اثرات پارامترهای ساختاری بر روی بهره نوری دیود های لیزری چاه کوانتومی چندگانه نیتریدی

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 چندگانه نیتریدی پرداخته می‌شود، میزان بهره‌نوری در ساختار چاه‌کوانتومی چندگانه با پارامترهای ساختاری متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌است. نمودار بهره نوری برای کسرمولی متفاوتی از آلومینیوم در لایه های سدی در محدوده ی ۰.۲ تا ۰.۸ و نیز تغییرات عرض چاه کوانتومی در محدوده ۱ تا ۵ نانومتر شبیه سازی شده‌است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد افزایش عرض چاه‌کوانتومی و همینطور افزایش سد منجر به کاهش بهره‌نوری می‌شود.

The Effects of Structural Parameters of GaN Based Asymmetric Multiple 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 multiple GaN asymmetric quantum well based laser diode has been investigated. The rate of optical gain in the structure of multiple quantum wells with different structural parameters is considered. The optical gain is obtained for different values of aluminum mole fraction (from 0.1 to 0.8) and variations of quantum well thickness from 1 nm to 5 nm. The results of our calculations show that increasing the width of the multiple quantum wells and increasing of the aluminum mole fraction will decrease the optical gain.

PACS No. 78.67

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 [2,6]. 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 خود به خودی و پیزوالکتریکی آنها می‌باشد[3].

ساختار و روش کار

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

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

الف) عرض سد را ثابت گرفته و عرض تمام چاه را از $0.1nm$ تا $5nm$ تغییر می‌دهیم. ب) عرض چاه‌ها و سد ها را ثابت گرفته و ارتفاع سد را از $0.1nm$ تا $0.8nm$ 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 چاه‌کوانتومی نامتقارن به صورت زیر بیان می شود :

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

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 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 خواهدبو[5]

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

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

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

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 :

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

R_1R_2، بازتابش در سطوح عقب و جلو، L طول کاواک، α_i ضریب اتلاف نوری، سرعت نور C 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:

$$g(\hbar w)=C_0\sum_{n,m}\left|I^{en}_{hm}\right|^2\int_0^\infty dE_t\rho_r^{2D}\left|\hat{e}\bullet P_{cv}\right|^2 \qquad (۵)$$

$$\frac{\frac{\gamma}{\pi}}{[E^{en}_{hm}+E_t-\hbar w]^2+\gamma^2}\times[f_c{}^n(E_t)-f_v{}^m(E_t)]$$

که در آن $C_0,\rho_r^{2D},I^{en}_{hm}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

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

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

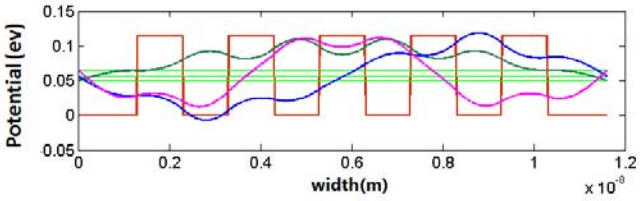
ϕ_n و g_m به ترتیب تابع موج الکترون و حفره می‌باشد.

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

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 $f_c - f_v = 0$.

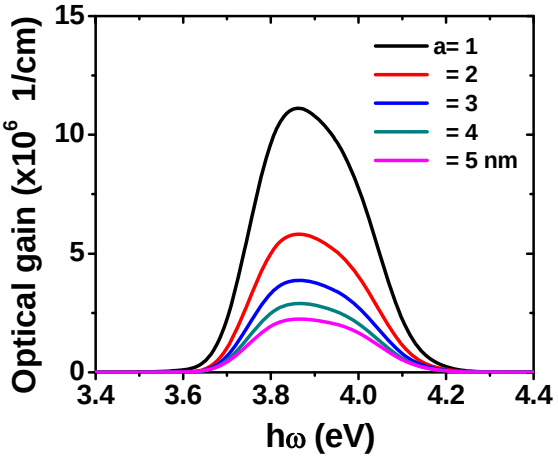
بررسی نتایج

ساختار مورد بررسی به ترتیب شامل پنج سد ازجنس $AlGaN$ با کسر مولی $x = 0.2$، چهار چاه از جنس GaN با ضخامت $1nm$، می‌باشد. شکل (۱).

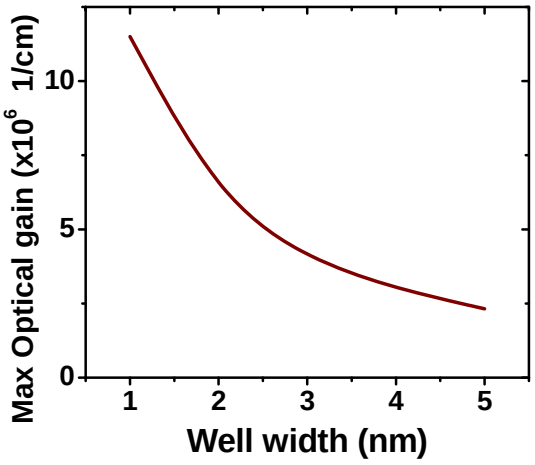


شکل۱: تابع موج و ترازهای انرژی برای چاه‌پتانسیل چندگانه برای حفره.

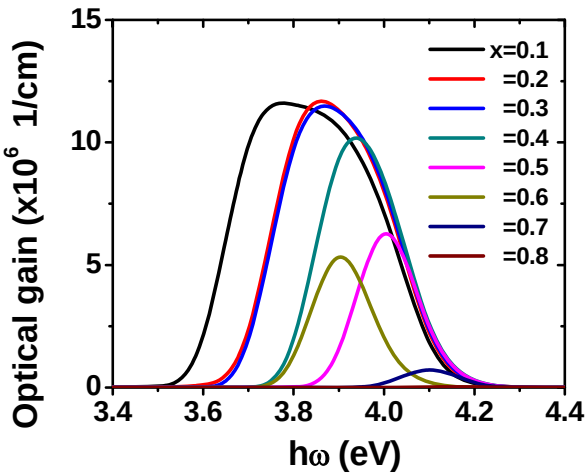
دربررسی قسمت(الف)مشاهده می‌شود با ثابت بودن عرض سد و افزایش عرض چاه، بهره‌نوری کاهش می‌یابد شکل(۲و۳). علت این کاهش را می‌توان این گونه توضیح داد که هر چه عرض چاه افزایش پیدا کند، ترازهای انرژی به سمت کف چاه نزدیک‌تر می‌شوند. در نتیجه گذارهای مجاز به سمت انرژی‌های کم‌تر و طول موج‌های بلندتر حرکت می‌کنند 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 ارتفاع سد را از $0.1nm$ تا $0.8nm$ تغییر می‌دهیم. با تغییر ارتفاع سدها، مشابه با تغییرات چاه‌ها، توابع موج و ترازهای انرژی تغییر و این اثر بهره نوری را کاهش خواهد داد. شکل(۴و۵).



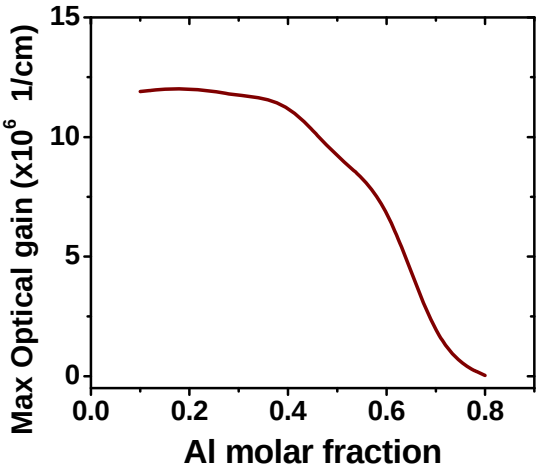
شکل۲: بهره نوری در چاه کوانتومی چندگانه نیتریدی به ازای عرض چاه‌های مختلف.



شکل۳: تغییرات بهره‌نوری با تغییر عرض چاه‌ها در چاه‌کوانتومی چندگانه نیتریدی



شکل۴: :بهره نوری در چاه کوانتومی چندگانه نیتریدی به ازای ارتفاع سدهای متفاوت.



شکل۵: تغییرات بهرهنوری با تغییر ارتفاع سد در چاهکوانتومی چندگانه نیتریدی بر حسب تغییرات مولاریته

نتیجه گیری

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

مرجعها

[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)

[6] A. Golestani, E. A. Milani, A. Asgari, Large Kerr coefficient induced by THz driven to intersubband of a GaN/AlGaN coupled quantum well nanostructure, *Journal of Modern Optics* **62** (7),(2015)