Postupak proračuna apsorpcije se u suštini oslanja na prethodno opisane metode i predstavlja standardni metod u slučaju



kada je talasna dužina zračenja značajno veća od veličine dipolnog pomeraja, što je u slučaju kvantnih crta zadovoljeno, budući da su njihove dimenzije reda desetina nanometra, dok je talasna dužina incidentnog zračenja nekoliko do nekoliko desetina mikrometara.

## 2. Metode primenjene za numeričko rešavanje svojstvenog problema i parcijalnih diferencijalnih jednačina

Prethodno navedene teorijske metode, baziraju svoju implementaciju na numeričkim metodama. U rešavanju stacionarne dvodimenzionalne Šredingerove jednačine primenjuju se numeričke metode za rešavanje svojstvenog problema eliptičkih parcijalnih diferencijalnih jednačina, dok se pri rešavanju dvodimenzionalne Poasonove jednačine koriste metode za rešavanje nelinearnih eliptičkih parcijalnih diferencijalnih jednačina. Sa stanovišta procesorske snage i memorijskih resursa, najzahtevnije su upravo metode koje se tiču rešavanja dvodimenzionalnog svojstvenog problema, pogotovo za nanostrukture sa asimetričnim profilom i nepravilnim heterogranicama, kao što su kvantne crte. Zbog toga je svojstveni problem za Šredingerovu jednačinu potrebno rešiti za zadati dvodimenzionalni profil potencijala koji je značajnim delom određen geometrijom poprečnog preseka kvantnih crta, diskontinuitetom provodne zone i Hartrijevim potencijalom. Rešavanje se može postići primenom različitih numeričkih metoda, čija kompleksnost i zahtevi po pitanju procesorske snage i memorijskih resursa zavise od geometrije strukture i preciznosti koju model treba da obezbedi. U široko primenjivane metode ubrajaju se metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika, kao i ekspanzione metode koje se baziraju na razvoju u bazi funkcije ili Furijeov red. U nekim situacijama moguće je izbeći zahtevna numerička izračunavanja, ali po cenu analitičkih priprema koje se baziraju na preslikavanju geometrije strukture i odgovarajućeg Hamiltonijana. Sa druge strane, metode konačnih elemenata i konačnih razlika su nešto jednostavnije za implementaciju, ali veoma zahtevne po pitanju memorijskih resursa. U disertaciji je za rešavanje oba tipa jednačina dominantno korišćen metod konačnih elemenata, kao jedan od metoda koji se standardno sreće u literaturi. Međutim, kandidat se opredelio da ispita i druge metode, pa je u tu svrhu razvio novi i efikasan metod baziran na koordinatnoj transformaciji kako strukture kvantne crte i ansambla kvantnih crta, tako i odgovarajućeg Hamiltonijana. Time su stvoreni uslovi da se svojstveni problem rešava metodom konačnih razlika, koja obezbeđuje precizan i efikasan pristup rešavanju u slučaju regularnih granica domena, a pri tome ne zahteva primenu specijalnih rutina za diskretizaciju domena.

### 3.4. Ocena primenljivosti i verifikacija ostvarenih rezultata

Tema izrade doktorske disertacije i njena veza sa samo-organizujućim nanostrukturama u značajnoj meri doprinosi primenljivosti rezultata istraživanja. Sa tog aspekta se može reći da su kvantne crte, iako relativno skoro otkrivene, do danas već našle primenu u širokopojasnim poluprovodničkim laserima za telekomunikacione primene. Naime, pojačavački materijal na bazi kvantnih crta je dobar kandidat za fabrikaciju različitih optoelektronskih naprava koje imaju koristi od širokog spektra optičkog pojačanja, kao što su superluminiscentne poluprovodničke diode, poluprovodnički optički pojačavači i monomodni laseri koji pokrivaju opseg 1400-1650 nm zahtevan od strane budućih

multikanalnih optičkih transmisionih sistema, kao i aktivni talasovodi za podesive lasere sa eksternim rezonatorom. Pored toga, napredak u tehnologiji fabrikacije i materijalima korišćenim za realizaciju kvantnih crta omogućio je nedavno demonstraciju međuzonske emisije svetlosti u srednjem infracrvenom području u okolini 2  $\mu\text{m}$ . Međutim, praktično sva dosadašnja istraživanja su mahom bila usmerena ka eksploataciji međuzonskih optičkih prelaza.

U poređenju sa ansamblima kvantnih tačaka kod kojih mali broj elektronskih i šupljinskih stanja doprinosi pojačanju, kvantne crte mahom imaju jedno ili dva kvantizovana stanja u odnosu na transverzalni poprečni presek i veliki broj kvantizacionih maksimuma u longitudinalnom pravcu. Ova longitudinalno konfinirana stanja se mogu popuniti pri relativno malim gustinama struje injekcije, što u kombinaciji sa izraženim fluktuacijama veličine poprečnog preseka, dovodi do formiranja širokog spektra pojačanja. Međutim, iako su proteklih decenija sprovedena intenzivna istraživanja sa stanovišta primene kvantnih tačaka za generaciju i detekciju svetlosti u srednjoj infracrvenoj oblasti, kvantne crte još uvek nisu dobile značajnu pažnju u pogledu eksploatacije ove spektralne oblasti.

Rezultati analize elektronske zonske strukture i unutarzonskog spektra apsorpcije ansambla kvantnih crta, koji su sprovedeni u disertaciji kandidata Jasne Crnjanski, predstavljaju prve korake u istraživanju primene ovih samo-organizujućih nanostrukture u oblasti fotonih naprava za srednju infracrvenu oblast. Naime, spektralna karakterizacija apsorpcionog ili emisionog spektra su bazični postupci koji imaju za cilj procenu potencijalne primene konkretnih nanostrukture u realizaciji fotonih naprava za određeno spektralno područje. Kandidat je kroz svoju tezu pokazao da su dominantni optički prelazi u ovim nanostrukturama upravo oni koji obezbeđuju apsorpciju, a samim tim i emisiju fotona u oblasti talasnih dužina od 4 do 16  $\mu\text{m}$ , što skoro u potpunosti pokriva opseg srednjeg infracrvenog zračenja i zalazi u oblast dalekog infracrvenog zračenja.

Koliko je komisiji poznato, kandidat ove disertacije je bio prvi koji je analizirao unutarzonsku apsorpciju u ovom strukturama i izvršio teorijsku karakterizaciju spektra apsorpcije. Vrlo brzo nakon što je kandidat objavio glavne rezultate svoje disertacije, pojavio se prvi rad koji se bavi primenom kvantnih crta i njihove unutarzonske apsorpcije u realizaciji kvantno-kaskadnog lasera, što svakako predstavlja verifikaciju da je oblast unutarzonske apsorpcije u samo-organizujućim nanostrukturama postala interesantna za realizaciju koherentnih fotonih generatora u srednjoj infracrvenoj oblasti. Naravno, pored realizacije koherentnih i nekoherentnih izvora, rezultati ove teze mogu biti interesantni i za realizaciju širokopoljnih fotodetektora ili elektroapsorpcionih modulatora u srednjoj infracrvenoj oblasti.

Osim praktičnog značaja koji ima po pitanju spektralne karakterizacije i optičkih osobina kvantnih crta, ova disertacija direktno ukazuje na interesantne fenomene u mini-zonskoj elektronskoj strukturi, koja demonstrira efekte nultog energetskog procepa i antiukrštanja, što su fenomeni karakteristični pre svega za valentnu zonu. Ove pojave su posledica uticaja vlažećeg sloja i mogu imati značaj u procesima zahvata, otpuštanja i relaksacije elektrona, što su procesi koji u velikoj meri mogu uticati na dinamiku elektrona u fotonim i elektronskim komponentama na bazi kvantnih crta.

Činjenica da je u ovom trenutku broja radova koji se odnosi na unutarzonske prelaze u kvantnim crtama mali, ne ide na ruku eksperimentalnoj proverbi rezultata dobijenih u tezi, jer se kompletno slaganje sa eksperimentom može ostvariti samo onda, ako su kompozicija i

raspodela u ansamblu kvantnih crta identični onim iz same disertacije, što do sada nije bio slučaj. Međutim, postojeći eksperimentalni rezultati koji se odnose na unutarzonsku apsorpciju u kvantnim tačkama, crtama i žicama kvalitativno potvrđuje rezultate ove teze.

Na osnovu svega navedenog, komisija je došla do zaključka da je oblast istraživanja ove disertacije aktuelna i od velikog praktičnog značaja za oblast fotonskih komponenata i podsistema u srednjoj infracrvenoj oblasti, a i šire. Kompletna eksperimentalna verifikacija u ovom trenutku nije ostvariva, pre svega zbog avangardnosti i inovativnosti teme, ali poređenje sa sličnim nanostrukturama i dostupnim rezultatima pokazuje značajno kvalitativno slaganje sa teorijskim zaključcima do kojih se došlo u ovoj disertaciji.

### **3.5. Ocena sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad**

Kroz realizaciju ove disertacije kandidat je u potpunosti demonstrirao sve sposobnosti neophodne za samostalan naučno-istraživački rad. Na prvom mestu, kandidat je vrlo zrelo predvideo i prepoznao aktuelnost, atraktivnost i značaj izabrane teme. Literatura koju je kandidat priložio je aktuelna i relevantna za temu, što govori o njenom sistematičnom i pažljivom izboru. Ciljevi disertacije, matematičko-fizički model, kao i izbor i prezentacija metoda za sprovođenje istraživanja i realizaciju postavljenih zadataka su vrlo jasno definisani, obrazloženi i prikazani u disertaciji. Pored toga, kandidat je uspešno razvio nekoliko originalnih numeričkih metoda za numeričku implementaciju formulisanog modela, kao i efikasan, robustan i pouzdan algoritam i programski kod, koji je omogućio konzistentne i uverljive rezultate numeričkih simulacija i proračuna. Analiza i diskusija rezultata su sadržajno, jasno, detaljno, nedvosmisleno i zrelo prikazani i napisani, što se takođe može videti i u radovima koje je kandidat objavio. Takođe, zaključci disertacije pokazuju visok nivo spremnosti kandidata da prepozna kvalitete, prednosti i nedostatke, kao i ograničenja postavljenog modela i da jasno i uverljivo predstavi najvažnije doprinose svog rada, uz konkretno i uopšteno sagledavanje konsekvenci rezultata proisteklih iz teze, što nedvosmisleno potvrđuje da je kandidat spreman i sposoban da sam ili u timu ubuduće kompetentno obavlja naučno-istraživački rad.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### **4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa**

U doktorskoj disertaciji „Spektralne karakteristike kvantnih crta u srednjoj infracrvenoj oblasti“ kandidata Jasne Crnjanski, ostvareni su sledeći naučni doprinosi:

- Predložen je i formulisan kompletan dvodimenzionalni model za proračun zonske strukture i unutarzonske apsorpcije u nanostrukturama sa asimetričnim i/ili nepravilnim poprečnim presekom.
- Predložen je metod za određivanje elektronske zonske strukture na bazi kombinacije metoda koordinatnog preslikavanja i konačnih razlika koji omogućava analizu izolovanih kvantnih crta i periodičnih nizova identičnih kvantnih crta. Testiranjem

ovog metoda potvrđena je zadovoljavajuća konvergencija i efikasnost u poređenju sa metodom konačnih elemenata.

- Predloženi model je numerički implementiran primenom metode konačnih elemenata, čime je omogućeno efikasno, simultano i samosaglasno rešavanje dvodimenzionalne Šredingerove i nelinearne Poasonove jednačine izvan aproksimacije totalnog osiromašenja. Prisustvo slobodnog naelektrisanja u velikoj meri utiče na profil zone i konfiniranje nosilaca, pa primenjeni metod uključuje u proračun uticaj slobodnih nosilaca na konfinirajući potencijal, a shodno tome i na apsorpcioni spektar. Uticaj Hartrijevog potencijala se ogleda u smanjenju stepena konfiniranja, zatim broja vezanih stanja i konačno same apsorpcije.
- Analiziran je uticaj međusobne kvantno-mehaničke sprege na mini-zonsku strukturu u periodičnom nizu identičnih kvantnih crta. Na osnovu rezultata je zaključeno da je za standardne dimenzije kvantnih crta u ansamblu, čak i za relativno mala rastojanja između susednih kvantnih crta (oko 20 nm), mini-zonska struktura slabo izražena i da se vezana stanja, koja nisu pri samom vrhu jame, mogu tretirati kao diskretni energetski nivoi. Ovaj zaključak posebno dobija na značaju pri određivanju samosaglasne zonske strukture.
- Elektronska struktura i spektar unutarzonske apsorpcije detaljno su analizirani sa aspekta uticaja vlažećeg sloja, koji se neizostavno javlja prilikom fabrikacije nanostruktura Stranski-Krastanov postupkom. Pokazano je da i pored relativno malih debljina vlažećeg sloja, njegovo prisustvo značajno utiče na unutarzonski spektar, tako što kroz smanjenje stepena konfiniranja u kvantnim crtama dovodi do smanjenja apsorpcije i pojave crvenog pomeraja u spektru apsorpcije.
- Pokazano je da se, za usvojenu Gausovu raspodelu kvantnih crta u ansamblu sa izraženim fluktuacijama po dimenzijama, egzaktan apsorpcioni spektar, dobijen usrednjavanjem spektra pojedinačnih kvantnih crta u ansamblu, može aproksimirati sumom od nekoliko pomerenih Gausovih raspodela.
- Analizom usrednjenog spektra apsorpcije, pokazano je da ansamblu samoorganizovanih InAs kvantnih crta na GaAs supstratu obezbeđuju intenzivnu interakciju kvantnih crta sa elektromagnetskim poljem u srednjem infracrvenom području, u opsegu talasnih dužina od 4 do 12  $\mu\text{m}$ .
- Pokazano je da apsorpcioni spektar ispoljava izraženu asimetriju u odnosu na polarizaciju incidentnog električnog vektora elektromagnetskog polja, što je posledica anizotropije zonske strukture i razlike u stepenu konfiniranja jamske oblasti, a što je u osnovi posledica asimetrije profila poprečnog preseka strukture. Analizom apsorpcionog spektra za dva međusobno ortogonalna pravca polarizacije upadne svetlosti, utvrđeno je da je intenzitet apsorpcije svetlosti polarizovane u pravcu izraženijeg konfiniranja elektrona za nekoliko redova veličine manji nego za pravac slabijeg konfiniranja, budući da u zonskoj strukturi dominiraju energetski nivoi koje dominantno određuje pravac slabijeg konfiniranja.

- Analiza uticaja fluktuacija po dimenzijama u ansamblu kvantnih crta pokazala je da povećanje fluktuacija dovodi do širenja apsorpcionog spektra, koji postaje sve više asimetričan i zaravnjen. Za male fluktuacije po dimenzijama, spektar ansambla u velikoj meri zadržava osobine spektra kvantne crte sa najvećom zastupljenošću u ansamblu.
- Analiziran je uticaj izbora geometrijskog oblika kojim se aproksimira poprečni presek kvantnih crta u ansamblu na apsorpcioni spektar. Definisani su kriterijumi ekvivalencije geometrijskih oblika. Analiza je pokazala da sočivasti i trapezni oblik daju veoma dobro poklapanje spektara, dok je za trougaoni profil spektar nešto intenzivniji i pomeren ka manjim energijama. Pokazano je da je u literaturi uobičajeno korišćena pravougaona aproksimacija profila poprečnog preseka kvantnih crta, opravdana samo za relativno male fluktuacije dimenzija u ansamblu.
- Analiziran je uticaj položaja sloja kvantnih crta u odnosu na dopirane delove strukture koji obezbeđuju naelektrisanje neophodno za apsorpciju, a zatim je izvršena optimizacija geometrije strukture u cilju ostvarivanja maksimalne apsorpcije. Pokazano je da se maksimum apsorpcije za InAs/GaAs ansambl kvantnih crta sa srednjim dimenzijama poprečnog preseka od  $14 \times 3$  nm, ostvaruje za bafer sloj debljine od oko 120 nm.
- Pokazano je da se dobra procena optimalne dimenzije bafer sloja za ansamble sa relativno malim fluktuacijama u dimenzijama može ostvariti na osnovu razmatranja apsorpcije u funkciji od dimenzije bafer sloja za jednu kvantnu crtu, čije dimenzije odgovaraju srednjim dimenzijama ansambla.
- Procena optimalne dimenzije bafer sloja za InAs/InAlGaAs ansamble kvantnih crta, zbog manje razlike u diskontinuitetima provodnih zona, izvršena je za ansamble sa većim srednjim dimenzijama,  $20 \times 4$  nm i  $25 \times 5$  nm. Pokazano je da se u tom slučaju maksimum apsorpcije pomera na veće talasne dužine, u opseg od 13 do 16  $\mu\text{m}$ .

## 4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Sagledavanjem ciljeva istraživanja, postavljenih hipoteza i ostvarenih rezultata konstatujemo da je kandidat uspešno odgovorio na sva bitna pitanja i dileme koje suštinski proizilaze iz problematike kojom se disertacija bavi. Razvoj matematičko-fizičkog modela i metoda za numerički proračun zonske i mini-zonske elektronske strukture ansambla kvantnih crta, odgovarajućih unutarzonskih prelaza i apsorpcionog spektra, kao i rezultati proistekli iz njegove primene, predstavljaju značajan korak u karakterizaciji ovih samo-organizujućih nanostrukture i osnovu za dalji razvoj fotonih komponenata, pre svega izvora i detektora u srednjem infracrvenom delu spektra. U tom smislu, rezultati koje je postigao kandidat daju čvrst okvir i osnovu za prepoznavanje ovog rada kao kvalitetne doktorske disertacije.

### 4.3. Očekivana primena rezultata u praksi

Polazeći od činjenice da su oblasti kojima teza pripada prepoznate kao ključne tehnologije za privredu Evropske unije, opravdano je očekivati da su rezultati ove teze od interesa za mnoge napredne tehnološke grane. Naime, rezultati prikazani u disertaciji mogu naći primenu u mnogim fotonskim komponentama i podsistemima koji funkcionišu u srednjem infracrvenom području i kao takvi mogu biti korisni u aplikacijama vezanim za optičke komunikacije u slobodnom prostoru, termalnu vizuelizaciju, lasersko navođenje u mnogim mirnodopskim i vojnim sistemima, spektroskopiju hemijskih veza, u nedestruktivnoj analizi tkiva, ćelija i genetskog materijala, u astronomiji, u realizaciji senzora gasova i biosenzora koji se koriste u monitoringu zagađenja i ekologiji, u silicijumskoj nanofotonici pri realizaciji fotonskih magistrala između procesora i u mnogim drugim tehničko-tehnološkim i medicinskim primenama.

### 4.4. Verifikacija naučnih doprinosa

U toku svog istraživačkog rada, u užoj oblasti teme doktorske disertacije, Jasna Crnjanski je objavila 6 radova u međunarodnim časopisima sa SCI liste, od toga 4 u vrhunskim međunarodnim časopisima (kategorija M21), 1 rad u istaknutom međunarodnom časopisu (kategorija M22) i jedan rad u međunarodnom časopisu (kategorija M23). Takođe, temi doktorske disertacije pripada i jedan rad objavljen u vodećem časopisu od nacionalnog značaja (kategorija M51), jedan rad predstavljen na međunarodnoj konferenciji i 2 rada predstavljena na domaćim konferencijama.

#### Radovi objavljeni u vrhunskim međunarodnim časopisima (kategorija M21)

1. Stupovski, B., **Crnjanski, J.**, Gvozdić, D.: Miniband electronic structure of quantum dash array, *Journal of Applied Physics*, vol. 112, no. 12, pp. 123716, 2012 (**IF=2.168**) (ISSN 0021-8979)
2. Stupovski, B., **Crnjanski, J.**, Gvozdić, D.: Application of coordinate transformation and finite difference method in numerical modeling of quantum dash band structure, *Computer Physics Communications*, vol. 182, pp. 289-298, 2011 (**IF=3.268**)(ISSN 0010-4655)
3. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Mid- and far-intersubband absorption in quantum dash nanostructures, *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 9, pp. 091906, 2010 (**IF=3.844**)(ISSN 0003-6951)
4. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Band structure and intersubband absorption in modulation-doped V-groove quantum wires, *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 1, pp. 013104, 2007 (**IF=2.171**)(ISSN 0021-8979)

#### Radovi objavljeni u istaknutim međunarodnim časopisima (kategorija M22)

1. **Crnjanski, J. V.**: Intersubband absorption in quantum dashes with various cross-section profiles, *Physica Scripta*, vol. T149, pp. 014034, 2012 (**IF=1.204**)(ISSN 0031-8949)

#### Radovi objavljeni u međunarodnim časopisima (kategorija M23)

1. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Intersubband Absorption in Quantum Dash Nanostructures, *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, pp. 668-671, 2009 (IF=0.433)(ISSN 0587-4246)

#### Radovi objavljeni u časopisima od nacionalnog značaja (kategorija M51)

1. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Self - Consistent treatment of V-groove quantum wire band structure in nonparabolic approximation, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 69-77, 2004 (ISSN: 1451-4869)

#### Radovi saopšteni na međunarodnim skupovima (kategorija M33)

1. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Intersubband Absorption in Modulation-Doped V-Shaped Quantum Wires, *5th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*, Berlin, Germany, 2005., pp. 15-16.

#### Radovi saopšteni na skupovima nacionalnog značaja (kategorija M63)

1. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Intersubband absorption in step modulation-doped V-shaped quantum wires, *51. konferencija ETRAN*, Herceg Novi, 2007.
2. **Crnjanski, J. V.**, Gvozdić, D. M: Self - Consistent treatment of V-groove quantum wire band structure in nonparabolic approximation, *48. konferencija ETRAN*, Čačak, 2004., pp. 144-147.

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

### 5.1. Kratak osvrt na disertaciju u celini

Disertacija kandidata Jasne Crnjanski, pod naslovom „**Spektralne karakteristike kvantnih crta u srednjoj infracrvenoj oblasti**“ predstavlja savremen, originalan i značajan naučni doprinos. Disertacija se bavi proučavanjem zonske i mini-zonske elektronske strukture ansambla kvantnih crta, unutarzonskim optičkim prelazima koji se u njima javljaju i apsorpcionim spektrom koji potiče od ovih prelaza. Rezultat ove disertacije su osim formulisanog matematičko-fizičkog modela, proračunata zonska elektronska struktura dobijena primenom samosaglasnog postupka koji obuhvata Šredingerovu i Poasonovu jednačinu i spektar unutarzonske apsorpcije, koji je analiziran sa aspekta uticaja tehnoloških i geometrijskih parametara ansambla kvantnih crta. Pored toga, razvijene su nove i efikasne metode za proračun zonske strukture primenom kombinacije koordinatnih transformacija i metode konačnih razlika. Uočeni su novi fenomeni u karakteru mini-zonske elektronske strukture za koju je pokazano da poseduje nulte mini-zonske energetske procepe, koji su praćeni efektom antiukrštanja. Pokazano je da spektar unutarzonske apsorpcije leži u srednjoj infracrvenoj oblasti i da karakteristike ansambla kvantnih crta u velikoj meri određuju profil ovog spektra. Dobijeni rezultati su objavljeni u više relevantnih časopisa sa SCI liste.

## 5.2. Predlog Komisije nastavno-naučnom veću

Na osnovu prethodnog, Komisija konstatuje da je Jasna Crnjanski ispunila sve uslove predviđene Zakonom o visokom obrazovanju, Statutom i Pravilnikom o doktorskim studijama Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, te, sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta da ovaj izveštaj prihvati, i u skladu sa zakonskom procedurom, uputi Veću oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu na konačno usvajanje i davanje odobrenja kandidatu da pristupi usmenoj odbrani.

U Beogradu, 24.01.2013. godine

Članovi komisije:



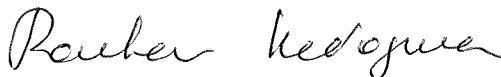
dr Dejan Gvozdić, redovni profesor

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu



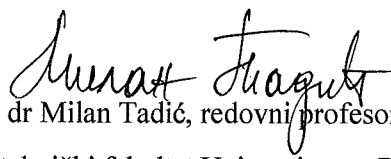
dr Jovan Radunović, redovni profesor

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu



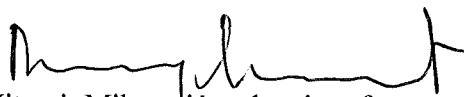
dr Nebojša Romčević, naučni savetnik

Institut za fiziku u Beogradu



dr Milan Tadić, redovni profesor

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu



dr Vitomir Milanović, redovni profesor u penziji

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu