

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

Предмет: Подобност теме и кандидата Сенке Ћук за израду докторске дисертације.

Одлуком бр. 5034-07/2 од 03. септембра 2013. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Сенке Ћук за израду докторске дисертације и научне заснованости теме *„Технике за унапређење резолуције у прецизним мерењима са топлим и хладним атомима“* („*Techniques for Resolution Improvement in Precision Measurements with Hot and Cold Atoms*“). На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Сенка (Милорад) Ћук је рођена 09. новембра 1982. године у Сарајеву. Девету београдску гимназију „Михаило Петровић Алас“ завршила је 2001. године. У мају 2007. године, дипломирала је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру за Физичку електронику – одсек за Оптиелектронику и ласерску технику, са темом *„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 2008. године. Школске 2008/2009. је као стипендиста Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије укључена у реализацију научноистраживачког пројекта „Квантна и оптичка интерферометрија“ (бр. 141003).

Сенка Ћук је запослена у звању истраживача сарадника у Институту за физику у Београду, где од 2008. године ради на научноистраживачким пројектима Лабораторије за фотонику, у којима се проучавају својства и примене кохерентних ефеката индукованих присуством електромагнетног зрачења у пари алкалних метала на собној температури. Током 2011. и 2012. године, боравила је као гостујући студент на Масачусетском институту за технологију у Кембриџу (САД), где се у Центру за ултрахладне атоме бавила прецизним мерењима сигнала који потичу од хладних атома, тражећи оптималну технику мерења физичких величина (фреквенције, магнетног поља и др.) са прецизношћу бољом од стандардне квантне границе.

1.2. *Стечено научноистраживачко искуство*

У току докторских студија, до подношења Захтева за одобрење теме дисертације, Сенка Ћук је испунила све обавезе предвиђене Студијским програмом и изборним подручјем студија (Научно-стручни рад, Студијски истраживачки рад I и II), и положила следеће испите:

1. Простирање оптичких таласа у комплексним срединама (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
2. Фотонски кристали и оптички метаматеријали (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
3. Оптиелектронске мерне методе (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
4. Скенирајућа микроскопија у нанонауци и нанотехнологији (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
5. Електричне и оптичке карактеристике материјала у наноелектроници и фотоници (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
6. Увод у научни рад (оцена 10 – 6 ЕСПБ бодова)
7. Нелинеарна оптика (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
8. Квантна оптика (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова)
9. Оптичко траповање и биомедицинска наноманипулација (оцена 10 – 9 ЕСПБ бодова).

Резултати научне активности Сенке Ћук, приказани су у следећим радовима, објављеним у водећим међународним часописима и на конференцијама:

1. **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, pp. 175501 (2013).
2. 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).
3. 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).
4. 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. 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).
6. **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).

7. 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).
8. 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).

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Резултати досадашњег истраживачког рада Сенке Ћук и остварена искуства, указују да ће предложена докторска дисертација бити успешно реализована.

2. Предмет и циљ истраживања

Истражују се два аспекта интеракције светлости са парама алкалних метала, на два различита експериментална апаратурама. Циљ је да се побољша резолуција неких од најчешће коришћених мерних инструмената данашњице, базираних на ансамблима атома.

Прво се, у ласерски побуђиваним парама рубидијума на собној температури, експериментално испитује утицај укупног интензитета и радијалног профила примењеног ласерског снопа на облике и ширине резонанци у кохерентним ефектима, *електромагнетно индукованих транспаренције* и *апсорпције* (ЕИТ и ЕИА). Разматра се комбиновани утицај ласерског поља и контролисаног хомогеног магнетног поља на еволуцију атомских стања у снопу. Циљ је да се погодним избором профила снопа (Гаусов или П-профил) и специфичним начином детекције појединих његових делова, постигне сужавање резонанци, што је од практичног значаја за побољшање мерне резолуције стандарда учестаности, магнетометара, ултра-уских филтера оптичких фреквенција и др.

У другом делу дисертације, врше се експерименти са хладним атомим рубидијума, заробљеним у оптичком резонатору унутар вакуумске коморе, где се посредством светлости остварују квантне корелације између честица. Циљ је да се за мезоскопски ансамбл од око 100 атома развије и демонстрира детекциони систем који омогућава мерење разлике између популација два стања, са резолуцијом од једног атома, и постигне осетљивост мерења знатно испод границе квантног шума пројекције. Мерење броја атома у одређеном стању са једноатомском резолуцијом, представља значајну технику која ће омогућити метрологију знатно испод стандардне квантне границе.

3. Полазне хипотезе

При интеракцији атома рубидијума са сноповима различитих радијалних профила интензитета, Гаусовог, који се често користи у експериментима, и П-профила, који је уобичајен у теоријским израчунавањима, очекују се значајне разлике у облицима и ширинама ЕИТ и ЕИА резонанци, оправдане различитом природом физичких процеса којима су атоми изложени.

Планирани експеримент са хладним атомима се изводи под претпоставком да се коришћењем оптичког резонатора за генерисање увезаних стања у атом-атом интеракцијама посредством светлости могу смањити статистичке флуктуације броја атома у одређеном стању толико да се, погодним избором експерименталних параметара, оствари једноатомска резолуција.

4. Научне методе истраживања

Ефекти ЕИТ и ЕИА се реализују у тзв. *Ханле конфигурацији* експеримента. Линеарно поларизован ласерски сноп, учестаности стабилисане на одговарајући прелаз у рубидијуму, носилац је двојаке улоге: пумпе, која кохерентно припрема атоме у одређено стање, и пробе којом се врши мерење. Раманова раздешеност магнетних поднивоа у пари рубидијума на собној температури, постиже се деловањем контролисаног хомогеног магнетног поља дуж правца простирања снопа. Информација о карактеристичним параметрима резонанце добија се из измерене трансмисије целог или дела снопа Гаусовог или П-радијалног профила интензитета. Теоријски модел за проверу експерименталних резултата базиран је на оптичким Блоховим једначинама.

У другом експерименту се посредством пробне светлости индукују квантне корелације између охлађених атома рубидијума, у комори под ултра-високим вакуумом. Атоми су заробљени у диполном потенцијалу унутар оптичког резонатора високе финесе. Присуство атома мења индекс преламања средине, што доводи до померања резонантне учестаности шупљине. Број атома присутних у резонатору се добија мерењем индукованог помераја учестаности оптичког резонатора. За мерење помераја се користи дисперзивни сигнал добијен детекцијом дела резонантне пробне светлости, који се рефлектује од оптичке шупљине. Резолуцију детектора одређује варијанса броја атома, која се добија из великог броја поновљених мерења.

5. Очекивани научни допринос

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, јефтини, компактни рубидијумски осцилатори базирани на гасним ћелијама, са бројним комерцијалним применама (контрола учестаности телевизијских станица и базних станица мобилне телефоније, глобални системи за сателитску навигацију, нпр. ГПС), захтевају уске резонанце. С друге стране, најпрецизнији атомски часовници, гравиметри, магнетометри, акцелерометри, данас су толико добро испројектовани да је њихова прецизност ограничена квантним шумом пројекције, а не техничким изворима шума. Једноатомска резолуција у мерењу броја атома у одређеном стању представља технику која би требало да омогући смањење мерне несигурности знатно испод стандардне квантне границе.

6. План истраживања и структура рада

У дисертацији је планирано изучавање утицаја радијалне расподеле интензитета ласерског снопа на карактеристике резонанци у кохерентним ефектима *електро-*

магнетно индукованих транспаренције (ЕИТ) и апсорпције (ЕИА). ЕИТ и ЕИА су последице интерференције амплитуда вероватноћа прелаза између атомских стања. За експериментално уочавање ових ефеката, потребно је извршити спрезање одговарајућих нивоа основног стања са побуђеним, применом два кохерентна оптичка поља, тзв. *пробног и спрежућег ласера*. Пробно поље мери апсорпциони спектар на једном од прелаза, а снажно спрежуће поље (*пумпа*), резонантно са другим прелазом, ствара спектрални „прозор“ у детектованом сигналу. Планирана је алтернативна реализација експеримента, тзв. *Ханле конфигурација*, коришћењем само једног линеарно поларизованог ласерског снопа чије супротно ротирајуће кружне компоненте поларизације имају улогу пумпе и пробе, и спољашњег хомогеног магнетног поља, за генерисање Раманове раздешености. Стабилизација учестаности коришћеног диодног ласера у спољашњој шупљини биће остварена спектроскопском методом DDAVLL-а (*Doppler-free Dichroic Atomic Vapor Laser Lock*). Код посматрања ЕИТ ефекта, ласер ће бити стабилисан на прелаз са $F_g=2$ на $F_e=1$ (D_1 линија у ^{87}Rb), док се за уочавање ЕИА користи прелаз са $F_g=2$ на $F_e=3$ (D_2 линија у ^{87}Rb). Интеракција ласерског зрачења са атомима рубидијума се одвија на собној температури, у стакленој вакуумској ћелији са природном мешавином изотопа рубидијума. Ћелија је постављена коаксијално у центар соленоида, којим се ствара хомогено магнетно поље дуж правца простирања снопа. Посматрају се две различите радијалне расподеле интензитета снопа, Гаусов и П-профил, истог пречника. Интензитет снопа при мерењу се подешава неутралним филтером променљиве густине. Уске резонанце у трансмитованој ласерској светлости се детектују фотодиодом велике површине. За детекцију ЕИТ и ЕИА резонанци из малих цилиндричних сегмената колимисаног ласерског снопа, испред фотодиоде се поставља апертура која се може померати дуж пречника снопа. Заштиту експеримента од лабораторијских магнетних поља обезбеђује трослојни μ -метал, у коме је смештена ћелија са соленоидом. Коришћењем формализма матрице густине, биће и теоријски анализирана динамика интеракције атома рубидијума и ласерског снопа одређеног профила, и дато поређење са експерименталним резултатима.

У дисертацији се планира и одређивање броја хладних атома у резонатору у вакуумској комори, на основу укупног измереног помераја учестаности оптичког резонатора и познатог помераја индукованог једним атомом. За формирање диполне замке у конфокалном резонатору високе финесе биће коришћена светлост таласне дужине 852 nm. У замци се онда конфинира од 10 до 500 ласерски охлађених атома ^{87}Rb . Мерење резонантне учестаности шупљине, која је померена услед промене индекса преламања средине изазване присуством атома, врши се PDH-методом (*Pound-Drever-Hall*): део пробне светлости рефлектован од оптичке шупљине у хетеродинској детекцији даје фреквентно-зависан дисперзивни сигнал у околини резонанце шупљине. Пробна светлост је на 780 nm и кружно поларизована тако да побуђује прелаз са $(F_g=2, m_F=2)$ на $(F_e=3, m_F=3)$. Избором затвореног прелаза се смањује Раманово расејање ка другим стањима и продужава време мерења. Раздешеност учестаности пробе од посматраног прелаза треба да буде мања од 400 MHz, ради постизања већег помераја фреквенције по атому. Варијанса броја атома се добија из великог броја поновљених мерења. Планирано је разматрање утицаја неколико експерименталних параметара (раздешеност атома од резонатора, време интеграције, број атома и др.) на варијансу броја атома у појединим стањима, као и укупног броја атома. Очекује се да ће директно уочавање квантизованог сигнала бити немогуће због просторне променљивости јачине спрезања атома са шупљином. Тврдња о једноатомској резолуцији ће се онда критично ослањати на исправну калибрацију сигнала по једном атому, који се може израчунати из независно измерених параметара резонатора. Због тога се планира и развијање

експерименталног метода за екстракцију вредности помераја по једном атому, који треба да потврди израчунату вредност.

7. Закључак и предлог

Предложена тема докторске дисертације је из домена истраживања која се одвијају у оквиру научноистраживачких пројеката Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, на којима је Сенка Ћук ангажована: „Квантна и оптичка интерферометрија“ (бр. 141003), „Холографске методе генерисања специфичних таласних фронтова за ефикасну контролу квантних кохерентних ефеката у интеракцији атома и ласера“ (бр. ОИ171038) и „Генерисање и карактеризација нанофотонских функционалних структура у биомедицини и информатици“ (бр. ИИИ45016). Имајући у виду наведени рад и значај резултата које је остварила Сенка Ћук, предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да одобри израду докторске дисертације 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)

коју је Електротехничком факултету пријавила Сенка Ћук, дипломирани инжењер електротехнике. Тема припада изборном подручју Наноелектронике и фотонице, и ужој научној области Квантне оптике. За ментора рада је предложен др Бранислав Јеленковић, научни саветник Института за физику Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Бранислав Јеленковић, научни саветник
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