بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی و شبیه‌سازی تاثیر نامیزانی کاواک و فاکتور پهنای خط بهبودیافته روی رفتار واهلشی لیزر نیم رسانا (VCSEL) با تزریق اپتیکی خارجی

غفور هاشم وند[۱]، ساسان مرادی[۱]، سعیده اسفندیارپور[۱]، رضا خردمند[۲] و محمدآقا بلوری زاده[۱]

[۱]گروه فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

[۲]گروه فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز

چکیده — در این مقاله تاثیر پارامتر نامیزانی کاواک و فاکتور پهنای خط بهبود یافته روی دوپایایی و ناپایداری های هوپف و تورینگ درمیکرومشدد نیمرسانا در حضور تزریق اپتیکی خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی انجام شده برای لیزر نشرکننده از سطح با کاواک عمودی، حاکی از آن است که نامیزانی کاواک و بطور متناظر فاکتور پهنای خط بهبود یافته تاثیر زیادی روی دوپایایی، ناحیه تورینگ و دامنه نوسان های واهلشی لیزر دارد و با تغییر این پارامترها ناحیه‌ای که نوسانات واهلشی ناپایدار/ پایدار را در بر می گیرد مطالعه می‌شود. همچنین نشان داده می شود که نامیزانی کاواک در مقایسه با فاکتور پهنای خط بهبود یافته پارامتر مهم‌تری در دینامیک لیزر نیمرسانا می باشد.

کلید واژه- نوسانات واهلشی، دوپایایی، ناپایداری هوپف، قفل شدگی تزریق.

.

Investigation and Simulation of Effect of Cavity Detuning and Line Width Enhancement Factor Effects on the Relaxation Characteristics of an Optically Injected VCSEL

[1]Ghafour Hashemvand, [1]Sasan Moradi, [1]Saideh Esfandiarpour, [2] Reza Kheradmand, [1]Mohammad Agha Blorizadeh.

[1] Photonics Group, Kerman Graduate University of Technology, Kerman, Iran

[2] Photonics Group, Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper, investigation and simulation of the effect of cavity detuning parameter and line width enhancement factor of an optically injected semiconductor laser on the bi-stable and Hopf and Turing instability have been carried out. simulations of vertical-cavity surface-emitting laser show that changes in the detuning parameter and line width enhancement factor parameter value have a considerable effect not only on the bi-stability of the system, but also on the instabilities of the system, namely Hopf and Turing instability. Region which contains unstable/stable relaxation oscillations is studied by changing these parameters. It is also shown that the cavity detuning is more important in comparison with the line width enhancement factor in dynamic of semiconductor laser.

Keywords: Relaxation Oscillation, Bistability, Hopf Instability, Injection Locking

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-03]

۱- مقدمه

لیزرهای نشرکننده از سطح با کاواک عمودی (VCSEL) یکی از منابع نوری پراهمیت در بحث فناوری اطلاعات نوری به حساب می‌آید [۱]. این لیزرها به شدت در مقابل اثرات خارجی حساس هستند. تزریق اپتیکی خارجی و فیدبک نوری خارجی از این جمله اثراتی هستند که موجب ناپایدار شدن خروجی لیزر می‌شود [۲]. در لیزرهای نیمرسانا اختلال‌های خارجی بصورت تزریق اپتیکی [۳] فیدبک اپتیکی و فیدبک اپتوالکترونیک [۴و۵] انجام می‌شود و این اختلال خارجی، خروجی لیزر را ناپایدار کرده و باعث نوسان آن می‌شود. لیزرهای نیمرسانا با تزریق اپتیکی یک سیستم آزمون بسیار خوب برای تحقیق و بررسی دینامیک غیرخطی می‌باشد.

قفل‌شدگی تزریق یک روش موثر برای همزمان کردن یک (یا چندین) نوسانگر آزاد با لیزر اصلی نگهدارنده می‌باشد که این قفل‌شدگی تزریق به واسطه ناپایداری هوپف اتفاق می‌افتد. وجود ناپایداری‌ها نقش عمده‌ای در به وجود آوردن ساختارهای محلی دارد. از جمله این ناپایداری‌ها می‌توان به ناپایداری هوپف و تورینگ اشاره کرد. یکی از روشهای بررسی ناپایداری، تحلیل پایداری خطی است که با مطالعه رفتار سیستم در برابر نوسانات کوچک حول جوابهای ایستا انجام می‌گیرد. به طوری که در ناحیه ناپایداری هوپف بخاطر نامیزانی موجود بین پرتوی ترزیقی و رزونانس کاواک نوسانات نامیرای واهلشی را خواهیم داشت و در خارج از این ناحیه بخاطر وجود قفل‌شدگی این نوسانات به سرعت میرا شده [۶] و به روی مشخصات لیزر اصلی قفل می‌شود.

نامیزانی کاواک، اختلاف فرکانس بین لیزر اصلی و فرکانس رزونانس کاواک مشدد است که اهمیت زیادی در لیزر های نیمرسانا دارد و از پارامترهای اصلی کنترل سیستم دینامیکی مورد مطالعه می‌باشد. پارامتر کنترلی دیگر لیزر نیمرسانا، مشخصه بهبود یافته پهنای خط می‌باشد. مشخصه بهبود یافته پهنای خط در اصل توسط هنری برای توضیع پهن‌شدگی پهنای خط بیان شده است [۷]. مشخصه بهبودیافته پهنای خط نیز پارامتر مهم و بحرانی در لیزر نیمرسانا می‌باشد و آن مربوط به اثرات تغییر ضریب شکست، که به وسیله تغییر در جریان تزریق القا می‌شود، روی خصوصیات دینامیکی لیزر نیمرسانا می‌باشد[۸] که به صورت:

$$a = -\frac{4p}{l}\frac{dn/dN}{dg/dN}$$

تعریف می‌شود و در آن dn/dN و dg/dN به ترتیب دیفرانسیل ضریب شکست و دیفرانسیل بهره می‌باشند.

۲- معادلات ریاضی

سیستم مورد مطالعه یک میکرومشدد نیمرسانا با کاواک عمودی است که دارای سطح مقطع پهن بوده و از چاه‌های کوانتومی چندگانه ساخته شده است. معادلات ماکسول ـ بلاخ تعمیم یافته سه معادله کوپل شده‌ی میدان الکتریکی، پلاریزاسیون و چگالی حاملین [۹] بصورت

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= \sigma(P - E_I - (1+i\theta) + i\nabla^2 E)\\ \frac{dP}{dt} &= \Gamma(1+i\Delta)\left[(1-i\alpha)(1-\beta D)DE - P\right]\\ \frac{dD}{dt} &= -b\left[\frac{1}{2}(E^*P + EP^*) + D - J - d\nabla^2 D\right]\end{aligned} \qquad (۱)$$

هستند که در آن J پارامتر پمپاژ یا جریان تزریقی، b و σ آهنگهای واهلش و β ضریب برازش مرتبه دوم، E_I میدان ورودی، θ نامیزانی کاواک و α فاکتور بهبود یافته پهنای باند است. همچنین Δ و Γ نشان دهنده پذیرفتاری موثر می‌باشد. جدول (۱) مقادیر پارمترهای به کار رفته را نشان می دهد. رفتار دینامیکی سیستم با استفاده از بسته محاسباتی Matcount مطالعه شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامتر ها

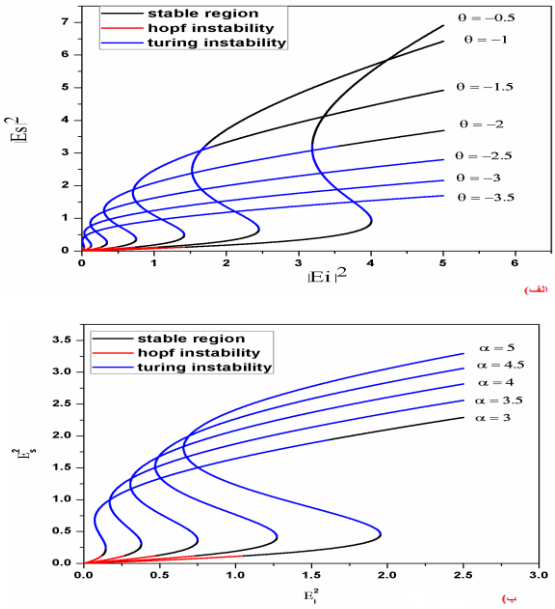
پامترها	α	b	σ	τ_d	τ_p	θ	d
مقادیر	4	10^{-4}	4×10^{-2}	$100fs$	$2.5ps$	−2	0.052

۳- نتایج عددی

در این مقاله اثر θ (نامیزانی کاواک) و α (فاکتور پهنای خط بهبود یافته) روی دینامیک سیستم به منظور یافتن موثرترین پارامتر روی دوشاخگی هوپف مورد بررسی قرار می‌گیرد. حالت پایای همگن با مساوی صفر قرار دادن جملات زمانی و لاپلاسی در معادلات ماکسول ـ بلاخ تعمیم یافته به دست می‌آید و با در نظر گرفتن تحلیل پایداری خطی ناحیه ناپایداری تورینگ و ناپایداری هوپف به دست آمده و منحنی میدان های ورودی و خروجی به ازای نامیزانی کاواک (θ) و مشخصه بهبود یافته پهنای

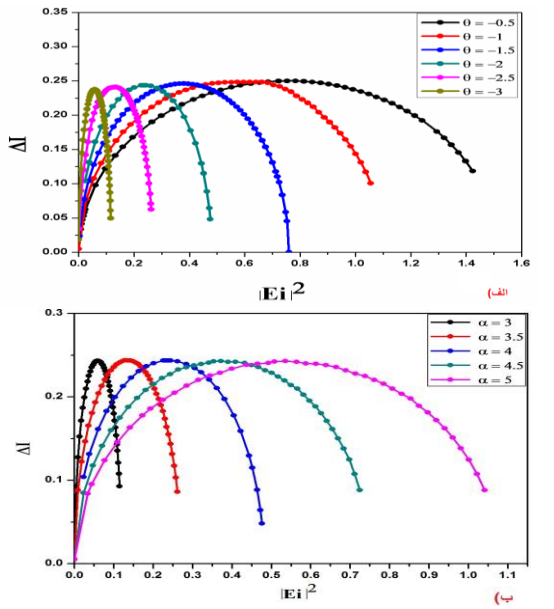
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-03]

خط (α) مختلف در حالت ۱۰٪ بالای آستانه برای برازش مرتبه دوم رسم شده است (نمودار ۱ را ببینید).



شکل ۱: منحنی دوپایایی به ازای تغییر پارامتر الف) نامیزانی کاواک ب) فاکتور پهنای خط بهبودیافته، که شدت ورودی را به شدت خروجی مربوط می کند؛ $J=1.288, \alpha=4, d=0.052, \beta=0.125$

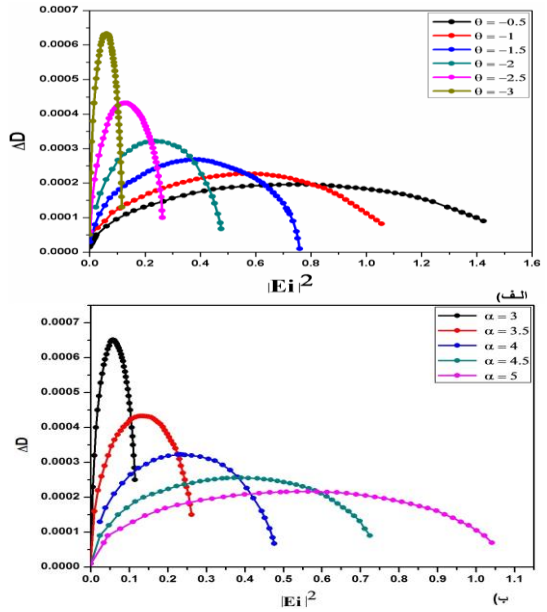
نامیزانی کاواک و مشخصه بهبود یافته پهنای خط تاثیر زیادی روی دوپایایی و بصورت متناظری روی ناحیه تورینگ دارد و افزایش مقدار θ در جهت منفی باعث ایجاد دوپایایی در انرژی ورودی پایین‌تری می‌شود و ناحیه تورینگ نیز در نمودار دوپایایی بیشتر و ناحیه پایدار شاخه پایین کمتر می‌شود تا جایی که در حالت $\theta=-3.5$ ناحیه تورینگ با ناحیه هوپف همپوشانی پیدا می‌کند. با افزایش α وسعت ناحیه دوپایایی و تورینگ افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش میزان مطلق θ دوپایایی در شدت های بالاتر بوجود می‌آید و عرض ناحیه دوپایایی کاهش می‌یابد ولی با افزایش α هم دوپایایی در شدت های بالاتر بوجود می‌آید و هم عرض این ناحیه افزایش می‌یابد.در ناحیه هوپف نوسانات واهلشی نامیرا هستند. دامنه این نوسانات با افزایش شدت میدان ورودی، بخاطر بیشتر شدن قدرت زنش نامیزانی، افزایش و با نزدیک شدن به نقطه‌ی قفل‌شدگی کاهش می‌یابد. بدیهی است که بعد از نقطه‌ی قفل‌شدگی فاز میدان خروجی با میدان ورودی یکسان بوده و دامنه‌ی نوسانات میدان خروجی به صفر خواهد رسید. نمودار دامنه نوسانات شدت بر حسب شدت ورودی به ازای نامیزانی کاواک و مشخصه بهبود یافته پهنای خط مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: منحنی دامنه نوسان شدت خروجی نسبت به شدت ورودی به ازای الف: نامیزانی کاواک ب: فاکتور پهنای خط بهبودیافته مختلف؛ $J=1.288, \alpha=4, d=0.052, \beta=0.125$

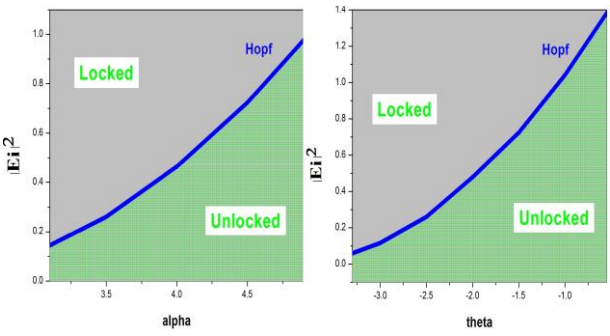
از شکل ۲ دیده می‌شود که با کاهش قدرمطلق نامیزانی کاواک و افزایش مشخصه بهبود یافته پهنای خط، گشودگی نمودار سهمی وار در راستای محور شدت ورودی بیشتر می‌شود و خروجی لیزر در محدوده شدت ورودی بیشتری، نوسان می‌کند یا به عبارت دیگر با افزایش θ و α ماکزیمم نوسان شدت در شدت ورودی کمتری اتفاق می‌افتد و ماکزیمم نوسان شدت برای تمام حالتهای θ و α یکسان و تقریباً برابر ۰،۲۵ می‌باشد. با مقایسه دو نمودار می‌بینیم که با تغییر نامیزانی کاواک، نوسانات واهلشی در محدوده شدت ورودی بیشتری نامیرا می شوند. دامنه نوسان جمعیت حاملین و دامنه نوسان فاز میدان خروجی به ازای تغییر پارامتر نامیزانی کاواک و مشخصه بهبود یافته پهنای خط برای ۱۰٪ بالای آستانه و برازش مرتبه دوم در شکل ۳ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شوددر شکل ۳ الف افزایش مقدار θ در جهت منفی باعث می‌شود که همانند نمودار دامنه شدت، گشودگی نمودار سهمی وار در راستای محور شدت ورودی کمتر شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-03]



شکل ۳: منحنی دامنه نوسان جمعیت حاملین نسبت به شدت ورودی به ازای الف: نامیزانی کاواک ب: فاکتور پهنای خط بهبودیافته : مختلف و $J=1.288, \alpha=4, d=0.052, \beta=0.125$

در فضای پارامتری می توان دو ناحیه ی به اصطلاح قفل شده و قفل نشده را از هم جدا کرد. شکل ۴ این نواحی را در فضای پارامتری $|E_i|^2-\theta$, $|E_i|^2-\alpha$ نشان می‌دهد که از آن طریق می‌توان ورودی‌های لازم برای داشتن نوسانات میرا/نامیرا را انتخاب کرد. این شکل در واقع نقطه ی وقوع دوشاخگی هوپف را که توسط پارامترهای θ و α تعیین می شود برای مقادیر مختلف شدت میدان ورودی که آن نیز یکی از پارامترهای کنترل کننده ی سیستم است، نشان می دهد.



شکل ۴: نواحی قفل شده/ نشده در فضای $|E_i|^2-\theta$, $|E_i|^2-\alpha$

۴- نتیجه‌گیری

در این کار یک لیزر نیمرسانای نشرکننده از سطح با کاواک عمودی با تزریق اپتیکی خارجی در نظر گرفته شده است که دینامیک آن توسط معادلات ماکسول-بلاخ توصیف می شود. حضور تزریق خارجی باعث بروز نوسانات واهلشی نامیرا (در ناحیه قفل نشده) می‌شود به خاطر اینکه لیزرهای نیمرسانا در حوزه‌های وسیعی از کاربردها بکار برده می‌شوند نوسانات واهلشی از اهمیت خاصی برخوردار است که بایستی مکانیزم‌های فیزیکی این نوسانات و تأثیر این رفتار را درک کنیم. دامنه این نوسانات با افزایش شدت ورودی به خاطر بیشتر شدن قدرت زنش نامیزانی افزایش یافته و با نزدیک شدن به نقطه قفل‌شدگی کاهش می‌یابد. سعی ما در این پژوهش بر آن بود که تاثیرات نامیزانی کاواک و فاکتور پهنای خط بهبود یافته روی نوسانات واهلشی نامیرا را بررسی کنیم. پس از مقایسه مشاهده شد مقدار نامیزانی کاواک پارامتر موثری در دینامیک سیستم و نوسانات واهلشی نامیرا به شمار می‌رود. با تغییر نامیزانی کاواک، نوسانات واهلشی در محدوده شدت ورودی بیشتری نامیرا می‌شوند. نوسانات واهلشی نامیرا، که بواسطه‌ی حضور تزریق خارجی از لحاظ دامنه و فرکانس ارتقا یافته‌اند، می‌توانند کاربرد های متنوعی در مدولاسیون و انتقال داده پیدا کنند، چرا که پهنای باند مدولاسیونی بواسطه‌ی قفل‌شدگی بهبود می-یابد و این موضوع مطالعات آتی می‌باشد.

مراجع

[1] Iga K., *Surface-emitting laser—its birth and generation of new optoelectronics fields*, **IEEE J. Quant. Electron**, 6 (2000) 1201–1215.

[2] Chow W., and Koch S., *Semiconductor-Laser Fundamentals*, Springer, 1998.

[3] Hwang S. K., Liu J. M., *Dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser*, **Opt. Commun**, 183 (2000) 195–205.

[4] Lin F. Y., Liu J. M., *Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback*, **Opt. Commun**, 221 (2003) 173-180.

[5] Lin F. Y., Liu J. M., *Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback*, **IEEE J. Quant. Electron**, **39 (2003)** 562–567.

[6] Wieczorek S., et al, *The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers*, **Phys. Rep**, 416 (2005) 1-128.

[7] Henry C., *Theory of the line width of semiconductor lasers*, **IEEE J. Quantum Electron,** 18 (1982) 259–264.

[8] Ehrhardt J., et al., *Interferometric measurement of the line width enhancement factor of a 1:55 μm strained multi-quantum-well InGaAs/In-GaAsP amplifier*, **IEEE Photon. Technol. Lett.** 4 (1992) 1335–1338.

[9] Lugiato L. A., et al., *Cavity Solitons in a driven VCSEL above Threshold*, **IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron**, **12 (2006)** 339-351.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-03]