تحلیل و شبیه‌سازی مشخصه‌های پویا و ایستای یک لیزر آبشاری کوانتومی با کاواک بیرونی

سحر فرخ زاده[۱]، حسین رضا یوسف وند [۲]، محمد بهادر نجفی [۳]

[۱و۲و۳] گروه الکترونیک- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

چکیده – در این مقاله بر اساس معادلات نرخ دو سطحی یک الگوی عددی برای تحلیل لیزرهای آبشاری کوانتومی(*QCLs*) با کاواک بیرونی (*EC*) ارائه شده است. با استفاده از الگوی ارائه شده، مشخصه‌های پویا و ایستای یک *EC-QCL* محاسبه و تحلیل‌شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند به دلیل بزرگ‌تر بودن طول عمر فوتون‌های کاواک بیرونی (در مقایسه با کاواک داخلی)، تابش مود بیرونی بر تابش مود داخلی غالب می‌باشد. علاوه بر این، می‌توان با تغییر طول عمر فوتون‌های کاواک بیرونی که خود متأثر از طول فیزیکی کاواک بیرونی می‌باشد، طول‌موج تابشی لیزر را تنظیم نمود. نتایج حاصل از تحلیل گذرا در این مقاله با نتایج تجربی منتشر شده مطابقت می‌کنند.

کلید واژه- تنظیم پذیری طول‌موج، کاواک بیرونی، لیزر آبشاری کوانتومی، معادلات نرخ

Analysis and simulation of static and dynamic characteristics of an external-cavity quantum cascade laser

Sahar Farokh-zadeh[1], Hossein Reza Yousefvand[2], Mohammad Bahador Najafi[3]

[1,2,3] Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Islamshahr branch, Tehran

Abstract- Based on a two-level rate-equation approach a numerical model is presented here to analyze the external-cavity (EC) quantum cascade lasers (QCLs). Using the presented model, the static and dynamic characteristics of an EC-QCL are computed and analyzed. Simulated results show that due to the longer photon-lifetime in the EC (compared to the internal-cavity), the external emission mode dominates on the internal mode. Additionally, the laser wavelength can be tuned by the change of photon lifetime in the EC, which are determined by the physical length of EC. Transient results obtained from this work are in agreement with experiment data reported earlier.

Keywords: External Cavity, Quantum Cascade Laser, Rate equations, Wavelength tenability.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

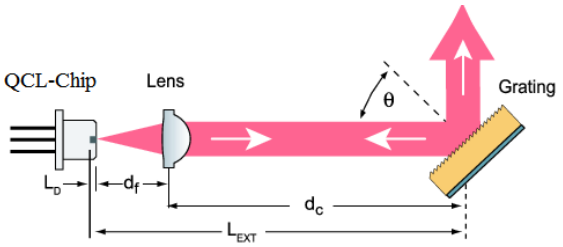
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

لیزرهای نیمه هادی به دو دسته لیزرهای دوقطبی و تک قطبی تقسیم می‌شوند. لیزرهای دوقطبی مبتنی بر بازترکیب الکترون‌های نوار هدایت و حفره‌های نوار ظرفیت در شکاف باند انرژی می‌باشند؛ در حالی که لیزرهای تک قطبی در عملکرد خود تنها از یک نوع حامل استفاده می‌کنند؛ از این رو تک قطبی نامیده می‌شوند [۱]. لیزرهای آبشاری کوانتومی (QCLs) جزء لیزرهای نیمه هادی تک قطبی محسوب می‌شوند که در آن‌ها، فوتون‌ها از طریق گذارهای نوری درون-نواری در چاه‌های کوانتومی نامتقارن تولید می‌شوند [۲]. لیزرهای آبشاری کوانتومی به خاطر تولید نور در طیف وسیعی از طول‌موج‌ها (۳ تا ۳۰۰ میکرومتر) در شناسایی گازها کاربرد فراوانی دارند و تنها لیزرهای نیمه‌هادی هستند که در محدوده بالای مادون‌قرمز به عنوان منابع مؤثر نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. لیزرهای آبشاری کوانتومی با کاواک بیرونی (EC-QCL) محدودیت تنظیم لیزرهای آبشاری کوانتومی با فیدبک توزیع‌شده (DFB-QCL) را برطرف می‌کنند، بنابراین در میان لیزرهای آبشاری کوانتومی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. به منظور بهبود عملکرد این دسته از لیزرهای نیمه هادی و کنترل مشخصه‌های ایستا و پویای آن‌ها، تحلیل و شبیه سازی معادلات حاکم ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، یک لیزر آبشاری کوانتومی (مبتنی بر یک ساختار InAlAs/InGaAs) با استفاده از الگوی استاندارد معادلات نرخ مدل‌سازی و تحلیل شده است. در بخش دوم این مقاله، تئوری حاکم بر لیزرهای آبشاری کوانتومی با کاواک بیرونی ارائه می‌شود و نتایج در بخش سوم بحث می‌شوند.

۲- لیزرهای آبشاری کوانتومی با کاواک خارجی

لیزرهای QCL با فیدبک توزیع شده (DFB-QCLs) با عملکرد در دمای اتاق در سال ۱۹۹۸ ساخته شدند که در طیف سنجی بسیار مفید هستند [۳]؛ اما محدوده تنظیم آن‌ها محدود و کمتر از ۱٪ طول موج تابشی لیزر است که مزایای آن‌ها را برای تحقیقات طیف سنجی محدود می‌سازد. برای غلبه بر این محدودیت EC-QCLs ساخته شده‌اند و مزیت اصلی یک EC-QCL در مقایسه با یک DFB-QCL محدوده تنظیم گسترده‌تر آن‌ها می‌باشد. همچنین ساختارهای نامتجانس QCL ها که در آن چندین طول موج مختلف را در مراحل مختلف منتشر می‌کنند به عنوان راهی برای افزایش بیشتر محدوده‌ی تنظیم EC-QCL ها ارائه شده است. سیستم مورد مطالعه در این مقاله یک EC-QCL است که در سال ۲۰۰۱ به طور تجربی ساخته شده است [4]. درشکل 1 نمای کلی یک EC-QCL نشان داده شده است. در کاواک بیرونی پرتو نور به توری فرستاده می‌شود سپس به طور مستقیم به تراشه QCL برمی‌گردد. همان‌طور که نشان داده شده است، یک ساختار EC-QCL از سه مؤلفه اصلی شامل یک لیزر آبشاری کوانتومی، یک لنز موازی ساز و یک توری (Grating) که به عنوان فیلتر انتخاب کننده طول موج در سیستم عمل می‌کند، تشکیل شده است.



شکل 1: نمای کلی EC-QCL مورد مطالعه در این مقاله.

۲-۱- الگوی معادلات آهنگ در یک EC-QCL

معادلات نرخ دو سطحی بیان کننده دینامیک حامل‌ها و فوتون‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [5]:

$$\frac{dn_3}{dt} = \frac{J}{e} - [S_{FP}g_{FP} + S_{EC}g_{EC}](n_3 - n_2) - \frac{n_3}{\tau_3} \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{n_3}{\tau_{32}} - \frac{n_2 - n_2^{therm}}{\tau_2} + [S_{FP}g_{FP} + S_{EC}g_{EC}] \times (n_3 - n_2) \quad (2)$$

$$\frac{dS_{FP}}{dt} = \frac{c}{n}((N_P g_{FP}(n_3 - n_2) - \alpha_{tot}^{FP})S_{FP} + \beta\frac{n_3}{\tau_{SP}}$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

(3)

$$\frac{dS_{EC}}{dt} = \frac{1}{\rho_{cav}}\frac{c}{n}((N_P g_{EC}(n_3 - n_2) - \alpha_{tot}^{EC})S_{EC} + \beta\frac{n_3}{\tau_{SP}}$$

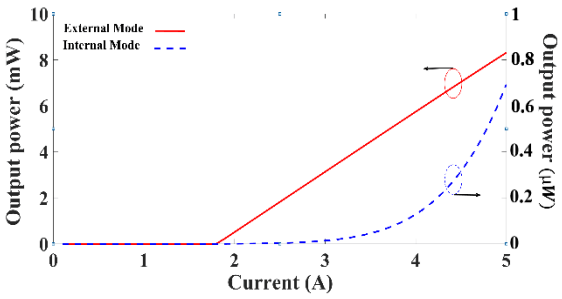
(4)

در روابط (۱) - (۴)، n_3 و n_2 به ترتیب معرف چگالی سطحی حامل‌ها در سطوح انرژی بالائی و پایینی لیزر، τ_3 و τ_2 طول عمر حامل‌ها در ترازهای بالا و پائین، τ_{32} زمان واهلش فونونی حامل از سطح بالائی به سطح پائینی می‌باشد، n_2^{therm} معرف جمعیت غیر تعادلی حامل‌ها در سطح پائینی لیزر، β ضریب تابش خود به خودی و τ_{SP} بیانگر زمان تابش خودبه‌خودی می‌باشد، S_{FP} و S_{EC} به ترتیب معرف چگالی شار نوری مودهای کاواک داخلی و کاواک بیرونی می‌باشند. در ادامه g_F و g_{EC} به ترتیب معرف بهره نوری مودهای کاواک داخلی و کاواک بیرونی می‌باشند، c/n بیانگر سرعت نور داخل کاواک (n معرف ضریب شکست نور در داخل کاواک)، ρ_{cav} معرف نسبت طول مسیر نوری کاواک بیرونی به کاواک داخلی لیزر می‌باشد و N_P بیانگر تعداد طبقات آبشاری استفاده شده در لیزر می‌باشد. در نهایت α_{tot}^{FP} و α_{tot}^{EC} به ترتیب معرف تلفات کل مود تابشی کاواک داخلی و کاواک بیرونی می‌باشند. قابل ذکر است طول عمر فوتون‌های کاواک بیرونی با تلفات کل کاواک بیرونی رابطه عکس دارد، بنابراین با افزایش طول کاواک بیرونی می‌توان تلفات کل و درنتیجه طول عمر فوتون کاواک بیرونی را تعیین کرد.

۳- نتایج و بحث

در شکل۲ توان خروجی مودهای تابشی بیرونی و درونی لیزر مورد مطالعه در حالت ماندگار نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود جریان آستانه لیزر حدود 1.9 A می‌باشد و بازده کوانتومی مود تابشی بیرونی بسیار بزرگ‌تر از بازده کوانتومی مود تابشی داخلی می‌باشد (توجه داشته باشید: توان مود بیرونی در محدوده چند میلی وات و توان مود درونی در محدوده زیر یک میکرو وات تولید شده است).

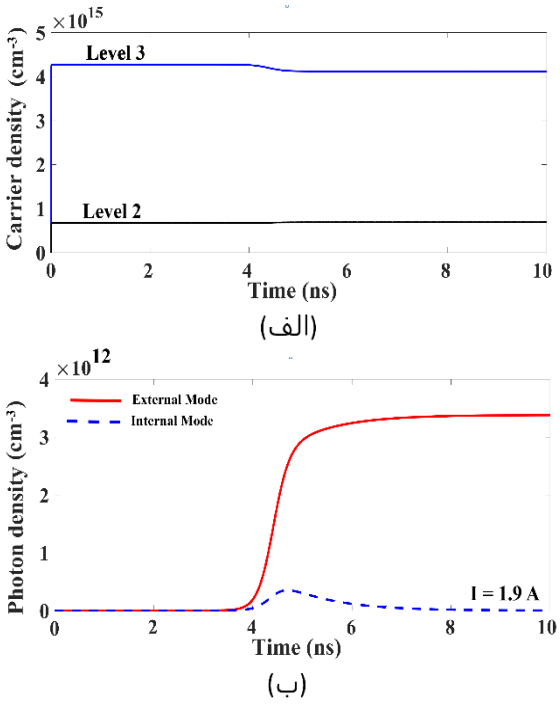
در شکل ۳ (الف) تغییرات زمانی چگالی حجمی حامل‌ها در تراز بالا (Level 3) و تراز پائین (Level 2) لیزر در پاسخ به یک جریان تزریقی پالسی با دامنه 1.9 A نشان داده شده است. در شکل ۳ (ب) چگالی حجمی فوتون‌های تولید شده در مود بیرونی و مود داخلی نمایش داده شده است. با توجه به اینکه جریان تزریقی کمی بالاتر از آستانه لیزر انتخاب شده است، میزان ریزش حامل‌ها از تراز بالای لیزر به تراز پائین قابل رویت نمی‌باشد. در شکل ۴ (الف) و ۴ (ب) به ترتیب تغییرات زمانی حامل‌ها (در ترازهای بالا و پائین) و تغییرات زمانی فوتون‌های تابشی (در مودهای بیرونی و درونی) به ازای یک جریان تزریقی با دامنه 2.3 A (بالاتر از جریان آستانه لیزر) نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد در لحظات اولیه اعمال پالس مود درونی شروع کننده تابش می‌باشد اما در انتها مود تابشی بیرونی غالب می‌شود. غلبه نمودن مود تابشی بیرونی بر مود تابشی درونی را می‌توان به‌طور مستقیم به بزرگ‌تر بودن طول عمر فوتون‌های بیرون کاواک نسبت به طول عمر فوتون‌های درون کاواک نسبت داد.



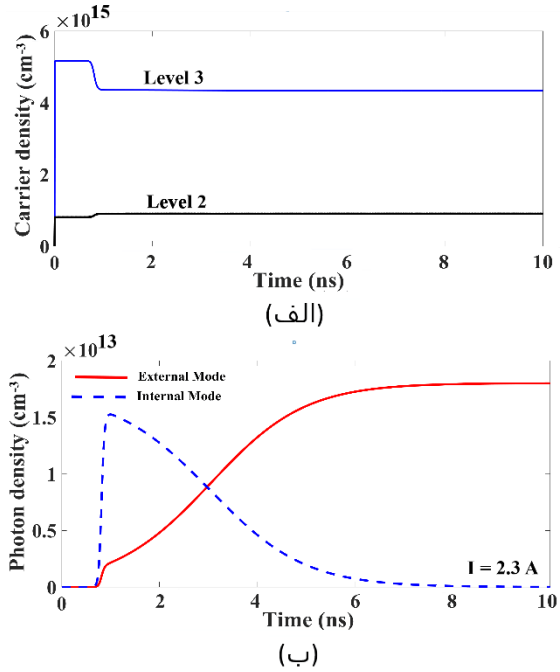
شکل۲: مشخصه توان بر حسب جریان تزریقی در مودهای تابشی بیرونی و درونی.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]



شکل۳: (الف) تغییرات زمانی چگالی حامل‌ها در ترازهای بالا و پائین لیزر و (ب) تغییرات زمانی مودهای تابشی بیرونی و درونی به ازای یک پالس جریان با دامنه 1.9 A (متناظر با جریان آستانه لیزر).



شکل۴: (الف) تغییرات زمانی چگالی حامل‌ها در ترازهای بالا و پائین لیزر و (ب) تغییرات زمانی مودهای تابشی بیرونی و درونی به ازای یک پالس جریان با دامنه 2.3 A (بالاتر از جریان آستانه لیزر).

قابل ذکر است، می‌توان با تغییر طول فیزیکی کاواک بیرونی تلفات کاواک بیرونی (و در نتیجه طول عمر فوتون‌های کاواک بیرونی) را تغییر داد. از آنجائی که تغییر طول کاواک به تغییر طول موج تابشی لیزر منتج می‌گردد، تغییر طول کاواک به‌طور مستقیم به تنظیم پذیری طول موج تابشی لیزر آبشاری کوانتومی ختم می‌شود. نتایج گذرای حاصل از این مقاله با نتایج تجربی منتشر شده در [6] مطابقت می کند.

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از الگوی استاندارد معادلات نرخ، یک الگوی عددی برای تحلیل و شبیه سازی لیزرهای آبشاری کوانتومی با کاواک بیرونی ارائه شد. مشخصه‌های حالت ماندگار و حالت گذرای لیزر محاسبه و تحلیل گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهند توان نوری حاصل از مود تابشی بیرونی بر توان نوری مود درونی غلبه می‌کند و علت این غلبه را می‌توان به بزرگ‌تر بودن طول عمر فوتون‌های کاواک بیرونی نسبت به کاواک درونی لیزر نسبت داد. لذا در این دسته از لیزرهای کوانتومی با تغییر طول کاواک می‌توان طول موج تابشی لیزر را تنظیم نمود.

مراجع

[1] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, “Quantum cascade laser,” *Science*, vol. 264, pp. 553-556, 1994.
[2] J. Faist, F. Capasso, C. Sirtori, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, “Quantum cascade lasers”, in Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications II, Edited by H. C. Liu and F. Capasso (Academic, San Diego, 2000), pp. 1-83.
[3] S. W. Sharpe, J. F. Kelly, J. S. Hartman, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, and A. Y. Cho, “High-resolution (Doppler-limited) spectroscopy using quantum-cascade distributed-feedback lasers”, Opt. Lett. 23, 1396-1399, 1998.
[4] G. P. Luo, C. Peng, H. Q. Le, S. S. Pei, W.-Y. Hwang, B. Ishaug, J. Um, J. N. Baillargeon, and C.-H. Lin, “Grating-tuned external-cavity quantum-cascade semiconductor lasers”, Appl. Phys. Lett. 78, 2834, 2001.
[5] A. Huge, R. Maulini, and J. Faist, “External cavity quantum cascade laser”, Semicond. Sci. Technol. 25, 083001, 2010.
[6] B. Hinkov, Q. Yang, F. Fuchs, W. Bronner, K. Kohler, and J. Wagner, Appl. Phys. Lett., 94, 221105, 2009.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]