



شبیه سازی پهنای باند مدولاسیون در لیزرهای نقطه کوانتومی 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 کوانتومی مبتنی بر معادلات آهنگ ارائه می دهیم. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد اثر افت خیز اندازه نقاط (مربوط به پهن شدن نا همگن) 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 کوانتومی، معادلات آهنگ، مدل مداری .

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

Mohammad Reza Mansouri¹, Samaneh Gholamhosseini², Abolghasem Mohammadi¹ and saeid Khodaparast¹

¹ Department of Electronics, Islamic Azad University Lamerd Branch

² Department 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.

۱- مقدمه

مداری توسط نرم افزار Hspice با استفاده از روابط زیر ارائه می شود [۴].

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N_s}{\tau_s} - \frac{N_s}{\tau_{sr}} + \frac{N_q}{\tau_{qe}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{N_s}{\tau_s} + \sum_m \frac{N_{ESm}}{\tau_{eESm}} - \frac{N_q}{\tau_{qr}} - \frac{N_q}{\tau_{qe}} - \frac{N_q}{\tau_{c0}} \sum_m (1 - P_{ESm}) G_m \quad (2)$$

$$\frac{dN_{GSm}}{dt} = \frac{N_{ESm} (1 - P_{GSm})}{\tau_{d0}} - \frac{N_{GSm}}{\tau_r} + \frac{c\Gamma}{n_r} \sum_j g_{jmES} S_j \quad (3)$$

$m = 0, 1, \dots, M - 1$

$$\frac{dN_{ESm}}{dt} = \frac{N_q G_m (1 - P_{ESm})}{\tau_{c0}} + \frac{N_{GSm} (1 - P_{ESm})}{\tau_{eGSm}} - \frac{N_{ESm}}{\tau_{d0}} - \frac{N_{ESm}}{\tau_r} + \frac{c\Gamma}{n_r} \sum_j g_{jmES} S_j \quad (4)$$

$m = 0, 1, \dots, M - 1$

$$\frac{dS_j}{dt} = \beta \frac{N_j}{\tau_r} - \frac{S_j}{\tau_{pj}} + \frac{c\Gamma}{n_r} \sum_j (g_{jmES} + g_{jmGS}) S_j \quad (5)$$

$$N_s = N_{s0} \exp\left(\frac{qV}{n_s kT}\right) \quad (6)$$

$$N_q = N_{q0} \exp\left(\frac{qV_q}{n_q kT}\right) \quad (7)$$

$$N = N_0 \exp\left(\frac{qV_D}{n_D kT}\right) \quad (8)$$

سرانجام مدل مداری برای محاسبه توان خروجی و بهره نوری در لیزرهای نقطه کوانتومی توسط نرم افزار Hspice بصورت شکل ۳ ارائه می شود [۴].

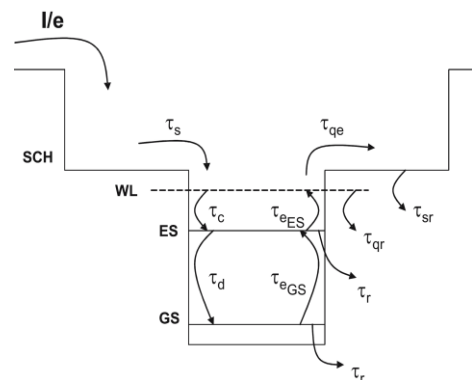
۲-۱ اثر دینامیک واهلش حامل بر پهنای باند مدولاسیون

در این بخش پهنای باند مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی 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 شدن همگن حالت پایه 20meV و برای تراز

اغلب عملکردی که از لیزرهای نقطه کوانتومی 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 کوانتومی و در نتیجه ترازهای انرژی آنها به علت اختلاف در اندازه و ترکیب نقاط کوانتومی بطور ناهمگن پهن می شوند. از آنجایی که سرعت مدولاسیون مستقیم لیزرهای چاه کوانتومی بدلیل وجود چیرپ فرکانسی محدود به چند گیگا بیت بر ثانیه است بنابراین لیزرهای نقطه کوانتومی InAs/InP بدلیل چیرپ فرکانسی پایین، سرعت مدولاسیون بالا، بسیار مناسب هستند. افت وخیز اندازه نقاط کوانتومی (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 مدل مداری برای بررسی پهنای باند مدولاسیون با در نظر گرفتن اثرات افت وخیز اندازه نقاط است.

۲- مدل تئوری، مداری و معادلات آهنگ

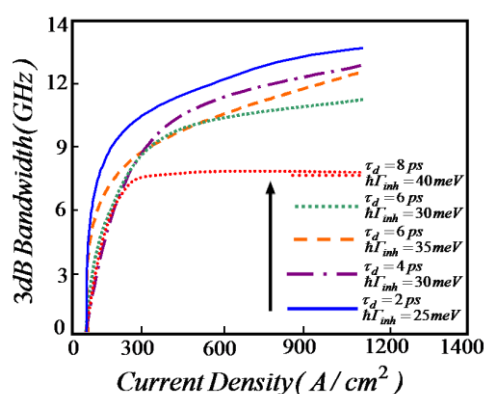
در مدل عددی استفاده شده برای بررسی پهنای باند مدولاسیون، مبتنی بر حل معادلات آهنگ فوتون- حامل می باشد. شکل ۱ دیگرام انرژی نوار هدایت ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتومی و فرآیند واهلش حامل به حالت پایه را نشان می دهد نقاط کوانتومی به m گروه تقسیم شده اند



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

معادلات آهنگ برای مدل تئوری [۳] و چگالی حامل ها در ترازهای SCH، وینینگ و پایه برای پیاده سازی مدل

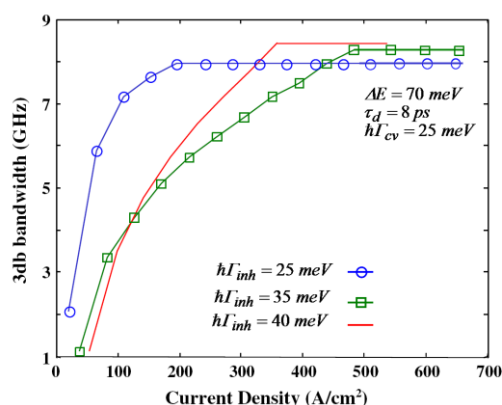
باند مدولاسیون کوچک می شود وقتی τ_d بزرگ است الکترون ها در ترازهای انرژی بالاتر انباشته می شوند که این موجب اشباع زود هنگام تراز برانگیخته می شود افزایش بیشتر τ_d موجب افزایش احتمال اشغال حالت برانگیخته (P_{ESm}) می شود. همانطور که دیده می شود با کاهش زمان واهلش τ_d و کاهش پهن شدگی ناهمگن پهنای باند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



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

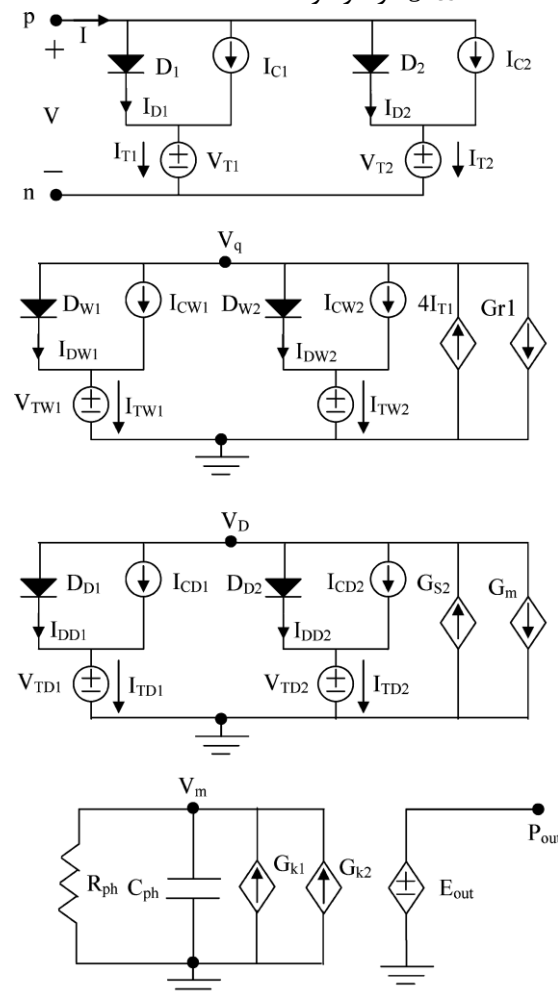
۲-۲- پهنای باند مدولاسیون با اثر پهن شدگی ناهمگن

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

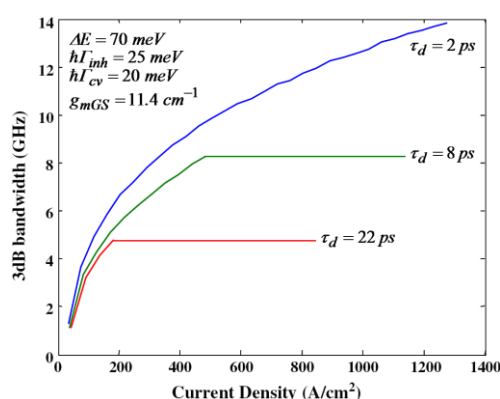


شکل ۶: پهنای باند مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی برای زمان واهلش ثابت و پهن شدگی ناهمگن متغیر.

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



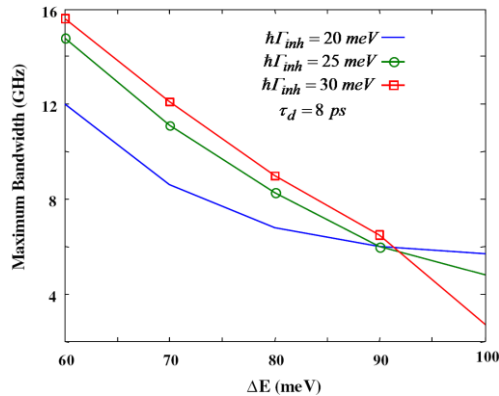
شکل ۳- پیاده سازی مدل مداری لیزرهای نقطه کوانتومی [۴].



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

شکل ۴ پهنای باند مدولاسیون لیزر نقطه کوانتومی را برای زمانهای مختلف واهلش از تراز برانگیخته به پایه τ_d نشان می دهد واهلش آهسته از برانگیخته به پایه موجب پهنای

افزایش می دهد باید توجه کرد که کاهش ΔE موجب تغییر چگالی حامل های نقطه ای که در بهره نوری تاثیر می گذارند، می شود. همچنین جدایی کوچکی بین تراز پایه و برانگیخته موجب همپوشانی قوی بین این حالت ها بدلیل ناهمگنی نقاط می شود.



شکل ۸: ماکزیمم پهنای باند لیزر نقطه کوانتومی بر حسب تابعی از جدایی انرژی بین حالت GS و ES برای مقادیرهای متفاوت ناهمگنی نقاط.

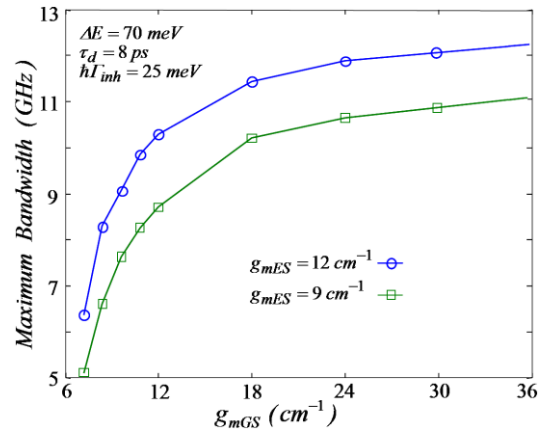
۳- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل مداری برای محاسبه پهنای باند مدولاسیون لیزرهای نقطه کوانتومی InAs/InP با در نظر گرفتن پهن شدن ناهمگنی و واهلش حامل بین ترازهای انرژی نشان داده شد. شبیه سازی ها نشان داد که کاهش افت وخیز اندازه نقاط موجب افزایش پهنای باند مدولاسیون 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 و برانگیخته 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" Springer, 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

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 کوانتومی بر حسب ضریب بهره حالت پایه برای مقادیرهای متفاوت بهره حالت برانگیخته.

۳-۲- تاثیر بهره نوری حالت پایه و برانگیخته

در پهنای باند مدولاسیون

در شکل ۷ پهنای باند ماکزیمم بصورت تابعی از بهره مدی حالت پایه نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود افزایش بهره از $g_{mGS}=11.4\text{cm}^{-1}$ تا $g_{mGS}=34\text{cm}^{-1}$ فقط افزایش ۸ تا ۱۱GHz 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.

۴-۲- 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 ۱۰۰meV به ۶۰meV پهنای باند را از ۵GHz به ۱۵GHz برای پهن شدن ناهمگنی ۴۰meV