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

مدل سازی لیزردهی دو ترازی و اثر پهن شدگی غیر همگن برتاخیر زمان روشن شدن و توان خروجی در لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP

سعید یزدانی[1] ، اسفندیار رجایی و اعظم شفیعی نژاد

1 -گروه فیزیک، دانشکده علوم ، دانشگاه گیلان

چکیده - در این مقاله روش های عددی بر پایه ی معادلات آهنگ ارائه شده است و برای مطالعه دینامیک گسیل فوتون از دو تراز انرژی حالت پایه و حالت برانگیخته یک سیستم لیزر نقطه کوانتومی *InAs-InP* استفاده شده که با استفاده از روش رانگ- کوتای مرتبه چهار محاسبه شده اند. هم چنین نتایج عددی در تغییرات جمعیت فوتون ها و نیز تغییرات توان خروجی به ازاء پهن شدگی های غیر همگن مختلف ارائه و بررسی شده اند. اثر پهن شدگی غیر همگن در تاخیر زمان روشن شدن لیزر نیز بررسی شده است.

کلید واژه- تراز انرژی، توان خروجی ، ضریب پهن شدگی غیر همگن ، لیزر نقطه کوانتومی ، معادلات آهنگ.

Modelling of the two state-lasing and effect of non-homogeneous broadening factor on turn-on delay and output power for InAs-InP quantum dot lasers

Saeed Yazdani(1), Esfandiar Rajaei, Azam Shafieenezhad

1-Department of physics, Faculty of science, University of Guilan, Guilan

Abstract-In this article numerical methods based on rate equations are presented and to study the dynamics of photons emission in two ground state and excited state level an InAs-InP quantum dot (QD) lasers system is used that is calculated by using fourth order Runge-kutta method. In addition, numerical results for the variations of photons population and the variations of output power for different non-homogeneous broadening factors are also presented and discussed. The effect of non-homogeneous broadening factor on turn on delay of laser has also discussed.

Keywords : Energy level , Non-homogeneous broadening factor, Output power, Quantum dot laser, Rate equations.

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

۱- مقدمه

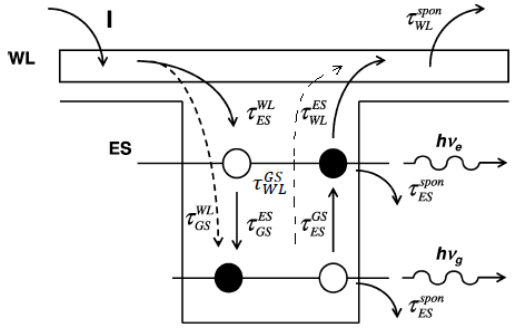
لیزرهای نقطه کوانتومی دارای مزایای بسیار زیادی در قیاس با سایر لیزرهای نیمه رسانا هستند که از این مزایا می توان به ماکزیمم بهره مادی و بهره دیفرانسیلی حداقل دو تا سه برابر بیشتر از لیزرهای چاه کوانتومی،پهنای نوار مدولاسیون بزرگ،چیرپ دینامیکی کوچک [1] و جریان آستانه‌ی پایین به دلیل کوچک بودن ناحیه فعال[۲]و پایداری دمایی[3] اشاره نمود.

برای بهبود عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی فهم چگونگی تاثیر عوامل گوناگون بر عملکرد لیزرهای نقطه کوانتومی و به ویژه بر بهره اپتیکی لیزر و توان خروجی لیزر به هنگام طراحی قطعه ضروری خواهد بود.

در این مقاله دینامیک واهلش آبشاری بین ترازی لیزر [۳] و مدل واهلش مستقیم بین ترازی لیزر [۴] بررسی شده است..طیف تابشی لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- ارائه مدل تئوری

برای بررسی دینامیک لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP باید با استفاده از مدل نوار انرژی شکل ۱ معادلات آهنگ را به دست بیاوریم [3].



شکل ۱: نمودار طرحوار از مدل واهلش در لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP

از شکل 1 می توان فهمید در این مدل سه تراز لایه تر کننده (WL) ،تراز حالت برانگیخته (ES) و تراز حالت پایه (GS) را در نقطه کوانتومی در نظر گرفته ایم که واهلش و فرار حامل ها از این تراز ها به یکدیگر را در نظر می گیریم.

۲-۱- معادلات ریاضی

با توجه به شکل ۱ می توانیم ۵ معادله آهنگ را به صورت زیر بیان نماییم [3]:

$$\frac{dN_{wL}}{dt}=\frac{I}{e}+\frac{N_{ES}}{\tau_{WL}^{ES}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}(1-P_{ES})$$

$$-\frac{N_{WL}}{\tau_{WL}^{spon}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{gs}^{WL}}(1-P_{GS})+\frac{N_{ES}}{\tau_{WL}^{GS}} \qquad \textbf{(1)}$$

$$\frac{dN_{ES}}{dt}=\frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}(1-P_{ES})+\frac{N_{GS}}{\tau_{ES}^{GS}}(1-P_{ES})$$

$$-\frac{N_{ES}}{\tau_{WL}^{ES}}-\frac{N_{ES}}{\tau_{GS}^{ES}}(1-P_{GS})-\frac{N_{ES}}{\tau_{ES}^{SPON}}$$

$$-(\Gamma Vgk_{ES})(2P_{ES}-1)(\frac{s_{ES}}{1+\varepsilon_{ES}s_{ES}}) \qquad (۲)$$

$$\frac{dN_{GS}}{dt}=\frac{N_{ES}}{\tau_{GS}^{ES}}(1-P_{GS})-\frac{N_{GS}}{\tau_{ES}^{GS}}(1-P_{ES})$$

$$-\frac{N_{QS}}{\tau_{GS}^{spon}}-(\Gamma V_g k_{GS})(2P_{GS}-1)\frac{S_{GS}}{1+\varepsilon_{GS}S_{GS}}$$

$$+\frac{N_{WL}}{\tau_{GS}^{WL}}(1-P_{GS})-\frac{N_{GS}}{\tau_{WL}^{GS}} \qquad (۳)$$

$$\frac{dS_{ES}}{dt}=(\Gamma V_g k_{ES})(2P_{ES}-1)(\frac{s_{ES}}{1+\varepsilon_{ES}s_{ES}})$$

$$-\frac{S_{ES}}{\tau_p}+\beta_{sp}\frac{N_{ES}}{\tau_{ES}} \qquad (۴)$$

$$\frac{dS_{GS}}{dt}=(\Gamma V_g k_{GS})(2P_{GS}-1)(\frac{s_{GS}}{1+\varepsilon_{GS}s_{GS}})$$

$$-\frac{S_{GS}}{\tau_p}+\beta_{sp}\frac{N_{GS}}{\tau_{GS}} \qquad (۵)$$

معادلات (۱) تا (۵) معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP می باشند که با حل همزمان این معادلات می توانیم رفتار دینامیکی لیزر را مطالعه نماییم. در معادله (۱) I جریان تزریقی می باشد. در این معادلات $S_{GS},S_{ES},N_{GS},N_{ES},N_{WL}$ به ترتیب جمعیت حامل ها در تراز لایه تر کننده، جمعیت حامل ها در تراز حالت برانگیخته ، جمعیت حامل ها در تراز حالت پایه، تعداد

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

فوتون در تراز حالت برانگیخته و تعداد فوتون در تراز حالت پایه [5] می باشند. همچنین در این معادلات فاکتور محدودیت اپتیکی Γ و فاکتور گسیل خودبخودی β_{sp} به ترتیب ۰.۰۳۶ و 10^{-3} است و $\in_{GS}$ و $\in_{ES}$ به ترتیب فشردگی بهره تراز GS و تراز ES میباشند. زمان های واهلش خودبخودی در لایه ی تر کننده، تراز حالت برانگیخته و تراز حالت پایه را نیز به ترتیب ۰.۵، ۰.۵ و ۱.۲ پیکو ثانیه در نظر می گیریم. P_{GS} و P_{ES} ترتیب توابع احتمال اشتغال ترازهای GS و ES می باشند[5]. در معادلات (۱) تا (۵) زمان های واهلش به صورت زیر در نظر گرفته شده است[3]:

$$\tau_{ES}^{WL} = \frac{1}{A_w + C_w N_w} \qquad (۶)$$

$$\tau_{GS}^{ES} = \frac{1}{A_E + C_E N_w} \qquad (۷)$$

در این معادلات C_w, A_E, C_E, A_E, N_w به ترتیب چگالی حامل در مخزن لایه تر، ثابت و اهلش با فوتون از تراز حالت برانگیخته، ثابت واهلش با اثر اوژه از تراز حالت برانگیخته، ثابت و اهلش با فوتون از تراز لایه ی تر و ثابت واهلش با اثر اوژه از تراز لایه ی تر می باشند. قابل توجه است که در این مقاله زمان واهلش از لایه ی تر به تراز حالت پایه (τ_{GS}^{WL}) را برابر با زمان و اهلش از لایه ی تر به تراز حالت برانگیخته (τ_{GS}^{WL}) در نظر می گیریم[5]:

$$\tau_{GS}^{WL} = \tau_{ES}^{WL}$$

در معادلات آهنگ فوق بهره اپتیکی تراز برانگیخته (ES) و تراز پایه(GS) به ترتیب g_{GS}, g_{ES} می باشد که عبارتنداز [5]:

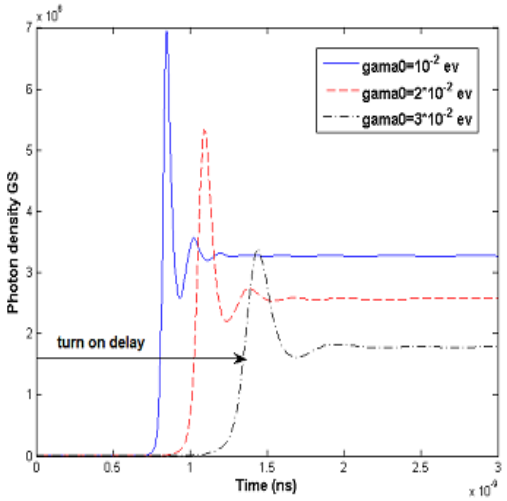
$$g_{ES} = \frac{4\pi e^{2}\hbar D_{ES}}{cn_r\varepsilon_\circ m_\circ^2 v_d}\frac{|P_{cv}|^2}{E_{ES}}\frac{\xi}{\Gamma_\circ}(2P_{ES}-1) = 2K_{ES}(2P_{ES}-1)$$

$$g_{GS} = \frac{4\pi e^{2}\hbar D_{GS}}{cn_r\varepsilon_\circ m_\circ^2 v_d}\frac{|P_{cv}|^2}{E_{GS}}\frac{\xi}{\Gamma_\circ}(2P_{GS}-1) = 2K_{GS}(2P_{GS}-1)$$

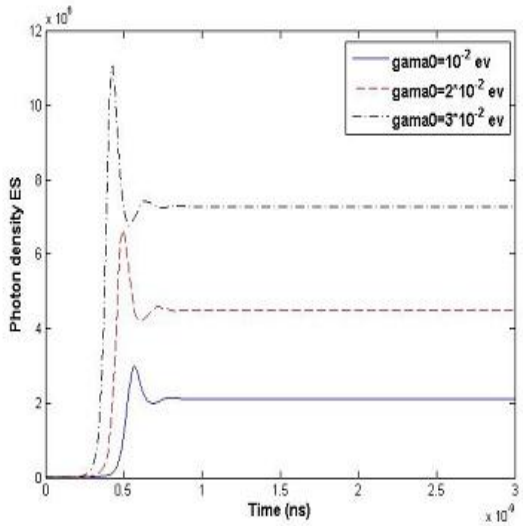
در معادلات بالا Γ. ضریب پهن شدگی غیر همگن ، ξ ضریب پوشش ، P_{GS} و P_{ES} به ترتیب توابع احتمال اشغال ترازهای ES و GS ، D_{ES} و D_{GS} درجه تبهگنی ترازهای ES و GS و $|P_{cr}|$ قدر مطلق عنصر ماتریس گذار می باشند[5].

۲-۲- نتایج شبیه سازی

با حل معادلات آهنگ می توانیم تغییرات تعداد فوتون ها و توان خروجی ترازهای حالت پایه و برانگیخته را به دست آوریم. این منحنی ها را با تغییر ضریب پهن شدگی غیر همگن نقطه کوانتومی ها ($\Gamma_\circ$) بررسی می کنیم. در شکل ۲ مشاهده می شود که با افزایش مقدار $\Gamma_\circ$ چگالی فوتون گسیل شده از تراز حالت پایه در حالت اشباع به طور کاملاً محسوس کاهش می یابد. هم چنین تأخیر زمانی روشن شدن لیزر به ازاء افزایش $\Gamma_\circ$ ، افزایش می یابد.

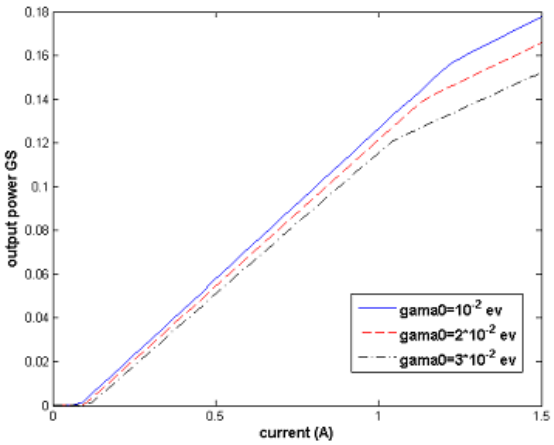


شکل۲:تغییرات جمعیت فوتون ها در تراز حالت پایه به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیرهمگن مختلف

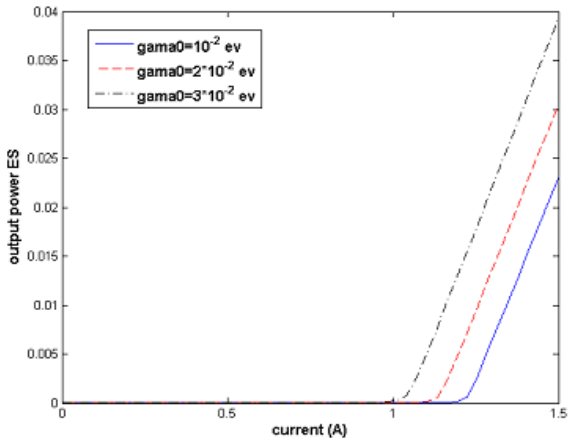


شکل3: تغییرات جمعیت فوتون ها در تراز حالت برانگیخته به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیرهمگن مختلف

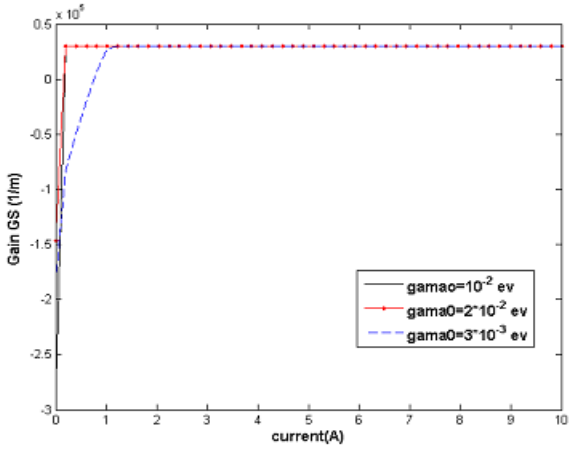
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]



شکل۴: تغییرات توان خروجی بر حسب جریان تزریقی در تراز حالت پایه به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیرهمگن مختلف



شکل۵: تغییرات توان خروجی بر حسب جریان تزریقی در تراز حالت برانگیخته به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیر همگن مختلف



شکل6: تغییرات بهره بر حسب جریان تزریقی در تراز حالت پایه به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیرهمگن مختلف

در شکل ۳ می بینیم که با افزایش Γ. چگالی فوتون گسیل شده از تراز حالت برانگیخته در حالت اشباع به طور آشکار افزایش می یابد. هم چنین تأخیر زمانی روشن شدن لیزر به ازاء افزایش Γ. کاهش می یابد که رفتاری عکس تراز ES از خود نمایش می دهد. در شکل ۴ می بینیم که با افزایش Γ. به ازاء افزایش جریان تزریقی مقدار توان خروجی تراز حالت پایه کاهش یافته است.هم چنین جریان آستانه با افزایش Γ. افزایش می یابد. شکل ۵ به ما نشان می دهد که با افزایش Γ. علاوه بر اینکه جریان آستانه برای شروع لیزردهی در تراز حالت برانگیخته کاهش می یابد، توان خروجی تراز حالت برانگیخته افزایش می یابد. در شکل ۶ مشاهده می شود که با افزایش Γ. به ازاء جریان تزریقی بیشتری بهره تراز حالت پایه به اشباع می رسد.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله تغییرات چگالی فوتون ها و توان خروجی را با چند ضریب پهن شدگی غیر همگن مختلف بررسی نمودیم. ملاحظه شد که با افزایش ضریب پهن شدگی غیر همگن، مقدار توان خروجی تراز حالت پایه کم می شود اما جریان آستانه برای شروع لیزردهی در تراز حالت برانگیخته کاهش می یابد.به سبب پهن شدگی غیر همگن کسر معینی از نقطه کوانتومی ها در گزارهای لیزری شرکت نمی کنند و به بازترکیب های پارازیتی اضافه می شوند.با افزایش پهن شدگی غیر همگن بهره اشباع در جریان های کمتر کاهش می یابد .

مراجع

[1] 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.

[2] G.T.Liu, A. Stintz , H.Li, K.J. Malloy , and L.F. **Lester, Electron. Lett**., vol .35 , pp. 1163-1165, 1999.

[3] Kiril Vese;inov , Frederic Grillot , Charles Cornet *'Analysis of the Double Laser Emission Occurring in 1.55micron InAs-Inp(113)B Quantum Dot Lasers'* , **IEEE journal of QUANTUM ELECTRONICS**, vol . 43 , no. 9, SEPTEMBER 2007.

[4] Kiril Veselinov, Frederic Grillot , A. Bekiarski.*' Modeling of the two- state lasing and the turn ondelayin 1.55micron InAs/InP (113)B quantum dot'* , **IEEE *Proc- Optoelectron*.***Vol.** 153, No, 6 December 2006.

[5] Frédéric Grillot , Kiril Veselinov, Mariangela Gioannini.*'Spectral Analysis of 1.55 micron InAs-InP(113)B Quantum-Dot Lasers Based on a Mulripopulation Rte Equations Model'* **IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS** , VOL. 45, NO.7, JULY 2009.

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