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 بربهره نوری دیود های لیزری

المیرا عنّابی میلانی، اصغر عسگری

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

چکیده – در این مقاله به بررسی عملکرد بهره‌نوری چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی پرداخته می‌شود، میزان بهره‌نوری در ساختار چاه‌کوانتومی دوگانه با پارامترهای ساختاری متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌است. نمودار بهره نوری برای کسرمولی 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 می‌دهد افزایش عرض چاه‌کوانتومی و همینطور افزایش عرض سد میانی منجر به کاهش بهره‌نوری می‌شود.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

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

مقدمه

امروزه لیزرهای نیمه‌رسانای چاه کوانتومی نظر بسیاری از محققان را به‌خود جلب کرده‌است. مخصوصا 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 چاه‌کوانتومی نسبت به لیزرهای معمولی با نسبتی از ضخامت‌های ناحیه فعال، کاهش می‌یابد [1]. گاف باند پهن مواد نیتریدی و عناصر وابسته به آنها با گروه III $(AlN - GaN - InN)$ موفقیت های زیادی در امر ادوات اپتو الکترونیک به ویژه در دهه حاضر داشته اند [۲]. اگرچه این مواد به گروه III-V تعلق دارند، موادی قطبیده و یونی هستند. وجود میدان الکتریکی خیلی بزرگ در جهت رشد مواد نیتریدی به خاطر اثر قطبش خودبه‌خودی‌و پیزوالکتریکی آنها می‌باشد[3].

ساختار و روش کار

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

$Al_xGa_{1-x}N\ /GaN\ /Al_xGa_{1-x}N\ /GaN\ /Al_xGa_{1-x}N$

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 می دهیم 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 چاه‌کوانتومی نامتقارن به صورت زیر بیان می شود :

$$-\frac{\hbar^2}{2}\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{m^*_{(x)}}\frac{d\psi(x)}{dx}\right)+u(x)\psi(x)=E(x)\psi(x) \quad (۱)$$

که در آن $m^*_{(x)}$ جرم مؤثر وابسته به مکان است که برای چاه و سد $u(x)$. $m^*_{(x)}=m^*_b=m^*_w$ نمایانگر پروفایل باندی 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 تراز های 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 خواهدبود[5]:

$$\begin{cases}\dfrac{dN_e}{dt}=\dfrac{\eta_i I}{qV}-(R_{sp}+R_{nr})-v_g g_{th}N_p \\ \dfrac{dN_p}{dt}=\left[\Gamma v_g-\dfrac{1}{\tau_p}\right]N_p+\Gamma R'_{sp}\end{cases} \quad (۲)$$

که در آن Ne چگالی حاملین، I جریان تزریقی، Γضریب‌محدودیت، v_g سرعت گروه و برابر با $\frac{C}{n_{eff}}$ لحاظ‌شده‌است. g_{th} بهره‌آستانه و به‌صورت $\Gamma g_{th}=\alpha_i+\alpha_m$ به‌دست می‌آید:

$$\alpha_m=\frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_1R_2} \quad (۳)$$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

$$\lambda_p = \frac{c}{n_{eff}}\left[\alpha_i + \frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right)\right] \qquad (4)$$

R_1R_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 متوان بهره نوری را بدست آورد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

(۵)

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

که در آن $C_0, \rho_r^{2D}, I_{hm}^{en}$ به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_0 = \frac{\pi e^2}{n_r c\varepsilon_0 m_0^2 w} \qquad (۶)$$

$$\rho_r^{2D} = \frac{m_r^*}{\pi\hbar^2 L_z} \qquad (۷)$$

$$I_{hm}^{en} = \int_{-\infty}^{+\infty} dz\,\phi_n(z)g_m(z) \qquad (۸)$$

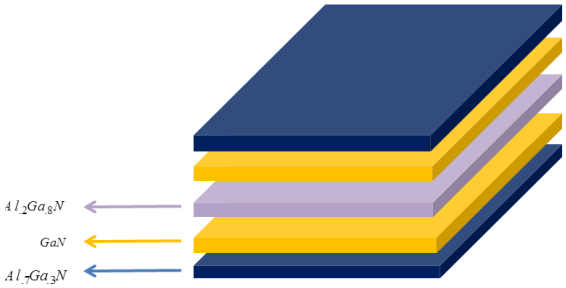
ϕ_n و g_m به ترتیب تابع موج الکترون و حفره می‌باشد.

$$|\hat{e}.p_{cv}| = \frac{E_p.m_0}{6} \qquad (۹)$$

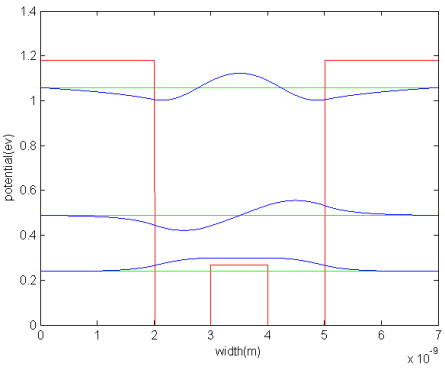
معادله (۸) انتگرال همپوشانی باند هدایت و ظرفیت می‌باشد و مقداری کمتر از یک و بسیار نزدیک به یک دارد. باتوجه به معادله (۵) وقتی $f_v < f_c$ بهره مثبت است و یک موج نور فرودی با انرژی فوتون $\hbar\omega$ به وسیله ماده تقویت خواهد شد. می‌توان نشان داد که این نامساوی با این عبارت $E_g < \hbar\omega < E_{fc} - E_{fv}$ 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 ازجنس $AlGaN$ با کسر مولی $x = 0.7$، دو چاه از جنس GaN با ضخامت $1nm$، یک سد مابین چاهای کوانتومی از جنس $AlGaN$ با کسر مولی $x = 0.2$ و عرض $1nm$ و در نهایت یک سد از جنس $AlGaN$ با کسر مولی $x = 0.7$ می‌باشد. شکل (۱و۲).



شکل۱:شماتیکی از ساختار مورد مطالعه

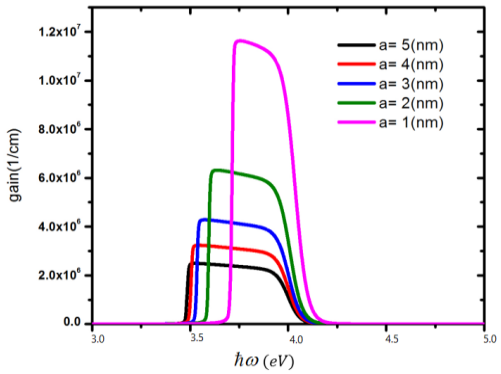


شکل۲: تابع موج و ترازهای انرژی برای چاه‌پتانسیل نامتقارن دوگانه برای الکترون.

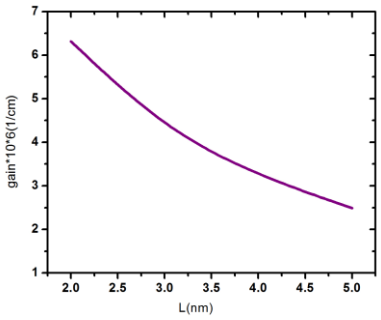
دربررسی قسمت(الف)مشاهده می‌شود با ثابت بودن عرض سد و افزایش عرض چاه، بهره‌نوری کاهش می‌یابد شکل(۳و۴). علت این کاهش را می‌توان این گونه توضیح داد که هر چه عرض چاه افزایش پیدا کند، ترازهای انرژی به سمت کف چاه نزدیک‌تر می‌شوند. در نتیجه گذارهای مجاز به سمت انرژی‌های کم‌تر و طول موج‌های بلندتر حرکت می‌کنند و چون ترازهای شبه‌فرمی به هم نزدیک‌تر و فاصله جدایی آنها از هم کم تر 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 چاه ها 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 بهره نوری را کاهش خواهد داد. (۵و۶). در بررسی قسمت(ج) با فرض ثابت بودن عرض چاه اول و عرض سد ها، با افزایش عرض چاه

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

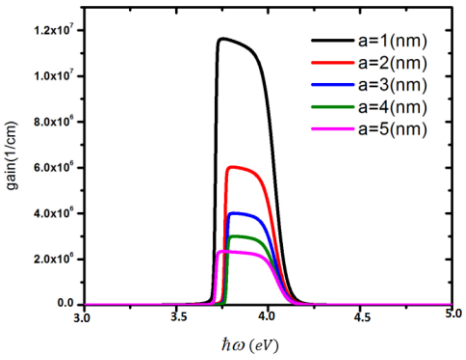
دوم همان‌طور که در شکل (۷و۸) می‌بینیم، کاهش بهره نوری را شاهد خواهیم بود.



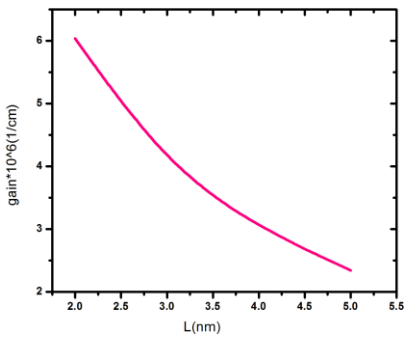
شکل۳: بهره نوری در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی به ازای عرض چاه‌های مختلف.



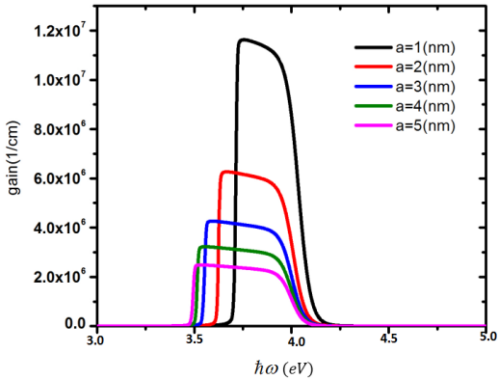
شکل۴: تغییرات بهره‌نوری با تغییر عرض چاه‌ها در چاه‌کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی



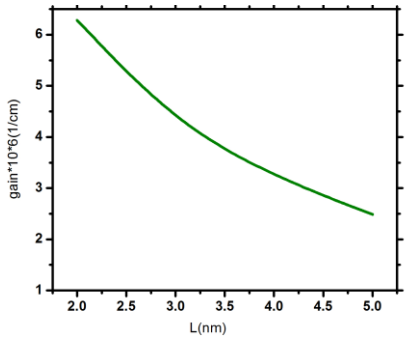
شکل۵: :بهره نوری در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی به ازای عرض سد میانی مختلف.



شکل۶: تغییرات بهره‌نوری با تغییر عرض سد در چاه‌کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی.



شکل۷: :بهره نوری در چاه کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی به ازای تغییر در عرض یک چاه.



شکل۸: تغییرات بهره‌نوری با تغییر عرض یکی از چاه‌ها در چاه‌کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌بررسی بهره‌نوری در لیزرهای چاه‌کوانتومی نامتقارن دوگانه نیتریدی پرداخته شده‌است. محاسبات نشان می‌دهد که تاثیر نوع ساختار بر روی بهره لیزری بسیار زیاد است به گونه‌ای که با افزایش پهنای چاه‌کوانتومی و افزایش پهنای سد وسط، بهره کاهش یافته و همچنین پهنای طیف نشری نیز افزایش می‌یابد.

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 AlGaN/AlN/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 AlGaN/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, *Effevt of inter- level relaxation and cavity length on double-* state Asaing perforvsnve of qusntuv dot Asaera**, Phsica E**, 39, 203-208,(2007).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]