



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 هاشم‌وند<sup>۱</sup>، ساسان مرادی<sup>۱</sup>، سعیده اسفندیارپور<sup>۱</sup>، رضا خردمند<sup>۲</sup> و محمدآقا بلوری زاده<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

<sup>۲</sup>گروه فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی، دانشگاه تبریز

چکیده — در این مقاله تاثیر پارامتر نامیزانی کاواک و فاکتور پهنای خط بهبود یافته روی دوپایایی و ناپایداری های هوپف و تورینگ در میکرومشد 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 می‌شود که نامیزانی کاواک در مقایسه با فاکتور پهنای خط بهبود یافته پارامتر مهم‌تری در دینامیک لیزر نیم‌رسانا می‌باشد.

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

<sup>1</sup>Ghafour Hashemvand, <sup>1</sup>Sasan Moradi, <sup>1</sup>Saideh Esfandiarpour, <sup>2</sup>Reza Kheradmand, <sup>1</sup>Mohammad Agha Blorzadeh.

<sup>1</sup> Photonics Group, Kerman Graduate University of Technology, Kerman, Iran

<sup>2</sup> 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

## ۱- مقدمه

الفا می‌شود، روی خصوصیات دینامیکی لیزر نیم‌رسانا می‌باشد [۸] که به صورت:

$$a = -\frac{4p}{1} \frac{dn/dN}{dg/dN}$$

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 - بلاخ تعمیم یافته سه معادله کوپل شده‌ی میدان الکتریکی، پلاریزاسیون و چگالی حاملین [۹] بصورت

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

هستند که در آن  $J$  پارامتر پمپاژ یا جریان تزریقی،  $b$  و  $\sigma$  آهنگهای واهلش و  $\beta$  ضریب برازش مرتبه دوم،  $E_I$  میدان ورودی،  $\theta$  نامیزانی کاواک و  $\alpha$  فاکتور بهبود یافته پهنای باند است. همچنین  $\Delta$  و  $\Gamma$  نشان دهنده پذیرفتاری موثر می‌باشد. جدول (۱) مقادیر پارامترهای به کار رفته را نشان می‌دهد. رفتار دینامیکی سیستم با استفاده از بسته محاسباتی Matcount مطالعه شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترها

پارامترها	$\alpha$	$b$	$\sigma$	$\tau_d$	$\tau_p$	$\theta d$
مقادیر	4	$10^{-4}$	$4 \times 10^{-2}$	100fs	2.5ps	-2 0.052

## ۳- نتایج عددی

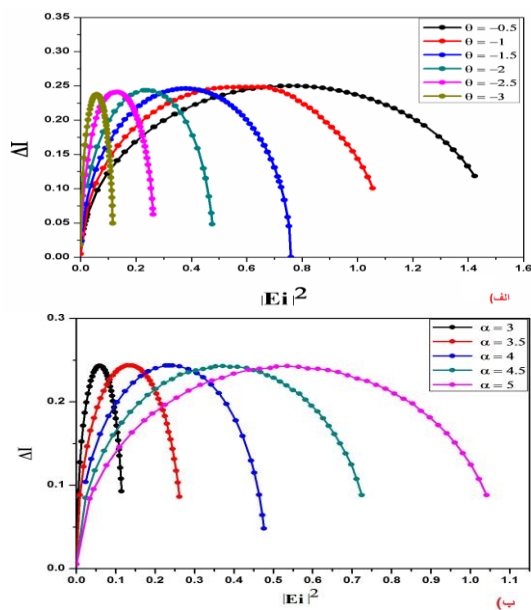
در این مقاله اثر  $\theta$  (نامیزانی کاواک) و  $\alpha$  (فاکتور پهنای خط بهبود یافته) روی دینامیک سیستم به منظور یافتن موثرترین پارامتر روی دوشاخگی هویف مورد بررسی قرار می‌گیرد. حالت پایای همگن با مساوی صفر قرار دادن جملات زمانی و لاپلاسی در معادلات ماکسول - بلاخ تعمیم یافته به دست می‌آید و با در نظر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

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 هویف اتفاق می‌افتد. وجود ناپایداری‌ها نقش عمده‌ای در به وجود آوردن ساختارهای محلی دارد. از جمله این ناپایداری‌ها می‌توان به ناپایداری هویف 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 هویف بخاطر نامیزانی موجود بین پرتوی تزریقی 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 لیزرهای 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 توضیح پهن‌شدگی پهنای خط بیان شده است [۷]. مشخصه بهبود یافته 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

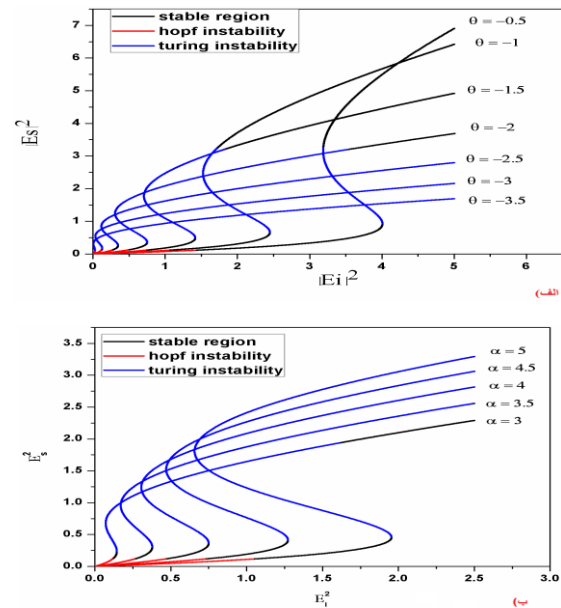
شدت ورودی به ازای نامیزانی کاواک و مشخصه بهبود یافته پهنای خط مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: منحنی دامنه نوسان شدت خروجی نسبت به شدت ورودی به ازای الف: نامیزانی کاواک ب: فاکتور پهنای خط بهبود یافته 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  $\theta$  و  $\alpha$  ماکزیمم نوسان شدت در شدت ورودی کمتری اتفاق می‌افتد و ماکزیمم نوسان شدت برای تمام حالت‌های  $\theta$  و  $\alpha$  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 می‌شوند. 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 می‌شود در شکل ۳ الف افزایش مقدار  $\theta$  در جهت منفی باعث می‌شود که همانند نمودار دامنه شدت، گشودگی نمودار سهمی وار در راستای محور شدت ورودی کمتر شود.

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



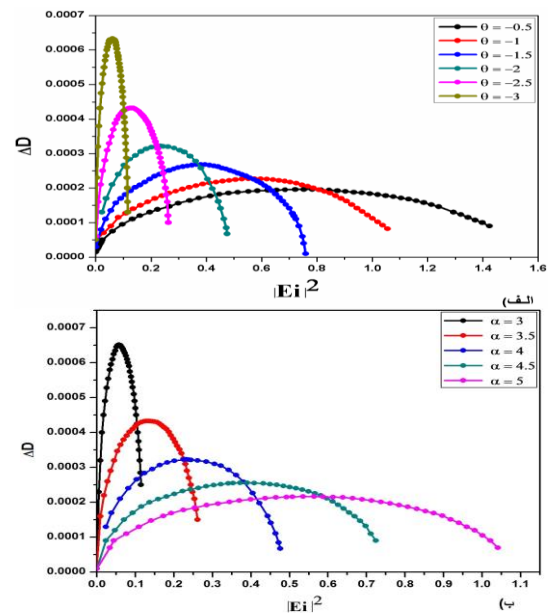
شکل ۱: منحنی دوپایایی به ازای تغییر پارامتر الف) نامیزانی کاواک ب) فاکتور پهنای خط بهبود یافته، که شدت ورودی را به شدت خروجی مربوط می‌کند؛  $J = 1.288, \alpha = 4, d = 0.052, \beta = 0.125$

نامیزانی کاواک و مشخصه بهبود یافته پهنای خط تاثیر زیادی روی دوپایایی و بصورت متناظری روی ناحیه تورینگ دارد و افزایش مقدار  $\theta$  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 هوف همپوشانی پیدا می‌کند. با افزایش  $\alpha$  وسعت ناحیه دوپایایی و تورینگ افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش میزان مطلق  $\theta$  دوپایایی در شدت‌های بالاتر بوجود می‌آید و عرض ناحیه دوپایایی کاهش می‌یابد ولی با افزایش  $\alpha$  هم دوپایایی در شدت‌های بالاتر بوجود می‌آید و هم عرض این ناحیه افزایش می‌یابد. در ناحیه هوف 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

توصیف می شود. حضور تزریق خارجی باعث بروز نوسانات واهلشی نامیرا (در ناحیه قفل نشده) می شود به خاطر اینکه لیزرهای نیمرسانا در حوزه های وسیعی از کاربردها بکار برده می شوند نوسانات واهلشی از اهمیت خاصی برخوردار است که بایستی مکانیزم های 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 قفل شدگی کاهش می یابد. سعی ما در این پژوهش بر آن بود که تأثیرات 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 می رود. با تغییر نامیزانی کاواک، نوسانات واهلشی در محدوده شدت ورودی بیشتری نامیرا می شوند. نوسانات واهلشی نامیرا، که بواسطه ی حضور تزریق خارجی از لحاظ دامنه و فرکانس ارتقا یافته اند، می توانند کاربرد های متنوعی در مدولاسیون و انتقال داده پیدا کنند، چرا که پهنای باند مدولاسیونی بواسطه ی قفل شدگی بهبود می یابد و این موضوع مطالعات آتی می باشد.

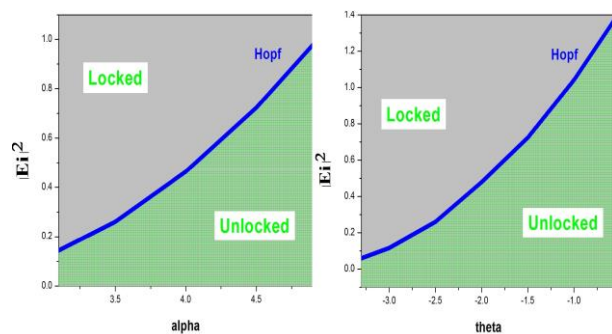
### مراجع

- [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] Wicczorek 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 nm 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.



شکل ۳: منحنی دامنه نوسان جمعیت حاملین نسبت به شدت ورودی به ازای الف: نامیزانی کاواک ب: فاکتور پهنای خط بهبود یافته : 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  $\alpha, \theta$  نشان می دهد که از آن طریق می توان ورودی های لازم برای داشتن نوسانات میرا/نامیرا را انتخاب کرد. این شکل در واقع نقطه ی وقوع دوشاخگی هوفپ را که توسط پارامترهای  $\alpha$  و  $\theta$  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/ قفل نشده در فضای  $\alpha, \theta, |E_i|^2$

### ۴- نتیجه گیری

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