بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

مدل‌سازی و آنالیز رفتار پویای یک لیزر آبشاری کوانتومی با تابش دو طول‌موجی

[1]محمد بهادر نجفی، [2]دکتر حسین رضا یوسف وند

[1و2] گروه برق- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

چکیده – در این مقاله، مدل‌سازی و آنالیز یک لیزر آبشاری کوانتومی با تابش دو طول‌موجی ارائه شده است. بر اساس حل عددی معادلات نرخ چهار سطحی، دینامیک حامل‌ها و فوتون‌ها در ساختار آبشاری کوانتومی دو طول‌موجی تحلیل و مشخصه‌های خروجی لیزر محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی شامل رفتار دینامیکی لیزر در حالت گذرا و پاسخ مدولاسیون آن می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تأخیر زمانی و پاسخ مدولاسیون لیزر دو طول‌موجی، متأثر از طول عمر فوتون در داخل کاواک می‌باشد. علاوه بر این مشاهده می‌گردد به دلیل غالب بودن پراکندگی‌های درون‌نواری الکترون-فونون در لیزرهای آبشاری کوانتومی، این دسته از لیزرها از پاسخ مدولاسیون سریع‌تری نسبت به دیودهای لیزری مرسوم برخوردار هستند.

کلید واژه- لیزر آبشاری کوانتومی، معادلات نرخ، تابش دو طول‌موجی، پاسخ حالت گذرا.

Dynamic Response Analysis of a Quantum Cascade Laser with Dual-Wavelength Radiation

[1]Mohammad Bahador Najafi, [2]Dr Hossein Reza Yousefvand

[1, 2] Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Islamshahr branch, Tehran.

Abstract- In this paper, modeling and analysis of a quantum cascade laser (QCL) in the case of dual-wavelength radiation is discussed. Based on the numerical solution of four-level carrier scattering rate equations, the dynamics of carriers and photons in a dual-wavelength QC structure are analyzed and output characteristics are calculated. The results of the simulation includes laser dynamic's behavior in the transient regime and its modulation response. The results of simulation show that the turn-on time delay and modulation response of the dual wavelength laser is affected by lifetime of the photons in the cavity. In addition it can be seen that due to the dominance of the electron-phonon intersubband scattering in QCLs, the modulation response of this device is faster than modulation response of conventional diode lasers.

Keywords: Quantum Cascade Lasers, Rate equation, Dual wavelength radiation, Dynamic response.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

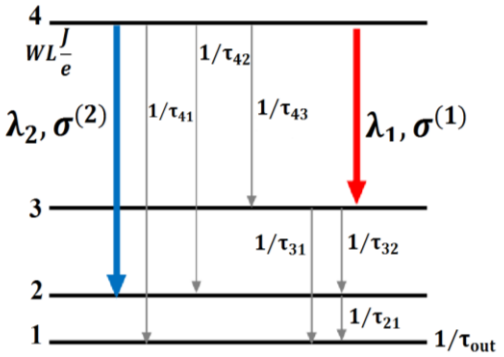
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

لیزرهای آبشاری کوانتومی (QCL)، ادواتی نیمه‌رسانا می‌باشند که فرایند نوردهی در آن‌ها مبتنی بر انتقال الکترونیکی زیر نواری در بین سطوح انرژی کوانتیده شده است که در نوار هدایت صورت می‌پذیرد [۱]. در مقایسه با لیزرهای مرسوم، لیزرهای QC این مزیت حائز اهمیت را دارا هستند که کنترل طول‌موج در آن‌ها می‌تواند با مهندسی ضخامت لایه‌ها انجام شود و این امر به طول‌موج‌های گسیل‌شده از لیزر این اجازه را می‌دهد تا به‌راحتی تنظیم شوند. از مهم‌ترین بحث‌ها در زمینه ارتقا افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه در لیزرها، مبحث لیزرهای چند طول‌موجی است. لیزرهای چند طول‌موجی ساختارهایی هستند که می‌توانند چندین تابش با طول‌موج‌های متفاوت را به‌طور هم‌زمان ساطع نمایند. یک منبع نوری چند طول‌موجی همانند لیزرهای تک طول‌موجی از یک محیط فعال برای فراهم نمودن بهره، یک سیستم دمنده (Pump) برای تزریق حامل به ناحیه فعال و یک فیدبک مثبت برای تقویت نور در کاواک تشکیل شده است؛ با این تفاوت که ناحیه فعال کوانتومی آن به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که دو یا چند طول‌موج در آن بتواند به صورت همزمان تقویت شود [۲].

۲- الگوی تئوری

لیزر آبشاری کوانتومی موردمطالعه در این مقاله، ساختاری دو طول‌موجی است که به‌عنوان منبع نوری برای تولید طول‌موج‌های 10.5 µm و 8.9 µm ساخته شده است[۳]. نحوه تابش طول‌موج‌های این لیزر را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید.



شکل (۱): لیزر آبشاری کوانتومی با تابش دو طول‌موج

در شکل (۱) نمای ساده شده دینامیک حامل در لیزر ۴ ترازی (با گسیل دو طول موج) مورد مطالعه در این مقاله نشان داده شده است. قابل ذکر است گذار نوری ۲⟵۴ متناظر با تابش طول موج کوچکتر (8.9µm) و گذار نوری ۳⟵۴ متناظر با تابش طول موج بزرگتر (10.5µm) می باشد.

۱-۲- معادلات نرخ لیزر دو طول‌موجی

در این مقاله به منظور تحلیل و آنالیز دینامیک حامل و فوتون در لیزر آبشاری کوانتومی دو طول موجی، از معادلات نرخ چهار سطحی مرسوم استفاده شده است. در معادلات نرخ، رفتار الکترون‌ها در یک سیستم کوانتومی به روش نیمه کلاسیک توصیف می‌شود به گونه ای که تعداد لحظه ای حامل ها در ترازهای چهارگانه به ترتیب N_1، N_2، N_3 و N_4 تعریف می شوند و تعداد فوتون‌های ساطع شده بین گذارهای ۲⟵۴ و ۳⟵۴ به ترتیب توسط متغیرهای $s^{(2)}$ و$s^{(1)}$ معرفی می‌شوند. در نهایت معادلات نرخ توصیف کننده دینامیک حامل و فوتون به‌صورت زیر نوشته می‌شود[۳] :

$$\frac{dN_4}{dt} = WL\frac{J}{e} - \frac{N_4}{\tau_4} - \Gamma^{(1)}\frac{c'\sigma^{(1)}}{V}(N_4 - N_3) - \Gamma^{(2)}\frac{c'\sigma^{(2)}}{V}(N_4 - N_2)S^{(2)} \quad (۱)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{N_4}{\tau_{43}} - \frac{N_3}{\tau_3} + \Gamma^{(1)}\frac{c'\sigma^{(1)}}{V} \times (N_4 - N_3)S^{(1)} \quad (۲)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_4}{\tau_{42}} + \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{out21}} + \Gamma^{(2)}\frac{c'\sigma^{(2)}}{V} \times (N_4 - N_2)S^{(2)} \quad (۳)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_4}{\tau_{41}} + \frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_3}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{out}} \quad (۴)$$

$$\frac{dS^1}{dt} = N_P\Gamma^{(1)}\frac{c'\sigma^{(1)}}{V}(N_4 - N_3)S^{(1)} - \frac{S^{(1)}}{\tau_p{}^{(1)}} + N_P\beta^{(1)}\frac{N_4}{\tau_{sp}{}^{(1)}} \quad (۵)$$

$$\frac{dS^2}{dt} = N_P\Gamma^{(2)}\frac{c'\sigma^{(2)}}{V}(N_4 - N_2)S^{(2)} - \frac{S^{(2)}}{\tau_p{}^{(2)}} + N_P\beta^{(2)}\frac{N_4}{\tau_{sp}{}^{(2)}} \quad (۶)$$

در معادلات فوق، J چگالی جریان تزریقی می‌باشد و e بار الکترون است؛ L و W نیز طول و عرض کاواک هستند. N_P

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

و L_P به ترتیب تعداد طبقات و طول هر طبقه را نشان می دهند؛ از طرفی $V=NWLL_P$ حجم کاواک است. دینامیک سیستم توسط زمان‌های پراکندگی غیر نوری τ_{32}، τ_{31}، τ_{41} و τ_{42} نشان داده می‌شود که علت این پراکندگی‌ها، انتشار فونون LO بین ترازها به همراه زمان واهلش خودبه‌خودی τ_{sp} بین ترازها است. τ_p نیز طول عمر فوتون می‌باشد که توسط رابطه $\tau_p^{-1} = c'(\alpha_W + \alpha_M)$ محاسبه می‌گردد که α_W تلفات موجبر کاواک و α_M تلفات آینه نام‌گذاری شده است[۳]. همچنین طول عمر حامل در تراز ۳ و ۴ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{\tau_{32}} + \frac{1}{\tau_{31}} \qquad (۷)$$

$$\frac{1}{\tau_4} = \frac{1}{\tau_{43}} + \frac{1}{\tau_{42}} + \frac{1}{\tau_{41}} \qquad (۸)$$

زمان واهلش گسیل خودبه‌خودی نوری $\tau_{SP}^{(i)}$ را می‌توان به‌صورت معادله زیر به دست آورد[۳] :

$$\frac{1}{\tau_{SP}^{(i)}} = \frac{8\pi^2 n_{eff}(ez^{(i)})^2}{\varepsilon_0 \hbar \lambda_i^3}, \quad i = 1,2 \qquad (۹)$$

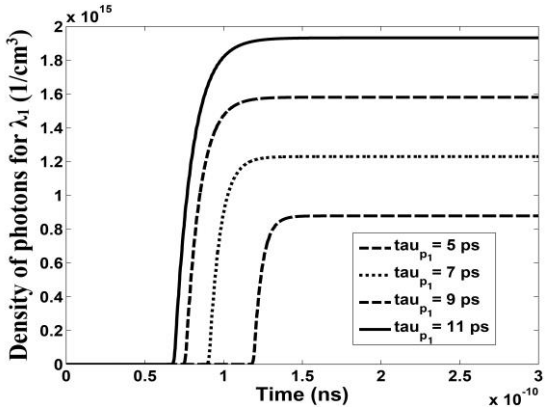
در اینجا $ez^{(i)}$ المان ماتریس دوقطبی بین ترازها است و ε_0 گذردهی خلأ، λ طول‌موج انتشار و $\hbar$ ثابت پلانک کاهش یافته است. سطح مؤثر گسیل القایی $\sigma^{(i)}$ به‌صورت زیر بیان می‌شود[۳]:

$$\sigma^{(i)} = \frac{4\pi(ez^{(i)})^2}{\varepsilon_0 n_{eff} \lambda_i (2\gamma^{(i)})}, \quad i = 1,2 \qquad (۱۰)$$

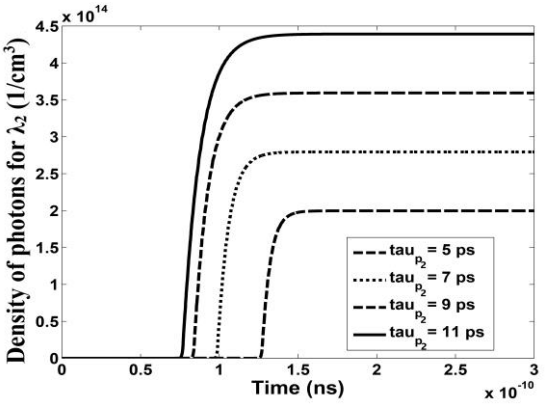
که در اینجا $2\gamma^{(i)}$ پهنای خط نصف بیشینه (FWHM) از طیف تابشی است. سایر ثابت ها نیز در مرجع [۳] معرفی شده اند.

۳- نتایج و بحث

از مهم‌ترین خصوصیات لیزینگ در یک لیزر، بررسی رفتار لیزر در حالت گذرا است. از طرفی زمان پاسخ‌دهی لیزر به جریان پالس تزریقی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع فاصله بین لحظه تزریق جریان و زمان رسیدن تعداد فوتون‌ها به ۱۰٪ مقدار نهایی آن را با استفاده از رابطه $t_d \cong t_{th} + \Delta t$ (t_{th} زمان تأخیر افزاره) تعریف کرد [۴]. زمان تأخیر روشن شدن افزاره است و در طی آن وارونگی حامل‌ها به حالت آستانه می‌رسد. از طرفی Δt به آن فاصله زمانی اطلاق می‌شود که تعداد فوتون‌ها معادل ۱۰٪ مقدار نهایی آن است. نتایج شبیه‌سازی تغییرات زمانی تعداد فوتون‌ها برحسب زمان طول عمر آن‌ها برای هر دو تابش، در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۲): نمودار تعداد فوتون‌ها برحسب زمان در ناحیه گذرا
الف) برای تابش اول با طول‌موج λ_1= 10.5 μm
ب) برای تابش دوم با طول‌موج λ_2= 8.9 μm

طول عمر فوتون‌های لیزر در کاواک، برحسب زمان‌های 5ps، 7ps، 9ps و 11ps و به ازای جریان پله‌ای 5A می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش طول عمر فوتون‌های لیزر و در نتیجه افزایش توان، زمان تأخیر افزاره کاهش می‌یابد.

برای آنالیز پاسخ فرکانسی یک لیزر می‌توان در حول نقطه کار، یک سیگنال کوچک را اعمال کنیم و نتیجه را مشاهده کنیم [۵]. پاسخ فرکانسی تمام لیزرهای نیمه هادی را می توان به صورت رابطه زیر بیان نمود[۵] و [۶]:

$$|h(\omega')|^2 = \frac{1}{\omega'^4 + \omega'^2\left(\frac{\tau_P^{(1,2)}}{\tau_{STI}^{(1,2)}} + 2\frac{\tau_P^{(1,2)}}{\tau_{UL}^{(1,2)}} + \frac{\tau_P^{(1,2)}\tau_{STI}^{(1,2)}}{\tau_{UL}^{2\,(1,2)}} - 2\right) + 1} \qquad (۱۱)$$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

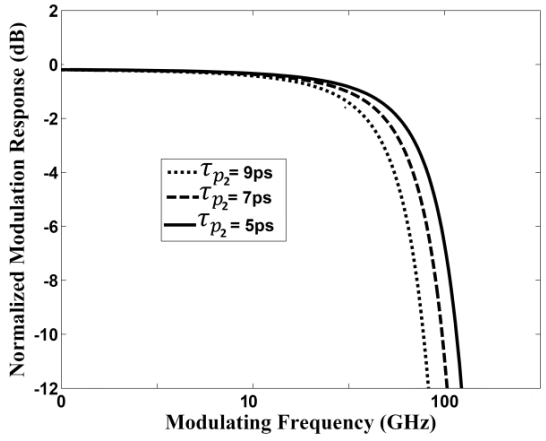
که در آن ω'^{2} از رابطه زیر بدست می آید :

$$\omega'^{2} = \omega^{2}\tau_{p}{}^{(1,2)}\tau_{STI}{}^{(1,2)} \qquad (۱۲)$$

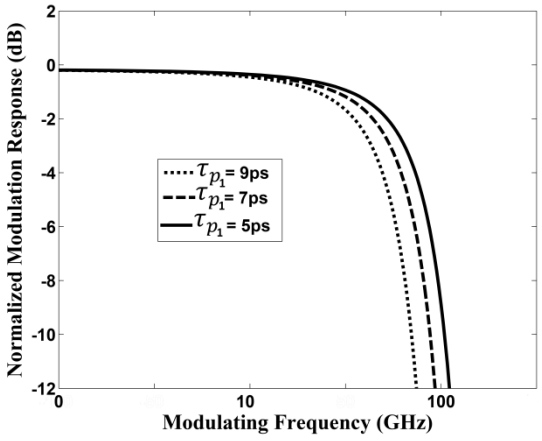
و زمان برانگیختگی بصورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{1}{\tau_{STI}{}^{(1,2)}} = \Gamma_{\mathrm{P}}^{(1,2)}\frac{c'^{(1,2)}\sigma^{(1,2)}}{\mathrm{V}}S_{0}^{(1,2)} \qquad (۱۳)$$

$\tau_{UL}{}^{(1,2)}$ بیانگر گذار غیر نوری لیزر می باشد و سایر ثابت ها در مرجع [۵] معرفی شده اند. شکل (۳)، پاسخ مدولاسیون لیزر آبشاری کوانتومی دو طول‌موجی را به ازای جریان بایاس ۵ آمپر و طول عمرهای فوتون در لحظات 5ps، 7ps و 9ps نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل (۳) : پاسخ فرکانسی لیزر QC دو طول‌موجی در حالت(الف) برای تابش با طول‌موج λ_2= 8.5 μm حالت (ب) برای تابش با طول‌موج λ_1= 10.5 μm

با توجه به رابطه (۱۱) می توان استنباط کرد که با افزایش طول عمر فوتون، پاسخ فرکانسی لیزر برای هر دو تابش به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در یک لیزر QC انتظار می‌رود به دلیل فوق سریع بودن گذارهای غیر نوری هیچ‌گونه فراجهشی در پاسخ مدولاسیون مشاهده نشود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی این واقعیت را نشان می‌دهد. نتایج تجربی نشان می دهند لیزرهای آبشاری کوانتومی از فرکانس گذر بالاتر و پایدارتری نسبت به دیودهای لیزری مرسوم برخوردار هستند و دلیل آن را می توان به زیرنواری بودن گذارها در مقیاس فمتوثانیه نسبت داد [۷].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آنالیز و مدل‌سازی یک لیزر آبشاری کوانتومی مبتنی بر تابش دو طول‌موجی ارائه گردید. به منظور بررسی رفتار پویای لیزر، معادلات نرخ چهار سطحی ترابری حامل و فوتون معرفی شد. نشان داده شد با افزایش طول عمر فوتون و در نتیجه بهبود شرایط وارونگی حامل‌ها، زمان آستانه پاسخ‌دهی لیزر کاهش می‌یابد و این زمان متأثر از تقابل بین پراکندگی‌های نوری و غیر نوری در افزاره است. نتایج حاصل از تحلیل پاسخ مدولاسیون نیز نشان می‌دهد در لیزرهای آبشاری کوانتومی دو طول‌موجی، به دلیل غالب بودن پراکندگی الکترونی زیر نواری بر پراکندگی حامل بین نواری (از جمله پراکندگی Auger)، این دسته از لیزرها از پاسخ مدولاسیون سریع‌تر و پایدارتری نسبت به دیودهای لیزری مرسوم برخوردارند.

مراجع

[1] J.Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, and A. Y.Cho, "Quantum CascadeLaser", *Science*, vol. 264, pp. 553-556, 1994.

[2] Claire Gmachl, Federico Capasso, Deborah L Sivco and Alfred Y Cho, "Recent progress in quantum cascade lasers and applications", *Rep. Prog. Phys.* vol. 64, pp. 1533–1601, 2001.

[3] A. Hamadou , L. Thobel , S. Lamari , "Rate equation analysis of a dual-wavelength quantum", *Opt. Commun.*, vol. 305 pp. 147-154, 2013.

[4] A. Hamadou, S. Lamari, and J. L. Thobel, "Dynamicmodeling of a midinfrared quantum cascade laser", *J. Appl. Phys.* vol. 105, pp. 093116-1-093116-6, 2009.

[5] H. R. Yousefvand, V. Ahmadi, K. Saghafi, "Static and dynamic response analysis of Raman injection quantum cascade laser using circuit level modeling", *J. Lightwave Technol.* vol. 28, pp. 3142-3148, 2010.

[6] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, *Intersubband Transition in Quantum wells*, Physics and Device, Application II, ch. VIII, New York: Academic, 2000.

[7] R. Paiella, *Intersubband Transition in Quantum Structures*, McGraw-Hill, 2005.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]