

بررسی خواص اپتیکی چاه کوانتومی مربعی مختل شده

علیرضا کشاورز^۱، فرزانه غیضانی ده شیخ^۱ و ناصر زمانی^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

^۲گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده - در این مقاله، خواص اپتیکی چاه کوانتومی مختل شده بررسی شده است. بدین منظور ابتدا معادله شرودینگر برای چاه پتانسیل مربعی عادی و چاه کوانتومی مربعی مختل شده (تغییر شکل یافته در لبه) به روش عددی حل و سپس با استفاده از توابع موج حاصل خواص اپتیکی از قبیل ضریب جذب کل و ضریب شکست محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد که شکل لبه چاه روی خواص اپتیکی چاه کوانتومی تاثیر دارد به طوری که قله ضریب جذب و شکست به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود. کلید واژه- اثر لبه، خواص اپتیکی، چاه کوانتومی، ضریب جذب، ضریب شکست.

Investigation of optical properties of disturbed square quantum well

Alireza Keshavarz¹, Farzaneh Gheizani Dehsheikh¹ and Naser Zamani²

¹Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

²Department of Physics, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper, the optical properties of disturbed square quantum well has been investigated. In this regard, the Schrödinger equation solved numerically for a normal square potential well and disturbed square potential well (deformed at the edges). Then by using the wave functions obtained optical properties such as the absorption coefficient and the refractive index has been calculated. Results show that the optical properties of disturbed square quantum well such as total absorption and refractive index are shifted to higher to energy.

Keywords: Edge effect, optical properties, quantum well, absorption coefficient, refractive index.

مقدمه

امروزه توانایی ساخت، کنترل و استفاده ماده در ابعاد نانومتری که به فن آوری نانو موسوم است، به دلیل خواص ویژه ای که دارند مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته اند. نانو ساختارها نوید بخش کارایی و پیشرفت زیادی در الکترونیک، صنعت، پزشکی و زمینه های دیگر می باشند. توسعه در این زمینه ها وابسته به پیشرفت مداوم در کوچک کردن اجزاء مرتبط به هر زمینه می باشد.

از سوی دیگر بدلیل کاربرد های چاه های کوانتومی در وسایل اپتیکی، مطالعات زیادی بر روی خواص اپتیکی از جمله ضریب جذب، تغییرات ضریب شکست و پذیرفتاری اپتیکی در گذار های اپتیکی انجام شده است. به عنوان مثال، بررسی خواص اپتیکی چاه های کوانتومی چند گانه و اثر تعداد چاه ها بر ضریب جذب و ضریب شکست مرتبه اول و مرتبه سوم غیر خطی اثر میدان الکتریکی بر ضریب جذب و ضریب شکست خطی و غیر خطی یک چاه کوانتومی نوع $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{GaAs}_{1-x}$ ، بررسی اثر میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر ضریب جذب و تغییرات ضریب شکست یک چاه کوانتومی دوگانه سهموی معکوس را می توان نام برد.

اهمیت سیستم های کوانتومی شامل چاه های کوانتومی و نانوساختارها به دلیل خواص الکترونیکی و اپتیکی آنها است. این خواص به شدت به شکل پتانسیل چاه کوانتومی وابسته است. در عمل چاه های کوانتومی خوش تعریف نیستند و اثر لبه مشهود است، هرچند در محاسبات نظری از آن چشم پوشی می شود. در این مقاله خواص اپتیکی را در چاه کوانتومی مربعی عادی و مختل شده بررسی و تاثیر اثر لبه چاه کوانتومی بر این خواص بررسی می شود.

مبانی نظری

برای بررسی خواص اپتیکی ابتدا به حل معادله شرودینگر (۱) به روش عددی برای پتانسیل چاه کوانتومی مربعی عادی و مختل شده پرداخته شده است. پهنای چاه a و ارتفاع آنها V_0 در نظر گرفته شده است (شکل ۱). لبه های چاه کوانتومی مختل شده سهمی شکل با شعاع انحنا s می باشند و طوری نسبت به لبه های چاه کوانتومی مربعی عادی انتخاب شده است که حاصل

بدون تغییر بماند. سپس ویژه مقادیر انرژی و توابع موج وابسته با استفاده از معادله شرودینگر حاکم محاسبه شده است [۱].

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad (1)$$

به کمک محاسبه ویژه مقادیر انرژی و توابع موج وابسته برای هر دو چاه کوانتومی، تغییرات ضریب شکست کل و همچنین ضریب جذب کل برای گذارهای نوری بین باندهای استفاده از روش ماتریس چگالی محاسبه شده است.

تغییرات ضریب شکست خطی و غیر خطی به صورت زیر به دست می آیند [۲-۴]:

$$\frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_r} = \frac{\sigma_v |M_{21}|^2}{2n_r^2 \epsilon_0} \left[\frac{E_{21} - \hbar\omega}{(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n^{(3)}(\omega)}{n_r} = & -\frac{\sigma_v}{4n_r^3 \epsilon_0} \times \frac{|M_{21}|^2 \mu c I}{[(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2]^2} \\ & \times [4(E_{21} - \hbar\omega)] |M_{21}|^2 \\ & - \frac{(M_{22} - M_{11})^2}{(E_{21})^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} \{ (E_{21} - \hbar\omega) \\ & \times [E_{21}(E_{21} - \hbar\omega) - (\hbar\Gamma_{12})^2] \\ & - (\hbar\Gamma_{12})^2 (2E_{21} - \hbar\omega) \} \end{aligned} \quad (3)$$

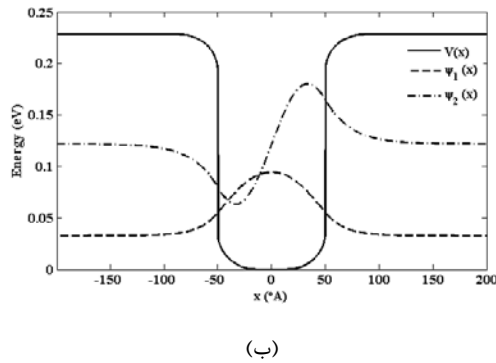
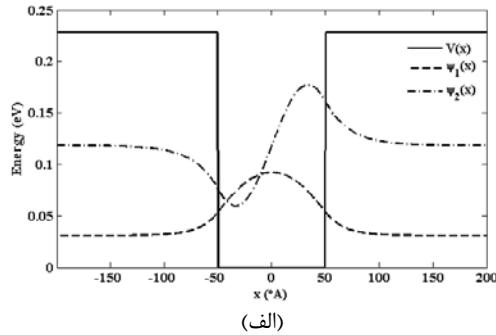
بنابراین تغییرات ضریب شکست کل را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\Delta n(\omega)}{n_r} = \frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_r} + \frac{\Delta n^{(3)}(\omega)}{n_r} \quad (4)$$

تغییرات ضریب جذب خطی و غیر خطی نیز به صورت زیر به دست می آیند:

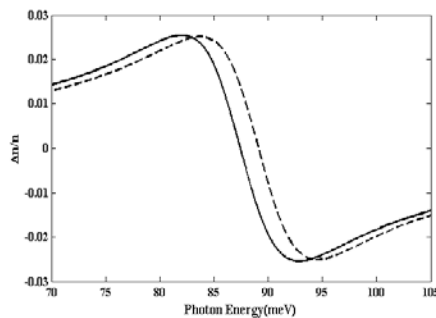
$$\alpha^1(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_R}} \frac{|M_{21}|^2 \sigma_v \hbar \Gamma_{12}}{(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} \quad (5)$$

$$\alpha^{(3)}(\omega, I) = -\omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_R}} \left(\frac{I}{2\epsilon_0 n_r c} \right)$$



شکل ۱. (الف) پتانسیل چاه مربعی عادی همراه با توابع موج اول و دوم آن و (ب) پتانسیل تغییر شکل یافته همراه با دو تابع موج اول و دوم آن.

در شکل های (۲) و (۳) تغییرات ضریب جذب کل و ضریب شکست کل برای چاه مربعی عادی و مختل شده با استفاده از توابع موج به دست آمده و روابط (۴) و (۷) ترسیم شده است. منحنی پیوسته مربوط به چاه کوانتومی مربعی عادی و منحنی خط چین مربوط به چاه کوانتومی مختل شده می باشد.



شکل ۲: تغییرات ضریب شکست کل برای چاه مربعی عادی (منحنی پیوسته) و مختل شده (منحنی خط چین).

در شکل (۲) تغییرات ضریب شکست کل را برای چاه مربعی عادی و مختل شده ترسیم شده است. با توجه به اینکه تغییرات ضریب شکست به اختلاف ترازهای انرژی

$$\times \frac{|M_{21}|^2 \sigma_v \hbar \Gamma_{12}}{\left[(E_{21} - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2 \right]^2} \times \left[4|M_{21}|^2 - \frac{|M_{22} - M_{11}|^2}{E_{21}^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2} \right] \times \left[3E_{21}^2 - 4E_{21}\hbar\omega + \hbar^2(\omega^2 - \Gamma_{12}^2) \right] \quad (6)$$

بنابراین تغییرات ضریب جذب کل نیز برابر است با:

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^{(1)}(\omega) + \alpha^{(3)}(\omega, I) \quad (7)$$

در این روابط σ_v چگالی حامل سیستم، μ نفوذپذیری مغناطیسی سیستم، ε_R بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی سیستم، $E_{21} = E_2 - E_1$ اختلاف انرژی بین دوتراز اول سیستم، ε_0 نفوذ پذیری الکتریکی در فضای آزاد، n ضریب شکست محیط، M_{ij} المان های ماتریس گشتاور دوقطبی بر بار الکترون می باشد که به صورت $M_{ij} = \langle \psi_i | qx | \psi_j \rangle$ ($i, j = 1, 2$) تعریف می شود، C سرعت نور در فضای آزاد و $I = 2\varepsilon_0 n_r c |E|^2$ شدت میدان الکترومغناطیسی می باشد.

پارامترهای مورد استفاده برای نیمرسانای چاه کوانتومی نوع GaAs/Al_xGaAs_{1-x} به این صورت می باشند [2]:

پهنای چاه $a = 100 \text{ \AA}$ ، شعاع انحنای لبه $s = 35 \text{ \AA}$ ، جرم موثر $m_{\text{AlGaAs}} = 0.0919 m_0$ ، $\sigma_v = 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ، $T_{12} = 0.2 \text{ ps}$ ، $n = 3.2$ ، $I = 0.4 \text{ MW/cm}^2$ ، $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ ، $\Gamma_{12} = \frac{1}{T_{12}}$ و $V_0 = 228 \text{ meV}$ (متناظر با غلظت $x = 0.30$ از آلومینیوم) [5].

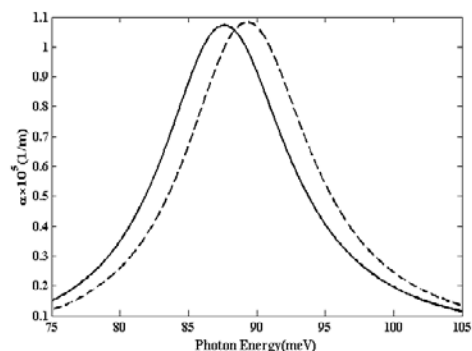
شبیه سازی

در این بخش تابع موج اول و دوم، تغییرات ضریب جذب کل و ضریب شکست کل برای چاه کوانتومی عادی (شکل ۱.الف) و مختل شده (شکل ۱.ب) برحسب انرژی فوتون فرودی با حل معادله شرودینگر به روش عددی ترسیم شده است.

مراجع

- [1] Gasiorowicz Stephen, "Quantum physics", University of Minnesota. John Wiley and Sons, Inc. New York. London. Sydney. Toronto
- [2] S. Ünlü, İ. Karabulut*, H. Şafak. Physica, linear and nonlinear intersubband optical absorption coefficients and refractive index changes in a quantum box with finite confining potential, E 33 (2006) 319-324.
- [3] Rosencher E., Bois P., Model system for optical nonlinearities: Asymmetric quantum well, Phys. Rev. B, 44(1991)11315-11315.
- [4] Ahn D., Chuang S.L., Calculation of linear and nonlinear intersubband optical absorption in a quantum well model with an applied electric field, IEEE J. Quant. Electron. 23, (1987)2196-2204
- [5] Keshavarz, A., N. Zamani. Optical properties of modified poschl-Teller Quantum Well with position-Dependent Mass. "J.Comput. Theor. Nanosci. 10, (2013) 2155-2160.

اول و دوم وابسته می باشد در حالت پتانسیل تغییر شکل یافته مشاهده می شود که اختلاف ترازها بیشتر از حالتی است که پتانسیل مربعی شکل باشد و باعث می شود که به سمت انرژی های بالاتر جابجا شود.



شکل ۳: تغییرات ضریب جذب کل برای دو چاه مربعی عادی (منحنی پیوسته) و مختل شده (منحنی خط چین).

شکل (۳) تغییرات ضریب جذب کل برای چاه مربعی عادی و مختل شده ترسیم شده است. همانطور که از شکل مشاهده می شود هنگامی که پتانسیل تغییر شکل پیدا می کند قله جذب به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود که ناشی از پهن شدگی لبه های چاه پتانسیل مربعی می باشد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اینکه در عمل لبه های چاه کوانتومی خوش تعریف نیستند در این مقاله با استفاده از حل عددی معادله شرودینگر، ویژه مقادیر انرژی و توابع موج وابسته برای چاه کوانتومی مربعی عادی و مختل شده محاسبه شده است. برای بررسی وجود اثر لبه با استفاده از داده های به دست آمده از حل عددی به بررسی خواص اپتیکی در دو چاه کوانتومی مربعی عادی و مختل شده پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که با توجه به وابستگی ضریب جذب و ضریب شکست به اختلاف تراز های انرژی ، هنگامی که پتانسیل تغییر شکل پیدا می کند و لبه های چاه پهن می شود قله جذب و شکست به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شود. لذا در محاسبات خواص الکترونیکی و اپتیکی نانو ساختارهای چاه کوانتومی اثر لبه نیز بعنوان یک عامل موثر باید در محاسبات مورد نظر قرار گیرد.