بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تحلیل اثر تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی بر مشخصه‌های استاتیکی لیزرهای نقطه کوانتومی InAs/InP

غلامرضا باباعباسی[۱]، علی میر[۲] و محمدحسن یاوری[۳]

۱- موسسه آموزش عالی شهاب دانش، گروه الکترونیک
۲- دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه الکترونیک
۳- دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه الکترونیک

چکیده - در این تحقیق رفتار لیزرهای نقطه کوانتومی خودآرای *InAs/InP* در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر با در نظر گرفتن حالت پایه و برانگیخته و لحاظ کردن اثرات پهن شدگی همگن و غیر همگن بهره با استفاده از حل معادله نرخ لیزر مدل‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد با افزایش جریان تزریقی وقتی کانال واهلش مستقیم از تراز وتینگ به تراز پایه در نظر گرفته می‌شود، اثر اشباع حالت پایه دیده نمی‌شود، همچنین لیزردهی حالت برانگیخته در طول موج ۱/۴۲ میکرو متر ظاهر می‌شود. علاوه بر این، افزایش تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی باعث افزایش کارایی کوانتومی شده، ولی متاسفانه افزایش جریان آستانه را در پی دارد.

کلید واژه- بهره نوری، پهن شدگی غیر همگن، لیزر نقطه کوانتومی، معادله نرخ.

Analysis of Effect of Number of Quantum Dot Layers on Static Characteristics InAs/InP Quantum Dot Laser

Gholamreza Babaabasi[۱], Ali Mir[۲], and Mohammad-Hasan Yavari[۳]

۱- Shahab Danesh Institute of Higher Education
۲- Lorestan University, Dept.of Engineering
۳- Shahed University, Dept.of Engineering

Abstract- In this paper the behavior of InAs/InP quantum dot semiconductor lasers in ***۱,۵۵***μm by considering excited and ground state and effects gain homogeneous broadening and inhomogeneous broadening will be simulate by implementing rate equations. The simulation results indicates increasing in injected current when direct relaxation channel between wetting state and ground state is considered, there is no effect of ground state saturation. In addition, the excited state lasing will appear in ***۱,۴۲***μm. in the following, by examining the number of quantum dot layers, the quantum efficiency will enhance by increase in quantum dot layers but the threshold current will increase too.

Keywords: Gain optical, Inhomogeneous broadening, Quantum dot laser, Rate equations.

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

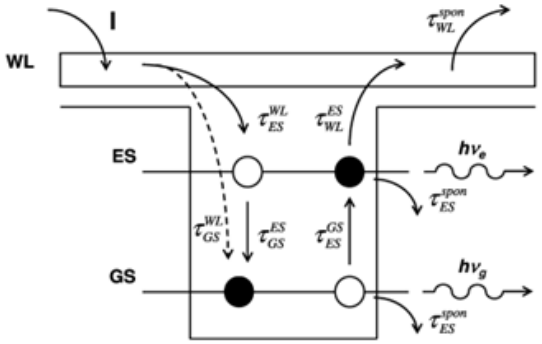
[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]

۱- مقدمه

در خلال طراحی لیزرها مدلسازی خصوصیات دینامیکی و استاتیک لیزر از طریق تعدادی ابزار اجتناب ناپذیر است. این ابزار اغلب بر پایه مجموعه‌ای از معادلات آهنگ استوار است، که بوسیله حل این معادلات می‌توان رفتار لیزر را قبل از ساخت در مرحله طراحی پیش بینی کرد و تطابق عملکرد لیزر با آنچه مطلوب است مقایسه نمود. نقاط کوانتومی خود آرا به واسطه شیوه ساخت دارای شکل، اندازه و محل قرارگیری یکسانی نیستند که این منشأ پهن شدگی غیر همگن بهره نوری است. در این تحقیق لیزرهای نیمه‌هادی مخابراتی مبتنی بر نقاط کوانتومی خودآرای ناهمگون InAs/InP در جهت رشد (۱۱۳) در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر با در نظر گرفتن حالت پایه و برانگیخته و لحاظ کردن اثرات ساختاری ناشی از فرآیند ساخت نظیر پهن شدگی غیر همگن بهره و اثرات محیطی نظیر درجه حرارت یا پهن‌شدگی همگن با استفاده از معادله نرخ رفتار لیزر مدل‌سازی می‌شود.

۲- معادلات نرخ حامل و فوتون

برای تحلیل رفتار لیزر دو تراز پایین‌تر انرژی به عنوان حالت پایه و حالت برانگیخته در سیستم InAs/InP استفاده شده است و از وجود حالت پیوستار انرژی چشم پوشی شده است. الکترون و حفره را بصورت زوج الکترون و حفره در نظر می‌گیریم. شکل (۱) دیاگرام انرژی نوار هدایت ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتومی و فرآیند واهلش حامل ها را نشان می‌دهد. حامل‌ها به درون لایه وتینگ با آهنگ جریان تزریقی I واهلش می‌یابند. این لایه مانند مخزنی برای ترازهای پائین‌تر عمل می‌کند. حامل ها از WL به داخل تراز برانگیخته 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 حفره ها با ثابت زمانی τ_{spon} به‌طور خودبخودی باز ترکیب می‌شوند و تعدادی به درون حالت پایه با ثابت زمانی τ_{GSn}^{WL} واهلش می‌یابند[۱-۳].



شکل ۱: مدل دینامیک حامل‌ها با کانال واهلش مستقیم(خط چین) و آبشاری برای nامین گروه نقطه کوانتومی

۲-۱- معادلات نرخ توصیف کننده دینامیک حامل و فوتون‌ها

از نوشتن معادلات نرخ برای چگالی تراز ویتینگ، ترازهای تحریک و زمین گروه‌های نقاط کوانتومی و نیز فوتون‌ها صرف‌نظر می‌کینم و صرفاً به معادلات بهره‌های نوری خطی و احتمال اشغال حالت‌ها که وابسته به ساختار فوتونیک کریستال خواهد شد اکتفا می‌کینم. برای دیدن این معادلات می‌توان به [۶] مراجعه کرد.

$$g_{mnES} = \mu_{ES} \frac{\pi e^2 \hbar}{c n_r \varepsilon_0 m_0^2} \frac{N_d}{H} \frac{\left|P_{ES}^{\sigma}\right|^2}{E_{ESn}} \times (2P_{ES\,n} - 1) G_{nES} B_{ES} (E_m - E_{ESn}) \quad (۱)$$

$$g_{mnGS} = \mu_{GS} \frac{\pi e^2 \hbar}{c n_r \varepsilon_0 m_0^2} \frac{N_d}{H} \frac{\left|P_{GS}^{\sigma}\right|^2}{E_{GSn}} \times (2P_{GS\,n} - 1) G_{nGS} B_{GS} (E_m - E_{GSn}) \quad (۲)$$

$$P_{ESn.GSn} = \frac{N_{ESn.GSn}}{\mu_{ES.GS} N_d W L_{ca} N_l G_{nES.nGS}} \quad (۳)$$

$$P_m = c E_m S_m Ln(\frac{1}{R_1 R_2}) / (2 n_r L cav) \quad (۴)$$

در این معادلات بهره نوری خطی g_{mn} به احتمال اشغال حالت های $P_{ESn,GSn}$وابسته است و احتمال اشغال حالت های $P_{ESn,GSn}$ به تعداد لایه‌های نقطه کوانتومیN_L وابسته است. توان خروجی برای فوتون‌های مد m بصورت رابطه (۴) است. در ادامه معادله نرخ را به روشی رانک کوتای مرتبه چهار با اعمال جریان پله واحد در زمان $t = 0$ حل می‌کنیم و برای بررسی رفتار استاتیک زمانی نوسانات واهلش مدهای لیزش به اتمام می‌رسد مقدار چگالی

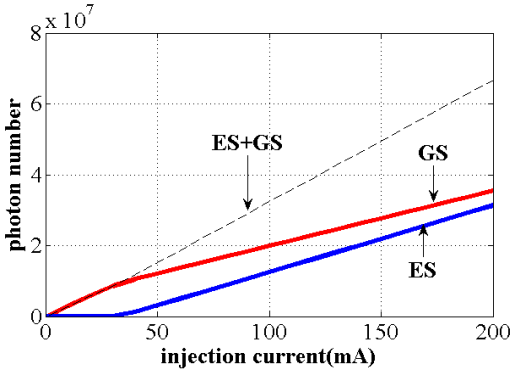
[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]

فوتون‌ها در هر یک از مدهای همراه با طول موج گذار بین باندی مد مربوطه را در نظر می‌گیریم.

۳- لیزردهی دو حالته

نتایج عملی لیزرهای نیمه های (۱۱۳) InAs/InP نشان می‌دهد که با افزایش جریان تزریقی دومین پیک لیزری در طیف لیزر دهی ظاهر می شود[۴]. در مدل آبشاری وقتی که تراز برانگیخته به آستانه لیزش می‌رسد گسیل از تراز پایه اشباع می‌گردد وگسیل از تراز برانگیخته بطور خطی افزایش می یابد این حالت در مقاله [۵] بررسی گشته است. در لیزری که در این مقاله مد نظر است مبتنی بر کانال واهلش مستقیم از لایه وتینگ به تراز پایه است که دراین حالت برخلاف واهلش آبشاری گسیل از تراز پایه هیچ وقت اشباع نمی‌شود .

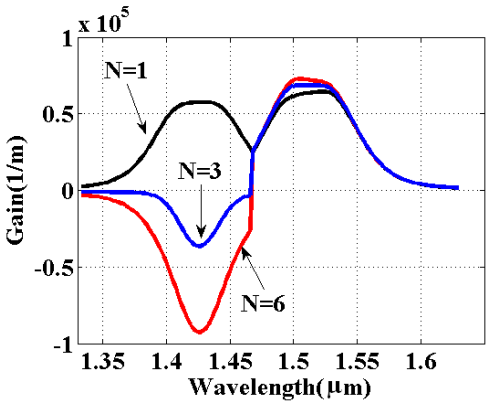
شکل(۲) چگالی فوتونهای گسیلی محاسبه شده در ناحیه فعال لیزر به ازای کانال واهلش مستقیم از تراز وتینگ به تراز پایه به ازای $\Gamma_0 = 30meV, L_{cav} = 0.7mm$ و $w = 30\mu m, \Gamma_{\hom,GS} = 20mev, \Gamma_{\hom,ES} = 20mev$ تابعی از جریان تزریقی برای ترازهای پایه و برانگیخته را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مدل کانال واهلش مستقیم دو مقدار آستانه برای دو گسیل لیزری نشان داده شده است وقتی گسیل القایی حالت بر انگیخته ظاهر می‌شود کارایی کوانتومی (شیب) برای نمودار حالت پایه کاهش می‌یابد و در همان نقطه گسیل القایی حالت برانگیخته افزایش می‌یابد.



شکل ۲: چگالی فوتون‌ها بر حسب جریان تزریقی برای لیزر دو حالته

۴- تاثیر تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی بر طیف بهره

در شکل (۳) طیف بهره برای تعداد متفاوت لایه نقطه کوانتومی بهازای $\Gamma_{\hom,GS} = 10mev$ $\Gamma_{\hom,ES} = 15mev$ و جریان ۱۰mA شبیه سازی شده است. به ازای یک لایه نقطه کوانتومی، بهره برای هر دو تراز پایه و بر انگیخته مثبت است و توان خروجی در این حالت ناشی از گسیل القایی است. به ازای ۳ و۶ لایه نقطه کوانتومی تعداد نقاط یا چگالی حالت‌ها افزایش می‌یابد، که در این حالت بهره در تراز برانگیخته منفی می‌شود و لیزش در آن ناشی از گسیل خودبخودی است.



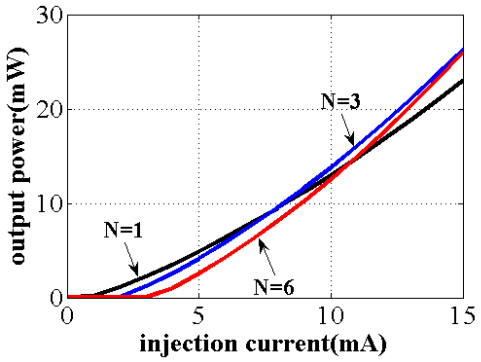
شکل ۳: طیف بهره به ازای ۱،۳و۶ لایه نقطه کوانتومی

۵- بررسی اثر تعدادلایه‌های نقطه کوانتومی بر جریان آستانه

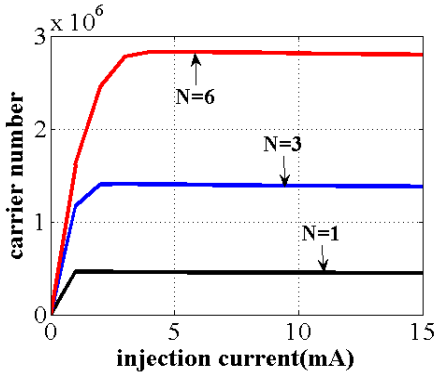
شکل‌های (۴) و (۶) تغییرات توان خروجی بر حسب جریان تزریقی را برای ۱و ۳ و۶ لایه نقطه کوانتومی به ترتیب برای حالت پایه و حالت برانگیخته ترسیم می‌کند. شکل‌های (۵) و (۷) تغییرات چگالی حامل‌ها بر حسب جریان تزریقی را برای ۱، ۳ و ۶ لایه نقطه کوانتومی به ترتیب برای حالت پایه و حالت برانگیخته ترسیم می‌کند. با افزایش تعداد لایه‌ها احتمال شکار حامل‌ها توسط نقاط افزایش می‌یابد و این فرآیند باعث افزایش کارایی کوانتومی می‌گردد ولی در عوض با افزایش تعداد لایه‌ها که باعث افزایش تعداد نقاط یا افزایش چگالی حالت می‌گردد و به دنبال آن به جریان بیشتر برای گسیل القای نیاز دارد. برهمین اساس با توجه به شکل در حالتی که ۶ لایه نقطه کوانتومی داریم کارایی کوانتومی افزایش می‌یابد ولی جریان آستانه هم افزایش می‌یابد. در این حالت لازم است مصالحه‌ای بین جریان آستانه و کارایی کوانتومی در نظر گرفته شود. مرز گسیل القایی و برانگیخته در حالتی اتفاق می‌افتد که چگالی حامل‌ها محدود یا اشباء گردد، از مقایسه شکل‌های (۵) و (۷) می‌توان نتیجه گرفت که چگالی حامل‌های آستانه برای تراز برانگیخته بیشتر از حالت پایه است و دلیل این امر این است که تبهگنی حالت برانگیخته دو برابر حالت پایه در نظر گرفته شده

[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]

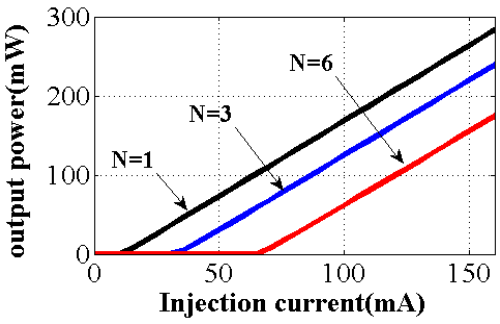
است.



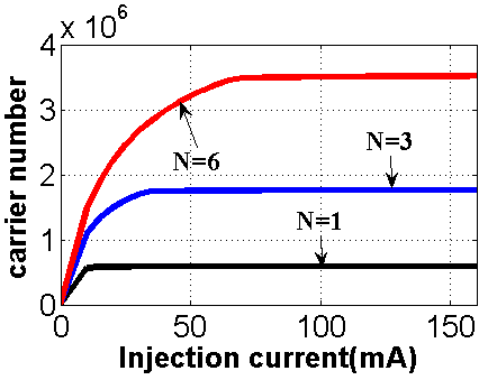
شکل ۴: تغییرات توان خروجی برحسب جریان به ازای تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی متفاوت برای حالت پایه



شکل ۵: تغییرات چگالی حامل‌ها برحسب جریان به ازای تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی متفاوت برای حالت پایه



شکل ۶: تغییرات توان خروجی برحسب جریان به ازای تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی متفاوت برای حالت برانگیخته



شکل ۷: تغییرات چگالی حامل‌ها برحسب جریان به ازای تعداد لایه‌های نقطه کوانتومی متفاوت برای حالت برانگیخته

نتیجه‌گیری

یک مدل تئوری برای بررسی ویژگی‌های طیف گسیل لیزرهای نقطه کوانتومی InAs/InP در جهت رشد (۱۱۳) در ۱/۵ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت. این مدل تئوری مبتنی بر حل معادلات آهنگ به روش رانک کوتای مرتبه چهار است. شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جریان تزریقی وقتی کانال واهلش مستقیم از لایه وتینگ به حالت پایه در نظر گرفته می‌شود، اثری از اشباع چگالی حامل‌ها در حالت پایه دیده نمی‌شود و با افزایش جریان تزریقی لیزردهی حالت برانگیخته در طول موج ۱/۴۲میکرومتر ظاهر می‌گردد. شبیه سازی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های نقاط کوانتومی باعث افزایش جریان آستانه ولی در عوض باعث افزایش کارایی کوانتومی می‌گردد که لازم است مصالحه‌ای بین افزایش جریان آستانه و کارایی کوانتومی صورت بگیرد.

مراجع

[۱] Sugawara M, Hatori N, Ebe H, Ishida M. Modeling room temperature lasingspectraof۱٫۳ mm self-assembled InAs/GaAs quantum dot lasers: homogeneous broadening of optical gain under current injection. Journal of AppliedPhysics ۲۰۰۵;۹۷:٤۳٥۲۳_٤۳٥۲۷.

[۲] K.Veselinov and F.Grillot;"Modelling of the two-state lasing and turn-on delay in۱٫٥٥μmInAs/InP(۱۱۳)QDlasers";IEEProc.Optoelectron.,Vol.۱٥۳,No.٦,December(۲۰۰٦)

[۳] K.Veselinov and F.Grillot;"Analysis of the double laser emission in۱٫٥٥μmInAs/InP quantum dot lasers"; IEEE, Quantum Electronic ,vol.٤۳,No.۹.(۲۰۰۷)

[٤] C. Platz, C. Paranthoen, P. Caroff, N. Bertru, C. Labbe, J. Even, O. Dehaese, H. Folliot, A. Le Corre, S. Loualiche, G. Moreau, J. C. Simon, and A. Ramdane, “Comparison of InAs quantum dot lasers emitting at ۱٫٥٥ m under optical and electrical injection,” Semicond. Sci. Technol., vol. ۲۰, pp. ٤٥۹–٤٦۳, ۲۰۰٥.

[٥] K.Mukai,andM.Sugawara; IEEE Photon Technol.lett., (۱۹۹۹).

[٦] «مدل سازی و بهینه سازی لیزرهای کاواک کریستال فوتونی با ساختار نقطه کوانتومی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، غلامرضا باباعباسی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]