بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

تحلیل اثر پهن شدگی همگن وغیر همگن بهره نوری بر خصوصیات استاتیک و دینامیک لیزرهای نقاط کوانتومی خود آرا

محسن روستایی[۱]، علیرضا کشاورز[۲] و مجتبی ثروت خواه[۳]
[۱ و۳] گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات فارس
[۲] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده – با حل معادلات آهنگ لیزر نقاط کوانتومی خودآرا به روش رانگ کوتا مرتبه چهارم با در نظر گرفتن اثرات پهن شدگی همگن و غیر همگن بهره نوری، خصوصیات استاتیک و دینامیک این نوع لیزر بررسی می گردد. نتایج نشان می دهند که با زیاد شدن اختلاف بین پهن شدگی همگن و غیر همگن افت خصوصیات استاتیک، آثار غیر خطی و کاهش بازده شیب نمایان می شود. افزایش جریان تزریقی باعث بهبود خصوصیات دینامیک از قبیل فرکانس نوسانات واهلش، پهنای باند مدولاسیون و تاخیر شروع گردیده و همچنین افزایش پهن شدگی همگن جریان آستانه و تاخیر شروع را کاهش می دهد.

کلید واژه- لیزر نقاط کوانتومی خودآرا، بهره نوری، پهن شدگی همگن و غیر همگن.

Analysis of Effect of Homogeneous and Inhomogeneous Broadening of Optical Gain on Static and Dynamic Characteristics in Self-Assembled Quantum Dots Lasers

Mohsen Roustaei[1], Alireza Keshavarz [2] and Mojtaba Servatkhah [3]

[1,3]Department of Physics, Science and Research branch, Islamic Azad University, Fars

[2]Department of Physics, Shiraz University of Technology

Abstract- The rate equations of self-assembled quantum dot laser are solved by using fourth order Rung-Kutta method and with considering effects of homogeneous and inhomogeneous broadening of optical gain, static and dynamic characteristics of this laser are investigated. Results are showed with increasing of different between homogeneous and inhomogeneous broadening, degradation of statics characteristics, nonlinearity in light-current characteristics and decreasing of slop-efficiency are appeared. Increasing of current injection is caused the dynamic characteristics, relaxation oscillation frequency, modulation bandwidth and turn on delay are heightened. In addition threshold current and turn on delay decrease with increasing of homogeneous broadening.

Keywords: Self-assembled quantum dots laser, Optical gain, Homogeneous and inhomogeneous broadening

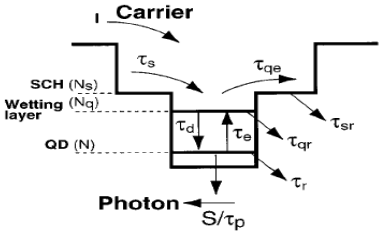
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

لیزرهای نیمرسانای نقاط کوانتومی در ناحیه فعالشان بروز دهنده تعدادی رفتارهای برتری از قبیل جریان آستانه بسیار پایین، غیر حساس بودن به دما، عملکرد با سرعت بالا، بهره نوری بالا، پهنای باند مدولاسیون وسیع و پهنای خط طیفی باریک می باشند که این برتری ها از طریق محدود سازی الکترونیکی سه بعدی، که حاصل آن طیف انرژی کاملاً گسسته می باشد ایجاد گردیده است[۳-۱]. در خلال طراحی لیزرها مدلسازی خصوصیات لیزر از طریق تعدادی ابزار محاسباتی اجتناب ناپذیر است. این ابزار اغلب بر پایه یک مجموعه از معادلات آهنگ استوار است که به وسیله حل این معادلات می توان رفتار لیزر را قبل از ساخت و در مرحله طراحی پیش بینی کرد و تطابق عملکرد لیزر را با آنچه مطلوب است مقایسه نمود[۴]. نقاط کوانتومی خود آرا به واسطه شیوه ساخت دارای شکل، اندازه و محل قرارگیری یکسانی نیستندکه این منشاء پهن شدگی غیر همگن بهره نوری است[۵]. در این مقاله با حل معادلات آهنگ و در نظر گرفتن پهن شدگی همگن و غیر همگن بهره نوری خطی، خصوصیات استاتیک و دینامیک برای یک لیزر نقاط کوانتومی خود آرای نوعی (InGaAs/GaAs) مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

۲- معادلات آهنگ

شیوه بحث در خصوص دینامیک حاملها و فوتونها در لیزر، حل معادلات آهنگ برای حاملها و فوتونها می باشد. شکل۱ نمای نوار رسانش در منطقه فعال لیزر را توضیح می دهد که شامل نقاط کوانتومی خودآرا و مراحل واهلش حاملها درون حالت پایه نقطه کوانتومی است.



شکل۱: نمای نوار رسانش در منطقه فعال لیزر و مراحل واهلش حاملها به حالت پایه نقطه کوانتومی[۶]

ثابت های مربوطه عبارتند از : پخش در منطقه SCH (τ_s)، باز ترکیب حامل ها در منطقه SCH (τ_{sr})، باز برانگیختگی حامل از چاه کوانتومی به منطقه SCH (τ_{qe})، باز برانگیختگی حامل از نقطه کوانتومی به لایه خیس (τ_e)، باز ترکیب حامل در لایه خیس (τ_{qr})، واهلش حامل درون نقطه کوانتومی (τ_d) و باز ترکیب در نقطه کوانتومی (τ_r). N_s تعداد حاملها در لایه SCH ، N_q تعداد آنها در لایه خیس و N تعداد آنها در نقاط کوانتومی می باشد. جهت توصیف اندرکنش بین نقاط با انرژی مختلف و فوتونها آنسامبل نقاط کوانتومی به 2M+1 گروه تقسیم می شوند که $\Delta E = ch/(2n_r L_{ca})$ پهنای انرژی برای هر گروه می باشد.که c سرعت نوردر خلاء، h ثابت پلانک و L_{ca} طول کاواک می باشد. انرژی n امین گروه به صورت $E_n = E_{cv} - (M-n)\Delta E$ که E_{cv} ، n=0,1,…,2M انرژی انتقال بین باندی و N_n تعداد حاملها در n امین گروه از نقاط کوانتومی است. بنابراین $N = \sum N_n$ و احتمال اشغال نقاط کوانتومی در حالت پایه با رابطه $P_n = N_n/(2N_D V_A G_n)$ داده می شود. که V_Aحجم منطقه فعال و N_D چگالی نقاط می باشد. معادلات آهنگ لیزر های نقاط کوانتومی خودآرا به صورت زیر خواهند بود:

$$dN_s/dt = I/e - N_s/\tau_s - N_s/\tau_{sr} + N_q/\tau_{qe} \qquad (۱)$$

$$dN_q/dt = N_s\Big/\tau_s + \sum_n N_n\Big/\tau_e - N_q/\tau_{qr} - N_q/\tau_{qe} - N_q\Big/\overline{\tau_d} \qquad (۲)$$

$$dN_n/dt = N_q G_n/\tau_{dn} - N_n/\tau_r - N_n/\tau_e - \frac{c\Gamma}{n_r}\sum_m g_{mn} S_m \qquad (۳)$$

$$dS_m/dt = \beta N_m\Big/\tau_r + \frac{c\Gamma}{n_r}\sum_n g_{mn} S_m - S_m/\tau_p \qquad (۴)$$

که β بازده جفت شدگی گسیل خود به خود مد لیزینگ، I جریان تزریقی و g_{mn} بهره نوری خطی n امین گروه نقاط است که m امین مد فوتون ها را می دهد:

$$g_{mn} = \frac{2\pi e^2 \hbar N_D}{c n_r \varepsilon_0 m_0^2}\frac{|P_{cv}|^2}{E_{cv}}(2P_n - 1)G_n B_{cv}(E_m - E_n) \qquad (۵)$$

که در آن $|P_{cv}|$ ماتریس انتقال و B_{cv} تابع شکل خط لورنتسی پهن شدگی همگن با تمام پهنا در نصف مقدار بیشینه(FWHM)، $2\hbar\Gamma_{cv}$ و G_n تابع توزیع گاوسی پهن شدگی غیر همگن باFWHM به صورت $\Gamma_0 = 2.35\xi_0$ به

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

صورت زیر می باشند:

$$B_{cv}(E-E_{cv})=\frac{\hbar\Gamma_{cv}/\pi}{(E-E_{cv})^2+(\hbar\Gamma_{cv})2} \qquad (۶)$$

$$G(E-E_{cv})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_0}\exp\left[-(E-E_{cv})^2/2\xi_0^2\right] \qquad (۷)$$

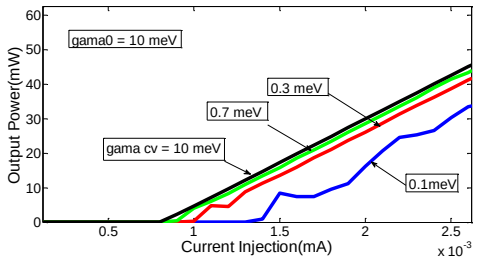
در رابطه (۵) از بهره اپتیکی غیر خطی چشم پوشی شده است و Γ عامل محدود سازی نوری می باشد[۶].

۳- نتایج نظری

حل معادلات آهنگ با استفاده از روش عددی رانگ کوتا مرتبه۴ و با استفاده از نرم افزار Matlab وبا بهره از پارامترهای موجود درمرجع[۶] با فرض اینکه تمام حاملها در لایه خیس تزریق می شوند($\tau_{qe}=\tau_{sr}=\infty$)انجام شده است همچنین از باز برانگیخته شدن حرارتی حاملها از نقاط کوانتومی نیز چشم پوشی می شود($\tau_{sr}=\infty$) و $\overline{\tau_d}$نیز برابر با زمان واهلش اولیه در نظر گرفته می شود. فرض شده نقاط کوانتومی استوانه ای شکل و نزدیک به متقارن باشند.

۳-۱- خصوصیات استاتیک

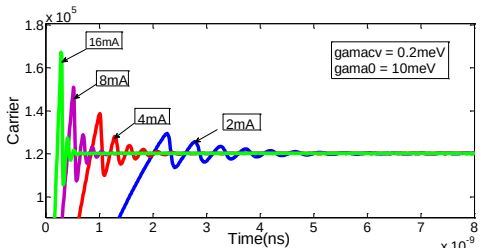
شکل۲ نمودار توان خروجی برحسب جریان تزریقی را نمایش می دهد. افزایش تمام پهنا در نصف مقداربیشینه(FWHM) پهن شدگی همگن اثرات غیر خطی بودن و بازده شیب را در نمودار توان خروجی کاهش می دهد تا جایی که این افزایش، با FWHM پهن شدگی غیر همگن معادل می گردد که در این حالت نمودار توان خروجی کاملا شکل خطی به خود می گیرد. در واقع اختلاف بین پهن شدگی همگن و غیر همگن باعث افت خصوصیات استاتیک می گردد. این نتیجه با مدل مطرح شده موسوم به مدل پهن شدگی همگن در مرجع[۶] و نتایج مرجع[۷] در توافق کامل است. دلیل این امر این است که وقتی که پهن شدگی همگن با پهن شدگی غیر همگن قابل مقایسه می شود فوتونهای مد لیزر نه فقط از طریق نقاط تشدید شده با انرژی بالا گسیل می شوند بلکه از دیگر نقاط غیر مرتعش در گستره‌ی پهن شدگی همگن نیز گسیل خواهند شد. از آنجا که حامل های نقاط تشدید نشده موجب می شوند مدهای مرکزی لیزر، بوسیله گسیل القایی صورت پذیرد و گسیل لیزر با یک خط باریک وکیفیت بالا اتفاق می افتد.



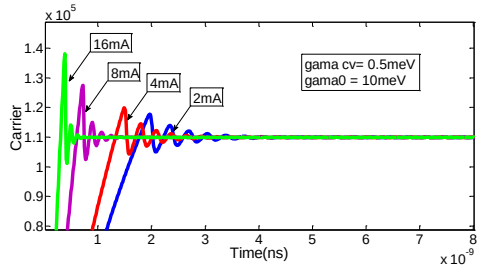
شکل ۲: نمودار توان خروجی بر حسب جریان تزریقی با در نظر گرفتن پهن شدگی ناهمگن با FWHM ، ۱۰meV و پهن شدگی همگن با FWHM ، ۰/۱، ۰/۳ ، ۰/۷ و ۱۰meV.

۳-۲- خصوصیات دینامیک

شکل۳و۴ تحولات زمانی حاملها را نمایش می دهد.



شکل۳ : تحولات زمانی حاملها در جریانهای تزریقی ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلی آمپر و پهن شدگی همگن با FWHM ، ۰/۲meV

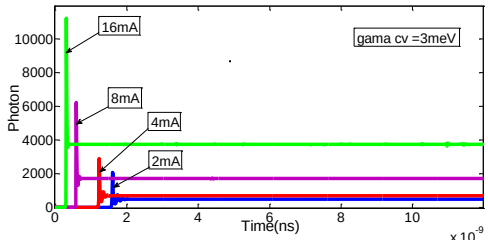


شکل۴ : تحولات زمانی حاملها در جریانهای تزریقی ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلی آمپر و پهن شدگی همگن با FWHM ، ۰/۵meV

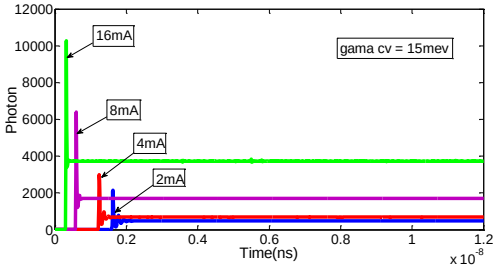
همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان تزریقی، تاخیر در شروع لیزر کاهش می یابد و همچنین فرکانس نوسانات واهلش و قدر نوسانات واهلش افزایش می یابد که به دلیل رسیدن سریعتر به وارونی جمعیت و برانگیختگی بیشتر حاملها می باشد. با افزایش FWHM پهن شدگی همگن بیشینه قدر کاهش و فرکانس نوسانات واهلش افزایش پیدا می کند. دلیل کاهش بیشینه قدر این است که چگالی حالتها در گروه های مرکزی کمتر و در نتیجه با تزریق جریان، حاملهای کمتری برانگیخته می شوند و

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

هر چه حاملها کمتر باشند فرکانس نوسانات واهلش (افت و خیزها) حاملها بیشتر خواهد شد. شکل۵ و۶ تحولات زمانی فوتونها را نشان می دهد.

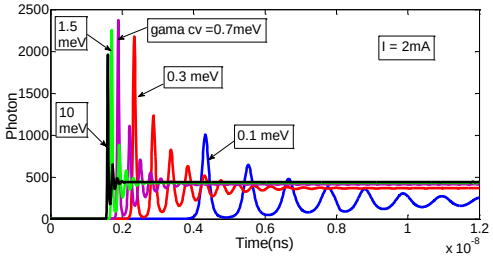


شکل۵ : تحولات زمانی فوتونها در جریانهای تزریقی ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلی آمپر و در پهن شدگی همگن با FWHM ، ۳ meV



شکل۶ : تحولات زمانی فوتونها در جریانهای تزریقی ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلی آمپر و در پهن شدگی همگن با FWHM ، ۱۵ meV

از بررسی شکل۵ و۶ می توان دریافت که فوتونهای حالت پایه که مربوط به توان خروجی است، با افزایش جریان تزریقی افزایش می یابد دلیل این امر افزایش تعداد حاملها و واهلش آنها به درون نقطه کوانتومی و تولید فوتون می باشد. با افزایش جریان تزریقی تأخیر شروع کاهش می یابد دلیل این امر این است که حاملها برای شروع نوسانات واهلش زودتر آماده می شوند با افزایش جریان تزریقی فرکانس نوسانات واهلش و بیشینه ی قدر این نوسانات افزوده می شود به این دلیل که فوتونها زودتر و بیشتر تولید می شوند و باعث بالا رفتن قدر نوسانات شده و از طرفی در جریانهای تزریقی بالاتر آهنگ گسیل القایی بالاتر و در نتیجه زمان تولید فوتون در کاواک کاهش و فرکانس نوسانات واهلش افزایش می یابد و در پایان باعث رسیدن زودتر لیزر به حالت پایه می گردد. شکل۷ تحولات زمانی فوتونها در جریان تزریقی ۲mA و پهن شدگی همگن مختلف را نمایش می دهد و بیانگر این موضوع است که با افزایش FWHM پهن شدگی همگن در یک جریان تزریقی خاص تأخیر شروع کاهش می یابد.که مغایر با نتایج مرجع[۷] بوده و علت این کاهش این است که با افزایش پهن شدگی همگن توزیع چگالی حالتها گسترده تر می شود و چگالی حالتها در گروه مرکزی کاهش می یابد و با جریان تزریقی پایین تری (جریان آستانه پایین تر) می توان تعداد زیادی از حاملها را برانگیخته نمود و سریعتر به وارونی جمعیت و سپس لیزر رسید.



شکل۷ : تحولات زمانی فوتونها در جریان تزریقی ۲ میلی آمپر و پهن شدگی همگن با FWHM ، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۷، ۱/۵ و ۱۰ meV.

۴ - نتیجه‌گیری

بررسی نمودارهای حاصل از حل معادلات آهنگ نشان می دهد که اختلاف زیاد بین پهن شدگی همگن و غیر همگن آثار غیر خطی و کاهش بازده شیب را در نمودار توان خروجی- جریان نمایان می کند و باعث افت خصوصیات استاتیک می گردد. همچنین با افزایش جریان تزریقی خصوصیات دینامیک از قبیل فرکانس نوسان واهلش، پهنای باند مدولاسیون و تاخیر شروع بهبود می یابد و در پایان اینکه افزایش پهن شدگی همگن بهره نوری، جریان آستانه و تاخیر شروع را کاهش می دهد.

مراجع

[1] Arakawa, Y., Sakaki, H., *Multi Dimensional Quantum Well Laser and Temperature Dependence of its Threshold current.* P. 939, Appl. Phys. Lett.,1982

[2] Bimberg, D., *Quantum Dot Heterostructures*, p. 144, John Wiley & Sons Inc.,1999

[3] Fiore, A., Markus, A., *Differential Gain and Gain Compression in Quantum Dot Lasers*, p.287, IEEE J. Quantum Electron, 2007

[4] The, G.A.P., *How to Simulate a Semiconductor Quantum Dot Laser: General Description*, p. 2302/1, Brazilian Society of Physics, 2009

[5] Steiner, T., *Semiconductor Nanostructure for Optoelectronic Application*, p. 46, Artech House, 2004

[6] Sugawara, M., Ishida, Mukai, K., Ishikawa, H., *Effect of Homogenous Broadening of Optical Gain on Lasing Spectra in Self-Assembled InGaAs/GaAs Quantum Dot Lasers*, p. 7595, Phys. Rev. B, 2000

[7] Ghodsi Nahri, D., Arabshahi, H., Rezaee Rokn-Abadi, M., *Analysis of dynamic and static characteristics of InGaAs/GaAs self-assembled quantum dot lasers*, p.138, Armenian Journal of Physics, 2010

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]