



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



اثرات ساختاری چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی بر بهره نوری دیود های لیزری

المیرا عنابی میلانی، اصغر عسگری

گروه فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز

چکیده - در این مقاله به بررسی عملکرد بهره نوری چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی پرداخته می شود، میزان بهره نوری در ساختار چاه کوانتومی دوگانه با پارامترهای ساختاری متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار بهره نوری برای کسر مولی متفاوتی از آلومینیوم در لایه های سدی با تغییرات عرض چاه کوانتومی و عرض سد میانی در محدوده ۱ تا ۵ نانومتر شبیه سازی شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد افزایش عرض چاه کوانتومی و همینطور افزایش عرض سد میانی منجر به کاهش بهره نوری می شود.

کلید واژه- بهره نوری، دیود لیزری، چاه کوانتومی دوگانه، سد کوانتومی، مواد نیتریدی، نامتقارن

The Effects of Structural Parameters of GaN Based Asymmetric Doubled Quantum Wells on Optical Gain in Laser Diodes

Elmira Annabi Milani, Asghar Asgari

Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz

Abstract- In this paper, the optical gain of GaN doubled asymmetric quantum well based laser diode has been investigated. The rate of optical gain in the structure of doubled quantum wells with different structural parameters is considered. The optical gain is obtained for different values of aluminum mole fraction, variations of quantum well thickness and central quantum barrier width from 1 nm to 5 nm. The results of our calculations show that increasing the width of the central barrier and the doubled quantum well will decrease the optical gain.

Keywords: Optical gain, Diode laser, Double quantum well, Quantum barrier, Nitride material, Asymmetric

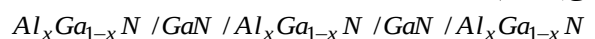
مقدمه

امروزه لیزرهای نیمه‌رسانای چاه کوانتومی نظر بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌است. مخصوصاً استفاده وسیع این ابزار در دستگاه‌ها به دلیل جریانهای آستانه فوق‌العاده پایین این‌گونه لیزرها، طیف باریک بهره نوری و وابستگی کمتر به دما در قیاس با لیزرهای عادی باعث تکاپوی هرچه بیشتر صنایع در راستای بهینه سازی اینگونه ادوات نیمه‌رسانا شده است. بهره نوری یکی از پایه‌ای‌ترین مشخصات یک لیزر نیمه‌رسانا است که بهینه سازی در آن باعث اثر مستقیم در مشخصات خارجی آن همچون: بازده و توان خروجی می‌گردد.

از طرف دیگر هرگاه ساختارهای لایه فعال به اندازه کافی ریز باشند (در حد طول موج دوبروی الکترون مربوطه)، حالت‌های انرژی در نوارهای ظرفیت و رسانش کوانتیده شده و فقط ترازهای انرژی معینی مجاز می‌شوند. همچنین نازک کردن ناحیه فعال مزیت بزرگی دارد و آن این که تعداد کل حاملین مورد نیاز برای به‌دست آوردن چگالی شفافیت در ناحیه فعال لیزر چاه کوانتومی نسبت به لیزرهای معمولی با نسبتی از ضخامت‌های ناحیه فعال، کاهش می‌یابد [1]. گاف باند پهن مواد نیتريدی و عناصر وابسته به آنها با گروه III (AlN - GaN - InN) موفقیت‌های زیادی در امر ادوات اپتو الکترونیک به ویژه در دهه حاضر داشته اند [2]. اگرچه این مواد به گروه III-V تعلق دارند، موادی قطبیده و یونی هستند. وجود میدان الکتریکی خیلی بزرگ در جهت رشد مواد نیتريدی به خاطر اثر قطبش خودبه‌خودی و پیزوالکتریکی آنها می‌باشد [3].

ساختار و روش کار

در این مقاله، به بررسی چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه که از اتصال زیر به وجود آمده است، به شرح زیر می‌پردازیم:



الف) عرض سد را ثابت گرفته و عرض هر دو چاه را از 1nm تا 5nm تغییر می‌دهیم. ب) عرض چاه‌ها را ثابت گرفته و عرض سد را از 1nm تا 5nm تغییر می‌دهیم. ج) عرض سد و یکی از چاه‌ها را ثابت گرفته و عرض چاه دیگر را از 1nm تا 5nm تغییر می‌دهیم و تغییرات بهره نوری را بررسی می‌کنیم.

شایان ذکر است در این بررسی به علت متقارن بودن شکل چاه‌های کوانتومی از اثرات میدانهای خودبه‌خودی و پیزوالکتریک صرف‌نظر شده است. برای محاسبه بهره نوری ابتدا باید توابع موج و زیر باندهای انرژی معلوم گردد برای این کار، معادله شرودینگر برای یک ذره در چاه کوانتومی نامتقارن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m_{(x)}^*} \frac{d\psi(x)}{dx} \right) + u(x)\psi(x) = E(x)\psi(x) \quad (1)$$

که در آن $m_{(x)}^*$ جرم مؤثر وابسته به مکان است که برای چاه و سد $m_{(x)}^* = m_b^* = m_w^*$. $u(x)$ نمایانگر پروفایل بانندی ساختار است. در حل این معادله به روش تفاضل محدود، در نهایت مسئله با اعمال شرایط مرزی، به یک ماتریس ویژه مقداری تبدیل می‌شود. ویژه مقادیر این ماتریس، همان انرژی‌های مجاز سیستم و ویژه توابع این ماتریس، همان توابع موج ذره می‌باشد. با تغییر گام‌ها از مقادیر زیاد به کم مشاهده شد در گام یک آنگستروم مقادیر انرژی و توابع موج از دقت لازم برخوردار هستند. برای ادامه کار، لازم است موقعیت ترازهای فرمی معلوم گردد که این ترازها به طور کلی به تزریق حاملین وابسته بوده و بنابراین با حل معادله آهنگ لیزر، می‌توان چگالی حاملین و سپس، ترازهای شبه فرمی را از تابع توزیع فرمی‌دیراک به دست آورد. معادلات آهنگ به صورت زیر خواهد بود [5]:

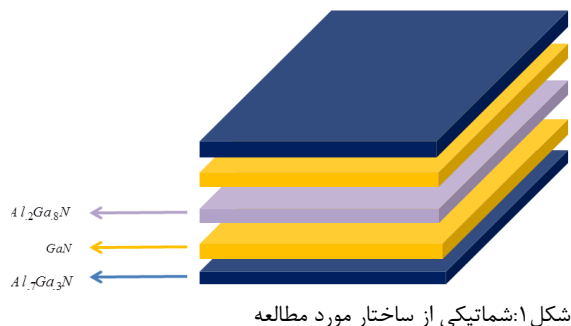
$$\begin{cases} \frac{dN_e}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - (R_{sp} + R_{nr}) - v_g g_{th} N_p \\ \frac{dN_p}{dt} = \left[\Gamma v_g - \frac{1}{\tau_p} \right] N_p + \Gamma R'_{sp} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن Ne چگالی حاملین، I جریان تزریقی، Γ ضریب محدودیت، v_g سرعت گروه و برابر با $\frac{C}{n_{eff}}$ لحاظ شده است. g_{th} بهره آستانه و به صورت $\Gamma g_{th} = \alpha_i + \alpha_m$ به دست می‌آید:

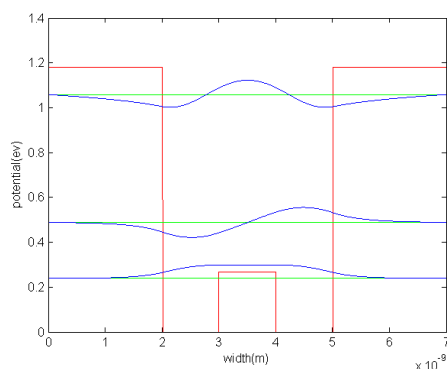
$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (3)$$

N_p چگالی فوتون‌ها، R_{sp} نرخ گسیل خودبخودی، R_{nr} نرخ گسیل غیرتشنشعی است. τ_p طول عمر فوتون است، که برابر است با:

جنس GaN با ضخامت $1nm$ ، یک سد مابین چاهای کوانتومی از جنس $AlGaIn$ با کسر مولی $x=0.2$ و عرض $1nm$ و در نهایت یک سد از جنس $AlGaIn$ با کسر مولی $x=0.7$ می‌باشد. شکل (۱ و ۲).



شکل ۱: شماتیکی از ساختار مورد مطالعه



شکل ۲: تابع موج و ترازهای انرژی برای چاه پتانسیل نامتقارن دوگانه برای الکترون.

در بررسی قسمت (الف) مشاهده می‌شود با ثابت بودن عرض سد و افزایش عرض چاه، بهره‌نوری کاهش می‌یابد شکل (۳ و ۴). علت این کاهش را می‌توان این گونه توضیح داد که هر چه عرض چاه افزایش پیدا کند، ترازهای انرژی به سمت کف چاه نزدیک‌تر می‌شوند. در نتیجه گذارهای مجاز به سمت انرژی‌های کمتر و طول موج‌های بلندتر حرکت می‌کنند و چون ترازهای شبه‌فرمی به هم نزدیک‌تر و فاصله جدایی آنها از هم کم‌تر شده است، بنابراین ترازهای کم‌تری در گسیل شرکت می‌کنند و از این رو تعداد فوتون‌های تولید شده در اثر گذارهای مجاز کاهش می‌یابد. در بررسی قسمت (ب) عرض چاه‌ها را ثابت گرفته ($1nm$) و عرض سد را از $1nm$ تا $5nm$ تغییر می‌دهیم. تغییر سد میانی، مشابه با تغییرات چاه‌ها، توابع موج و ترازهای انرژی تغییر و این اثر بهره‌نوری را کاهش خواهد داد. (۵ و ۶). در بررسی قسمت (ج) با فرض ثابت بودن عرض چاه اول و عرض سد‌ها، با افزایش عرض چاه

$$\lambda_p = \frac{c}{n_{eff}} \left[\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (4)$$

$R_1 R_2$ بازتابش در سطوح عقب و جلو، L طول کاواک، α_i ضریب اتلاف نوری، C سرعت نور و n_{eff} ضریب شکست مؤثر کاواک می‌باشد. با حل معادلات آهنگ، به صورت عددی و به روش رانگ کوتای مرتبه چهارم با نرم افزار متلب، مقدار تقریبی ترازهای شبه فرمی محاسبه می‌گردد [6].

با معلوم بودن این پارامترهای فیزیکی می‌توان بهره نوری را بدست آورد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

(۵)

$$g(\hbar\omega) = C_0 \sum_{n,m} |I_{hm}^{en}|^2 \int_0^\infty dE_t \rho_r^{2D} \left| \hat{e} \cdot P_{cv} \right|^2 \frac{\gamma}{\pi} \times [f_c^n(E_t) - f_v^m(E_t)]$$

که در آن C_0 ، ρ_r^{2D} ، I_{hm}^{en} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_0 = \frac{\pi e^2}{n_r c \epsilon_0 m_0^2 \omega} \quad (6)$$

$$\rho_r^{2D} = \frac{m_r^*}{\pi \hbar^2 L_z} \quad (7)$$

$$I_{hm}^{en} = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \phi_n(z) g_m(z) \quad (8)$$

ϕ_n و g_m به ترتیب تابع موج الکترون و حفره می‌باشد.

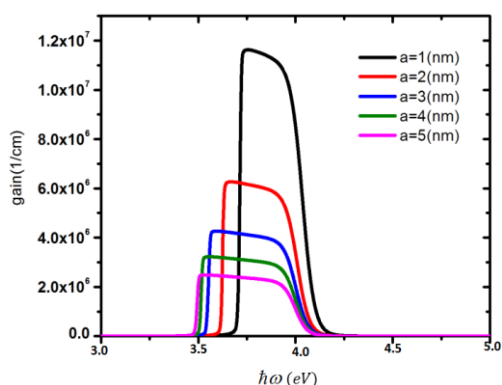
$$|\hat{e} \cdot p_{cv}| = \frac{E_p \cdot m_0}{6} \quad (9)$$

معادله (۸) انتگرال همپوشانی باند هدایت و ظرفیت می‌باشد و مقداری کمتر از یک و بسیار نزدیک به یک دارد. باتوجه به معادله (۵) وقتی $f_v < f_c$ بهره مثبت است و یک موج نور فرودی با انرژی فوتون $\hbar\omega$ به وسیله ماده تقویت خواهد شد. می‌توان نشان داد که این نامساوی با این عبارت $E_g < \hbar\omega < E_{fc} - E_{fv}$ هم ارز است. یعنی جدایی تراز نسبی فرمی باید بزرگ‌تر از باند گاف باشد تا بهره نوری در ماده حاصل شود. برای چگالی‌های حامل الکترون بسیار زیاد می‌توان قرار داد $f_c - f_v = 0$.

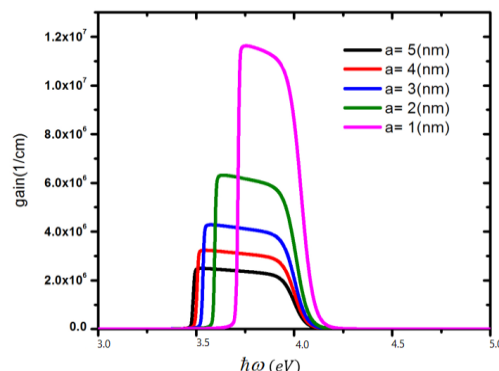
بررسی نتایج

ساختار مورد بررسی به ترتیب شامل یک سد از جنس $AlGaIn$ با کسر مولی $x=0.7$ ، دو چاه از

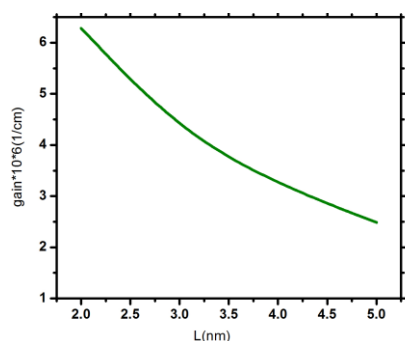
دوم همان طور که در شکل (۸و۷) می بینیم، کاهش بهره نوری را شاهد خواهیم بود.



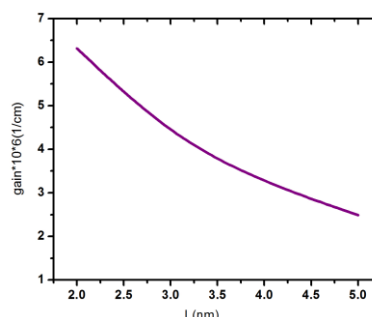
شکل ۷: بهره نوری در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتیدی به ازای تغییر در عرض یک چاه.



شکل ۸: بهره نوری در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتیدی به ازای عرض چاه های مختلف.



شکل ۹: تغییرات بهره نوری با تغییر عرض یکی از چاه ها در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتیدی.



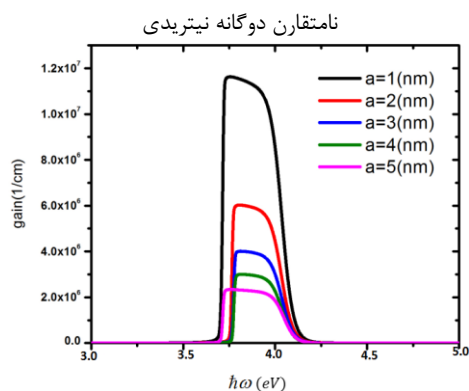
شکل ۱۰: تغییرات بهره نوری با تغییر عرض چاه ها در چاه کوانتومی

نتیجه گیری

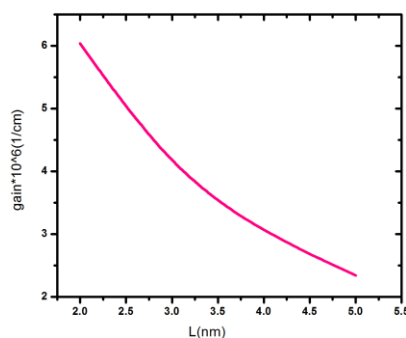
در این مقاله به بررسی بهره نوری در لیزرهای چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتیدی پرداخته شده است. محاسبات نشان می دهد که تاثیر نوع ساختار بر روی بهره لیزری بسیار زیاد است به گونه ای که با افزایش پهنای چاه کوانتومی و افزایش پهنای سد وسط، بهره کاهش یافته و همچنین پهنای طیف نشری نیز افزایش می یابد.

مراجع

- [1] A. Yariv, ۱۹۶۷, *Quantum electronics*, John Wiley & Sons, Third Edition
- [2] Asgari, A., and L. Faraone. "Thermal broadening of electron mobility distribution in AlGaIn/GaN heterostructures." *Journal of Applied Physics* 114, no. 5 (2013): 053702-053702.
- [3] Yahyazadeh, R., A. Asgari, and M. Kalafi. The effects of depletion layer on negative differential conductivity in AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 33, no. 1 (2006): 77-82.
- [4] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley Interscience, Chap. 3
- [5] L.L. Ihi, Y.S. Dhen, Effect of inter- level relaxation and cavity length on double- state Asaing perforvsnsve of qusntuv dot Asaera, *Physica E*, 39, 203-208,(2007).



شکل ۱۱: بهره نوری در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتیدی به ازای عرض سد میانی مختلف.



شکل ۱۲: تغییرات بهره نوری با تغییر عرض سد در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتیدی.