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]

[۱]بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

[۲]گروه 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 A^{o} ۶۸ 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 Zamani[1], Alireza Keshavarz[2], and Hamid Nadgaran[1]

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

[2]Department 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 A° and decreasing the width of second well, temperature and pressure the optical gain increases.

Keywords: Optical Gain, Multilayered Spherical Quantum Dot Laser.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

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

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 ویژگی های لیزر نقطه کوانتومی کاهش هزینه ها 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 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 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

$$-\frac{\hbar^2}{2}\vec{\nabla}.(\frac{1}{m^*(r)}\vec{\nabla}\psi_{rl}(r))+V_{rl}(r)\psi_{rl}(r)=E_{rl}\psi_{rl}(r) \qquad (۱)$$

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

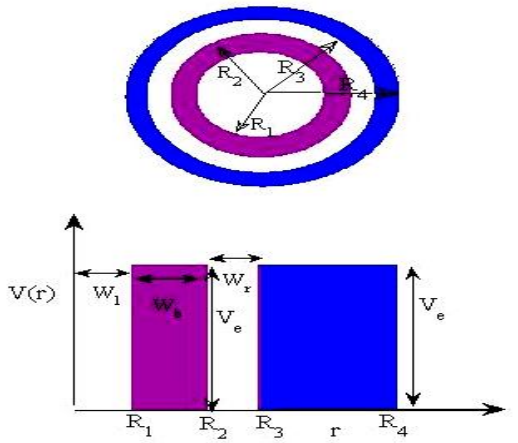
$$m_e^*(P,T)=\left[1+\frac{15.02}{E_g(P,T)}+\frac{7.51}{E_g(P,T)+0.341}\right]^{-1}m_0, \qquad (۲)$$

$$m_{hh}^*(P,T)=(0.45-0.1\times10^{-3}P-3.55\times10^{-5}T)m_0. \qquad (۳)$$

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]:

$$E_g(P,T)=\left[E_g(0,T)+1.26\times10^{-2}P-0.377\times10^{-5}P^2\right] \qquad (۴)$$

و $E_g(0,T)=1.519-5.405\times10^{-4}T^2/T+204$ می‌باشد.



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

که $w_1=R_1$ ، $w_r=R_3-R_2$ و $w_b=R_2-R_1$ به ترتیب پهنای چاه چپ(داخلی)، راست(بیرونی) و پهنای سد پتانسیل می باشند و $V_{rl}(r)$ پتانسیل محدود نقطه کوانتومی کروی چند پوسته ای می باشد که به صورت زیر تعریف می شود :

$$V(r)=\begin{cases}0, & 0\le r\le R_1\\ V_{e(h)}, & R_1<r<R_2\\ 0, & R_2\le r\le R_3\\ V_{e(h)}, & R_3<r<\infty\end{cases} \qquad (۵)$$

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

$$\Delta E_g(x,P,T)=\Delta E_g(x)+D(x)P-G(x)T \qquad (۶)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

در رابطه (۶)، $\Delta E_g(x)=(1.155x+0.37x^2)$،
و $D(x)=[-(1.3\times10^{-3})x]$ eV/Kbar
$G(x)=[-(1.11\times10^{-4})x]$ eV/K می‌باشد.

۲-۲- بهره نوری

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

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

به طوری که

$$r_{sp}(E)=\frac{ne^2E}{\pi m_0^2\varepsilon_0\hbar^2c^3}\sum_{n_c,n_v}\iint\frac{Q^{n_c,n_v}}{4\pi^2L}f_cf_v \times\frac{1}{\pi}\frac{\hbar/\tau}{(E_{eh}-E)^2+(\hbar/\tau)^2}dk_xdk_y, \qquad (۱۰)$$

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

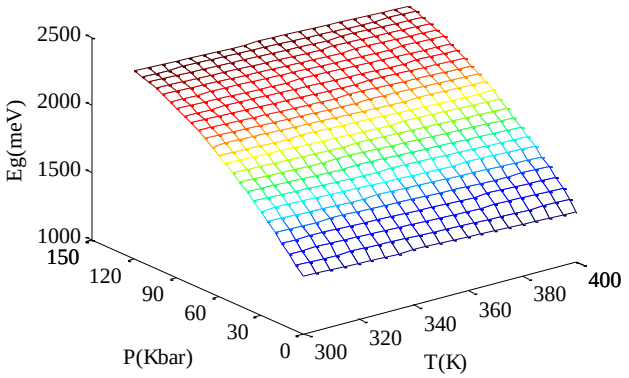
$$f_c=\frac{1}{1+exp\left(\frac{E_{n_c}-E_{f_c}}{k_BT}\right)} \qquad (۱۱)$$

$$f_v=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{E_{n_v}-E_{f_v}}{k_BT}\right)} \qquad (۱۲)$$

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

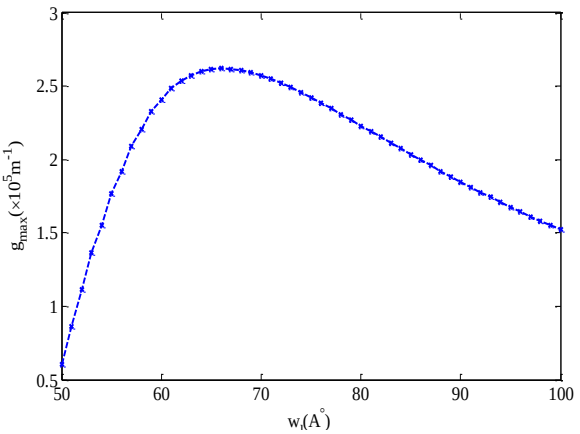
۲-۳- نتایج عددی

با توجه به اینکه ضریب بهره نوری به شدت وابسته به پارامترهای هندسی و پارامترهای خارجی از جمله دما و فشار 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 می‌کنیم به‌صورت زیر هستند: $n_r=3.2$ ، $T=300\,^{\circ}K$، $P=0\,Kbar$ و چگالی حامل $N=2\times10^{18}\,cm^{-3}$. پهنای چاه داخلی و بیرونی و همچنین پهنا سد پتانسیل به ترتیب برابر با $w_l=70\,A^{\circ}$ و $w_r=30\,\%$ و $w_b=20\,\%$ می باشند. شکل ۲ وابستگی گاف انرژی را به دما و فشار نشان می دهد. 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

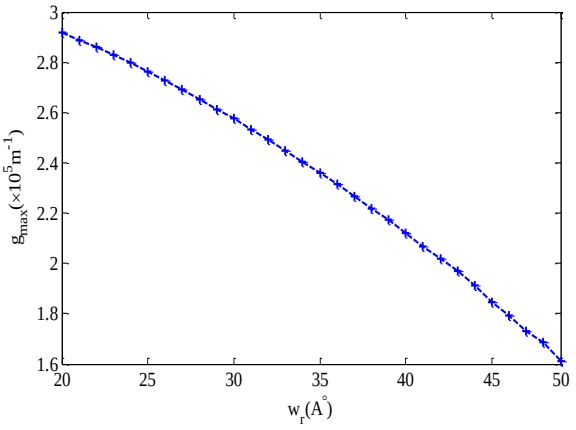
شکل ۳ بیشینه ضریب بهره نوری را برای پهناهای مختلف از w_l ترسیم نموده ایم. همانطور که شکل نشان می دهد با افزایش پهنای چاه داخلی تا ۶۸A° بیشینه ضریب بهره نوری افزایش می یابد و بعد از آن کاهشی می شود.



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

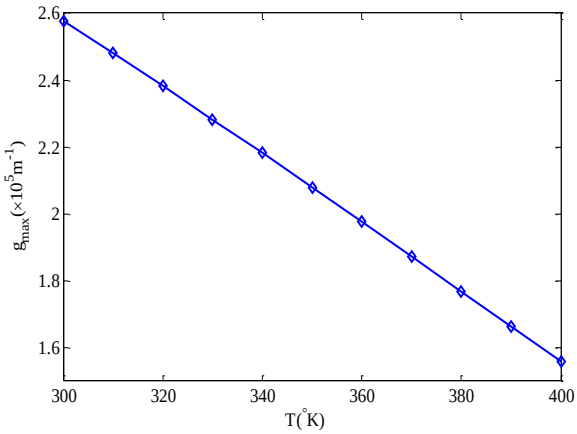
همچنین با افزایش پهنای چاه بیرونی، ضریب بهره نوری کاهش می یابد که در شکل ۵ نشان داده شده است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

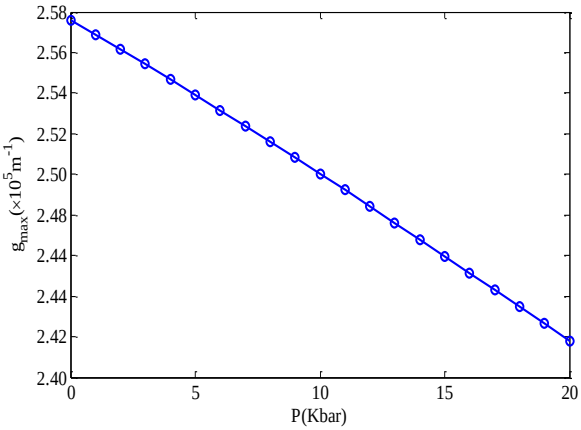


شکل ۴: وابستگی ضریب بهره نوری به پهنای چاه بیرونی

حال اگر بیشینه ضریب بهره نوری را بر اساس پارامترهای خارجی ازجمله دما و فشار ترسیم کنیم از شکل های ۶ و ۷ مشاهده می کنیم. همانطور که از رابطه (۴) و شکل(۵) مشاهده می‌شود از نظر فیزیکی با افزایش دما گاف انرژی و از اینرو ضریب بهره نوری کاهش می‌یابد هرچه دما کمتر باشد ضریب بهره نوری بیشتر می‌باشد. شکل ۶ نیز نمایانگر این می باشد که با افزایش فشار ضریب بهره نوری کاهش می یابد. باید به این نکته توجه داشت که با توجه به اینکه گاف انرژی همانطور که در شکل ۱ ترسیم شده است که با کاهش دما و افزایش فشار، افزایش می یابد، لذا، افزایش دما باعث می شود که بیشینه ضریب بهره نوری به سمت طول موج های بالاتر(Blue shift) و همچنین افزایش فشار باعث می شود به سمت طول موج های پایین تر(Red shift) شیفت پیدا کنند



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



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

۳- نتیجه‌گیری

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 می‌باشد، 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 شکل‌های ۳، ۴، ۵ و۶ مشاهده می‌شود بیشینه ضریب بهره نوری با افزایش پهنای چاه دوم و همچنین با افزایش دما و فشار کاهش پیدا می‌کند و برای پهنای چاه اول تا پهنای ۶۸ A° افزایشی و بعد از آن کاهش می یابد. گاف انرژی نیز به دما و فشار وابسته می‌باشد و مشاهده شد که با افزایش دما گاف انرژی کاهش می‌یابد و با افزایش فشار، گاف انرژی افزایش پیدا می‌کند.

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/AlAsquantum 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]