بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تحلیل مشخصات اپتوالکترونیک لیزر ترانزیستوری طول موج کوتاه

بهزاد حکاری[۱]، حسن کاتوزیان[۱] و ایمان تقوی[۱و۲]

[۱] دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

[۲] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، اصفهان

چکیده – این مقاله به تحلیل و شبیه سازی مشخصات اپتوالکترونیک لیزر ترانزیستوری تک چاه کوانتومی با قابلیت کارکرد در طول موجهای کوتاه (336 nm) می پردازد. یک مدل کنترل بار بر مبنای معادلات نرخ برای یافتن مشخصات اپتوالکترونیک لیزر ترانزیستوری مورد استفاده قرار گرفت. شبیه سازی ها نشان داد که قطعه مربوطه دارای چگالی جریان آستانه ای برابر 12.3 kA/cm^2 و بهره جریانی در حدود 10.6 می باشد. همچنین 30GHz پهنای باند نوری، پیک رزونانسی زیر 5dB و f_{max} برابر 53.4 GHz برای عرض 15 nm چاه کوانتومی و طول کاواک 500µm بدست آمد.

کلید واژه- اپتوالکترونیک، پهنای باند نوری، جریان آستانه، چاه کوانتومی، لیزر ترانزیستوری.

Analysis of Optoelectronic Characteristics of Short Wavelength Transistor Laser

Behzad Hakkari[1], Hassan Kaatuzian[1], and Iman Taghavi[1,2]

[1] Photonics Research Laboratory, Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology,Tehran, Iran
[2] Electrical and Computer Engineering Department, Kashan University, Isfahan, Iran

Abstract- This paper deals with analysis and simulation of optoelectronic characteristics of transistor laser, which is capable of operating at short wavelengths. A charge control model based-on rate equations is utilized. Simulations show that the device has 12.3 kA/cm^2 threshold current density and 10.6 current gain. Also 30 GHz optical bandwidth, a resonance peak below 5 dB and 53.4 GHz maximum frequency in the case of 15 nm quantum-well width and a cavity length of 500 µm is yield.

Keywords: Optoelectronic, Optical Bandwidth, Threshold Current, Quantum Well, Transistor Laser.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-24]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

لیزر ترانزیستوری[1] یک نوع از HBT[2] ها می باشند با این تفاوت که در ناحیه بیس خود لایه ای به نام چاه کوانتومی[3] دارند که در این لایه بسیار بیشتراز آنچه در ناحیه بیس یک ترانزیستور معمولی یا در یک ترانزیستور نامتجانس بازترکیب وجود دارد عمل بازترکیب رخ میدهد و حاصل این بازترکیب زیاد تولید نور میباشد. این نور تولید شده توسط آینه های دو طرف کاواک[4] مرتباً بازتاب شده و از یک روزنه به صورت نور لیزری خارج می گردد[۱].

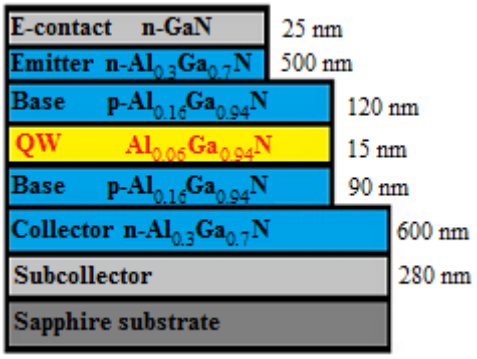
لیزرهای ترانزیستوری که تا به حال مورد توجه و مطالعه زیادی قرار گرفته اند دارای نور خروجی لیزری در طول موجهای بلند (۱۳۳۰ و ۱۵۵۰ نانومتر) [۲و۳و۴] و طول موج فروسرخ (نزدیک ۱ میکرومتر) [۵و۶] می باشند.

مشخصات کارکردی TL مانند بهره جریان الکتریکی، چگالی جریان آستانه و پاسخ فرکانسی نوری می توانند با بهینه سازی پارامترهای مختلف بهبود یابند. در این کار روی یک نمونه لیزر ترانزیستوری با تک چاه کوانتومی که نور خروجی آن طول موجی برابر ۳۳۶ نانومتر دارد (طول موج کوتاه) مطالعه می شود.

۲- مدلسازی لیزر ترانزیستوری:

شکل ۱ شماتیکی از TL استفاده شده در این مقاله را نشان می دهد. جنس چاه کوانتومی $Al_{0.06}Ga_{0.94}N$ بدون ناخالصی و با ضخامت ۱۵ نانومتر می باشد. میزان آلایش ناحیه بیس برابر $2x10^{18}\ cm^{-3}$ می باشد. با اعمال ولتاژ به پیوند بیس-امیتر حاملها از امیتر به داخل بیس تزریق می یابند. بیشتر این حاملها در داخل چاه کوانتومی به دام افتاده، در اثر عمل بازترکیب تولید نور می کنند.

برای تحلیل TL از یک مدل کنترل بار استفاده می کنیم [۷]. شکل ۲ انتقال حاملها در ناحیه بیس را نشان می دهد. همانطوری که از شکل پیداست دو پروسه برای حاملها رخ می دهد. ۱) بازترکیب مستقیم در بیس و در بیرون چاه کوانتومی با طول عمر τ_{rb0} ۲) بازترکیب در داخل چاه کوانتومی τ_{qw}. بازترکیب حاملها در ابتدا به صورت خودبخودی است. با افزایش تزریق حاملها به تدریج تابش القایی هم خواهیم داشت.



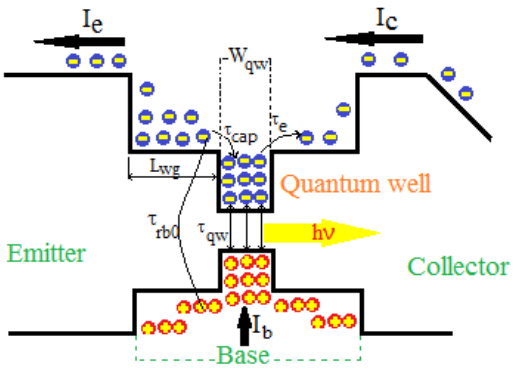
شکل ۱: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستور طول موج کوتاه

۲-۱- چگالی جریان آستانه (J_{th}):

جریان آستانه جریانی است که به ازای آن تابش القایی به تابش خودبخودی غلبه می کند. رابطه چگالی جریان آستانه به صورت زیر می باشد:

$$J_{th}=\frac{qn_0\tau_{cap}}{\upsilon\tau_{qw}\tau_{rb}}=\frac{qn_0}{\tau_{qw}}\left(1+\left(\frac{1}{\upsilon}-1\right)\frac{\tau_{cap}}{\tau_{rb0}}\right) \quad (۱)$$

که q واحد بار الکترون، n_0 چگالی الکترونها در حالت پایدار، τ_{cap} زمان به دام افتادن حاملها در چاه کوانتومی، υ فاکتور هندسی، τ_{qw} طول عمر بازترکیب در چاه کوانتومی و τ_{rb0} طول عمر بازترکیب حاملها در بالک بیس است. همچنین می توان نوشت: $\tau_{cap}=x_{qw}^2/2D$ که x_{qw} فاصله پیوند بیس-امیتر تا چاه کوانتومی و D ثابت انتشار



شکل ۲: مدل کنترل بار TL

[1] Transistor Laser (TL)

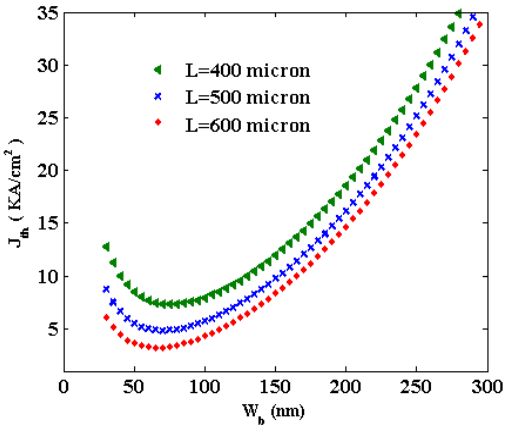
[2] Hetero-junction Bipolar Transistor

[3] Quantum Well (QW)

[4] Resonant cavity

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-24]

و برابر $26\ cm^2s^{-1}$ می باشد. و$\nu = W_{qw}(1/W_b - x_{qw}/W_b^2)$ که W_{qw} عرض چاه کوانتومی و W_b عرض کل بیس می باشد. طبق (شکل ۳) مشاهده می شود که یک حداقل مقدار برای چگالی جریان بیس در عرض ۷۴ نانومتری بیس برای طول کاواک ۵۰۰ میکرومتر خواهیم داشت. مقدار چگالی جریان آستانه $5kA/Cm^2$ می باشد. دو نمودار دیگر هم به ازای طول کاواک های مختلف ناحیه فعال می باشد و مشاهده می شود که با افزایش طول کاواک چگالی جریان آستانه کم می شود. همچنین چگالی جریان آستانه برای ساختار پیشنهادی مان که عرض بیس ۲۲۵ نانومتر است حدود $12.3\ kA/Cm^2$ بدست آمد.



شکل ۳: منحنی تغییرات چگالی جریان آستانه بر حسب W_b

۲-۲- بهره جریان (خروجی الکتریکی) لیزر ترانزیستوری β:

بهره جریان در لیزرهای ترانزیستوری مشابه با ترانزیستورهای دوقطبی با نسبت جریان کلکتور به جریان بیس تعریف میشود و می توان نوشت [۶]:

$$\beta=\tau_{rb}/\tau_{TL} \qquad (۲)$$

در این رابطه τ_{rb} طول عمر حاملهای بیس است که :

$$\frac{1}{\tau_{rb}}=\frac{1-\upsilon}{\tau_{rb0}}+\frac{\upsilon}{\tau_{cap}} \qquad (۳)$$

و τ_{TL} نیز زمان گذر از عرض بیس است که با فرض یکنواخت بودن جنس بیس با استفاده از رابطه زیر به دست می آید $\tau_{TL}=W_b^2/2D$. و خواهیم داشت:

$$\beta=\tau_{rb}\times 2D/W_b^2 \qquad (۴)$$

برای تحلیل تأثیر عرض بیس بر بهره جریان لیزر ترانزیستوری میتوان از رابطه (۴) استفاده کرد. البته باید توجه داشت که علاوه بر ترم W_b موجود در مخرج رابطه (۴), ترم τ_{rb} در صورت رابطه نیز همانطور که در رابطه (۳) مطرح شده است, تابع ν و متعاقباً تابع W_b می باشد.

با استفاده از شبیه سازی ها بهره جریان الکتریکی (β) برای TL در حدود 10.6 بدست آمد.

۲-۳- پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری

پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری عبارتست از نرخ تغییرات چگالی فتون ها به جریان تزریقی ناحیه فعال می توان روابط زیر نوشت:

$$S(\omega)=\frac{\Delta N_p(\omega)}{\Delta J(\omega)}=\left(\frac{1}{1+i\omega\tau_{rb}}\right)\frac{A}{\omega_r^2-\omega^2+i\omega\gamma} \qquad (۵)$$

$$A=\Omega\upsilon N_{p0}\tau_{rb}/q\tau_{cap} \qquad (۶)$$

$$\omega_r=\sqrt{\Omega N_{p0}/\tau_p} \qquad (۷)$$

$$\gamma=1/\tau_{qw}+\Omega N_{p0} \qquad (۸)$$

در رابطه (۵) $S(\omega)$ پاسخ فرکانسی نوری، N_{p0} چگالی فتونها در حالت ماندگار، τ_p طول عمر فتون ها، Ω ضریب بهره دیفرانسیلی و ω فرکانس زاویه ای می باشد($\omega=2\pi f$). دیگر پارامترهای بکاررفته در روابط فوق، قبلا تشریح شده اند. منحنی $S(\omega)$ به ازای فرکانس برای مقادیر مختلف عرض ناحیه بیس در شکل (۴) آورده شده است. همانطوری که از رابطه (۵) مشخص است و با توجه به شکل (۴) در منحنی پاسخ فرکانسی نوری یک فیلتر پایین گذر به همراه یک فراجهش در فرکانس تشدید داریم. نمودار نشان می دهد که با افزایش عرض ناحیه بیس میزان فراجهش کاهش و پهنای باند سیستم افزایش می یابد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که می توان به 30GHz پهنای باند نوری برای TL طول موج کوتاه با چاه کوانتومی 15nm دست یافت. یک پیک رزونانسی (فراجهش) به اندازه کمتر از 5dB در فرکانس 20GHz مشاهده می شود.

شکل (۵) تغییرات پیک رزونانسی بر حسب تغییرات W_b را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنی در عرض ۲۲۵ نانومتری دارای بیشترین پیک است و این همان نتیجه ای است که از شکل (۴) نتیجه می شود.

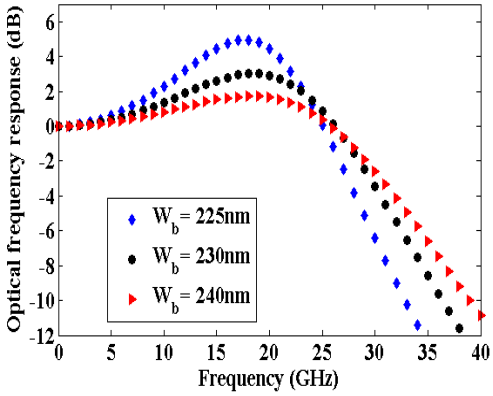
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-24]

۲-۴- f_{max} پهنای باند مدولاسیون ممکن، max:

یک فاکتورکلیدی برای سیستم های مدولاسیون پرسرعت فاکتور K می باشد که برای محاسبه بیشینه فرکانس ممکن استفاده می شود و از رابطه زیر بدست می آید [۸]:

$$K = 4\pi^2\left(\tau_p + \frac{\varepsilon_g}{v_g a/\chi}\right) \qquad (۹)$$

$$\chi = 1 + \tau_{cap}/\tau_e \qquad (۱۰)$$



شکل ۴: پاسخ فرکانسی نوری TL به ازای تغییر عرض بیس

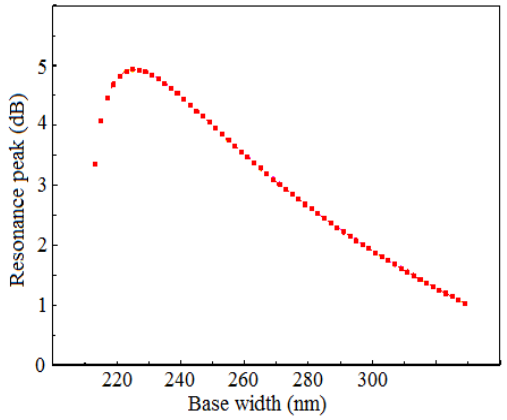
در روابط بالا ε_g فاکتور فشردگی بهره، χ فاکتور انتقال و τ_e طول عمر تابش است که از رابطه زیر می توان آن را حساب کرد:

$$\tau_e = \sqrt{\frac{2\pi\, m^* W_{qw}^2}{k_B T}}\; e^{E_B/k_B T} \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق K_B ثابت بولتزمن، T دما و E_B ارتفاع موثر سد انرژی در چاه کوانتومی است و برابر است با: $E_B = \pi^2 h^2 / 2m^* W_{qw}^2$. عملکرد فرکانس بالای قطعه بر اساس بیشینه پهنای باند ممکن مشخص می شود. f_{max} فرکانسی است که بهره توانی در آن واحد است. رابطه بین f_{max} و فاکتور K به صورت زیر است:

$$f_{max} = 2\sqrt{2}\pi/K \qquad (۱۲)$$

برای طراحی یک TL با پهنای باند نوری بالا، فاکتور K باید حداقل باشد. شبیه سازی های ما نشان می دهد که فرکانس 53/4 GHz برای قطعه ی ما قابل حصول است.



شکل ۵: تغییرات پیک رزونانسی بر حسب عرض ناحیه بیس

۳- نتیجه‌گیری

به منظور تحلیل و شبیه سازی دقیق مشخصات اپتوالکترونیک TL پیشنهادی یک مدل کنترل بار معرفی شده، سپس پارامترهای مدل مذکور بر اساس پارامترهای فیزیکی ساختار قطعه محاسبه شد. در نتیجه شبیه سازی ها تحلیل های DC و ac رو قطعه پیشنهادی نشان داد که لیزر ترانزیستوری طول موج کوتاهِ پیشنهاد شده، دارای چگالی جریان آستانه ای برابر $12.3\ kA/cm^2$ و بهره جریانی در حدود 10.6 می باشد. همچنین در تحلیل ac به منظور بررسی پاسخ فرکانسی 30GHz پهنای باند نوری و پیک رزونانسی زیر 5dB برای عرض ۱۵ نانومتر چاه کوانتومی و طول کاواک ۵۰۰ میکرومتر بدست آمد.

مراجع

[۱] کاتوزیان، حسن، *فتونیک*، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش دوم، ۱۳۸۸.

[2] Huang, Y., Ryou, J., *Epitaxial Structure Design of a Long-Wavelength InAlGaAs/InP Transistor Laser*. IEEE J. Quantum Electron. 47(5), 642-650, (2011).

[3] Mojaver H. R. and Kaatuzian H., *Analysis and Improvement of Optical Frequency Response in long wavelength Transistor Laser*, Optical and Quantum Electronics, 2011.

[4] Shiaro, M., Sato, T., Takino, Y., Sato, N., Nishiyama, N., Arai, Sh., *Lasing Operation of Long-Wavelength Transistor Laser Using AGaInAs/InP Quantum Well Active Region*, IRPM 2011 proceeding, 2011.

[5] Feng, M., Holonyak Jr, N., Walter, G., & Chan, R, *Room temperature continuous wave operation of a hetero-junction bipolar transistor laser*, Applied Physics Letters, 87(13), 131103, 2005.

[6] Then, H. W., Feng, M., & Holonyak Jr, N., *The Transistor Laser: Theory and Experiment*, Proceedings of the IEEE, 2271 – 2298, 2013.

[7] Zhang, L., & Leburton, J., *Modeling of the transient characteristics of hetero-junction bipolar transistor lasers*, IEEE Journal of Quantum Electronics, (2009),45(4), 359-366

[8] Nagarajan, R., Ishikawa, M., Fukushima, T., Geels, R.S., Bowers, J.E., *High speed quantum-well lasers and carrier transport effects*, Quantum Electronics, IEEE Journal of 28(10), 1990-2008 (1992)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-24]