

Opazovanje injekcijske vklenitve polprevodniške Fabry-Perot laserske diode s pomočjo meritve njene izhodne optične moči

Vesna Eržen, Andrej Lavrič, Janez Krč, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: vesna.erzen@scsl.si, bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si.com

Observation of injection locking of a semiconductor Fabry-Perot laser diode by measuring its optical output power

Abstract. Injection locking (IL) in semiconductor Fabry-Perot laser diodes is a critical phenomenon with significant implications for optical communication systems and photonic technologies in general, including quantum technologies. In this paper, we present an experimental investigation of injection locking of a Fabry-Perot laser diode (FP-LD) by analyzing its optical output power. We used a master laser to inject a coherent optical signal into the FP-LD and observed the resulting changes in the output power spectrum. The experimental setup allowed precise control of the injection parameters, including wavelength detuning and injection power. Our results show a clear locking range where the FP-LD output stabilizes and amplifies the injected signal. These observations confirm the theoretical predictions of injection-locking behavior and highlight the potential for improved coherence and stability in laser diode applications. This study provides valuable insights into the dynamics of injection locking and paves the way for improved design and optimization of semiconductor laser systems in modern photonic networks.

1 Uvod

Injekcijska vklenitev (angl. Injection Locking – IL) predstavlja frekvenčno in fazno uskladitev dveh laserjev, pri čemer ima eden izmed laserjev nadrejeno, drugi pa podrejeno vlogo. V splošnem se injekcijska vklenitev laserjev uporablja v različnih praktičnih optičnih komunikacijskih sistemih [1, 2] in na različnih področjih fotonike, vključno s sinhronizacijo [3] in kvantnimi tehnologijami [4, 5, 6]. Laserji z ozko spektralno širino so tako ključni na področju koherentnih optičnih komunikacijskih sistemov in na področju mikrovalovne fotonike. Optična vklenitev omogoča tudi koherentno demultiplesiranje valovnih dolžin v sistemih z valvnodolžinskim razvrščanjem (angl. Wavelength Division Multiplexed – WDM), kjer zagotavlja prenos komunikacijskega signala z visoko spektralno učinkovitostjo [7]. Prav tako na področju zaznavanja in kvantne optike injekcijska vklenitev omogoča visoko zanesljivost zaznavanja fazno moduliranih signalov [8].

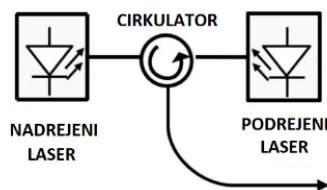
Fabry-Perot (FP) laser je polprevodniški laser, ki v osnovi niha na več vzdolžnih rodovih. Tehnika injekcijske vklenitve pa FP laserju omogoča delovanje na enem samem vzdolžnem rodu. To je režim delovanja, ki

učinkuje enako kot brezbarvni optični oddajnik in predstavlja privlačno nizkocenovno alternativo dragim brezbarvnim laserjem v pasivnem optičnem dostopovnem omrežju (angl. Passive Optical Network – PON) z valvnodolžinskim 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 laserske diode (FP-LD) [9].

Članek vsebuje teoretični in eksperimentalni del. V teoretičnem delu opisuje princip optične vklenitve, kjer je za zagotavljanje stabilne vklenitve FP-LD treba zadostiti določenim pogojem, zato so podani in opisani pomembni parametri, ki vplivajo na injekcijsko vklenitev. Strokovna literatura podaja nekaj različnih tehnik za stabilizacijo vklenitve FP-LD. Ena izmed najpreprostejših tehnik se nanaša na opazovanje izhodne optične moči FP-LD. Namen eksperimentalnega dela je proučitev možnosti za ta način kontrole injekcijske vklenitve. V ta namen smo opazovali spremembo izhodne moči v odvisnosti od valovne dolžine in sočasno opazovali spremembo optičnega spektra IL-LD.

2 Optična vklenitev laserjev

Pri injekcijski vklenitvi se svetlobo nadrejenega laserja usmeri v podrejeno laser, kot prikazuje slika 1. Sistem za injekcijsko vklenitev 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 [10].



Slika 1. Vezava nadrejenega in podrejenega laserskega vira [7].

Sinhronizacija delovanja dveh laserjev učinkuje predvsem na parametru frekvence in faze, kar se odraža v izboljšanju obratovanja laserja v vklenjenem 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 vkleinitve laserja, kadar je eden od rodov podrejenega laserja »zaklenjen« na frekvenco in fazo signala nadrejenega laserja.

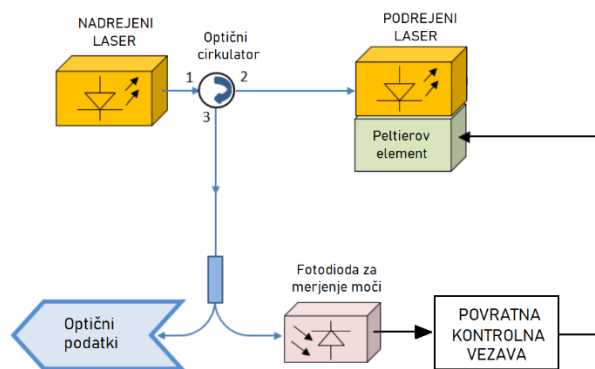
Ena od glavnih lastnosti injekcijske vkleinitve laserja je povečana frekvenčna stabilnost podrejenega laserja. Stanje injekcijske vkleinitve laserja lahko prepoznamo zgolj pod določenimi pogoji, ki so povezani z injicirano optično močjo nadrejenega laserja in frekvenčno razliko med frekvenco nadrejenega laserja in podrejenega laserja ($\Delta\omega$), znano kot frekvenčni odmik. Stabilna vkleinitve 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 vkleinjeno na nihanje nadrejenega laserja. Prostor, ki prikazuje obnašanje podrejenega laserja, imenujemo zemljevid vkleinitve (angl. Locking map) [9]. Injekcijska vkleinitve je nelinearen pojav. Pri nizkih optičnih vhodnih močeh mora biti frekvenčna razlika ($\Delta\omega$) dovolj majhna, da bi prišlo do vkleinitve. S povečevanjem vhodne moči pa si lahko privoščimo večjo frekvenčno razliko med frekvencama nadrejenega in podrejenega laserja. Vkleinitveno področje torej narašča z naraščanjem vhodne optične moči. Zunaj področja vkleinitve prihaja do štirivalovnega mešanja (angl. Four Wave Mixing – FWM) in nedoločenih nihanj (oscilacij). Znotraj vkleinitvenega področja imamo stabilno in nestabilno vkleinitve. Področje stabilnosti je na vkleinitvenem zemljevidu asimetrično in močno odvisno od vhodne optične moči. Pri nizkih vhodnih močeh je stabilna vkleinitve možna le za negativne vrednosti frekvenčne razlike. S povečevanjem vhodne moči pa se področje stabilnosti povečuje in zajame tudi pozitivno frekvenčno razliko [9].

V splošnem velja merilo, da je FP-LD v stabilnem stanju injekcijske vkleinitve tedaj, ko je razmerje zadržitve stranskih rodov (angl. Side Mode Suppression Ratio – SMSR) vsaj 35 dB pod prevladujočim optičnim rodom. Pri praktični izvedbi injekcijske vkleinitve se je potrebno zavedati, da je stabilnost več parametrska funkcija in znotraj vkleinitvenega področja vladajo različni odzivi vkleinjena laserja. Zlasti na mejah vkleinitvenega področja, kjer je SMSR 35 dB, je stabilnost lahko vprašljiva [9].

Žal je frekvenčna stabilnost FP-LD precej odvisna od temperature samega laserskega čipa. To je eden od glavnih tehničnih razlogov, ki preprečuje uporabo injekcijsko vkleinjena FP-LP 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 vkleinjena FP-LD, je nujna za pričetek širše uporabe injekcijsko vkleinjena FP-LD v optičnem dostopnem omrežju [9].

3 Kontrola injekcijske vkleinitve

Kontrola injekcijske vkleinitve je bistvena za učinkovito sinhronizacijo in uporabnost pojava IL v praksi. Pri praktični uporabi v realnem okolju bi namreč zaradi temperaturne odvisnosti laserskega čipa zlahka prišlo do nestabilne vkleinitve oziroma celo nevkleinitve. V strokovni literaturi zasledimo nekaj predlogov tehnik za samodejno stabilizacijo vkleinitve po principu nadzora v povratni zanki (angl. Feedback Control). Ena izmed predlaganih tehnik se nanaša na opazovanje izhodne optične moči, ki s povratno vezavo zagotavlja preprosto in nizko cenovno rešitev. Princip, prikazan na sliki 2, temelji na dejstvu, da izhodna moč podrejenega laserja upada z večanjem frekvenčne razlike $\Delta\omega$, ki je razlika med frekvencama 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 [11]. 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 2. Optične povezave na sliki 2 so modre barve, električne povezave v povratni zanki pa so črne.



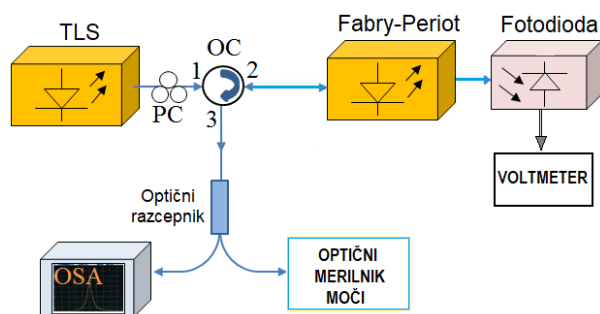
Slika 2. Tehnika stabilizacije vkleinitve FP-LD s pomočjo meritve optične moči vkleinjena laserja.

4 Zasnova poskusa

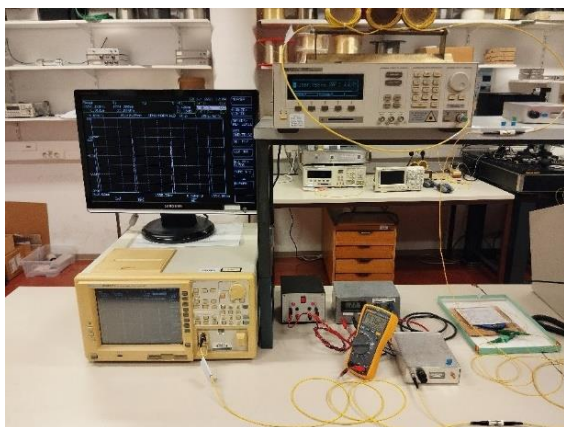
Eksperimentalni del zajema izvedbo ustreznih meritev, ki se nanašajo na tehniko stabilizacije vkleinitve FP-LD s pomočjo opazovanja izhodne optične moči. S pomočjo dobljenih rezultatov smo želeli eksperimentalno preveriti uporabnost te tehnike za stabilizacijo injekcijske vkleinitve. V ta namen smo opazovali spremembo izhodne optične moči v odvisnosti od valovne dolžine in sočasno opazovali spremembo optičnega spektra. Motivacija za to delo se nanaša na iskanje čim bolj dovršene tehnične rešitve za dolgotrajno samodejno stabilizacijo injekcijske vkleinitve FP-LD, ki bi bila uporabna v praktičnem, terenskem okolju.

Na sliki 3 je podan vezalni načrt gradnikov za izvedbo meritve. Svetloba nadrejenega nastavljenega laserskega

vira (angl. Tunable Laser Source – TLS), ki niha na enem valvnodolžinskem rodu, potuje na priključek 1 optičnega cirkulatorja (OC). Ker je pojav IL polarizacijsko odvisen, smo morali svetlobi iz TLS nastaviti primerno polarizacijo. Svetloba iz priključka 2 OC potuje do FP-LD, ki niha na več rodovih. Konstantno temperaturo FP-LD smo vzdrževali prek Peltierovega elementa. Od FP je vlakno povezano na priključek 3 OC, ki je prek optičnega delilnika povezan na optični spektralni analizator (OSA), kjer smo opazovali optični spekter. Poleg tega smo na priključku 3 opazovali tudi izhodno moč na fotodiodi, tako da smo merili padec napetosti s pomočjo merilnika moči. Na sliki 4 je fotografija, ki prikazuje dejansko postavitev optičnih gradnikov v laboratoriju.



Slika 3. Vežalni načrt gradnikov eksperimentalne meritve.



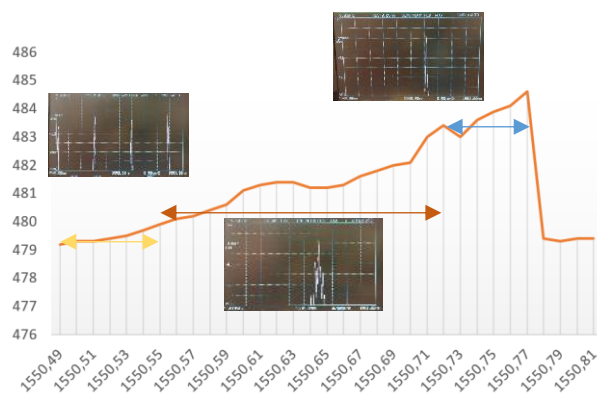
Slika 4. Postavitev optičnih gradnikov v laboratoriju.

5 Rezultati meritev

Rezultate meritev smo pridobili pri konstantni temperaturi FP-LD 22°C. Pred injiciranjem črpalnega signala v FP-LD je napetost prostega teka na merilniku napetosti znašala 476,1 mV. Napetost po priključitvi TLS pa je pri valovni dolžini 1550,50 nm znašala 479,2 mV, kar je posledica pozitivne interference. Moč vzbujalne svetlobe je znašala 6 dBm. Rezultati meritev napetosti v odvisnosti od valovne dolžine TLS so prikazani na sliki 5.

Iz grafa na sliki 5 lahko vidimo, da napetost z naraščanjem valovne dolžine postopoma narašča. Pri valovni dolžini 1550,77 nm je najvišja napetost, ki pa potem takoj upade nazaj na najnižjo vrednost. Gre za strogo mejo. Pri najvišjih vrednostih izhodne moči, na

spektralnem pasu TLS od 1550,72 nm do 1550,77 nm je spekter na OSA kazal na vklejenost FP-LD. To območje je na sliki 5 označeno z modro barvo. Poleg je prikazan spekter iz OSA, kjer je razvidna vklejitev laserja.



Slika 5. Napetost na monitorski fotodiodi v odvisnosti od valovne dolžine nadrejenega laserja.

Na valovno-dolžinskem pasu od 1550,49 nm do 1550,55 nm in na valovnih dolžinah od 1550,78 nm naprej FP-LD ni bila vklejena, kar se na OSA kaže kot prisotnost več rodov oziroma spektralnih komponent. Na sliki 5 je to območje označeno z rumeno puščico.

Na valovno-dolžinskem pasu od 1550,56 nm do 1550,71 nm (na sliki 5 označeno z rdečo puščico) pa je spekter kazal značilnosti nestabilne vklejnitve oziroma štiri-valovnega mešanja, kjer prihaja do nedoločeni oscilacij.

6 Interpretacija rezultatov in sklep

Z meritvami smo preverili možnost za izvedbo stabilizacije injekcijske vklejnitve FP-LD s pomočjo opazovanja izhodne optične moči na fotodiodi. Rezultati potrjujejo primernost te metode, saj je v območju stabilne vklejnitve izhodna moč višja, kot v območju, kjer laser ni vklejen oziroma je območje nestabilne vklejnitve, oscilacij in štiri-valovnega mešanja.

Dolgotrajna in nizkocenovna kontrola stabilizacije injekcijske vklejnitve je tehnološki izziv. Meritve v tem članku odpirajo možnosti za nadaljnje delo in poskuse, kot so:

- meritev polarizacijske odvisnosti,
- meritve vklejnitve na druge oziroma sosednje rodove, kjer se bo preverjala morebitno večji učinek razlike izhodne moči,
- določitev vklejnitvenega zemljevida.

Nadaljnje delo pa se bo nanašalo na izvedbo regulacije v povratni vezavi v električni domeni s pomočjo krmilnika Red Pitaya.

Zahvala

Delo je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru projekta J2- 50072 in raziskovalnega programa P2-0246.

Literatura

- [1] X. Liu, J. Hu, Q. Bian, S. Yi, Y. Ma, J. Shi, Z. Li, J. Zhang, N. Chi, C. Shen. "Recent Advances in Optical Injection Locking for Visible Light Communication Applications," *Photonics*, vol. 10, no. 3, str. 291, 2023.
<https://doi.org/10.3390/photonics10030291>
- [2] M. Z. M. Khan et al., "Injection-Locked Quantum-Dash Laser in Far L-Band 192 Gbit/s DWDM Transmission," *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 5, str. 1-11, 2020, doi: 10.1109/JPHOT.2020.3029026.
- [3] L. Podbregar, A. Blatnik, S. Tomažič, B. Batagelj, "Feasibility Study of Time Synchronization Solution for the Bistatic Synthetic Aperture Radar Using Mobile Platforms", *CoBCCom 2024 & IWSSIP 2024*.
- [4] J. Tratnik, B. Batagelj, "Predstavitev ideje kvantnega šifriranja in pregled osnovnih tehnik kvantnega razdeljevanja ključa," *Elektrotehniški vestnik*, vol. 75, no. 5, str. 257-263, 2008.
- [5] Z. Su, D. Cai, H. Jiang, J. Wang, D. Wang, X. Guo, Z. Li, "Optical injection locking based local oscillator regeneration for continuous variable quantum key distribution," *Opt. Lett.* Vol. 47, no. 5, str. 1287-1290, 2022.
- [6] K. Taofiq R. Paraíso, I. Woodward, G. Davide, V. Marangon, V. Lovic, Y. Zhiliang, A. J. Shields, "Advanced Laser Technology for Quantum Communications," *Advanced Quantum Technologies*. Vol. 4, no. 10, 2021.
- [7] V. Eržen, B. Batagelj. "Rodovno vklejnjena 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.
- [8] Z. Liu, R. Slavík, "Optical Injection Locking: From Principle to Applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, str. 43-59, 1 Jan.1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2945718.
- [9] J. Ratkoceri, "Capacity increase of an optical access network using an injection-locked Fabry-Perot laser" (doktorska dizertacija), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. Ljubljana, 2019.
- [10] V. Eržen, J. Ratkoceri, B. Batagelj, "Tehnike za zagotavljanje stabilnosti injekcijske vklejnitve Fabry-Perot laserske diode." *Zbornik mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference (2022)* str. 127-132.
- [11] 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, str. 618-633, May-Jun. 2009.