



مدل سازی لیزردی دو ترازی و اثر پهن شدگی غیر همگن بر تاخیر زمان روشن شدن و توان خروجی در لیزر نقطه کوانتموی InAs-InP

سعید یزدانی^۱، اسفندیار رجایی و اعظم شفیعی نژاد

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان

چکیده - در این مقاله روش های عددی بر پایه ای معادلات آهنگ ارائه شده است و برای مطالعه دینامیک گسیل فوتون از دو تراز انرژی حالت پایه و حالت برانگیخته یک سیستم لیزر نقطه کوانتموی *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 کوانتموی، 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.

۱- مقدمه

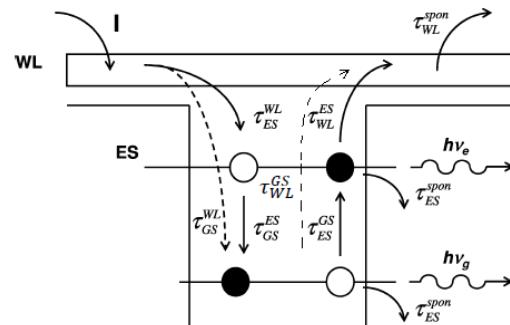
لیزرهای نقطه کوانتومی دارای مزایای بسیار زیادی در قیاس با سایر لیزرهای نیمه رسانا هستند که از این مزایا می‌توان به ماکزیمم بهره مادی و بهره دیفرانسیلی حداقل دو تا سه برابر بیشتر از لیزرهای چاه کوانتومی، پهنهای نوار مدولاسیون بزرگ، چیرپ دینامیکی کوچک [۱] و جریان آستانه‌ی پایین به دلیل کوچک بودن ناحیه فعال [۲] و پایداری دمایی [۳] 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 [۳].



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

از شکل ۱ می‌توان 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 حامل‌ها از این تراز‌ها به یکدیگر را در نظر می‌گیریم.

۱-۲- معادلات ریاضی

با توجه به شکل ۱ می‌توانیم ۵ معادله آهنگ را به صورت زیر بیان نماییم [۳]:

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

$$\begin{aligned} \frac{dN_{ES}}{dt} &= \frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}(1 - P_{ES}) + \frac{N_{GS}}{\tau_{ES}^{GS}}(1 - P_{ES}) - \frac{N_{ES}}{\tau_{WL}^{ES}} - \frac{N_{ES}}{\tau_{GS}^{ES}}(1 - P_{GS}) - \frac{N_{ES}}{\tau_{ES}^{spont}} \\ &- (\Gamma V g k_{ES})(2P_{ES} - 1) \left(\frac{S_{ES}}{1 + \varepsilon_{ES} S_{ES}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{GS}}{dt} &= \frac{N_{ES}}{\tau_{GS}^{ES}}(1 - P_{GS}) - \frac{N_{GS}}{\tau_{ES}^{GS}}(1 - P_{ES}) - \frac{N_{GS}}{\tau_{WL}^{GS}} - (\Gamma V_g k_{GS})(2P_{GS} - 1) \frac{S_{GS}}{1 + \varepsilon_{GS} S_{GS}} \\ &+ \frac{N_{WL}}{\tau_{GS}^{WL}}(1 - P_{GS}) - \frac{N_{GS}}{\tau_{WL}^{GS}} \end{aligned} \quad (3)$$

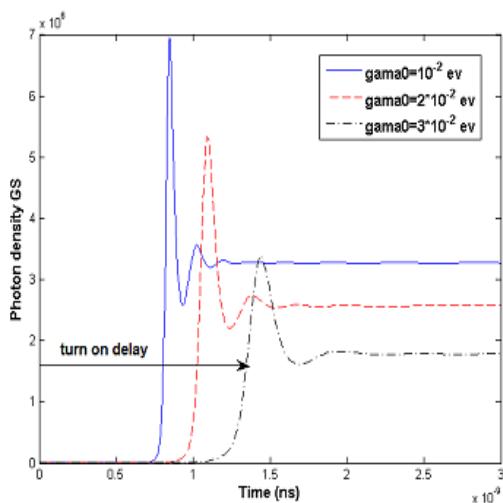
$$\begin{aligned} \frac{dS_{ES}}{dt} &= (\Gamma V_g k_{ES})(2P_{ES} - 1) \left(\frac{S_{ES}}{1 + \varepsilon_{ES} S_{ES}} \right) - \frac{S_{ES}}{\tau_p} + \beta_{sp} \frac{N_{ES}}{\tau_{ES}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{GS}}{dt} &= (\Gamma V_g k_{GS})(2P_{GS} - 1) \left(\frac{S_{GS}}{1 + \varepsilon_{GS} S_{GS}} \right) - \frac{S_{GS}}{\tau_p} + \beta_{sp} \frac{N_{GS}}{\tau_{GS}} \end{aligned} \quad (5)$$

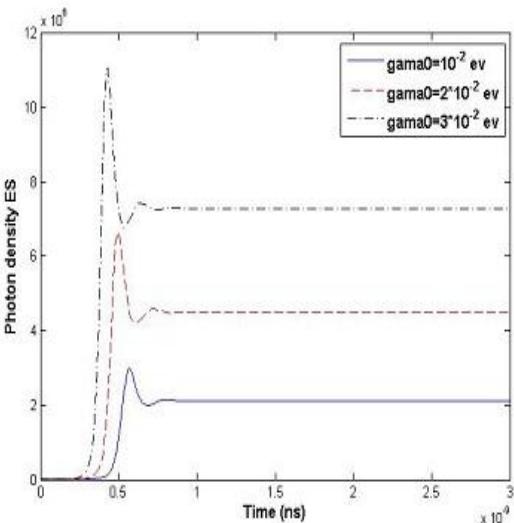
معادلات (۱) تا (۵) معادلات آهنگ لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP می‌باشند که با حل هم‌زمان این معادلات می‌توانیم رفتار دینامیکی لیزر را مطالعه نماییم. در معادله (۱) جریان تزریقی می‌باشد. در این معادلات I جریان لایه تر کننده، جمعیت حامل‌ها در تراز حالت برانگیخته، جمعیت حامل‌ها در تراز حالت پایه، تعداد

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 (Γ) بررسی می کنیم. در شکل ۲ مشاهده می شود که با افزایش مقدار Γ 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 Γ ، افزایش می یابد.



شکل ۲: تغییرات جمعیت فوتون ها در تراز حالت پایه به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیرهمگن مختلف



شکل ۳: تغییرات جمعیت فوتون ها در تراز حالت برانگیخته به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیرهمگن مختلف

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 0.036×10^{-3} است و \in_{GS} به ترتیب فشردگی بهره تراز GS و تراز ES میباشد. زمان های واهلش خودبخودی در لایه i تر کننده، تراز حالت برانگیخته و تراز حالت پایه را نیز به ترتیب 0.5×10^{-9} و 1.2×10^{-9} ثانیه در نظر می گیریم. P_{GS} و P_{ES} 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]:

$$\tau_{ES}^{WL} = \frac{1}{A_w + C_w N_w} \quad (6)$$

$$\tau_{GS}^{ES} = \frac{1}{A_E + C_E N_w} \quad (7)$$

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

$$g_{ES} = \frac{4\pi e^2 \hbar D_{ES}}{cn_r \epsilon_0 m_e^2 v_d} \frac{|P_{cv}|^2}{E_{ES}} \frac{\xi}{\Gamma_0} (2P_{ES} - 1) = 2K_{ES} (2P_{ES} - 1)$$

$$g_{GS} = \frac{4\pi e^2 \hbar D_{GS}}{cn_r \epsilon_0 m_e^2 v_d} \frac{|P_{cv}|^2}{E_{GS}} \frac{\xi}{\Gamma_0} (2P_{GS} - 1) = 2K_{GS} (2P_{GS} - 1)$$

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

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 بازترکip های پارازیتی اضافه می شوند. با افزایش پهن شدگی غیر همگن بهره اشباع در جریان های کمتر کاهش می یابد.

مراجع

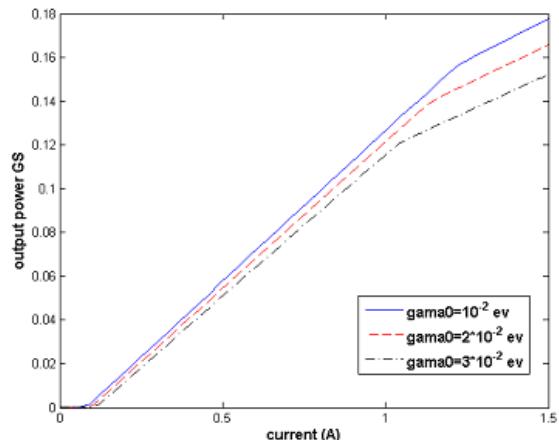
[1] S.S. Mikhlin , A. R . Kovsh , I. L. Krestnikov , A. V. Kozhukhov, D.A. Livshits , N. N. Ledentsonv , Y. M.Shernyakov , I.I. Novikov , M. V.Maximov, V. M. Ustinov, and Z. I. Alferov, Semicond . **Sci. Technol.**, vol . 20, p. 340, 2005.

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

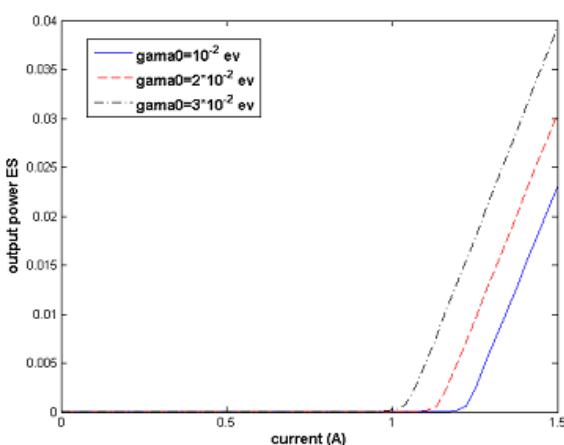
[3] Kiril Veselinov , Frederic Grillot , Charles Cornet 'Analysis of the Double Laser Emission Occurring in 1.55micron InAs-InP(113)B Quantum Dot Lasers' , **IEEE journal of QUANTUM ELECTRONICS**, vol . 43 , no. 9, SEPTEMBER 2007.

[4] Kiril Veselinov, Frederic Grillot , A. Bekiariski.'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.

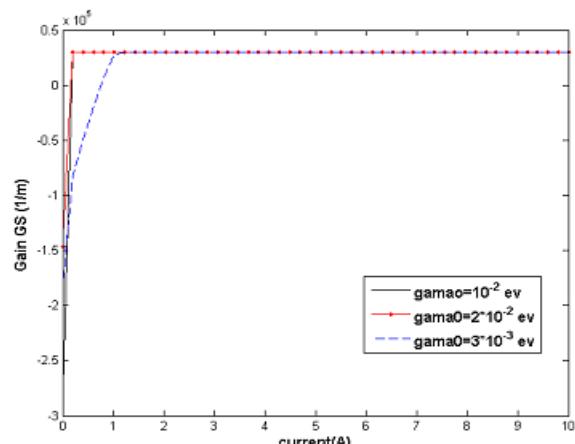
[5] Frédéric Grillot , Kiril Veselinov, Mariangela Gioannini.'Spectral Analysis of 1.55 micron InAs-InP(113)B Quantum-Dot Lasers Based on a Multipopulation Rte Equations Model' **IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS** , VOL. 45, NO.7, JULY 2009.



شکل ۴: تغییرات توان خروجی بر حسب جریان تزریقی در تراز حالت پایه به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیر همگن مختلف



شکل ۵: تغییرات توان خروجی بر حسب جریان تزریقی در تراز حالت برانگیخته به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیر همگن مختلف



شکل ۶: تغییرات بهره بر حسب جریان تزریقی در تراز حالت پایه به ازاء سه ضریب پهن شدگی غیر همگن مختلف

در شکل ۳ می بینیم که با افزایش Γ . چگالی فوتون گسیل شده از تراز حالت برانگیخته در حالت اشباع به