



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



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

مریم مکتبی<sup>۱</sup>، محمدرضا شاهزاده<sup>۲</sup>، سید آزادی حسینی<sup>۲</sup> و محمد صباغیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه پیام نور اهواز

<sup>۲</sup> 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 نقطه‌ای کوانتومی مخروطی-شکل GaN/AlN حل شد و ترازهای انرژی و دوقطبی گذار الکترون بدست آمد. اثر ابعاد نقطه‌ای 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، نقطه‌ای 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<sup>1</sup>, Mohammadreza Shahzadeh<sup>2</sup>, Seyed Azadi Hosseini<sup>2</sup>, and Mohammad Sabaeian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Payam e Noor University, Ahvaz Branch, Iran

<sup>2</sup> 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.

## ۱-مقدمه

آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ای کوانتومی (QDIP) <sup>۱</sup> همانند آشکارسازهای فروسرخ چاه کوانتومی (QWIP) <sup>۲</sup> توجه بسیاری را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند [۱-۶]. از جمله مزیت‌های QDIP می‌توان به تابش فرودی عمودی، امکان وقوع گذارهای بین زیرباندی، جریان تاریک <sup>۳</sup> ضعیف-تر، تشخیص <sup>۴</sup> بالاتر، پاسخ <sup>۵</sup> 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 عمدتاً از طریق مهندسی سد پتانسیل بوده است [۱۰]. از جمله این تلاش‌ها می‌توان به استفاده از نقاط کوانتومی تک زیرلایه [۱۱]، ساختارهای نقطه‌ای کوانتومی در چاه کوانتومی (DWELL) <sup>۶</sup> [۱۲] و آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ای کوانتومی تونل‌زنی [۱۳] اشاره کرد.

"میتین" و همکارانش، اثر سد پتانسیل اطراف نقطه‌ای کوانتومی بر بهبود پاسخ نوری در QDIP را بررسی کردند [۱۴]. "آدیکاری" و همکارانش با تنظیم منطقه‌ای فعال آشکارساز، یک QDIP چند نوری <sup>۷</sup> با پهنای طیفی <sup>۸</sup> کم را ساخته و بررسی کردند [۱۰]. "هوفستتر" و همکارانش، با استفاده از نقطه‌ای 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 نقطه‌ای کوانتومی سه بعدی مخروطی شکل GaN / AlN، اثر ابعاد و بایاس در آشکارسازهای فروسرخ نقطه‌ای 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]:

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

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]

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

و  $\Delta E_C = E_{C,AlN} - E_{C,GaN}$  است که بیانگر پتانسیل محدودیت الکترون درون نقطه‌ای 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 نقطه‌ای 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 نقطه‌ای کوانتومی مخروطی-شکل را نشان می‌دهد. برای مرزهای بالا و پایین شرط  $Y = 0$ ، برای مرزهای مشترک GaN و AlN شرط  $n(Y / m_e)_{AlN} = n(Y / m_e)_{GaN}$  و برای سایر مرزها شرط  $Y_0 = n$  اعمال شد [۱۶].

<sup>1</sup> Quantum Dot Infrared Photodetector

<sup>2</sup> Quantum Well Infrared Photodetector

<sup>3</sup> Dark Current

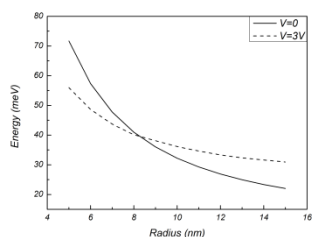
<sup>4</sup> Detectivity

<sup>5</sup> Responsivity

<sup>6</sup> Quantum Dot-in-a-Well Structure

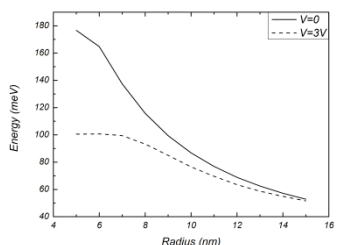
<sup>7</sup> Multicolor

<sup>8</sup> Spectral Width



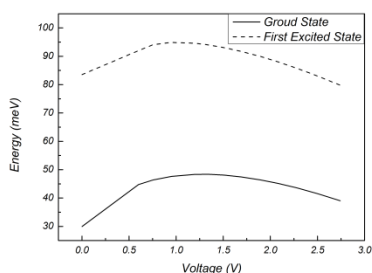
شکل ۴- تغییرات انرژی حالت پایه بر حسب شعاع قاعده‌ی مخروط در دو حالت بدون بایاس و بایاس ۳ ولت.

در شکل ۵ انرژی اولین حالت برانگیخته‌ی الکترون بدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولت بر حسب تغییرات شعاع قاعده‌ی مخروط نشان داده شده است.



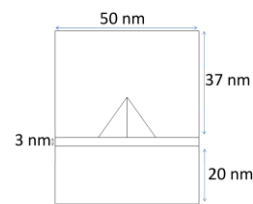
شکل ۵- تغییرات انرژی اولین حالت برانگیخته بر حسب شعاع قاعده‌ی مخروط در دو حالت بدون بایاس و بایاس ۳ ولت.

در شکل ۶ تغییرات انرژی حالت پایه و اولین حالت برانگیخته بر حسب تغییر ولتاژ بایاس نشان داده شده است.



شکل ۶- تغییرات انرژی حالت پایه و اولین حالت برانگیخته‌ی نقطه‌ی کوانتومی بر حسب تغییرات ولتاژ بایاس.

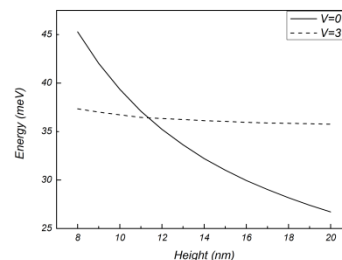
مشاهده می‌شود که این نمودار ابتدا صعودی و سپس نزولی است. دلیل این موضوع این است که با افزایش پتانسیل درون نقطه‌ی کوانتومی بر اثر اعمال بایاس، احتمال حضور الکترون در لایه‌ی خیس (با محدودیت یک بعدی) افزایش می‌یابد که به دلیل محدودیت کمتر نسبت به نقطه‌ی کوانتومی (محدودیت سه بعدی) ویژه مقادیر انرژی کاهش می‌یابند (شکل‌های ۷ و ۸). در غیاب بایاس، پتانسیل در



شکل ۱- نمای دو بعدی و ابعاد نقطه‌ی کوانتومی در صفحه‌ی X-Z. صفحه‌ی Y-Z مشابه است.

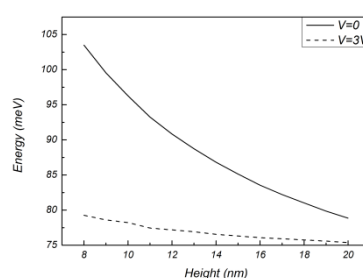
### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ انرژی حالت پایه الکترون بدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولت بر حسب تغییرات ارتفاع مخروط نشان داده شده است.



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

در شکل ۳ انرژی اولین حالت برانگیخته‌ی الکترون بدون بایاس و با اعمال بایاس ۳ ولت بر حسب تغییرات ارتفاع مخروط نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات انرژی اولین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع مخروط 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.

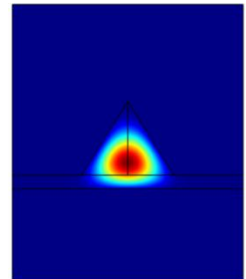
#### ۴- نتیجه گیری

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

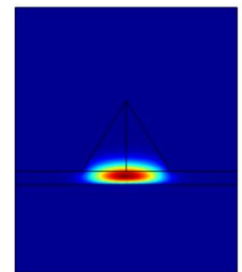
#### مراجع

- [1] H. Liu, "Quantum dot infrared photodetector," *Optoelectronics Review*, pp. 1-6, 2003.
- [2] F. Ghasemi and S. Razi, "Cuboid GaN/AlGaIn 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. Theron, 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  $\mu\text{m}$ ), 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.

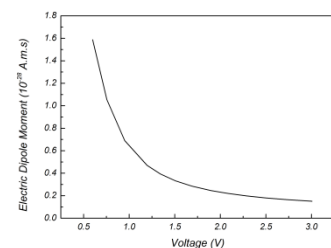
قسمت‌های مختلف نقطه‌ی کوانتومی یکسان است. اما با اعمال بایاس، با افزایش ارتفاع، پتانسیل هم افزایش می‌یابد و باعث حضور تابع موج در لایه‌ی خیس نقطه‌ی کوانتومی می‌شود که این موضوع منجر به پایین آمدن سطح انرژی می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸).



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 بیان‌کننده‌ی 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.