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

سمیه کاویان[۱]، محمد محسن شیخی[۲]، حامد باغبان[۱]

[۱]دانشکده مهندسی فناوریهای نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۲]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 λ_1 در حالتی که تزریق نداریم ۲/۳۴ گیگا هرتز است و در نسبت تزریق های ۱۰- و ۰ و ۱۰دسی بل، افزایش یافته و به ترتیب ۶/۳۳ ، ۱۵/۰۴و ۲۸/۶۳ گیگاهرتز می شود. با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط پهنای باند کاهش و پیک افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت تزریق توان خروجی مربوط به آن تابش افزایش می یابد. همچنین جریان آستانه مربوط به تابش با طول موج λ_1 ، با افزایش نسبت تزریق به تابش با طول موج λ_2 تا ۱۰ دسی بل تا ۱/۸ 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 Kavian1, Mohammad Mohsen Sheikhi2, Hamed Baghban1
[1]School of Engineering- Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]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 λ_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 λ_1 enhances about 1.8 times with a high injection ratio of λ_2.

Keywords: Injection locking, Quantum cascade laser, Modulation bandwidth

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

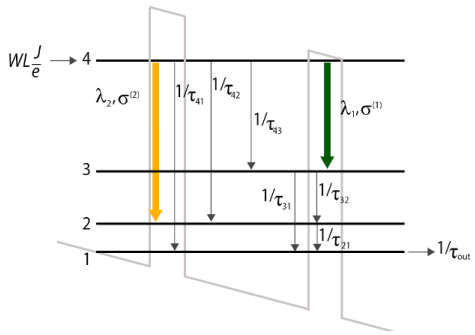
۱- مقدمه

لیزرهای آبشاری 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 می‌شوند. تولید همزمان چند طول موج در لیزرهای آبشاری کوانتومی توجه زیادی را در سال های اخیر به خود جلب کرده است. ایده طراحی این لیزر ها بر اساس همان لیزرهای آبشاری 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 می‌شوند. 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 مراقبت‌های پزشکی کاربرد دارند. تاکنون طرح های عملی مختلفی برای لیزرهای آبشاری کوانتومی چند طول موجی توسط محققین ارائه شده است. در میان طرح های قابل توجه به مواردی مثل دو گذار متوالی نوری، لیزر آبشاری چندین طول موجی ابر شبکه‌ای و لیزر آبشاری با دو ناحیه پشته‌ای می‌توان 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 آن‌جاکه نوسانات واهلشی عامل پایداری پویا در حالت نوسان آزاد است، یک عامل آشفتگی خارجی کوچک مثل تلفیق، تزریق نوری یا خود تزریقی می‌تواند شدت تپ را تغییر دهد. تزریق نوری می‌تواند برای افزایش پهنای باند، تثبیت فرکانس، کاهش پرش مد و نویز شدت نسبی به کار رود [۳-۱]. در تکنیک قفل تزریق نوری، نور از یک لیزر با نوسان تک مد (لیزر پایه) به ناحیه فعال لیزر دیگر (پیرو) تابانده می‌شود. سپس دو لیزر در فرکانس نوری مشابه تحت شرایط مناسب فرکانس تنظیم و سطح تزریق منطبق می‌شوند.

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی روی افزایش توان خروجی و پهنای باند لیزرهای آبشاری صورت گرفته است. قفل تزریقی نوری در لیزرهای آبشاری باعث افزایش پهنای باند و توان خروجی لیزر می‌شود، اما تاکنون هیچ مطالعه ای در زمینه لیزرهای آبشاری 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 آبشاری کوانتومی دو طول موجی بررسی می‌شود.

۲- تئوری و روش مدل‌سازی

هدف این مقاله ارائه تجزیه تحلیل نظری برای توصیف دینامیک لیزرهای آبشاری 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 آبشاری کوانتومی دو طول موجی است که به طور همزمان دو طول موج متفاوت تابش می‌کنند 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 می‌دهد. در هر تناوب قسمت اول برای تولید طول موج λ_1=10.5 میکرومتر و بر مبنای گذار دو فونونی طراحی شده و قسمت دوم برای تولید طول موج λ_2=8.9 میکرومتر و بر مبنای تراز مقید به پیوستار طراحی شده است. ماده چاه/ سد به ترتیب AlGaAs/GaAs می باشد [۴]. تراز بالا و پایین برای طول موج λ_1 ترازهای چهار و سه، برای طول موج λ_2 ترازهای چهار و دو خواهند بود.



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

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

$$\frac{dN_4}{dt} = \mathrm{WL}\frac{J}{e} - \frac{N_4}{\tau_4} - \Gamma^{(1)}\frac{c\sigma^{(1)}}{V}(N_4 - N_3)S^{(1)} - \Gamma^{(2)}\frac{c\sigma^{(2)}}{V}(N_4 - N_2)S^{(2)} \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{N_4}{\tau_{43}} - \frac{N_3}{\tau_3} + \Gamma^{(1)}\frac{c\sigma^{(1)}}{V}(N_4 - N_3)S^{(1)}$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$\frac{dN_1}{dt}=\frac{N_4}{\tau_{41}}+\frac{N_3}{\tau_{31}}+\frac{N_2}{\tau_{21}}-\frac{N_1}{\tau_{out}}$$

$$\frac{dN_2}{dt}=\frac{N_4}{\tau_{42}}+\frac{N_3}{\tau_{32}}-\frac{N_2}{\tau_{21}}+\Gamma^{(2)}\frac{c'\sigma^{(2)}}{V}(N_4-N_2)S^{(2)}$$

$$\frac{dS^{(i)}}{dt}=N_P\Gamma^{(1)}\frac{c'\sigma^{(i)}}{V}\Delta N^{(i)}S^{(i)}-\frac{S^{(i)}}{\tau_p^{(i)}}+N_P\beta^{(i)}\frac{N_4}{\tau_{sp}^{(i)}}$$

$$+2k_c\sqrt{S_{inj}^{(i)}S^{(i)}}\cos\Delta\Phi^{(i)}$$

$$\frac{d\Delta\Phi^{(i)}}{dt}=\frac{\alpha_H^{(i)}}{2}\left(N_P\Gamma^{(1)}\frac{c'\sigma^{(i)}}{V}\Delta N^{(i)}-\frac{1}{\tau_p^{(i)}}\right)$$

$$-\Delta\omega_{inj}^{(i)}-k_c\sqrt{\frac{S_{inj}^{(i)}}{S^{(i)}}}\sin\Delta\Phi^{(i)}$$

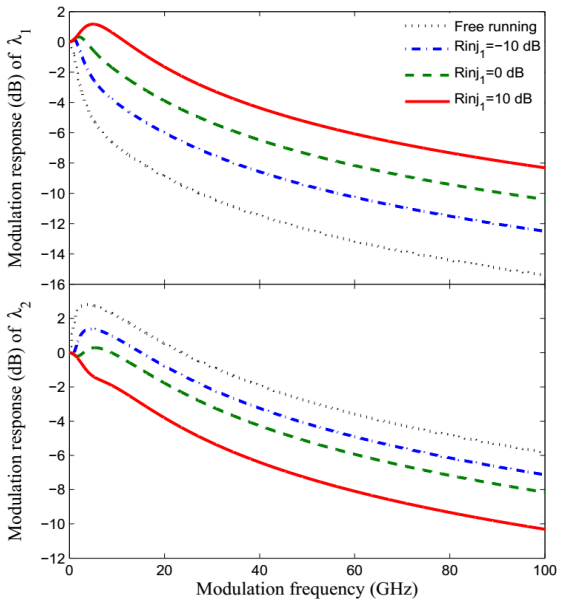
در معادلات بالا J (I/WL) چگالی الکترون هایی ست که به تراز بالایی پمپ می‌شود و e اندازه بار الکترون است.W و L ابعاد کاواک را نشان می‌دهند، WLJ/e بیانگر تعداد الکترون‌های تزریقی به نیمه هادی در واحد زمان است (دیمانسیون این جمله با سایر جملات معادلات نرخ یکسان است). Lp طول هر تناوب ، Np تعداد تناوب است. حجم کل ناحیه فعال با رابطه Np.W.L.Lp نشان داده می‌شود. $\Gamma^{(i)}$ فاکتور محدودیت برای λi (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 می باشد. α_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 $\beta^{(i)}$ ثابت انتشار خود به خودی فوتون های ساطع شده در کاواک است.$\sigma^{(i)}$ ثابت انتشار تحریک شده برای گذارهای با طول موج‌های λi است. دینامیک این سیستم عمدتا 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. الکترون ها نیز با نرخ $1/\tau_{out}$ از هر تناوب به تناوب بعدی می‌روند که τ_{out} زمان فرار الکترون نامیده می‌شود. برای هر دو تابش یک طول عمر محدود برای فوتون $\tau_p^{(i)}$ در نظر می گیریم. برای ساده‌تر نوشته شدن روابط از دو طول عمر τ_4 و τ_3 برای ترازهای ۳و۴ استفاده می‌کنیم. نحوه محاسبه و مقدار این پارامتر ها در منبع [۵] آمده است. پس از آنالیز سیگنال کوچک معادلات نرخ و نوشتن معادلات در حوزه فرکانس ماتریسی به شکل زیر خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix}\gamma_{11}+j\omega & \cdots & -\gamma_{18}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ -\gamma_{81} & \cdots & \gamma_{88}+j\omega\end{pmatrix}\begin{pmatrix}N_4\\ \vdots\\ \Delta\Phi_1\end{pmatrix}=\frac{I_1}{q}\begin{pmatrix}1\\0\\ \vdots\\0\end{pmatrix} \qquad (۲)$$

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

$$H_i(\omega)=\frac{S_i(\omega)/J(\omega)}{S_i(0)/\Delta J(0)} \qquad (۳)$$

شکل ۲ اثر نسبت تزریق در طول موج λ_1 را روی پاسخ تلفیق طول موج λ_1 و طول موج λ_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 λ_1افزایش می‌یابند. به طور مثال در Rinj=10dB پهنای باند تلفیق۲۸/۶۳ گیگاهرتز است، که در مقایسه با حالتی که تزریق نداریم (۲/۳۴ گیگا هرتز) بیش از دوازده برابر افزایش داشته است. همچنین با افزایش اثر نسبت تزریق به طول موج λ_1 پهنای باند تلفیق تابش با طول موج λ_2 کاهش می یابد.

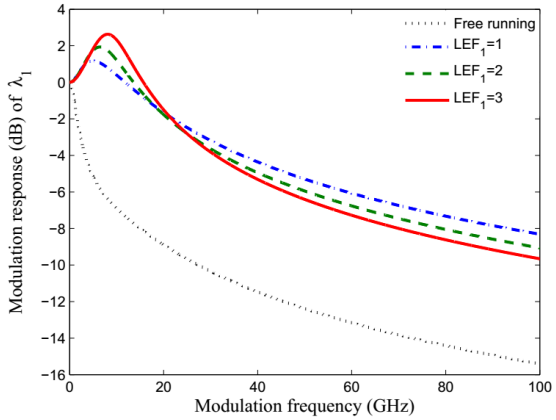


شکل ۱ اثر نسبت تزریق در طول موج λ_1 روی پاسخ تلفیق طول موج λ_1 و λ_2

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

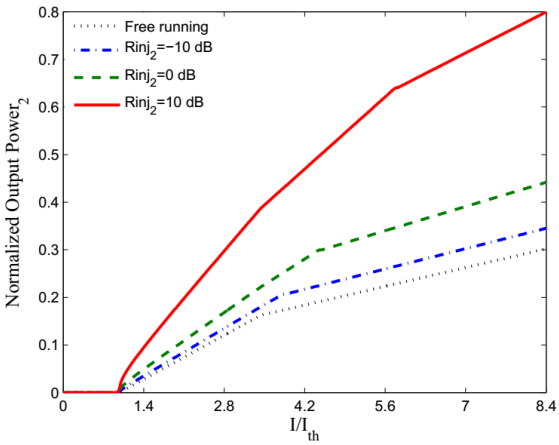
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

شکل ۳ اثر فاکتور افزایش پهنای خط در طول موج λ_1 را روی پاسخ تلفیق طول موج λ_1 در فرکانس تنظیم صفر و نسبت تزریق ۱۰ dB نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط پهنای باند کاهش و پیک افزایش می‌یابد.

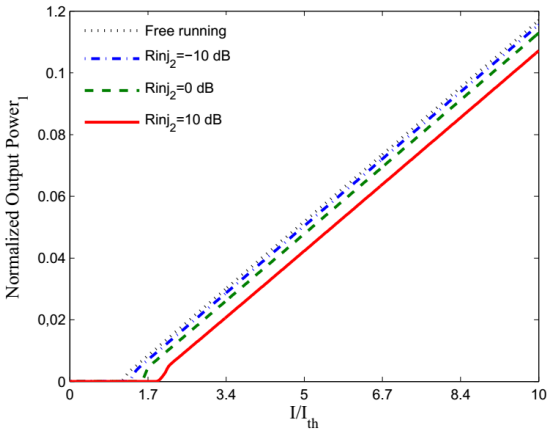


شکل ۳ اثر فاکتور افزایش پهنای خط در طول موج λ_1 روی پاسخ تلفیق طول موج λ_1

شکل ۴ اثر نسبت تزریق به طول موج λ_2 را روی توان خروجی با طول موج λ_2 بر جریان، در فرکانس تنظیم صفر و فاکتور افزایش پهنای خط برابر با یک نشان می‌دهد. با افزایش نسبت تزریق توان خروجی افزایش می‌یابد. شکل ۵ اثر نسبت تزریق به طول موج λ_2 را روی توان خروجی با طول موج λ_1 بر جریان، در فرکانس تنظیم صفر و فاکتور افزایش پهنای خط برابر با یک نشان می‌دهد. با افزایش نسبت تزریق به طول موج λ_2 توان خروجی با طول موج λ_1 کاهش یافته و جریان آستانه افزایش می‌یابد. دلیل افزایش جریان آستانه در طول موج λ_1 این است که از حامل های



شکل ۴ اثر نسبت تزریق در طول موج λ_2 روی توان خروجی با طول موج λ_2 بر جریان



شکل ۵ اثر نسبت تزریق در طول موج λ_2 روی توان خروجی با طول موج λ_1 بر جریان

با طول موج λ_1 کاسته و به طول موج λ_2 افزوده می شود و این باعث افزایش آستانه طول موج λ_1 می شود.

۳- نتیجه‌گیری

بر اساس یک مدل معادله نرخ ساده شده، ویژگی‌های تلفیق لیزرهای آبشاری 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 آبشاری کوانتومی چند طول موجی مد قفل شده تزریقی اهمیت برجسته‌ای دارند. محاسبات نشان می‌دهد پهنای باند تلفیق لیزر مربوط به هریک از تابش ها با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط و نسبت تزریق همان تابش افزایش می‌یابد. همچنین اندازه‌ی پیک پهنای باند تلفیق لیزر با افزایش فاکتور افزایش پهنای خط افزایش می‌یابد.

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 μm 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]