

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата дипл. инж. – мастера **Марка Крстића** за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа бр. 771 од 27.03.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Марка Крстића** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода“**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Марко М. Крстић је рођен у Нишу, 29.12.1984. године где је завршио основну школу и гимназију. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2003. године. Дипломирао је октобра 2007. године, на смеру за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, са средњом оценом током студија 8,82 и темом дипломског рада „Моделовање пропагације сигнала у оптичком влакну применом сплит-степ методе“. Мастер академске студије уписао је у новембру 2007. године, а завршио марта 2009. године, са средњом оценом 9,83 и темом мастер рада „Анализа и моделовање полупроводничког ласера са инјекционо спрегнутим модовима“. Децембра 2009. године уписао је докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, током којих је положио све испите предвиђене наставним планом и програмом, са средњом оценом 10,00.

Запослење и стручне активности

Фебруара 2009. године кандидат је изабран за сарадника у настави при Катедри за Микроелектронику и техничку физику, на Електротехничком факултету у Београду, а у звање асистента унапређен је априла 2010. године. Током свог досадашњег рада на Електротехничком факултету у Београду, интензивно и успешно је учествовао у настави на Катедри за микроелектронику и техничку физику. Остварио је веома успешну сарадњу са члановима Катедре, показао изражену способност за наставно-педагошки рад, посебно савесност и одговорност у раду и остварио успешан контакт са студентима. Учествовао је у извођењу наставе, аудиторних и лабораторијских вежби у оквиру већег броја предмета из области физичке електронике. На свим досадашњим студентским анкетама, кандидат је

оцењен оценама у распону од 4 до 5. Учествовао је у 12 комисија за одбрану завршног рада. Поред извођења наставе, кандидат је активно ангажован на одржавању сајта Катедре. Такође, од школске године 2008/2009 ангажован је око тестирања и избора екипе за такмичење из физике на Електријади. Тренутно обавља функцију секретара Катедре. Један је од чланова и оснивача Оптичког друштва Србије.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске студије

Кандидат је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских студија на Електротехничком факултету у Београду са просечном оценом 10:

1. Оптичелектронске мерне методе (9 ЕСПБ)
2. Фотонске комуникације (9 ЕСПБ)
3. Моделовање полупроводничких ласера (оцена 9 ЕСПБ)
4. Оптичке особине полупроводничких хетероструктура (9 ЕСПБ)
5. Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара (9 ЕСПБ)
6. Научни рад, замена за испит Нумеричка анализа (9 ЕСПБ)
7. Енглески језик (6 ЕСПБ)
8. Пројектовање интегрисаних кола (9 ЕСПБ)
9. Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници (9 ЕСПБ)
10. Моделовање наноструктура (9 ЕСПБ)

Наставно ангажовање

Током свог досадашњег рада на Електротехничком факултету, кандидат је учествовао у извођењу наставе, аудиторних и лабораторијских вежби у оквиру већег броја предмета:

1. Физика 1 (аудиторне вежбе, од школске године 2009/2010 до текуће 2013/2014)
2. Лабораторијске вежбе из физике 1 (лабораторијске вежбе, од школске године 2009/2010 до текуће 2013/2014)
3. Практикум из физике 2 (лабораторијске вежбе, од школске године 2008/2009 до текуће 2013/2014)
4. Простирање оптичких таласа (аудиторне вежбе, од школске године 2008/2009 до школске 2010/2011)
5. Елементи електронских уређаја (аудиторне и лабораторијске вежбе од школске године 2008/2009 до текуће 2013/2014)
6. Оптичке телекомуникације (лабораторијске вежбе, од школске 2010/2011 до текуће 2013/2014)
7. Оптичке телекомуникације 2 (аудиторне вежбе од школске 2011/2012 до текуће 2013/2014)

Учествовао је у 12 комисија за одбрану завршног рада. Од школске године 2008/2009 ангажован је око тестирања и избора екипе за такмичење из физике на Електријади.

Научна каријера

Током своје досадашње научне каријере, Марко Крстић је био аутор или коаутор 8 радова у часописима од међународног значаја (са *impract* фактором), 3 рада на међународним конференцијама и 3 рада на домаћим конференцијама:

Радови објављени у врхунским међународним часописима (категорија M21):

1. **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 (**IF=3.042**) (ISSN 1050-2947) doi: 10.1103/PhysRevA.88.063826
2. Totović, A.R., Crnjanski, J.V., **Krstić, M.M.**, Mašanović, M.L., Gvozdić, D.M.: A Self-Consistent Numerical Method for Calculation of Steady-State Characteristics of Traveling-Wave and Reflective SOAs, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 3000411, 2013 (**IF=4.078**) (ISSN 1077-260X) doi: 10.1109/JSTQE.2013.2263118
3. **Krstić, M.M.**, Crnjanski, J.V., Mašanović, M.L., Johansson, L., Coldren, L.A., Gvozdić, D.M.: Multi-Valued Stability Map of Injection-Locked Semiconductor Laser, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1501408, 2013 (**IF=4.078**) (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 (**IF=3.780**) (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 (**IF=3.399**) (ISSN 0146-9592) doi: 10.1364/OL.36.004200

Радови објављени у истакнутим међународним часописима (категорија M22):

6. Totović, A., Crnjanski, J., **Krstić, M.**, Gvozdić, D.: Modelling of carrier dynamics in multi-quantum well semiconductor optical amplifiers, *Physica Scripta*, vol. T149, pp. 014032, 2012 (**IF=1.204**) (ISSN 0031-8949). doi:10.1088/0031-8949/2012/T149/014032
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 (**IF=1.204**) (ISSN 0031-8949). doi:10.1088/0031-8949/2012/T149/014033

Радови објављени у међународним часописима (категорија M23):

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

Радови саопштени на међународним скуповима (категорија M33):

9. **Krstić, M.M.**, Mašanović, M., Crnjanski, J. V., Johansson L., Coldren, L., Gvozdić, D. M.: 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

Радови саопштени на међународним скуповима штампани у изводу (категорија M34):

10. **Krstić, M.M.**, Crnjanski, J. V., Totović, A. R., Gvozdić, D. M.: 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. Totović, A.R., Crnjanski, J. V., **Krstić, M.M.**, Gvozdić, D. M.: Analytical Solution for Stationary Distribution of Photon Density in Traveling-Wave and Reflective Semiconductor Optical Amplifiers, *IV International School and Conference on Photonics*, pp. 116, 26-30 August 2013, Belgrade, Serbia (ISBN: 978-86-82441-36-6)

Радови саопштени на скуповима националног значаја (категорија М63):

12. Totović, A., Crnjanski, J. V., **Krstić, M. M.**, Gvozdić, D. M.: Application of multi-quantum well RSOA in remodulation of 100 Gb/s downstream RZ signal for 10 Gb/s upstream transmission, *Proceedings of the 19th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 840-843, 2011 (ISBN: 978-1-4577-1499-3), doi: 10.1109/TELFOR.2011.6143675

Радови саопштени на скуповима националног значаја штампани у изводу (категорија М64):

13. Totović, A., Crnjanski, J., **Krstić, M.**, Gvozdić, D.: Modelling of carrier dynamics in multi-quantum well semiconductor optical amplifiers, *Photonica 2011*, P.OE.9, pp. 130, Beograd, Srbija, 29. Avgust – 2. Septembar, 2011.
14. 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.

Доприноси објављени у радовима [1], [3]-[5], [7]-[10] представљају део основних резултата истраживања који ће бити изложени у докторској дисертацији кандидата. Ти доприноси ће бити допуњени резултатима који до сада нису објављени.

Марко Крстић је учествовао у реализацији 2 пројекта које финансира надлежно министарство и 2 међународна пројекта:

1. „Фотонске компоненте и системи“, пројекат Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије (2011-2014).
2. „Фотонске комуникације“, пројекат Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије (2008-2010).
3. “Techniques of Modulation and Remodulation for PON (TOMAR-PON)”, пројекат португалског Министарства за науку (2010-2013).
4. “New Approach to Temperature Processes Control Based on Soft Computing Methods (Neuro-temp)”, Eureka Project, 01.04.2009.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Марко Крстић се својим досадашњим радом показао успешним како у наставном, тако и у научно-истраживачком раду. Кандидат је успешно положио све испите предвиђене планом и програмом докторских студија на Електротехничком факултету у Београду и пред Комисијом, на јавној усменој одбрани, успешно положио докторски испит одржан 15.04.2014.

На основу досадашњег рада, публикованих научних резултата и успешно завршених обавеза према плану и програму докторских студија, Комисија је дошла до закључка да је

кандидат, Марко Крстић, квалификован за израду докторске дисертације на предложену тему.

2. Предмет и циљ истраживања

Техника инјекционе синхронизације омогућава контролу радне фреквенције посматраног осцилаторног система путем синхронизације, односно путем спрезања са неким другим, водећим осцилаторним системом. Радне фреквенције водећег и посматраног, односно пратећег осцилаторног система, разликују се за износ који се означава као фреквенцијска раздешеност. У зависности од вредности фреквенцијске раздешености до синхронизације може, или не мора доћи. Осим фреквенцијске раздешености, други битан параметар представља јачина спрезања два осцилаторна система, која се дефинише у складу са типом осцилаторног система.

Инјекциона синхронизација је први пут примећена код механичких система, а присутна је и у системима из домена електронике, микроталасне технике, али и у системима из домена других, мање сродних научних дисциплина као што су биологија, медицина, психологија и социологија. Из визуре савремене електротехнике и информационо-комуникационих технологија посебно је интересантна инјекциона синхронизација ласерских диода, због примена у оптичким телекомуникационим системима, као и системима за оптичку обраду сигнала. У овим применама светлост једног, водећег ласера, инјектује се у оптички резонатор другог, пратећег ласера, при чему се фреквенцијска раздешеност ова два ласера дефинише као разлика фреквенција пратећег и водећег ласера, док јачину спрезања одређује инјектована оптичка снага из водећег ласера.

У пасивним оптичким мрежама нове генерације, које користе технику мултиплексирања по таласним дужинама, инјекционо синхронизоване ласерске диоде препознате су као потенцијално ефикасније и економски исплативије решење за реализацију оптичких предајника у оптичким мрежним уређајима, које може да замени далеко комплексније и скупље подесиве ласере [1-3]. Осим тога, инјекциона синхронизација ласерских диода може да обезбеди мономодни режим рада мултимодних предајника [4], смањи Хенријев фактор [5], елиминише фазни цитер који настаје као резултат поскакивања модова и дисперзије оптичког влакна [6], побољша фреквенцију релаксационих осцилација и тиме обезбеди више граничне фреквенције директне модулације пратећег ласера [7-9]. Са друге стране, у одређеним радним условима, инјекционо синхронизоване ласерске диоде испољавају феномен оптичке бистабилности, који се огледа у формирању хистерезисне петље излазне оптичке снаге и фазе пратећег ласера у функцији улазне снаге и фреквенцијске раздешености инјектованог светлосног сигнала водећег ласера. Феномен оптичке бистабилности омогућава реализацију оптичких флип-флоп уређаја [10-12], посебно битних за рад све атрактивнијих система за оптичку обраду сигнала, све-оптичких регистара и меморија [13]. Посебан значај придаје се анализи услова при којем долази до стабилног спрезања пратећег и водећег ласера, односно мапи стабилности у функцији параметара инјекције, тј. фреквенцијске раздешености и инјекционе снаге [14-16]. Коначно, кроз могућност контролисања фазе и фреквенције оптичког сигнала пратеће ласерске диоде, техника инјекционе синхронизације налази примену и у реализацији и регенерацији напредних модулационих формата [17], [18] као и у конверзији таласних дужина [19].

Предмет рада предложене дисертације је формирање, нумеричка имплементација и примена комплетног и детаљног модела брзинских једначина инјекционо синхронизованог мултимодног полупроводничког ласера, који омогућава утврђивање параметара стабилног режима синхронизације, услова и параметара настанка оптичке дисперзионе бистабилности и нестабилности, као и механизме и карактеристике комутације између стабилних стања бистабилног радног режима посматраног ласера.

За описивање динамике инјекционо синхронизованих полупроводничких ласера у литератури су присутни модели који посматрају само онај лонгитудинални мод у који се инјектује светлосни сигнал из водећег ласера [1-3, 7, 8, 14, 16], евентуално уз додатно урачунавање централног лонгитудиналног мода [15]. Међутим, моделовање динамике рада инјекционо синхронизованих мултимодних ласера требало би да обухвати и урачуна и допринос свих осталих лонгитудиналних модова подржаних од стране оптичког резонатора пратећег ласера, будући да интегрални утицај великог броја бочних модова може имати значајан утицај на стабилност рада, као и на појаву бистабилности.

На основу комплетног модела мултимодних брзинских једначина са инјекционом синхронизацијом, биће испитан утицај снаге инјекционе синхронизације и фреквенцијске раздешености између пратећег и водећег ласера на стабилност рада пратећег ласера, што ће омогућити формирање детаљне и прецизне мапе стабилности пратећег ласера. За делове мапе односно дијапазон параметара за које постоје два стабилна стања, биће испитане могућности и механизми комутације између бистабилних стања који, примера ради, укључују варијацију инјекционе снаге, фреквенцијске раздешености и струје поларизације. У зависности од постигнутих резултата и релевантних механизма, истраживање ће се проширити у смислу развијања модела и методе за прорачун времена и енергије комутације између бистабилних стања. На основу оваквог модела били би створени услови за испитивање зависности карактеристика комутације (времена и енергије комутације) у функцији од различитих параметара инјекције и режима рада пратећег ласера. Анализа бистабилности и карактеристика комутације би требало да посебно обухвати Хенријев фактор за који се очекује да у великој мери одређује мапу стабилности пратећег ласера и његова комутациона својства, као и испитивање утицаја неких структурних параметара пратећег ласера, попут запремине активне области.

Циљ ове дисертације је да формира детаљну теоријску слику о дисперзивној бистабилности инјекционо синхронизованих полупроводничких Фабри-Перо ласерских диода и да препозна параметре и начине на које инјекција одређује мапу стабилности, бистабилност, процесе и карактеристике комутације између бистабилних стања.

- [1] N. Kashima, S. Yamaguchi, S. Ishii: Optical Transmitter Using Single-Mode Injection Locking for High-Speed Photonic LANs, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, pp. 550, 2004. (ISSN 0733-8724)
- [2] N. Kashima, M. Watanabe: Transient Properties of Side-Mode Injection Locking in an FPLD, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 1523, 2006. (ISSN 0733-8724)
- [3] N. Kashima: Dynamic Properties of FP-LD Transmitters Using Side-Mode Injection Locking for LANs and WDM-PONs, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, 3045, 2006. (ISSN 0733-8724)
- [4] K. Iwashita, K. Nakagawa: Suppression of Mode Partition Noise by Laser Diode Light Injection, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, pp. 1669, 1982. (ISSN 0018-9197)
- [5] Y. Okajima, S. Hwang, J. Liu: Experimental Observation of Chirp Reduction in Bandwidth-Enhanced Semiconductor Lasers Subject to Strong Optical Injection, *Optics Communications*, vol. 219, pp. 357, 2003. (ISSN 0030-4018)
- [6] C. Chang, L. Chrostowski, C. Hasnain, W. Chow: Study of Long-Wavelength VCSEL-VCSEL Injection Locking for 2.5 Gb/s Transmission, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 1635, 2002. (ISSN 1041-1135)
- [7] E. Lau, H. Sung, M. Wu: Frequency Response Enhancement of Optical Injection-Locked Lasers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 44, pp. 90, 2008. (ISSN 0018-9197)

- [8] E. Lau, L. Wong, M. Wu: Enhanced Modulation Characteristics of Optical Injection-Locked Lasers: A Tutorial, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, pp. 618, 2009. (ISSN 1077-260X)
- [9] X. Jin, S. Chuang: Bandwidth Enhancement of Fabry-Perot Quantum-Well Lasers by Injection-Locking, *Solid-State Electronics*, vol. 50, pp. 1141, 2006. (ISSN 0038-1101)
- [10] Y. Jeong, J. Cho, Y. Won, H. Lee, H. Yoo: All-Optical Flip-Flop Based on the Bistability of Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diode, *Optics Express*, vol. 14, pp. 4058, 2006. (ISSN 1094-4087)
- [11] N. Hoang, J. Cho, Y. Won, Y. Jeong: All-Optical Flip-Flop With High On-Off Contrast Ratio Using Two Injection-Locked Single-Mode Fabry-Perot Laser Diodes, *Optics Express*, vol. 15, pp. 5166, 2007. (ISSN 1094-4087)
- [12] K. Hybrechts, W. D'Oosterlinck, G. Morthier, R. Baets: Proposal for an All-Optical Flip-Flop Using Single Distributed Feedback Laser Diode, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, pp. 18, 2008. (ISSN 1041-1135)
- [13] S. Osborne, K. Buckley, A. Amann, S. O'Brien: All Optical Memory Based on the Injection Locking Bistability of a Two-Color Laser Diode, *Optics Express*, vol. 17, pp. 6293, 2009. (ISSN 1094-4087)
- [14] A. Murakami: Phase Locking and Chaos Synchronization in Injection-Locked Semiconductor Lasers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 39, pp. 438, 2003. (ISSN 0018-9197)
- [15] T. Simpson: Mapping the Nonlinear Dynamics of a Distributed Feedback Semiconductor Laser Subject to External Optical Injection, *Optics Communications*, vol. 215, pp. 135, 2003. (ISSN 0030-4018)
- [16] V. Kovanis, T. Erneux, A. Gavrielides: Largely Detuned Injection-Locked Semiconductor Lasers, *Optics Communications*, vol. 159, pp. 177, 1999. (ISSN 0030-4018)
- [17] K. Hybrechts, T. Tanemura, K. Takeda, Y. Nakano, R. Baets, G. Morthier: All-Optical 2R Regeneration Using the Hysteresis in a Distributed Feedback Laser Diode, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, pp. 1434, 2010. (ISSN 1077-260X)
- [18] A. Kuramoto, S. Yamashita: All-Optical Regeneration Using Side-Mode Injection-Locked Semiconductor Laser, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 9, pp. 1283, 2003. (ISSN 1077-260X)
- [19] C. Chow, C. Wong, H. Tsang: All-Optical Data-Format and Wavelength-Conversion in Two-Wavelength Injection-Locked Slave Fabry-Perot Laser Diodes, *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 997, 2003. (ISSN 0013-5194)

3. Полазне хипотезе

Резултати који су доступни у релевантним референцама указују на то да су досадашња истраживања углавном фокусирана на разматрање мапе стабилности инјекционо синхронизованих ласера на бази модела брзинских једначина који у обзир узима мод у који се врши инјекција, и евентуално централни лонгитудинални мод. Основна хипотеза ове дисертације је да детаљан модел инјекционо синхронизованих Фабри-Перо полупроводничких ласера, који обухвата и разматра допринос несинхронизованих модова, може значајно да утиче на мапу стабилности пратећег ласера. Ова хипотеза заснива се на чињеници да преостали несинхронизовани модови својим великим бројем и поред малог интензитета могу значајно утицати на динамику рада пратећег ласера.

Друга хипотеза која ће бити размотрена у раду односи се на утицај снаге инјекционе светлости и фреквенцијске раздешености између водећег и пратећег ласера на број стационарних стања пратећег ласера и стабилност ових стања. У досадашњој литератури,

услед занемаривања утицаја несинхронизованих модова, било је могуће детектовати два стационарна стања, од којих је само једно било стабилно, а друго потпуно нестабилно. Због тога није било могуће објаснити ефекат бистабилности услед инјекционе синхронизације који се може јавити само онда када су барем два стационарна стања стабилна. У овој дисертацији полази се од хипотезе да за одређене опсеге вредности инјектоване снаге и фреквенцијске раздешености, за фиксну вредност струје поларизације пратећег ласера и инјекцију у бочне модове мултимодног ласера, постоје два стабилна стационарна стања, од којих друго стање настаје као последица интеракције синхронизованих и несинхронизованих модова, пре свега оних доминантних модова у слободном режиму рада. Претпоставка је да би ова два стања резултовала појавом хистерезисних петљи у функцији од инјектоване оптичке снаге.

Трећа хипотеза која је заступљена у овом раду односи се на утицај структурних параметара пратећег ласера, првенствено Хенријевог фактора и структуре активне области на бази вишеструких квантних јама која директно одређује фактор конфинирања и запремину активне области, на појаву и карактеристике хистерезисних петљи. Будући да је Хенријев фактор директно одговоран за појаву дисперзионе бистабилности, а да фактор конфинирања и запремина активне области одређују концентрацију наелектрисања на прагу појачања и последично струју прага пратећег ласера, очекује се значајан утицај ових параметара на динамику рада пратећег ласера, а самим тим и на мапу стабилности и појаву ефекта бистабилности.

Четврта хипотеза ове дисертације односи се на везу између карактеристика хистерезисних петљи и времена и енергије комутације између стабилних стања. Наиме, за оне параметре инјекције за које постоје два стабилна стања, могуће је применом различитих механизма комутације (краткотрајном варијацијом инјектоване снаге, фреквенцијске раздешености или струје поларизације) мењати радни режим пратећег ласера. Претпоставка од које се полази је да ће карактеристике хистерезисних петљи утицати на дужину временског интервала у току ког је потребно да буде присутна варијација побуде да би се остварила комутација између стабилних стања пратећег ласера.

Пета хипотеза разматра могућност формирања поједностављеног аналитичког модела који може обезбедити елегантнији и ефикаснији увид у карактеристике комутације између бистабилних стања него егзактан нумерички приступ. Претпоставка од које се полази је да је време реакције фотонског гаса много брже од реакције система електронско-шупљинске плазме, због чега се може сматрати да време комутације одређује комутација електронско-шупљинског дела система.

4. Научне методе истраживања

Инјекционо синхронизовани ласери моделују се системом брзинских једначина са концентрисаним параметрима које садрже додатне чланове који узимају у обзир спрезање екстерне, инјектоване светлости из водећег ласера. Комплетан модел ових једначина подразумева систем спрегнутих, нелинеарних диференцијалних једначина по времену, који се састоји од једне једначине која дефинише динамику концентрације носилаца (електрона и шупљина), као и од једначина по концентрацији фотона и њихових фаза и то за сваки од подржаних модова пратећег ласера, укључујући и инјектовани мод. У зависности од ширине спектра појачања активног материјала у пратећем ласеру број подржаних модова може ићи и до више стотина модова, што додатно повећава димензије система. Димензија посматраног система једначина се може смањити занемаривањем утицаја инјекције на фазе неинјектованих, тј. несинхронизованих модова.

У овој тези биће извршена стационарна и транзијентна анализа инјекционо синхронизованих ласера применом комплетног модела брзинских једначина. У оквиру стационарне анализе, у циљу испитивања услова за настанак бистабилности, као и карактеристика одговарајућих хистерезисних петљи, биће примењена следећа методологија:

- Решавање великог система стационарних брзинских једначина, које у стационарном случају постају систем трансцедентно-алгебарских једначина. Решења добијена нумеричким путем биће искоришћена да преко фазног дијаграма обезбеде јасан увид у утицај параметара инјекције на број стационарних стања.
- Анализа стабилности добијених стационарних стања, путем индиректне (линеаризационе) теорије стабилности Љапунова. За потребе ове анализе систем брзинских једначина се линеаризује у околини стационарних стања, а затим се анализирањем својствених вредности линеаризованог система испитује утицај инјектоване снаге и фреквенцијске раздешености, али и других технолошко-експлоатационих параметара на стабилност синхронизације.

У оквиру транзијентне анализе која подразумева анализу динамичких карактеристика инјекционо синхронизованих ласера, у циљу испитивања механизма комутације и њихове ефикасности, као и модулативног одзива инјекционо синхронизованих ласера, биће примењена следећа методологија:

- Развој аналитичког модела, на основу поједностављеног детаљног модела брзинских једначина, којим би, путем аналитички решивог интеграла, било могуће ефикасно и елегантно извршити процену времена и енергије комутације између два стабилна стања пратећег ласера и то у функцији од струје поларизације пратећег ласера, инјектоване снаге или фреквенцијске раздешености, али и других, структурних параметара пратећег ласера, као што су Хенријев фактор и запремина активне области.
- Решавање детаљног модела брзинских једначина, у коме се, у зависности од механизма комутације, у краком временском интервалу варира одговарајући параметар: струја поларизације пратећег ласера, фреквенцијска раздешеност или снага инјекције. Систем диференцијалних једначина решава се применом адаптивне Рунге-Куте методе уз адаптацију корака интеграције у зависности од механизма комутације, тј. од брзине варијације одговарајућег параметра.

5. Очекивани научни допринос

Очекује се да ће резултати коју буду проистекли из ове тезе имати следеће научне доприносе:

- Развој и формирање модела система брзинских једначина и материјалних зависности за случај инјекционе синхронизације мултимодног (Фабри-Перо) полупроводничког ласера.
- Развој модела и нумеричког метода за одређивање стационарних стања код инјекционо синхронизованих мултимодних полупроводничких ласерских диода
- Формирање нове, детаљне и комплетне мапе стабилности пратећег ласера у зависности од инјектоване снаге и фреквенцијске раздешености, као и потврда постојања области бистабилности у оквиру ове мапе.
- Разумевање утицаја и значаја неинјектованих модова на мапу стабилности и ефекат бистабилности.
- Разумевање утицаја Хенријевог фактора и других параметара инјекције и ласерске структуре на формирање бистабилности и карактер мапе стабилности.
- Развој поједностављеног аналитичког модела за ефикасно предвиђање времена и енергије комутације између стабилних стања пратећег ласера.

- Развој детаљног и егзактног нумеричког модела за одређивање времена и енергије комутације између стабилних стања пратећег ласера.
- Поређење ефикасности различитих механизма комутације на основу развијеног аналитичког и нумеричког модела.

Научне доприносе који су у директној вези са предложеном дисертацијом кандидат је објавио у радовима:

1. **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 (**IF=3.042**) (ISSN 1050-2947) doi: 10.1103/PhysRevA.88.063826
2. **Krstić, M.M.**, Crnjanski, J.V., Mašanović, M.L., Johansson, L., Coldren, L.A., Gvozdić, D.M.: Multi-Valued Stability Map of Injection-Locked Semiconductor Laser, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1501408, 2013 (**IF=4.078**) (ISSN 1077-260X) doi: 10.1109/JSTQE.2013.2241026
3. **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 (**IF=3.780**) (ISSN 1077-260X) doi: 10.1109/JSTQE.2011.2135335
4. Gvozdić, D., **Krstić, M.**, Crnjanski, J.: Switching time in optically bistable injection-locking semiconductor lasers, *Optics Letters*, vol. 36, pp. 4200-4202, 2011 (**IF=3.399**) (ISSN 0146-9592) doi: 10.1364/OL.36.004200
5. 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 (**IF=1.204**)(ISSN 0031-8949). doi:10.1088/0031-8949/2012/T149/014033
6. **Krstić M.M.**, Gvozdić D.M.: Side-Mode-Suppression-Ratio of Injection-Locked Fabry-Perot Lasers, *Acta Physica Polonica - Series A*, vol. 116, pp. 664-667, 2009 (**IF=0.433**) (ISSN 0587-4246)
7. **Krstić, M.M.**, Mašanović, M., Crnjanski, J. V., Johansson L., Coldren, L., Gvozdić, D. M.: 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
8. **Krstić, M.M.**, Crnjanski, J. V., Totović, A. R., Gvozdić, D. M.: 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)

6. План истраживања и структура рада

При изради предложене дисертације предвиђен је следећи план истраживања:

- Детаљан преглед литературе која се односи на инјекциону синхронизацију полупроводничких ласера и пресек досадашњих истраживања, објављених теоријских и експерименталних резултата, као и потенцијалних примена ове технике у савременим електротехничким дисциплинама.

- Дефинисање модела инјекционо синхронизованог Фабри-Перо полупроводничког ласера који се заснива на систему брзинских једначина са додатним члановима који моделују спрезање екстерне, тј. инјектоване светлости.
- Одређивање стационарних решења система брзинских једначина и њихова анализа на бази фазног дијаграма, односно одређивање опсега параметара инјекције у којима систем има више стационарних решења.
- Анализа стабилности пратећег ласера у функцији од инјекционе снаге и фреквенцијске раздешености водећег и пратећег ласера на бази индиректне (линеаризационе) теорије Љапунова.
- Транзијентна анализа, односно развијање егзактног нумеричког модела за одређивање времена и енергије комутације у области бистабилности, а затим анализирање карактеристика комутације у зависности од технике комутације, параметара инјекције и структурних параметара пратећег ласера. Такође, у овој фази биће испитивана могућност реализације поједностављеног аналитичког модела за ефикасно предвиђање карактеристика комутације.

Структура предложене дисертације ослањаће се на предвиђени план.

У уводном поглављу ће бити представљена техника инјекционо синхронизовања и биће дат преглед литературе као и потенцијалних примена инјекционо синхронизованих ласерских диода.

Наредно поглавље ће бити фокусирано на теоријску анализу у оквиру које ће бити представљен модел брзинских једначина за случај инјекционо спрегнутог Фабри-Перо мултимодног ласера. При томе, посебна пажња ће бити усмерена ка детаљном опису и дефиницији свих параметара који улазе у формиран модел.

У другом поглављу дисертације, које ће се бавити стационарном анализом, биће показана стационарна решења овог модела, на основу којих ће бити демонстрирана бистабилност, тј. појава карактеристичних хистерезисних петљи. Биће дискутован утицај инјекционих, материјалних и структурних ласерских параметара на појаву и ширину хистерезисних петљи, на првом месту утицај Хенријевог фактора. Након тога, биће презентована детаљна слика стабилности пратећег ласера и разјашњен утицај неинјектованих модова на ширину области нестабилности. На основу претходног, биће утврђен опсег у коме је пратећи ласер бистабилан.

У трећем поглављу дисертације, које ће бити фокусирано на транзијентну анализу, на основу развијеног егзактног модела, заснованог на нумеричком решавању система мултимодних брзинских једначина, биће прорачуната времена и енергије комутације за различите механизме комутације, који ће бити поређени по ефикасности. На основу формираног модела спровешће се испитивање утицаја Хенријевог фактора и запремине активне области на ефикасност комутације. У случају успешне реализације поједностављеног модела који би омогућио аналитичку процену карактеристика комутације, резултати ова два модела биће поређени у циљу верификације аналитичког модела.

На крају, у закључку дисертације, биће дат преглед резултата дисертације са посебним акцентом на значај резултата који се односе на нову, детаљну слику стабилности и утицај инјекционих и структурних параметара на ефикасност комутације и пропусни опсег директно модулисаног пратећег ласера.

7. Закључак и предлог

Кандидат Марко Крстић је пријавио докторску дисертацију под насловом „Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода“ у складу са Правилником о докторским студијама на Електротехничком факултету Универзитета у Београду и поднео сва предвиђена документа. Из свега достављеног

закључујемо да кандидат дипл. инж. - мастер Марко Крстић испуњава формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. У предлогу тезе су јасно и прегледно наведени научни проблеми које ове дисертација треба да резреши, као и њени очекивани научни доприноси. На основу образложења предмета и циља истраживања, објашњења полазних хипотеза и методологије истраживања, као и очекиваних научних доприноса и плана истраживања, закључујемо да је предложена тема научно актуелна у области фотонице и наноелектронике.

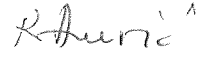
На основу свега наведеног предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Марку Крстићу одобри израду докторске дисертације под насловом „**Статичке и динамичке карактеристике инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода**“ и за ментора предлажемо др Дејана Гвоздића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Зован Радуновић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Зован Елазар, професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Радивоје Ђурић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Јасна Црњански, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет