

## تحلیل اثر قفل تزریقی در لیزرهای آبشاری دو طول موجی مادون قرمز میانی

سمیه کاویان<sup>۱</sup>، محمد محسن شیخی<sup>۲</sup>، حامد باغبان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی فناوریهای نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده - در این مقاله تحلیل و مدلسازی اثر قفل تزریقی در لیزرهای آبشاری کوانتومی دو طول موجی در محدوده مادون قرمز میانی ارائه شده است. بر اساس تحلیل تئوری معادلات نرخ، دینامیک لیزرهای آبشاری کوانتومی دو طول موجی مادون قرمز میانی در اثر تزریق نور توصیف شده است. نتایج نشان می دهد پهنای باند مربوط به تابش با طول موج  $\lambda_1$  در حالتی که تزریق نداریم  $2/34$  گیگا هرتز است و در نسبت تزریق های  $-10$  و  $0$  و  $10$  دسی بل، افزایش یافته و به ترتیب  $6/33$ ،  $15/04$  و  $28/63$  گیگاهرتز می شود. با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط پهنای باند کاهش و پیک افزایش می یابد. با افزایش نسبت تزریق توان خروجی مربوط به آن تابش افزایش می یابد. همچنین جریان آستانه مربوط به تابش با طول موج  $\lambda_1$ ، با افزایش نسبت تزریق به تابش با طول موج  $\lambda_2$  تا  $10$  دسی بل تا  $1/8$  برابر افزایش می یابد.

کلید واژه- پهنای باند تلفیق، قفل تزریقی، لیزر آبشاری

## Analysis the Effect of Injection Locking on Dual-wavelength Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers

Somaye Kavian<sup>1</sup>, Mohammad Mohsen Sheikhi<sup>2</sup>, Hamed Baghban<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering- Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- The analysis and modeling of injection locking effect on dual-wavelength mid-infrared quantum cascade lasers has been presented in this article. Based on analytical solution of the rate equations, the dynamics of optically injection-locked dual-wavelength quantum cascade lasers is described. It is found that strong injection level of  $\lambda_1$  enhances the modulation bandwidths compared to the free-running case (2.34 GHz), which are 6.33 GHz, 15.04 GHz, and 28.63 GHz for injection ratios of -10 dB, 0 dB, and 10 dB, respectively. A large LEF reduces the bandwidth and increase the peak magnitude. Calculations demonstrate that the output power can be enhanced with a high injection ratio. Also, the threshold current of  $\lambda_1$  enhances about 1.8 times with a high injection ratio of  $\lambda_2$ .

Keywords: Injection locking, Quantum cascade laser, Modulation bandwidth

## ۱- مقدمه

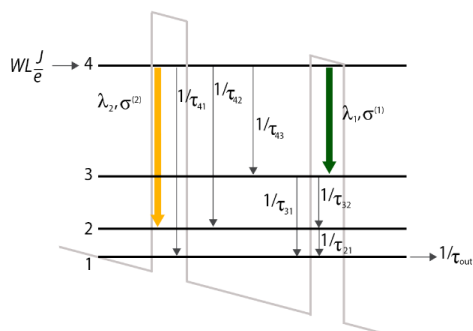
لیزرهای آبخاری کوانتومی یکی از مهم ترین منابع نوری بویژه در طول موج های مادون قرمز میانی و دور هستند. در این لیزرها، فوتون ها از طریق گذار بین زیرنوارهای موجود در نوار هدایت گسیل می شوند. تولید همزمان چند طول موج در لیزرهای آبخاری کوانتومی توجه زیادی را در سال های اخیر به خود جلب کرده است. ایده طراحی این لیزرها بر اساس همان لیزرهای آبخاری تک طول موج است با این تفاوت که ناحیه های فعال بر اساس طول موج های مورد انتظار طراحی و به صورت ردیفی یا پشته ای در کنار هم رشد داده می شوند. این ادوات فوتونی برای بسیاری از برنامه های نظامی و غیر نظامی از جمله ارتباطات نوری امن، رادار لیزری، سنجش مواد شیمیایی از راه دور، کنترل آلودگی، تصویربرداری دو طول موج و مراقبت های پزشکی کاربرد دارند. تاکنون طرح های عملی مختلفی برای لیزرهای آبخاری کوانتومی چند طول موجی توسط محققین ارائه شده است. در میان طرح های قابل توجه به مواردی مثل دو گذار متوالی نوری، لیزر آبخاری چندین طول موجی ابر شبکه ای و لیزر آبخاری با دو ناحیه پشته ای می توان اشاره کرد. چالش اصلی داشتن گستره پهنی از طول موجها و راهکاری است که توسط آن بتوان یکی از طول موجها را انتخاب و تنظیم کرد. از آن جاکه نوسانات و اهلهشی عامل پایداری پویا در حالت نوسان آزاد است، یک عامل آشفتگی خارجی کوچک مثل تلفیق، تزریق نوری یا خود تزریقی می تواند شدت تپ را تغییر دهد. تزریق نوری می تواند برای افزایش پهنای باند، تثبیت فرکانس، کاهش پرش مد و نویز شدت نسبی به کار رود [۱-۳]. در تکنیک قفل تزریق نوری، نور از یک لیزر با نوسان تک مد (لیزر پایه) به ناحیه فعال لیزر دیگر (پیرو) تابانده می شود. سپس دو لیزر در فرکانس نوری مشابه تحت شرایط مناسب فرکانس تنظیم و سطح تزریق منطبق می شوند.

در سال های اخیر مطالعات متعددی روی افزایش توان خروجی و پهنای باند لیزرهای آبخاری صورت گرفته است. قفل تزریقی نوری در لیزرهای آبخاری باعث افزایش پهنای باند و توان خروجی لیزر می شود، اما تاکنون هیچ مطالعه ای در زمینه لیزرهای آبخاری کوانتومی چند طول موجی و امکان مدیریت توان خروجی و پهنای باند آنها صورت نیافته است. در این مقاله برای اولین بار اثر قفل تزریقی در

لیزرهای آبخاری کوانتومی دو طول موجی بررسی می شود.

## ۲- تئوری و روش مدل سازی

هدف این مقاله ارائه تجزیه تحلیل نظری برای توصیف دینامیک لیزرهای آبخاری کوانتومی دو طول موجی مادون قرمز میانی در اثر تزریق نور است. در این راستا رویکردی ساده و شهودی بر پایه معادلات نرخ در دمای اتاق پیشنهاد شده است. تمرکز بر روی نوع خاصی از لیزرهای آبخاری کوانتومی دو طول موجی است که به طور همزمان دو طول موج متفاوت تابش می کنند و تراز بالایی مشترک است، که برای رسیدن به بهره در رقابت اند. شکل ۱ ترازهای انرژی یک دوره تناوب از ناحیه فعال در این افزاره را نشان می دهد. در هر تناوب قسمت اول برای تولید طول موج  $\lambda_1=10.5$  میکرومتر و بر مبنای گذار دو فوتونی طراحی شده و قسمت دوم برای تولید طول موج  $\lambda_2=8.9$  میکرومتر و بر مبنای تراز مقید به پیوستار طراحی شده است. ماده چاه/ سد به ترتیب  $\text{AlGaAs/GaAs}$  می باشد [۴]. تراز بالا و پایین برای طول موج  $\lambda_1$  ترازهای چهار و سه، برای طول موج  $\lambda_2$  ترازهای چهار و دو خواهند بود.



شکل ۱ یک دوره تناوب از ناحیه فعال لیزر آبخاری کوانتومی دو طول موجی

با چشم پوشی از اثرات غیر غطی نور و عدم کوپل شدگی دو مد بر هم معادلات نرخ لیزرهای آبخاری کوانتومی دو طول موجی مد قفل شده تزریقی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \frac{dN_4}{dt} &= \frac{J}{e} - \frac{N_4}{\tau_4} - \Gamma^{(1)} \frac{c \sigma^{(1)}}{V} (N_4 - N_3) S^{(1)} \\ &\quad - \Gamma^{(2)} \frac{c \sigma^{(2)}}{V} (N_4 - N_2) S^{(2)} \\ \frac{dN_3}{dt} &= \frac{N_4}{\tau_4} - \frac{N_3}{\tau_3} + \Gamma^{(1)} \frac{c \sigma^{(1)}}{V} (N_4 - N_3) S^{(1)} \end{aligned} \quad (1)$$

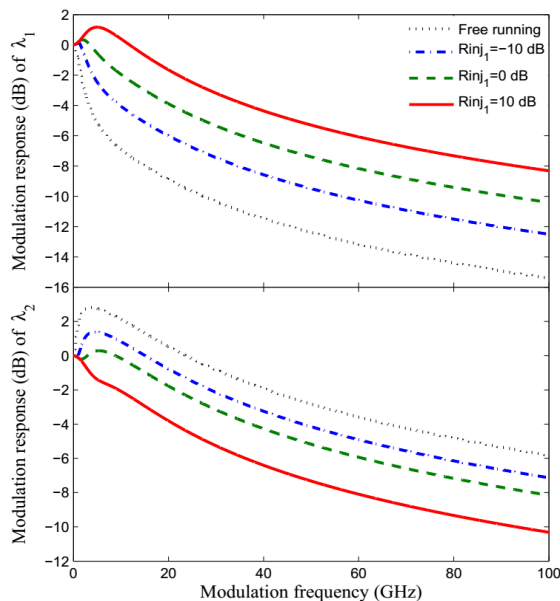
در منبع [۵] آمده است. پس از آنالیز سیگنال کوچک معادلات نرخ و نوشتن معادلات در حوزه فرکانس ماتریسی به شکل زیر خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} + j\omega & \dots & -\gamma_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_{81} & \dots & \gamma_{88} + j\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_4 \\ \vdots \\ \Delta\Phi_1 \end{pmatrix} = \frac{I_1}{q} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

مقادیر ماتریس بالا مشابه منبع [۱] محاسبه می‌شود. پس از حل معادلات نرخ و بدست آمدن جمعیت حامل‌ها و فوتون‌ها نیاز است عملکرد افزاره در اثر تزریق نور به هریک از تابش‌ها بررسی شود. بدین منظور تابع انتقال تلفیق به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$H_i(\omega) = \frac{S_i(\omega) / J(\omega)}{S_i(0) / \Delta J(0)} \quad (3)$$

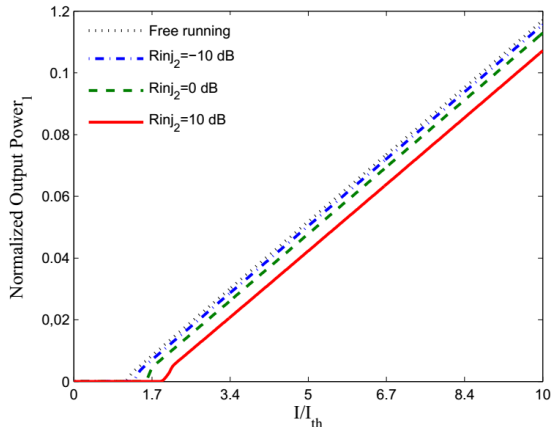
شکل ۲ اثر نسبت تزریق در طول موج  $\lambda_1$  را روی پاسخ تلفیق طول موج  $\lambda_1$  و طول موج  $\lambda_2$  در فرکانس تنظیم صفر و فاکتور افزایش پهنای خط برابر با یک نشان می‌دهد. تزریق نور هر بار فقط به یکی از تابش‌ها اعمال می‌شود. مشاهده می‌کنید که با افزایش نسبت تزریق، پهنای باند و پیک تابش با طول موج  $\lambda_1$  افزایش می‌یابند. به طور مثال در  $Rinj=10\text{dB}$  پهنای باند تلفیق  $28/63$  گیگاهرتز است، که در مقایسه با حالتی که تزریق نداریم ( $2/34$  گیگاهرتز) بیش از دوازده برابر افزایش داشته است. همچنین با افزایش اثر نسبت تزریق به طول موج  $\lambda_1$  پهنای باند تلفیق تابش با طول موج  $\lambda_2$  کاهش می‌یابد.



شکل ۱ اثر نسبت تزریق در طول موج  $\lambda_1$  روی پاسخ تلفیق طول موج  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \frac{N_4}{\tau_{41}} + \frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_2}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{out}} \\ \frac{dN_2}{dt} &= \frac{N_4}{\tau_{42}} + \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} + \Gamma^{(2)} \frac{c' \sigma^{(2)}}{V} (N_4 - N_2) S^{(2)} \\ \frac{dS^{(i)}}{dt} &= N_p \Gamma^{(1)} \frac{c' \sigma^{(i)}}{V} \Delta N^{(i)} S^{(i)} - \frac{S^{(i)}}{\tau_p^{(i)}} + N_p \beta^{(i)} \frac{N_4}{\tau_{sp}^{(i)}} \\ &+ 2k_c \sqrt{S_{inj}^{(i)} S^{(i)}} \cos \Delta\Phi^{(i)} \\ \frac{d\Delta\Phi^{(i)}}{dt} &= \frac{\alpha_H^{(i)}}{2} (N_p \Gamma^{(1)} \frac{c' \sigma^{(i)}}{V} \Delta N^{(i)} - \frac{1}{\tau_p^{(i)}}) \\ &- \Delta\omega_{inj}^{(i)} - k_c \sqrt{\frac{S_{inj}^{(i)}}{S^{(i)}}} \sin \Delta\Phi^{(i)} \end{aligned}$$

در معادلات بالا  $J$  چگالی الکترون هابی است که به تراز بالایی پمپ می‌شود و  $e$  اندازه بار الکترون است.  $W$  و  $L$  ابعاد کاواک را نشان می‌دهند،  $WLJ/e$  بیانگر تعداد الکترون‌های تزریقی به نیمه هادی در واحد زمان است (دیمانسیون این جمله با سایر جملات معادلات نرخ یکسان است).  $L_p$  طول هر تناوب،  $N_p$  تعداد تناوب است. حجم کل ناحیه فعال با رابطه  $N_p.W.L.L_p$  نشان داده می‌شود.  $\Gamma^{(i)}$  فاکتور محدودیت برای  $i=1,2$  است. سرعت متوسط گروه نور با  $c'$  نشان داده می‌شود و از رابطه  $c' = c.N_{eff}$  بدست می‌آید.  $c$  سرعت نور در خلا و  $N_{eff}$  ضریب شکست موثر است.  $K_c$  نرخ الحاق لیزر پایه به لیزر پیرو می‌باشد.  $\alpha_H$  فاکتور افزایش پهنای خط است.  $\Delta\omega_{inj}$  فرکانس تنظیم است که اختلاف بین لیزر پیرو و اصلی است. در این سیستم از تاثیر ضریب شکست موثر دو مد روی هم صرف نظر شده است. پارامتر ثابت انتشار خود به خودی فوتون‌های ساطع شده در کاواک است.  $\sigma^{(i)}$  ثابت انتشار تحریک شده برای گذارهای با طول موج‌های  $\lambda_i$  است. دینامیک این سیستم عمدتاً توسط شش زمان غیر تابشی  $\tau_{43}, \tau_{42}, \tau_{41}, \tau_{32}, \tau_{31}, \tau_{21}$  که مربوط به تابش فونون طولی نوری‌اند و همچنین دو زمان  $\tau_{sp}^{(i)}$  که مربوط به گسیل‌های خود به خودی دو گذار است، مشخص می‌شود. الکترون‌ها نیز با نرخ  $1/\tau_{out}$  از هر تناوب به تناوب بعدی می‌روند که  $\tau_{out}$  زمان فرار الکترون نامیده می‌شود. برای هر دو تابش یک طول عمر محدود برای فوتون  $\tau_p^{(i)}$  در نظر می‌گیریم. برای ساده‌تر نوشته شدن روابط از دو طول عمر  $\tau_3$  و  $\tau_4$  برای ترازهای ۳ و ۴ استفاده می‌کنیم. نحوه محاسبه و مقدار این پارامترها



شکل ۵ اثر نسبت تزریق در طول موج  $\lambda_2$  روی توان خروجی با طول موج  $\lambda_1$  بر جریان

با طول موج  $\lambda_1$  کاسته و به طول موج  $\lambda_2$  افزوده می شود و این باعث افزایش آستانه طول موج  $\lambda_1$  می شود.

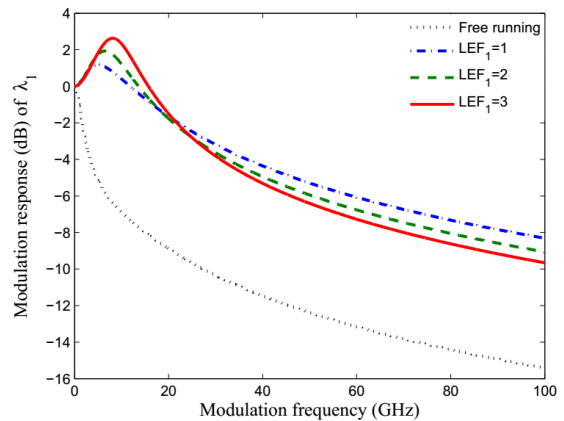
### ۳- نتیجه گیری

بر اساس یک مدل معادله نرخ ساده شده، ویژگی های تلفیق لیزرهای آبخاری کوانتومی دو طول موجی مد قفل شده تزریقی تحت تاثیر فاکتور افزایش پهنای خط و نسبت تزریق بررسی شد. این نتایج اولیه برای بهبود مشخصات تلفیق لیزرهای آبخاری کوانتومی چند طول موجی مد قفل شده تزریقی اهمیت برجسته ای دارند. محاسبات نشان می دهد پهنای باند تلفیق لیزر مربوط به هر یک از تابش ها با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط و نسبت تزریق همان تابش افزایش می یابد. همچنین اندازه ی پیک پهنای باند تلفیق لیزر با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط افزایش می یابد.

### مراجع

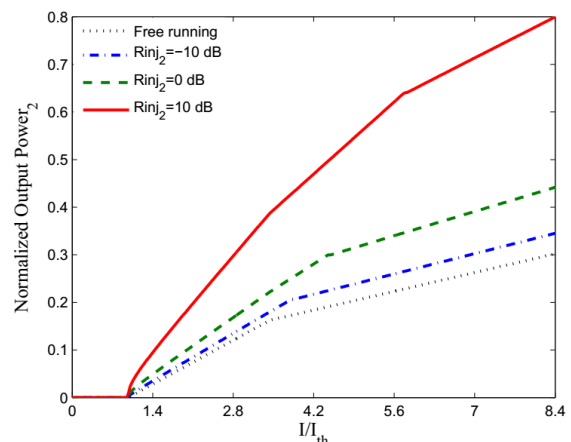
- [1] Wang, C., et al., *Rate equation analysis of injection-locked quantum cascade lasers*. Journal of Applied Physics, 2013. **113**(6): p. 063104.
- [2] Henry, C., N. Olsson, and N. Dutta, *Locking range and stability of injection locked 1.54  $\mu\text{m}$  InGaAsP semiconductor lasers*. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985. **21**(8): p. 1152-1156.
- [3] Jin, X. and S.-L. Chuang, *Relative intensity noise characteristics of injection-locked semiconductor lasers*. Applied Physics Letters, 2000. **77**(9): p. 1250-1252.
- [4] Geiser, M., et al., *Gain competition in dual wavelength quantum cascade lasers*. Optics express, 2010. **18**(10): p. 9900-9908.
- [5] Hamadou, A., S. Lamari, and J.-L. Thobel, *Delay time calculation for dual-wavelength quantum cascade lasers*. Journal of Applied Physics, 2013. **114**(20): p. 203102.

شکل ۳ اثر فاکتور افزایش پهنای خط در طول موج  $\lambda_1$  را روی پاسخ تلفیق طول موج  $\lambda_1$  در فرکانس تنظیم صفر و نسبت تزریق ۱۰ dB نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط پهنای باند کاهش و پیک افزایش می یابد.



شکل ۳ اثر فاکتور افزایش پهنای خط در طول موج  $\lambda_1$  روی پاسخ تلفیق طول موج  $\lambda_1$

شکل ۴ اثر نسبت تزریق به طول موج  $\lambda_2$  را روی توان خروجی با طول موج  $\lambda_2$  بر جریان، در فرکانس تنظیم صفر و فاکتور افزایش پهنای خط برابر با یک نشان می دهد. با افزایش نسبت تزریق توان خروجی افزایش می یابد. شکل ۵ اثر نسبت تزریق به طول موج  $\lambda_2$  را روی توان خروجی با طول موج  $\lambda_1$  بر جریان، در فرکانس تنظیم صفر و فاکتور افزایش پهنای خط برابر با یک نشان می دهد. با افزایش نسبت تزریق به طول موج  $\lambda_2$  توان خروجی با طول موج  $\lambda_1$  کاهش یافته و جریان آستانه افزایش می یابد. دلیل افزایش جریان آستانه در طول موج  $\lambda_1$  این است که از حامل های



شکل ۴ اثر نسبت تزریق در طول موج  $\lambda_2$  روی توان خروجی با طول موج  $\lambda_2$  بر جریان