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

بررسی اثر حرارت بر مشخصه‌های ایستا و پویای یک لیزر نقطه کوانتومی با استفاده از الگوی معادلات نرخ سه سطحی

زیبا فریس[۱]، دکتر حسین رضا یوسف وند[۲]

[۱و ۲] گروه الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

چکیده – این مقاله به بررسی اثر حرارت بر مشخصه‌های ایستا و پویای یک لیزر نقطه کوانتومی خود آراسته در گستره *InAs/InP* پرداخته است. با استفاده از الگوی معادلات نرخ سه سطحی و با احتساب اثر حرارت بر روی پارامتر های مربوطه دینامیک حامل و فوتون تحلیل می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهد که پارامترهای اساسی لیزر مانند جریان آستانه و زمان پاسخ دهی،متأثر از حرارت می باشند.

کلید واژه- لیزر نقطه کوانتومی، معادلات نرخ ، مشخصه‌های ایستا و پویا، اثر حرارت.

Investigation of Temperature Effect on the Static and Dynamic Characteristics of a Quantum Dot Laser Using Three-Level Rate Equations Model

Ziba Faris[۱], Dr. Hossein Reza Yousefvand[۲]

[۱,۲] Faculty of Engineering ,Department of Electronic, , Azad Islamic University Eslamshahr Branch

Abstract- in this paper, we investigate the effect of temperature on the static and dynamic characteristics of a self-assembled InAs/InP quantum dot laser. A detailed analysis of the carrier and photon dynamics is carried out using a three-level rate-equation model, by taking in to account the temperature dependency of the relevant parameters. The results of simulation revel that the main characteristics of the device such as threshold current and turn-on delay time are affected by the temperature.

Keywords: Quantum dot laser, Rate equations, Static and dynamic characteristics, Temperature effects.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱-مقدمه

نقاط کوانتومی *(QD)* نوع جدیدی از نانو ساختارهای نیمه رسانا هستند که در آن حامل‌ها در سه بعد محصورشده‌اند و این محصور شدگی باعث می‌شود نقاط کوانتومی رفتاری شبیه به اتم داشته باشند. لیزرهای نیمه‌هادی مبتنی بر نقاط کوانتومی نسبت به سایر لیزرهای نیمه‌هادی مرسوم، در چند سال اخیر مورد توجه محققین در زمینه‌ی الکترونیک نوری قرار گرفته است. زیرا سیستم‌های شامل نقاط کوانتومی دارای ویژگی های منحصر به فردی از جمله پاسخ مدولاسیون بالا ، جریان آستانه پایین و پایداری دمایی بالا می باشند [۳-۱].

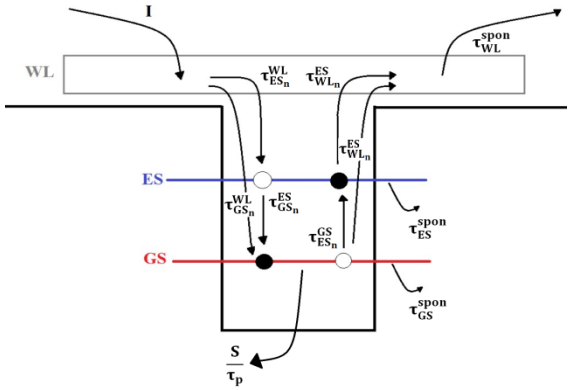
متداول‌ترین روش در تحلیل رفتار پیچیده‌ی لیزر های نقطه کوانتومی استفاده از الگوی معادلات نرخ *(REM)* حامل‌های الکترونی و فوتونی می‌باشد. در این دسته از افزاره ها ناحیه فعال لیزر، از نقاط کوانتومی خود آراسته *(Self-Assembled)* تشکیل می‌شود که بر روی لایه‌ی خیس *(WL)* شکل گرفته است. لایه‌ی خیس همچون چاه کوانتومی دو بعدی با حالت انرژی شبه پیوستار رفتار می‌کند. ترابری حامل‌ها در بین لایه‌ها، عامل اصلی در تعیین دینامیک لیزر نقطه کوانتومی است [۲].

با توجه به شرایط رشد، تمامی نقاط کوانتومی بر روی لایه‌ی خیس قرار دارند و از طریق این لایه با یکدیگر در ارتباط هستند.

در این مقاله، با استفاده از الگوی معادلات نرخ سه سطحی مشخصه‌های خروجی یک لیزر نقطه کوانتومی *InAs/InP* شامل پاسخ گذرا و پالس حالت ماندگار توان نوری خروجی تحلیل شده است.

۲-معادلات نرخ حامل و فوتون

برای تحلیل و بررسی رفتار لیزر، دو تراز پایین انرژی به‌عنوان حالت پایه *(GS)* و حالت برانگیخته *(ES)* در سیستم *InAs/InP* استفاده شده است. شکل (۱) دیاگرم انرژی نوار هدایت ناحیه‌ی فعال لیزر نقطه کوانتومی و فرآیندهای واهلش حامل‌ها را نشان می‌دهد. حامل‌ها به میزان جریان I از منبع تحریک، به ناحیه خیس تزریق می‌شوند. این لایه مانند مخزنی برای ترازهای پایین‌تر عمل می‌کند. حامل‌ها از لایه‌ی تر به داخل تراز برانگیخته *ES* یا به‌طور مستقیم به داخل تراز پایه *GS* با ثابت زمانی $\tau_{GSn}^{WL}=\tau_{ESn}^{WL}$ واهلش می‌یابند. در تراز *ES* تعدادی از جفت الکترون و حفره‌ها با ثابت زمانی τ_{spon} به صورت خودبه‌خودی بازترکیب می‌شوند و تعدادی به درون حالت پایه با ثابت زمانی τ_{GSn}^{WL} واهلش می یابد.



شکل ۱: نمودار طرحوار از الگو واهلش و فرار در لیزر نقطه کوانتومی *InAs/InP*

باتوجه به طرحوار نشان داده شده برای *m* امین گروه نقطه کوانتومی *(m=n)*، می‌توان واهلش های نوری و غیر نوری الکترون‌ها و دینامیک حامل و فوتون را برای سه تراز *WL* (تراز متناظر با لایه‌ی خیس)، *ES* (تراز برانگیخته) و *GS* (تراز پایه) به‌صورت زیر بیان نمود.

درنهایت معادلات آهنگ دینامیک حامل و فوتون در ترازهای مختلف لیزر نقطه کوانتومی سه سطحی به شرح زیر نوشته می‌شوند [۵]:

$$\frac{dN_{WL}}{dt}=\frac{I}{e}+\sum_n\frac{N_{ESn}}{\tau_{WLn}^{ES}}+\sum_n\frac{N_{GSn}}{\tau_{WLn}^{GS}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{WL}^{spon}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{GS}^{WL}} \quad (۱)$$

$$\frac{dN_{ESn}}{dt}=\frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}+\frac{N_{GSn}(1-p_{ESn})}{\tau_{ESn}^{GS}}-\frac{N_{ESn}}{\tau_{WLn}^{ES}}-\frac{N_{ESn}}{\tau_{GSn}^{ES}}-\frac{N_{ES}}{\tau_{ES}^{spon}}-\frac{c\Gamma}{n_r}\sum_m g_{mnES}S_m \quad (۲)$$

$$\frac{dN_{GSn}}{dt}=\frac{N_{WL}}{\tau_{GSn}^{WL}}+\frac{N_{ESn}}{\tau_{GSn}^{ES}}-\frac{N_{GSn}(1-p_{ESn})}{\tau_{ESn}^{GS}}-\frac{N_{GSn}}{\tau_{WLn}^{GS}}-\frac{N_{GS}}{\tau_{GS}^{spon}}-\frac{c\Gamma}{n_r}\sum_m g_{mnGS}S_m \quad (۳)$$

$$\frac{dS_{GSm}}{dt}=\frac{c\Gamma}{n_r}\sum_n g_{mnGS}S_{GSm}-\frac{S_{GSm}}{\tau_p}$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

در این معادلات N_{ESn} و N_{GSn} به ترتیب تعداد حامل‌ها در زیرگروه nام در ES و GS است، I جریان تزریقی، G_{GSn} و G_{ESn} به ترتیب احتمال بازترکیب متناظر با انرژی E_{ESn} و E_{GSn} است.

β ضریب گسیل خود به خودی است n_r ضریب شکست و Γ ضریب محصورشدگی نوری است که در معادلات بالا مورد استفاده قرارگرفته است. همچنین بهره نوری تراز برانگیخته و تراز پایه به ترتیب در معادلات زیر آمده است:

$$g_{mnES} = \mu_{ES}\frac{\pi e^2\hbar}{Cn_r\varepsilon_0 m_0^2}\frac{N_d}{H}\frac{|P_{ES}^{\sigma}|^2}{E_{ESn}} * (2P_{ESn}-1)G_{ESn}B_{ES}(E_{ESm}-E_{ESn}) \quad (۵)$$

$$g_{mnGS} = \mu_{GS}\frac{\pi e^2\hbar}{Cn_r\varepsilon_0 m_0^2}\frac{N_d}{H}\frac{|P_{GS}^{\sigma}|^2}{E_{GSn}} * (2P_{GSn}-1)G_{GSn}B_{GS}(E_{GSm}-E_{GSn}) \quad (۶)$$

τ_p معرف طول عمر فوتون در داخل کاواک است در معادلات بالا H عرض میانگین نقاط کوانتومی و $|P_{GS,ES}^{\sigma}|$ سرعت ماتریس ممنتم است و طول عمرهای وابسته به حرارت در لیزرهای نقطه کوانتومی به شرح زیر تعریف میگردند و سایر پارامترها در مرجع مربوطه معرفی شده اند [۴]:

$$\tau_{ESn}^{GS} = \tau_{GSn}^{ES}\frac{\mu_{GS}}{\mu_{ES}}e^{(E_{ESn}-E_{GSn})/K_BT} \quad (۷)$$

$$\tau_{WLn}^{ES} = \tau_{ESn}^{WL}\frac{\mu_{ES}N_dN_1}{\rho_{WLeff}}e^{(E_{WL}-E_{ESn})/K_BT} \quad (۸)$$

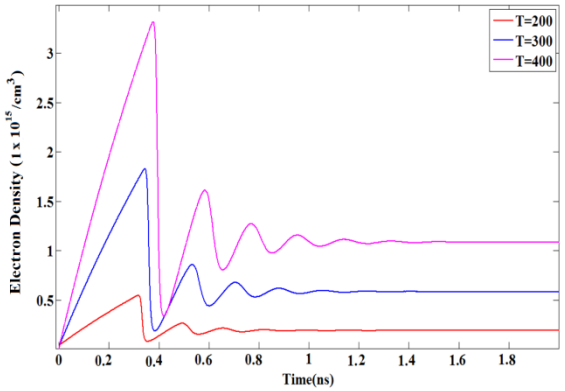
$$\tau_{WLn}^{GS} = \tau_{GSn}^{WL}\frac{\mu_{GS}N_dN_1}{\rho_{WLeff}}e^{(E_{WL}-E_{Sn})/K_BT} \quad (۹)$$

۱-۲-نتایج و بحث

با حل معادلات نرخ سه سطحی در شرایط گذرا و حالت ماندگار و با اعمال زمان های واهلش (وابسته به حرارت غیر نوری) بین ترازهای موجود، مشخصه‌های خروجی لیزر استخراج می‌گردد.

در شکل(۲) و شکل(۳) به ترتیب تغییرات چگالی الکترون‌ها در تراز پایه GS و تغییرات توان خروجی لیزر به ازای سه دمای مختلف(200k, 300k و 400k) به ازای یک پالس جریان 5mA نشان داده شده است. مشاهده می گردد با افزایش دما، توان خروجی لیزر به صورت جزئی کاهش یافته و زمان پاسخ دهی لیزر به صورت محسوسی (با افزایش دما) افزایش می یابد. زمان پاسخ دهی لیزر (به ازای پالس جریان ورودی) در لیزرهای نقطه کوانتومی از اهمیت ویژه ای برخوردار است و به صورت زیر تعریف می شود: فاصله زمانی بین تزریق جریان و زمان رسیدن توان خروجی به 10% از مقدار نهایی آن‌ها معرف زمان تأخیر افزاره است [۶].

در شکل (۳) ملاحظه می‌شود ریزش نوری الکترون‌ها در تراز پایه (در نتیجه افزایش توان نوری افزاره) با افزایش دما، زمان پاسخ دهی را افزایش می دهد.

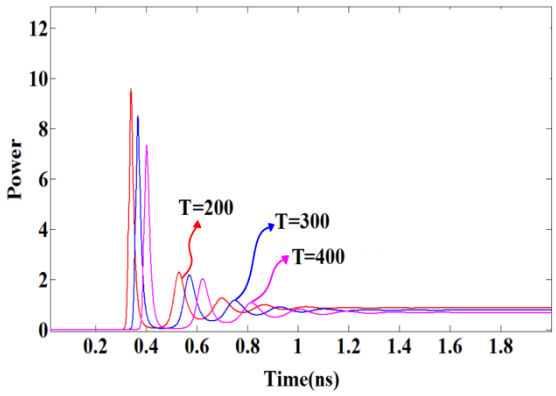


شکل۲: مشخصه گذرای الکترون‌ها به ازای سه دمای 200k، 300k و 400k برای طول عمر فوتون $8ps$ (در تراز پایه)

در شکل (۴) پاسخ حالت ماندگار توان نوری برحسب جریان تزریقی $(L\text{-}I)$ به ازای طول عمر فوتون برابر $8ps$ در سه دمای 200k، 300k و 400k نشان داده شده است.

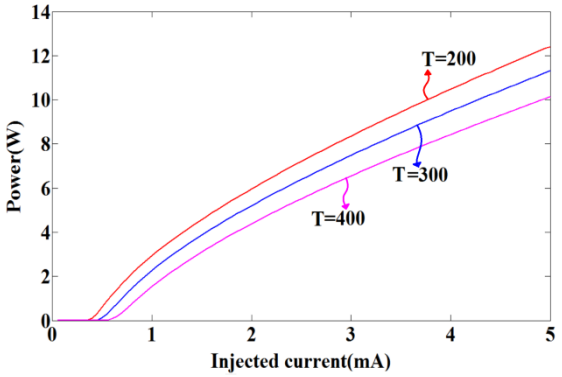
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]



شکل۳: مشخصه گذرای فوتون‌های خروجی به ازای سه دمای متفاوت (400k و 300k, 200k).

نتایج حاصل از پاسخ حالت ماندگار نشانگر این است که با افزایش جریان تزریقی در لیزر نقطه کوانتومی، و با افزایش حرارت، توان نور خروجی کاهش یافته و جریان آستانه‌ی لیزینگ افزایش می یابد. با توجه به معادلات نرخ ارائه شده این کاهش توان و افزایش جریان آستانه را می‌توان به کاهش زمان واهلش های غیر نوری (با افزایش دما) الکترون‌های تراز پایه *GS* نسبت داد.



شکل۴: تغییرات توان خروجی برحسب جریان (پاسخ ماندگار) به ازای سه دمای 400k و300k, 200k.

۳ -نتیجه‌گیری

در این مقاله یک دسته معادلات نرخ سه سطحی و با احتساب پارامترهای حرارتی به منظور بررسی دینامیک حامل و فوتون در یک لیزر نقطه کوانتومی ارائه شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در لیزرهای نقطه کوانتومی با افزایش دما، جریان آستانه لیزینگ و زمان پاسخ دهی لیزر افزایش می یابد. این افزایش جریان آستانه و افزایش زمان پاسخ دهی لیزر را می توان به کاهش زمان واهلش غیر نوری در الکترون‌های تراز پایه نسبت داد که متأثر از حرارت می باشند.

مراجع

[۱] A. Daraei, S. M. Izadyar and N. chenarani , “Simulation and Analysis of Carrier Dynamics in the InAs/GaAs Quantum Dot Laser, Based upon Rate Equations” Optics and Photonics Journal, vol. 13, pp. 112-116, 2013.

[۲] M. Sugawara, T. Akiyama, N. Hatori1, Y. Nakata, H. Ebe1 and H. Ishikawa, “Quantum-dot semiconductor optical amplifiers for high-bit-rate signal processing up to 160 Gbs and a new scheme of regenerators” Institute of Physics Publishing Meas. Sci. Technol. vol. 13, pp. 1683-1691, 2002.

[۳] S. S. Mikhrin , A. R. Kovsh , I. L. Krestnikov , A. V. Kozhukhov, D. A. Livshits , N. N. Ledentsonv , Y. M. Shernyakov , I.I. Novikov , M. V. Maximov, V. M. Ustinov, and Z. I. Alferov, Semicond . Sci. Technol., vol. 20, p. 340, 2005.

[۴] F. G. Kiril Veselinov, M. Gioannini, Spectral analysis of 1.55 micron InAs-InP(113)B quantum-dot lasers based on a multi population rate equations model' IEEE Journal of Quantum Electron., vol. 45, no.7, pp. 872-878, 2009.

[۵] B. W. Tilma, M. S.Tahvili, J. Kotani, R. Notzel. M. K. Smit, E. A. J. M. Bente. Measurement and analysis of optical gain spectra in 1.6 ti 1.8 μm InAs-InP (100) quantum-dot amplifiers. Opt. Quantum Electron. vol. 41, pp. 735-749, 2009.

[۶] H. R. Yousefvand, V. Ahmadi, K. Saghafi, Static and dynamic response analysis of Raman injection quantum cascade laser using circuit level modeling, J. Light Wave Tecnol.vol. 28, pp. 3142-3148, 2010.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]