

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

سحر فرخ زاده^۱، حسین رضا یوسف‌وند^۲، محمد بهادر نجفی^۳

^۱ و ^۲ 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 آبخاری کوانتومی (QCLs) با کاواک بیرونی (EC) ارائه شده است. با استفاده از الگوی ارائه شده، مشخصه‌های پویا و ایستای یک EC-QCL محاسبه و تحلیل شده‌اند. 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، طول موج تابشی لیزر را تنظیم نمود. نتایج حاصل از تحلیل گذرا در این مقاله با نتایج تجربی منتشر شده مطابقت می‌کنند.

کلید واژه - تنظیم پذیری طول موج، کاواک بیرونی، لیزر آبخاری کوانتومی، معادلات نرخ

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

Sahar Farokh-zadeh¹, Hossein Reza Yousefvand², Mohammad Bahador Najafi³

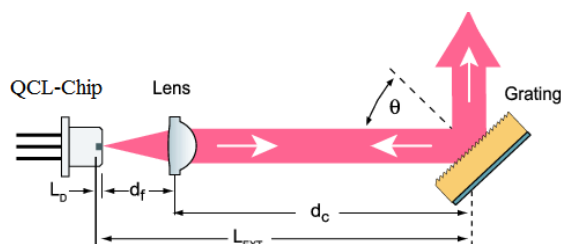
^{1,2,3} Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Islamshahr branch, Tehran

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.

۱- مقدمه

محدوده تنظیم گسترده تر آن ها می باشد. همچنین ساختارهای نامتجانس QCL ها که در آن چندین طول موج مختلف را در مراحل مختلف منتشر می کنند به عنوان راهی برای افزایش بیشتر محدوده 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]. در شکل 1 نمای کلی یک EC-QCL نشان داده شده است. در کاواک بیرونی پرتو نور به توری فرستاده می شود سپس به طور مستقیم به تراشه QCL برمی گردد. همان طور 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 می کند، 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 حامل ها و فوتون ها به صورت زیر تعریف می شوند [5]:

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

(1)

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

$(n_3 - n_2)$

(2)

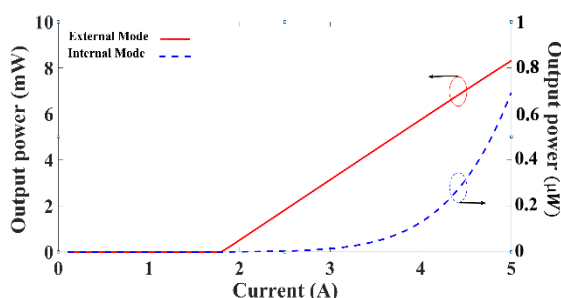
$$\frac{dS_{FP}}{dt} = \frac{c}{n} ((N_P g_{FP}(n_3 - n_2) - \alpha_{tot}^{FP}) S_{FP} + \beta \frac{n_3}{\tau_{SP}})$$

لیزرهای نیمه هادی به دو دسته لیزرهای دوقطبی و تک قطبی تقسیم می شوند. لیزرهای دوقطبی مبتنی بر باز ترکیب الکترون های نوار هدایت و حفره های نوار ظرفیت در شکاف باند انرژی می باشند؛ در حالی که لیزرهای تک قطبی در عملکرد خود تنها از یک نوع حامل استفاده می کنند؛ از این رو تک قطبی نامیده می شوند [۱]. لیزرهای آبشاری کوانتومی (QCLs) جزء لیزرهای نیمه هادی تک قطبی محسوب می شوند که در آن ها، فوتون ها از طریق گذارهای نوری درون-نوری در چاه های کوانتومی نامتقارن تولید می شوند [۲]. لیزرهای آبشاری کوانتومی به خاطر تولید نور در طیف وسیعی از طول موج ها (۳ تا ۳۰۰ میکرومتر) در شناسایی گازها کاربرد فراوانی دارند و تنها لیزرهای نیمه هادی هستند که در محدوده بالای مادون قرمز به عنوان منابع مؤثر نوری مورد استفاده قرار می گیرند. لیزرهای آبشاری کوانتومی با کاواک بیرونی (EC-QCL) محدودیت تنظیم لیزرهای آبشاری کوانتومی با فیدبک توزیع شده (DFB-QCL) را برطرف می کنند، بنابراین در میان لیزرهای آبشاری کوانتومی از جایگاه ویژه ای برخوردارند. به منظور بهبود عملکرد این دسته از لیزرهای نیمه هادی و کنترل مشخصه های ایستا و پویای آن ها، تحلیل و شبیه سازی معادلات حاکم ضروری به نظر می رسد. در این تحقیق، یک لیزر آبشاری کوانتومی (مبتنی بر یک ساختار InAlAs/InGaAs) با استفاده از الگوی استاندارد معادلات نرخ مدل سازی و تحلیل شده است. در بخش دوم این مقاله، تئوری حاکم بر لیزرهای آبشاری کوانتومی با کاواک بیرونی ارائه می شود و نتایج در بخش سوم بحث می شوند.

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 آن ها محدود و کمتر از ۱٪ طول موج تابشی لیزر است که مزایای آن ها را برای تحقیقات طیف سنجی محدود می سازد. برای غلبه بر این محدودیت EC-QCLs ساخته شده اند و مزیت اصلی یک EC-QCL در مقایسه با یک DFB-QCL

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 مدهای 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.



شکل ۲: مشخصه توان بر حسب جریان تزریقی در مدهای تابشی بیرونی و درونی.

(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_2 و n_3 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 فوتونی 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_{EC} و S_{FP} به ترتیب معرف چگالی شار نوری مدهای کاواک داخلی و کاواک بیرونی می‌باشند. در ادامه g_F و g_{EC} به ترتیب معرف بهره نوری مدهای 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 آبخاری 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 در نتیجه طول عمر فوتون کاواک بیرونی را تعیین کرد.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ توان خروجی مدهای 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

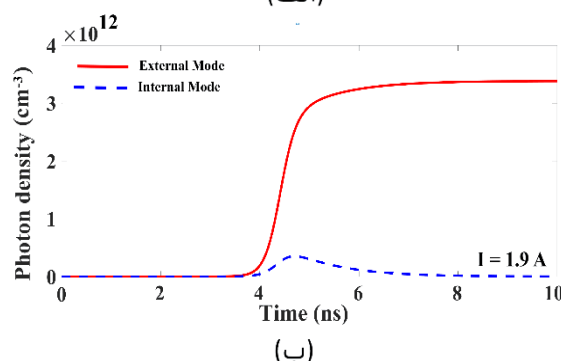
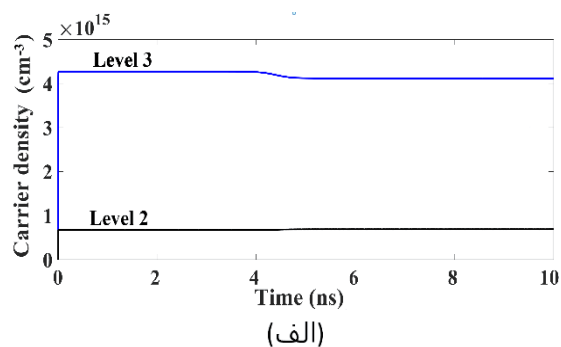
کاواک بیرونی) را تغییر داد. از آنجائی که تغییر طول کاواک به تغییر طول موج تابشی لیزر منتج می‌گردد، تغییر طول کاواک به‌طور مستقیم به تنظیم پذیری طول موج تابشی لیزر آبخاری کوانتومی ختم می‌شود. نتایج گذرای حاصل از این مقاله با نتایج تجربی منتشر شده در [6] مطابقت می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

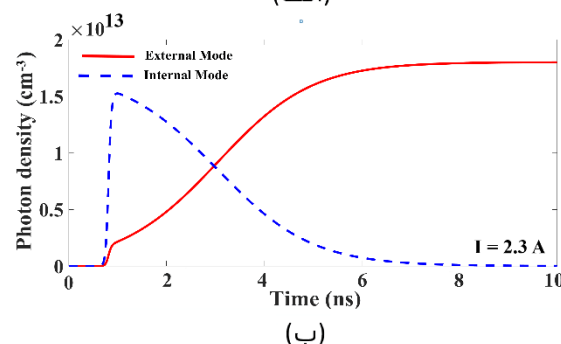
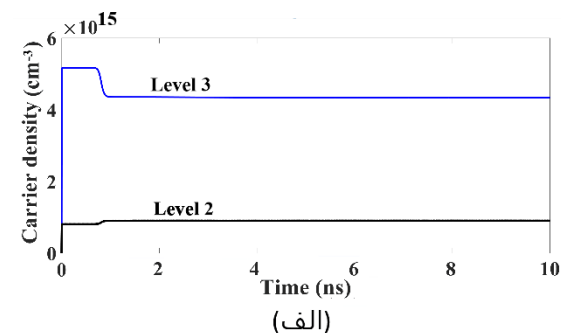
با استفاده از الگوی استاندارد معادلات نرخ، یک الگوی عددی برای تحلیل و شبیه سازی لیزرهای آبخاری کوانتومی با کاواک بیرونی ارائه شد. مشخصه‌های حالت ماندگار و حالت گذرای لیزر محاسبه و تحلیل گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهند توان نوری حاصل از مود تابشی بیرونی بر توان نوری مود درونی غلبه می‌کند و 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. Hüge, 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.



شکل ۳: (الف) تغییرات زمانی چگالی حامل‌ها در ترازهای بالا و پایین لیزر و (ب) تغییرات زمانی مدهای تابشی بیرونی و درونی به ازای یک پالس جریان با دامنه 1.9 A (متناظر با جریان آستانه لیزر).



شکل ۴: (الف) تغییرات زمانی چگالی حامل‌ها در ترازهای بالا و پایین لیزر و (ب) تغییرات زمانی مدهای تابشی بیرونی و درونی به ازای یک پالس جریان با دامنه 2.3 A (بالتر از جریان آستانه لیزر).

قابل ذکر است، می‌توان با تغییر طول فیزیکی کاواک بیرونی تلفات کاواک بیرونی (و در نتیجه طول عمر فوتون‌های