

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ**

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Сенке М. Ћук, дипл. инж. ел.

Одлуком бр. 5034/2007-3 од 26. 5. 2014. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Сенке М. Ћук под насловом:

**„Технике за унапређење резолуције
у прецизним мерењима са топлим и хладним атомима“**

**(“Techniques for Resolution Improvement
in Precision Measurements with Hot and Cold Atoms”)**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Сенка М. Ћук је докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписала 2007/2008. године (14. 3. 2008. год.). На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 2944/2 од 11.10.2007. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2007/2008., па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. За школску 2010/2011. годину, кандидаткињи је одобрено мировање статуса студента докторских студија.

Докторску дисертацију под насловом *„Технике за унапређење резолуције у прецизним мерењима са топлим и хладним атомима“* (“*Techniques for Resolution Improvement in Precision Measurements with Hot and Cold Atoms*”) кандидаткиња је пријавила Комисији за студије III степена 27. 8. 2013. године. Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на седници одржаној 3. 9. 2013. године, одлуком бр. 5034-07/2, именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Бранислав Јеленковић (ментор), научни саветник Института за физику Универзитета у Београду, др Милан Тадић, редовни професор

Електротехничког факултета Универзитета у Београду, и др Дејан Гвоздић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Извештај Комисије је усвојен на седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржаној 8. 10. 2013. године. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је 18. 11. 2013. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука бр. 61206-5373/2-13).

24. 4. 2014. године кандидаткиња је предала урађену дисертацију на преглед и оцену. На основу предлога Комисије за студије III степена од 29. 4. 2014. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на седници одржаној 20. 5. 2014. године, одлуком бр. 5034/2007-3, именовало Комисију за оцену услова и прихватање докторске дисертације у саставу: др Бранислав Јеленковић, научни саветник Института за физику Универзитета у Београду, др Милан Тадић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, и др Дејан Гвоздић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Технике за унапређење резолуције у прецизним мерењима са топлим и хладним атомима“ (*“Techniques for Resolution Improvement in Precision Measurements with Hot and Cold Atoms”*) припада научној области Електротехничког и рачунарског инжењерства и ужој научној области Наноелектронике и фотонице за коју је Електротехнички факултет у Београду матичан.

За ментора докторске дисертације је одређен др Бранислав Јеленковић, научни саветник Института за физику Универзитета у Београду и дописни члан САНУ, захваљујући дугогодишњем научноистраживачком раду у области фотонице, а посебно експерименталне квантне оптике, што је потврђено великим бројем научних радова објављених у часописима са SCI листе (око 80 радова).

1.3. Биографски подаци о кандидату

Сенка (Милорад) Ђук је рођена 9. 11. 1982. године у Сарајеву, у Босни и Херцеговини. По завршетку Девете београдске гимназије „Михаило Петровић Алас“, 2001. године је уписала Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Маја 2007. године је дипломирала са просечном оценом 8,70 на смеру за Оптиелектронику и ласерску технику одсека за Физичку електронику, одбравивши дипломски рад под насловом „Принципи функционисања и практична реализација ласер-Доплер система у оптичким мерењима“. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, у групи за Наноелектронику и фотонику, уписала је школске 2007/2008. године.

Током 2008/2009. године, Сенка М. Ђук је као стипендиста Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије учествовала у реализацији националног истраживачког пројекта „Квантна и оптичка интерферометрија“ (ОИ141003) у Центру за фотонику на Институту за физику у Београду. Од 2009. године кандидаткиња је запослена у Центру за фотонику, где проучава својства и примене кохерентних ефеката индукованих у пари алкалних метала дејством резонантног ласерског зрачења специфичне радијалне расподеле интензитета. Тренутно је ангажована као истраживач-сарадник на следећим пројектима: „Холографске методе за генерисање специјалних таласних фронта за ефикасну контролу квантних кохерентних ефеката у атом-ласер интеракцијама“ (ОИ171038) и „Генерисање и карактеризација функционалних нанофотонских структура у биомедицини и

информатици“ (ИИИ45016). У раздобљу од јануара 2011. до фебруара 2013. године, кандидаткиња је провела 18 месеци у Центру за ултрахладне атоме на Масачусетском институту за технологију у Кембриџу, САД, где је под менторством проф. др Владана Вулетића учествовала у истраживањима интеракције ласерске светлости са охлађеним алкалним атомима унутар оптичког резонатора и успостављањем и контролом квантно-механичких корелација (увезаности) између честица.

Током истраживачког рада, Сенка М. Ђук је била аутор или коаутор шест радова објављених у врхунским међународним часописима (M21), једног рада објављеног у истакнутом међународном часопису (M22), као и једног рада објављеног у међународном часопису (M23).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на енглеском језику, на 159 страна. Дисертација садржи насловне стране на енглеском и српском језику, страну са информацијама о ментору и члановима Комисије за преглед, оцену и одбрану дисертације, изјаве захвалности (на енглеском и српском језику) и резиме (такође написан на оба језика). Потом је дат садржај, те списак слика (57 слика) и списак табела (4 табеле). Текст рада је подељен на седам поглавља (Chapters): 1. Introduction, 2. Alkali metal atom: Rubidium, 3. Atom-light interaction, 4. Experimental tools and methods in precision spectroscopy, 5. Effects of radial laser intensity profile on coherent resonances, 6. State measurement of ensemble with single-atom resolution, 7. Conclusions and outlook. Дисертација садржи списак коришћене литературе (135 референци) и кратку биографију аутора са списком публикација. Уз дисертацију су приложене и Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, као и Изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дисертације је дат кратак осврт на историјски развој квантне оптике, као једне од „најживахнијих“ и по темама најразноврснијих области савремене физике. Интересовање је усмерено ка области *прецизних мерења*, где се издвајају два правца истраживања и развоја, иницирана бројним постојећим и потенцијалним применама: (1) прецизна спектроскопија и (2) инжењеринг квантних стања у домену квантне електродинамике у резонатору (*cavity QED*). У складу са тим тенденцијама, дисертација се бави двема „дефиницијама“ *резолюције мерења*. Прва се односи на ширину електромагнетно индуковане резонанце детектоване у зависности интензитета ласерске светлости трансмитоване кроз пару рубидијума од спољашњег магнетног поља. Друга подразумева резолуцију у бројању атома рубидијума припремљених у одређено квантно стање, а које почива на прецизним мерењима помераја учестаности резонанце оптичког резонатора. У овом поглављу су дате најбитније карактеристике две експерименталне поставке на којима су реализована истраживања. За сваки од експеримената је дат исцрпан преглед постојеће литературе са до тада оствареним резултатима, и дефинисани су циљеви рада.

У другом поглављу су представљена физичка и оптичка својства рубидијумових атома, првенствено изотопа ^{87}Rb , која су релевантна за експериментална и теоријска истраживања приказана у дисертацији. Бројне особине чине рубидијум погодним за

експериментисање у квантној оптици и за високо-прецизна мерења: значајан притисак паре на скромним температурама од свега неколико стотина степени Целзијуса, лако доступне и јефтине ласерске диоде на таласним дужинама одговарајућих оптичких прелаза, дугачко време живота основних стања, специфично понашање у присуству спољашњег електричног или магнетног поља. Такође, основна стања атома свих алкалних метала имају затворене љуске са само једним валентним електроном, те једини допринос укупном ангуларном моменту потиче управо од тог електрона. Приказана је шема енергетских нивоа и описано понашање атома у стационарним пољима, магнетном и електричном, која се често користе за припремање добро дефинисаних стања атома, са аспекта спољашњих и унутрашњих степени слободе.

У трећем поглављу је описана интеракција светлости са атомом, у слободном простору и оптичком резонатору. Прво је уведена нотација и дат кратак преглед одређених аспеката квантне механике који олакшавају разумевање материјала приказаног у остатку тезе (првенствено у петом поглављу). Дефинисана је матрица густине, њени елементи и особине. Увођење апроксимације атома са два нивоа, који интерагује са резонантном ласерском светлошћу, омогућава опис временске еволуције стања атома помоћу оптичких Блохових једначина. Ефекат осцилујућег електричног поља на енергију нивоа, а не само популације стања атома, такође је приказан у оквиру овог поглавља. У наставку су описани ефекти *кохерентног заробљавања популације, електромагнетно индуковане транспаренције и апсорпције (ЕИТ и ЕИА)*, и услови за њихово настајање у средини са тринивооским атомима, који истовремено интерагују са два монохроматска континуална ласерска поља. У наредним одељцима се посматра шта се дешава када се атом са два нивоа постави у оптички резонатор. Улога оптичког резонатора се огледа у значајном смањењу ефеката спонтане емисије у слободни простор, а резонатор омогућава и скупљање расејаног зрачења у једном његовом моду. Дефинисане су карактеристичне временске скале динамике интеракције и *режими спрезања* атома и фотона у резонатору. Интеракција између атома и мода резонатора је анализирана класично, преко снаге трансмитованог и расејаног ласерског зрачења.

Четврто поглавље даје преглед уређаја и стандардних експерименталних техника које су имплементирани у експериментима изведеним у оквиру дисертације. Дати су описи ласерских диода са специфично дизајнираним резонаторима, као и неколико активних и пасивних техника за стабилизацију емисионе учестаности ласера, која је предуслов за спектроскопска мерења. Потом су размотрени релевантни механизми ласерског хлађења и магнетног и оптичког заробљавања атома, уз дефинисање неколико температурних граница достижних у појединим методама. У овом поглављу су описани и неки од комерцијално доступних извора алкалних атомских врста.

Пето поглавље приказује експериментално и теоријско истраживање облика кохерентних ЕИТ и ЕИА резонанци, индукованих у пари рубидијума применом ласерских снопова различитих профила интензитета, Гаусовог и П-профила, и предлаже смањење ширине резонанци погодним избором профила снопа и сегмента који ће бити детектован. У дисертацији је реализована алтернативна експериментална поставка, тзв. *Ханле конфигурација*, где се користи само један линеарно поларизован ласерски снап стабилне учестаности, са две супротно ротирајуће кружне компоненте поларизације које играју улоге тзв. *пумпе* и *пробе*. За генерисање Раманове раздешености се примењује спољашње магнетно поље дуж правца снопа. Информације о карактеристичним својствима резонанци, ширини и амплитуди, добијају се мерењем трансмисије целог или сегмената ласерског снопа. Ово поглавље описује и теоријски модел базиран на временски зависним оптичким Блоховим једначинама, за анализу и проверу добијених резултата мерења.

У шестом поглављу је описана експериментална реализација детекционог система на бази оптичког резонатора, ради бројања хладних атома рубидијума у одређеном хиперфином стању са једноатомском резолуцијом. Прво је описан ласерски систем који је коришћен за хлађење, заробљавање и мерење ансамбла атома ^{87}Rb , уз приказ међусобних фреквентних релација и специфичних детаља о примењеним техникама стабилизације учестаности. Даље, наведени су релевантни параметри оптичког резонатора и детаљи о поступку припреме облака охлађених атома. Потом следи опис процедуре мерења и детаљи о „читању“ атомских стања на основу добијених сигнала. Наведени су математички модели који омогућавају интерпретацију добијених резултата и мерне несигурности.

Седмо поглавље доноси општи преглед најважнијих резултата и закључака, дајући и неколико препорука за даље унапређење демонстрираних метода и будуће правце истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Квантна оптика је област модерне физике која у први план долази у последњих 20 до 30 година. Пре тога је ова дисциплина сматрана уско специјализованом и као таква била доступна само малом броју напредних студената појединих универзитета. Међутим, данас је интересовање за област интензивно и мотивисано све бројнијим применама проучаваних ефеката у квантној информатици и прецизној метрологији (мерење времена, учестаности, магнетног поља, брзине и др.). У дисертацији се истражују ефекти интеракције светлости са парама алкалних метала, на два различитим експерименталним поставкама у специфичним условима, а ради стицања непроцењивог искуства у експерименталном раду, проширивања знања о проучаваним феноменима и развоја нових метода за побољшање резолуције неких од најнапреднијих мерних инструмената данашњице. Савременост теме се огледа у литератури коју је кандидаткиња користила приликом дефинисања проблема, као и у значају часописа у којима су презентовани резултати проистекли из истраживања у оквиру дисертације.

У основи рада еталона учестаности и других прецизних мерних уређаја, често су следећа два кохерентна ефекта: електромагнетно индукована транспаренција и апсорпција. Управо су многобројне примене ових ефеката мотиви за њихово проучавање у дисертацији. ЕИТ (ЕИА) је интересантан феномен: под дејством снажног оптичког поља, средина са тринивооским атомима постаје сасвим транспарентна за упадну светлост (или је „појачано“ апсорбује) у уском опсегу фреквенција. Ефекат је базиран на деструктивној (конструктивној) интерференцији амплитуда вероватноћа прелаза између атомских стања. Уочавање ових ефеката захтева спрезање три квантна стања атома помоћу два оптичка поља (кохерентни светлосни извори, нпр. ласери). Пробно поље је блиско учестаности прелаза између два стања и мери апсорпциони спектар прелаза. Много снажније спрежуће поље (пумпа) је резонантно са другим посматраним прелазом. Ако су стања погодна изабрана, присуство спрежућег поља ће створити спектрални „прозор“ (резонанцу) у транспаренцији, који ће бити детектован пробним пољем. Савремена истраживања ових ефеката се изводе са атомским системима у разблаженим гасовима, као и у чврстим или чак егзотичнијим стањима попут Бозе-Ајнштајн кондензата. Истраживања се раде и у полупроводничким наноструктурама, као што су квантне јаме, квантне жице и квантне тачке. ЕИТ је један од

ефеката који могу произвести спору или заустављену светлост. Потенцијалне примене укључују и оптичко прекидање на нивоу појединачних фотона, минијатурне атомске часовнике, као и све-оптичко (*all-optical*) процесирање квантних информација.

Имајући на уму горе наведено, а након прегледа актуелне литературе и увида у до тада постигнуте резултате, кандидаткиња је у договору са ментором формулисала предмет истраживања за први експеримент приказан у дисертацији. Ту се у ласерски побуђиваним парама рубидијума на собној температури у вакуумској стакленој ћелији, испитује утицај радијалне расподеле интензитета ласерског снопа на облике и ширине резонанци у кохерентним ефектима, електромагнетно индукованој транспаренцији и апсорпцији. Разматра се комбиновани утицај ласерског поља и контролисаног хомогеног магнетног поља на еволуцију атомских стања у снопу, са циљем да се погодним избором профила снопа (Гаусов или П-профил) и специфичним начином детекције појединих његових делова, оствари додатно сужавање резонанци, што је од практичног значаја за побољшање мерне резолуције секундарних стандарда учестаности, магнетометара, ултра-уских филтера оптичких фреквенција и др. Такође, приказани рад указује на неопходност разматрања реалистичног профила интензитета ласерског снопа у теоријским прорачунима (који се претежно ослањају на расподелу П-облика) пириликом моделовања експерименталних резултата мерења (изведених углавном са Гаусовим сноповима).

Оптички еталони учестаности су углавном базирани на ласерски побуђиваним електронским прелазима у одређеним атомима, јонима или молекулима, при чему је учестаност ласера стабилисана на одговарајући прелаз. Прецизност уређаја зависи од два фактора. Први је температура атомског ансамбла – хладни атоми се крећу много спорије, дозвољавајући дужа времена мерења. Други фактор је фреквенција и унутрашња ширина електронског прелазу – веће фреквенције и уске линије повећавају прецизност. Према томе, значајан ефекат температуре и старења на померање фреквенције током времена, разлог су зашто стандарди базирани на стакленим ћелијама нису погодни за примарне стандарде учестаности, али могу бити веома јефтина решења, малих снага и димензија, за секундарне стандарде или тамо где је потребна боља стабилност од оне коју пружају кварцни осцилатори (контрола фреквенције телевизијских станица, базних станица мобилне телефоније, у тест опреми и телекомуникационим системима, и глобалним системима за сателитску навигацију).

Ради смањења нехомогеног ширења услед термалног кретања (Доплерово ширење) и судара, густина честица и релативне брзине морају бити минимизирани. Ово је могуће постићи хватањем честица у замку (нпр. оптичка замка) у вакуумској комори и применом ласерског хлађења. Тиме се ствара могућност за веома прецизна спектроскопска мерења на одговарајућем прелазу. Прецизни мерни инструменти су од огромног значаја за физичаре јер омогућавају најосетљивије тестове за проверу фундаменталних константи природе, будући да неке теорије предвиђају њихово мењање током времена. Током неколико протеклих деценија, технологија израде мерних уређаја базираних на ансамблима атома (стандарди фреквенције, магнетометри, гравиметри, акцелерометри и др.) је изузетно напредовала. До 1999. године је атомски часовник достигао тачку где његову стабилност не ограничавају технички извори шума, већ статистичке флукуације у понашању некорелираних честица. Овај праг прецизности је познат као стандардна квантна граница (*Standard Quantum Limit, SQL*). Стога је изазов метрологије 21. века да пројектовање прошири у квантни домен, где се увођењем и контролом квантних корелација (*entanglement*, увезаност) између атома постиже прецизност знатно боља од стандардне квантне границе. Тако стања стиснутог спина (*spin-squeezed states*), на пример, побољшавају однос сигнал-шум

перасподелом квантног шума из величине која се мери у ону која није од интереса, што омогућава рад атомских часовника са варијансом 3 пута мањом од SQL-а. Гринбергер-Хорн-Цајлингер (*Greenberger-Horne-Zeilinger, GHZ*) стања појачавају сигнал помоћу брже-еволуирајуће колективне фазе, тиме омогућавајући мерења чак и на Хајзенберговој граници. У оба случаја, потребна је висока прецизност читавања да би се реализовало метролошко појачање. Најбољи остварени резултати за *spin-squeezing* су ограничени управо детекцијом, док код GHZ стања читавање колективне фазе захтева мерење парности разлике између популација два атомска стања.

Према томе, високо-осетљива детекција броја атома у датом стању са једно-атомском резолуцијом, представља значајну технику која ће омогућити метрологију знатно испод стандардне квантне границе. У другом експерименту реализованом у дисертацији, врше се истраживања са охлађеним атомим рубидијума, заробљеним у оптичком резонатору унутар вакуумске коморе, управо са циљем да се за мезоскопски ансамбл развије детекциони систем осетљивији од стандардне квантне границе, који ће омогућити мерење разлике између популација два атомска стања са једноатомском резолуцијом.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током рада, кандидаткиња је детаљно претражила и проучила постојећу литературу и у дисертацији коректно навела 135 библиографских референци на радове који су у вези са темом истраживања. Библиографија садржи велики број недавно објављених радова из врхунских међународних часописа попут *Physical Review A, Physical Review Letters, Nature*, а који су уско везани за разматране проблеме, што говори о актуелности и значају истраживања. У списку референци се налази и пет ауторских и коауторских радова кандидаткиње.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија научног рада на приложеној дисертацији, подразумевала је упознавање са доступном литературом о физичким феноменима од интереса и претходно оствареним резултатима других истраживача. Пронађени релевантни резултати су сумирани и систематизовани, на основу чега је дефинисана проблематика којом ће се бавити дисертација. У истраживачком раду су примењене бројне експерименталне и теоријско-математичке процедуре и технике, уобичајене у процесима планирања, постављања и извођења квантно-оптичких експеримената. Неке од њих су:

- конструкција и оптимизација рада мономодних диодних ласера у спољашњим резонаторима, на одговарајућим таласним дужинама, и израда струјних и температурских контролера;
- активне и пасивне технике за стабилизацију емисионе учестаности ласера: спектроскопске технике које почивају на елиминисању Доплеровог ширења прелаза, стабилизација према сигналу избијања, Паунд-Дривер-Хол (*Pound-Drever-Hall, PDH*) метод стабилизације учестаности ласера на референтну шупљину путем фазне модулације светлости, инјекциона стабилизација;
- поравнавање, усмеравање и обликовање снопова коришћењем бројних оптичких компоненти (диелектричних огледала, сочива, делитеља снопа, таласних плочица, оптичких влакана, акусто-оптичких и електро-оптичких модулятора и др.);

- припрема одређених атомских стања оптичким пумпањем, дејством контролисаних магнетних или електричних поља и др.;
- ласерско хлађење атома у магнето-оптичкој замци (конфигурација са три пара супротно-пропагирајућих црвено-раздешених снопова и градијентом магнетног поља који је генерисан жичаним струјним намотајима у анти-Хелмхолц конфигурацији), хлађење изазвано градијентом поларизације, заробљавање у диполној замци тј. једнодимензионој оптичкој решетки и др.;
- имплементација унапређених метода детекције, извођење и управљање експериментима помоћу кодова развијених у комерцијалним програмским пакетима (LabView, Mathematica, итд.), прикупљање и обрада резултата мерења (OriginPro, Mathematica);
- развој теоријских и математичких модела за проверу и потпуније разумевање резултата мерења, а тиме и самих ефеката.

Остварени резултати рада су представљени научној заједници кроз учешћа на научним скуповима и радове публиковане у часописима са SCI листе.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања представљена у дисертацији доприносе потпунијем разумевању природе и последица фундаменталних физичких процеса који се јављају у интеракцијама између алкалних атома и светлости. Стечена знања и резултати спроведених истраживања би требало да омогуће развој нових техника за побољшање резолуције савремених мерних уређаја заснованих на ансамблима честица, а коришћених у комуникационим системима, прецизној метрологији и квантном рачунарству. С једне стране, јефтине, компактни рубидијумски осцилатори базирани на гасним ћелијама, са бројним комерцијалним применама (контрола учестаности телевизијских и станица мобилне телефоније, глобални системи позиционирања, мерна и тест опрема и др.), захтевају уске резонанце, које су манифестација проучаваних ефеката електромагнетно индуковане транспаренције и апсорпције. С друге стране, најпрецизнији атомски часовници, гравиметри, магнетометри, акцелерометри, интерферометри, су данас толико добро испројектовани да је њихова прецизност ограничена квантним шумом пројекције, а не техничким изворима шума. Једноатомска резолуција у мерењу броја атома у одређеном квантном стању представља технику која би, имплементацијом у већ постојеће атомске интерферометре и сличне мерне системе, који се ослањају на мерење разлике између енергија дискретних атомских нивоа (тј. фреквенције), а која је пак пропорционална разлици у броју самих атома у посматраним нивоима, требало да омогући смањење мерне несигурности знатно испод стандардне квантне границе.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је током рада на дисертацији приказала све способности неопходне за самосталан рад. Врло зрело је предвидела и препознала актуелност и значај изабране теме, а о систематичности и пажњи у избору сведочи и приложени списак релевантне литературе. Циљеви истраживања су јасно дефинисани, имплементирани експерименталне технике и процедуре, као и теоријски модели, детаљно су представљени и образложени у дисертацији. Анализа и дискусија резултата, као и закључци произашли из рада, јасно су написани, уз сагледавање предности и недостатака, и указивање на

места за евентуална унапређења. Све наведено потврђује да је кандидаткиња способна да убудуће самостално или у тиму обавља научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Истраживања у дисертацији су усмерена ка побољшању метода прецизне спектроскопије, а реализована су кроз два експеримента, на топлим и хладним атомима рубидијума. Најважнији резултати и доприноси рада су следећи:

- Демонстриране су значајне разлике у облику одговарајућих ЕИА (ЕИТ) резонанци, добијених детекцијом целог ласерског снопа Гаусовог или П-профила, истог пречника и укупне снаге, након проласка снопа кроз узорак атома рубидијума изложен спољашњем скенирајућем магнетном пољу.
- Детекција резонанци које потичу из различитих сегмената попречног пресека ласерског снопа, омогућила је лакше разумевање ефеката који одређују еволуцију атомских стања у снопу датог профила и њихов допринос свеукупном облику кохерентних резонанци.
- Показано је да су ЕИА резонанце, индуковане ласерским снопом са Гаусовом расподелом интензитета, знатно уже у ободним деловима снопа у поређењу са централним, што се објашњава ширењем услед снаге (*power broadening*). Супротно, у случају интеракције са П-профилом снопа, најуже ЕИА резонанце се уочавају у центру снопа, што је последица сужавања услед дугачког времена прелета атома кроз сноп (*transit-time narrowing*).
- Облици ЕИТ резонанци индукованих Гаусовим профилем снопа су објашњени Ремзијевом интерференцијом (*Ramsey-like interference*) између атома кохерентно припремљених у центру снопа и ласерског зрачења у спољним сегментима, која је доминантно одговорна за сужавање резонанци у ободу. Под дејством снопа П-профила, облик резонанце је одређен оптичким пумпањем у неспрегнути хиперфини ниво совоног стања. Због јаке зависности оптичког пумпања од магнетног поља, у резонанцама из централних делова снопа се уочавају трансмисиони минимуми око узане централне ЕИТ резонанце.
- Током истраживања је развијен теоријско-математички модел заснован на оптичким Блоховим једначинама, који верно описује временску еволуцију реалних атомских система са више нивоа. При израчунавању матрице густине појединачних атома и целог ансамбла, модел узима у обзир различите брзине и путање кретања атома у снопу, као и ефекте пропагације ласерског снопа дуж ћелије и индуковану атомску поларизацију паре рубидијума. Модел израчунава снагу трансмитованог зрачења, целог снопа или његових сегмената, ради поређења са експериментално добијеним резултатима. Модел се може проширити и на стаклене ћелије са *buffer* гасом или антирелаксационим слојевима, укључивањем одговарајућих чланова.
- Практична последица приказаног рада је да се одговарајућим одабиром профила снопа (а данашња истраживања су проширена и на неке нове расподеле интензитета, попут Лагер-Гаусових и Беселових снопова), као и сегмента који

ће бити детектован, могу реализовати уже кохерентне резонанце, и тиме побољшати резолуција мерења које је засновано на размотреним ефектима.

- Да би се добила колективна информација о стању охлађених атома у вакуумској комори, атоми су заробљени у оптичком резонатору, којим су смањени нежељени ефекти спонтане емисије у слободан простор, те фаворизовано расејање у мод пробне светлости (*forward scattering*).
- За мерење помераја учестаности резонанце оптичке шупљине, изазваног променом индекса преламања средине услед присуства атома, имплементиран је PDH-метод. PDH сигнал носи информацију о фази пробне светлости рефлектоване од оптичке шупљине, а раздешеност учестаности ове светлости од атомске резонанце је релативно ниска (од 250 до 375 MHz). PDH-метод и оваква раздешеност су омогућили мерења на самој резонанци, чиме је повећана вредност сигнала по атому у односу на ранија трансмисиона мерења, а радом на затвореном прелазу је смањен и број нежељених догађаја расејања.
- Демонстрирана је једноатомска резолуција у мерењу броја атома у одређеном хиперфинном стању за мезоскопски ансамбл који садржи до 100 охлађених атома рубидијума, са варијансом мерења од око 21 dB мањом од квантног шума пројекције. Ови резултати представљају побољшање за више од реда величине у броју атома и за око 10 dB у варијанси у односу на до тада остварене резултате. Тврдња о једноатомској резолуцији је појачана експерименталним мерењем једноатомског сигнала из биномне расподеле „испумпаних“ атома, а варијанса мерења и извори шума су описани одговарајућим математичким моделом.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад кандидаткиње Сенке М. Ђук је заснован на актуелним научним резултатима, а за циљ има допуну и побољшање постојећих теоријских модела и тумачења одређених феномена у интеракцији светлости са атомима, у слободном простору и оптичком резонатору који модификује спонтану емисију, и експерименталних техника за њихову реализацију и детекцију. Сагледавањем постављених хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата, констатује се да је кандидаткиња успешно одговорила на сва битна питања која суштински произилазе из разматране проблематике којом се дисертација бави. Приказана експериментална решења и математички модели интеракција, представљају значајан научни и стручни допринос у области квантне оптике, а посебно прецизне метрологије.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада, у ужој области теме дисертације Сенка М. Ђук је објавила 6 радова у врхунским међународним часописима (M21), 1 рад у истакнутом међународном часопису (M22), као и 1 рад у међународном часопису (M23). Објављени радови су наведени у наставку са одговарајућим импакт факторима и М-кофицијентима изабраним по најповољнијој класификацији из периода од три године (година пре, година публикавања и година после публикавања), према Правилнику о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача из 2008. године.

Радови објављени у врхунским међународним часописима (M21):

1. Robert McConnell, Hao Zhang, **Senka Ćuk**, Jiazhong Hu, Monika H. Schleier-Smith, and Vladan Vuletić: Generating entangled spin states for quantum metrology by single-photon detection, *Physical Review A*, vol. 88, no. 6, pp. 063802, 2013 (**IF=3.042**) (ISSN 1050-2947).
2. **S. M. Ćuk**, A. J. Krmpot, M. Radonjić, S. N. Nikolić, and B. M. Jelenković: Influence of a laser beam radial intensity distribution on Zeeman electromagnetically induced transparency line-shapes in the vacuum Rb cell, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 46, no. 17, pp. 175501, 2013 (**IF=2.031**) (ISSN 0953-4075).
3. Hao Zhang, Robert McConnell, **Senka Ćuk**, Qian Lin, Monika H. Schleier-Smith, Ian D. Leroux, and Vladan Vuletić: Collective State Measurement of Mesoscopic Ensembles with Single-Atom Resolution, *Physical Review Letters*, vol. 109, no. 13, pp. 133603, 2012 (**IF=7.943**) (ISSN 0031-9007).
4. A. J. Krmpot, M. Radonjić, **S. M. Ćuk**, S. N. Nikolić, Z. D. Grujić, and B. M. Jelenković: Evolution of dark state of an open atomic system in constant intensity laser field, *Physical Review A*, vol. 84, no. 4, pp. 043844, 2011 (**IF=2.878**) (ISSN 1050-2947).
5. **S. M. Ćuk**, M. Radonjić, A. J. Krmpot, S. N. Nikolić, Z. D. Grujić, and B. M. Jelenković: Influence of laser beam profile on electromagnetically induced absorption, *Physical Review A*, vol. 82, no. 6, pp. 063802, 2010 (**IF=2.878**) (ISSN 1050-2947).
6. A. J. Krmpot, **S. M. Ćuk**, S. N. Nikolić, M. Radonjić, D. G. Slavov, and B. M. Jelenković: Dark Hanle resonances from selected segments of the Gaussian laser beam cross-section, *Optics Express*, vol. 17, no. 25, pp. 22491-22498, 2009 (**IF=3.880**) (ISSN 1094-4087).

Радови објављени у истакнутим међународним часописима (M22):

1. S. N. Nikolić, V. Đokić, N. M. Lučić, A. J. Krmpot, **S. M. Ćuk**, M. Radonjić, and B. M. Jelenković: The connection between electromagnetically induced transparency in the Zeeman configuration and slow light in hot rubidium vapor, *Physica Scripta*, vol. T149, pp. 014009, 2012 (**IF=1.204**) (ISSN 1094-4087).

Радови објављени у међународним часописима (M23):

1. A. J. Krmpot, **S. M. Ćuk**, S. N. Nikolić, M. Radonjić, Z. D. Grujić, and B. M. Jelenković: Laser beam profile influence on dark Hanle resonances in Rb Vapor, *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, no. 4, pp. 563-565, 2009 (**IF=0.467**) (ISSN 0587-4246).

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

1. A. J. Krmpot, S. N. Nikolić, **S. M. Ćuk**, M. Radonjić, and B. M. Jelenković: Dark Hanle resonance narrowing by blocking the central part of the Gaussian laser beam, *Proceedings of SPIE*, vol. 7747, pp. 77470E, 2011.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидаткиње Сенке М. Ђук, дипл. инж. ел., садржи савремене и оригиналане научне доприносе. Дисертација се бави ефектима интеракције резонантног ласерског зрачења са атомима алкалног метала рубидијума у контролисаним експерименталним условима, са циљем разумевања индукованих кохерентних ефеката, а онда и потенцијалног побољшања резолуције прецизних мерења (фреквенције, магнетног поља, итд.), која су заснована на проучаваним ефектима. Дисертација објашњава механизме интеракција и предлаже имплементацију побољшаних метода детекције резонантне светлости, као носиоца одређене информације о ансамблу честица са којим интерагује, у постојеће процедуре мерења или мерне инструменте. Добијени резултати истраживања су објављени у више релевантних часописа са SCI листе.

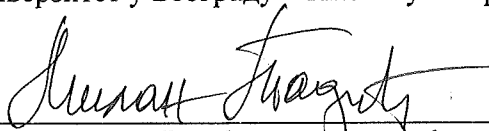
На основу свега претходно изреченог, Комисија за преглед и оцену дисертације констатује да је Сенка М. Ђук испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду, те са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да докторску дисертацију под називом „Технике за унапређење резолуције у прецизним мерењима са топлим и хладним атомима“ (*“Techniques for Resolution Improvement in Precision Measurements with Hot and Cold Atoms”*) прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

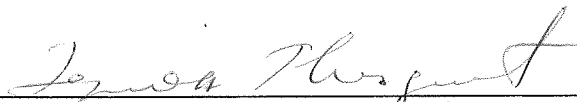


др Бранислав М. Јеленковић, научни саветник,
дописни члан САНУ

Универзитет у Београду – Институт за физику



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



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