



## مطالعه‌ی امکان جذب تراهرتز در آرایه چاه‌های کوانتومی نیم‌رسانا

زهرا جاویدی<sup>۱</sup>، مهدی حسینی<sup>۱</sup>، محمدجواد کریمی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - در این کار طیف جذب خطی آرایه ای از چاه‌های کوانتومی با ضخامت‌های مختلف، در شدت‌های کم مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا با حل عددی معادله شرودینگر، ویژه مقادیر و ویژه توابع انرژی را به دست آورده سپس با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی ضریب جذب به دست آمده و اثرات تغییر پارامترهای چاه کوانتومی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه جذب در ناحیه تراهرتز است، همچنین امکان تنظیم بسامد جذب با تغییر ضخامت و ارتفاع چاه‌ها یا تعداد آن‌ها وجود دارد.

کلید واژه- خواص اپتیکی، چاه کوانتومی، ضریب جذب، قله بسامد.

### Study of tera-hertz absorption in semiconductor quantum wells array

Z. Javidi<sup>1</sup>, M. Hosseini<sup>1</sup>, M.J. Karimi<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

**Abstract-** In this work the linear absorption spectra for array of quantum wells with different thicknesses, in low intensity has been studied. The energy eigenvalues and eigenfunctions are calculated by solving the Schrödinger equation numerically. The absorption spectra are obtained using the density matrix approach and the effects of quantum well parameters have been studied. Results show that the absorption peak fell in the terahertz region, also it is possible to adjust the absorption peak frequency by changing the width and height of the wells or array numbers.

Keywords: optical properties, quantum well, absorption coefficient, frequency peak.

#### ۱- مقدمه

در چند سال گذشته، خواص اپتیکی غیر خطی، مانند یکسوسازهای اپتیکی، تولید هارمونیک دوم، تولید هارمونیک سوم، جذب نوری و تغییرات ضریب شکست در سیستم‌های نیم‌رسانای کم بعدی مانند چاه‌های کوانتومی، نقاط کوانتومی و دیگر نانوساختارها، توسط تعداد زیادی محقق مورد مطالعه قرار گرفته است [۹-۱].

چاه کوانتومی یکی از این سیستم‌های کوانتومی نیم‌رسانا است که در آن حرکت حامل‌های بار در یک راستا محدود و در دو راستای دیگر آزاد است. محدودیت کوانتومی یک بعدی در این ساختارها باعث گسستگی ترازهای انرژی شده و ویژگی‌های الکترونی و نوری جدیدی را تولید می‌نماید [۱۰-۱].

۱۲]. خواص الکترونی و نوری غیرمعمول این سازه‌ها طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی بالقوه برای دستگاه‌های نیم‌رسانای نوری، مانند لیزر مادون قرمز، آشکارسازهای عکس فرامادون قرمز، تعدیل‌کننده‌های اپتوالکترو و سوئیچ‌های نوری را ارائه می‌دهد [۱۳]. علاوه بر این به علت کاربرد گسترده چاه‌های کوانتومی نیم‌رسانا در ساخت قطعات الکترونی، اپتوالکترونی، لیزرهای نیم‌رسانا، آشکارسازهای مادون قرمز و... مطالعه ویژگی‌های نوری این سیستم‌های کوانتومی و تأثیر عوامل خارجی بر این ویژگی‌ها ضروری به نظر می‌رسد [۸، ۱۴-۱۶]. در این مقاله خواص اپتیکی چاه‌های کوانتومی چندگانه بررسی می‌شود.

## ۲- تئوری

سیستم چاه کوانتومی در نظر گرفته شده در شکل (۱) آورده شده است که دارای پتانسیل تناوبی به صورت زیر می باشد:

$$V(z) = \begin{cases} v_1 & \text{Type 1 material} \\ v_2 & \text{Type 2 material} \end{cases} \quad (1)$$

با حل عددی معادله شرودینگر مستقل از زمان یک بعدی زیر، ویژه مقادیر و ویژه توابع انرژی را بررسی نموده، سپس با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی، خواص اپتیکی از قبیل ضرایب جذب و تغییرات ضریب شکست به دست می آیند.

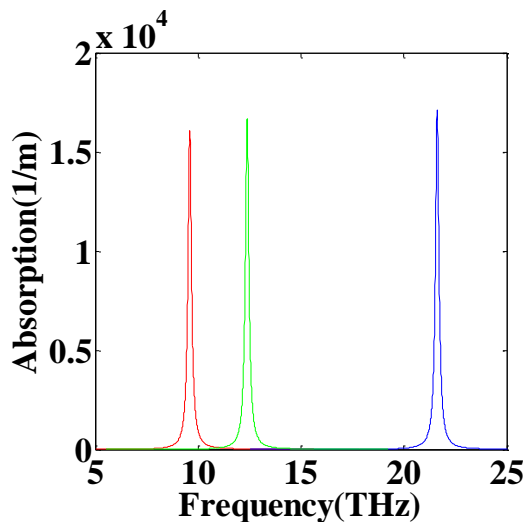
$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \varphi(z) + v(z)\varphi(z) = E\varphi(z), \quad (2)$$

که  $\varphi(z)$  ویژه تابع،  $E$  ویژه انرژی،  $m^*$  جرم مؤثر الکترون و  $v(z)$  تابع پتانسیل می باشد.

## ۳- نتایج و بحث

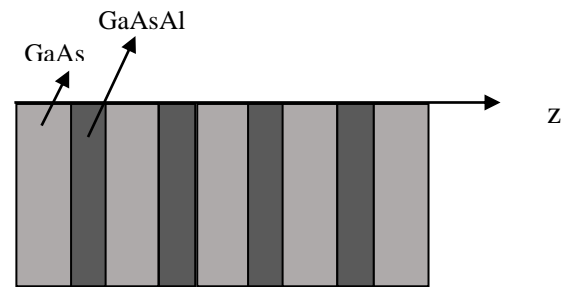
معادله شرودینگر به صورت عددی برای پتانسیل تناوبی داده شده رابطه (۱) حل شده است، سپس به بررسی طیف جذب در آرایه چاه های کوانتومی نیم رسانای نوع GaAs/GaAs<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub> پرداخته شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت: جرم مؤثر  $m_{GaAs}^* = 0.067m_0$  که  $m_0$  جرم الکترون آزاد است،  $\sigma_v = 3.0 \times 10^{22} m^{-3}$ ،  $\Gamma = 1/T_{12}$ ،  $T_{0.14} = 14ps$ ، از آنجا که اختلاف پتانسیل GaAs<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub> نسبت به GaAs 245.8mev کمتر می باشد [۱۷] پتانسیل یا ارتفاع چاه های فرد را  $v_1 = 0$  و پتانسیل چاه های زوج  $v_2 = -245.8mev$  می باشد.

شکل (۲) طیف جذب را به صورت تابعی از بسامد برای پارامترهای مختلف چاه های کوانتومی نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش ضخامت چاه ها و کاهش ارتفاع، بیشینه جذب به سمت بسامدهای کمتر می رود.



شکل (۲): طیف جذب به صورت تابعی از بسامد برای ۲۵ لایه برای منحنی قرمز ضخامت لایه فرد 25nm ضخامت لایه زوج 25nm ارتفاع 245.8mev. منحنی سبز برای 20 لایه، ضخامت لایه فرد 20nm ضخامت لایه زوج 20nm ارتفاع 245.8mev و منحنی آبی برای 25 لایه، ضخامت لایه فرد 10nm ضخامت لایه زوج 15nm ارتفاع 245.8mev.

شکل (۳) مقدار بیشینه ضریب جذب و بسامد بر حسب ضخامت مواد GaAs و GaAs<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub> برای ۲۵ لایه را نشان می دهد. شکل ۳ الف نشان می دهد که با افزایش ضخامت ضریب جذب افت می کند به طوری که برای ضخامت های بیشتر از 30nm، مقدار ضریب جذب به کمتر از  $1.5 \times 10^4 m^{-1}$  می رسد. شکل ۳ ب نشان می دهد که قله بسامد برای پارامترهای در نظر گرفته شده در محدوده تراهرتز است.



شکل ۱: آرایه چاه های کوانتومی به طور شماتیک

در رهیافت ماتریس چگالی فرض می شود که سیستم بوسیله یک میدان الکترومغناطیسی وابسته به زمان به صورت زیر برانگیخته می شود:

$$E(t) = E_0 \cos \omega t = \frac{1}{2} E_0 e^{i\omega t} + \frac{1}{2} E_0 e^{-i\omega t}, \quad (3)$$

که  $\omega$  بسامد میدان خارجی می باشد.

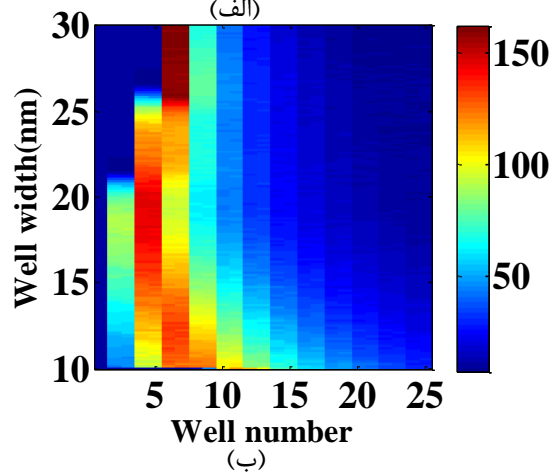
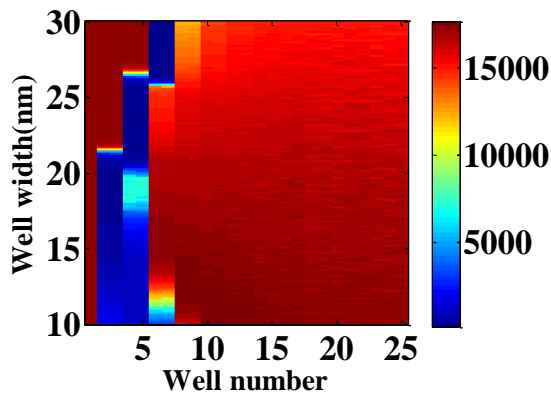
تغییرات ضریب جذب به صورت زیر به دست می آید [۱]:

$$\alpha^{(1)}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_R}} \frac{|M_{21}|^2 \sigma_v \hbar \Gamma_0}{(E_{21} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_0)^2}, \quad (4)$$

که  $\sigma$  چگالی حامل سیستم،  $\mu$  نفوذ پذیری الکتریکی سیستم،  $E_{21}$  اختلاف انرژی بین دو تراز اول سیستم،  $M_{ij}$  المان های ماتریس گشتاور دوقطبی بر بار الکترون می باشد که به صورت  $M_{ij} = |\langle \varphi_i | e z | \varphi_j \rangle|$  ( $i, j = 1, 2$ ) تعریف می شود و  $\epsilon_R$  بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی سیستم می باشد.

۱۵۰ تراهرتز می‌رسد که با افزایش تعداد چاه‌ها بسامد قله تا ۱۰ تراهرتز هم می‌رسد. بنابراین برای استفاده از چاه‌های کوانتومی در محدوده تراهرتز نیاز به استفاده از آرایه‌های چندتایی چاه‌های کوانتومی است.

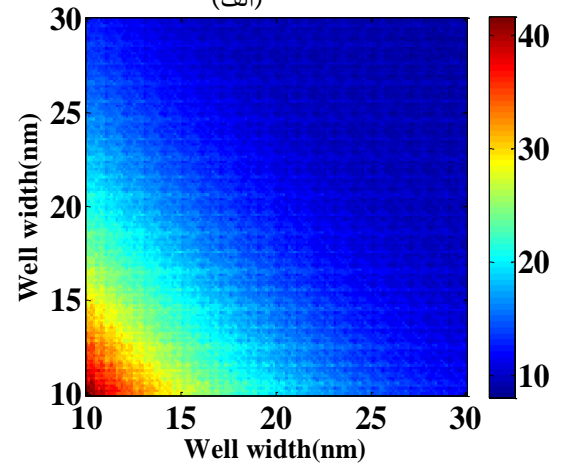
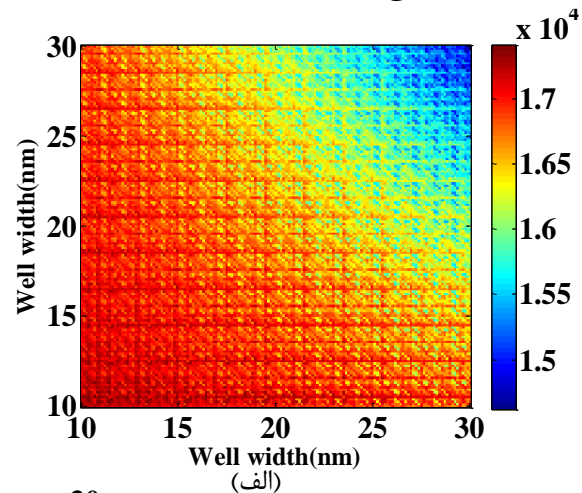
با توجه به اینکه چاه پتانسیل در اینجا به غلظت آلومینیم بستگی دارد و با تغییر غلظت آلومینیم می‌توان پتانسیل چاه را تغییر داد در شکل (۵) قله بسامد و بیشینه ضریب جذب بر حسب ارتفاع چاه و ضخامت ماده مورد نظر  $\text{GaAs}_x\text{Al}_{1-x}$  آورده شده است.



شکل ۴: (الف) بیشینه ضریب جذب و (ب) قله بسامد بر حسب ضخامت ماده  $\text{GaAs}_{0.7}\text{Al}_{0.3}$  و تعداد لایه‌ها، پتانسیل چاه  $245.8\text{meV}$  - و ضخامت ماده  $\text{GaAs}$  10 نانومتر.

شکل ۵ الف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع و افزایش ضخامت لایه، بیشینه جذب به پایین می‌آید به طوری که برای پتانسیل بیشتر از  $0.3\text{eV}$  و یا ضخامت بیشتر از  $30\text{nm}$  این افت چشمگیر است. در شکل ۵ ب مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع، قله بسامد به سمت بسامدهای بالاتر می‌رود همچنین در ارتفاع کم، قله بسامد در محدوده تراهرتز است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که وابستگی قله جذب به ارتفاع پتانسیل تنها در پتانسیل‌های کم محسوس است و با

معمولا به بسامدهای زیر 30 تراهرتز، محدوده تراهرتز گفته می‌شود [۱۸]. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، قله جذب به سمت بسامدهای پایین‌تر انتقال می‌یابد. البته باید این نکته را نیز در نظر گرفت که افزایش ضخامت باعث افت میزان جذب می‌شود که مطلوب نیست، بنابراین بایستی برای کاربرد مورد نظر بهینه‌سازی انجام گیرد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که قله بسامد تنها تابعی از مجموع ضخامت‌های دو ماده است و با افزایش مجموع ضخامت‌ها بیشتر از  $30\text{nm}$  می‌توان بسامد 10 تراهرتز را به دست آورد.

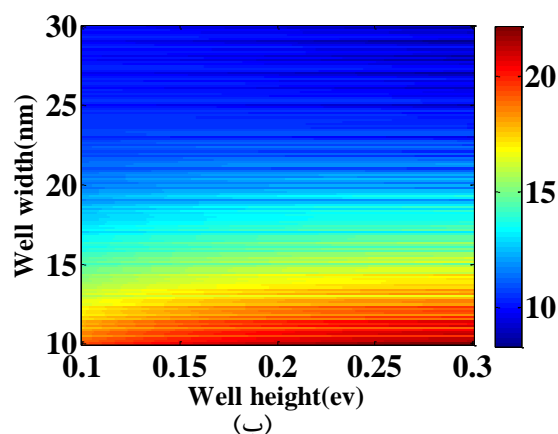
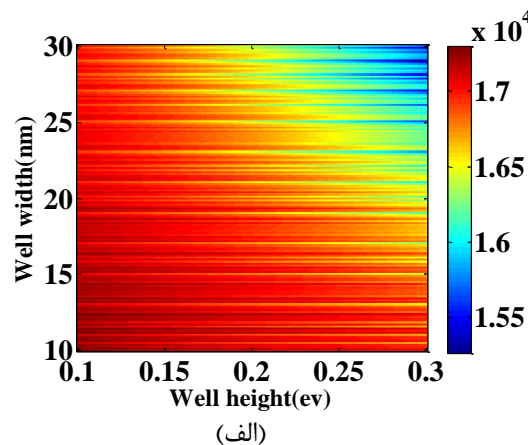


شکل ۳: (الف) بیشینه ضریب جذب و (ب) قله بسامد بر حسب ضخامت مواد  $\text{GaAs}_{0.7}\text{Al}_{0.3}$  و  $\text{GaAs}$  برای ۲۵ لایه و پتانسیل چاه  $245.8\text{meV}$  -

شکل (۴) بسامد و مقدار بیشینه ضریب جذب بر حسب ضخامت مواد  $\text{GaAs}_{0.7}\text{Al}_{0.3}$  و  $\text{GaAs}$  و تعداد چاه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۴ الف نشان می‌دهد که برای تعداد چاه‌های کم، میزان شدت بیشینه جذب بسیار پایین است به همین خاطر قابلیت کاربردی کمی دارد اما با افزایش تعداد چاه‌ها بیشتر از 10 بیشینه جذب به شدت بالا می‌رود. شکل ۴ ب نشان می‌دهد که برای تعداد چاه‌های کم بسامد قله جذب تا

- [3] E. Kasapoglu, H. Sari, I. Sökmen, Physica B 390 (2007) 216.  
 [4] F. Ungan, U. Yesilgul, S. Şakiroğlu, E. Kasapoglu, H. Sari, I. Sökmen, Phys. Lett. A 374 (2010) 2980.  
 [5] C.A. Duque, E. Kasapoglu, S. Şakiroğlu, H. Sari, I. Sökmen, Appl. Surf. Sci. 257 (2011) 2313.  
 [6] I. Karabulut, S. Baskoutas, J. Appl. Phys. 103 (2008) 073512.  
 [7] L. Lu, W. Xie, Phys. Scr. 84 (2011) 025703.  
 [8] Y. Yakar, B. Cakir, A.Ozmen, Opt. Commun. 283 (2010) 1795.  
 [9] V. Prasad, P. Silotia, Phys. Lett. A 375 (2011) 3910.  
 [10] A. Keshavarz, M.J. Karimi, Physics Letters A 374 (2010) 2675-2680.  
 [11] L. Zhang, Y.M. Chi, J.J. Shi, Phys. Lett. A 335 (2007) 256.  
 [12] B. Chen, K.X. Guo, R.Z. Wang, Y.B. Zheng, B. Li, Eur. Phys. J. B 66(2008) 227.  
 [13] S. Sakiroglu, Phys. Rev. B 30 (2016) 1650209.  
 [14] V. Prasad, P.Silotia, Phys. Lett. A 375 (2011) 3910.  
 [15] A. Ozmen, Y.Yakar, B.Cakir, U. Atav, Opt. Commun. 282 (2009) 3999.  
 [16] X.H. Qi, X.J. Kong, J.J. Lio, Phys. Rev. B 58 (1998) 10578.  
 [17] Zhen-Yan Deng, Jing-Kun Guo, Ting-Rong Lai, Phys. Rev. B 50, 5736 (1994).  
 [18] A.J. Fitzgerald, E. Berry, N.N. Zinovev, G C Walker, M.A. Smith, J.M. Chamberlain, Phys. Med. Biol. 47 (2002) R67-R84.

افزایش پتانسیل چاه به 0.2eV وابستگی تقریباً از بین می-رود.



شکل ۵: (الف) بیشینه ضریب جذب و (ب) قله بسامد بر حسب ضخامت ماده  $\text{GaAs}_{0.7}\text{Al}_{0.3}$  و ارتفاع چاه پتانسیل برای 25 لایه.

#### ۴- نتیجه گیری

طیف جذب برای آرایه ای از چاه های کوانتومی محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که بسامد جذب در ناحیه تراهرتز است و امکان تنظیم آن با تغییر ضخامت و تعداد چاه ها وجود دارد. بررسی های انجام شده برای تعداد چاه های کمتر از ۵ نشان می دهد که برای این تعداد چاه امکان بدست آمدن بسامد تراهرتز وجود ندارد در حالی که با افزایش تعداد چاه ها می توان به بسامد ۱۰ تراهرتز نیز رسید. علاوه براین افزایش ضخامت لایه ها باعث کاهش بسامد قله جذب می شود.

#### مراجع

- [1] Wu. Qingjie, Guo. Kangxian, Lio. Guanghui, wu. Jing-He, Physica B 410 (2013) 206-211.  
 [2] E. Kasapoglu, H. Sari, I. Sökmen, Superlatt. Microstruct. 29 (2001) 25.