

КОМИСИЈИ ЗА СТУДИЈЕ II СТЕПЕНА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Комисија за студије II степена, Електротехничког факултета у Београду, на својој седници одржаној 28.06.2022. године именовала нас је у Комисију за преглед и оцену мастер рада дипл. инж. Јоване Обрадовић под насловом „Оптичка карактеризација допираних GaN наножица за њихову употребу као емитера појединачних фотона”. Након прегледа материјала Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Биографски подаци кандидата

Јована Обрадовић је рођена 16.7.1998. године у Приједору, Република Српска, Босна и Херцеговина. Завршила је основну школу и гимназију у Приједору као вуковац. Током школовања је учествовала на такмичењима из математике и физике на републичком и државном нивоу. Електротехнички факултет је уписала 2017. године. Дипломирала је у септембру 2021. године са просечном оценом 8,61 и дипломски рад је одбранила под менторством др Јелене Радовановић са оценом 10. У току основних академских студија учествовала је на две научне конференције - “Photonica 2021” (Београд, 2021), у оквиру које је излагала постер и “MCQST Summer Student program” (Минхен, 2021), где је презентovala резултате научног истраживања.

Мастер академске студије на Модулу за наноелектронику и фотонику уписала је на истом факултету у октобру 2021. године. Од јануара до јула 2022. године, кроз Erasmus+ програм студентске размене, боравила је на Институту за оптоелектронске системе и микротехнологију на Политехничком универзитету у Мадриду. Од уписа мастер академских студија учествовала је на две научне конференције: “The 19th Young researchers’ conference - Materials Science and Engineering” (Београд, децембар 2021) - где је излагала резултате сопственог научног доприноса у оквиру дипломског рада и “European Spring School of Quantum Science and Technology” (Стразбур, 2022) где је излагала научни постер са дотадашњим истраживањима у оквиру мастер рада.

2. Извештај о студијском истраживачком раду

Кандидаткиња Јована Обрадовић (3002/2021) је као припрему за израду мастер рада „Оптичка карактеризација допираних GaN наножица за њихову употребу као емитера појединачних фотона” урадила истраживање релевантне литературе која се односи на област квантних комуникација. Експериментални део студијског истраживачког рада је рађен у Институту за оптоелектронске системе и микротехнологију на Политехничком универзитету у Мадриду. Конкретно, анализирано је актуелно стање у области постојећих уређаја за изворе појединачних фотона. У оквиру истраживања су детаљније анализирани следеће референце:

[4] L. Nicolai, Ž. Gačević et al. “Electron Tomography of Pencil-Shaped GaN/(InGa)N Core-Shell Nanowires”, *Nanoscale Research Letters*, 14(1), 2019.

[5] Ž. Gačević et al. “Emission of Linearly Polarized Single Photons from Quantum Dots Contained in Nonpolar, Semipolar and Polar Sections of Pencil-Like InGaN/GaN Nanowires”, *ACS Photonics*, 4(3), pp, 657-664, 2017.

[6] M. A. Reschchikov, H. Morkoç, "Luminescence properties of defects in GaN", Journal of Applied Physics, 97(6),061301, 2005.

Проучавањем наведених референци утврђена је предност материјала GaN и његове легуре InGaN у области оптоелектронике и њихова могућа употреба као извора појединачних фотона у сврху уређаја за прављење кључа у квантној криптографији. Такође, утврђено је да не постоји адекватна карактеризација ових потенцијалних емитера појединачних фотона приликом њиховог допирања, будући да их је потребно припремити за електричну употребу. Током израде мастер рада било је потребно урадити комплетан процес оптичке карактеризације материјала под истим условима и упоредити га са постојећим резултатима, како би материјал био правилно описан и окарактерисан. Неке од референци у којима је GaN окарактерисан су:

[1] F. Furtmayr, M. Vilemeyer, M. Stutzmann et al. „Optical properties of Si- and Mg-doped gallium nitride nanowires grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy”, Journal of Applied Physics, 104, 074309, 2008.

[2] A. Kasi Viswanath et al. "Magnesium acceptor levels in GaN studied by photoluminescence", Journal of Applied Physics, 83, 2272, 1998.

[3] G. Martinez-Criado, C.R. Miskys, A. Cros et al. "Photoluminescence study of excitons in homoepitaxial GaN", Journal of Applied Physics, 11(90), 5627, 2001.,

заједно са референцом 3 литературе разматране на почетку истраживања.

Свака од наведених референци обрађује неку од комбинација метода у циљу утврђивања квалитета материјала (појаву и нестајање ексцитона на ниским температурама, промену температуре и изглед ексцитонског спектра или појаву и нестајање ексцитона променом снаге). Међутим, ни у једној од референци није урађено прецизно проучавање свих метода и нису поређени резултати различитих метода под истим условима и на истом узорку.

Процес студијског истраживачког се састојао у детаљној анализи свих узорака нарастаних у истим условима у Институту за оптоелектронске системе и микротехнологију, оптичком карактеризацијом наножица које су различито допирани силицијумом и магнезијумом, њиховим коментарисањем и поређењем са наведеним и многим другим пријављеним резултатима. Додатно, у кратком временском року, како би се одржали исти услови проучавања узорка, урађена је карактеризација при промени температуре и при промени снаге на недопираном узорку. Такође, урађена је физичка припрема ових наножица за даље проучавање на уређајима за μ PL и μ CL (микрофотолуминесценција и микрокатоделуминесценција) – дисперзија.

3. Опис мастер рада

Мастер рад обухвата 66 страна са укупно 45 слика, 9 табела и 43 референце. Рад садржи увод, 6 поглавља и закључак (укупно 8 поглавља) и списак коришћене литературе.

Прво поглавље представља увод у коме су описани предмет и циљ рада. Дат је кратак преглед InGaN/GaN наножица и њихове предности у сврху коришћења као емитера појединачних фотона.

У другом поглављу је дат кратак преглед протокола за квантну криптографију. Описан је BB84 квантни протокол комуникације и начин размене кључа између особа које размењују тајну информацију, где би за прављење кључа направе избора биле управо – InGaN/GaN наножице.

У трећем поглављу је објашњена потреба за емитерима појединачних фотона. Прво је дат историјски преглед развоја ових емитера, а затим и преглед различитих емитера појединачних фотона са њиховим предностима и манама при употреби.

У четвртном поглављу детаљно су описане прво структурне особине нитрида, где је акценат стављен на GaN и InGaN. Описане су и оптичке особине материјала, као што је зонска структура и енергетски процеп. У оквиру овог поглавља, посебна пажња је посвећена дефектима који се појављују у III-нитридним материјалима, као и екситонима који су фактор карактеризације квалитета нарастаних материјала.

У петом поглављу описани су технолошки процеси коришћени за нарастање наножица и експериментална мерења вршена на њима. Дат је кратак опис сваког појединачног процеса са додатком параметара који су коришћени при мерењима у лабораторији.

У шестом поглављу су описане наножице које су биле на располагању при изради овог мастер рада. Описан је процес два типа нарастања наножица и у табелерном приказу је извршена категоризација наножица, са посебном пажњом на серију допираних GaN наножица, које су главни фокус овог рада.

У седмом поглављу су приказани резултати са пропратном дискусијом где се разликују две гране мастер рада – дисперзовање наножица као припрема за њихова даља мерења и оптичка карактеризација групно нарастаних наножица. Упоредени су резултати из литературе са резултатима добијеним из мерења и изведени су закључци о кристалној структури материјала и интензивности деструкције структуре при допирању.

Осмо поглавље представља закључак у којем су сумирани изложени резултати за свако мерење понаособ и дат је могући план даљег рада на основу изведених закључака.

4. Анализа рада са кључним резултатима

Мастер рад дипл. инж. Јоване Обрадовић се бави проблемом примене наножица у оптоелектронским колима. Показано је да су InGaN/GaN наножице емитери појединачних фотона при оптичкој побуди. Уколико је потребно укључити наножице у оптоелектронско коло, где би за крајњу употребу биле коришћене као извори појединачних фотона у криптованој оптичкој комуникацији, потребно је обезбедити њихово електрично побуђивање, што се обезбеђује допирањем GaN као полупроводничког материјала. Дат је детаљан преглед свих релевантних параметара за испитивање утицаја допаната на кристалну структуру. Приказани су спектри фотолуминесценције недопираних узорака и узорака допираних силицијумом и магнезијумом и на основу литературе су изведени закључци о квалитету допираног кристала. Урађен је трансфер наножица на силицијум и урађена компаративна студија нетрансферованих и трансферованих узорака, те су изведени нови закључци о постојаним екситонима као параметрима релевантним за процену квалитета кристалне структуре. Финализација оптичког испитивања су спектри фотолуминесценције недопираног узорка наножица за различите снаге улазног снопа ласера, као и спектри за различиту температуру. Показано је да тренутно нарастане наножице дају задовољавајући критеријум квалитета кристалне структуре, те да је деструкција

израженија при допирању магнезијумом него при допирању силицијумом. Уз помоћ катодолуминесценције приказана је количина инкорпорације индијума у InGaN/GaN наножицама.

Основни доприноси рада су: 1) свеобухватни приказ релевантне теорије која описује структурне и оптичке особине III-нитридних материјала, са акцентом на дефекте и ексцитоне; 2) различит приступ оптичке анализе нарастаних наножица са упоредном анализом свих добијених резултата 3) финални закључак о квалитету кристалне структуре и његовој даљој могућој употреби при инкорпорацији InGaN.

5. Закључак и предлог

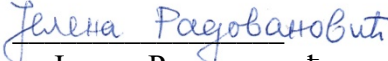
Кандидаткиња Јована Обрадовић је у свом мастер раду успешно проучила основе III-нитридних материјала и емитера појединачних фотона. Кандидаткиња је дала преглед основних карактеристика материјала са акцентима на карактеристикама којима се прецизно оптички описује деструкција кристалне структуре приликом допирања и приказала је релевантне параметре за одређивање квалитета мерене кристалне структуре. Такође, кандидаткиња је дала и финалне предлоге на основу добијених резултата, за даљу надоградњу наножица ради њихове употребе као емитера појединачних фотона.

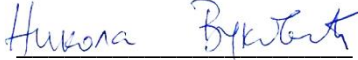
Кандидаткиња је исказала самосталност и систематичност у своме раду, као и иновативне елементе у анализи разматране проблематике.

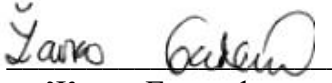
На основу изложеног, Комисија предлаже Комисији за студије II степена Електротехничког факултета у Београду да рад дипл. инж. Јоване Обрадовић прихвати као мастер рад и кандидаткињи одобри јавну усмену одбрану.

Београд, 22. 07. 2022. године

Чланови комисије:


др Јелена Радовановић,
редовни професор


др Никола Вуковић,
доцент


др Жарко Гачевић,
доцент