بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

مقایسه‌ی ترازهای انرژی، توابع موج، زمان گذار و جذب خطی بین زیرباندی یک نقطه‌ی کوانتومی هرمی-شکل InAs/GaAs با نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی (DWELL) هرمی-شکل $InAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$

محمدرضا شاهزاده و محمد صبائیان

بخش فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

چکیده – در این کار با استفاده از تقریب جرم موثر برای الکترون در باند رسانش یک نقطه‌ی کوانتومی و الکترون در باند رسانش یک ساختار نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی، ترازهای انرژی، تابع موج، زمان گذار و جذب خطی محاسبه و مقایسه شد. محاسبات نشان-دهنده‌ی جابجایی زمان گذار و همچنین جذب خطی در این دو ساختار نسبت به همدیگر و در توافق با داده‌های تجربی است.

کلید واژه: جذب خطی، زمان گذار، گذار بین زیرباندی، نقطه‌ی کوانتومی، نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی.

Comparison of intersubband eigen-energies, envelop functions, transition lifetime, and linear absorption between pyramid-shaped InAs/GaAs quantum dot and pyramid-shaped $InAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ Quantum Dot-in-a-Well (DWELL)

Mohammad Sabaeian and Mohammadreza Shahzadeh

Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

Abstract-In this work, Schrodinger equation was solved in the framework of effective mass approximation for an electron in conduction band of InAs/GaAs quantum dot and $InAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ Quantum Dot-in-a-Well structure (DWELL). Eigen-energies, envelop functions, transition lifetime and linear absorption were calculated and compared for both structures. A shift in transition lifetime as well as linear absorption was noticed between the structures and in accordance with experimental results.

Keywords:Linear Absorption, Transition Lifetime, Intersubband Transition, Quantum Dot, Quantum Dot-in-a-Well (DWELL).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]

۱-مقدمه

با معرفی آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ی کوانتومی(QDIP)[1] در سال ۱۹۹۶ [۱]، توجه بسیاری را نسبت به آشکارسازهای فروسرخ چاه کوانتومی به خود جلب کردند [۲]. آشکارسازهای QDIP به دلیل محدوده‌ی طول موجی آشکارسازی $3-25\mu m$ از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند [۳]. یکی از ساختارهای مورد استفاده برای این نوع آشکارسازی، ساختار نقطه‌ی کوانتومی درون چاه کوانتومی (DWELL) [2] است [۴] که در آن با استفاده از شیوه‌ی رشد MBE [3] یا MOCVD [4]، نقطه‌ی کوانتومی InAs در درون چاه کوانتومی InGaAs در بستر GaAs رشد می‌کند [۵, ۶]. از ساختارهای DWELL به عنوان لیزر $1.3\mu m$ نیز استفاده می‌شود [۷] که در آن از گذارهای بین زیر باندی[5] استفاده می‌شود [۵]. در این ساختارها، انرژی تراز پایه‌ی نقطه‌ی کوانتومی نسبت به لبه‌ی ترازهای انرژی GaAs اندکی پایین‌تر می‌آید و با تغییر ضخامت و نسبت آلایش (x) در $In_xGa_{1-x}As$، ترازهای انرژی برانگیخته تغییر می‌کنند و به این ترتیب می‌توان طول موج را تنظیم کرد [۶].

"وی" و همکارانش با تغییر ساختار DWELL از طریق وارد کردن لایه‌های بسیار نازک GaAs یا AlGaAs در نقطه‌ی کوانتومی InAs، نورافشانی[6] را افزایش و پهنای طیفی آن را کاهش دادند [۴]. "چن" و همکارانش افزایش نورافشانی را از طریق وارد کردن InGaAs برای نقاط کوانتومی InAs انجام دادند که با توجه به کاهش عدم تطبیق ثابت شبکه بین مواد، کرنش و نقص‌های ناشی از آن کاهش پیدا کردند [۸]. "باروی" و همکارانش با استفاده از پدیده‌ی کوانتومی تونل‌زنی تشدیدی در ساختارهای DWELL، جریان تاریک را کاهش دادند و همزمان پارامتر تشخیص[7] را در آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ی کوانتومی و چاه کوانتومی افزایش دادند [۹]. در کار حاضر، با در نظر گرفتن یک ساختار نقطه‌ی کوانتومی در ماتریس و یک نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی (DWELL) جابجایی زمان گذار و جذب خطی را محاسبه و مقایسه می‌کنیم. نتایج حاصل از مقایسه بین دو ساختار با داده‌های تجربی در توافق است.

۲-تئوری و روش

شکل (۱) ساختار نقطه‌ی کوانتومی InAs در ماتریس GaAs و شکل (۲) ساختار DWELL را همراه با ابعاد نشان می‌دهد [۷]. توابع‌موج و ویژه انرژی‌ها از طریق حل معادله‌ی شرودینگر به دست می‌آیند:

$$-\frac{h}{8p^2}\nabla\cdot\frac{1}{m_e(r)}\nabla\Upsilon(\vec{r})+V(\vec{r})\Upsilon(\vec{r})=E\Upsilon(\vec{r})$$

که در آن h ثابت پلانک، m_e جرم الکترون و Υ تابع‌موج است. با استفاده از تقریب جرم موثر برای گذارهای بین زیربانده‌ی تک الکترون در باند رسانش [۱۰]، برای نقطه‌ی کوانتومی $InAs$ بر روی زیرلایه‌ی $GaAs$ مقادیر پتانسیل درون و خارج نقطه‌ی کوانتومی به ترتیب $V=0$ و $V=0.854eV$ [۱۱] و جرم موثر الکترون درون و خارج از نقطه‌ی کوانتومی به ترتیب $0.025m_e$ و $0.071m_e$ [۱۲] در نظر گرفته شد. همچنین برای ساختار DWELL مقدار پتانسیل برای نقطه‌ی کوانتومی $InAs$، چاه کوانتومی $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ و بستر $GaAs$ به ترتیب $V=0$، $V=0.680ev$ و $V=0.854ev$ [۱۱] و جرم موثر الکترون به ترتیب برابر با $0.025m_e$، $0.0591m_e$ و $0.071m_e$ [۱۲] در نظر گرفته شد. در شکل‌های (۱) و (۲)، برای مرزهای بالا و پایین شرط $\Upsilon=0$، برای مرزهای مشترک درون ساختار، شرط $\mathbf{n}.(\Upsilon/m_e)_{Inside}=\mathbf{n}.(\Upsilon/m_e)_{Outside}$ و برای سایر مرزها شرط $\mathbf{n}.(\Upsilon)=0$ اعمال شد. نمودار چاه پتانسیل برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی و الکترون نقطه‌ی کوانتومی در چاه، در شکل ۳ نشان داده شده است. با حل معادله‌ی شرودینگر و به دست آمدن توابع موج، دوقطبی‌های گذار برای الکترون از رابطه‌ی $M_{if}=\left|\langle\Psi_f|-ez|\Psi_i\rangle\right|$ به دست آیند که در آن i و f به ترتیب حالت ابتدایی و نهایی هستند [۱۳]. با محاسبه‌ی عناصر دوقطبی گذار، آهنگ گذار W و زمان گذار τ به شکل زیر بدست می‌آیند [۱۳]:

$$W=\frac{1}{\tau}=\frac{\omega^3n^3}{3\pi c^3\left(h/2\pi\right)\varepsilon_0}\left|M_{if}\right|^2$$

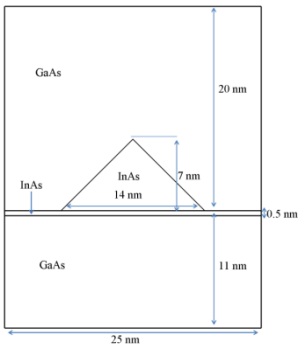
[1] Quantum Dot Infrared Photo-Detector
[2] Dot-in-a-Well Structure
[3] Molecular Beam Epitaxy
[4] Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
[5] Intersubband Transitions
[6] Photoluminescence
[7] Detectivity

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]

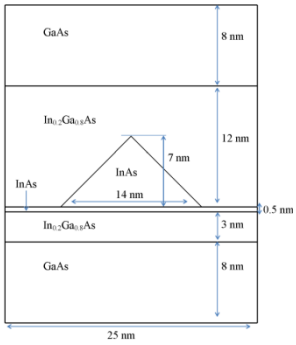
که در آن ω فرکانس گذار، n ضریب شکست، c سرعت نور و ε_0 ضریب گذردهی خلا است [۱۰]. با فرض یک میدان الکتریکی تکفام و قطبیده که در جهت محور z منتشر می‌شود، $\tilde{E}(z,t) = E_0 \hat{i} e^{i(kz-wt)} + C.C,$ که در آن $k = Nw/c$ و $N = n + in_i$، جذب خطی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۰, ۱۴]:

$$a = \frac{2n_i w}{c} = w\sqrt{\frac{m}{e_R}}\,\mathrm{Im}\left[e_0 c^{(1)}(w)\right]$$

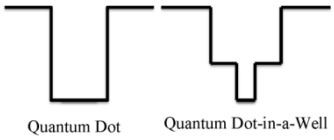
که در آن $c^{(1)} = \frac{s}{\hbar}\frac{|M_{21}|^2}{w_{21} - w - ig_{21}}$ پذیرفتاری الکتریکی مرتبه اول، s چگالی حامل‌های بار و g_{21} آهنگ افت است. این پارامترها برابر با $s = 3\times 10^{22}\ m^{-3}$ و $g_{21} = 5\ ps^{-1}$ در نظر گرفته شدند [۱۰].



شکل ۱- نمای دو بعدی ساختار و ابعاد نقطه‌ی کوانتومی $InAs/GaAs$ شبیه‌سازی شده.



شکل ۲- نمای دو بعدی ساختار و ابعاد DWELL شبیه‌سازی شده.

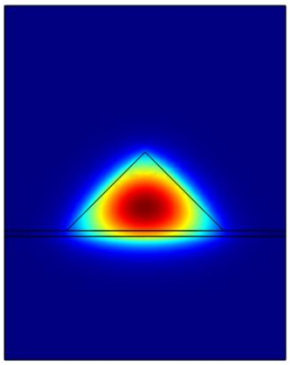


شکل ۳- مقایسه‌ی چاه پتانسیل برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی (سمت چپ) و الکترون نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی (سمت راست).

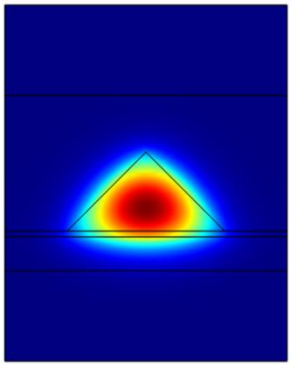
۳-نتایج و بحث

با محاسبه‌ی انرژی حالت پایه و اولین حالت برانگیخته در دو ساختار نقطه‌ی کوانتومی و ساختار DWELL، جابجایی نسبی طول موج گذار از اولین حالت برانگیخته به حالت پایه $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{Dot}} = \frac{\lambda_{Dot} - \lambda_{DWELL}}{\lambda_{Dot}}$ بین دو ساختار، 3.1% بدست آمد.

در شکل ۴ تابع موج در حالت پایه نقطه‌ی کوانتومی و در شکل ۵ برای ساختار DWELL نشان داده شده است.



شکل ۴- تابع موج حالت پایه برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی.

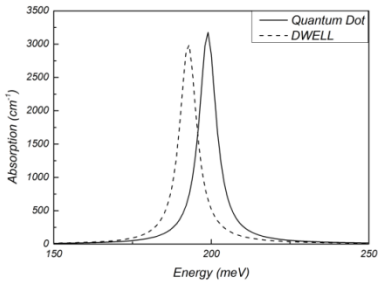


شکل ۵- تابع موج حالت پایه برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی.

همانگونه که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، در ساختار DWELL به دلیل پتانسیل کمتر اطراف نقطه‌ی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]

کوانتومی، تابع موج به محیط اطراف نشت کرده است که این میزان نشت برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی (شکل ۴) کمتر است. نمودار جذب خطی برای دو ساختار(شکل ۶) نشان‌دهنده‌ی جابجایی جذب خطی است.



شکل ۶- نمودار جذب خطی برای نقطه‌ی کوانتومی و ساختار DWELL.

مطابق شکل ۶ برای جذب خطی بین دو ساختار یک جابجایی مشاهده می‌شود که در ساختار DWELL جابجایی به سمت قرمز و طول موج‌های بلندتر صورت گرفته است که این موضوع در توافق با داده‌های تجربی است [۳, ۴, ۸]. با محاسبه‌ی زمان گذار برای دو ساختار، زمان گذار برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی $5.7\times10^{-8}S$ و زمان گذار برای الکترون نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی $6.5\times10^{-8}S$ بدست آمد. این مطلب نشان‌دهنده‌ی زمان گذار طولانی‌تر در ساختار DWELL نسبت به نقطه‌ی کوانتومی است که با داده‌های آزمایشات تجربی در توافق است [۱۵, ۱۶].

۴-نتیجه‌گیری

در این کار با حل معادله‌ی شرودینگر در تقریب جرم موثر برای تک الکترون درون باند رسانش یک ساختار نقطه‌ی کوانتومی و یک ساختار نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی، جابجایی ترازهای انرژی، زمان گذار و جذب خطی بین دو ساختار نشان داده شد. محاسبات نشان داد که زمان گذار برای الکترون در ساختار DWELL نسبت به نقطه‌ی کوانتومی طولانی‌تر است و جذب خطی برای ساختار DWELL نسبت به نقطه‌ی کوانتومی، جابجایی به سمت قرمز و طول موج‌های بلندتر دارد.

مراجع

[1] V. Ryzhii, "The theory of quantum-dot infrared phototransistors," *Semiconductor science and technology*, vol. 11, p. 759, 1996.

[2] H. Liu, "Quantum dot infrared photodetector," *Optoelectronics Review*, pp. 1-6, 2003.

[3] R. Shenoi, R. Attaluri, A. Siroya, J. Shao, Y. Sharma, A. Stintz, *et al.*, "Low-strain InAs⁄ InGaAs⁄ GaAs quantum dots-in-a-well infrared photodetector," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 26, p. 1136, 2008.

[4] Y. Wei, W. Ma, J. Huang, Y. Zhang, Y. Huo, K. Cui, *et al.*, "Very long wavelength quantum dot infrared photodetector using a modified dots-in-a-well structure with AlGaAs insertion layers," *Applied Physics Letters*, vol. 98, pp. 103507-103507-3, 2011.

[5] I. McKerracher, J. Wong-Leung, G. Jolley, L. Fu, H. H. Tan, and C. Jagadish, "Selective intermixing of InGaAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 47, pp. 577-590, 2011.

[6] R. Prasankumar, R. Attaluri, R. Averitt, J. Urayama, N. Weisse-Bernstein, P. Rotella, *et al.*, "Ultrafast carrier dynamics in an InAs/InGaAs quantum dots-in-a-well heterostructure," *Opt. Express*, vol. 16, p. 1165, 2008.

[7] A. Stintz, G. Liu, H. Li, L. Lester, and K. Malloy, "Low-threshold current density 1.3-μm InAs quantum-dot lasers with the dots-in-a-well (DWELL) structure," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 591-593, 2000.

[8] L. Chen, V. Stoleru, and E. Towe, "Improved luminescence from quantum-dot nanostructures embedded in structurally engineered (In, Ga) As confining layers," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 8, pp. 1045-1050, 2002.

[9] A. Barve, J. Shao, Y. D. Sharma, T. E. Vandervelde, K. Sankalp, S. J. Lee, *et al.*, "Resonant tunneling barriers in quantum dots-in-a-well infrared photodetectors," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 46, pp. 1105-1114, 2010.

[10] M. Sabaeian and A. Khaledi-Nasab, "Size-dependent intersubband optical properties of dome-shaped InAs/GaAs quantum dots with wetting layer," *Applied Optics*, vol. 51, pp. 4176-4185, 2012.

[11] S. Ghanad-Tavakoli, M. A. Naser, D. A. Thompson, and M. Jamal Deen, "Experimental characterization and theoretical modeling of the strain effect on the evolution and interband transitions of InAs quantum dots grown on In x Ga 1-x As (0.0≤ x≤ 0.3) metamorphic pseudosubstrates on GaAs wafers," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, pp. 063533-063533-8, 2009.

[12] S. L. Chuang, "*Physics of optoelectronic devices*," ed: Wiley (New York), 1995.

[13] A. Yariv, "*Quantum electronics*, 3rd," *Edn.(John WieLy & Sons, New York, 1988)*, 1989.

[14] R. W. Boyd, *Nonlinear optics*: Academic press, 2003.

[15] M. R. Matthews, R. J. Steed, M. D. Frogley, C. C. Phillips, R. S. Attaluri, and S. Krishna, "Transient photoconductivity measurements of carrier lifetimes in an InAs/In0. 15Ga0. 85As dots-in-a-well detector," *Applied Physics Letters*, vol. 90, pp. 103519-103519-3, 2007.

[16] A. Sergeev, V. Mitin, and M. Stroscio, "Quantum-dot photodetector operating at room temperatures: diffusion-limited capture," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 316, pp. 369-372, 2002.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]