

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



تحليل مشخصات ابتوالكترونيك ليزر ترانزيستورى طول موج كوتاه

بهزاد حکاری^۱، حسن کاتوزیان^۱ و ایمان تقوی^{۹۲} 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 باری 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/cm² و بهره جریانی در حدود 10.6 می باشد. همچنین 30GHz پهنای باند نوری، پیک رزونانسی زیار 5dB و f_{ma} برابر 53.4 GHz

كليد واژه- اپتوالكترونيك، پهناى باند نورى، جريان آستانه، چاه كوانتومى، ليزر ترانزيستورى.

Analysis of Optoelectronic Characteristics of Short Wavelength Transistor Laser

Behzad Hakkari¹, Hassan Kaatuzian¹, 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/cm² 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 μ m is yield.

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

۱– مقدمه

لیزر ترانزیستوری^۱ یک نوع از ^۲HBT ها می باشند با این تفاوت که در ناحیه بیس خود لایه ای به نام چاه کوانتومی^۲ 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^۴ مرتباً بازتاب شده و از یک روزنه به صورت نور لیزری خارج می گردد[1].

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 برابر³ cm⁻³ 2x10¹⁸ می باشد. با اعمال ولتاز 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

¹ Transistor Laser (TL)

- ² Hetero-junction Bipolar Transistor
- ³ Quantum Well (QW)
- ⁴ Resonant cavity

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 ۲_{rb0} ۲) بازترکیب در داخل چاه کوانتومی _۲qw. بازترکیب حاملها در ابتدا به صورت خودبخودی است. با افزایش تزریق حاملها به تدریج تابش القایی هم خواهیم داشت.

E-contact n-GaN	25 nm	
Emitter n-Al _{0.3} Ga _{0.7} N 500 nm		
Base p-Al _{0.16} Ga _{0.94} N	120	nm
QW Al _{0.06} Ga _{0.94} N		ım
Base p-Al _{0.16} Ga _{0.94} N	90 :	nm
Collector n-Al _{0.3} Ga _{0.7} N		600 nm
Subcollector		280 nm
Sapphire substrate		

شکل ۱: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستور طول موج کوتاه

J_{th}) چگالی جریان آستانه (J_{th}):

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

$$J_{th} = \frac{qn_{0}\tau_{cap}}{\upsilon\tau_{qw}\tau_{rb}} = \frac{qn_{0}}{\tau_{qw}} (1 + (\frac{1}{\upsilon} - 1)\frac{\tau_{cap}}{\tau_{rb0}}) \quad (1)$$

که q واحد بار الکترون، n₀ چگالی الکترونها در حالت پایدار، τ_{cap} زمان به دام افتادن حاملها در چاه کوانتومی، υ فاکتور هندسی، $\tau_{qw} - \tau_{qw}$ عصر بازترکیب در چاه کوانتومی و τ_{rb0} طول عمر بازترکیب حاملها در بالک بیس $x_{qw} - x_{cap} = x_{qw}^2/2D$ است. همچنین می توان نوشت: $\tau_{cap} = x_{qw}^2/2D$ که راست فاصله پیوند بیس-امیتر تا چاه کوانتومی و D ثابت انتشار



شکل ۲: مدل کنترل بار TL

 $v = W_{qw}(1/W_b - x_{qw}/W_b^2)$ و برابر $V = W_{qw}(1/W_b - x_{qw}/W_b^2)$ که W_{qw} عرض چاه کوانتومی و W_b عرض کـل بـیس مـی باشد. طبق (شکل ۳) مشاهده می شـود کـه یـک حـداقل مقدار برای چگالی جریـان بـیس در عـرض ۷۴ نـانومتری بیس برای طول کـاواک ۵۰۰ میکرومتـر خـواهیم داشت. مقـدار چگـالی جریـان آسـتانه SkA/Cm² مـی باشـد. دو نمودار دیگر هم به ازای طول کاواک های مختلف ناحیـه فعال می باشد و مشاهده می شـود کـه بـا افـزایش طـول کاواک چگـالی جریـان آسـتانه کـم مـی شـود. همچنـین چگالی جریان آستانه برای سـاختار پیشـنهادی مـان کـه 12.3 kA/Cm² مـیس ۲۲۵ نـانومتر اسـت حـدود V_{12}



بهـره جریـان در لیزرهـای ترانزیسـتوری مشـابه بـا ترانزیستورهای دوقطبی با نسبت جریان کلکتور به جریان بیس تعریف میشود و می توان نوشت [۶]: $\beta = \tau_{rb} / \tau_{TL}$ (۲) در این رابطه τ_{rb} طول عمر حاملهای بیس است که : 1 - u u

$$\frac{\tau_{rb}}{\tau_{rb0}} = \frac{\tau_{rb0}}{\tau_{rb0}} + \frac{\tau_{rb0}}{\tau_{cap}}$$
(٣)

و au_{TL} نیز زمان گذر از عـرض بـیس اسـت کـه بـا فـرض یکنواخت بودن جنس بیس بـا اسـتفاده از رابطـه زیـر بـه دست می آید $au_{TL} = W_b^2 / 2D$. و خواهیم داشت:

$$\beta = \tau_{\rm rb} \times 2D/W_{\rm b}^2 \tag{(f)}$$

-۳-۲ پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری

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

$$S(\omega) = \frac{\Delta N_{p}(\omega)}{\Delta J(\omega)} = \left(\frac{1}{1 + i\omega\tau_{rb}}\right) \frac{A}{\omega_{r}^{2} - \omega^{2} + i\omega\gamma} \quad (\Delta)$$

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

$$\omega_{\rm r} = \sqrt{\Omega N_{\rm p0}} / \tau_{\rm p} \tag{Y}$$

$$\gamma = 1/\tau_{qw} + \Omega N_{p0} \tag{A}$$

در رابطـه (۵) ((0) (S) پاسـخ فرکانسـی نـوری، $N_{p0}
abla$ گالی فتونها در حالت ماندگار، $au_{
m p}$ طول عمر فتون هـا، Ω ضـريب بهره دیفرانسیلی و ۵ فرکانس زاویه ای می باشد(ω=2πf). دیگر پارامترهای بکاررفته در روابط فوق، قبلا تشریح شدہ انہ منحنے S(۵) به ازای فرکانس برای مقادیر مختلف عرض ناحیه بیس در شکل (۴) آورده شده است. همانطوری که از رابطه (۵) مشخص است و با توجـه به شکل (۴) در منحنی پاسخ فرکانسی نوری یک فیلتر پایین گذر به همراه یک فراجهش در فرکانس تشدید داريم. نمودار نشان مي دهد كه با افزايش عرض ناحيه 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 كوانتـومى 15nm دسـت يافـت. يـك پيـك رزونانسـي (فراجهش) به اندازه کمتر از BB در فرکانس 20GHz مشاهده می شود.

شکل (۵) تغییرات پیک رزونانسی بر حسب تغییرات W_b را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنـی در عـرض ۲۲۵ نانومتری دارای بیشترین پیـک اسـت و ایـن همـان نتیجه ای است که از شکل (۴) نتیجه می شود.

 f_{max} بهنای باند مدولاسیون ممکن، f_{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]:

$$\mathbf{K} = 4\pi^2 \left(\tau_{\rm p} + \frac{\varepsilon_{\rm g}}{v_{\rm g}a/\chi} \right) \tag{9}$$

$$\chi = 1 + \tau_{\rm cap} / \tau_{\rm e} \tag{(1)}$$



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

در روابط بالا ϵ_{g} فاکتور فشردگی بهره، χ فاکتور انتقال و au_{e} طول عمر تابش است که از رابطه زیـر مـی تـوان آن را حساب کرد:

$$\tau_{e} = \sqrt{\frac{2\pi \ m^{*} W_{qw}^{2}}{k_{B} T}} \ e^{E_{B}/k_{B} T}$$
(11)

در رابطه فوق ${
m K_B}$ ثابت بولتزمن، T دما و ${
m E_B}$ ارتفاع موثر سـد انــرژی در چـاه کوانتــومی اســت و برابــر اســت بــا: ${
m E_B} = \pi^2 h^2 / 2m^* W_{
m ow}^2$. عملکرد فرکانس بالای قطعه



$$f_{max}$$
 بر اساس بیشینه پهنای باند ممکن مشخص می شود. f_{max} فرکانسی است که بهره توانی در آن واحد است. رابطه بین
فرکانسی است که بهره توانی در آن واحد است. رابطه بین
 f_{max} و فاکتور K به صورت زیر است:
 $f_{max} = 2\sqrt{2\pi/K}$ (۱۲)
K برای طراحی یک TL با پهنای باند نوری بالا، فاکتور K
باید حداقل باشد. شبیه سازی های ما نشان می دهـد کـه
فرکانس 53/4 GHz برای قطعه ی ما قابل حصول است.

۳- نتیجهگیری

به منظ ور 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 کوتاه پیشنهادی نشان داد که چگالی جریان آستانه ای برابر I2.3 kA/cm² 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 Bd برای عرض ۱۵ نانومتر چاه کوانتومی و طول کاواک ۵۰۰ میکرومتر بدست آمد.

مراجع

- [۱] کاتوزیان، حسن، فتونیک، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، 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 heterojunction 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)