

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 753. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 25.09.2012. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације **мр Абдулгадер Г. Р. Злитни** под насловом **“Модулациони одзив и пропусни опсег инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода”**. Након прегледа добијеног материјала, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Подаци о кандидату

Абдулгадер Злитни је рођен 1969. године у Триполију, Либија. Дипломирао је 1991. на Вишем институту за цивилну авијацију, где је стекао титулу комуникационог инжењера. У периоду од 1992. до 2007. године био је запослен у одељењу за ласерско навођење Центра за истраживање и развој у Триполију. У периоду од 2001. до 2003. године борао је на Електротехничком факултету у Београду, где је радио на изради магистарског рада под називом „Error positioning of laser illuminated object“, који је одбранио 29.09.2003. У току своје професионалне каријере радио је на многим пројектима из области фотонице и развоја одбрамбених система, као што су на пример, унапређење телеметријске јединице далекодметних ракета, развој трансивера противтенковских ракета, развој ласерског навођења противтенковских ракета типа FAGOT, итд. Од 2007. године поново борао у Београду, и на Електротехничком факултету ради на својој докторској дисертацији која се бави проблемом моделовања “безбојних” трансмитера за приступне пасивне оптичке мреже, које се базирају на мултиплексу таласних дужина.

Током своје досадашње каријере Абдулгадер Злитни је аутор 1 рада у часопису од међународног значаја (са *impact* фактором):

- [1] A. G. R. Zlitni, M. M. Krstić and D. M. Gvozdić "Modulation response and bandwidth of injection-locked Fabry–Pérot laser diodes", Phys. Scr. T 149, pp.014033 (2012). [ISSN: 0031-8949][IF = 1.204]

На основу досадашњег рада и публикованих научних резултата Комисија је дошла до закључка да је кандидат Абдулгадер Злитни квалификован за израду докторске дисертације на предложеној тему.

Анализа теме

Предмет и циљ истраживања

Полупроводнички ласери се могу сматрати електрично напајаним направама које су у стању да подрже аутоосцилације електромагнетског поља. У аутономном режиму рада, осцилације се јављају на различитим учестаностима и при томе коегзистирају унутар резонаторске шупљине уз одређени степен међусобне интерференције. Интензитет ових осцилација могуће је контролисати и селективно потискивати применом различитих механизма повратне спреге. У зависности од броја подржаних модова, ласери се могу поделити на мономодне и мултимодне. Осцилације доминантног мода, које карактерише учестаност и фаза („пратећег“ или „слејв“) ласера, могу се контролисати синхронизацијом са другим („водећим“ или „мастер“) ласером, што се обично зове техником оптичке инјекционе синхронизације („локовање“).

Техника инјекционе синхронизације је генерални феномен који је се може препознати у многим дисциплинама као што су биологија, медицина, психологија, социологија, астрономија итд. Током времена, инјекциона синхронизација је постала корисна и у инжењерским дисциплинама које се односе на електричне, микроталасне и оптичке осцилаторе, односно ласере.

Као напредна техника инјекциона синхронизација је нашла велики број примена у области оптичких комуникација и оптичке обраде сигнала. Једна од последњих примена ове технике тиче се реализације „безбојних“ трансмитера у новој генерацији пасивних оптичких мрежа базираних на мултиплексирању по таласним дужинама, који би могли да се примене за трансмисију сигнала од корисника до централе уместо скувих подешавајућих ласера. Досадашње теоретско и експериментално истраживање је показало да се модулациони одзив ласера може поправити у поређењу са ласером који ради у аутономном режиму. Такође је примећено да се овом техником може обезбедити мономодни режим рада, да је могуће смањити Хенријев фактор, односно чирп предајника, елиминисати фазни цитер који настаје као резултат поскакивања модова и дисперзије оптичког влакна и друге штетне ефекте.

У овој дисертацији, кандидат ће испитивати утицај инјекционе синхронизације бочних модова Фабри–Перо (ФП) полупроводничког ласера. Дисертација ће применом анализе „малих сигнала“, испитивати утицај снаге инјекционе синхронизације и фреквенцијске раздешености између пратећег и водећег ласера на модулациони одзив пратећег ласера и њему придружен пропусни опсег. С обзиром да се инјектовање сигнала водећег ласера врши у бочне модове ФП ласера, биће неопходно да анализа обухвати, не само мод у који водећи ласер инјектује сигнал, већ и преостале присутне модове, посебно оне који у слободном режиму рада доминирају над инјектованим модом. Због тога ће анализа обухватити и случај када су у обзир узети сви лонгитудинални модови ФП ласера, тако да димензија анализираног динамичког система једначина може износити неколико стотина. Посебна пажња биће посвећена стабилности рада пратећег ласера, тако да ће испитивање бити спроведено за оне параметре рада у којима је пратећи ласер у стабилном режиму рада.

Циљ рада ове дисертације је теоријско истраживање модулационих карактеристика инјекционо синхронизованих мултимодних ласера, који би због своје економске приступачности могли наћи примену у оптичким мрежним јединицама WDM пасивних оптичких мрежа. У случају да се инјекцијом сигнала из централе у бочни мод мултимодног ласера који припада оптичкој мрежној јединици, може обезбедити стабилна емисија сигнала од корисника ка централа, овакви системи омогућили би реализацију „безбојних предајника“ и упрошћену архитектуру WDM пасивних оптичких мрежа. У том смислу, дисертација треба да одговори на питање да ли је могуће оптимизовати параметре инјекције, тако да пропусни опсег има максималну вредност, која је значајно већа у односу на слободан режим рада и при којој пратећи мултимодни ласер може да ради у стабилном мономодном режиму. Такође, анализа има за циљ да истражи колики број и које од неинјектованих модова би требало узети у обзир, да би рад система био репрезентативно описан, будући да је показано да анализа која не узима у разматрање довољан број модова, не доводи до реалних и самим тим, релевантних резултата.

- [1] N. Kashima, S. Yamaguchi, and S. Ishii, "Optical transmitter using sidemode injection locking for high-speed photonic LANs," J. Lightw. Technol., vol. 22, no. 2, 2004, pp. 550–557.
- [2] N. Kashima and M. Watanabe, "Transient properties of side-mode injection locking in a FPLD," J. Lightw. Technol., vol. 24, no. 3, 2006, pp. 1523–1533.
- [3] N. Kashima, "Dynamic properties of FP-LD transmitters using side-mode injection locking for LANs and WDM-PONs," J. Lightw. Technol., vol. 24, no. 8, 2006, pp. 3045–3058.
- [4] J. Ohtsubo, Semiconductor Lasers: Stability, Instability, Chaos, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008.
- [5] E. K. Lau, H. Sung, and M. C. Wu, "Frequency response enhancement of optical injection-locked lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 44, no. 1, 2008, pp. 90–99.
- [6] E. K. Lau, L. J. Wong, and M. C. Wu, "Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: A tutorial," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 15, no. 3, 2009, pp. 618–633.
- [7] X. Jin and S. L. Chuang, "Bandwidth enhancement of Fabry–Pérot quantum-well lasers by injection locking", Solid State Electron. vol. 50, 2006, pp. 1141–1149

Полазне хипотезе

Основна хипотеза ове дисертације је да се инјекционом синхронизацијом мултимодног Фабри-Перо ласера на корисничком крају WDM пасивне оптичке мреже може реализовати трансмитер сигнала од корисника ка централа, код кога се радна таласна дужина подешава мастер ласером из централе, а који је иначе намењен за пренос података до корисника. На тај начин, сигнал из централе има не само улогу у преносу података, већ и у подешавању и постављању радне таласне дужине корисничког трансмитера, који у основи нема унапред дефинисану радну таласну дужину. Тиме би се постигла значајна флексибилност у реализацији WDM пасивне оптичке мреже, која у том случају није ограничена бројем таласних дужина додељених корисницима и код које је избегнута примена економски неисплативих решења базираних на подешавајућим ДБР ласерима.

Друга хипотеза која ће бити размотрена у раду односи се на утицај инјекционе синхронизације на брзину модулативног одзива. У досадашњој литератури утицај инјекционе синхронизације на модулативни одзив је детаљно разматран за случај ласера са дистрибуираном повратном спрегом, за које је показано да се гранична учестаност директне модулативне повећава са инјекционом синхронизацијом. У том погледу, дисертација би требало да провери да ли се ово побољшање граничне учестаности може постићи и у мултимодним ласерима, посебно оним код којих се у процесу синхронизације користе бочни модови за које је карактеристичан значајан дефект оптичког појачања.

Трећа хипотеза тиче се проблема броја лонгитудиналних модова ласера које је потребно укључити у разматрање да би се модулативни одзив исправно третирао. Када су у питању мономодни ласери потребно је да у разматрање буде укључен само један мод и то онај мод који подлеже синхронизацији, тј. локовању. Међутим, проблем је далеко сложенији када је број модова већи и кад неки од њих имају иницијално веће појачање од оних који се синхронизују. Основни разлог за овај проблем лежи у чињеници да су синхронизовани мод као и остали модови међусобно спрегнути и као такви остварују међусобни утицај који у великој мери утиче на резултат и понашање целокупног оптичког излаза и мода синхронизованог инјекцијом. Зато је једна од основних хипотеза овог рада да је осим инјектованог локованог мода потребно у разматрање узети и остале модове, посебно оне који су доминантни и да је том приликом потребно спровести детаљно испитивање о потребном броју модова са којим је могуће постићи модулативни одзив и граничну учестаност задовољавајуће тачности.

Четврта хипотеза ове дисертације односи се на проблем оптимизације параметара за које је могуће постићи максималан пропусни опсег. Наиме, испитивање модулативног одзива и граничне учестаности у основи се заснива на две независне променљиве, а то су инјекциона оптичка снага мастер ласера и фреквенцијска раздешеност између мастер ласера и синхронизованог ласера. Ова хипотеза у основи полази од тога да испитивање дводимензионалног простора инјекционе снаге и фреквенцијске раздешености може да понуди оптималну комбинацију параметара за коју ће гранична учестаност модулативног одзива бити максимална.

Научне методе истраживања

Реализација ове дисертације базира се на мултимодном моделу брзинских једначина који, осим једначина по концентрацији фотона и фази за инјекционо синхронизован мод, укључује и једначине за несинхронизоване модове. У циљу истраживања модулативног одзива и његовог пропусног опсега, неопходна је линеаризација мултимодних брзинских једначина у околини мирне радне тачке, која је одређена струјом поларизације ласера. Линеаризација брзинских једначина омогућава генерисање модулативне карактеристике и њене анализе путем методе малих сигнала за различите степене фреквенцијске раздешености мастер и синхронизованог ласера и инјектоване снаге мастер ласера. Број линеаризованих једначина као и димензија модулативне функције преноса зависе од броја несинхронизованих модова ласера, па димензије анализираног система могу ићи и до неколико стотина.

Поред одређивања модулативног одзива на бази малих сигнала, потребно је одредити области стабилности синхронизованог ласера у којима ласер поседује линеаран модулативни одзив и не показује елементе детерминистичког хаоса. Процес одређивања области стабилности заснива се на анализи својствених вредности линеаризованог система једначина у параметарском простору фреквенцијске раздешености и инјекционе снаге,

као и њихове оцене са становишта асимптотске стабилности система. Након одређивања области стабилности, испитивање модулационог одзива и граничне учестаности је потребно извршити управо у области у којој синхронизовани ласер показује стабилну инјекциону синхронизацију.

Очекивани научни допринос

Нова генерација пасивних оптичких приступних мрежа базираних на мултиплексирању по таласним дужинама, у основи захтева примену оптичких мрежних јединица, које се заснивају на економски исплативим „безбојним“ трансмитерима. Један од доприноса ове дисертације је експлицитан теоријски одговор на питање да ли је, и у којој мери, као „безбојне“ трансмитере могуће користити мултимодне полупроводничке ласере.

У том погледу резултати ове тезе могу представљати један од значајних корака у даљем унапређењу оптичких мрежних јединица у приступним оптичким мрежама. Резултати проистекли из тезе требало би да омогуће:

1. Одређивање параметара инјекције, пре свега фреквенцијске рездешености и инјекционе снаге мастер ласера при којима је пропусни опсег директно модулисаног пратећег ласера већи од пропусног опсега у слободном режиму рада, као и оптималних вредности параметара за које пропусни опсег има максималну вредност.
2. Други важан резултат тиче се одређивања потребног броја неинјектованих модова који омогућава реалну процену модулационог одзива и пропусног опсега.
3. Коначно, један од важних резултата представља развој самог модела, који у обзир узима произвољан број неинјектованих модова, будући да мултимодални модели модулационог одзива до сада нису били разматрани у литератури.

План истраживања и структура рада

План истраживања предложене докторске дисертације сачињавају следеће активности:

- Анализа релевантних референци са аспекта примене инјекционо синхронизованих ласера у реализацији трансмитера у пасивним оптичким мрежама, модела мултимодних брзинских једначина и инјекционо синхронизованих ласера, као и модела модулационог одзива.
- Избор модела оптичког појачања полупроводничког ласера и развој процедуре за прорачун стационарног спектра мултимодног ласера без и са инјекцијом мастер ласера уз урачунавање фреквенцијске рездешености између мастер ласера и бочног мода синхронизованог ласера. Развој нумеричких процедура за линеаризацију брзинских једначина и матрични приступ прорачуна модулационог одзива за мале сигнале. Развој нумеричких процедура за испитивање стабилности параметарског простора који је одређен фреквенцијском рездешеношћу и инјекционом снагом. Тестирање процедура и провера њихове поузданости.
- Прорачун и одређивање области стабилног спрезања и синхронизације мастер ласера и синхронизованог ласера. Прорачун модулационог одзива и испитивање утицаја броја бочних модова на граничну учестаност модулационог одзива. Израчунавање граничне учестаности у параметарском простору фреквенцијске рездешености и инјекционе снаге. Анализа и дискусија добијених резултата са аспекта постављених хипотеза.
- Оптимизација параметара инјекције у циљу добијања максималне граничне учестаности модулационог одзива синхронизованог ласера.

Докторска дисертација ће садржати шест поглавља. После увода, у другом поглављу биће дат кратак осврт на пасивне оптичке мреже на бази мултиплексирања по таласним дужинама и на потребу реализације „безбојних“ трансмитера у пасивним оптичким WDM мрежама. У оквиру трећег поглавља биће приказане и објашњене теоријске основе функционисања инјекционе синхронизације и услова њене стабилности, док ће у

четвртом поглављу бити дат теоријски модел мултимодног ласера са инјекционом синхронизацијом, његов стационарни модел и модел за мале сигнале базиран на линеаризованим брзинским једначинама. Такође, биће објашњен поступак за одређивање асимптотске стабилности мултимодног ласера. У петом поглављу биће приказани резултати прорачуна стационарног спектралног одзива ласера, зависност модулационог одзива и одговарајуће граничне учестаности у функцији броја модова и инјекционих параметара мастер ласера. Такође, биће спроведена детаљна анализа добијених резултата са циљем оптимизације параметара инјекције за које је могуће постићи максималну граничну учестаност. Закључна разматрања биће изложена у шестом поглављу.

Закључак и предлог

На основу изложеног, Комисија сматра да кандидат мр Абдулгaдер Г. Р. Злитни испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације, као и да је предложена тема научно актуелна у области оптичких комуникација. Стога, предлажемо Већу да кандидату одобри израду докторске дисертације под радним насловом “Модулациони одзив и пропусни опсег инјекционо синхронизованих Фабри-Перо ласерских диода” под руководством ментора проф. др Гвоздић Дејана.

Београд, 24. децембар 2012.

др Дејан Гвоздић, ред. проф.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Јован Радуновић, ред. проф.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др Витомир Милановић, ред. проф. у пензији

Електротехнички факултет Универзитета у Београду