

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Марије Ђурчић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5014/16-1 од 30. 9. 2019. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Марије Ђурчић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом: „Примена квантних и нелинеарних феномена у пари калијума за контролу особина ласерског зрачења” (*Application of quantum and nonlinear phenomenon in hot potassium vapor for controlling properties of laser radiation*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Марија Ђурчић је рођена 12.08.1991. године у Краљеву. Изабрана је за ђака генерације након завршене основне школе. Уписала је Математичку гимназију у Краљеву, коју је завршила као носилац Вукове дипломе. У основној и средњој школи учествовала је на републичким такмичењима из математике и физике. Електротехнички факултет је уписала 2010. године. Дипломирала је на одсеку за Физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, 2015. године са укупном просечном оценом 8.89, и оценом 10 на завршном раду на тему "Косимулација између Matlab-а и OptiSystem-а на примеру рефлексионих полупроводничких оптичких појачавача". Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу за Наноелектронику и фотонику уписала је у октобру 2015. године. Положила је све испите са просечном оценом 10 и одбранила мастер рад на тему "Нелинеарна спектроскопија у пари калијума" са оценом 10. 2016. године започиње докторске студије на модулу Наноелектроника и фотоника. Од новембра 2016. је запослена у Центру за фотонику Института за физику у Београду у звању истраживач приправник. Од 2017. године учесник је билатералног пројекта са Петим институтом за физику у Штутгарту. У оквиру ове сарадње провела је више месеци током 2017. и 2018. на Универзитету у Штутгарту. Од 23. до 28. јула 2018. похађала је курс Nanoscale Quantum Optics у оквиру интернационалне школе физике Enrico Fermi у Варени.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидаткиња је уписала докторске студије на Електротехничком факултету у Београду школске 2016/2017. године на модулу Наноелектроника и фотоника. У Институту за физику је, од почетка докторских студија, ангажована на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја III45016. Током докторских студија је испунила све обавезе и положила испите предвиђене наставним планом.

Р.Бр.	Назив испита	Потписао наставник	Оцена	ЕСПБ
1	Моделовање полупроводничких ласера	Дејан Гвоздић	10	9
2	Фотонске комуникације	Јасна Црњански	10	9
3	Квантна оптика	Бранислав Јеленковић	10	9
4	Оптичке особине полупроводничких наноструктура	Јелена Радовановић	10	9
5	Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара	Јелена Радовановић	10	9
6	Нелинеарна оптика	Петар Матавуљ	9	9
7	Модерне фотонске компоненте и системи	Петар Матавуљ	9	9
8	Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници	Марко Крстић	9	9
9	Моделовање наноструктура	Владимир Арсоски	10	9
10	Увод у научни рад	Зоран Поповић	10	9
	Назив обавезе			
1	Студијски истраживачки рад I			15
2	Студијски истраживачки рад II			15
3	Научно стручни рад			3

Публиковани радови:

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

- [1] M. M. Ćurčić, T. Khalifa, B. Zlatković, I. S. Radojičić, A. J. Krmpot, D. Arsenović, B. M. Jelenković, M. Gharavipour, Four-wave mixing in potassium vapor with an off-resonant double-Lambda system, Phys Rev A 97,063851 (2018).
- [2] D. Arsenović, M. M. Ćurčić, T. Khalifa, B. Zlatković, Ž. Nikitović, I. S. Radojičić, A. J. Krmpot, B. M. Jelenković, Slowing 80-ns light pulses by four-wave mixing in potassium vapor, Phys Rev A 98, 023829 (2018).
- [3] B. Zlatković, M. M. Ćurčić, I. S. Radojičić, D. Arsenović, A. J. Krmpot, B. M. Jelenković, Slowing probe and conjugate pulses in potassium vapor using four wave mixing, Optics Express 26, 034266 (2018).

Предавање по позиву са међународног скупа штампано у целини (M31):

- [1] M. Ćurčić, B. Jelenković, Squeezed states of light generated by four wave mixing in potassium vapor, 21st International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON'2019, Angers, France, July 9-13, 2019.

Предавање по позиву са међународног скупа штампано у изводу (M32):

- [1] M. Ćurčić, B. Zlatković, I. Radojičić, Ž. Nikitović, A. Krmpot, D. Arsenović, B. Jelenković, Slowing light pulses due to four-wave-mixing in Potassium vapor – theory and experiment, Hot Atomic Workshop, European Workshop on the Science and Technology of Hot atomic Vapors, Stuttgart, Germany, 23-25. May, 2018.

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34):

- [1] D. Arsenović, M. M. Ćurčić, B. Zlatković, A. J. Krmpot, I. S. Radojičić, B. M. Jelenković, Four wave mixing in potassium vapor with off-resonant double lambda system, PHOTONICA 2017, Institute of Physics, Belgrade, pp. 62-62, isbn: 978-86-82441-46-5, Belgrade, Serbia, 27-31. Aug, 2017.
- [2] B. Zlatković, A. J. Krmpot, D. Arsenović, I. S. Radojičić, M. M. Ćurčić, B. M. Jelenković, Ultraslow propagation of optical pulses in hot potassium vapor, PHOTONICA 2017, Institute of Physics, Belgrade, pp. 48-48, isbn: 978-86-82441-46-5, Belgrade, Serbia, 27-31. Aug, 2017.
- [3] M. Ćurčić, R. Bek, R. Loew, M. Jetter, B. Jelenković, Towards realization of frequency doubled VECSEL for Rydberg spectroscopy in rubidium and potassium, 11th Photonics Workshop, pp. 40-40, isbn: 987-86-82441-47-2, Kopaonik, 11-15. Mar, 2018.
- [4] B. Zlatković, M. M. Ćurčić, I. S. Radojičić, A. J. Krmpot, Ž. Nikitović, D. Arsenović, B. M. Jelenković, Slow propagation of pulses by four wave mixing in potassium vapor, 11th Photonics Workshop, pp. 39-39, isbn: 987-86-82441-47-2, Kopaonik, 11-15. Mar, 2018.
- [5] B. Zlatković, M. Ćurčić, I. Radojičić, A. Krmpot, Ž. Nikitović, D. Arsenović, B. Jelenković, Slowing probe and conjugate pulses in potassium vapor using four wave mixing, Book of Abstracts, The Nanoscale Quantum Optics (NQO) Workshop, Prague, Czech Republic, 13-16. Feb, 2018.
- [6] I. Radojičić, M. Ćurčić, B. Zlatković, Ž. Nikitović, A. Krmpot, D. Arsenović, B. Jelenković, Propagation of short twin pulses in four wave mixing in hot potassium vapor, 50th Anniversary EGAS conference, Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science, Jagiellonian University, pp. 105-105, isbn: 978-83-945937-5-9, Krakow, Poland, 9-13. Jul, 2018.
- [7] B. Zlatković, M. Ćurčić, I. Radojičić, D. Arsenović, A. Krmpot, B. Jelenković, Non-degenerate four wave mixing based slow light in hot potassium vapor, Hot Atomic Vapor Workshop, European Workshop on Science and Technology of Hot atomic Vapors, Stuttgart, Germany, 23-25. May, 2018.
- [8] A. Čutuk, M. Ćurčić, M. Plach, R. Hermann, M. Grossmann, R. Bek, R. Loew, H. Kuebler, M. Jetter, P. Michler, Blue InGaAs-VECSELs for Rydberg atom spectroscopy, DPG Spring Meeting, Regensburg, Germany, 31-5. Apr, 2019.

- [9] D. Arsenović, Ž. Nikitović, B. Zlatković, I. S. Radojčić, M. M. Ćurčić, A. J. Krmpot, B. M. Jelenković, Evolution of laser pulse propagation in Four Wave Mixing atomic medium, PHOTONICA 2019, Belgrade, pp. 86-86, isbn: 978-86-7306-153-5, Belgrade, Serbia, 26-30. Aug, 2019.
- [10] M. M. Ćurčić, B. M. Jelenković, Amplitude squeezing by four wave mixing in hot potassium vapor, PHOTONICA 2019, Belgrade, pp. 85-85, isbn: 978-86-7306-153-5, Belgrade, Serbia, 26-30. Aug, 2019.
- [11] M. M. Ćurčić, M. Grossmann, R. Bek, R. Loew, M. Jetter, B. Jelenković, Blue InGaAsP VECSEL for Rydberg spectroscopy in Rb and K, 12th Photonics Workshop, Kopaonik, 10-14. Mar, 2019.

Дана 10.10.2019. године на Електротехничком факултету у Београду, Марија Ђурчић је имала јавни усмени испит о подобности теме и кандидата пред трочланом комисијом у саставу:

1. др Јасна Црњански, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду
2. др Душан Арсеновић, научни саветник, Институт за физику у Београду
3. др Иван Поповић, ванредни професор, Електротехнички факултет у Београду

Комисија је закључила да кандидат испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације и оценила испит оценом **задовољно**.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада Марије Ђурчић и узимајући у обзир претходно наведене чињенице, Комисија је стекла увид у способности и научно-истраживачки рад кандидата, те констатује да је кандидаткиња:

- Положила све испите и завршила све обавезе предвиђене наставним планом и програмом, и тиме остварила 120 ЕСПБ бодова.
- Јавно одбранила тему докторске дисертације 10.10.2019. године пред трочланом комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду.
- Током трајања докторских студија активно ангажована на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја III45016, као и на билатералним пројектима са институтима са Универзитета у Штутгарту.
- Публиковала више радова у научним часописима и научним скуповима из области којој припада предложена тема докторске дисертације чиме је показала квалификације за научни рад и афинитет према теми докторске дисертације.

Комисија закључује да кандидаткиња Марија Ђурчић у сваком погледу испуњава услове за рад на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Интеракција између оптичких поља и материје одавно је у жижи интересовања научника, што је за последицу имало откриће великог броја физичких процеса. У литератури су до сада детаљно описана оптичка својства материје попут апсорпције, рефлексије, преламања, расејања, дисперзије,... Појашњење ових карактеристика медијума следило је из појашњења својстава атома који интерагују са светлошћу. Реализација ласера довела је до главне прекретнице у истраживањима у пољу квантне и нелинеарне оптике, и отворила врата открићу фасцинантних физичких феномена. Уз довољно јаке ласерске снопове, контролисаних карактеристика, постало је могуће обликовати својства материје, контролисати начин њене интеракције са фотонима, али и генерисати нова стања светлости. Начин за постизање последње поменутог јесте коришћењем ефеката које сврставамо у област нелинеарне оптике [1]. Једно од посебно интересантних неklasичних стања светлости јесте такозвана стиснута светлост [2].

Алkalни елементи, као активне средине, показали су се као изразито погодни и интересантни у овој сфери истраживања. Наиме, у њима је, под одређеним условима, могуће генерисати нелинеарности које су по интензитету јаче у поређењу са другим материјалима, попут кристала. Поред тога, нуде широк спектар и разнолику комбинацију ефеката који се и даље показују атрактивним у истраживањима. Специфична атомска структура алкалних елемената је погодна за реализацију кохерентних квантних ефеката. Под тиме посебно треба истаћи два дугоживећа хиперфина нивоа основног стања, електричним диполом спрегнута са првим побуђеним стањима, на таласној дужини у блиској инфрацрвеној области. Диодни, односно полупроводнички ласери у овом делу спектра су комерцијално доступни, и скоро неизоставни део свих лабораторија за квантну физику. Имајући у виду доступност адекватних извора зрачења, као и чињеницу да је прелаз између та два хиперфина нивоа забрањен, оваква структура омогућава лаку оптичку поларизацију атома и оптичко пумпање, предуслове за реализацију ефеката од интереса у даље описаном истраживању. Конкретно, истраживања везана за ову тезу ће бити рађена у пари калијума.

Кохерентне интеракције електромагнетног поља са вишенивовским атомским системима доводе до појаве широког спектра физичких феномена. Кохерентни феномени у пари калијума којима се могу контролисати и обликовати стања светлости биће предмет предложеног истраживачког рада. Део истраживања које ће кандидат спровести биће фокусиран на нелинеарни феномен четворталасног мешања таласа у пари калијума реализован на двострукој ламбда шеми на D1 линији [3]. Овај ефекат је од посебног интереса јер доводи до генерисања два корелисана снопа за које се показује да се могу искористити за добијање амплитудски стиснуте светлости. Основно својство стиснуте светлости је одређено Хајзенберговом релацијом неодређености, што значи да смо лимитирани са прецизношћу истовременог одређивања фазе и амплитуде. Реализацијом стиснуте светлости вршимо асиметричну редистрибуцију ове неодређености. Извори амплитудски стиснуте светлости су од посебног интереса јер нам омогућавају смањивање техничког шума, што је од посебне важности при детекцији гравитационих таласа [4], реализацији биосензора [5], као и побољшању прецизности оптичке микроскопије [6]. Ово стање светлости је до сада демонстрирано у пари рубидијума [7-9] и цезијума [10]. Међутим, пара калијума је остала врло слабо истражен медијум.

Корак даље у студији кохерентних ефеката у пари калијума биће побуда високих Ридбергових нивоа [11]. Како се валентни електрони крећу по орбитама јако удаљеним од језгра, чак и уз јако слаба електрична поља можемо имати јаке диполне моменте, што води до снажних интеракција међу атомима. Физика Ридбергових стања је област истраживања која је данас у жижи интересовања многих група, посебно у контексту охлађених атома, јер се показује да своју примену може наћи у пољу квантног процесирања информација и реализацији квантних рачунара. Међутим, атомске паре, као медијуми, су до недавно биле занемарене. Недавно је демонстриран ефекат Ридбергове блокаде [12], али и реализован

једнофотонски извор у пари рубидијума [13]. Снага интеракција између Ридбергових атома може бити лако контролисана променом густине средине или променом побуђеног Ридберговог стања, тј. главног квантног броја. Новина коју ова област физике доноси јесте могућност рада у квантним нелинеарним срединама када фотони снажно интерагују [14]. Задатак кандидата ће биће побуда и детаљна спектроскопија ових стања у пари калијума преко феномена електромагнетски индуковане транспаренције [15] реализоване на степеначастој атомској шеми.

Циљ предложене дисертације ће, поред саме реализације поменутих ефеката, бити показати да је пара калијума погоднији медијум за генерисање нових стања светлости у поређењу са другим алкалним металима.

Референце:

- [1] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Elsevier, New York, 2003.
- [2] M. Fox, *Quantum Optics, An Introduction*, Oxford University Press, Oxford (2006).
- [3] M.M. Ćurčić, T. Khalifa, B. Zlatković, I.S. Radojičić, A.J. Krmpot, D. Arsenović, B.M. Jelenković, M. Gharavipour, *Phys. Rev. A* 97, 063851 (2018).
- [4] K. Goda, O. Miyakawa, E. Mikhailov, S. Saraf, R. Adhikari, K. McKenzie, R. Ward, S. Vass, A. Weinstein, and N. Mavalvala, *Nature Physics*, 4(6):472–476 (2008).
- [5] J.R. Mejía-Salazar, O.N. Oliveira, *Chem Rev* 118, 10617–10625 (2018).
- [6] M. A. Taylor, J. Janousek, V. Daria, J. Knittel, B. Hage, H.-A. Bachor, W. P. Bowen, *Phys. Rev. X* 4, 011017(2014).
- [7] C. F. McCormick et al., *Phys. Rev. A* 78, 043816 (2008).
- [8] R. C. Pooser, A. M. Marino, V. Boyer, K. M. Jones, and P. D. Lett, *Opt. Express* 17, 16722–16730 (2009).
- [9] Glorieux Q, Guidoni L, Guibal S, Likforman J-P and Coudreau T, *Phys. Rev. A* 84, 053826 (2011).
- [10] M. Guo et al. *Phys. Rev. A* 89, 033813 (2014).
- [11] R. Loew, H. Weimer, J. Nipper, J.B. Balewski, B. Butscher, H. P. Buchler, and T. Pfau, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 45, 113001 (2012).
- [12] A. Bhowmick, D. Kara, and A. K. Mohapatra, arXiv:1802.06599v1 (2018).
- [13] F. Ripka, H. Kubler, R. Loew, and T. Pfau, *Science* 362, 446, ISSN 0036-8075 (2018).
- [14] O. Firstenberg, C. S. Adams, and S. Hofferberth, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 49:152003 (2016).
- [15] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J.P. Marangos, *Rev. Mod. Phys.* 77, 633-673 (2005).

3. Полазне хипотезе

Истраживачки рад ће се базирати на следећим полазним хипотезама:

- Услед карактеристичне атомске структуре, различите у поређењу са другим алкалним металима, топла пара калијума може бити погоднији медијум за ефикасно генерисање стиснуте светлости.
- Достигнути нивои појачања у калијуму су већи од оних постигнутих у рубидијуму и цезијуму. Како је ниво стискања светлости у директној вези са појачањем, може се претпоставити да ће стискање светлости у пари калијума бити ефикасније него у другим поменутих срединама.
- Теоријска анализа базирана на полу-класичном приступу, сету Максвел-Болцманових једначина, омогућава одређивање опсега експерименталних параметара за који можемо да очекујемо генерисање стиснуте светлости.

- Електромагнетски индукована транспаренција (ЕИТ) на степеничастој атомској шеми преко побуде Ридбергових nS и nD стања у пари калијума може се реализовати са мањим интензитетом пробног ласера него што је потребно код других алкала, због чињенице да атом калијума има знатно мању енергијску разлику хиперфиних нивоа основног стања.
- На основу прелиминарних анализа и досадашњих тестирања полупроводничког чипа на бази квантних јама од InGaAs претпоставка је да ће реализација плавог VECSEL-a (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser) бити успешно завршена.
- Генерисањем другог хармоника уз помоћ нелинеарног кристала постављеног унутар ласерског резонатора може се достићи жељена снага у плавом делу спектра (~ 2 W).
- Инкорпорација оптичке пумпе унутар слојева квантних јама доводи до смањеног загревања активног медијума и омогућава боље конфинирање носилаца наелектрисања унутар квантних јама.

4. Научне методе истраживања

Један од задатака током истраживања биће генерисање амплитудски стиснуте светлости, и на тај начин превазилажење ограничења наметнутих случајним квантним флукуацијама. Наиме, квантно-механичке флукуације у вакууму намећу ограничења када је у питању прецизност мерења. Та граница се дефинише као стандардни квантни лимит. У Лабораторији за квантну и атомску физику, у Институту за физику, кандидат је у могућности да генерише амплитудски стиснуту светлост, и на тај начин смањи релативне флукуације у интензитету између два ласерска снопа. Процес се базира на феномену четворталасног мешања таласа, који представља интеракцију четири мода поља посредством интеракције са медијумом. Користи се двострука ламбда шема, у комбинацији са два копропагирајућа ласерска снопа, јаким снопом пумпе и слабијим снопом пробе. Процес четворталасног мешања таласа састоји се у Рамановим прелазима између хиперфиних стања основног нивоа, а резултира спонтаном емисијом коњугованог фотона. Снаге добијених снопова се мере индивидуално, а затим се сигнали одузимају и шаљу на спектрални анализатор. Сноп пробе и коњуговани сноп, који се добију на излазу су корелисани, што значи да су интензитетске флукуације пробе утиснуте у коњуговани сноп. За адекватан скуп параметара система вредност разлике интензитета ова два снопа спада испод вредности квантног лимита шума. У експерименту квантни шум који представља референтну тачку јесте шум сачме. Уз експерименталну анализу биће спроведена и теоријска, ради детаљнијег и потпунијег разумевања и појашњења добијених резултата.

За побуду и детекцију Ридбергових стања искористиће се феномен електромагнетски индуковане транспаренције. Ова појава се базира на постојању тамних стања која нису спрегнута са ласерским пољем. Како су атоми у тамном стању не могу бити побуђени ласерским пољима, па на тај начин постају транспарентни у одређеном делу спектралног опсега. Реализацију ЕИТ-а ће се постићи уз помоћ два контрапропагирајућа ласерска снопа којим ће се спрегнути три атомска стања у такозваној степеничастој шеми. На овај начин се на неинвазиван начин могу детектовати Ридбергова стања и извршити њихова детаљна спектроскопија у пари калијума. Током рада са алкалним елементима често се провлачи аналогија са атомима водоника. Разлика у енергетској структури између ових елемената одређена је квантним дефектима. Када су вредности квантних дефеката познате, може се израчунати вредности Ридбергових стања. Кандидат ће покушати да из резултата мерења одреди вредности квантних дефеката, а затим упоредити мерене фреквенце прелаза са прорачунатим прелазима. Добијени подаци ће дати пружити могућност за даље аналитичке/нумеричке калкулације и предвиђања.

За истраживања у области атомске физике, неопходни су ласерски извори зрачења одређених карактеристика. За побуде Ридбергова стања у пари калијума потребан је снажан и стабилан плави ласер, на ~ 460 nm. Из тог разлога један део истраживачког процеса биће посвећен реализацији плавог вертикалног површинско емитујућег ласера са екстерним резонатором (VECSEL-а). Овај тип ласера поседује комбинацију добрих карактеристика полупроводничких ласера и диодно пумпаних чврстотелних ласера, што значи да је могуће постићи високе снаге снопова, уз уску спектралну линију. Уз поменуто, њихов дизајн пружа флексибилност при реализацији екстерног резонатора и контролу таласне дужине. Оно што је од посебног интереса јесте могућност удвајања фреквенце у нелинеарном кристалу који се налази унутар резонатора. Све ове особине чине га идеалним одабиром за примену у спектроскопији Ридбергових стања.

5. Очекивани научни допринос

Као резултати описаног истраживања, очекују се следећи научни доприноси:

- Студија квантних феномена, четворталасног мешања таласа и електромагнетски индуковане транспаренције, у пари калијума, алкалном металу који до сада није детаљно испитан у овом контексту.
- Генерисање амплитудски стиснуте светлости у пари калијума преко феномена четворталасног мешања таласа.
- Одређивање скупа параметара система за који се добија максимално амплитудски стиснута светлост.
- Теоријска анализа поменутог ефекта ради додатног појашњења добијених експерименталних резултата.
- Детаљна спектроскопија Ридбергових стања у пари калијума преко феномена електромагнетски индуковане транспаренције.
- Прва реализација плавог VECSEL-а, оптички пумпаног унутар слојева квантних јама, са снажном, мономодном емисијом.

6. План истраживања и структура рада

Истраживање ће бити спроведено у следећим корацима:

- Први део истраживачког рада биће посвећен теми четворталасног мешања таласа, на који начин и под којим условима он може довести до генерисања амплитудски стиснуте светлости. Атомски прелази ће бити реализовати на Д1 линији калијума. Показаће се на који начин и у којој мери појачање, као и ефикасност амплитудског стискања светлости зависе од параметара система: снаге ласерских снопова, угла под којим се снопови секу у ћелији, дужине ћелије, једнофотонског и двофотонског фреквенцијског помераја, густине атома у ћелији, ако и ефикасности детекције снопова након проласка кроз ћелију. Ласерски извор у експерименталној поставци је MBRласер, модел 110 од Coherent-а, којим се може постићи до 1 W излазне снаге на таласној дужини од 770 nm. За фреквенцијску модулацију снопа пробе се користе два акусто-оптичка модулятора. Регулацијом температуре ћелије се постиже жељена густина калијума. За детекцију се користи балансни фотодетектор, након чега се сигнали, ради даље обраде, шаљу на осцилоскоп и спектрални анализатор. Оваква експериментална поставка даје могућност за индивидуално снимање интензитета пробе и коњугованог снопа, али и њихове разлике. На тај начин се може потврдити постојање корелације између снопова и одредити мера стискања светлости.

- Наредни корак представљаће детекција високопобуђених Ридбергових стања. Она ће се постићи уз помоћ феномена под називом електромагнетски индукована транспаренција, реализованог на тринивоској степеничастој атомској шеми. Снопом пробе на 770 nm ће се спрезати нивои на Д1 линији, док ће контролни сноп на таласној дужини од око 460 nm, служити за побуду nS и nD Ридбергових стања. Као извор на 770 nm ће се користити диодни ласер. Светлосни сноп на 460 nm ће се добити уз помоћ генерације другог хармоника у кристалу са двојним преламањем. У ту сврху ће се удвајати фреквенца основног снопа који се добија из MBR ласера. Уз довољно високу ефикасност конверзије у други хармоника, кандидат ће бити у могућности да достигне довољно високу снагу ласера у плавом делу спектра која ће омогућити почетне карактеризације Ридбергових атома. У различитим условима и при скенирању фреквенце плавог ласера, мериће се трансмисија снопа пробе. На тај начин ће се снимати ЕИТ спектар, извршити детаљна спектроскопија Ридбергових стања у пари калијума, и на тај начин поставити темељ за даље успешне експерименталне и теоријске студије у области Ридбергове физике у пари калијума.
- Како је снага плавог снопа добијеног на претходно описан начин лимитирана снагом MBR ласера и ефикасношћу конверзије, кандидат ће истовремено радити на реализацији снажног плавог VECSEL-а који ће емитовати зрачење на таласној дужини око 460 nm, за побуду nS и nD Ридбергових стања у пари калијума. Довољно снажан плави извор омогућиће студије јаким оптичких нелинеарности до којих може доћи у описаној атомској средини и на који начин оне могу довести до генерисања нових стања светлости. Развој оваквог типа ласера подразумева дизајнирање полупроводничког чипа (базираног на квантним јамама), као и екстерног резонатора, уз све оптичке елементе који ће се у њему наћи. Један од првих корака биће тестирање узорака од различитих комбинација полупроводничких материјала, у циљу достизања жељене таласне дужине емисије, као и постизања што боље конфинираности носилаца наелектрисања. Сви чипови ће бити добијени методом метал-органске епитаксије из парне фазе. Након тога, добијени чип ће бити тестиран у различитим типовима ласерског резонатора. Следећи корак биће генерисање другог хармоника у ББО кристалу, постављеном унутар резонатора, и карактеризација снаге, таласне дужине, као и профила добијеног снопа. За постизање мономодног зрачења, као и ради могућности скенирања таласне дужине, унутар резонатора биће постављени еталон и филтер са двојним преламањем. Да би овакав ласер нашао примену у атомској спектроскопији биће неопходно стабилизovati његову фреквенцу.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, и стечене слике о теми докторске дисертације и досадашњем научном раду Марије Ђурчић, Комисија закључује да кандидаткиња испуњава све услове да успешно спроведе истраживање и реализацију докторске дисертације под темом „Примена квантних и нелинеарних феномена у пари калијума за контролу особина ласерског зрачења”.

Предложена тема припада ужој научној области Наноелектроника и фотоника, подобласт Нелинеарни и квантни оптички ефекти. Тема је научно заснована и резултати до којих ће кандидат доћи представљаће значајан и оригиналан допринос у поменутој области истраживања. За ментора израде докторске дисертације предлаже се др Бранислав Јеленковић, научни саветник и дописни члан САНУ. Уз извештај се прилаже списак радова предложеног ментора који га квалификују за ментора.

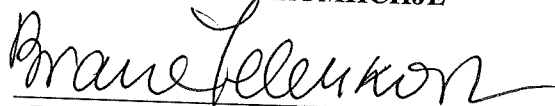
Докторска дисертација ће бити написана на енглеском језику.

Узимајући у обзир све раније наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидаткињи Марији Ђурчић одобри израду докторске дисертације под насловом „Примена квантних и нелинеарних феномена у пари

калијума за контролу особина ласерског зрачења” (*Application of quantum and nonlinear phenomenon in hot potassium vapor for controlling properties of laser radiation*).

У Београду, 25.10.2019.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



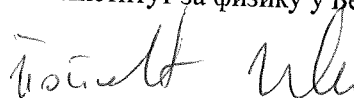
др Бранислав Јеленковић, научни саветник,
Институт за физику, дописни члан САНУ



др Јасна Црњански, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Душан Арсеновић, научни саветник,
Институт за физику у Београду



др Иван Поповић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

University of Belgrade
Faculty of Electrical Engineering

TO THE TEACHING AND SCIENTIFIC COUNCIL

Subject: Eligibility of theme and candidate Marija Ćurčić, Master of Electrical and Computer Engineering, for the preparation of the doctoral dissertation.

By decision of the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Electrical Engineering no. 5014/16-1 of September 30. 2019., we have been appointed as members of the Commission for the assessment of eligibility of the topic and the candidate Marija Ćurčić, Master of Science of Electrical and Computer Engineering, for the preparation of the doctoral dissertation entitled: **„Application of quantum and nonlinear phenomenon in hot potassium vapor for controlling properties of laser radiation”** (*Примена квантних и нелинеарних феномена у пари калијума за контролу особина ласерског зрачења*).

Based on the material attached to the applicant's request, the Commission submits the following

REPORT

1. Candidate information

1.1. Biographical information

Marija Ćurčić was born on August 12, 1991. in Kraljevo. She was selected as the best student of the generation after graduating from elementary school. She enrolled at the Mathematics High School in Kraljevo, which she completed as a Vuk diploma holder. During elementary and high school, she participated in republic competitions in mathematics and physics. She enrolled in the Faculty of Electrical Engineering in 2010. She graduated from the Department of Physical Electronics, Department of Nanoelectronics, Optoelectronics and Laser Engineering, in 2015 with an overall average score of 8.89, and a grade 10 for the Bachelor thesis titled "Co-modulation between Matlab and OptiSystem on the example of Reflective

Semiconductor Optical Amplifiers". In October 2015. she started her Master studies at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade, at the module for Nanoelectronics and Photonics. She passed all exams with a average grade of 10 and defended her master's thesis "Nonlinear Spectroscopy in Potassium Vapor" with a grade 10. In 2016. she has started her doctoral studies at the module Nanoelectronics and Photonics. Since November 2016. she has been employed at the Photonics Center of the Institute of Physics in Belgrade as a research intern. Since 2017. she has been a participant in a bilateral project with the Fifth Institute of Physics in Stuttgart. During this collaboration, she had spent several months during 2017. and 2018. at the University of Stuttgart. From July 23. to 28. 2018, she attended the Nanoscale Quantum Optics course at the Enrico Fermi International School of Physics in Varena.

1.2. Scientific research experience

The candidate started her doctoral studies at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade in the academic year 2016/2017. on the module Nanoelectronics and Photonics. Since the beginning of her doctoral studies, she has been engaged in the project of the Ministry of Education, Science and Technological Development III45016, at the Institute of Physics. During her doctoral studies she fulfilled all obligations and passed the exams required by the syllabus.

R.No.	Course Title	Lecturer	Grade	ECTS
1	Modeling of Semiconductor Lasers	Dejan Gvozdić	10	9
2	Photonic Communications	Jasna Crnjanski	10	9
3	Quantum Optics	Branislav Jelenković	10	9
4	Optical Properties of Semiconductor Heterostructures	Jelena Radovanović	10	9
5	Optimization and Engineering of Nanostructural Parameters	Jelena Radovanović	10	9
6	Nonlinear Optics	Petar Matavulj	9	9
7	Modern Photonic Components and Systems	Petar Matavulj	9	9
8	Transport Processes in Nanoelectronics and Photonics	Marko Krstić	9	9
9	Modeling of Nanostructures	Vladimir Arsoski	10	9
10	Introduction to Scientific Research	Zoran Popović	10	9
	Activities			
1	Research work related to the final thesis I			15

2	Research work related to the final thesis II			15
3	Scientific paper			3

Published papers:

Category M21:

- [1] M. M. Ćurčić, T. Khalifa, B. Zlatković, I. S. Radojčić, A. J. Krmpot, D. Arsenović, B. M. Jelenković, M. Gharavipour, Four-wave mixing in potassium vapor with an off-resonant double-Lambda system, Phys Rev A 97,063851 (2018).
- [2] D. Arsenović, M. M. Ćurčić, T. Khalifa, B. Zlatković, Ž. Nikitović, I. S. Radojčić, A. J. Krmpot, B. M. Jelenković, Slowing 80-ns light pulses by four-wave mixing in potassium vapor, Phys Rev A 98, 023829 (2018).
- [3] B. Zlatković, M. M. Ćurčić, I. S. Radojčić, D. Arsenović, A. J. Krmpot, B. M. Jelenković, Slowing probe and conjugate pulses in potassium vapor using four wave mixing, Optics Express 26, 034266 (2018).

Category M31:

- [1] M. Ćurčić, B. Jelenković, Squeezed states of light generated by four wave mixing in potassium vapor, 21st International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON'2019, Angers, France, July 9-13, 2019.

Category M32:

- [1] M. Ćurčić, B. Zlatković, I. Radojčić, Ž. Nikitović, A. Krmpot, D. Arsenović, B. Jelenković, Slowing light pulses due to four-wave-mixing in Potassium vapor – theory and experiment, Hot Atomic Workshop, European Workshop on the Science and Technology of Hot atomic Vapors, Stuttgart, Germany, 23-25. May, 2018.

Category M34:

- [1] D. Arsenović, M. M. Ćurčić, B. Zlatković, A. J. Krmpot, I. S. Radojčić, B. M. Jelenković, Four wave mixing in potassium vapor with off-resonant double lambda system, PHOTONICA 2017, Insitute of Phzsics, Belgrade, pp. 62-62, isbn: 978-86-82441-46-5, Belgrade, Serbia, 27-31. Aug, 2017.
- [2] B. Zlatković, A. J. Krmpot, D. Arsenović, I. S. Radojčić, M. M. Ćurčić, B. M. Jelenković, Ultraslow propagation of optical pulses in hot potassium vapor,

- PHOTONICA 2017, Insitute of Physics, Belgrade, pp. 48-48, isbn: 978-86-82441-46-5, Belgrade, Serbia, 27-31. Aug, 2017.
- [3] M. Ćurčić, R. Bek, R. Loew, M. Jetter, B. Jelenković, Towards realization of frequency doubled VECSEL for Rydberg spectroscopy in rubidium and potassium, 11th Photonics Workshop, pp. 40-40, isbn: 987-86-82441-47-2, Kopaonik, 11-15. Mar, 2018.
 - [4] B. Zlatković, M. M. Ćurčić, I. S. Radojičić, A. J. Krmpot, Ž. Nikitović, D. Arsenović, B. M. Jelenković, Slow propagation of pulses bz four wave mixing in potassium vapor, 11th Photonics Workshop, pp. 39-39, isbn: 987-86-82441-47-2, Kopaonik, 11-15. Mar, 2018.
 - [5] B. Zlatković, M. Ćurčić, I. Radojičić, A. Krmpot, Ž. Nikitović, D. Arsenović, B. Jelenković, Slowing probe and conjugate pulses in potassium vapor using four wave mixing, Book of Abstracts, The Nanoscale Quantum Optics (NQO) Workshop, Prague, Czech Republic, 13-16. Feb, 2018.
 - [6] I. Radojičić, M. Ćurčić, B. Zlatković, Ž. Nikitović, A. Krmpot, D. Arsenović, B. Jelenković, Propagation of short twin pulses in four wave mixing in hot potassium vapor, 50th Anniversary EGAS conference, Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science, Jagiellonian University, pp. 105-105, isbn: 978-83-945937-5-9, Krakow, Poland, 9-13. Jul, 2018.
 - [7] B. Zlatković, M. Ćurčić, I. Radojičić, D. Arsenović, A. Krmpot, B. Jelenković, Non-degenerate four wave mixing based slow light in hot potassium vapor, Hot Atomic Vapor Workshop, European Workshop on Science and Technology of Hot atomic Vapors, Stuttgart, Germany, 23-25. May, 2018.
 - [8] A. Ćutuk, M. Ćurčić, M. Plach, R. Hermann, M. Grossmann, R. Bek, R. Loew, H. Kuebler, M. Jetter, P. Michler, Blue InGaAs-VECSELs for Rydberg atom spectroscopy, DPG Spring Meeting, Regensburg, Germany, 31-5. Apr, 2019.
 - [9] D. Arsenović, Ž. Nikitović, B. Zlatković, I. S. Radojičić, M. M. Ćurčić, A. J. Krmpot, B. M. Jelenković, Evolution of laser pulse propagation in Four Wave Mixing atomic medium, PHOTONICA 2019, Belgrade, pp. 86-86, isbn: 978-86-7306-153-5, Belgrade, Serbia, 26-30. Aug, 2019.
 - [10] M. M. Ćurčić, B. M. Jelenković, Amplitude squeezing by four wave mixing in hot potassium vapor, PHOTONICA 2019, Belgrade, pp. 85-85, isbn: 978-86-7306-153-5, Belgrade, Serbia, 26-30. Aug, 2019.
 - [11] M. M. Ćurčić, M. Grossmann, R. Bek, R. Loew, M. Jetter, B. Jelenković, Blue InGaAsP VECSEL for Rydberg spectroscopy in Rb and K, 12th Photonics Workshop, Kopaonik, 10-14. Mar, 2019.

On 10/10/2019. at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade, Marija Ćurčić had a public oral examination on the eligibility of the topic and the candidate before a three-member committee, composed of:

1. Jasna Crnjanski, PhD, Associate Professor, Faculty of Electrical Engineering in Belgrade

2. Dusan Arsenović, PhD, Scientific Advisor, Institute of Physics, Belgrade
3. Ivan Popović, PhD, Associate Professor, Faculty of Electrical Engineering in Belgrade

The committee concluded that the candidate fulfilled the requirements for work on the proposed doctoral dissertation topic and evaluated the exam with a satisfactory grade.

1.3. Assessment of the candidate's suitability to work on the proposed topic

Based on the previous presentation of the results of Marija Ćurčić's work so far, and taking into account the above mentioned facts, the Committee has gained insight into the candidate's capabilities and scientific work, and concludes that the candidate:

- Passed all exams and completed all coursework requirements, earning 120 ECTS credits.
- Publicly defended her doctoral dissertation topic on 10/10/2019. before a three-member commission formed by the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade.
- During her doctoral studies she was actively involved in the project of the Ministry of Education, Science and Technological Development III45016, as well as in bilateral projects with institutes from the University of Stuttgart.
- Published several papers in scientific journals and conferences in the field to which the proposed doctoral dissertation topic belongs, demonstrating qualifications for scientific work and affinity for the topic of the doctoral dissertation.

The Committee concludes that candidate Marija Ćurčić in every respect fulfills the conditions for working on the proposed topic.

2. Object and purpose of research

The interaction between optical fields and matter has been in the focus of scientific interest for a long time, resulting in the discovery of a large number of physical processes. The optical properties of light-matter interactions such as absorption, reflection, refraction, scattering, dispersion, etc. have been described in detail in the literature so far. The realization of the laser has led to a major turning point in research in the field of quantum and nonlinear optics, and opened door to the discovery of fascinating physical phenomena. With a strong laser beams, with controllable laser characteristics, it became possible to fine control interactions and to change the properties of matter, and also to change properties of the laser light itself. By the ways of optical nonlinear interactions [1], generation of interesting non-classical states of light called squeezed light was demonstrated [2].

Alkaline elements are particularly interesting as medium for efficient development of different nonlinear and quantum phenomena. Namely, under certain conditions, defined by the atomic scheme of interactions, alkaline vapor can become highly nonlinear. Its nonlinearity can be stronger compared to other materials, such as crystals. In addition, they offer a wide

range and diverse combination of nonlinear and quantum effects that continue to attract research interest. The specific atomic structure of alkaline elements is suitable for realizing coherent quantum effects. The existence of two long-lived hyperfine sublevels of the ground state level, coupled via electric dipole transitions to first excited states, at a wavelength in the near-infrared region covered by simple and cheap diode lasers, makes alkali atoms medium of choice for most valuable and impressive scientific results of today, several being awarded lately by Nobel prizes. Since the transition between two hyperfine levels of alkalis is forbidden, this atomic structure allows for easy optical polarization of the atoms, prerequisites for realizing the effects of interest in the study described below.

Most of investigations in nonlinear and quantum optics with alkalis were done with Rb and Cs, less with Na. Very little has been done with K atoms. Potassium has exceptionally (compared to other alkalis) small hyper fine splitting which favors stronger cross susceptibility of the third order. With this in mind candidate began thorough investigations of nonlinear and quantum phenomena in thermal K vapor. The goal of the proposed dissertation is to confirm our expectations that potassium vapor is a more suitable medium for generating new states of light than other alkali metals.

Coherent interactions of the electromagnetic field with multi-level atomic systems give rise to a wide range of physical phenomena. Coherent phenomena developed in potassium vapor that can be used for controlling and shaping states of light will be the subject of the proposed research work. Part of the research that the candidate will conduct will be focused on the nonlinear phenomenon of four-wave mixing in a potassium vapor realized on a double lambda scheme on the D1 line [3]. This effect is of particular interest because it leads to the generation of two correlated light beams that could be used to obtain amplitude-squeezed light. The basic property of squeezed light is determined by the Heisenberg relation of uncertainty, which states that we are limited with the precision of simultaneous determination of phase and amplitude. By realizing squeezed light, we perform an asymmetric redistribution of this uncertainty. Sources of amplitude- squeezed light are of particular interest because they allow us to reduce technical noise, which is of particular importance in the detection of gravitational waves [4], the realization of biosensors [5], and the improvement of precision of optical microscopy [6]. This state of light has been demonstrated so far in a rubidium [7-9] and cesium vapor [10]. However, potassium vapor has remained a very poorly studied medium.

Further studies of coherent effects includes novel investigations of ladder type EIT in potassium that includes excitation of high Rydberg states [11]. As valence electrons of a Rydberg atom move in orbits far away from the nucleus, even with very weak electric fields we can have strong dipole moments, leading to strong interactions between atoms. The physics of Rydberg states is an area of research that is now in the focus of interest of many research groups, especially in the context of cooled atoms, as it has been shown that it can be applied in the field of quantum information processing and the realization of quantum computers. However, until recently, atomic vapors, as active mediums, have been neglected. The effect of Rydberg blockade has recently been demonstrated [12]. Also a single-photon source has been realized in hot rubidium vapor [13]. The strength of interactions between Rydberg atoms can be easily controlled by changing the density of the medium or by changing the excited Rydberg state, i.e. the principal quantum number. The novelty of this field of physics is the ability to work in quantum nonlinear environments when photons interact strongly [14]. The candidate's task will be the excitation and detailed spectroscopy of these states in potassium vapor via the

phenomenon of electromagnetically induced transparency [15] realized on a ladder atomic scheme.

References:

- [1] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Elsevier, New York, 2003.
- [2] M. Fox, *Quantum Optics, An Introduction*, Oxford University Press, Oxford (2006).
- [3] M.M. Ćurčić, T. Khalifa, B. Zlatković, I.S. Radojičić, A.J. Krmpot, D. Arsenović, B.M. Jelenković, M. Gharavipour, *Phys. Rev. A* 97, 063851 (2018).
- [4] K. Goda, O. Miyakawa, E. Mikhailov, S. Saraf, R. Adhikari, K. McKenzie, R. Ward, S. Vass, A. Weinstein, and N. Mavalvala, *Nature Physics*, 4(6):472–476 (2008).
- [5] J.R. Mejía-Salazar, O.N. Oliveira, *Chem Rev* 118, 10617–10625 (2018).
- [6] M. A. Taylor, J. Janousek, V. Daria, J. Knittel, B. Hage, H.-A. Bachor, W. P. Bowen, *Phys. Rev. X* 4, 011017(2014).
- [7] C. F. McCormick et al., *Phys. Rev. A* 78, 043816 (2008).
- [8] R. C. Pooser, A. M. Marino, V. Boyer, K. M. Jones, and P. D. Lett, *Opt. Express* 17, 16722–16730 (2009).
- [9] Glorieux Q, Guidoni L, Guibal S, Likforman J-P and Coudreau T, *Phys. Rev. A* 84, 053826 (2011).
- [10] M. Guo et al. *Phys. Rev. A* 89, 033813 (2014).
- [11] R. Loew, H. Weimer, J. Nipper, J.B. Balewski, B. Butscher, H. P. Buchler, and T. Pfau, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 45, 113001 (2012).
- [12] A. Bhowmick, D. Kara, and A. K. Mohapatra, arXiv:1802.06599v1 (2018).
- [13] F. Ripka, H. Kubler, R. Loew, and T. Pfau, *Science* 362, 446, ISSN 0036-8075 (2018).
- [14] O. Firstenberg, C. S. Adams, and S. Hofferberth, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 49:152003 (2016).
- [15] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J.P. Marangos, *Rev. Mod. Phys.* 77, 633–673 (2005).

3. Starting hypotheses

The research work will be based on the following starting hypotheses:

- Due to the characteristic atomic structure, different from other alkali metals, warm potassium vapor may be a more suitable medium for efficient squeezing of light.
- The levels of achieved gain are higher than those obtained in rubidium and cesium. As the level of light squeezing is directly related to the gain, it can be assumed that squeezing of light in the potassium vapor will be more effective than in the other media.

- A theoretical analysis based on a semi-classical approach, a set of Maxwell-Boltzmann equations, allows us to determine the range of experimental parameters for which we can expect to generate squeezed light.
- Electromagnetically Induced Transparency (EIT) on a ladder atomic scheme employing Rydberg nS and nD states in a potassium vapor can be realized at a lower intensity of the probe laser compared to the power levels needed with other alkalis, due to the fact that the potassium atom has a much smaller energy of the hyperfine splitting of the ground state.
- Based on preliminary analyses and previous testing of InGaAs quantum well based semiconductor chip, the assumption is that the realization of blue VECSEL (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser) will be successfully completed.
- Generation of a second harmonic with the help of a nonlinear crystal placed inside the laser resonator could lead to the desired power in the blue part of the spectrum (~ 2 W).
- Optical pumping of the laser chip inside the quantum well layers results in reduced heating of the active medium and allows for better confinement of charge carriers within the quantum wells.

4. Scientific research methods

One of the tasks during the research will be to generate amplitude-squeezed light, thus overcoming the constraints imposed by random quantum fluctuations. Specifically, quantum-mechanical fluctuations in vacuum impose constraints on measurement accuracy. This limit is defined as the standard quantum limit. In the Laboratory for Quantum and Atomic Physics, at the Institute of Physics, the candidate is able to generate amplitude-squeezed light, thereby reducing the relative fluctuations in the intensity between the two laser beams. The process is based on the phenomenon of four-wave mixing, which represents the interaction of four modes of the field through interaction with the medium. A double lambda scheme is used, in the combination with two copropagating laser beams, a strong pump beam and a weaker probe beam. The process of four-wave mixing consists of Raman transitions between hyperfine sublevels of the ground states, which results in spontaneous emission of conjugated photons. The powers of the obtained beams are measured individually and then the signals are subtracted and sent to the spectral analyzer. The obtained probe and conjugate beams at the output are correlated, which means that the intensity fluctuations of the probe are imprinted in the conjugated beam. For an adequate set of system parameters, the intensity difference value of these two beams will be below the quantum noise limit. In the experiment, quantum noise, which is the reference point, is shot noise. In addition to the experimental analysis, a theoretical one will be carried out in order to understand and clarify the obtained results in greater detail.

The electromagnetically induced transparency will be used to excite and detect Rydberg states. This phenomenon is based on the existence of dark states that are not coupled to the laser field. Because atoms are in the dark state they cannot be excited by laser fields, and thus become transparent in a certain part of the spectral range. The realization of the EIT will be achieved with the help of two counter-propagating laser beams, which will couple the three atomic states in the so-called ladder scheme. When working with alkaline elements, an analogy with hydrogen atoms is often drawn. The difference in energy structure between these elements is determined by quantum defects. When the values of quantum defects are known, the values of Rydberg states can be calculated. The candidate will try to determine the values of quantum defects from the measurement results and then compare the measured transition frequencies

with the calculated transitions. The data obtained will provide an opportunity for further analytical/numerical calculations and predictions.

For the research in the field of atomic physics, laser sources with specific features are necessary. For the excitation of Rydberg states in potassium vapor strong and stable blue laser is needed, at ~ 460 nm. For that reason, a part of the research process will be related to the realization of the blue VECSEL. This type of laser has a combination of good characteristics of semiconductor lasers and optically pumped solid-state lasers, which means that high powers of the laser output can be achieved, together with a narrow spectral lines. Their design also enables the flexibility in the realization of an external cavity and in choice of the emission wavelength.. All of these features make this type of the laser an ideal choice for the spectroscopy of Rydberg states.

5. Expected scientific contribution

As a result of the research described, the following scientific contributions are expected:

- A study of quantum phenomena, four-wave mixing and electromagnetically induced transparency, in potassium vapor, an alkali metal that has not been thoroughly examined in this context so far.
- Generation of amplitude-squeezed light in potassium vapor via the phenomenon of four-wave mixing.
- Determination of the set of parameters of the system for which maximum amplitude squeezing is obtained.
- Theoretical analysis of the mentioned effect in order to further clarify the obtained experimental results.
- Detailed spectroscopy of Rydberg states in potassium vapor by the phenomenon of electromagnetically induced transparency.
- The first realization of blue VECSEL, optically pumped inside quantum well layers, with powerful, singlefrequency emission.

6. Research plan and work structure

The research will be conducted in the following steps:

- The first part of the research work will focus on the topic of four-wave mixing, and in what way and under what conditions it can lead to the generation of amplitude-squeezed light. The atomic transitions will be realized on the D1 line of potassium. It will be shown how and to what extent gain, as well as the efficiency of the amplitude squeezing of light, depend on the parameters of the system: laser beams powers, the angle at which the beams intersect in the cell, the length of the cell, the single-photon and two-photon detunings, the atomic density in the cell, and beam detection efficiency after passing through the cell. The laser source in the experimental setup is MBR laser, model 110 Coherent, which can deliver up to 1 W of output power at a wavelength of 770 nm. Two acousto-optic modulators are used for frequency modulation of the probe beam. By regulating the cell temperature, the desired potassium density is achieved. A balance photodetector is used for detection, after which the signals are sent to an oscilloscope and spectral analyzer for further processing. Such an experimental setup makes it

possible to individually measure the intensity of the probe and conjugated beam, as well as their differences. In this way, a correlation between the beams can be confirmed and obtained squeezing of light can be determined.

- The next step will be the detection of highly excited Rydberg states. This will be achieved by a phenomenon called electromagnetically induced transparency, realized on a three-level ladder atomic scheme. The probe beam at 770 nm will couple the levels at the D1 line, while the control beam at a wavelength of about 460 nm will be used for coupling nS and nD Rydberg states. A diode laser will be used as the source at 770 nm. The light beam at 460 nm will be obtained with the help of the second harmonic generation in the nonlinear crystal. For this purpose, the frequency of the fundamental beam obtained from the MBR laser will be doubled. With a sufficiently high conversion efficiency to the second harmonic, the candidate will be able to reach a sufficiently high power in the blue that will allow the initial characterization of Rydberg atoms. Under different conditions and when scanning the frequency of a blue light source, the transmission of the probe beam will be measured. In this way the EIT spectrum will be recorded and the detailed spectroscopy of Rydberg states in potassium vapor will be performed. In this way the groundwork for further successful experimental and theoretical studies in the field of Rydberg physics in potassium vapor will be set.
- As the blue-beam power obtained in previously described is limited by the power of the MBR laser and conversion efficiency, the candidate will be simultaneously working on the realization of the blue VECSEL with the emission wavelength around 460 nm. A sufficiently strong blue source will allow studies of the strong optical nonlinearities that can occur in the described atomic environment and in which way they can lead to the generation of new light states. The development of this type of laser involves the design of a semiconductor chip (based on quantum wells), as well as an external resonator, with all the optical elements that will be included. One of the first steps will be to test samples with different combinations of semiconductor materials in order to reach the desired emission wavelength, as well as to achieve the best possible confinement of charge carriers. All chips will be grown by metal-organic vapor phase epitaxy. After that, the final chip will be tested in different types of laser resonator. The next step will be generation of a second harmonic in the BBO crystal placed inside the resonator, power, wavelength, and beam profile characterization. In order to achieve single-frequency emission, as well as to be able to scan the wavelength, an etalon and a birefringent filter will be placed inside the resonator. In order for such a laser to be used in atomic spectroscopy, it will be necessary to lock its frequency.

7. Conclusion and proposal

On the basis of the attached documentation, and the acquired impression on the topic of the proposed thesis and the scientific work of Marija Ćurčić so far, the Committee concludes that the candidate fulfills all the conditions to successfully conduct the research and realize the doctoral dissertation under the title "Application of quantum and nonlinear phenomenon in hot potassium vapor for controlling properties of laser radiation".

The proposed topic belongs to the narrow scientific field of Nanoelectronics and Photonics, sub-domain Nonlinear and Quantum Optical Effects. The topic is scientifically based and the results that the candidate will obtain will be a significant and original contribution to the aforementioned area of research. Dr Branislav Jelenkovic, a scientific advisor and correspondent member of SASA, is proposed as a mentor for the preparation of the doctoral

dissertation. Together with this report, a list of the scientific papers of the proposed mentor which qualifies him as a mentor, will be submitted.

The doctoral dissertation will be written in English.

Taking into account all of the above, the Committee proposes to the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade to give the approval to the candidate Marija Ćurčić for the preparation of her doctoral thesis titled: „**Application of quantum and nonlinear phenomenon in hot potassium vapor for controlling properties of laser radiation**” (*Примена квантних и нелинеарних феномена у пари калијума за контролу особина ласерског зрачења*).

In Belgrade, 25.10.2019.

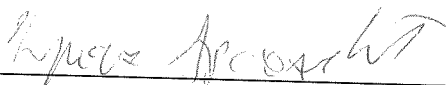
COMMITTEE MEMBERS



Branislav Jelenkovic, Scientific Advisor,
Institute of Physics, correspondent member of
SASA



Jasna Crnjanski, PhD, Associate Professor,
Faculty of Electrical Engineering in Belgrade



Dusan Arsenovic, PhD, Scientific Advisor,
Institute of Physics, Belgrade



Ivan Popović, PhD, Associate Professor,
Faculty of Electrical Engineering in Belgrade

