



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۵۶۵-۱۰-A

آنالیز جیتر و نویز فاز لیزرهای قفل مد سیلیکونی با لحاظ کردن فیدبک نوری

محمد شکرپور^۱، محمد حسن یآوری^۲

۱-دانشجوی دکتری - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران

۲-استادیار - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران - ایران

چکیده - در این تحقیق با استفاده از معادلات دیفرانسیل تاخیری (DDE)، اثر فیدبک نوری روی دینامیک، نویز فاز و جیتر زمانی لیزر قفل مد مبتنی بر سیلیکون بررسی شده است. نتایج دینامیکی نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات فرکانس تکرار در خارج از نواحی رزونانسی اتفاق می‌افتد. همچنین در این مقاله کاهش نویز فاز و جیتر زمانی در مقایسه با ساختار بدون فیدبک نوری نشان داده شده است که با نتایج تجربی گزارش شده انطباق خوبی دارد.

کلیدواژه- جیتر زمانی، فیدبک نوری، لیزر قفل مد مبتنی بر سیلیکون، نویز فاز

Phase noise and jitter analysis of hybrid silicon mode-locked laser subject to optical feedback

M. Shekarpour¹, M. H. Yavari²

¹PhD Student, ²Assistant Professor, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

mohammad.shekarpour@shahed.ac.ir, mh.yavari@shahed.ac.ir,

Abstract- We study the influence of the optical feedback on dynamics, phase noise and timing jitter of hybrid silicon colliding-pulse mode-locked laser using a delay differential equation (DDE) model. The results of dynamic show that the maximum variation of repetition rate is occurred in outside the main resonance regime. We also find a reduction of phase noise and timing jitter compared to without-optical-feedback structure, which is in good agreement with experimental result.

Keywords: Timing jitter, optical feedback, silicon mode-locked laser, phase noise

پهنای باند فرکانس رادیویی را در یک لیزر قفل مد GHz ۵.۲۵ از ۴۶ KHz به ۱.۱ KHz برسانند [۴].

در چند سال اخیر، پیاده سازی لیزرهای قفل مد در مدارات مجتمع نوری مورد توجه قرار گرفته است [۵]. همچنین با توجه به پایین بودن تلفات موجبرهای سیلیکون فوتونیک، امکان ساخت لیزرهای قفل مد با کاواک‌های خارجی طولی روی تراشه برای فیدبک نوری فراهم شده است.

در این مقاله اثر فیدبک نوری روی نویز فاز و جیتزر ساختار پیشنهاد شده در [۵] توسط معادلات تاخیری بررسی می‌شود. همچنین جیتزر زمانی به ازای تغییرات طول فیدبک و قدرت فیدبک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ساختار لیزر قفل مد با فیدبک نوری

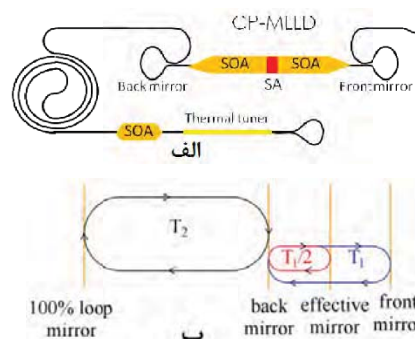
همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. کاواک لیزر در این ساختار شامل دو بخش گین است که توسط ناحیه جاذب از هم جدا شده‌اند. طول کاواک ۳.۹۳۴ mm است که معادل نرخ تکرار پایه ۸.۷ GHz می‌باشد. در دو طرف کاواک از آیینه‌های حلقوی با بازتابندگی ۱۰٪ و ۵۵٪ استفاده شده است. خروجی آیینه حلقوی عقبی وارد خط تاخیری فیدبک شده که در انتهای کاواک فیدبک از آیینه حلقوی با بازتابندگی ۱۰۰٪ استفاده شده است. طول کاواک فیدبک ۳۹.۳۴۳ mm است که دقیقاً ده برابر طول کاواک لیزر می‌باشد. یک تنظیم کننده حرارتی برای کنترل فاز پالس‌های برگشتی در کاواک فیدبک تعبیه شده است و از یک تقویت کننده نوری نیز برای جبران تلفات موجبر استفاده شده است.

مدل تاخیری لیزر قفل مد با فیدبک نوری

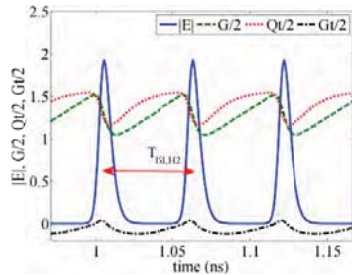
بر اساس مدل پیشنهادی [۶]، در این مقاله از مدل تاخیری برای مطالعه فیدبک نوری استفاده می‌شود. رابطه

مقدمه

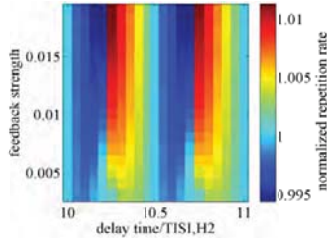
در چندین دهه اخیر منابع نوری مبتنی بر لیزر قفل مد، نقش مهمی در سیستم‌های مخابراتی، کلاک نوری و مبدل‌های نوری آنالوگ به دیجیتال ایفا کرده‌اند. نویز فاز بالا یکی از عوامل محدود کننده کاربردهای لیزر قفل مد است [۱]. یکی از روش‌های کاهش نویز فاز و جیتزر زمانی استفاده از قفل مد هیبریدی است [۲]؛ دست یابی به جیتزر زمانی بسیار پایین با این روش محقق شده است. اما نیاز به اسیلاتورهای الکتریکی با فرکانس بالای پایدار، هزینه این روش را بالا برده است. تزریق نور از طریق یک لیزر دیگر با عرض پهنای باند کم نیز یکی از روش‌های کاهش نویز فاز می‌باشد. با این روش توانسته‌اند برای لیزر قفل مد ۱۰ GHz، عرض پهنای باند فرکانس رادیویی را از چند صد کیلو هرتز به کمتر از یک کیلو هرتز برسانند [۳]. این روش نیز همانند روش قبلی نیاز به منبع خارجی دارد که هزینه پیاده سازی این روش‌ها را بالا برده است. فیدبک نوری به عنوان یک روش ساده و موثر برای کاهش نویز فاز پالس‌های لیزر قفل مد مطرح شده است. این روش نسبت به دو روش قبلی نیاز به استفاده از منبع خارجی ندارد. با کمک فیدبک نوری توانسته‌اند عرض



شکل ۱: الف) ساختار لیزر قفل مد با اثر برخورد پالس و فیدبک نوری بر بستر سیلیکون [۵]، ب) زمان‌های تاخیر متناظر مورد استفاده در مدل DDE.



شکل ۲: قطار پالس‌های تولید شده در هارمونیک دوم.



شکل ۳: نرخ تکرار پالس‌های ساختار فیدبک نوری به ازای تغییرات طول و قدرت فیدبک (نسبت به نرخ تکرار ساختار بدون فیدبک نرمالیزه شده است).

عوامل بهبود دهنده عرض خط در ناحیه گین و جاذب هستند.

نتایج شبیه سازی

با توجه به اثر CPM، پالس‌های تولیدی در هارمونیک دوم و با نرخ تکرار ۱۷.۴ GHz می‌باشند (شکل ۲). زمان دوره تناوب پالس‌ها $T_{ISI,H2}$ را می‌توان به دو بخش آهسته و سریع تقسیم نمود. بخش آهسته مربوط به ناحیه‌ای است که شدت میدان در آن تقریباً صفر ($|E| \approx 0$) است. در این بخش ناحیه گین و جذب بازیابی می‌شوند. اما در بخش سریع، شدت میدان الکتریکی بالا است. همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است؛ زمان بازیابی ناحیه جذب کمتر از زمان بازیابی ناحیه گین است که این خود جزو شرایط لازم برای عملکرد قفل مد است.

تغییرات نرخ تکرار نرمالیزه شده پالس‌ها به ازای تغییرات طول و قدرت فیدبک در شکل ۳ نشان داده شده است.

(۱)، پوش دامنه میدان (E) را توصیف می‌کند. در این رابطه اثر فیدبک نوری توسط کوپلینگ کاواک لیزر با حلقه فیدبک مدل شده است. همچنین اثر گریتینگ لحظه‌ای، که به علت برخورد پالس‌ها در ناحیه جاذب ایجاد می‌شود، توسط آئینه موثر در مرکز ناحیه جاذب مدل شده است. رابطه‌های نهایی برای پوش دامنه میدان (E) گین (G) و جذب (Q) قابل اشباع به قرار زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \gamma^{-1} \dot{E}(t) = & -E(t) + R_1(t - T_1/2) e^{-i\Delta\Omega T_1} E(t - T_1/2) \\ & + R_2(t - T_1) e^{-i\Delta\Omega T_1} E(t - T_1) + \sum K e^{-i(C + \Delta\Omega(T_1 + IT_2))} \\ & \times R_3(t - T_1 - IT_2) E(t - T_1 - IT_2) + D \xi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{G}(t) = J_g - \gamma_g G(t) - e^{-Q(t)} (e^{G(t)} - 1) |E(t)|^2 \quad (2)$$

$$\dot{Q}(t) = J_q - \gamma_q Q(t) - r_s e^{-Q(t)} (e^{G(t)} - 1) |E(t)|^2 \quad (3)$$

$$R_i(t) = \sqrt{k_i} e^{1/2(1-i\alpha_g)G(t) - 1/2(1-i\alpha_q)Q(t)} \quad i = 1, 2, 3$$

J_g و J_q به ترتیب گین و جذب اشباع نشده هستند. طول عمر حامل‌ها در ناحیه گین و جاذب با $1/\gamma_g$ و $1/\gamma_q$ معرفی شده‌اند. نسبت انرژی اشباع در ناحیه گین و جذب است. T_1 و T_2 به ترتیب مدت زمان رفت و برگشت کاواک لیزر و فیدبک می‌باشند. در معادلات تاخیری پهنای باند لیزر (FWHM) با γ بیان شده است. K توان فیدبک و I تعداد رفت و برگشت در حلقه فیدبک است. C فاز نور است که به علت یک بار رفت و برگشت در حلقه فیدبک ایجاد شده است. نویز تابش خود به خودی توسط $\xi(t)$ که یک عدد تصادفی مختلط با توزیع گاوسین و توان D می‌باشد، مدل شده است. $R_i(t)$ میزان تقویت و تلفات کاواک مربوطه را در یک بار رفت و برگشت توصیف می‌کند. α_g و α_q نیز

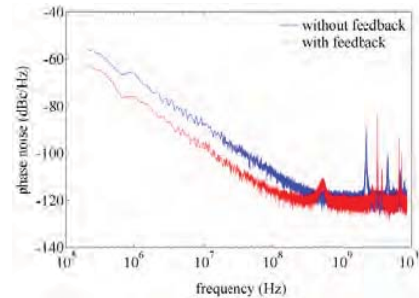
موثر ساختار بدون فیدبک نرمالیزه شده است. مطابق شکل ۵، در نواحی رزونانسی، جیتر زمانی با افزایش توان فیدبک روند کاهشی دارد که با نتایج تجربی گزارش شده در [۵]، همخوانی دارد.

نتیجه گیری

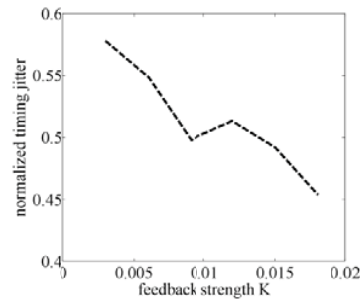
در اینجا تاثیر فیدبک نوری بر دینامیک، نویز فاز و جیتر زمانی به کمک آنالیز عددی بررسی شده است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی نشان می دهد در نواحی غیر رزونانسی، تغییرات نرخ تکرار پالسها نسبت نواحی رزونانسی شدیدتر است. همچنین نویز فاز و جیتر زمانی در ساختار با فیدبک نوری نسبت به ساختار بدون فیدبک کاهش یافته است.

مرجع ها

- [1] D., Arsenijević *et al.*, "Phase noise and jitter reduction by optical feedback on passively mode-locked quantum-dot lasers", *Applied Physics Letters*, Vol. 103, No. 23, pp. 231101, 2013.
- [2] M., Kuntz *et al.*, "High-speed mode-locked quantum-dot lasers and optical amplifiers", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 9, pp. 1767-1778, 2007.
- [3] T., Habruseva *et al.*, "Quantum-dot mode-locked lasers with dual-mode optical injection", *Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 6, pp. 359-361, 2010.
- [4] C.-Y., Lin *et al.*, "RF linewidth reduction in a quantum dot passively mode-locked laser subject to external optical feedback", *Applied Physics Letters*, Vol. 96, No. 5, pp. 051118, 2010.
- [5] S., Srinivasan *et al.*, "Hybrid silicon colliding-pulse mode-locked lasers with on-chip stabilization", *Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 21, No. 6, pp. 24-29, 2015.
- [6] A.G., Vladimirov and D., Turaev, "Model for passive mode locking in semiconductor lasers", *Physical Review A*, Vol. 72, No. 3, pp. 033808, 2015.
- [7] J., Mulet and J., Mork, "Analysis of timing jitter in external-cavity mode-locked semiconductor lasers", *quantum electronics*, Vol. 42, No. 3, pp. 249-256, 2006.



شکل ۴: نویز فاز برای ساختارهای بدون فیدبک و با فیدبک نوری در ناحیه رزونانسی $T_2/T_{ISI,H2}=10$ به ازای $K=0.018$.



شکل ۵: جیتر زمانی موثر در ساختار با فیدبک نوری به ازای مقادیر مختلف توان فیدبک در ناحیه رزونانسی $T_2/T_{ISI,H2}=10$

همانطوری که مشاهده می شود به ازای تغییر قدرت فیدبک، تغییری در نرخ تکرار ایجاد نشده ولی با تغییر طول فیدبک، در نواحی ای که نسبت زمان تاخیر فیدبک (T_2) به زمان تناوب پالسها ($T_{ISI,H2}$) عدد صحیحی نباشد. (نواحی غیر رزونانسی)، نرخ تکرار دامنه تغییرات ۱۰٪ دارد.

محاسبات نویز فاز و جیتر زمانی موثر بر اساس روش بیان شده در [۷] و در ناحیه رزونانسی $T_2/T_{ISI,H2}=10$ می باشد. محدوده انتگرالی محاسبه جیتر زمانی موثر از 0.5 MHz تا 5 GHz می باشد. نویز فاز برای ساختارهای بدون فیدبک و با فیدبک نوری به ازای $K=0.018$ در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می شود، نویز فاز تقریباً 5 dB نسبت به ساختار بدون فیدبک کاهش یافته است. همچنین جیتر زمانی موثر در ساختار با فیدبک نوری به ازای مقادیر مختلف توان فیدبک در شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه جیتر در شکل ۵ با جیتر