

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 نانو ساختار 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 $68 \text{ \AA}$ 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 $68 \text{ \AA}$ and decreasing the width of second well, temperature and pressure the optical gain increases.

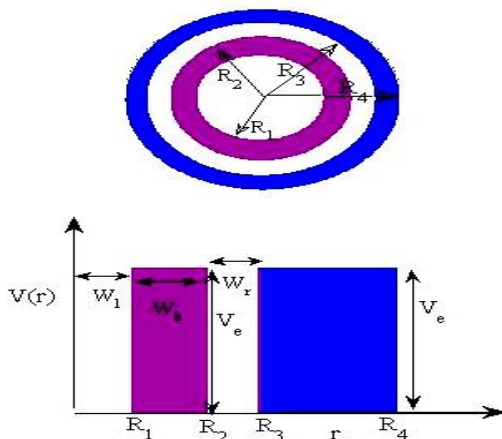
Keywords: Optical Gain, Multilayered Spherical Quantum Dot Laser.

۱- مقدمه

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

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

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



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 می باشند و $V_h(r)$ پتانسیل محدود نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

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

$V_{e(h)}$ 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 $Al_xGa_{1-x}As$ و $\Delta E_g(x, T, P)$ اختلاف باند انرژی بین چاه کوانتومی و سد پتانسیل می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

با پیشرفت تکنولوژی امکان ساخت دستگاه‌های الکترواپتیکی جدید بر اساس سیستم‌های با بعد کم منجر به خواص متفاوت برای بررسی نیم رساناهای 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 نیم رسانا هستند [۲]. از ویژگی‌های لیزر نقطه کوانتومی کاهش هزینه‌ها در بسیاری از کاربردها از جمله در انتقال اطلاعات می باشد. یک نوع از لیزرهای نقطه کوانتومی، لیزر نقطه کوانتوی کروی چند پوسته ای می باشد که باند هدایت این نوع لیزر در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه ضریب بهره در نیم رسانای 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 می دهد. برای محاسبه طیف انرژی و توابع موج الکترون و حفره در باند هدایت و ظرفیت، از معادله شرودینگر را در تقریب جرم موثر حل می کنیم

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

□

که $\psi_n(r)$ تابع پوش لامین 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]:

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

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

$$\Delta E_g(x) = (1.155x + 0.37x^2), \quad (۶)$$

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

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

۲-۲- بهره نوری

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

$$g(E) = \left[1 - \exp\left(\frac{E - \Delta F}{K_B T}\right) \right] \frac{\pi^2 c^2 \hbar^2}{n^2 E^2} r_{sp}(E), \quad (۹)$$

به طوری که

$$r_{sp}(E) = \frac{ne^2 E}{\pi m_0^2 \epsilon_0 \hbar^2 c^3} \sum_{n_c, n_v} \iint \frac{Q^{n_c, n_v}}{4\pi^2 L} f_c f_v \times \frac{1}{\pi} \frac{\hbar/\tau}{(E_{eh} - E)^2 + (\hbar/\tau)^2} dk_x dk_y, \quad (۱۰)$$

$r_{sp}(E)$ 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 می‌باشد. f_v و f_c توابع توزیع فرمی دیراک می‌باشند، که به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$f_c = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{n_c} - E_{f_c}}{k_B T}\right)} \quad (۱۱)$$

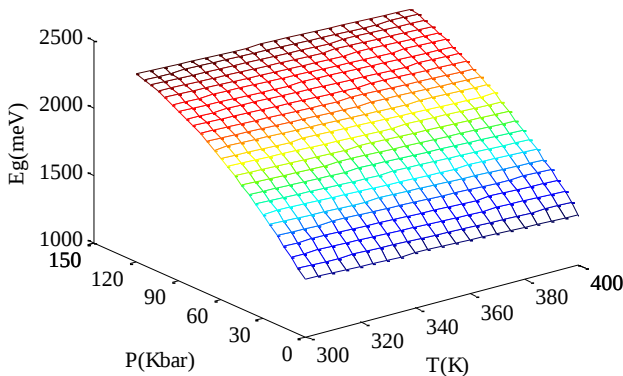
$$f_v = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{n_v} - E_{f_v}}{k_B T}\right)} \quad (۱۲)$$

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

۲-۳- نتایج عددی

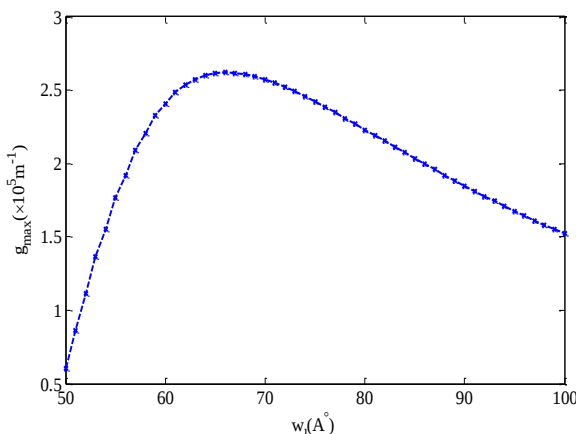
با توجه به اینکه ضریب بهره نوری به شدت وابسته به پارامترهای هندسی و پارامترهای خارجی از جمله دما و فشار می‌باشد و با هر تغییر کوچک در ساختار یا اعمال خارجی بهره نوری تغییر می‌کند. پارامترهای فیزیکی که برای این کار از آن‌ها استفاده می‌کنیم به صورت زیر هستند: $n_r = 3.2$ ، $T = 300^\circ \text{K}$ ، $P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

همچنین پهنای سد پتانسیل به ترتیب برابر با $w_l = 70 \text{ \AA}$ و $w_r = 30 \text{ \AA}$ و $w_b = 20 \text{ \AA}$ می‌باشند. شکل ۲ وابستگی گاف انرژی را به دما و فشار نشان می‌دهد. از لحاظ فیزیکی نمایانگر این است که هر چه دما بیشتر شود گاف انرژی کمتر می‌شود و برعکس هر چه فشار بیشتر شود گاف انرژی بیشتر می‌شود.



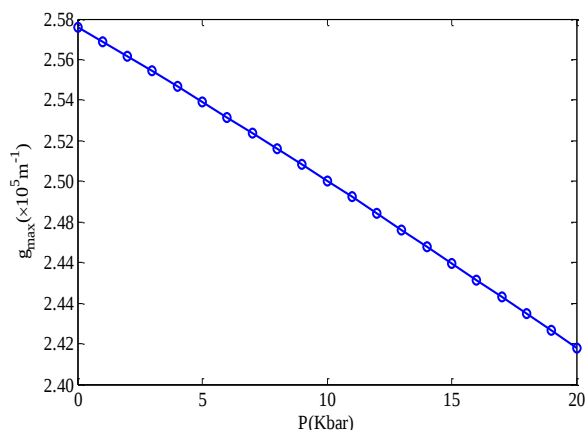
شکل ۲: وابستگی گاف انرژی به دما و فشار

شکل ۳ بیشینه ضریب بهره نوری را برای پهنای مختلف از w_l ترسیم نموده ایم. همانطور که شکل نشان می‌دهد با افزایش پهنای چاه داخلی تا $68 \text{ \AA}$ بیشینه ضریب بهره نوری افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌شود.

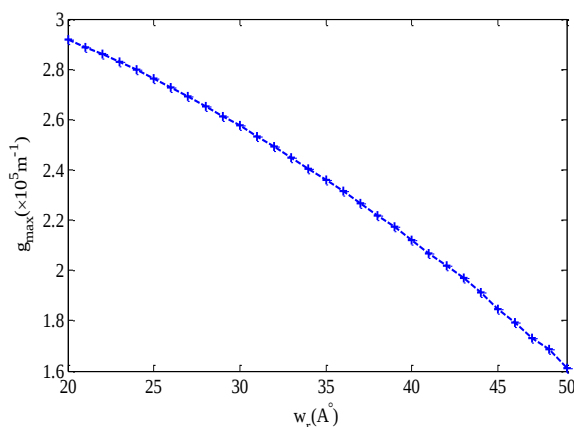


شکل ۳: وابستگی بیشینه ضریب بهره نوری به پهنای چاه کوانتومی داخلی.

همچنین با افزایش پهنای چاه بیرونی، ضریب بهره نوری کاهش می‌یابد که در شکل ۵ نشان داده شده است.



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



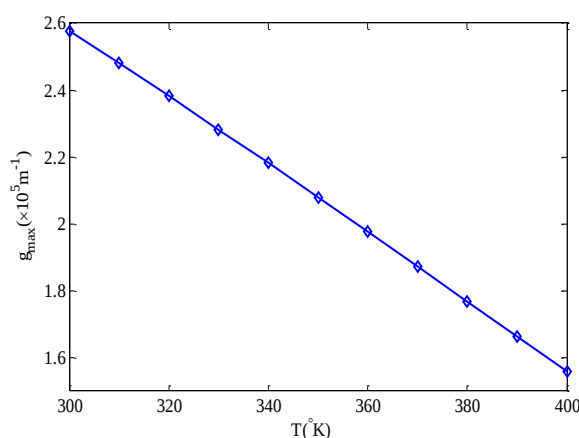
شکل ۴: وابستگی ضریب بهره نوری به پهنای چاه بیرونی

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 پارامترهای 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 $68 \text{ \AA}$ 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.