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

شبیه سازی اثر چگالی حجمی نقاط کوانتومی بر جمعیت فوتون ها و بهره ی اپتیکی در ترازهای حالت پایه و برانگیخته لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP

سعید یزدانی ، اسفندیار رجایی و اعظم شفیعی نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان

چکیده - در این مقاله برای مطالعه دینامیک گسیل فوتون **از دو تراز انرژی حالت پایه و حالت برانگیخته یک سیستم لیزر نقطه کوانتومی** InAs-InP **، روش‌های عددی بر اساس معادلات آهنگ ارائه شده و با استفاده از روش رانگ-کوتای مرتبه چهار محاسبه شده‌اند.هم چنین نتایج عددی در تغییرات جمعیت فوتون ها و نیز تغییرات** بهره‌ی **اپتیکی با نقطه‌کوانتومی‌هایی با چگالی حجمی متفاوت ارائه و بررسی شده اند. اثر چگالی حجمی نقطه کوانتومی در تاخیر زمان روشن شدن لیزر نیز بررسی شده است.**

کلید واژه- بهره اپتیکی، تراز انرژی ، چگالی حجمی نقطه کوانتومی، لیزر نقطه کوانتومی، معادلات آهنگ.

Simulation of effect of quantum dots volume density on photons population and optical gain in ground state and excited state for InAs-InP quantum dot lasers

Saeed Yazdani, Esfandiar Rajaei, Azam Shafieenzhad

Department of Physics, Faculty of science, University of Guilan,Guilan

Abstract- In this paper we have investigated photon dynamics in two ground state and exited state levels of an InAs-InP quantum dot (QD) laser system , numerical models that based on rate equation are presented and is calculated by using fourth order Runge- Kutta method . As well as, numerical results for variations of photon densitiy and variations of optical gain in different volume density of quantum dots are also presented and discussed. The effect of volume density of quantum dot on turn on delay of laser has also discussed.

Keywords : Energy level, Optical gain, Volume density of quantum dot, Quantum dot laser, Rate equations .

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

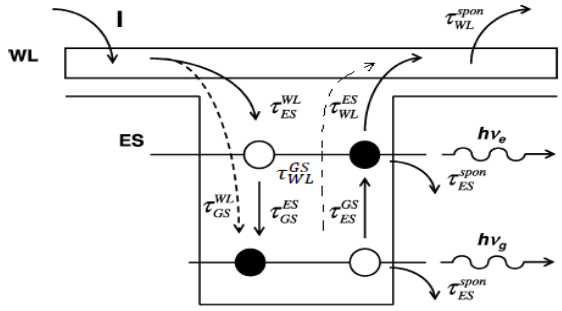
۱-مقدمه

کارایی روزافزون و عملکرد بسیار بالای لیزر های نقطه کوانتومی نسبت به دیگر لیزر های نیمه رسانای مرسوم ، در بسیاری از مشخصه ها نظیر پایداری در برابر دما ،کارایی کوانتومی بالا ، سرعت مدولاسیون بالا [1] و جریان آستانه ی پایین [2] موجب گسترش این لیزرها شده است . از ویژگی های لیزر های نقطه کوانتومی کاهش هزینه ها در بسیاری از کاربرد ها از جمله در انتقال اطلاعات می باشد. به طور ویژه با استفاده از شاخص زیر لایه InP در لایه جهت گیری با تکنیک های رشد مناسب، می توان نقطه کوانتومی هایی بسیار کوچک (ابعاد ۴nm) و چگال (بیشتر از $10^{11}cm^{-2}$)رشد داد.

در این مقاله دینامیک واهلش لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP برای مدل واهلش آبشاری [۳] و برای مدل واهلش مستقیم[4] و اثر چگالی حجمی نقاط کوانتومی بر جمعیت فوتون ها و بهره ی اپتیکی در ترازهای حالت پایه و برانگیخته لیزر نقطه کوانتومی InAs-InP بررسی شده است. همچنین 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 با استفاده از مدل نوار انرژی شکل ۱ معادلات آهنگ را به دست می اوریم.



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

از شکل بالا می‌توان فهمید در این مدل سه تراز لایه WL، تراز ES و تراز GS را در نقطه کوانتومی در نظر گرفته‌ایم و واهلش و فرار حامل‌ها از این ترازها به یکدیگر را در معادلات در منظور کرده ایم.

۲-۱ معادلات ریاضی

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

$$\frac{dN_{wL}}{dt}=\frac{I}{e}+\frac{N_{ES}}{\tau_{WL}^{ES}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}(1-P_{ES})-\frac{N_{WL}}{\tau_{WL}^{spon}}-\frac{N_{WL}}{\tau_{gs}^{WL}}(1-p_{GS})+\frac{N_{Es}}{\tau_{WL}^{GS}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{ES}}{dt}=\frac{N_{WL}}{\tau_{ES}^{WL}}(1-P_{ES})=\frac{N_{GS}}{\tau_{ES}^{GS}}(1-P_{ES})-\frac{N_{ES}}{\tau_{WL}^{ES}}-\frac{N_{ES}}{\tau_{Gs}^{ES}}(1-P_{GS})+\frac{N_{Es}}{\tau_{ES}^{spon}}-(\Gamma Vgk_{Es})(2P_{Es}-1)\left(\frac{S_{ES}}{1+\varepsilon_{ES}S_{ES}}\right) \quad (2)$$

$$\frac{dN_{Gs}}{dt}=\frac{N_{Es}}{\tau_{Gs}^{Es}}(1-P_{GS})-\frac{N_{Gs}}{\tau_{Es}^{Gs}}(1-P_{Es})-\frac{N_{Gs}}{\tau_{Gs}^{spon}}-(\Gamma Vgk_{Gs})(2P_{Gs}-1)\frac{S_{Gs}}{1+\varepsilon_{GS}S_{GS}}+\frac{N_{wL}}{\tau_{Gs}^{wL}}(1-P_{Gs})-\frac{N_{Gs}}{\tau_{WL}^{GS}} \quad (3)$$

$$\frac{ds_{Es}}{dt}=(\Gamma VgK_{Es})(2P_{Es}-1)\frac{S_{Es}}{1+\varepsilon_{Es}S_{Es}}-\frac{S_{Es}}{\tau_p}+\beta_{sp}\frac{N_{Es}}{\tau_{Es}^{spo}} \quad (4)$$

$$\frac{dS_{Gs}}{dt}=(\Gamma VgK_{Gs})(2P_{Gs}-1)\frac{S_{Gs}}{1+\varepsilon_{Gs}S_{Gs}}-\frac{S_{Gs}}{\tau_p}+\beta_{sp}\frac{N_{Gs}}{\tau_{Gs}^{s}} \quad (5)$$

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 این معادلات N_{wL} , N_{Es}, N_{Gs}, S_{Es} , S_{Gs} 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 فوتون در تراز حالت برانگیخته و تعداد فوتون در تراز حالت پایه 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 برای ترازهای حالت GS و ES میباشند. زمان های واهلش خودبخودی در لایه‌ی تر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

کننده، تراز حالت برانگیخته و تراز حالت پایه را نیـز 0.5، ۰.۵ و 1.2 پیکوثانیـه در نظـر مـی گیـریم [۴] . بهـره اپتیکی تراز برانگیخته (ES) و تراز پایـه(GS) بـه ترتیـب g_{ES} , g_{GS} می باشد که عبارتند از [5]:

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

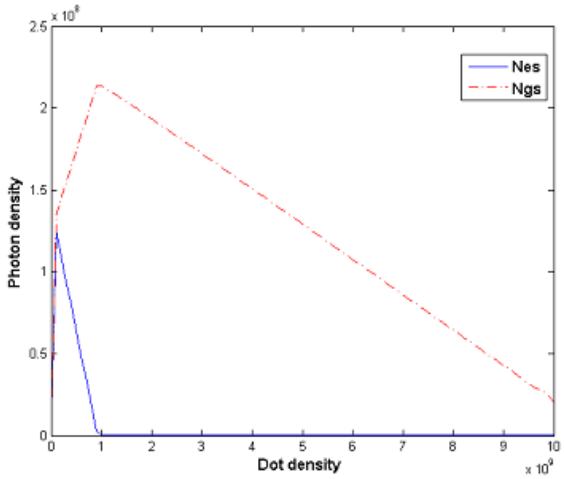
$$g_{GS} = \frac{4\pi e^2 \hbar D_{GS}}{c n_r \varepsilon_\circ m_\circ^2 v_d} \frac{|P_{cv}|^2}{E_{GS}} \frac{\xi}{\Gamma_\circ}(2P_{GS}-1) = 2K_{GS}(2P_{GS}-1)$$

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

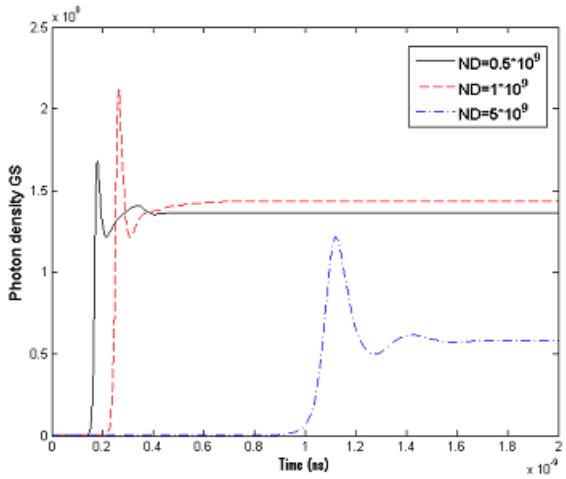
۲-۲ شبیه سازی

با حل معادلات آهنگ می‌توانیم تغییرات چگالی فوتون ها و بهره اپتیکی تراز های حالت پایه و حالت برانگیخته را به دست آوریم. این منحنی ها را با تغییر چگالی حجمی نقطه کوانتومی‌ها (ND) بررسی می‌کنیم.

در شکل ۲ تغییرات چگالی فوتون بر حسب چگالی نقطه کوانتومی برای تراز های حالت پایه و برانگیخته رسم شده است. ملاحظه می شود که به ازاء جریان ثابت ۱ میلی آمپر ،در ابتدا چگالی فوتون برای تراز حالت پایه در گستره چگالی ۰ تا $۱۰^{۹}$ افزایش می یابد تا و به بیشترین مقدار خود می رسد، سپس با افزایش بیشتر چگالی نقاط کوانتومی کاهش می یابد . اما چگالی فوتون برای تراز حالت برانگیخته در ابتدا به سرعت افزایش می یابد و به بیشترین مقدار خود می رسد ،سپس با افزایش بیشتر چگالی نقاط کوانتومی صفر می شود .در شکل ۳ که مربوط به چگالی فوتون تراز حالت پایه نسبت به زمان است می‌بینیم که با افزایش چگالی حجمی نقاط کوانتومی تأخیر زمانی روشن شدن افزایش می‌یابد . در شکل ۴ که مربوط به چگالی فوتون از تراز حالت برانگیخته نسبت به زمان است می‌بینیم علاوه بر اینکه با افزایش چگالی حجمی نقطه کوانتومی تأخیر زمانی روشن شدن افزایش می‌یابد ، چگالی فوتون از حالت تراز برانگیخته در حالت اشباع کاهش می‌یابد .شکل ۵ به ازاء سه مقدار متفاوت از چگالی حجمی نقاط کوانتومی ، بهره اپتیکی تراز حالت پایه رسم شده است . همانطور که در این شکل مشخص است برای هر سه مقدار چگالی حجمی نقاط کوانتومی ، در یک مقدار بهره اپتیکی به حالت اشباع می رسند. همچنین واضح است که هر قدر چگالی حجمی نقطه کوانتومی ها افزایش یابد بهره‌ی اپتیکی تراز حالت پایه دیرتر به حالت اشباع می‌رسد و به ازای جریان جریان ۲.۴ آمپر به ازاء هر سه مقدار چگالی حجمی نقاط کوانتومی به حالت اشباع می‌رسد. درشکل ۶ به ازاء سه مقدار متفاوت چگالی حجمی نقاط کوانتومی بهره اپتیکی برای تراز حالت برانگیخته رسم شده است. در اینجا نیز هر قدر چگالی حجمی نقطه کوانتومی ها افزایش یابد، بهره‌ی اپتیکی تراز حالت برانگیخته دیرتر به حالت اشباع می‌رسد.

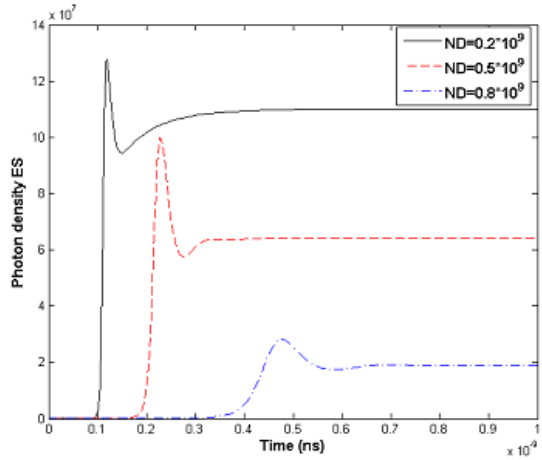


شکل ۲-تغییرات چگالی فوتون بر حسب چگالی نقطه کوانتومی برای ترازهای حالت پایه و برانگیخته

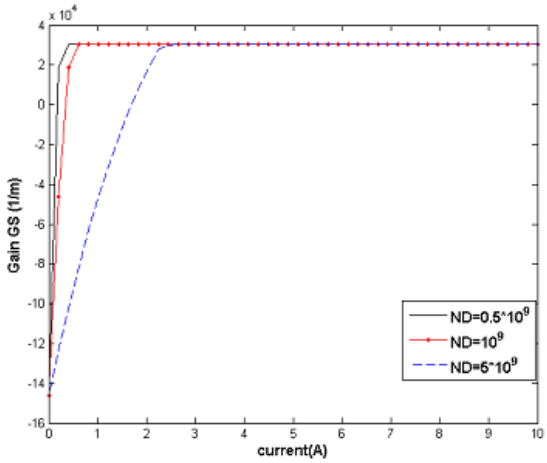


شکل ۳-تغییرات چگالی فوتون تراز حالت پایه بر حسب زمان به ازاء سه چگالی حجمی مختلف

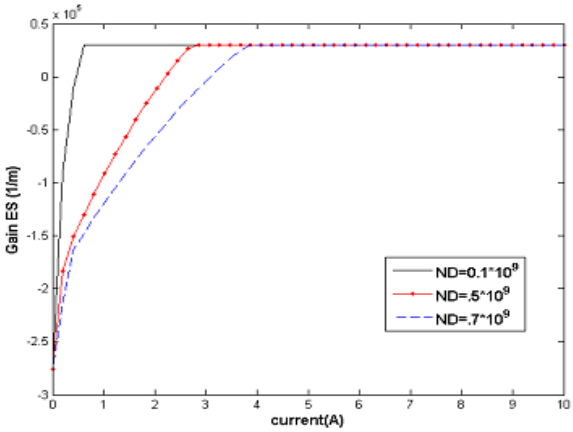
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]



شکل ۴-تغییرات چگالی فوتون تراز حالت برانگیخته بر حسب زمان به ازاء سه چگالی حجمی مختلف



شکل ۵-تغییرات بهره اپتیکی تراز حالت پایه بر حسب جریان تزریقی به ازاء سه چگالی حجمی مختلف



شکل ۶-تغییرات بهره اپتیکی تراز حالت برانگیخته بر حسب جریان تزریقی به ازاء سه چگالی حجمی مختلف

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله تغییر چگالی فوتون ها و بهره اپتیکی را با چند چگالی حجمی نقطه کوانتومی مختلف بررسی کرده ایم. افزایش چگالی حجمی نقاط کوانتومی منجر به افزایش بهره اشباع GS می شود. همچنین بهره اشباع بالاتر موجب کاهش احتمال اشغال تراز GS می شود . بطوریکه با افزایش چگالی حجمی نقاط کوانتومی، جریان گیراندازی حامل به GS افزایش می یابد و موجب می شود که حامل های بیشتری به GS منتقل بشوند در نتیجه از تجمع حامل ها در GS جلوگیری می‌کند. به همین دلیل باز ترکیب القایی بیشتری از GS رُخ می‌دهد و باعث افزایش تولید فوتون ها و بالا رفتن مقدار توان خروجی از GS و کاهش توان خروجی از ES می‌شود. ولی باید به یک مقدار بهینه از چگالی نقاط کوانتومی رسید که بتواند از افزایش بیش از اندازه جریان آستانه نیز جلوگیری کند.

مراجع:

[۱] 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.

[۲] 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 opsi.ir on 2026-02-03]