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

شبیه سازی پهنای باند مدولاسیون در لیزرهای نقطه کوانتمی InAs/InP با استفاده از مدل سازی تراز مداری

محمد رضا منصوری[۱]، سمانه غلامحسینی[۲]، ابوالقاسم محمدی[۱] و سعید خداپرست[۱]

[۱] گروه برق و الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد

[۲] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گیلان

چکیده – در این مقاله یک مدل مداری برای لیزرهای نقطه کوانتمی مبتنی بر معادلات آهنگ ارائه می دهیم.نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد اثر افت خیز اندازه نقاط (مربوط به پهن شدگی ناهمگن) و واهلش حامل در پهنای باند مدولاسیون لیزر بحساب آورده می شود. واهلش آهسته حامل از تراز برانگیخته به تراز پایه پهنای باند مدولاسیون را به *8GHz* حتی برای بهره مدی بالا محدود می کند. کاهش افت وخیز نقاط پهنای باند مدولاسیون را در جریان عملکردی پایین افزایش می دهد اما ماکزیمم اشباع پهنای باند به *8GHz* محدود می شود. بعلاوه دریافتیم پهنای باند مدولاسیون قویا وابسته به جدایی انرژی بین حالت پایه و برانگیخته است.

کلید واژه- پهنای باند مدولاسیون،لیزرهای نقطه کوانتمی، معادلات آهنگ، مدل مداری .

Simulation of modulation bandwidth in InAS/InP quantum dot lasers by using circuit-level modeling

Mohammad Reza Mansouri[1], Samaneh Gholamhosseini[2], Abolghasem Mohammadi[1] and saeid Khodaparast[1]

1 Department of Electronics, Islamic Azad University Lamerd Branch

2 Departmen of Physics, Faculty of Science, University of Guilan

Abstract- In this paper, we present a circuit model of quantum dot lasers (QDLs) based on the rate equations. The simulation results show that effect of size fluctuation (due to inhomogeneous broadening) and carrier relaxation on the modulation bandwidth of the laser are taken into account. Slow carrier relaxation from the excited-state to the ground-state limits the modulation bandwidth to ~8GHz even for high model gain. We found that reducing size fluctuation increases the modulation bandwidth at low operating current but the maximum saturated bandwidth is limited to 8 GHz. Besides, we found that the modulation bandwidth strongly depends on the energy separation between the ground and excited states.

Keywords: Modulation bandwidth, Quantum dot lasers, Rate equation, Circuit model.

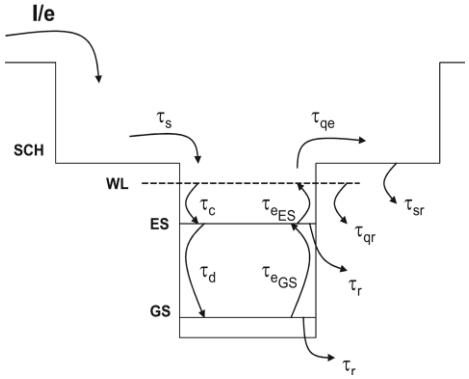
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

اغلب عملکردی که از لیزرهای نقطه کوانتمی انتظار می رود، از چگالی حالت های آنها ناشی می شود که در حالت ایده ال به صورت شبه دلتایی است[۱]. در حالت واقعی، چگالی حالت های نقطه کوانتمی و در نتیجه ترازهای انرژی آنها به علت اختلاف در اندازه و ترکیب نقاط کوانتمی بطور ناهمگن پهن می شوند. از آنجایی که سرعت مدولاسیون مستقیم لیزرهای چاه کوانتمی بدلیل وجود چیرپ فرکانسی محدود به چند گیگا بیت بر ثانیه است بنابراین لیزرهای نقطه کوانتمی InAs/InP بدلیل چیرپ فرکانسی پایین، سرعت مدولاسیون بالا، بسیار مناسب هستند. افت وخیز اندازه نقاط کوانتمی (پهن شدگی ناهمگن) سبب کند شدن واهلش حامل به درون حالت پایه نقاط شده که این امر موجب کاهش سرعت مدولاسیون و همچنین داشتن اثرات چیرپ فرکانسی می شود[۲]. هدف از این مقاله ارائه مدل مداری برای بررسی پهنای باند مدولاسیون با در نظر گرفتن اثرات افت وخیز اندازه نقاط است.

۲- مدل تئوری، مداری و معادلات آهنگ

در مدل عددی استفاده شده برای بررسی پهنای باند مدولاسیون، مبتنی بر حل معادلات آهنگ فوتون- حامل می باشد. شکل ۱ دیاگرام انرژی نوار هدایت ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتمی و فرآیند واهلش حامل به حالت پایه را نشان می دهد نقاط کوانتمی به m گروه تقسیم شده اند



شکل ۱: مدل دینامیک واهلش حامل به ترازهای پایین برای m امین گروه نقطه کوانتمی را نشان می دهد[۳].

معادلات آهنگ برای مدال تئوری[۳] و چگالی حامل ها در ترازهای SCH، وتینگ و پایه برای پیاده سازی مدل مداری توسط نرم افزار Hspice با استفاده از روابط زیر ارائه می شود[۴].

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

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{N_s}{\tau_s} + \sum_m \frac{N_{ESm}}{\tau_{eESm}} - \frac{N_q}{\tau_{qr}} - \frac{N_q}{\tau_{qe}} - \frac{N_q}{\tau_{c0}} \sum_m (1 - P_{ESm}) G_m \quad (۲)$$

$$\frac{dN_{GSm}}{dt} = \frac{N_{ESm}}{\tau_{d0}}(1 - P_{GSm}) - \frac{N_{GSm}}{\tau_r} - \frac{N_{GSm}(1 - P_{ESm})}{\tau_{eGSm}} + \frac{c\Gamma}{n_r} \sum_j g_{jmES} S_j \quad m = 0,1,\ldots,M-1 \quad (۳)$$

$$\frac{dN_{ESm}}{dt} = \frac{N_q G_m (1 - P_{ESm})}{\tau_{c0}} + \frac{N_{GSm}(1 - P_{ESm})}{\tau_{eGSm}} - \frac{N_{ESm}}{\tau_r} - \frac{N_{ESm}}{\tau_{eESm}} - \frac{N_{ESm}}{\tau_{d0}}(1 - P_{GSm}) + \frac{c\Gamma}{n_r} \sum_j g_{jmES} S_j \quad m = 0,1,\ldots,M-1 \quad (۴)$$

$$\frac{dS_j}{dt} = \beta \frac{N_j}{\tau_r} - \frac{S_j}{\tau_{pj}} + \frac{C\Gamma}{n_r} \sum_j (g_{jmES} + g_{jmGS}) S_j \quad (۵)$$

$$N_s = N_{s0} exp(\frac{qV}{n_s kT}) \quad (۶)$$

$$N_q = N_{q0} exp(\frac{qV_q}{n_q kT}) \quad (۷)$$

$$N = N_0 exp(\frac{qV_D}{n_D kT}) \quad (۸)$$

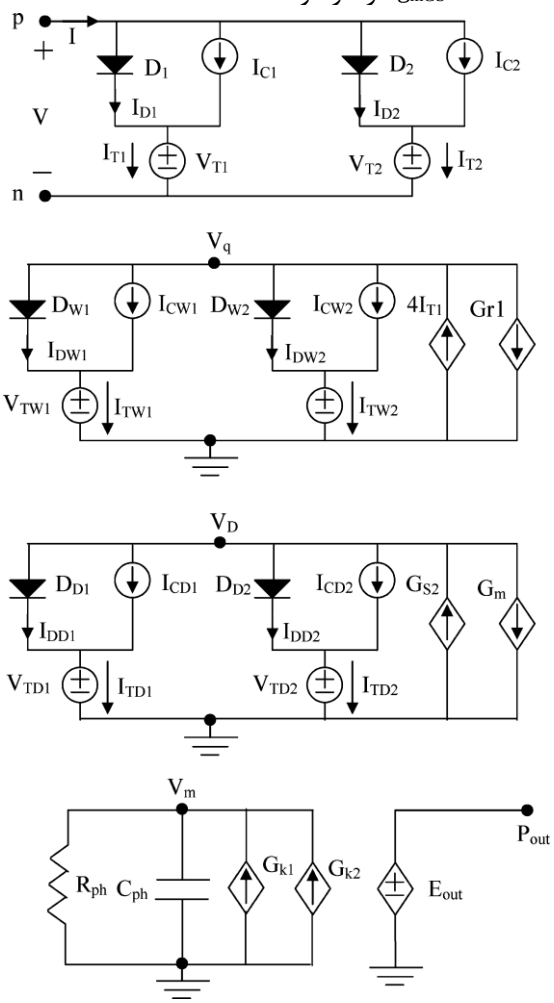
سرانجام مدل مداری برای محاسبه توان خروجی و بهره نوری در لیزرهای نقطه کوانتمی توسط نرم افزار Hspice بصورت شکل۳ ارائه می شود[۴].

۲-۱- اثر دینامیک واهلش حامل بر پهنای باند مدولاسیون

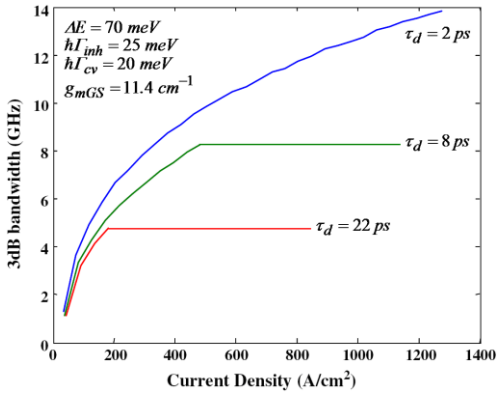
در این بخش پهنای باند مدولاسیون لیزر نقطه کوانتمی را برای زمان های مختلف واهلش حامل بصورت تابعی از جریان تزریقی بررسی می شود. جدایی انرژی بین تراز برانگیخته و پایه حدود 70meV در نظر گرفته شده است. پهن شدگی همگن حالت پایه 20meV و برای تراز

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

برانگیخته 25meV و ماکزیمم بهره مدی حالت پایه $g_{mGS}=11.4cm^{-1}$ درنظر گرفته شده است.

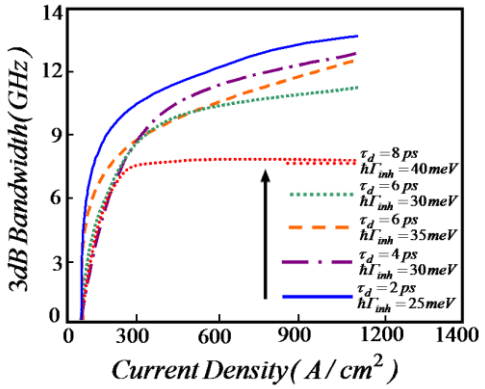


شکل۳- پیاده سازی مدل مداری لیزرهای نقطه کوانتمی[۴].



شکل ۴: پهنای باند لیزرQD بر حسب چگالی جریان تزریقی برای زمان های واهلش متفاوت. ناهمگنی متناظر با افت وخیز اندازه نقاط 25 meV در نظر گرفته شده است.

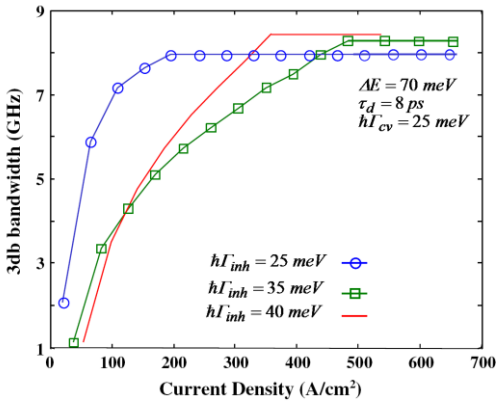
شکل ۴ پهنای باند مدولاسیون لیزر نقطه کوانتمی را برای زمانهای مختلف واهلش از تراز برانگیخته به پایه τ_d نشان می دهد واهلش آهسته از برانگیخته به پایه موجب پهنای باند مدولاسیون کوچک می شود وقتی τ_d بزرگ است الکترون ها در ترازهای انرژی بالاتر انباشته می شوند که این موجب اشباع زود هنگام تراز برانگیخته می شود افزایش بیشتر τ_d موجب افزایش احتمال اشغال حالت برانگیخته (P_{ESm}) می شود. همانطور که دیده می شود با کاهش زمان واهلش τ_d و کاهش پهن شدگی ناهمگن پهنای باند مدولاسیون افزایش می یابد(شکل ۵). نتایج شبیه سازی نشان می دهد ثابت زمانی واهلش حامل در دمای اتاق حدود τ_d=8ps متناظر به پهنای باند 8GHz است.



شکل ۵: پهنای باند لیزرQD بر حسب چگالی جریان تزریقی برای زمان های واهلش و پهن شدگی ناهمگن متفاوت.

۲-۲- پهنای باند مدولاسیون با اثر پهن شدگی ناهمگن

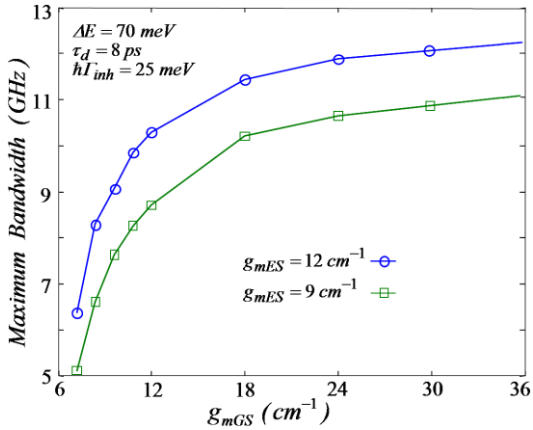
پهنای باند مدولاسیون برای مقدارهای متفاوت پهن $3dB$ شدگی ناهمگن بصورت تابعی از جریان تزریقی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: پهنای باند مدولاسیون لیزر نقطه کوانتمی برای زمان واهلش ثابت و پهن شدگی ناهمگن متغیر.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

در جریان های تزریقی بالا، بزرگی و کوچکی نقاط موجب اشباع پهنای باند می شود چون افزایش ناهمگنی باعث افزایش زمان واهلش حامل به درون حالت پایه می شود در حالت کلی پهنای باند در جریان های بالا بوسیله زمان واهلش حامل τ_d تعیین می شود. در جریان تزریقی کوچک نقاط احتمال اشغال متفاوتی دارند بنابراین پهنای باند لیزر در این حالت وابسته به میانگین عملکرد تمامی نقاط است.



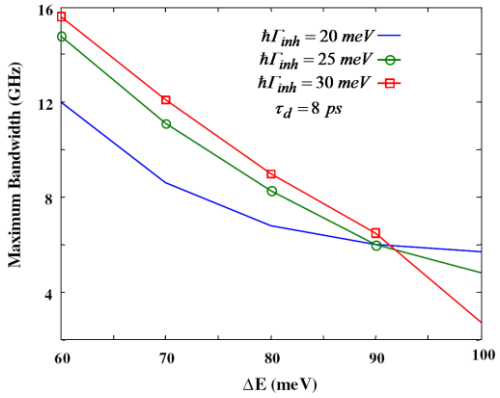
شکل ۷: ماکزیمم پهنای باند لیزر نقطه کوانتمی بر حسب ضریب بهره حالت پایه برای مقدارهای متفاوت بهره حالت برانگیخته.

۲-۳- تاثیر بهره نوری حالت پاپه و برانگیخته در پهنای باند مدولاسیون

در شکل۷ پهنای باند ماکزیمم بصورت تابعی از بهره مدی حالت پایه نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود افزایش بهره از g_{mGS}=11.4cm^{-1} تا g_{mGS}=34cm^{-1} فقط افزایش 8 تا 11GHz در پهنای باند را شامل می شود افت وخیز اندازه نقاط باعث افزایش پهنای طیف بهره حالت برانگیخته و همپوشانی گذار حالت پایه با حالت برانگیخته می شود از آنجایی که زمان گیراندازی حامل ها بین حالت های پیوسته بالایی و تراز برانگیخته بسیار سریع است بنابراین بهره حالت برانگیخته افزایش یافته که موجب افزایش پهنای باند می شود.

۲-۴- تاثیر جدایی انرژی بین ترازها بر پهنای باند مدولاسیون

شکل ۸ ماکزیمم پهنای باند را بصورت تابعی از ΔE نشان می دهد کاهش ΔE از 100meV به 60meV پهنای باند را از15GHz به 5GHz برای پهن شدگی ناهمگن 40meV افزایش می دهد باید توجه کرد که کاهش ΔE موجب تغییر چگالی حامل های نقاطی که در بهره نوری تاثیر می گذارند، می شود. همچنین جدایی کوچک بین تراز پایه و برانگیخته موجب همپوشانی قوی بین این حالت ها بدلیل ناهمگنی نقاط می شود.



شکل ۸: ماکزیمم پهنای باند لیزر نقطه کوانتمی بر حسب تابعی از جدایی انرژی بین حالت GS وES برای مقدارهای متفاوت ناهمگنی نقاط.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل مداری برای محاسبه پهنای باند مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتمی InAs/InP با در نظر گرفتن پهن شدگی ناهمگن و واهلش حامل بین ترازهای انرژی نشان داده شد. شبیه سازی ها نشان داد که کاهش افت وخیز اندازه نقاط موجب افزایش پهنای باند مدولاسون در جریان های تزریقی پایین می شود اما در جریان های تزریقی بالا زمان واهلش حامل بدرون حالت پایه فاکتور تعیین کننده پهنای باند است همچنین دریافتیم که پهنای باند قویا وابسته به جدایی انرژی بین حالت پایه وبرانگیخته است چون جدایی انرژی کوچک بین ترازها موجب همپوشانی گسیل لیزری حالت پایه و برانگیخته می شود

مراجع

[1] Sugawara, M., Hatori, H., *"Modeling room-temperature lasing spectra of 1.3μm InAs/GaAs QD lasers"*, Applied Physics,Vol. 97, 2005.

[2] Bhattacharya, P., Ghosh, S., *"Carrier dynamics and high-speed modulation properties of tunnel injection InGaAs-GaAs quantum-dot lasers"*, **IEEE**, Quantum Electron, Vol. 39, 2003.

[3] Gioannini, M., Sevegan, A., *"Simulation of differential gain linewidth enhancement factor of QD lasers"* Spiringer, Optical and Quantum Electronics, 2006.

[4] Yavari, M., Ahmadi, V., *"Circuit-Level Implementation of Semiconductor Self-Assembled Quantum Dot Laser"* **IEEE** Journal, Quantum Electronics, Vol. 15, No. 3, 2009

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]