

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Вуковића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5015/13-3 од 21.3.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Вуковића под насловом

**„Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“**  
(енгл. „*Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers*“)

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

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

**30.10.2013.** године Никола Вуковић је уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Наноелектроника и фотоника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Положио је све испите (10) на докторским студијама са просечном оценом 10.00.

**26.10.2017.** године Никола Вуковић је пријавио тему за израду докторске дисертације под радним називом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“.

**31.10.2017.** године Комисија за студије III степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

**07.11.2017.** године, на 820. седници, Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5015/13-1 од 16.11.2017. године) у саставу:

- др Витомир Милановић, професор емеритус, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Љупчо Хаџиевски, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча,

- др Ненад Цакић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора је предложена

- др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

16.11.2017. године је обављена јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, пред комисијом у саставу:

- др Витомир Милановић, професор емеритус, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Љупчо Хаџиевски, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча,
- др Ненад Цакић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

На одбрани су били присутни сви чланови Комисије. Комисија је закључила да је кандидат добио оцену „задовољно“. Комисија је предложила да ментор докторске дисертације буде др Јелена Радовановић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

5.12.2017. године, на 821. седници, Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5015/13-2 од 5.12.2017. године).

25.12.2017. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Николе Вуковића, под насловом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“ (Одлука бр. 61206-5176/2-17 од 25.12.2017. године).

1.3.2018. године Никола Вуковић је предао на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“ (енгл. „*Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers*“).

6.3.2018. године Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

13.3.2018. године на 824. Седници Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5015/13-3 од 21.3.2018. године), у саставу:

- др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
- др Витомир Милановић, професор емеритус, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Љупчо Хаџиевски, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча,
- др Владимир Арсоки, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Ненад Цакић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под називом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и самопулсирање у квантним каскадним ласерима“ припада научној области Електротехника и рачунарство, ужа научна област Наноелектроника и фотоника, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор кандидата је др Јелена Радовановић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, члан Катедре за микроелектронику и техничку физику. Др Јелена Радовановић је изабрана у звање редовног професора за исту научну област и држи наставу на основним, мастер и докторским студијама при Катедри за микроелектронику и техничку физику. Активно се бави истраживањем из наведене научне области и аутор је или коаутор већег броја радова у међународним часописима са импакт фактором, који је квалификују за вођење ове дисертације. Релевантни радови ментора су наведени приликом пријаве теме дисертације кандидата.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Вуковић рођен је у Београду 5.5.1989. године где је завршио основну школу као ђак генерације и носилац награда са републичких такмичења из математике. Математичку гимназију завршио је са одличним успехом и на основу награде са републичког такмичења из физике 2008. године, уписао је Електротехнички факултет без полагања пријемног испита.

Дипломирао је 2012. на Одсеку за физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника (НОЛТ) са просеком 9.70, затим је био на двомесечној стручној пракси у Немачкој, на Техничком факултету у Килу. Мастер студије уписао је 2012. године на модулу НОЛТ и завршио их са просечном оценом 10.00 у септембру 2013. Тема мастер рада је „Утицај непараболичности на електронску структуру квантног каскадног ласера“, а ментор је проф. др Јелена Радовановић. Током завршне године основних и током мастер студија био је стипендиста Фонда за младе таленте републике Србије – Доситеја.

У октобру 2013. уписао је докторске студије на изборном подручју Наноелектроника и фотоника и у међувремену је положио све испите (10) на докторским студијама са просечном оценом 10.00. Од јануара 2014. године запослен је на Електротехничком факултету у Београду као учесник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја под бројем ИИИ45010 – „Фотоника микро и нано структурних материјала“, а учествовао је и на пет међународних пројеката:

- „Terahertz QCL Based Spectrometer for Rapid Detection of Chemical Agents and Explosives“, Science for Peace and Security Programme, ref. no. 984068, (од 2014. - 2016.),
- „Ultrafast Infrared Emitter on a Quantum Cascade – FastIQ“ (SCOPE5 2013-2016: Joint Research Projects), (од 2014. -2017.),
- COST action BM1205 – „European Network for Skin Cancer Detection using Laser Imaging“, (од 2014. -2017.),
- COST action MP1204 – „TERA-MIR Radiation: Materials, Generation, Detection and Applications“ (од 2014.-2016.) и
- COST action MP1406 – „Multiscale in modelling and validation for solar photovoltaics (MultiscaleSolar)“ (од 2015. -).

Током 2015. и 2017. године у оквиру COST акције BM1205 боравио је три пута по месец дана у научној посети код др Дмитрија Ј. Боика у Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) у Нушателу (Швајцарска) и обављао активности везане за пројекте FastIQ и BM1205.

Од 1. октобра 2017. године је у звању асистента при Катедри за микроелектронику и техничку физику, а пре тога је био у звањима истраживач-приправник и истраживач сарадник. Током досадашњег научно-истраживачког рада објавио је 6 радова у часописима са импакт фактором (два категорије M21, три категорије M22 и један M23) и 15 радова на конференцијама.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Николе Вуковића под насловом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“ написана је на енглеском језику („*Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers*“) и има укупно 146 страна. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14.12.2011. године. На почетку се налазе насловна страна и сажетак на енглеском и српском језику, као и садржај. Текст дисертације се састоји из 6 поглавља, а на крају се налази преглед коришћене литературе и прилози. Поглавља су организована у следећем редоследу (оригинални назив на енглеском је у заграда): 1. Увод (*Introduction*), 2. Опис модела (*Model description*), 3. РНГХ само-пулсације у монолитном ККЛ чипу (*RNGH self-pulsations in monolithic QCL chip*), 4. Аналитички израз за праг РНГХ нестабилности код ККЛ (*Analytical expression for RNGH instability threshold in QCLs*), 5. Регуларне само-пулсације код Фабри-Перо квантног каскадног ласера у средњем инфрацрвеном делу спектра у конфигурацији са екстерном ласерском шупљином (*Regular self-pulsations in external cavity Mid-IR Fabry-Pérot quantum cascade lasers*), 6. Закључак (*Conclusion*). Након прегледа коришћене литературе (наведених по редоследу цитирања у тексту) налази се део са прилозима (*Appendix A- G*). На самом крају дисертације налазе се обавезни прилози: биографија и три неопходне изјаве аутора (о ауторству, истоветности штампане и електронске верзије, коришћењу).

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном, поглављу указано је на тренутне перформансе и примене квантног каскадног ласера (ККЛ), као и мотивацију за проналажењем начина да ова направа ради у режиму кратких импулса у средњем инфрацрвеном делу спектра. Дат је преглед досадашњих покушаја да се реализују кратки импулса у средњем инфрацрвеном спектру и објашњено је зашто је реализација и даље врло компликована. Затим је дат преглед досадашњих истраживања у релевантној литератури која се бави мултимодним режимима код ККЛ-а и уведен је појам мултимодне нестабилности Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен (РНГХ) типа која је експериментално уочена код ККЛ-а. Објашњење зашто је праг за појаву ове нестабилности код ККЛ-а врло близу ласерског прага представља и даље тему дебата у научној заједници и предложено је неколико модела који покушавају да објасне ову појаву. У уводу дисертације је дат кратак осврт на те постојеће моделе и истакнуте су разлике модела који је приказан у дисертацији у односу на њих. Истакнути су, осим полазних хипотеза, и научни доприноси проистекли из рада на дисертацији и на крају је укратко описана даља структура дисертације.

У другом поглављу је квантни каскадни ласер представљен као двонивовски модел у оквиру кога се анализирају РНГХ нестабилности. Полази се од система Максвел-Блохових (МБ) једначина које узимају у обзир кохерентну интеракцију између поља и ласерског медијума (динамика поларизације и инверзије носилаца је описана Блоховим једначинама, док је пропација импулса кроз ласерски медијум смештен у Фабри-Перо шупљини описан таласном једначином, видети и Додатак А). Затим је описано како се врши експанзија МБ једначина у сет једначина спрегнутих модела, при чему, за разлику од других модела присутних у литератури, нови модел укључује просторне хармонике трећег реда индуковане макроскопске поларизације медијума, као и дифузију поларизације. Резултујући систем једначина у апроксимацији споропроменљиве амплитуде се затим посматра као својствени проблем и спроводи се линеарна анализа стабилности. Показано је да матрица стабилности која је димензија  $9 \times 9$  може да се раздвоји на две матрице димензија  $4 \times 4$  и  $5 \times 5$  при чему је за ниски праг РНГХ нестабилности код ККЛ-а одговорна матрица  $4 \times 4$ . Битно је истаћи да модел не садржи сатурабилни апсорбер, претпоставку која је у неким другим моделима вештачки уведена како би се објаснио низак праг РНГХ нестабилности код ККЛ-а, као и то да је у адијабатској апроксимацији у сагласности са добро познатим једначинама за ласер класе Б, што није случај са неким другим моделима (видети Додатак Б).

У трећем поглављу приказани су нумерички резултати настали коришћењем модела путујућег таласа (енгл. *travelling wave model*). Код ККЛ-а стандардне дужине ласерске шупљине (2-4 mm) нумеричке симулације и аналитичка теорија стабилности система МБ једначина се јако добро поклапају и у оба случаја предвиђена вредност другог прага (прага за појаву мултимодних нестабилности— енгл. *second threshold*) је мало изнад ласерског прага, што је у складу са многобројним експерименталним резултатима објављеним у литератури. Показано је да постоји неслагање између предвиђања теорије линеарне стабилности и нумеричких симулација у вези другог прага у случају када је дужина ласерске шупљине врло кратка (100  $\mu\text{m}$  или краћа). Наиме, теорија стабилности предвиђа да се други праг јавља врло близу ласерског прага, док у симулацији појава само-пулсација тј. РНГХ нестабилности настаје када је струја  $\sim 2.5$  пута изнад ласерског прага. Ово неслагање је у дисертацији објашњено преко теореме о површини пулса (енгл. *pulse area theorem*) из које проистиче да је потребан додатни услов за настанак само-пулсација који гласи: максимална фреквенција појачања је већа или једнака фреквенцији основног мода ласерске шупљине [Eq. (3.1)]. Показано је дакле да је потребно модификовати услов за појаву мултимодне нестабилности РНГХ типа, тј. није довољно само да је реални део својствене вредности матрице стабилности (има смисао појачања) позитиван да би дошло до појаве нестабилности. Додатни услов је врло лако испуњен у случају стандардне дужине ласерске шупљине ККЛ-а, међутим доводи до пораста другог прага код ККЛ са кратком ласерском шупљином као што је показано у симулацији. Даље, у 3. поглављу је дат критички осврт на експерименталне резултате присутне у литератури. Нумерички резултати за ККЛ са дугом ласерском шупљином (4 mm) показују да није могуће постићи регуларне само-пулсације (у складу са експериментима у литератури), док је режим кратких импулса трајања  $\sim 1$  ps могућ када је ласерска шупљина кратка (100  $\mu\text{m}$  или краћа). Нумерички резултати обухватају временску зависност електричног поља, излазне снаге ласера, поларизације и концентрације носилаца, затим спектар оптичке снаге, радио фреквенцијски спектар, атракторе, интерферометарску аутокорељацију (за интерф. аутокор. видети Додатак Ц). Затим је анализирана дужина кохеренције и испитивана веза РНГХ само-пулсација са појавом суперрадијансе. Анализирани су посебно утицаји дифузије носилаца, решетке поларизације и решетке носилаца (*spatial hole burning* ефекат - СХБ). Теорија је примењена и на ласерске диоде (ЛД) и показано је зашто су оне много резистентније на РНГХ нестабилности у односу на ККЛ.

У четвртном поглављу (као и у Додацима Д-Ф) развијена је аналитичка теорија базирана на биортогоналном пертурбативном развоју примењеном на анализу стабилности по Љапунову за квантни каскадни ласер у мономодном режиму рада. Добијен је једноставан аналитички

израз за праг РНГХ нестабилности код ККЛ-а [Eq. (4.9)] који је врло практичан за разјашњење утицаја СХБ ефекта на праг РНГХ нестабилности код ККЛ у средњем инфрацрвеном и ЛД на бази квантних јама (или балка) у видљивом и блиском инфрацрвеном делу спектра. Дати су и аналитички изрази за реални део својствене вредност матрице стабилности који први постаје позитиван и одговоран је за нестабилност, као и израз за фреквенцију на којој је вредност тог реалног дела својствене вредности максимална. Аналитички изрази се добро слажу са нумеричким симулацијама и у складу су и са експерименталним резултатима објављеним у литератури. Успостављена је и веза са оригиналном теоријом Рискена и Нумедала, Грахама и Хакена која је 1968. године формулисана за унидирекциони ласер са прстенастим резонатором.

У петом поглављу се разматра конфигурација ККЛ-а са екстерном ласерском шупљином (ЕШ) и испитује се могућност настанка регуларних само-пулсација. Са једне стране, време пропагације у екстерној шупљини (време кашњења импулса) служи да обезбеди меморијски ефекат и очекује се да може да побољша кохеренцију код дугих узорака ККЛ-а који иначе имају непогодност узроковану формирањем некохерентних домена. Са друге стране, код кратких ККЛ чипова очекује се да екстерна шупљина смањи фреквенцију само-пулсација. Нумерички модел подразумева антирефлексионни слој на предњој страни ККЛ чипа који је окренут ка екстерном огледалу, што је веома различито у односу на моделе у литератури који имају одређену ненулту рефлексивност предњег огледала. Осим тога, ни једна од претходних студија о ККЛ-у са ЕШ није узимала у обзир кохерентне ефекте који доводе до РНГХ само-пулсација које се јављају код монолитног ККЛ-а (без ЕШ). Главни резултати овог поглавља су добијени за кратак чип (100  $\mu\text{m}$ ) који испољава (1) бистабилност приликом адијабатског повећавања/смањивања струје пумпе, (2) смањење фреквенције само-пулсација када је ЕШ дугачка  $\sim 1\text{ mm}$  и (3) престанак само-пулсација када је ЕШ дугачка  $\sim 1\text{ cm}$ . Поред тога, за одређивање периодичности таласног облика излазне снаге ласера коришћена је нормализована ентропија (енгл. *recurrence period density entropy*), добро позната метода из области анализе сигнала (видети и Додатак Г).

Шесто поглавље представља закључак у коме се укратко сумирају истраживања спроведена у оквиру дисертације и постигнути научни резултати. Дисертација има релативно велики број прилога како би се избегло оптерећење главног текста формулама и извођењима и олакшало праћење.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Квантни каскадни ласер је први пут демонстриран 1994. године и до сада је нашао бројне примене у електронским уређајима за детекцију гасова у малим концентрацијама, контролу загађења, сигурносни надзор, итд. Потенцијал квантног каскадног ласера за примену у спектроскопији био би значајно увећан уколико би био омогућен рад у режиму ултра кратких импулса<sup>1</sup>. Међутим, ултра-брза релаксација носилаца код ККЛ која је реда величине нико секунде, онемогућава реализацију стандардних начина за генерисање кратких импулса који се примењују код обичних ласерских диода<sup>2</sup>.

Потенцијално постоји још један начин за генерисање кратких импулса у средњем инфрацрвеном делу спектра помоћу ККЛ. Наиме, 2007. године група са Харварда први пут је

<sup>1</sup> Могућности за примене у средњем и далеком инфрацрвеном делу спектра би укључивале лидаре (енгл. *Light Detection and Ranging*), опсервацију Земље, примене у екологији - за даљинску детекцију молекула штетних гасова, комуникације велике брзине базиране на ККЛ које користе атмосферски трансмисиони прозор од 3-5  $\mu\text{m}$  или 8-12  $\mu\text{m}$ , и многе друге.

<sup>2</sup> пасивно закључавање модова (енгл. *passive mode locking*) и Q-прекидачки (енгл. *Q-switching*) режим.

експериментално уочила појаву мултимодних нестабилности Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен типа пар процената изнад ласерског прага. Мултимодна РНГХ нестабилност повезана је са неадијабатским понашањем поларизације медијума и екситацијом брзих осцилација поларизације и инверзије носилаца. Ова нестабилност се манифестује као само-пулсирање излазне снаге ласера, док је оптички спектар подељен у два бочна опсега чије растојање је приближно једнако двострукој Рабијевој фреквенцији. Испод прага РНГХ нестабилности, оптички мод је потпуно контролисан ласерском шупљином и излазна снага је континуална (енгл. *continuous wave*). Међутим, оригинална РНГХ теорија која је формулисана 1968. за једнодирекциони ласер са прстенастим резонатором који ради у континуалном режиму, предвиђа да је неопходна јачина струје која је најмање 9 пута већа од струје ласерског прага како би се побудиле само-пулсације.

Ова докторска дисертација представља оригинални научно-истраживачки рад у оквиру кога је развијен један софистицирани модел који нуди објашњење ниског прага мултимодних РНГХ нестабилности у квантном каскадном ласеру, који не претпоставља сатурабилни апсорбер и који укључује ефекте сатурације, просторне модулације и дифузије и базира се на моделу путујућег таласа. Основна разлика у односу на све друге моделе присутне у литератури је то што модел укључује (1) индуквану решетку поларизације (поред решетке за популацију носилаца) и (2) процес дифузије носилаца који доводи до релаксације обе решетке. Осим тога, анализиран је и утицај дужине ласерске шупљине на праг РНГХ нестабилности, одређени су аналитички изрази за једноставну и брзу процену вредности прага за РНГХ нестабилност код ККЛ-а, испитана је могућност за настанак суперрадијансе, нумерички су испитане могућности за настанак ултра-кратких импулса код ККЛ у конфигурацији са екстерном ласерском шупљином.

Оригиналност и савременост своје дисертације кандидат је потврдио објављивањем радова произашлих из рада на дисертацији, у међународним часописима са импакт фактором (погледати секцију 4.3 испод), међу којима су и два рада у врхунским међународним часописима (M21), као и цитираношћу резултата.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током рада на дисертацији кандидат Никола Вуковић је истражио постојећу литературу из области која је обрађена и као најрелевантније у списку референци навео 127 наслова који обухватају како фундаменталне, тако и врло савремене радове у међународним часописима, књиге, докторске дисертације, радове са конференција и arXiv-a. Могу се разврстати у следеће области (групе): квантни каскадни ласер, нелинеарни оптички системи, РНГХ нестабилност, суперрадијанса, ултрабрза оптика и анализа сигнала. Значајан део цитираних публикација је новијег датума, а у списку референци налазе се и радови у којима је кандидат Никола Вуковић аутор и који садрже оригиналне резултате директно произашле из рада на овој дисертацији. Проучавањем доступне литературе кандидат је сагледао актуелно стање, недостатке постојећих модела и формирао полазне хипотезе и глобалне циљеве истраживања, као и методе које ће бити примењене у различитим фазама израде дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У првој фази истраживања потребно је упознавање са релевантном литературом и постојећим моделима. Истраживање у оквиру ове дисертације представља комбинацију различитих аналитичких и нумеричких метода које су реализоване у неколико фаза:

- Прорачун одговарајућих параметара одређених комерцијално доступних ККЛ за потребе аналитичких и нумеричких прорачуна.

- Као аналитички модел ККЛ за потребе анализе стабилности узет је семи-класични систем Максвел-Блохових једначина за два ласерска нивоа и Фабри-Перо ласерску шупљину. У моделу није адијабатски елиминисана поларизација медијума. Модел осим решетке носилаца (СХБ ефекат) укључује и решетку поларизације и дифузиони члан у једначини за поларизацију. Једначине за електрично поље и поларизацију медијума укључују оба смера пропагације (позитиван и негативан смер z-осе). Примењује се споропроменљива амплитудска апроксимација и добија се систем линеарних парцијалних диференцијалних једначина.
- Линеарна анализа стабилности (енгл. *Linear stability analysis*) се врши на основу линеаризације МБ једначина за двонивоски систем, за случај малих пертурбација. Одређују се својствене вредности и својствени вектори. Нестабилност настаје када је реални део неке од својствених вредности позитиван.
- Нумеричко решавање брзинских једначина базираних на моделу путујућег таласа, без сатурабилног апсорбера.
- Поређење вредности прага РНГХ нестабилности добијеним анализом стабилности и из нумеричког модела.
- Извођење аналитичких израза коришћењем биортогоналне теорије пертурбација другог реда примењене на матрицу стабилности.
- Испитивање везе између РНГХ типа нестабилности код ККЛ са Фабри-Перо шупљином и могућности за настанак суперрадијансе.
- Прилагођење модела путујућег таласа за случај када је присутна екстерна ласерска шупљина и нумеричко испитивање могућности такве конфигурације за настанак ултра-кратких импулса.
- Цртање бифуркационих дијаграма екстремних вредности излазне снаге ласера када се повећава/смањује параметар струје пумпе и испитивање могућности бистабилног рада.
- Одређивање периодичности таласног облика излазне снаге ласера коришћењем нормализоване ентропије (енгл. *recurrence period density entropy*), добро познате методе из области анализе сигнала. Ентропија узима вредност 0 за идеално периодичан сигнал и 1 у случају потпуно хаотичног сигнала.

Научне методе примењене у дисертацији су адекватне и добро утемељене методе које се користе у међународној научној заједници, што се може проверити прегледом литературе. Осим тога, велики део дисертације је већ публикован у врхунским међународним часописима категорије M21, што потврђује исправност и ваљаност примењених метода, а у прилог томе говори и цитираност радова.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

У дисертацији је показано да се РНГХ нестабилности са ниским прагом код ККЛ-а јављају услед комбинованог ефекта решетке поларизације носилаца и решетке популације носилаца које су индуковане у појачавачком медијуму, а не услед сатурабилне апсорпције у ласерској шупљини. Ово истраживање отвара практичне могућности за остваривање режима ултра-кратких импулса у средњем инфрацрвеном делу спектра. Када се исти модел примени на полупроводничке ласерске диоде може се објаснити одсуство РНГХ само-пулсација код ласерских диода сачињених од једне секције базиране на појачавачком медијуму сачињеном од квантних јама. Изведени аналитички израз за праг мултимодних нестабилности РНГХ типа код ККЛ-а са Фабри-Перо шупљином се може једноставно применити у практичним



ситуацијама које захтевају анализу динамичког понашања ККЛ-а и процену прага РНГХ мултимодних нестабилности. У овој дисертацији су анализирани и само-пулсације РНГХ типа код ККЛ-а у конфигурацији са екстерном ласерском шупљином где се очекује да екстерна шупљина смањи фреквенцију само-пулсација.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Никола Вуковић је у току израде дисертације показао иницијативу, способност самосталног изучавања литературе, систематичност, истрајност и могућност примене резултата из различитих области. Оригинални научни доприноси проистекли из рада на дисертацији, потврђени већим бројем објављених радова и цитата (видети 4.3), говоре у прилог томе да је Никола Вуковић стекао добре основе за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси остварени у дисертацији су:

- 1) Нови модел помоћу кога је показано да се РНГХ нестабилности са ниским прагом код ККЛ-а јављају услед комбинованог ефекта решетке поларизације носилаца и решетке популације носилаца које су индуковане у појачавачком медијуму, а не услед сатурабилне апсорпције у ласерској шупљини. Када исти приступ применимо на полупроводничке ласерске диоде (ЛД) можемо да објаснимо одсуство РНГХ само-пулсација код ласерских диода сачињених од једне секције базиране на појачавачком медијуму сачињеном од квантних јама,
- 2) Анализиран је утицај дужине ласерске шупљине на праг РНГХ нестабилности и модификован је потребни услов за појаву РНГХ нестабилности код ККЛ-а,
- 3) Анализиран је утицај решетке поларизације, решетке носилаца и дифузије на појаву РНГХ нестабилности код ККЛ-а,
- 4) Показано је да ККЛ чија је ласерска шупљина дугачка неколико милиметара испољава нерегуларне РНГХ само-пулсације, док су регуларне само-пулсације могуће код ККЛ са кратком ласерском шупљином чија је дужина 100  $\mu\text{m}$  или краћа,
- 5) Аналитички изрази за једноставну и брзу процену вредности прага за РНГХ нестабилност код ККЛ-а који се могу једноставно применити у практичним ситуацијама које захтевају анализу динамичког понашања ККЛ-а,
- 6) Испитиван је транзијентни режим до РНГХ само-пулсација код ККЛ са кратком ласерском шупљином и пронађено је понашање које подсећа на кооперативну суперрадијансу што се види из нормализованих вредности поларизације и концентрације носилаца,
- 7) Моделовање квантног каскадног ласера који се налази у екстерној ласерској шупљини и теоријско испитивање могућности такве конфигурације за настанак ултра-кратких импулса. Овај нови нумерички модел подразумева антирефлексионни слој на предњој страни ККЛ чипа који је окренут ка екстерном огледалу, што је веома различито у односу на моделе у литератури који имају одређену ненулту рефлексивност предњег огледала. Осим тога, ни једна од претходних студија о ККЛ-у са ЕШ није узимала у

обзир кохерентне ефекте који доводе до РНГХ само-пулсација које се јављају код монолитног ККЛ-а.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Проблематика која је обрађена у дисертацији Николе Вуковића представља и даље изазов у научној заједници, како са инжењерског аспекта, с обзиром на потешкоће реализације кратких импулса у средњем инфрацрвеном делу спектра, тако и чисто научног, јер постојећи модели у литератури не успевају да у потпуности одговоре на питање зашто је низак праг РНГХ нестабилности у ККЛ.

Кандидат је развио нови модел помоћу кога је могуће објаснити узрок настанка мултимодне нестабилности са ниским прагом Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен типа код квантних каскадних ласера, као и одсуство РНГХ само-пулсација код полупроводничке ласерске диоде сачињене од једне секције базиране на појачавачком медијуму од квантних јама.

Показао је да ККЛ чија је ласерска шупљина дугачка неколико милиметара испољава нерегуларне РНГХ само-пулсације, у складу са експерименталним резултатима присутним у литератури док су регуларне само-пулсације могуће код ККЛ са кратком ласерском шупљином чија је дужина 100  $\mu\text{m}$  или краћа (не постоје још увек експериментални резултати).

Аналитички израз за праг РНГХ нестабилности код ККЛ-а, добијен биортогоналном теоријом пертурбација примењеном на анализу стабилности по Љапунову за ККЛ у мономодном режиму рада, представља користан алат како са чисто теоријског становишта, тако и у практичним ситуацијама.

Несумњив допринос дисертације је и моделовање квантног каскадног ласера који је у екстерној ласерској шупљини. Теоријско испитивање могућности такве конфигурације за настанак ултра-кратких импулса има велику могућност примене. Са једне стране, време пропагације у екстерној шупљини (време кашњења импулса) служи да обезбеди меморијски ефекат и очекује се да може да побољша кохеренцију код дугих узорака ККЛ-а, који иначе имају непогодност узроковану формирањем некохерентних домена. Са друге стране, код кратких ККЛ чипова очекује се да екстерна шупљина смањи фреквенцију само-пулсација. Главни резултати су добијени за кратак чип (100  $\mu\text{m}$ ) који испољава (1) бистабилност приликом адијабатског повећавања/смањивања струје пумпе, (2) смањење фреквенције само-пулсација када је ЕШ дугачка  $\sim 1\text{ mm}$  и (3) престанак само-пулсација када је ЕШ дугачка  $\sim 1\text{ cm}$ .

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси верификовани су радовима распоређеним по категоријама и цитатима (без аутоцитата и хетероцитата).

**Радови у врхунским међународним часописима (M21):**

1. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Low-threshold RNGH Instabilities in Quantum Cascade Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 23, 1200616 (1-16) (2017), DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2699139, ISSN 1077-260X, импакт фактор 3.971 (2016).
2. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Analytical expression for Risken-Nummedal-Graham-Haken instability threshold in quantum cascade lasers," *Optics Express* 24, pp. 26911-26929, (2016), DOI: 10.1364/OE.24.026911, ISSN 1094-4087, импакт фактор 3.307 (2016).

### Радови у истакнутим међународним часописима (M22):

3. N. Vuković, A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, and D. Indjin, "Possibilities of achieving negative refraction in QCL-based semiconductor metamaterials in the THz spectral range," *Optical and Quantum Electronics* 47, 883-891, DOI: 10.1007/s11082-014-0020-2, ISSN 0306-8919, (2015) импакт фактор 1.290.
4. N. Vuković, V. Milanović and J. Radovanović, "Influence of nonparabolicity on electronic structure of quantum cascade laser," *Physics Letters A* 378 (2014), pp. 2222-2225, DOI: 10.1016/j.physleta.2014.04.069, ISSN 0375-9601, импакт фактор 1.683 (2014).
5. N. Vuković, J. Radovanović and V. Milanović, "Enhanced modeling of band nonparabolicity with application to mid-IR quantum cascade laser structure," *Physica Scripta T* 162 (2014) 014014 (1-4), DOI:10.1088/0031-8949/2014/T162/014014, ISSN 0031-8949, импакт фактор 1.126 (2014).

### Радови у међународним часописима (M23):

6. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Multimode RNGH instabilities of Fabry - Perot cavity QCLs: impact of diffusion," *Optical and Quantum Electronics* 48, 254 (1-10), 2016., DOI: 10.1007/s11082-016-0515-0, ISSN 0306-8919, импакт фактор 1.055 (2016).

### Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

7. N. Vuković, A. Daničić, J. Radovanović and V. Milanović, "Conduction-band nonparabolicity and gain calculations for THz Quantum cascade laser in strong magnetic field," Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN Vrnjačka Banja, June 2-5 2014, pp. MOI2. 2. 1-4 (2014).

### Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34):

8. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D. L. Boiko, "Self-pulsing in monolithic and external cavity mid-IR QCLs," International School and Conference on Photonics - PHOTONICA2017, Belgrade 08/2017, Book of Abstracts, p. 130, (2017).
9. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D.L Boiko, "Self-pulsations in QCLs", International Quantum Cascade Lasers School & Workshop IQCLSW 2016, 4.-9. September 2016, Cambridge UK, Book of Abstracts, p.195-196, (2016).
10. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Determination of RNGH Round-trip Gain in QCLs," 4th Annual Conference of COST Action MP1204 & SMMO2016 Conference, Lisbon, Portugal, 21.-24. March 2016, Book of Abstracts, P.08, (2016).
11. M. Dubajić, A. Daničić, N. Vuković, V. Milanović, J. Radovanović, "Possibilities of achieving negative refraction conditions in quantum well structures based on cubic nitrides," 4th Annual Conference of COST Action MP1204 & SMMO2016 Conference, Lisbon, Portugal, 21.-24. March 2016, Book of Abstracts, P.23, (2016).
12. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D.L. Boiko, "The Role of Carrier Diffusion in RNGH Instabilities of Quantum Cascade Lasers," Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, 21-25 June 2015 Munich, Advance programme, p. 202 (2015).
13. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D. L. Boiko, "Influence of Carrier Diffusion on RNGH Instabilities in Semiconductor Lasers," 3rd Annual Conference of COST Action MP1204 & 6th International Conference on Semiconductor Mid-IR Materials and Optics-SMM02015, Book of Abstracts, p. 61, 8-11. April 2015, Prague, Czech Republic (2015).
14. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D. L. Boiko, "Determination of RNGH round-trip gain using bi-orthogonal perturbation approach," International School and Conference on Photonics - PHOTONICA2015, Belgrade 08/2015, Book of Abstracts, p. 126, (2015).

15. A. Danicic, N.Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, "Modeling and applications of Quantum Cascade in external magnetic field," International School and Conference on Photonics - PHOTONICA2015, Belgrade 08/2015, Book of Abstracts, p. 38, (2015).
16. N. Vuković, A. Daničić, J. Radovanović and V. Milanović, "Effects of Conduction-band Nonparabolicity on Electronic Structure and Gain of THz Quantum Cascade Laser in Magnetic field," International quantum cascade lasers school & workshop 2014 , 7-14. September 2014, Policoro, Italy, Workbook, pp. 242-243 (2014).
17. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović and D. L. Boiko, "Exploring the relation between Risken–Nummedal–Graham–Haken instabilities and conditions for superradiance in a quantum cascade laser," European Semiconductor Laser Workshop 2014 , Workbook, 18-19. September 2014, Paris, France (2014).
18. A. Daničić, N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, "Realization of negative refraction in the THz spectral range via quantum cascades," STSM Workshop & Management Committee Meeting, 13-15. November 2014, Warsaw, Poland, Workbook, (2014).
19. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D. L. Boiko, "Investigation of Risken–Nummedal–Graham–Haken instabilities in quantum cascade lasers," 13th YOUNG RESEARCHERS' CONFERENCE, Materials Science and Engineering, Belgrade 12/2014. Book of Abstracts, p. 18, (2014).

#### Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу (М64):

20. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. Boiko, "Recent progress on RNGH Instabilities in QCLs," 9th Photonics Workshop, Kopaonik, Serbia, March 2-6, 2016., Book of Abstracts, p. 20, (2016).
21. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D. L. Boiko, "Multimode Risken–Nummedal–Graham–Haken Instabilities of Fabry-Perot Cavity Quantum Cascade Laser," 8th Photonics Workshop, Kopaonik, Serbia, March 2015., Book of Abstracts, p. 28, (2015).

#### Остало:

22. N. Vuković, "Investigation of RNGH instabilities in quantum cascade lasers," in *SKIN AND TISSUE CANCER DETECTION USING LASER IMAGING The Book of Scientific Reports*, 1st ed., Ž. Cvejić, J. Radovanović, and D. Indjin, Eds. Novi Sad, Serbia: Liberte, 2017, pp. 112–116.
23. N. Vuković, "Travelling wave model for external cavity QCL," in *SKIN AND TISSUE CANCER DETECTION USING LASER IMAGING The Book of Scientific Reports*, 1st ed., Ž. Cvejić, J. Radovanović, and D. Indjin, Eds. Novi Sad, Serbia: Liberte, 2017, pp. 242–245.

#### Цитати у часописима са импакт фактором (без аутоцитата и индиректних цитата):

##### Рад 1. је цитиран у:

1. T. S. Mansuripur et al., "Single-mode instability in standing-wave lasers: The quantum cascade laser as a self-pumped parametric oscillator," *Phys. Rev. A* 94, p. 63807 (2016)<sup>3</sup>.
2. M. Piccardo et al., "The harmonic state of quantum cascade lasers: origin, control, and prospective applications [Invited]," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, p. 9464, (2018).

##### Рад 2. је цитиран у:

3. M. Piccardo et al., "The harmonic state of quantum cascade lasers: origin, control, and prospective applications [Invited]," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, p. 9464, 2018.
4. Kocharovskiy V V, Zheleznyakov V V, Kocharovskaya E R, Kocharovskiy V V "Superradiance: the principles of generation and implementation in lasers," *Phys. Usp.* 60, p. 345 (2017).
5. Paolo Bardella, Lorenzo Luigi Columbo, and Mariangela Gioannini, "Self-generation of optical frequency comb in single section quantum dot Fabry-Perot lasers: a theoretical study," *Opt. Express* 25, p. 26234 (2017).

<sup>3</sup> Напомена: Рад је цитиран док још увек није био објављен, тј. био је на arXiv-у (arXiv:1601.03212).

6. L. L. Columbo, S. Barbieri, C. Sirtori, and M. Brambilla, "Dynamics of a broad-band quantum cascade laser: from chaos to coherent dynamics and mode-locking," *Opt. Express* 26, p. 2829 (2018).

**Pad 3. je цитиран у:**

7. Figarova, S.R., Figarov, V.R. & Rashidova, S.S. "Negative reflection in GaP single crystals," *Opt Quant Electron* 48:452 (2016).

**Pad 4. je цитиран у:**

8. Borowik, P., Thobel, J.L. & Adamowicz, L. "Monte Carlo modeling applied to studies of quantum cascade lasers," *Opt Quant Electron* 49: 96 (2017).
9. A. Tiutiunyk, M.E. Mora-Ramos, A.L. Morales, C.M. Duque, R.L. Restrepo, F. Urgan, J.C. Martínez-Orozco, E. Kasapoglu, C.A. Duque, "Electron Raman scattering in a double quantum well tuned by an external nonresonant intense laser field," *Optical Materials* 64, p 496 (2017).
10. M. Solaimani, Seyed Mohammad Ali Aleomraninejad, Leila Lavaei, "Optical rectification in quantum wells within different confinement and nonlinearity regimes," *Superlattices and Microstructures* 111, p. 556 (2017).
11. Gookbin Cho and Jungho Kim, "Effect of conduction band non-parabolicity on the optical gain of quantum cascade lasers based on the effective two-band finite difference method," *Semiconductor Science and Technology* 32, 095002 (2017).

**Pad 5. je цитиран у:**

12. Borowik, P., Thobel, J.L. & Adamowicz, L. "Monte Carlo modeling applied to studies of quantum cascade lasers," *Opt Quant Electron* 49: 96 (2017).

**Pad 6. je цитиран у:**

13. Petar Tzenov, David Burghoff, Qing Hu, and Christian Jirauschek, "Time domain modeling of terahertz quantum cascade lasers for frequency comb generation," *Optics Express* 24, p 23232 (2016).
14. Erheng Wu, Qing Cao, Jun You, Chengpu Liu, "Nonlinear dynamics investigation in few-cycle laser seeding of quantum cascade lasers: role of permanent dipole moment," *Optics Communications* 392, p 196 (2017).

Друго: цитати на међународним конференцијама (без аутоцитата и индиректних цитата)

**Pad 2. je цитиран у:**

15. Lorenzo Luigi Columbo, Paolo Bardella, Ivo Montrosset and Mariangela Gioannini, "Self-mode-locking in Quantum Dot unidirectional ring lasers: model and simulations," International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), (2017).

**Pad 6. je цитиран у:**

16. Petar Tzenov, Christian Jirauschek, "Slow terahertz light via resonant tunneling induced transparency in quantum well heterostructures," Proc. SPIE 10226, 19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, 1022603 (5 January 2017).

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изложеног Комисија констатује да докторска дисертација кандидата Николе Вуковића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“ (енгл. „*Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers*“) испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета. **Напомена:** дисертација је написана на енглеском језику.


Докторска дисертација кандидата Николе Вуковића садржи више научних доприноса од којих бисмо као најважније издвојили: (1) развој новог модела који може да објасни узрок настанка мултимодне нестабилности са ниским прагом Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен типа код квантних каскадних ласера, а не садржи сатурабилни апсорбер, (2) аналитички израз за праг РНГХ само-пулсација код ККЛ добијен преко биортогоналне теорије пертурбација (3) показано је нумеричким симулацијама да је могуће постићи регуларне само-пулсације код ККЛ са кратком ласерском шупљином и (3) да је фреквенцију тих само-пулсација могуће смањити у конфигурацији са екстерном ласерском шупљином.

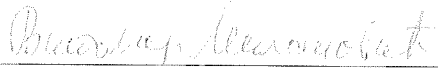
Током израде докторске дисертације, као и самом дисертацијом, објављеним радовима и цитираношћу, Никола Вуковић је показао да је оспособљен за самостални научно-истраживачки рад.

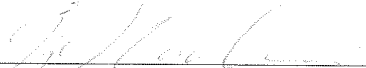
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом „Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима“, кандидата Николе Вуковића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, прихвати, изложи на јавни увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.


Београд, 30. март 2018. године


### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Јелена Радовановић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Витомир Милановић, професор емеритус  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Љупчо Хаџиевски, научни саветник  
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча

  
др Владимир Арсоки, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Ненад Цакић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет