

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Марка М. Крстића**

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5024/09-3 од 17. новембра 2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Марка М. Крстића** под насловом

**„Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода”**

**"Statical and dynamical characteristics of injection-locked Fabry-Perot laser diodes"**

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

Марко Крстић је 3. децембра 2009. године уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул за Наноелектронику и фотонику, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Све испите на докторским студијама положио је са највишом оценом.

Кандидат је 12. фебруара 2014. године пријавио тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Статичке и динамичке карактеристике бистабилних инјекционо синхронизованих полупроводничких Фабри-Перо ласерских диода”.

20. фебруара 2014. године, Комисија за студије III степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на својој 771. седници 27. марта 2014. године именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу

- др Јован Радуновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Јован Елазар, професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

- др Радивоје Ђурић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и
- др Јасна Црњански, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора је предложен

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

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације обављена је 15. априла 2014. године на Електротехничком факултету, пред комисијом у одсуству ментора. Комисија је закључила да је кандидат на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно”.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације на седници одржаној 17. јуна 2014. године.

На седници одржаној 7. јула 2014. године, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Марка М. Крстића, под насловом „Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода” (број одлуке 612-06-3149/2014).

Кандидат је 28. октобра 2015. године предао на преглед и оцену докторску дисертацију под насловом “Statical and dynamical characteristic of injection-locked Fabry-Pérot semiconductor lasers diodes” (“Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода”).

Комисија за студије III степена потврдила је 3. новембра 2015. године испуњеност свих потребних услова и Наставно-научном већу Електротехничког факултета поднела предлог за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

На својој 793. седници 10. новембра 2015. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 5024/09-3 од 17.11.2015. године), у саставу

- др Дејан Гвоздић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Јасна Црњански, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Јован Радуновић, професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Љупчо Хаџиевски, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за Нуклеарне науке Винча и
- др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Физичке електронике за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Именовани ментор дисертације, др Дејан Гвоздић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, активно се бави истраживањем из наведене научне области и из ње има укупно 48 публикованих радова у часописима са SCI листе.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко М. Крстић је рођен 29. децембра 1984. године у Нишу, где је завршио основну и средњу школу, Гимназија "Бора Станковић", обе као носилац Вукове дипломе.

Електротехнички факултет уписао је 2003. године, а дипломирао 22. октобра 2007. године, на Одсеку за Физичку електронику са укупном просечном оценом 8,82. Дипломски рад под насловом „Моделовање пропагације сигнала у оптичком влакну применом сплит-степ методе” одбранио је са оценом 10.

Дипломске академске – мастер студије на модулу Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника на Електротехничком факултету уписао је 2007. године, а завршио 17. марта 2009. године, одбраном завршног мастер рада под насловом „Анализа и моделовање полупроводничког ласера са инјекционо спрегнутим модовима”, са укупним просеком 9,83. Завршни рад одбранио је са оценом 10.

Докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Наноелектроника и фотоника, уписао је децембра 2009. године. На докторским студијама положио је све испите предвиђене планом докторских студија, са просечном оценом 10.

Од 2009. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. За сарадника у настави, на годину дана, изабран је 24. фебруара 2009. године, при Катедри за Микроелектронику и техничку физику. За асистента за ужу научну област Физичка електроника, при Катедри за Микроелектронику и техничку физику, изабран је 20. априла 2010. године, а поново изабран у исто звање 16. априла 2013. године.

Коаутор је осам радова (четири као први аутор) у врхунским међународним часописима (M21), четири рада (један као први аутор) у истакнутим међународним часописима (M22), једног рада (први аутор) у међународном часопису (M23), једног рада у домаћем научном часопису (M53), једног саопштења (први аутор) са међународног скупа штампаног у целини (M33), четири саопштења (једно као први аутор) са међународних скупова штампаних у изводу (M34) и два саопштења са скупова националног значаја штампаних у целини (M63). Учествовао је у два пројекта Министарства за науку и технолошки развој републике Србије и два међународна пројекта.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом “Statical and dynamical characteristic of injection-locked Fabry-Pérot lasers diodes” (“Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода”) написана је на 133 стране куцаног текста на енглеском језику, са 69 слика, једном табелом и 89 нумерисаних једначина. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. децембра 2011. године. Садржи насловну страну на енглеском и српском језику, страну са подацима о ментору и члановима комисије, апстракт на енглеском (4 стране) и српском језику (4 стране), садржај (2 стране), пет глава, страну са кратком биографијом кандидата и списак коришћене литературе који обухвата 146 библиографских референци (14 страна). Поглавља дисертације су насловљена као:

1. Introduction (27 страна)
2. Theoretical model (15 страна)

3. Static characteristics of injection locking induced bistability (40 страна)
4. Dynamic characteristics of injection locking induced bistability (46 страна)
5. Conclusion (5 страна)

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље тезе садржи преглед историјског развоја и примене принципа инјекционе синхронизације, као и класификације различитих режима осцилаторног спрезања и синхронизације. Поред тога, дат је преглед најзначајнијих бистабилних компонената у савременим фотонским системима, као што су све-оптички комутатори и флип-флопови, који представљају главне кандидате за основне градивне блокове будућих фотонских мрежа са оптичком пакетском комутацијом. Следи систематизација оптичких бистабилности које се срећу у инјекционо-синхронизованим полупроводничким ласерима, а у које спадају апсорпциона, дисперзиона, поларизациона и бистабилност два лонгитудинална мода. Коначно, дат је приказ савремених трендова у истраживању и примени инјекционо-синхронизованих ласера у области фотонице.

У другом поглављу изведен је и представљен математичко-физички модел брзинских једначина за случај инјекционе-синхронизације мономодног полупроводничког ласера. Систем једначина обухвата једначину по концентрацији носилаца, концентрацији фотона инјекционо-синхронизованог мода и коначно једначину по фазној разлици инјекционо-синхронизованог мода и инјектоване светлости. У наставку поглавља дат је систем брзинских једначина којима се може описати динамика инјекционе синхронизације мултимодних Фабри-Перо полупроводничких ласера. Овај систем једначина, поред инјекционо-синхронизованог мода обухвата и све остале несинхронизоване лонгитудиналне модове. Део поглавља посвећен је извођењу израза који одређују опсег синхронизације, и дефинишу везу између интензитета инјекције, фреквенцијске раздешености, интензитета синхронизованог мода и коефицијента инјекције. Коначно, изведена је матрица система линеаризованих брзинских једначина за мале варијације променљивих, која чини основу за процену стабилности инјекционо-спрегнутог ласера применом индиректне методе Љапунова.

Треће поглавље је посвећено моделовању оптичких особина пратећег ласера и његовој статичкој карактеризацији у режиму инјекционе синхронизације. Приказани су резултати прорачуна спектра оптичког појачања и радијативне рекомбинације активне средине ласера на бази InGaAsP/InGaAlAs квантне јаме. Наведене величине дате су у функцији концентрације носилаца и енергије фотона и представљају основу модела мултимодног Фабри-Перо полупроводничког ласера. У наставку поглавља дефинисан је и одређен опсег синхронизације пратећег ласера у случају унутар-модалне (синхронизација доминантног мода) и међумодалне синхронизације (синхронизације бочног мода). Показано је да у другом случају долази до појаве мултиформног опсега синхронизације, што даље доводи до појаве мултистабилности стања ласера. Изведен је и дефинисан математички модел, односно скуп једначина, које представљају основу статичке анализе инјекционо-синхронизованих мултимодних ласера. Показано је да концентрација носилаца као и њен извод по времену представљају погодан фазни простор за праћење стационарних стања инјекционо-синхронизованих мултимодних ласера. У наставку је показано како се применом фазног простора могу формирати хистерезисне петље по концентрацији фотона и по фазној разлици пратећег и водећег ласера у функцији инјекционе оптичке снаге и фреквенцијске раздешености инјектованог мода. Коначно, спроведен је прорачун и анализа ширине и висине хистерезисних петљи у зависности од променљивих параметара, које одређују хистерезисне петље.

Четврто поглавље бави се динамичким карактеристикама инјекционо-синхронизованих Фабри-Перо полупроводничких ласера. Изведене су једначине из којих је нумеричким поступком одређена детаљна мапа геометријског места стационарних стања у

оквиру области синхронизације и то применом стандардног простора променљивих, који чине фреквенцијска раздешеност и однос инјектовне снаге и снаге инјекционо-синхронизованог мода. Приказана је мапа стабилности стационарних тачака по индиректном методу Љапунова и одређене су области бистабилности. Полазећи од добијених резултата, спроведена је анализа брзине комутације између стабилних стања и то применом простог аналитичког поступка, којим је могуће заобићи компликовано решавање комплетног нумеричког модела брзинских једначина. Примена овог модела обезбеђује релативно добру процену времена и енергије комутације која се реализује варијацијом инјекционе снаге водећег ласера. Иако развијени аналитички поступак у неким ситуацијама може описати и комутацију применом варијације фреквенцијске раздешености, у општем случају то није могуће због природе самог поступка, који се базира на стационарним трајекторијама комутације, па је далеко захвалније применити нумеричке методе моделовања. Осим тога нумерички поступак обезбеђује да се поред минималног времена комутације водећег ласера, изврши и процена времена комутације пратећег ласера, што аналитички метод није у стању да обезбеди. Због тога је комутација на бази варијације фреквенцијске раздешености детаљно истражена применом нумеричког метода. Уочена је значајна диспропорција у погледу дужине трајања комутације за различите смерове комутације, и предложене су методе за оптимизацију и уједначавање времена комутације пратећег ласера које обухватају одређивање оптималне дужине трајања варијације фреквенцијске раздешености водећег (мастер) ласера, примену пратећег ласера са екстерном шупљином која унапређује динамику инјектованог мода и проналажење оптималних мирних радних тачака на хистерезису.

У последњем, петом поглављу, представљени су закључци и главни доприноси дисертације.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Оптичке мрежне технологије представљају окосницу телекомуникационих и информационих система, будући да захваљујући енормном информационом капацитету, у овом тренутку обезбеђују преко 80% телекомуникационог саобраћаја. Међутим, потреба за повећањем информационог капацитета и даље рапидно расте услед све масовније употребе Интернета, видео-технологија и паметних мобилних уређаја. Једна од кључних технологија која оптичким системима обезбеђује велики информациони капацитет, захваљујући могућности пресумеравања односно рутирања оптичких канала на различитим таласним дужинама, је техника мултиплексирања по таласним дужинама (енг. *Wavelength Division Multiplexing*, WDM). Иако по питању трансмисије сигнала ова технологија обезбеђује високе преформансе, процес рутирања и регенерације оптичких сигнала и даље представља „уско грло“ технологије, јер се остварује у електричном домену, што подразумева компликовану оптичко-електричну-оптичку конверзију. Из тог разлога, тренутно се улажу велики напори и спроводе интензивна истраживања могућности рутирања у оптичком домену, са циљем повећања транспарентности и реконфигурабилности оптичких мрежа. У овом тренутку постоје два концепта која још увек нису практично заживела, од којих први делимично, а други у потпуности обезбеђује захтеве за „све-оптичком“ обрадом сигнала и рутирањем пакета. Први концепт се базира на оптичкој блоковској комутацији (енг. *Optical Burst Switching*, OBS) која у суштини представља компромис са старом технологијом комутираног приступа и ближи је коначној реализацији, док други концепт, под називом оптичка пакетска комутација (енг. *Optical Packet Switching*, OPS), представља ултимативно решење у погледу рутирања и обраде сигнала у оптичком домену, али је због недостатка оптичких меморијских елемента, односно бафера, још увек далеко од практичне реализације. У том смислу кључни

проблем у реализацији ове технологије лежи у чињеници да се светлосни сигнали не могу сачувати, односно меморисати, тј. локализовати, на начин како се то остварује у случају електронских сигнала у електронским уређајима, пре свега због чињенице да фотони постоје све дотле док се крећу, што је супротно захтевима локализације и конфинирања у меморијским елементима. Један од начина реализације оптичких меморија, пре свега оптичке RAM меморије, у основи се базира на реализацији бистабилних оптичких уређаја који се могу релативно брзо и са мало енергије преводити из једног у друго стабилно стање и то искључиво оптичким сигнаlima, што у основи одговара све-оптичким флип флоповима.

Предмет проучавања ове докторске дисертације су управо полупроводничке бистабилне активне направе које се могу реализовати применом инјекционо-синхронизованих мултимодних полупроводничких ласера. У том смислу, дисертација се бави једним од врло значајних и горућих проблема модерних фотонских комуникација и оптичке обраде сигнала, без чијег решења је немогуће очекивати реализацију оптичке пакетске комутације као финалног концепта рутирања оптичких сигнала. О савремености спроведеног истраживања говори и податак приказан у оквиру дисертације, а према коме је број цитираних радова на тему оптичких флип-флопова од неколико стотина цитата годишње, последњих година достигао број од неколико десетина хиљада годишње. Поред тога, радови произашли из дисертације цитирани су 19 пута од стране других аутора, што у основи потврђује атрактивност обрађене теме. Оно што дисертацију чини још актуелнијом са аспекта фотонских комуникација је истраживање оптичке комутације применом нових и напредних модулационих формата, пре свега оних који се базирају на варијацији фазе или учестаности оптичких сигнала. Резултати ових истраживања потврдили су да се напредни модулациони формати могу примењивати, не само за трансмисију сигнала, већ да се као такви могу користити у логичким операцијама и меморисању и то без икакве претходне конверзије. Овим је у неку руку отворена још једна нова и пропулзивна тема истраживања у области оптичких комуникационих система.

Оригиналноост теме докторске дисертације огледа се кроз неколико релевантних резултата. Дужи низ година сматрало се да је мапа области синхронизације и стабилности инјекционо-синхронизованих ласера одређена искључиво модом пратећег ласера који је синхронизован са водећим ласером. Међутим, на основу истраживања спроведених у оквиру ове дисертације показано је да је у случају инјекционе синхронизације бочних модова мултимодног ласера област синхронизације мултиформна и да се, као и област стабилности, значајно разликује од оне коју предвиђа досадашња теорија базирана на моделу инјекционо-синхронизованог мода, што је један од значајних оригиналних резултата тезе. Овај теоријски резултат је потврђен кроз експеримент, који је са тим циљем спроведен. Поред тога, по први пут је показано да опсервација ефекта бистабилности зависи од тога да ли је поред инјекционо-синхронизованог мода у обзир узет барем још један, обично најдоминантнији мод. Такође, по први пут је показано да се исправна мапа области синхронизације и стабилности може приказати искључиво укључивањем у разматрање свих несинхронизованих модова, који својим интегралним доприносом, уз синхронизовани мод, доводе до појаве бистабилности. Другим речима, сама појава бистабилности као и мапа стабилности и области синхронизације зависе од тога да ли је у обзир узет један, тј. синхронизовани мод, синхронизовани мод и одређен број доминантних модова, или сви подржани модови. По први пут су прорачунати, дискутовани и окарактерисани хистерезиси који одговарају густини фотона и фазе инјекционо-синхронизованог мода у функцији инјекционе снаге и фреквенцијске раздешености. Поред тога, спроведена је анализа максималне брзине комутације и утрошене енергије водећег ласера у циљу реализације комутације пратећег ласера између бистабилних стања. Анализа је спроведена применом оригинално изведеног аналитичког поступка. Испитивања везана за комутацију варијацијом фреквенцијске раздешености понудила су оригинална решења за скраћење времена комутације и то применом модификације времена живота фотона за синхронизовани мод,

оптимизацијом мирне радне тачке на хистерезису, као и оптимизацијом дужине трајања варијације фреквенцијске раздешености.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе коју је кандидат навео у дисертацији показује да је кандидат детаљно анализирао постојећу литературу и коректно навео референце на радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је 146 библиографских референци. Литература садржи велики број недавно објављених радова из високо-реномираних часописа који су уско везани за разматрани проблем, што сведочи о актуелности и значају истраживања. Поред радова других аутора, у листи референци налази се 12 ауторских и коауторских радова самог кандидата.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе које су примењене у тези доминантно су теоријског карактера, док је једна од метода експериментална.

- У прорачуну статичких карактеристика и динамичког одзива инјекционо-синхронизованих ласера примењене су мултимодне брзинске једначине које узимају у обзир допринос инјекционог сигнала водећег ласера. Ове једначине представљају систем обичних диференцијалних једначина по концентрацији фотона несинхронизованих лонгитудиналних модова и инјекционо-синхронизованог мода, једначине по фази инјекционо-синхронизованог мода и једначине по концентрацији носилаца (парова електрон-шупљина). Основне улазне величине за ове брзинске једначине су прорачунате зависности спектра оптичког појачања и радијативне рекомбинације у функцији од концентрације носилаца у активној области ласера. Адекватност примене ових једначина огледа се у чињеници да се пратећи ласер може третирати као направа са концентрисаним параметрима, под условом да се утицај инјектованог сигнала узме применом адекватног коефицијента инјекционог спрезања, што је у дисертацији урађено. У супротном, уместо ових брзинских једначина неопходно је користити брзинске једначине на бази пропагирајућег таласа.
- Анализа стабилности и одговарајућа мапа у простору фреквенцијске раздешености и инјекционе снаге добијена је индиректним методом Љапунова. Ова метода захтева испитивање својствених вредности система линеаризованих брзинских једначина у околини мирне радне тачке ласера за дату вредност инјектоване снаге и фреквенцијске раздешености.
- Прорачун минималног времена комутације водећег ласера спроведен је оригиналним аналитичким поступком који се базира на формули изведеној интеграцијом брзинске једначине по концентрацији носилаца. Том приликом се допринос инјекционо-синхронизованог мода узима директно у обзир, док се утицај несинхронизованих модова мења концентрацијом носилаца на прагу појачања.
- Експеримент је спроведен у циљу мерења спектралне карактеристике мултимодног Фабри-Перо ласера који је изложен променљивом интензитету инјектоване светлости, чиме је успешно снимљена хистерезисна петља. Експериментална поставка садржи подешавајући ласер који представља водећи ласер инјекционе синхронизације, ербијумски допиран оптички појачавач и оптички атенуатор којим се врши контрола интензитета инјектованог сигнала. Поред тога, користи се подешавајући оптички филтер којим се врши прецизна контрола фреквенцијске раздешеност инјектованог сигнала. Циркулатором се сигнал инјектује у пратећи Фабри-Перо ласер, чији се

оптички излаз преко циркулатора преноси на оптички спектрални анализатор којим се утврђује и снима интензитет спектра пратећег ласера.

Поред набројаних метода, коришћене су и одређене нумеричке методе на бази којих су имплементирани теоријски модели:

- Статичке карактеристике пратећег ласера, пре свега сет стационарних стања одређених концентрацијом носилаца, добијен је решавањем одговарајућих трансцедентних једначина, за шта је било потребно развити посебан нумерички алгоритам, којим би се обезбедила аутоматизација процеса тражења решења.
- Динамички одзив пратећег ласера добијен је решавањем мултимодног система брзинских једначина у временском домену применом Рунге-Кута метода 4. реда за обичне диференцијалне једначине.
- За потребе испитивања стабилности система коришћен је алгоритам за тражење својствених вредности матрица димензија већих од сто.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Као што је већ поменуто у секцији 3.1., ефекти бистабилности активних компонената могу наћи примену у реализацији све-оптичких флип флопова, као основних градивних блокова будућих оптичких меморија. У том смислу јасно је да се резултати ове дисертације у највећој мери могу користити приликом пројектовања и развоја све-оптичких флип флопова. Оно што је далеко битније је да су резултати истраживања већ примењени приликом израде прототипа фотонског интегрисаног кола под називом „Све-оптички регистар“ чију фабрикацију је подржала, финансирала и реализовала „Удружена европска платформа за InP фотонске интегрисане компоненте и кола“, скраћено JePPIX. Реч је о секвенцијалном оптичком логичком колу, које реализује функцију померачког регистра применом инјекционе синхронизације мултимодних микроринг ласера, који представљају меморијске елементе предложеног уређаја. У основи коло меморише и серијски прослеђује оптичке битове реализоване путем две таласне дужине. У овом тренутку уређај се налази на евалуацији у лабораторијама Универзитета у Калифорнији у Санта Барбари. Поред ове примене, истраживања представљена у дисертацији могу бити од интереса у реализацији све-оптичких флип-флопова за сигнале кодиране путем напредних модулационих формата или у реализацији регенератора оптичких сигнала.

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

Кроз реализацију дисертације кандидат је у потпуности демонстрирао све релевантне способности за самосталан научно-истраживачки рад. На првом месту, кандидат је врло зрело предвидео и препознао актуелност, атрактивност и значај изабране теме. Литература коју је приложио је актуелна и релевантна за тему, што говори о њеном систематичном и пажљивом избору. Циљеви дисертације, математично-физички модел, као и избор и презентација метода за спровођење истраживања и реализацију постављених задатака су јасно дефинисани, образложени и приказани у дисертацији. Поред тога, кандидат је успешно развио неколико оригиналних нумеричких метода за нумеричку имплементацију формулисаног модела, као и ефикасан, робустан и поуздан алгоритам и програмски код, који је омогућио конзистентне и уверљиве резултате нумеричких симулација и прорачуна. Анализа и дискусија резултата су садржајно, јасно, подробно, недвосмислено и зрело приказани и написани, што се такође може видети и у објављеним радовима кандидата. Такође, закључци дисертације показују висок ниво спремности кандидата да препозна квалитете, предности и недостатке, као и ограничења постављеног модела и да јасно и уверљиво представи најважније доприносе свог истраживања, уз конкретно и уопштено сагледавање консеквенци резултата проистеклих из тезе, што недвосмислено потврђује да је



кандидат спреман и способан да сам или у тиму убудуће компетентно обавља научно-истраживачки рад.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни доприноси који су остварени у тези су следећи:

- Показано је да се ефекат бистабилности у инјекционо-синхронизованим мултимодним ласерима при инјекцији у бочне модове може реализовати негативном фреквенцијском раздешеношћу, при чему је једно бистабилно стање последица инјекционе синхронизације, док је друго стање резултат деловања несинхронизованих лонгитудиналних модова. Теоријски се ефекат бистабилности може доказати само онда када се у прорачун стационарних стања осим инјекционо-синхронизованог мода у обзир узму несинхронизовани лонгитудинални модови, посебно они који су доминантни.
- Истраживање области синхронизације и стабилности показало је да се деценијски коришћена мапа ових области, изведена за случај само инјекционо-синхронизованог мода, драстично мења у случају када су у разматрање укључени сви лонгитудинални модови. Показује се да је ова мапа уствари мултиформна у области негативне фреквенцијске раздешености, што за последицу има појаву бистабилности и вишеструких стационарних стања, док са друге стране води ка појави нестабилности како у области позитивне, тако и у области негативне фреквенцијске раздешености, што до сада није био познато. Нова мапа представља значајно унапређење научних сазнања у овој области, јер истовремено обухвата већ постојеће чињенице о областима нестабилности и нуди објашњења за феномене бистабилности и нових региона нестабилности. Поред тога показано је да број несинхронизованих модова узетих у обзир директно утиче на величину области нестабилности и прецизност и квалитет мапе.
- Кроз оригиналан и детаљан прорачун стационарних хистерезисних петљи по густини фотона и по фази инјекционо-синхронизованог мода пратећег ласера у функцији од инјекционе снаге и фреквенцијске раздешености обезбеђен је увид у зависност њиховог профила од улазних величина. Овај увид продубљен је кроз дискусију зависности висине и ширине хистерезисних петљи од наведених улазних величина, чиме је комплетирана статичка карактеризација бистабилности у Фабри-Перо ласерима.
- Изведен је оригиналан и релативно једноставан аналитички израз који пружа могућност ефикасног прорачуна минималног времена комутације водећег ласера, које је потребно да се постигне комутација пратећег ласера варијацијом инјекционе оптичке снаге. Поређење са нумеричким приступом показало је да аналитички метод даје релативно добре резултате у процени времена комутације и поред тога што се ослања на стационарне трајекторије при комутацији стања.
- Применом изведеног аналитичког израза показано је да повећање Хенријевог фактора и смањење фреквенцијске раздешености у апсолутном смислу доводи до скраћења потребног времена комутације водећег ласера и смањења енергије комутације, док повећање запремине активне области ласера доводи до смањења енергије, али и пораста времена комутације.
- Значајно унапређење научног сазнања остварено је кроз разматрање комутације пратећег ласера применом варијације фреквенцијске раздешености. Допринос овог дела истраживања је важан јер је потврдио да се напредни модулативни формати који се базирају на варијацији фазе или учестаности сигнала могу користити у комутацији

пратећег ласера, што отвара још једно ново поље истраживања све-оптичких флип флопова.

- На примеру комутације пратећег ласера варијацијом фреквенцијске раздешености демонстриране су методе којима се време комутације пратећег ласера може смањити и уједначити у оба смера комутације. Методе обухватају: (1) пажљив избор бистабилних стања на хистерезисној петљи, (2) контролу губитака (времена живота фотона) у околини инјекционо-синхронизованих бочних модова, што се постиже дизајном екстерне резонаторске шупљине ласера и коначно, (3) оптимизацију дужине трајања инјекционог сигнала водећег ласера.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем циљева истраживања, постављених хипотеза и остварених резултата, Комисија са задовољством може да констатује да је кандидат успешно одговорио на сва битна питања и дилеме које суштински произилазе из проблематике којом се дисертација бави.

Наведени научни доприноси тезе представљају значајне кораке у погледу разумевања функционисања, карактеризације и конкретне примене дисперзионе бистабилности која настаје при инјекционој синхронизацији бочних модова мултимодних полупроводничких ласера. Кључна открића до којих се дошло у овој дисертацији, а која дефинишу напредак у односу на већ постојећа сазнања, су следећа:

- Прорачуната је и реализована нова, свеобухватна односно генералисана мапа области синхронизације и стабилности, која показује да се већ постојећим областима нестабилности морају придружити и друге области које се јављају у области мултиформности.
- Стабилни део мултиформне области мапе дефинише област бистабилности који је до сада био непознат и недефинисан.
- Откривен је значај несинхронизованих лонгитудиналних модова који су до сада у литератури углавном били игнорисани, а за које се, на основу спроведених истраживања испоставило да одређују једно од стања у режиму бистабилности, док са друге стране својим утицајем дефинишу и профил области нестабилности. Наиме, прорачунати профил нестабилне области зависи од тога колики је број несинхронизованих модова узет у обзир, тако да се област нестабилности сужава и приближава реалној ситуацији како се број модова приближава укупном броју подржаних лонгитудиналних модова.
- По први пут су анализирана времена потребна за комутацију између бистабилних стања и том приликом се дошло до модела комутације који омогућава аналитички прорачун времена комутације, што са аспекта ефикасности анализе оваквих проблема представља значајан напредак.
- Коначно, теоријски је доказана могућност реализације све-оптичког флип-флопа, који се базира на варијацији фреквенцијске раздешености, чиме је отворен нови правац развоја оптичких меморијских елемената који би своју функцију могли да реализују у оквиру напредних модулационих формата, односно користећи као улазне величине фазу и учестаност светлосних сигнала, а не њихов интензитет.

Полазећи од свега наведеног, може се закључити да резултати које је постигао кандидат дају чврст оквир и основу за препознавање овог рада као квалитетне докторске дисертације.

### 4.3. Верификација научних dopриноса

Научни dopриноси дисертације верификовани су следећим радовима:

#### Категорија M21:

- [1] **Krstić, M.**, Crnjanski J., Totović A., Gvozdić D.: Switching of Bistable Injection-Locked Fabry-Perot Laser by Frequency Detuning Variation, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 1801509, 2015 (**IF2014 = 2.828**)(ISSN 1077-260X) doi: 10.1109/JSTQE.2015.2451103
- [2] **Krstić, M.**, Crnjanski, J., Gvozdić, D., Switching time and energy in bistable injection-locked semiconductor multi-quantum-well Fabry-Perot lasers, *Physical Review A*, vol. 88, no. 6, pp. 063826, 2013 (**IF2013 = 2.991**) (ISSN 1050-2947) doi: 10.1103/PhysRevA.88.063826
- [3] **Krstić, M.**, Crnjanski, J., Mašanovic, M., Johansson, L., Coldren, L., Gvozdić, D.: Multi-Valued Stability Map of Injection-Locked Semiconductor Laser, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1501408, 2013 (**IF2013 = 3.465**) (ISSN 1077-260X) doi: 10.1109/JSTQE.2013.2241026
- [4] **Krstić, M.**, Crnjanski, J., Gvozdić, D.: Injection Power and Detuning-Dependent Bistability in Fabry-Perot Laser Diodes, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 826-833, 2012 (**IF2012 = 4.078**) (ISSN 1077-260X) doi: 10.1109/JSTQE.2011.2135335
- [5] Gvozdić D., **Krstić M.**, Crnjanski, J.: Switching time in optically bistable injection-locking semiconductor lasers, *Optics Letters*, vol. 36, pp. 4200-4202, 2011 (**IF2011 = 3.399**) (ISSN 0146-9592) doi: 10.1364/OL.36.004200

#### Категорија M22:

- [6] **Krstić M.**, Crnjanski J., Totović A., Gvozdić D., Comparison of switching times in optically bistable injection-locked semiconductor lasers, *Physica Scripta*, vol. T162, pp. 014036, 2014 (**IF2014 = 1.126**)(ISSN 0031-8949) doi.:10.88/0031-8949/2014/T162/014036
- [7] Zlitni A.G.R, **Krstić, M.**, Gvozdić, D.: Modulation response and bandwidth of injection-locked Fabry-Perot laser diodes, *Physica Scripta*, vol. T149, pp. 014033, 2012 (**IF2012 = 1.032**)(ISSN 0031-8949) doi:10.1088/0031-8949/2012/T149/014033

#### Категорија M23:

- [8] **Krstić M.**, Gvozdić D.: Side-Mode-Suppression-Ratio of Injection-Locked Fabry-Perot Lasers, *Acta Physica Polonica - Series A*, vol. 116, pp. 664-667, 2009 (**IF2009 = 0.433**) (ISSN 0587-4246).

#### Категорија М33:

[9] **Krstić, M.**, Mašanović, M., Crnjanski, J., Johansson L., Coldren, L., Gvozdić, D.: Detailed stability map and bistability investigation for injection-locked Fabry-Perot semiconductor lasers, *23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, pp. 126-127, San Diego, CA 2012 (ISBN: 0899-9406/978-1-4577-0828-2) doi: 10.1109/ISLC.2012.6348361

#### Категорија М34:

[10] **Krstić, M.**, Crnjanski, J., Totović, A., Gvozdić, D.: Comparison of switching times in optically bistable injection-locked semiconductor lasers, *IV International School and Conference on Photonics*, pp. 78, 26-30 August 2013, Belgrade, Serbia (ISBN: 978-86-82441-36-6)

[11] Zlitni A.G.R., **Krstić, M.**, Gvozdić, D.: Modulation response and bandwidth of injection-locked Fabry-Perot laser diodes, *Photonica 2011*, P.OE.21, pp. 133, Beograd, Srbija, 29. Avgust – 2. Septembar, 2011.

#### Категорија М53:

[12] Pajković R., **Krstić M.**, Crnjanski J., Totović A., Gvozdić D.: Phase space of tristability in dual injection-locked Fabry-Perot laser diodes, *Telfor Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 43-48, 2015 (ISSN 1821-3251) doi.: 1109/TELFOR.2014.7034485

#### Категорија М63:

[13] Pajković R., **Krstić M.**, Crnjanski J., Totović A., Gvozdić D.: Phase space of tristability in dual injection-locked Fabry-Perot laser diodes, *Proceedings of the 22<sup>th</sup> Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 617-621, 2014 (ISBN: 978-1-4799-6192-4), doi.: 10.1109/TELFOR.2014.7034485

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу предложеног, комисија констатује да докторска дисертација **Марка М. Крстића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом “**Statical and dynamical characteristics of injection-locked Fabry-Pérot laser diodes**” („Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода”), испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.


Докторска дисертација Марка М. Крстића садржи научне доприносе који се састоје у развоју метода, аналитичких и нумеричких модела за моделовање инјекционо-

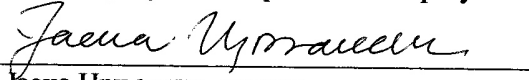
синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода, за ефикасан прорачун домена и стабилности синхронизације, статичких као и динамичких, односно комутационих карактеристика у домену бистабилности. Главни резултати истраживања приказани су у радовима у међународним часописима са SCI листе, односно у референцама [1-5] (пет радова из категорије M21, од којих је кандидат првопотписани на четири рада). Додатна истраживања на основу развијених модела, приказана су у референцама [6-8] (два рада из категорије M22, од којих је кандидат првопотписани на једном раду и један рад из категорије M23 на коме је кандидат првопотписани). Током израде докторске дисертације кандидат је показао несумњиву способност за самосталан научно-истраживачки рад.

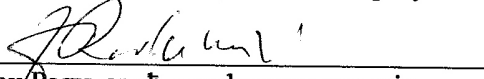
Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом **“Statical and dynamical characteristics of injection-locked Fabry-Pérot laser diodes”** („Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода”) кандидата **Марка М. Крстића**, мастер инжењера електротехнике и рачунарства прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.


Београд, 27.12.2015. године

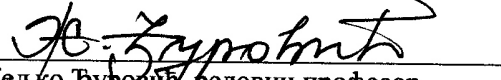
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

  
др Јасна Црњански, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Јован Радуновић, професор у пензији  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Јупчо Хаџиевски, научни саветник  
Универзитет у Београду – Институт Винча

  
др Жељко Буровић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет