

Tehnike za zagotavljanje stabilnosti injekcijske vklenitve Fabry-Periot laserske diode

Vesna Eržen^{1,4}, Jakup Ratkoceri^{2,3}, Boštjan Batagelj⁴

¹Šolski center Škofja Loka, Podlubnik 1b, 4220 Škofja Loka,

²Technetix B.V., Kazemat 5, 3905 NR, Nizozemska,

³UBT College, Lagja Kalabria, 10000 Pristina, Kosovo

⁴Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: vesna.erzen@scsl.si, bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Techniques for Ensuring the Stability of Optical Injection Locking of a Fabry-Periot Laser Diode

Abstract.

The inexpensive and well-known Fabry-Periot laser diode oscillates on several longitudinal lines. With the injection locking technique, the Fabry-Periot laser can operate like a single longitudinal line laser. To ensure stable optical locking of the Fabry-Periot laser, several conditions for the operation of an injection-locking system must be met. For this purpose, the paper provides an overview of three feedback control techniques that ensure the stability of optical injection locking. The presented techniques contribute to the use of Fabry-Periot laser diodes in the broader field of optical technology.

1 Uvod

Raziskovanje fizikalnega pojava sinhronizacije polprevodniških laserskih diod vzbuja zanimanja na področju optične tehnologije v obdobju zadnjih štirih desetletij. [1] Sinhronizacija laserjev predstavlja frekvenčno in fazno uskladitev dveh laserjev, pri čemer ima eden izmed laserjev nadrejeno, drugi pa podrejeno vlogo. To uskladitev strokovna literatura imenuje injekcijska vklenitev (angl. Injection Locking – IL).

Injekcijska vklenitev je že dolgo predmet raziskovanja, ki se je začelo s pojavom laserskih virov. V preteklosti je bilo veliko raziskovalnega truda usmerjenega v razumevanje pojava injekcijske vklenitve optičnih laserjev in razvoja tehnologij, ki se nanašajo na zagotavljanje vklenitve. Kljub temu še vedno prihaja do novih dognanj na tem področju. Zanimanje za to področje je še vedno zelo aktualno. [1]

V splošnem se sinhronizacija dveh laserjev oziroma injekcijska vklenitev uporablja v različnih praktičnih optičnih sistemih. Laserji z ozko spektralno širino so ključni na področju koherentnih optično-komunikacijskih sistemov in na področju mikrovalovne fotonike. Optična vklenitev omogoča tudi koherentno demultipleksiranje valovnih dolžin v sistemih z valovnodolžinskim razvrščanjem (angl. Wavelength Division Multiplexed – WDM), kjer zagotavlja prenos komunikacijskega signala z visoko spektralno učinkovitostjo. [2] Na področju zaznavanja in kvantne

optike injekcijska vklenitev omogoča visoko zanesljivost zaznavanja fazno moduliranih signalov. Na področju optične znanosti so fazno sinhronizirani laserji uporabljeni za generiranje poljubnih oblik optičnih impulzov. [1]

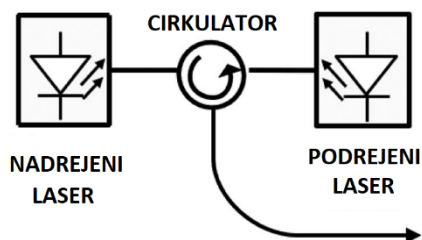
Fabry-Periot (FP) laser je polprevodniški laser, ki v osnovi niha na več vzdolžnih rodovih. Tehnika injekcijske vklenitve pa FP laserju omogoča delovanje na enem samem vzdolžnem rodu. To je režim delovanja, ki učinkuje enako kot brezbarvni optični oddajnik in predstavlja privlačno nizkocenovno alternativo dragim brezbarvnim laserjem. Zato so bile številne raziskave zadnjih dveh desetletij uperjene v uporabo Fabry-Periot laserske diode (FP-LD) z injekcijsko vklenitvijo za brezbarvni prenos v pasivnem optičnem dostopnem omrežju (angl. Passive Optical Network – PON) z valovnodolžinskim razvrščanjem (WDM-PON). Vendar pa možnost uporabe ni omejena samo na drevesne topologije, kakršna je tudi topologija sistema WDM-PON, temveč je uporaba možna tudi za nadgradnjo omrežja točka-točka (angl. Point to Point – P2P) in v gigabitnih PON (GPON) omrežjih. Za širšo praktično uporabo pa so potrebne še določene tehnično dovršene cenovno dostopne rešitve, ki bi zagotavljale učinkovit način stabilizacije injekcijske vklenitve FP-LD. [3]

Prispevek opisuje princip optične vklenitve, sinhronizacije dveh laserjev. Za zagotavljanje stabilne vklenitve FP laserja je potrebno zadostiti določenim pogojem, zato prispevek opisuje tudi značilnosti in pomembne parametre, ki vplivajo na optično vklenitev. Poglavitni del prispevka pa se nanaša na stabilizacijo optične vklenitve, ki je ključna za uporabo injekcijske vklenitve v praksi in je predmet nedavnih raziskav. V ta namen prispevek opisuje štiri tehnično različne načine povratne vezave za zagotavljanje stabilnosti optične vklenitve. Motivacija za to delo se nanaša na iskanje čimbolj dovršene tehnične rešitve za dolgotrajno samodejno stabilizacijo injekcijske vklenitve FP-LD, ki bi bila uporabna v praktičnem, terenskem okolju.

2 Princip optične vklenitve laserjev

Pri injekcijski vklenitvi gre za frekvenčno in fazno sinhronizacijo (uskladitev) dveh laserjev, kadar zunanjo svetlobo nadrejenega laserja usmerimo v podrejeno laser. Sistem za injekcijsko vklenitev je sestavljen iz dveh svetlobnih virov: nadrejenega (angl. Master), ki zagotavlja zunanji vzbujalni vir svetlobe za podrejeno

(angl. Slave) laser, kot prikazuje slika 1. Poleg tega omenjeni sistem vsebuje tudi optični cirkulator, prek katerega je svetloba nadrejenega laserja usmerjena do podrejenega. Ko pride vzbujalna svetloba določene frekvence (valovne dolžine) do podrejenega laserja, ki je v prostem teku, se le-ta sinhronizira, ujame oziroma uskladi s frekvenco vzbujalnega vira.



Slika 1. Vezava nadrejenega in podrejenega laserskega vira. [1]

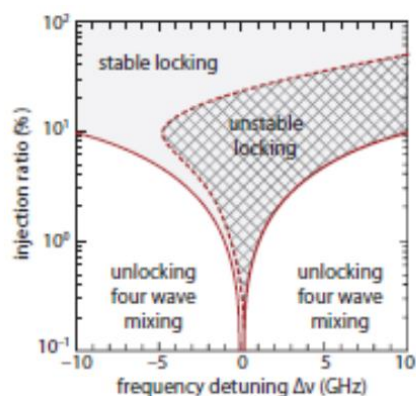
Sinhronizacija delovanja dveh laserjev učinkuje predvsem na parametru frekvence in faze, kar se odraža v izboljšanju obratovanja laserja v vklejenem režimu. S posredovanjem svetlobe iz glavnega laserja, ki niha na enem vzdolžnem rodu, v resonatorsko votlino drugega laserja, FP laserja, je pod določenimi pogoji mogoče doseči stabilno stanje vklejitve laserja, kadar je eden od rodov podrejenega laserja »zaklenjen« na frekvenco in fazo signala nadrejenega laserja.

3 Značilnosti optične vklejitve

Ena od glavnih lastnosti injekcijske vklejitve laserja je povečana frekvenčna stabilnost podrejenega laserja. Stanje injekcijske vklejitve laserja lahko prepoznamo zgolj pod določenimi pogoji, ki so povezani z injicirano optično močjo nadrejenega laserja in frekvenčno razliko med frekvenco nadrejenega laserja in podrejenega laserja ($\Delta\omega$), znano kot frekvenčni odmik. Stabilna vklejitev se doseže le pod skrbno določenima parametroma posredovane optične moči nadrejenega laserja in frekvenčnega odmika med obema laserjema. Kot funkcijo teh dveh parametrov imamo področje, znotraj katerega je nihanje FP laserja vklejeno na nihanje nadrejenega laserja. Prostor, ki prikazuje obnašanje podrejenega laserja, imenujemo zemljevid vklejitve (angl. Locking map), ki ga prikazuje slika 2. [3]

Injekcijska vklejitev je nelinearen pojav. Neprekinjena rdeča črta na sliki 2 predstavlja mejo med vklejenim in ne vklejenim področjem. Pri nizkih optičnih vhodnih močeh mora biti frekvenčna razlika ($\Delta\omega$) dovolj majhna, da bi prišlo do vklejitve; z višanjem vhodne moči pa si lahko privoščimo večjo frekvenčno razliko med frekvencama nadrejenega in podrejenega laserja. Vklejitveno področje torej narašča z naraščanjem vhodne optične moči. Zunaj področja vklejitve prihaja do štirivalovnega mešanja (angl. Four Wave Mixing – FWM) in nedoločenih nihanj (oscilacij). Znotraj vklejitvenega področja imamo stabilno in nestabilno vklejitev. Meja med njima je prikazana s prekinjeno rdečo črto. Področje stabilnosti je asimetrično in močno odvisno od vhodne optične moči: pri nizkih

vhodnih močeh je stabilna vklejitev možna le za negativne vrednosti frekvenčne razlike, z višanjem vhodne moči pa se področje stabilnosti povečuje in zajame tudi pozitivno frekvenčno razliko.



Slika 2. Vklejitveni zemljevid. [4]

Neodvisno od frekvenčne in fazne vklejitve injekcijska vklejitev znatno izboljša pasovno širino direktno moduliranega podrejenega laserja in hkrati zmanjša pojavnost neželenega modulatorijskega zvižga in intenziteto šuma. [1, 5]

Značilnosti kot sta znižanje napajalnega toka in izboljšana linearnost modulacije sta spremljajoča pojava injekcijske vklejitve, ki sta spodbudila veliko zanimanje tudi izven ožjega področja optike, in sicer na področju analogne fotonike, radarjev in teleskopov. [1]

Poleg tega injekcijska vklejitev FP laserja v optični zvezi znižuje šum, ki nastane zaradi zadušitve nevklejenih vzdolžnih rodov nihanja laserske resonančne votline. Ostale izboljšave, ki jih prinaša injekcijska vklejenost laserja, so: premik resonančne frekvence proti višjim frekvencam, zmanjšanje žvižga, zmanjšanje nelinearnosti, zmanjšanje relativne jakosti šuma (angl. Relative Intensity Noise – RIN) in povečano ojačenje optične zveze (razmerja signal-šum). FP laser v stanju injekcijske vklejitve znatno izboljša parametre delovanja v smislu laserskega žvižga in odpornosti na kromatsko disperzijo v primerjavi z ne vklejenim FP laserjem. [3, 5]

Vse to kaže na izboljšano učinkovitost injekcijsko vklejenega FP laserja v smislu povečane zmogljivosti in podaljšanega dosega. Pri tem je potrebno poudariti tudi, da je frekvenčni premik resonančne frekvence proti višjim frekvencam, ki je eden glavnih dejavnikov povečanja pasovne širine, neposredno povezan tudi z razglasitvijo vklejitvene frekvence. Glede na merilne rezultate pridobljene ob vklejitvi na spektralno ožji nadrejeni laser sklepamo, da imamo za nadrejeni laser z ožjo spektralno širino dobre pogoje za doseganje večje pasovne širine optične zveze. [3]

V splošnem velja merilo, da je FP laser v stabilnem stanju injekcijske vklejitve tedaj, ko je razmerje zadušitve stranskih rodov (angl. Side Mode Suppression Ratio – SMSR) vsaj 35 dB pod prevladujočim optičnim rodом. Pri praktični izvedbi injekcijske vklejitve se je

potrebno zavedati, da je stabilnost več parametrska funkcija in znotraj vkleinitvenega področja vladajo različni odzivi vkleinitvenega laserja. Zlasti na mejah vkleinitvenega področja, kjer je SMSR 35 dB, je stabilnost lahko vprašljiva.

Na žalost je frekvenčna stabilnost FP laserja precej odvisna od temperature samega laserskega čipa. To je eden od glavnih tehničnih razlogov, ki preprečuje uporabo injekcijsko vkleinitvenega FP laserja izven laboratorijskega okolja. Na terenu, v praktičnih komunikacijskih omrežjih, lahko zunanja temperatura, na kateri se nahaja komunikacijska oprema uporabnika, precej niha. Najti poceni tehniko, ki ponuja nadzor stabilnosti injekcijsko vkleinitvenega FP laserja, je nujna za pričetek širše uporabe injekcijsko vkleinitvenih FP laserjev v optičnem dostopovnem omrežju. [3]

Dosedanje raziskave so v veliki meri analizirale injekcijsko vkleinitve laserja v odvisnosti od optične moči in frekvenčnega razmika med frekvenco nadrejenega laserja in frekvenco enega od rodov podrejenega FP laserja, vendar ni bila podrobno analizirana odvisnost področja vkleinitve od spektralne širine nadrejenega laserja. Rezultati nedavnih meritev kažejo, da ožja širina nadrejenega laserja omogoča širše območje vkleinitve podrejenega laserja. Z virom spektralne širine v področju kHz je mogoče doseči do 30% širši razpon vkleinitve v primerjavi z virom v MHz področju spektralne širine. Širši vkleinitveni zemljevid v praksi pomeni, da lahko z nadrejenim laserjem, ki ima manjšo spektralno širino, ohranjamo podrejeni laser vkleiniten tudi pri širših frekvenčnih razglasitvah ob isti injicirani optični moči. [3, 6]

4 Kontrola injekcijske vkleinitve

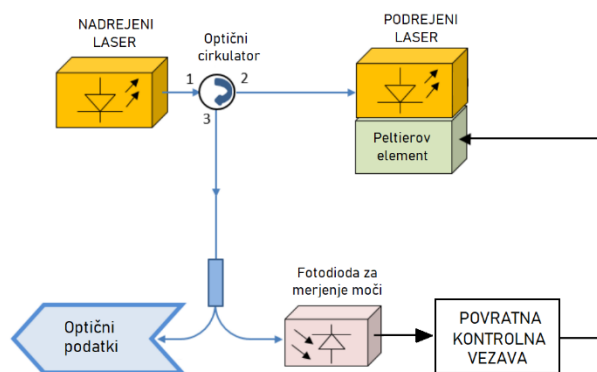
Kontrola injekcijske vkleinitve je bistvena za učinkovito sinhronizacijo in uporabnost tega pojava. Pri praktični uporabi v realnem okolju bi zlahka prišli do nestabilne vkleinitve oziroma izven območja vkleinitve, predvsem zaradi temperaturne odvisnosti laserskega čipa. V nadaljevanju so opisane značilnosti treh tehnik za samodejno stabilizacijo vkleinitve po principu nadzora v povratni zanki (angl. Feedback Control).

4.1 Direktna povratna vezava na osnovi meritve optične moči

Pri sistemih s šibko injekcijsko vkleinitvijo, ki se na primer uporabljajo za izboljšanje neposredno moduliranega laserja ali za zmanjšanje žvižga laserja, neposredna detekcija optične moči s povratno vezavo zagotavlja preprosto in nizko cenovno rešitev. Princip, prikazan na sliki 3, temelji na dejstvu, da izhodna moč podrejenega laserja upada z večanjem frekvenčne razlike $\Delta\omega$, ki je razlika med frekvencami nadrejenega in podrejenega laserja v prostem teku. Izhodna moč podrejenega laserja, ki jo merimo na fotodiodi, je torej funkcija $\Delta\omega$. Direktna povratna vezava je osnovana na meritvi optične moči izhodnega spektra podrejenega laserja s pomočjo fotodiode. [7] Povratna vezava lahko vpliva na napajalni tok podrejenega laserja ali temperaturo, če ima laserski modul možnost

temperaturne regulacije prek Peltierovega elementa, kot je prikazano na sliki 3. Optične povezave na sliki 3 so modre barve, električne povezave v povratni zanki pa so črne.

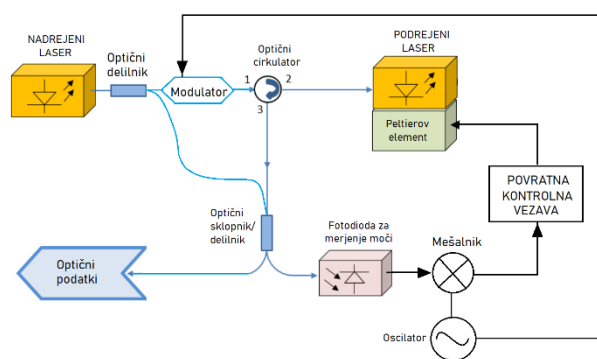
Ta tehnika je manj primerna pri nizkih razmerjih injekcijske vkleinitve. Natančnost te povratne vezave predstavlja netočnost pri merjenju optične moči zaradi »lezenja« izhodne moči podrejenega laserja v načinu prostega teka.



Slika 3. Tehnika stabilizacije vkleinitve FP laserja s pomočjo meritve optične moči vkleinitvenega laserja. [7]

4.2 Optična fazno sklenjena zanka s pomočjo zunanje moduliranega pilotnega tona

V primeru, ko potrebujemo širokopasovno fazno sinhronizacijo, je bolj primeren način kontrole optične vkleinitve tako imenovana optična fazno vkleinitvena zanka (angl. Optical Phase Lock Loop – OPLL), ki je prikazana na sliki 4. [8]



Slika 4. Princip stabilizacije vkleinitve s fazno vkleinitvijo v povratni vezavi. [8]

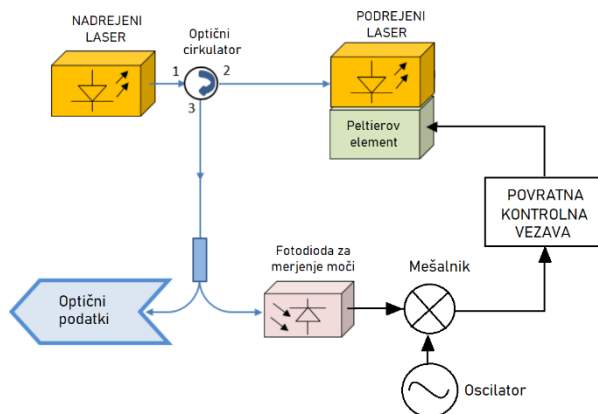
Del svetlobe nadrejenega laserja je s pomočjo zunanjega Mach-Zehnderjevega modulatorja (angl. Mach-Zehnder modulator) moduliran s nizkofrekvenčnim sinusnim signalom f_{NF} . Z modulacijo se ustvarita stranska boka in (nosilnik) pred vkleinitvijo podrejenega laserja. Podrejeni laser se nato poravnava in zaklene na stranski bok. Nemodulirana svetloba nadrejenega laserja se združi z izhodom podrejenega laserja in detektira na fotodiodi, kjer se ustvari visokofrekvenčni signal na frekvenci f_{VF} . Ta signal nato

potuje do mešalnika, kjer se primerja s signalom iz nizkofrekvenčnega oscilatorja. Na izhodu mešalnika se pridobi fazno razliko, ki predstavlja regulacijski pogrešek. Naloga povratne zanke je izničenje fazne razlike in zmanjšanje regulacijskega pogreška. To se izvede s pomočjo električnega vezja v povratni zanki (angl. Feedback Control), tako da le ta spremeni napajalni (angl. bias) tok podrejenega laserja, s čimer se uravnava frekvenca in faza. Namesto spreminjanja napajalnega toka se lahko koristi tudi spreminjanje temperature podrejenega laserja s pomočjo Peltierovega elementa, kot je prikazano na sliki 4.

Opisani OPLL omogoča odlično kontrolo uravnavanja injekcijske vklenitve, vendar pa je slabost, da zahteva visoko zmogljivo in hitro opto-elektroniko. Poleg tega za zagotavljanje dovolj velike pasovne širine zaklepanja povratna zanka ne sme biti fizično predolga. Vse to je povezano z dodatnimi stroški, kar ne zagotavlja cenovno privlačne rešitve.

4.3 Stabilizacija s pomočjo direktno moduliranega pilotnega tona

Stabilizacija vklenitve s pomočjo pilotnega tona [1] omogoča uporabo počasne elektronike in zelo nizko moč injiciranja (do -50 dB). Blokovni načrt te metode je prikazan na sliki 5.



Slika 5. Stabilizacija injekcijske vklenitve z uporabo direktno moduliranega pilotnega tona. [1]

V tem primeru se doda nizkofrekvenčni pilotni ton signalu nadrejenega laserja. To se doseže z modulacijo nadrejenega laserja ali s filtriranjem frekvence »glavnika«. [9, 10, 11] Frekvenca pilotnega tona je izbrana tako, da je višja od frekvence območja vklenitve. Stranska boka torej ne vplivata na proces vklenitve in se odbijeta od resonančne votline podrejenega laserja. Izhod podrejenega laserja je tako sestavljen iz optično vklenjenega dela in dveh stranskih pasov pilotnega tona, ki sta zunaj območja vklenitve. Izhod podrejenega laserja je podvržen faznemu zamiku, ki je odvisen od frekvenčnega odmika (med frekvenco nadrejenega in frekvenco podrejenega laserja), medtem ko faza odbojnih pilotnih tonov ni podvržena posledicam optične vklenitve (in s tem faznim spremembam), kot je

prikazano na sliki 5. Posledično informacijo o fazi in s tem tudi o frekvenčnem odkliku lahko natančno določimo / izmerimo tako, da izmerimo fazo utripa med injekcijsko vklenjenim nosilcem in stranskima pilotnima tonoma. Vse to je razvidno na izhodu podrejenega laserja. Ko optični detektor sprejme signal, je radiofrekvenčni (RF) utripni signal med nosilcem in pilotnim tonom določljiv z enačbo:

$$I = 1 + \eta^2/2 + \eta^2/2 \cos(2\omega_{pt}) + 2\eta \cos(\omega_{pt}) \cos(\varphi)$$

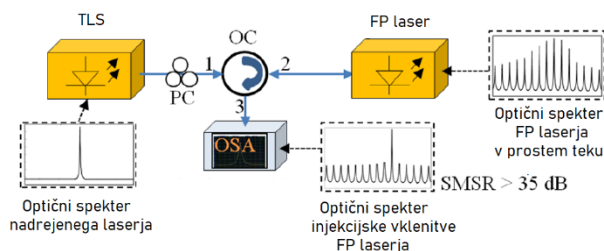
Pri tem je η normalizirano intenzitetno razmerje med nosilcem vklenitve in pilotnima tonoma, ω_p je kotna frekvenca pilotnega tona. Četrty člen v enačbi pa nosi informacijo o željeni vrednosti faze φ , ki nas zanima in je uporabljena kot signal napake pri PLL, po pretvorbi v osnovni pas s pomočjo RF mešalnika.

5 Opazovanje procesa injekcijske vklenitve

V tem poglavju bomo na kratko predstavili in med seboj primerjali klasičen način opazovanja optične vklenitve, ki temelji na moči injicirane svetlobe nadrejenega laserskega vira, in novo, eksperimentalno metodo za opazovanje procesa injekcijske vklenitve, ki temelji na zunanji resonančni votlini in opazovanju tako SMSR, kot tudi RF spektra. Oba načina smo preverili in ovrednotili tudi s pomočjo laboratorijskih meritev [12].

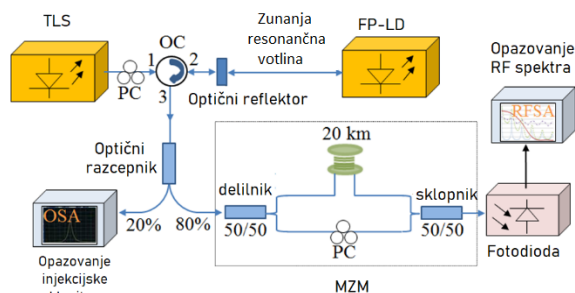
Za opazovanje procesa injekcijske vklenitve podrejenega FP laserskega vira s pomočjo optičnega spektra je potreben optični spektralni analizator (angl. Optical Spectrum Analyzer – OSA). Uporaba OSA je klasična in najpogostejše uporabljena metoda za opazovanje injekcijske vklenitve (slika 6). Kot smo že omenili je FP laser v stabilnem stanju injekcijske vklenitve tedaj, ko je razmerje zadušitve stranskih rodov (SMSR) vsaj 35 dB pod prevladujočim optičnim rodnom. Vendar v zadnjem obdobju zasledimo tudi principe ugotavljanja optične vklenitve s pomočjo opazovanja radio-frekvenčnega (RF) spektra. [3]

Na sliki 6 je prikazana blokovna vezava nastavljevega laserskega vira (angl. Tunable Laser Source – TLS), ki ima vlogo nadrejenega laserja in je prek kontrole polarizacije (angl. Polarization Controller – PC) in optičnega cirkulatorja (angl. Optical Circulator – OC) povezan s podrejenim FP laserjem na priključku 2 in z OSA na priključku 3. Dodatno so na sliki 6 prikazani: optični spekter nadrejenega in podrejenega laserja ter optični spekter injekcijsko vklenjenega podrejenega FP laserja. Najpomembnejši zaključek v zvezi z vezavo na sliki 6 se nanaša na področje vklenitve (vklenitveni zemljevid), ki narašča z naraščanjem vhodne optične moči. To pomeni, da si z višanjem moči nadrejenega laserja zagotovimo večji frekvenčni razmik med frekvenco nadrejenega in podrejenega laserja. Ta frekvenčni razmik je lahko bodisi pozitiven bodisi negativen. Tako kot je razvidno iz vklenitvenega zemljevida na sliki 2, stabilna vklenitev pri nižjih injiciranih močeh možna le ta negativni frekvenčni razmik, kar potrjujejo tudi laboratorijske meritve [12].



Slika 6. Klasična metoda opazovanja injekcijske vkleinitve FP laserja [12]

Eksperimentalno postavljen sistem za opazovanje optične vkleinitve, ki je prikazan na sliki 7, združuje klasično metodo opazovanja injekcijske vkleinitve s pomočjo OSA s sočasnim opazovanjem RF spektra. Pri tej postavitvi nismo spreminjali injicirane optične moči, temveč je bila le-ta konstantna in je ves čas meritve znašala 2 dBm na FP podrejenemu laserju. Spreminjali smo le vrednost frekvenčnega odmika od negativnega proti pozitivnemu področju. Sočasno smo opazovali SMSR na OSA in dušenje RF komponent na radiofrekvenčnem spektralnem analizatorju (RFSa). RF komponente na RFSa so posledica zunanje resonančne votline (angl. External Cavity), ki jih omogoča nizko-odbojni optični reflektor na razdalji 1 m od FP laserskega vira, kot je razvidno iz slike 7.



Slika 7. Eksperimentalna metoda za opazovanje procesa optične vkleinitve [12]

Pri tem poskusu smo posebno pozornost namenili pozitivnemu frekvenčnemu razmiku na območju, kjer hitro pride do nestabilnosti injekcijske vkleinitve. Izkazalo se je, da se pri stabilni optični vkleinitvi RF komponente popolnoma zadržijo. Prav tako se je izkazalo, da upoštevanje SMSR, ki naj bo vsaj 35 dB ne zagotavlja stanja stabilne injekcijske vkleinitve v primeru pozitivnega frekvenčnega razmika med frekvenco nadrejenega in podrejenega laserja.

Zaključek

V tem članku so predstavljeni trije načini za stabilizacijo delovanja injekcijske vkleinitve FP laserja, ki je uporabna v številnih primerih širšega področja fotonike. Vse tri tehnike uporabljajo povratno vezavo, ki uravnava napajalni tok ali temperaturo podrejenega FP laserja, s pomočjo česar se uglaši na nadrejeni laser. S pomočjo povratne vezave je zagotovljeno delovanje v sredini vkleinitvenega zemljevida, kjer je vkleinitvev najmočnejša in najbolj stabilna.

Predstavljene tehnike aktivne povratne zanke, ki omogočajo stabilizacijo vkleinitve, se razlikujejo po zajemu informacije o razglasitvi. Najpreprostejša je tehnika, kjer se meri moč izhodnega signala podrejenega laserja. Mnogo bolj zapletena je tehnika, kjer se uporablja zunanje moduliran pilotni ton, saj uporablja fazni detektor, na osnovi katerega se krmili povratna zanka. Fazni detektor uporablja tudi tretja tehnika, kjer pa je frekvenca modulacijskega tona večja od maksimalne frekvenčne razglasitve na vkleinitvenem zemljevidu.

Namen članka je prikazati možnosti za zagotavljanje injekcijske vkleinitve FP laserja. V nadaljnjem raziskovalnem delu pa bodo posamezne metode tudi podrobneje ovrednotene.

Dodatno smo v članku predstavili dve možnosti za opazovanje procesa vkleinitve podrejenega laserja: klasično s pomočjo opazovanja optičnega spektra in novo, eksperimentalno metodo, ki temelji na opazovanju RF komponent v električni domeni. Izkazalo se je, da slednja možnost odpira nove možnosti za nadaljnje delo, predvsem v smislu iskanja novih, izboljšanih sistemov za samodejno stabilizacijo injekcijske vkleinitve FP laserja.

Zahvala

Delo je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa P2-0246.

Literatura

- [1] Z. Liu and R. Slavík, "Optical Injection Locking: From Principle to Applications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 43-59, 1 Jan. 1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2945718.
- [2] V. Eržen, B. Batagelj, »Rodovno vklejena FP-LD za brezbarvni WDM-PON« Zbornik štiriindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2015, 21. - 23. september 2015, Portorož, Slovenija, zv. A, str. 61-64,.
- [3] Ratkoceri, J. »Capacity increase of an optical access network using an injection-locked Fabry-Pérot laser« (doktorska dizertacija), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. Ljubljana, 2019.
- [4] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, »Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences«, Cambridge University Press, 2001.
- [5] Jakup Ratkoceri, Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj, "Reduction of the chromatic dispersion and chirping effects by using an injection-locked and directly intensity-modulated Fabry-Pérot laser in point-to-point optical access networks," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 111, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.152891>.
- [6] Ratkoceri, J., Batagelj, B. Injection-locked range and linewidth measurements at different seed-laser linewidths using a Fabry-Pérot laser-diode. *Opt Quant Electron* 50, 402 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11082-018-1676-9>
- [7] 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, pp. 618-633, May-Jun. 2009
- [8] A. Bordonalli, C. Walton, and A. J. Seeds, "High-performance phase locking of wide linewidth

- semiconductor lasers by combined use of optical injection locking and optical phase-lock loop," J. Lightw. Technol., vol. 17, no. 2, p. 328, Feb. 1999.
- [9] D. S. Wu, R. Slavík, G. Marra and D. J. Richardson, "Direct selection and amplification of individual narrowly spaced optical comb modes via injection locking: Design and characterization", J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 14, pp. 2287-2295, Jul. 2013
- [10] J. Kim, H. Schnatz, D. S. Wu, G. Marra, D. J. Richardson and R. Slavík, "Optical injection locking-based amplification in phase-coherent transfer of optical frequencies", Opt. Lett., vol. 40, no. 18, pp. 4198-4201, 2015.
- [11] Z. Liu, J.-Y. Kim, D. S. Wu, D. J. Richardson and R. Slavík, "Homodyne OFDM with optical injection locking for carrier recovery", J. Lightw. Technol., vol. 33, no. 1, pp. 34-41, Jan. 2015.
- [12] Raktoceri, J., Batagelj, B. »Determining the Stable Injection Locking of a Fabry-Pérot Laser by Observing the RF Spectral Components Generated by a Low-Reflectivity External Cavity«, Photonics 2021, 8, 487.