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

بررسی اثر ولتاژ بایاس بر روی انرژی، تابع موج و دوقطبی گذار الکترون در آشکارسازهای نقطه‌ی کوانتومی مخروطی-شکل GaN/AlN

مریم مکتبی[۱]، محمدرضا شاهزاده[۲]، سید آزادی حسینی[۲] و محمد صبائیان[۲]

[۱] دانشگاه پیام نور اهواز

[۲] گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده – در این کار با استفاده از تقریب جرم موثر، حل معادله‌ی شرودینگر برای الکترون در باند رسانش نقطه‌ی کوانتومی مخروطی-شکل *GaN/AlN* حل شد و ترازهای انرژی و دوقطبی گذار الکترون بدست آمد. اثر ابعاد نقطه‌ی کوانتومی به صورت تغییر ارتفاع و تغییر شعاع قاعده‌ی مخروط و همچنین اثر ولتاژ بایاس بر روی ترازهای انرژی و دوقطبی گذار الکترون بررسی شد.

کلید واژه: آشکارساز فروسرخ، بایاس، تقریب جرم موثر، دوقطبی گذار، نقطه‌ی کوانتومی.

Investigation of bios effect on energy, envelop function and transition dipole moment in a cone-shaped GaN/AlN quantum dot infrared photo-detector

Maryam Maktabi[1], Mohammadreza Shahzadeh[2], Seyed Azadi Hosseini[2], and Mohammad Sabaeian[2]

[1] Payam e Noor University, Ahvaz Branch, Iran

[2] 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 the conduction band of a GaN/AlN cone-shaped quantum dot. Eigen-energies and transition dipole moments were calculated. Size-dependent and bios-dependent energies and transition dipole moments were investigated.

Keywords: Infrared Photodetector, Bios, Effective Mass Approximation, Transition Dipole Moment, Quantum Dot.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱-مقدمه

آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ی کوانتومی (QDIP) [1] همانند آشکارسازهای فروسرخ چاه کوانتومی (QWIP) [2] توجه بسیاری را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند [۱-۶]. از جمله مزیت‌های QDIP می‌توان به تابش فرودیِ عمودی، امکان وقوع گذارهای بین زیربانده‌ی، جریان تاریک[3] ضعیف-تر، تشخیص[4] بالاتر، پاسخ[5] بالاتر و قابلیت کار در دماهای بالاتر نسبت به QWIP اشاره کرد [۱, ۲, ۷-۹]. تاکنون تلاش‌های زیادی برای بهبود بازده QDIP انجام شده است که عمدتا از طریق مهندسی سد پتانسیل بوده است [۱۰]. از جمله‌ی این تلاش‌ها می‌توان به استفاده از نقاط کوانتومی تک زیرلایه [۱۱]، ساختارهای نقطه‌ی کوانتومی در چاه کوانتومی (DWELL) [6] [۱۲] و آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ی کوانتومی تونل‌زنی [۱۳] اشاره کرد.

"میتین "و همکارانش، اثر سد پتانسیل اطراف نقطه‌ی کوانتومی بر بهبود پاسخ نوری در QDIP را بررسی کردند [۱۴]. "آدیکاری" و همکارانش با تنظیم منطقه‌ی فعال آشکارساز، یک QDIP چند نوری[7] با پهنای طیفی[8] کم را ساخته و بررسی کردند [۱۰]. "هوفستتر" و همکارانش، با استفاده از نقطه‌ی کوانتومی به جای چاه کوانتومی در آشکارسازهای فروسرخ، بهبود چشمگیری در QDIP مبتنی بر GaN / AlN ایجاد کردند [۹] و علاوه بر افزایش دمای فعالیت از ۸۰ کلوین برای QWIP به ۱۶۰ کلوین برای QDIP، پاسخ را ۶۰ مرتبه نسبت به QWIP افزایش دادند. در کار حاضر با در نظر گرفتن یک ساختار نقطه‌ی کوانتومی سه بعدی مخروطی شکل GaN / AlN، اثر ابعاد و بایاس در آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ی کوانتومی بر روی ترازهای انرژی و دوقطبی‌های گذار الکترون بررسی می‌شوند.

۲-تئوری و روش حل

برای حل معادله‌ی شرودینگر در ساختار مورد نظر، از تقریب جرم موثر برای تک الکترون در باند رسانش استفاده شد که در این تقریب، با در نظر گرفتن اثر ولتاژ بایاس، هامیلتونی به صورت زیر در می‌آید [۲, ۷]:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*}\nabla^2 + V + e\vec{F}.\vec{r}$$

که در آن m^* جرم موثر الکترون بر حسب جرم الکترون (m_0) به شکل [۷, ۱۵]

$$m^* = \begin{cases} m^*_{GaN} = 0.2m_0 & , \text{(Inside Quantum Dot)} \\ m^*_{AlN} = 0.27m_0 & , \text{(Elsewhere)} \end{cases}$$

$\vec{F}$ میدان الکتریکی در جهت z+، V پتانسیل به صورت [۷, ۱۵]

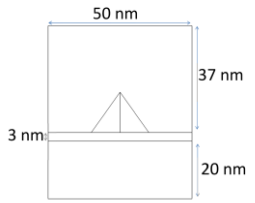
$$V = \begin{cases} 0 & , \text{(Inside Quantum Dot)} \\ \Delta E_C = 1.9eV & , \text{(Elsewhere)} \end{cases}$$

و $\Delta E_C = E_{C,AlN} - E_{C,GaN}$ است که بیانگر پتانسیل محدودیت الکترون درون نقطه‌ی کوانتومی و برابر با اختلاف بین انرژی لبه‌ی نوار رسانش GaN و AlN است.

معادله‌ی شرودینگر با در نظر گرفتن اثر استارک برای دو دسته از نقاط کوانتومی مخروطی شکل حل شد: دسته‌ی اول نقاط کوانتومی مخروطی شکل با ارتفاع ۱۴ نانومتر و شعاع متغیر از ۵ تا ۱۵ نانومتر و دسته‌ی دوم نقاط کوانتومی مخروطی شکل با شعاع ۱۰ نانومتر و ارتفاع متغیر از ۸ تا ۲۰ نانومتر. برای این دو دسته نقطه‌ی کوانتومی، اثر ولتاژ بایاس بر روی ترازهای انرژی و دوقطبی گذار الکترون بررسی شد. ولتاژ بایاس از صفر تا ۳ ولت متغیر در نظر گرفته شد. دوقطبی گذار برای الکترون از رابطه‌ی $M_{if} = |\langle \Psi_f | -ez | \Psi_i \rangle|$ محاسبه شد [۱۶] که در آن i و f به ترتیب بیانگر حالت‌های ابتدایی و نهایی هستند. شکل ۱ نمای دو بعدی یک نقطه‌ی کوانتومی مخروطی-شکل را نشان می‌دهد. برای مرزهای بالا و پایین شرط Y = 0، برای مرزهای مشترک GaN و AlN شرط $\mathbf{n}.(Y / m_e)_{AlN} = \mathbf{n}.(Y / m_e)_{GaN}$ و برای سایر مرزها شرط $\mathbf{n}.(Y) = 0$ اعمال شد [۱۶].

[1] Quantum Dot Infrared Photodetector
[2] Quantum Well Infrared Photodetector
[3] Dark Current
[4] Detectivity
[5] Responsivity
[6] Quantum Dot-in-a-Well Structure
[7] Multicolor
[8] Spectral Width

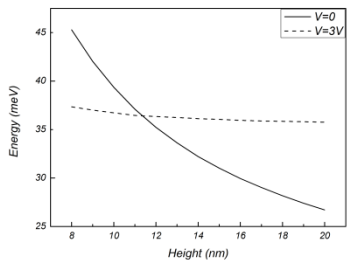
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل ۱- نمـای دو بعـدی و ابعـاد نقطـه‌ی کوانتـومی در صـفحه‌ی x-z. صفحه‌ی y-z مشابه است.

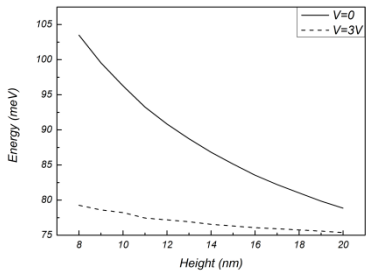
۳-نتایج و بحث

در شکل ۲ انرژی حالت پایه الکترون بدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولت بر حسب تغییرات ارتفـاع مخـروط نشـان داده شده است.



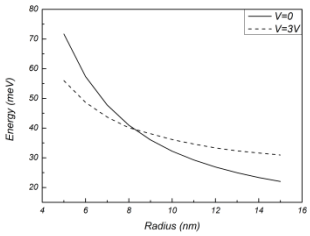
شکل ۲- تغییرات انرژی حالت پایه بر حسب ارتفاع مخروط در دو حالـت بدون بایاس و بایاس ۳ ولت.

در شکل ۳ انرژی اولین حالت برانگیختـه‌ی الکتـرون بـدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولـت بـر حسـب تغییـرات ارتفـاع مخروط نشان داده شده است.



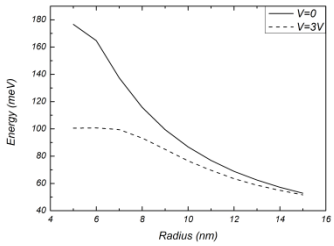
شکل ۳- تغییرات انرژی اولین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع مخـروط در دو حالت بدون بایاس و بایاس ۳ ولت.

در شکل ۴ انرژی حالت پایه الکترون بدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولت بر حسب تغییرات شعاع قاعده‌ی مخروط نشان داده شده است.



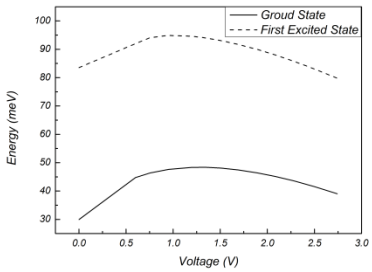
شکل ۴- تغییرات انرژی حالت پایه بر حسب شعاع قاعـده‌ی مخـروط در دو حالت بدون بایاس و بایاس ۳ ولت.

در شکل ۵ انرژی اولین حالت برانگیختـه‌ی الکتـرون بـدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولـت بـر حسـب تغییـرات شـعاع قاعده‌ی مخروط نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات انرژی اولین حالت برانگیخته بر حسب شـعاع قاعـده‌ی مخروط در دو حالت بدون بایاس و بایاس ۳ ولت.

در شـکل ۶ تغییـرات انـرژی حالـت پایـه و اولـین حالـت برانگیخته بر حسب تغییر ولتاژ بایاس نشان داده شده است.

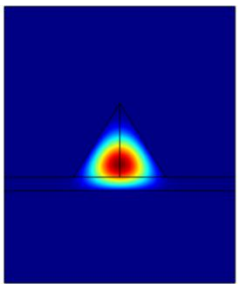


شکل ۶- تغییرات انرژی حالت پایه و اولین حالـت برانگیختـه‌ی نقطـه‌ی کوانتومی بر حسب تغییرات ولتاژ بایاس.

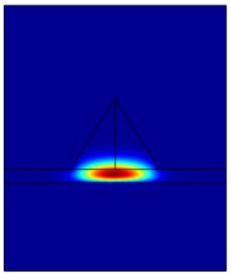
مشاهده می‌شود که این نمودار ابتدا صعودی و سپس نزولـی است. دلیل این موضوع این اسـت کـه بـا افـزایش پتانسـیل درون نقطه‌ی کوانتومی بر اثر اعمال بایاس، احتمـال حضـور الکترون در لایه‌ی خیس (با محدودیت یک بعـدی) افـزایش می‌یابد که بـه دلیـل محـدودیت کمتـر نسـبت بـه نقطـه‌ی کوانتومی (محدودیت سه بعدی) ویژه مقادیر انـرژی کـاهش می‌یابند (شکل‌هـای ۷ و ۸). در غیـاب بایـاس، پتانسـیل در

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

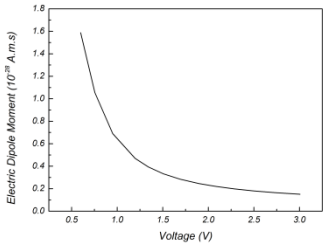
قسمت‌های مختلف نقطه‌ی کوانتومی یکسان است. اما با اعمال بایاس، با افزایش ارتفاع، پتانسیل هم افزایش می‌یابد و باعث حضور تابع موج در لایه‌ی خیس نقطه‌ی کوانتومی می‌شود که این موضوع منجر به پایین آمدن سطح انرژی می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷-تابع موج حالت پایه در غیاب بایاس.



شکل ۸-تابع موج حالت پایه در حضور بایاس ۳ ولت.



شکل ۹- تغییرات دوقطبی گذار الکترون بر حسب ولتاژ بایاس.

در شکل ۹ نمودار دوقطبی گذار الکترون بر حسب ولتاژ بایاس نشان داده شده است. برای توصیف این نمودار باید به مفهوم دوقطبی گذار توجه کرد، که بیان کننده‌ی میزان همپوشانی توابع موج در حالت‌های اولیه و نهایی است. با توجه به اینکه میدان الکتریکی باعث جابجایی تابع موج و ابر الکترونی در قسمت‌های مختلف و در نتیجه تغییر میزان همپوشانی توابع موج می‌شود (اثر استارک)، دوقطبی گذار در اثر تغییرات ولتاژ، تغییر می‌کند.

۴-نتیجه‌گیری

در این کار با استفاده از تقریب جرم موثر در حل معادله‌ی شرودینگر برای تک الکترون در باند رسانش، اثر ابعاد نقطه-ی کوانتومی و بایاس در آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ی کوانتومی بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش دوقطبی گذار الکترون با افزایش ولتاژ بایاس است.

مراجع

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

[2] F. Ghasemi and S. Razi, "Cuboid GaN/AlGaN Quantum Dot Infrared Photodetector; Photoconductive gain and capture probability," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012.

[3] A. Mohan, *et al.*, "Photocurrent spectroscopy of site-controlled pyramidal quantum dots," *Applied Physics Letters*, vol. 101, pp. 031110-031110-3, 2012.

[4] A. Rogalski, "Recent progress in third generation infrared detectors," *Journal of Modern Optics*, vol. 57, pp. 1716-1730, 2010.

[5] W. Ma, *et al.*, "Voltage tunable two-color InAs⁄ GaAs quantum dot infrared photodetector," *Applied Physics Letters*, vol. 93, p. 013502, 2008.

[6] D. Hofstetter, E. Baumann, F. R. Giorgetta, R. Théron, H. Wu, W. J. Schaff, *et al.*, "Photodetectors based on intersubband transitions using III-nitride superlattice structures," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 21, p. 174208, 2009.

[7] A. Asgari and S. Razi, "High performances III-Nitride quantum dot infrared photodetector operating at room temperature," *Opt. Express*, vol. 18, p. 14604, 2010.

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

[9] D. Hofstetter, J. Di Francesco, P. K. Kandaswamy, A. Das, S. Valdueza-Felip, and E. Monroy, "Performance Improvement of AlN–GaN-Based Intersubband Detectors by Using Quantum Dots," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 22, pp. 1087-1089, 2010.

[10] S. Adhikary, Y. Aytac, S. Meesala, S. Wolde, A. Unil Perera, and S. Chakrabarti, "A multicolor, broadband (5–20 μm), quaternary-capped InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector," *Applied Physics Letters*, vol. 101, pp. 261114-261114-4, 2012.

[11] D. Z.-Y. Ting, S. V. Bandara, S. D. Gunapala, J. M. Mumolo, S. A. Keo, C. J. Hill, *et al.*, "Submonolayer quantum dot infrared photodetector," *Applied Physics Letters*, vol. 94, pp. 111107-111107-3, 2009.

[12] 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.

[13] X. Su, S. Chakrabarti, P. Bhattacharya, G. Ariyawansa, and A. U. Perera, "A resonant tunneling quantum-dot infrared photodetector," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 41, pp. 974-979, 2005.

[14] V. Mitin, A. Antipov, A. Sergeev, N. Vagidov, D. Eason, and G. Strasser, "Quantum dot infrared photodetectors: photoresponse enhancement due to potential barriers," *Nanoscale Research Letters*, vol. 6, pp. 1-6, 2011.

[15] J. Piprek, *Nitride semiconductor devices: principles and simulation*: Wiley-vch, 2007.

[16] 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]