



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



بیشینه ضریب بهره نوری برای نقاط کوانتومی چند پوسته

ناصر زمانی^۱، علیرضا کشاورز^۲ و حمید نادگران^۱

^۱بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

^۲گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده - در این مقاله، بهره نوری در نقطه کوانتومی چند پوسته ای $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ محاسبه شده است. برای این منظور با استفاده از حل عددی معادله شرودینگر مقادیر ویژه انرژی و توابع موج با روش عددی رانگ-کوتا برای الکترون و حفره محاسبه شده است. نتایج برای بدست آوردن بیشینه ضریب بهره نوری در این نانوساختار مورد استفاده قرار گرفت. همچنین اثر پارامترهای هندسی و همچنین پارامترهای خارجی همچون دما و فشار روی بیشینه ضریب بهره نوری بررسی گردید. نتایج عددی به وضوح نشان می دهند که با افزایش پهنای چاه اول تا 68 \AA و کاهش پهنای چاه دوم و دما و فشار، بیشینه ضریب بهره نوری افزایش می یابد.

کلید واژه- بهره نوری، نقطه کوانتومی چند پوسته ای.

Maximum optical gain of multilayered spherical quantum dot

Naser Zamani¹, Alireza Keshavarz², and Hamid Nadgaran¹

¹Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

²Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz 71555-313, Iran

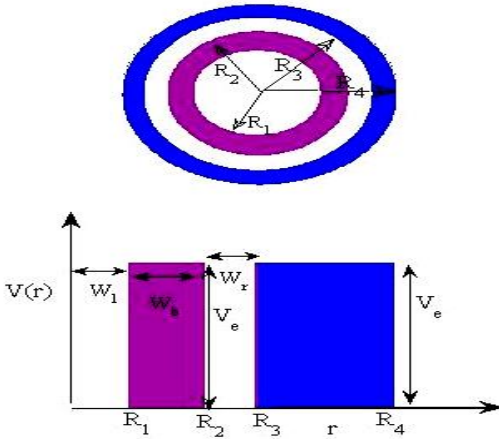
Abstract- In this paper, the optical gain in multilayered quantum dot is calculated for typical $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$. For this purpose, by using numerical solution of the Schrödinger equation is obtained the energy levels and their corresponding wave functions of electrons and holes. Results are used to obtain the maximum optical gain of this nano structure. The effects of geometrical parameter and external parameter such as hydrostatic pressure, and temperature on the maximum optical gain are investigated. Numerical results clearly show that by increasing of width of the first well 68 \AA and decreasing the width of second well, temperature and pressure the optical gain increases.

Keywords: Optical Gain, Multilayered Spherical Quantum Dot Laser.

که m_0 جرم موثر الکترون در فضای آزاد می‌باشد. $E_g(P, T)$ وابستگی انرژی باند به دما و فشار را نشان می‌دهد که به صورت زیر و واحد آن eV می‌باشد [۶]:

$$E_g(P, T) = [E_g(0, T) + 1.26 \times 10^{-2} P - 0.377 \times 10^{-5} P^2] \quad (4)$$

و $E_g(0, T) = 1.519 - 5.405 \times 10^{-4} T^2 / T + 204$ می‌باشد.



شکل ۱: نمایی از باند هدایت نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای

که $w_b = R_2 - R_1$ و $w_r = R_3 - R_2$ ، $w_l = R_1$ به ترتیب پهنای چاه چپ (داخلی)، راست (بیرونی) و پهنای سد پتانسیل می‌باشند و $V_{\text{eff}}(r)$ پتانسیل محدود نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq R_1 \\ V_{e(h)}, & R_1 < r < R_2 \\ 0, & R_2 \leq r \leq R_3 \\ V_{e(h)}, & R_3 < r < \infty \end{cases} \quad (5)$$

$V_{e(h)}$ ارتفاع سد پتانسیل برای الکترون (حفره) می‌باشد که توسط عبارت زیر تعریف می‌شود که برای الکترون به صورت $V_e(r) = Q_c \Delta E_g(x, T, P)$ و برای حفره برابر با $V_h(r) = (1 - Q_c) \Delta E_g(x, T, P)$ می‌باشد. $Q_c (= 0.67)$ ، x کسر مولی آلومینیوم در $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ و $\Delta E_g(x, T, P)$ اختلاف باند انرژی بین چاه کوانتومی و سد پتانسیل می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Delta E_g(x, P, T) = \Delta E_g(x) + D(x)P - G(x)T \quad (6)$$

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی امکان ساخت دستگاه‌های الکترواپتیکی جدید بر اساس سیستم‌های با بعد کم منجر به خواص متفاوت برای بررسی نیمرساناهای نانوساختار گردیده است [۱]. بنابراین این مواد به عنوان یک گزینه خوب برای طراحی و ساخت دستگاه‌های اپتوالکترونیکی و فوتونیکی هستند. در میان این نانوساختارها، نقاط کوانتومی به دلایل زیادی از جمله: پایداری در برابر دما، پهنای باند فرکانسی بالا، سرعت مدولاسیون بالا و توان خروجی بالا مورد استفاده در لیزرهای نیمرسانا هستند [۲]. از ویژگی‌های لیزر نقطه کوانتومی کاهش هزینه‌ها در بسیاری از کاربردها از جمله در انتقال اطلاعات می‌باشد. یک نوع از لیزرهای نقطه کوانتومی، لیزر نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای می‌باشد که باند هدایت این نوع لیزر در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه ضریب بهره در نیمرسانای نقاط کوانتومی یک پارامتر مهم و کلیدی می‌باشد در این مقاله قصد داریم وابستگی بهره نوری در این نوع ساختارها را بر اساس پارامترهای ساختار هندسی و همچون پارامترهای خارجی همچون دما و فشار هیدرواستاتیکی بدست آوریم.

۲- مبانی نظری

۲-۱- ساختار نواری

شکل ۱. ساختار باند هدایت نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای را نشان می‌دهد. برای محاسبه طیف انرژی و توابع موج الکترون و حفره در باند هدایت و ظرفیت، از معادله شرودینگر را در تقریب جرم موثر حل می‌کنیم

$$-\frac{\hbar^2}{2} \nabla \cdot \left(\frac{1}{m^*(r)} \nabla \psi_n(r) \right) + V_n(r) \psi_n(r) = E_n \psi_n(r) \quad (1)$$

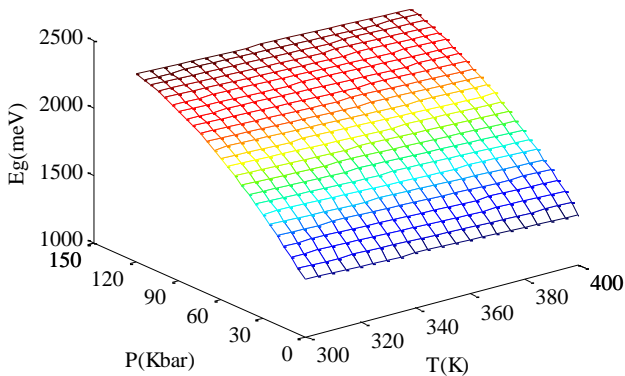
□

که $\psi_n(r)$ تابع پوش امین زیر باند برای الکترون ($r=e$) و برای حفره ($r=hh$) برای حفره سنگین، E_n انرژی زیر باند، $m^*(r)$ متناظر با جرم موثر در راستای x که به صورت زیر داده می‌شوند [۳]:

$$m_e^*(P, T) = \left[1 + \frac{15.02}{E_g(P, T)} + \frac{7.51}{E_g(P, T) + 0.341} \right]^{-1} m_0 \quad (2)$$

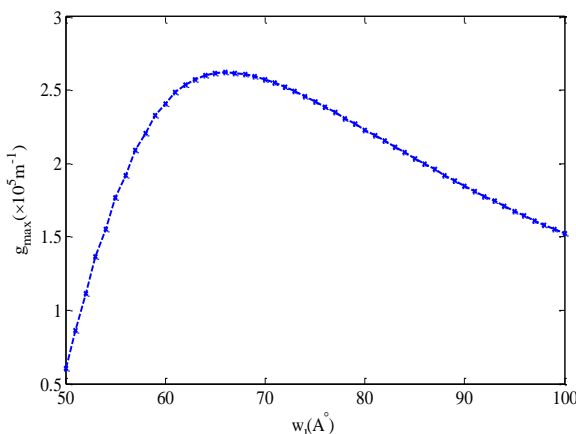
$$m_{hh}^*(P, T) = (0.45 - 0.1 \times 10^{-3} P - 3.55 \times 10^{-5} T) m_0 \quad (3)$$

همچنین پهنا سد پتانسیل به ترتیب برابر با $w_1 = 70 \text{ \AA}$ و $w_r = 30 \text{ \AA}$ و $w_b = 20 \text{ \AA}$ می باشند. شکل ۲ لحاظ فیزیکی نمایانگر این است که هر چه دما بیشتر شود گاف انرژی کمتر می شود و برعکس هر چه فشار بیشتر شود گاف انرژی بیشتر می شود.



شکل ۲: وابستگی گاف انرژی به دما و فشار

شکل ۳ بیشینه ضریب بهره نوری را برای پهناهای مختلف از w_1 ترسیم نموده ایم. همانطور که شکل نشان می دهد با افزایش پهناهای چاه داخلی تا 68 \AA بیشینه ضریب بهره نوری افزایش می یابد و بعد از آن کاهش می شود.



شکل ۳: وابستگی بیشینه ضریب بهره نوری به پهناهای چاه کوانتومی داخلی.

همچنین با افزایش پهناهای چاه بیرونی، ضریب بهره نوری کاهش می یابد که در شکل ۵ نشان داده شده است.

در رابطه (۶)، $\Delta E_g(x) = (1.155x + 0.37x^2)$

و $D(x) = [-(1.3 \times 10^{-3})x] \text{ eV/Kbar}$

می باشد. $G(x) = [-(1.11 \times 10^{-4})x] \text{ eV/K}$

۲-۲- بهره نوری

بهره نوری معمولاً به صورت کسری افزایش فوتون‌ها بر واحد طول تعریف می شود. با استفاده از تقریب ماتریس چگالی بهره نوری به صورت زیر معرفی می شود [۴]:

$$g(E) = \left[1 - \exp\left(\frac{E - \Delta F}{K_B T}\right) \right] \frac{\pi^2 c^2 \hbar^2}{n^2 E^2} r_{sp}(E), \quad (9)$$

به طوری که

$$r_{sp}(E) = \frac{ne^2 E}{\pi m_0^2 \epsilon_0 \hbar^2 c^3} \sum_{n_c, n_v} \iint \frac{Q^{n_c, n_v}}{4\pi^2 L} f_c f_v \times \frac{1}{\pi} \frac{\hbar/\tau}{(E_{eh} - E)^2 + (\hbar/\tau)^2} dk_x dk_y, \quad (10)$$

$r_{sp}(E)$ آهنگ گسیل خود بخودی، ΔF جدایی بین سطوح شبه فرمی، Q مجذور عنصر ماتریس انتقال نوری بین ترازهای مجاز، K_B ثابت بولتزمن، c سرعت نور در فضای آزاد، M_{nm} المان‌های گذار ماتریس نوری اندازه حرکت برای گذار بین n ام و m ام می باشد. f_v و f_c توابع توزیع فرمی دیراک می باشند، که به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

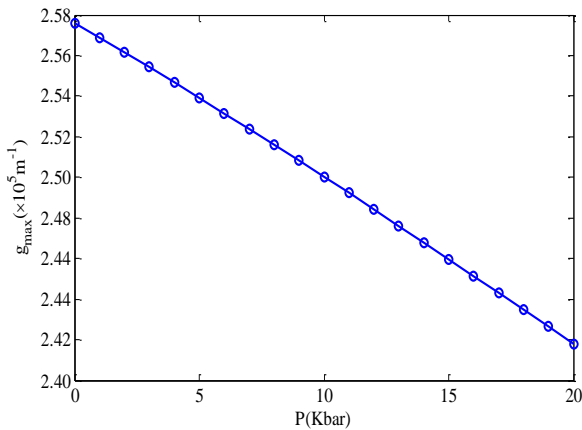
$$f_c = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{n_c} - E_{f_c}}{k_B T}\right)} \quad (11)$$

$$f_v = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{n_v} - E_{f_v}}{k_B T}\right)} \quad (12)$$

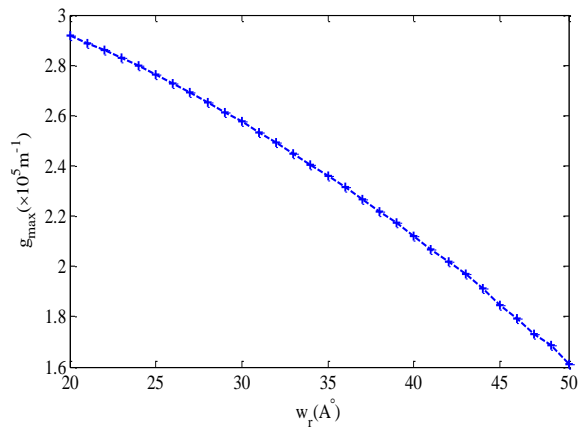
τ زمان واهلش بین باندهای می باشد. در این مقاله زمان واهلش را $\tau = 0.1 \text{ ps}$ در نظر می گیریم. انرژی گذار E_{eh} هم برابر با $E_{eh} = E_{n_c} + E_{n_v} + E_g$ می باشد.

۲-۳- نتایج عددی

با توجه به اینکه ضریب بهره نوری به شدت وابسته به پارامترهای هندسی و پارامترهای خارجی از جمله دما و فشار می باشد و با هر تغییر کوچک در ساختار یا اعمال خارجی بهره نوری تغییر می کند. پارامترهای فیزیکی که برای این کار از آن‌ها استفاده می کنیم به صورت زیر هستند: $P = 0 \text{ Kbar}$ ، $T = 300 \text{ K}$ ، $n_r = 3.2$ و چگالی حامل $N = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. پهناهای چاه داخلی و بیرونی و



شکل ۶: اندازه بیشینه ضریب بهره نوری در برابر افزایش دما.



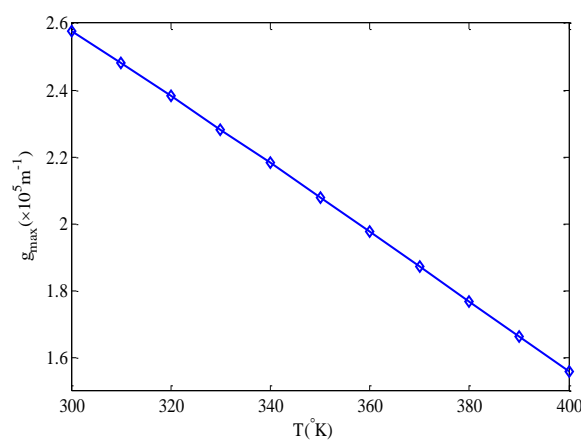
شکل ۴: وابستگی ضریب بهره نوری به پهنای چاه بیرونی

۳- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا با حل عددی معادله شرودینگر در مختصات کروی، مقادیر ویژه انرژی و توابع موج را برای یک نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای بدست آوردیم بعد از آن با توجه به اینکه یکی از مهمترین پارامترها در طراحی لیزر بهره نوری آن می باشد، بهره نوری را برای این ساختار بدست آوردیم و وابستگی بیشینه ضریب بهره نوری را به پارامتر های هندسی و همچنین پارامترهای خارجی از جمله دما و فشار بررسی کردیم که همانطور که از شکل های ۳، ۴، ۵ و ۶ مشاهده می شود بیشینه ضریب بهره نوری با افزایش پهنای چاه دوم و همچنین با افزایش دما و فشار کاهش پیدا می کند و برای پهنای چاه اول تا پهنای 68 \AA افزایشی و بعد از آن کاهش می یابد. گاف انرژی نیز به دما و فشار وابسته می باشد و مشاهده شد که با افزایش دما گاف انرژی کاهش می یابد و با افزایش فشار، گاف انرژی افزایش پیدا می کند.

مراجع

- [1] Harrison P., *Quantum Wells, Wires and Dots*, Wiley interscienc, 2005.
- [2] Rosencher E., Vinter B., *Optoelectronic*, Cambridge University Press, 2004.
- [3] Akbas H., Erdogan I., Akankan O., *Hydrostatic pressure effects on impurity states in GaAs/AlAs quantum wells Superlattices and Microstructures* 50 (2011) 80–89.
- [4] Fan W.J., Yoon S.F., *Investigation of Optical Gain of GaInNAs/GaAs Compressive- Strained Quantum Wells Physica B* 328. (2003) 264-270.



شکل ۵: بزرگی ضریب بهره نوری بر اساس فشار هیدرواستاتیکی.