بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

مطالعه‌ی امکان جذب تراهرتز در آرایه چاه‌های کوانتمی نیمرسانا

زهرا جاویدی[۱]، مهدی حسینی[۱]، محمدجواد کریمی[۱]،

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده – در این کار طیف جذب خطی آرایه ای از چاه‌های کوانتمی 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 به‌دست آورده سپس با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی ضریب جذب به‌دست آمده و اثرات تغییر پارامترهای چاه کوانتمی 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 کوانتمی، ضریب جذب، قله بسامد.

Study of tera-hertz absorption in semiconductor quantum wells array

Z. Javidi[1], M. Hosseini[1], M.J. Karimi[1],

[1]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 وتغییرات 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 ونوری جدیدی را تولید می‌نماید[۱۰-۱۲]. 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 سوئیچ-های نوری را ارائه می‌دهد[۱۳].

علاوه بر این به علت کاربرد گسترده چاه‌های کوانتومی نیم-رسانا 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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۲- تئوری

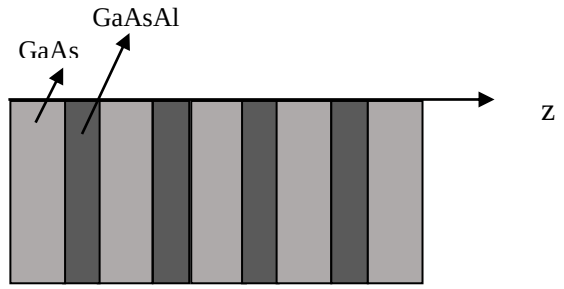
سیستم چاه کوانتمی در نظر گرفته شده در شکل (۱) آورده شده است که دارای پتانسیل تناوبی به صورت زیر می‌باشد:

$$V(z)=\begin{cases} v_1 & \text{Type 1 matterial} \\ v_2 & \text{Type 2 matterial} \end{cases} \qquad (۱)$$

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 به‌دست می‌آیند.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\frac{d^2}{dz^2}\varphi(z)+v(z)\varphi(z)=\mathrm{E}\varphi(z), \qquad (۲)$$

که φ(z) ویژه تابع، E ویژه انرژی، m^* جرم مؤثر الکترون و v(z) تابع پتانسیل می‌باشد.



شکل ۱: آرایه چاه های کوانتمی به‌طور شماتیک

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

$$\mathrm{E}(t)=\mathrm{E}_0\cos\omega t=\tilde{\mathrm{E}}e^{i\omega t}+\tilde{\mathrm{E}}e^{-i\omega t}, \qquad (۳)$$

که ω بسامد میدان خارجی می‌باشد.

تغییرات ضریب جذب به صورت زیر به‌دست می‌آید[۱]:

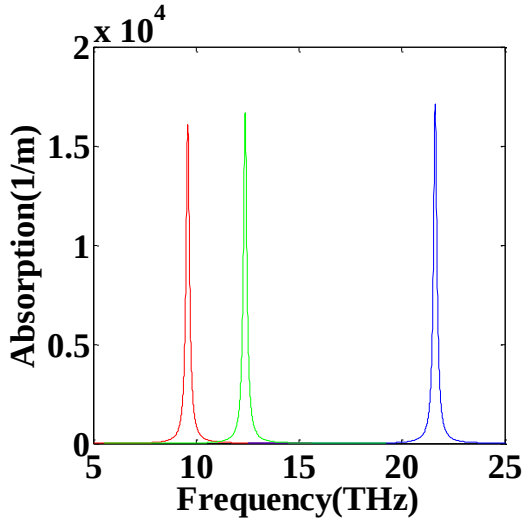
$$\alpha^{(1)}(\omega)=\omega\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_R}}\frac{|M_{21}|^2\sigma_v\hbar\Gamma_0}{(\mathrm{E}_{21}-\hbar\omega)^2+(\hbar\Gamma_0)^2}, \qquad (۴)$$

که σ چگالی حامل سیستم، μ نفوذ پذیری الکتریکی سیستم، E_{21} اختلاف انرژی بین دو تراز اول سیستم، M_{ij} المان‌های ماتریس گشتاور دوقطبی بر بار الکترون می‌باشد که به صورت $M_{ij}=|\langle\varphi_i|ez|\varphi_j\rangle|$ (i,j=1,2) تعریف می‌شود و ε_R بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی سیستم می‌باشد.

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 چاه‌های کوانتومی نیم‌رسانای نوع $GaAs/GaAs_{0.7}Al_{0.3}$ پرداخته شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت: جرم مؤثر $m^*_{GaAs}=0.067m_0$ که m_0 جرم الکترون آزاد است، $\sigma_v=3.0\times10^{22}m^{-3}$، $\Gamma_{12}=1/T_{12}$، $T_{12}=0.14ps$، از آنجا که اختلاف پتانسیل $GaAs_{0.7}Al_{0.3}$ 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 می‌باشد.

شکل (۲) طیف جذب را به صورت تابعی از بسامد برای پارامترهای مختلف چاه‌های کوانتمی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت چاه‌ها و کاهش ارتفاع، بیشینه جذب به سمت بسامدهای کمتر می‌رود.



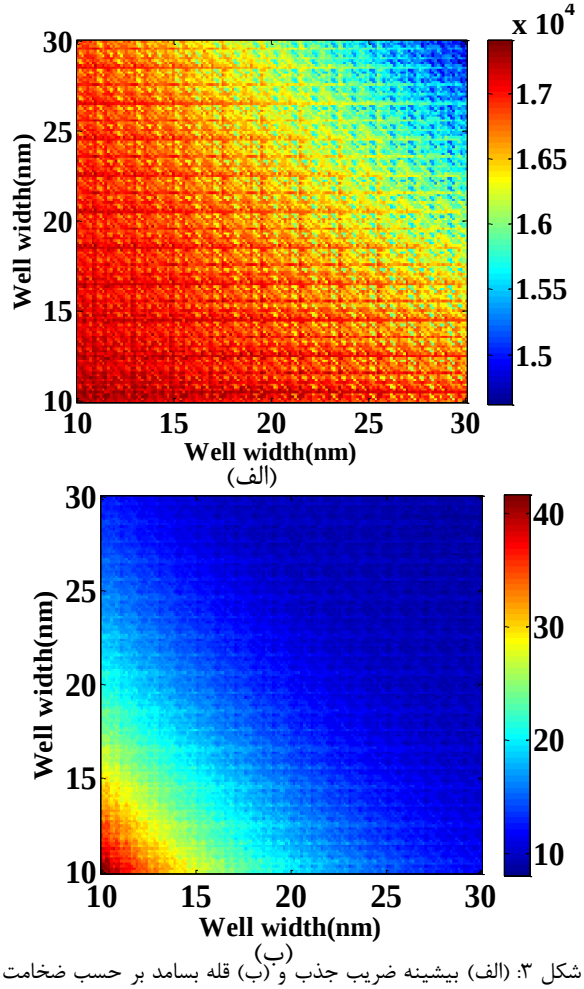
شکل (۲): طیف جذب به صورت تابعی از بسامد برای ۲۵ لایه برای منحنی قرمز ضخامت لایه فرد 25nm ضخامت لایه زوج 25nm ارتفاع 245.8mev. منحنی سبز برای 20 لایه، ضخامت لایه فرد 20nm ضخامت لایه زوج 20nm ارتفاع 245.8mev و منحنی آبی برای 25 لایه، ضخامت لایه فرد 10nm ضخامت لایه زوج 15nm ارتفاع 245.8mev.

شکل (۳) مقدار بیشینه ضریب جذب و بسامد بر حسب ضخامت مواد GaAs و $GaAs_{0.7}Al_{0.3}$ برای ۲۵ لایه را نشان می‌دهد. شکل ۳ الف نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ضریب جذب افت می‌کند به طوری‌که برای ضخامت‌های بیشتر از 30nm، مقدار ضریب جذب به کمتر از $1.5\times10^4m^{-1}$ می‌رسد. شکل ۳ ب نشان می‌دهد که قله بسامد برای پارامترهای در نظر گرفته شده در محدوده تراهرتز است.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

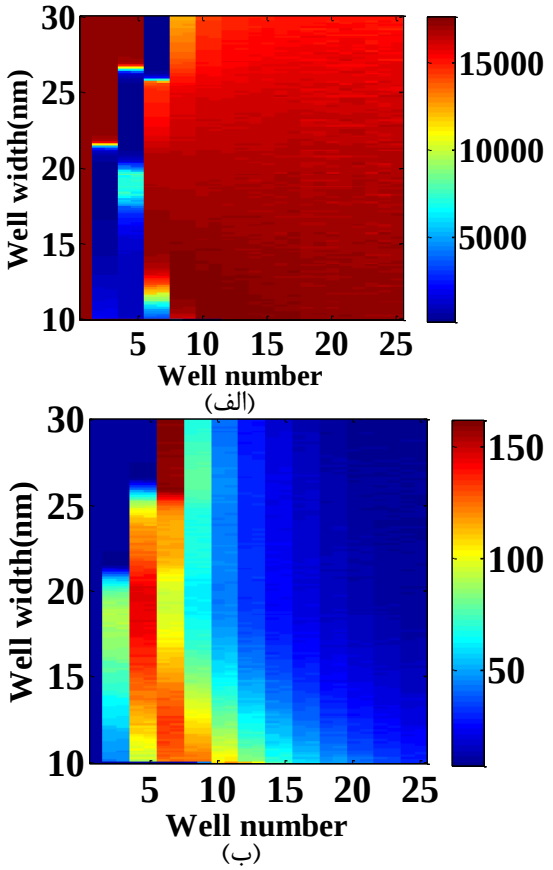
معمولا به بسامدهای زیر 30 تراهرتز، محدوده تراهرتز گفته می‌شود[۱۸]. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، قله جذب به سمت بسامدهای پایین‌تر انتقال می‌یابد. البته باید این نکته را نیز در نظر گرفت که افزایش ضخامت باعث افت میزان جذب می‌شود که مطلوب نیست، بنابراین بایستی برای کاربرد مورد نظر بهینه سازی انجام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



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

شکل (۴) بسامد و مقدار بیشینه ضریب جذب بر حسب ضخامت مواد GaAs و $GaAs_{0.7}Al_{0.3}$ و تعداد چاه‌ها را نشان می‌دهد، شکل ۴ الف نشان می‌دهد که برای تعداد چاه‌های کم، میزان شدت بیشینه جذب بسیار پایین است به‌همین 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 ۱۵۰ تراهرتز می‌رسد که با افزایش تعداد چاه‌ها بسامد قله تا ۱۰ تراهرتز هم می‌رسد. بنابراین برای استفاده از چاه‌های کوانتمی در محدوده تراهرتز نیاز به استفاده از آرایه‌های چندتایی چاه‌های کوانتمی 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 $GaAs_xAl_{1-x}$ آورده شده است.



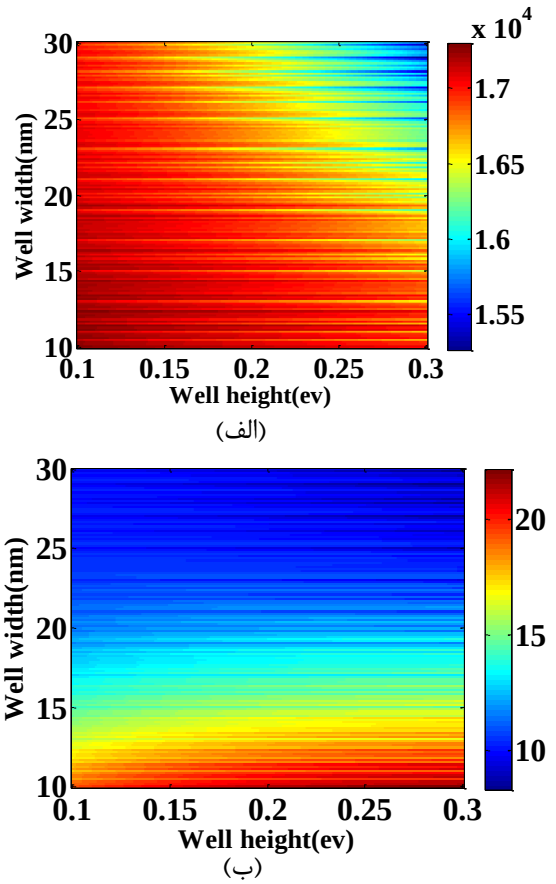
شکل ۴: (الف) بیشینه ضریب جذب و (ب) قله بسامد بر حسب ضخامت ماده $GaAs_{0.7}Al_{0.3}$ و تعداد لایه‌ها، پتانسیل چاه 245.8mev- و ضخامت ماده GaAs 10 نانومتر.

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 0.3eV و یا ضخامت بیشتر از 30nm 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 پتانسیل های کم محسوس است و با

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

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



(الف)

(ب)

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

۴- نتیجه‌گیری

طیف جذب برای آرایه ای از چاه های کوانتمی محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بسامد جذب در ناحیه تراهرتز است و امکان تنظیم آن با تغییر ضخامت وتعداد چاه‌ها وجود دارد. بررسی‌های انجام شده برای تعداد چاه‌های کمتر از ۵ نشان می‌دهد 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 می‌شود.

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.
[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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]