

## بررسی تاثیر تنش بر مولفه های ماتریس گذار در لیزرهای نیمه رسانا

آریامنش، سینا؛ باقری، میثم؛ رحیم پور سلیمانی، حمید<sup>۱</sup>؛ عربشاهی، هادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت

<sup>۲</sup> گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

### چکیده

در این مقاله به بررسی و محاسبه ماتریس گذار اپتیکی در چاه های کوانتومی پرداخته ایم. برای توصیف دقیق سیستم، ساختار نوار حفره ها را با استفاده از هامیلتونی لوتینگر-کوهن در حضور تنش بررسی نموده ایم. نوار رسانش نیز با تقریب جرم موثر مطالعه شده است. گذارهای بین زیرباندهای *Heavy hole* و *Light hole* از ناحیه ی ظرفیت با زیرباندهای ناحیه ی رسانش، نشان دهنده ی تاثیر تنش بر مولفه های ماتریس گذار می باشد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که گذار بین نوارها در قطبش *TE* و *TM* از همدیگر متفاوت است. همچنین احتمال هر یک از گذارها نیز بدست آمده است.

## Investigation of Strain Effect on Transition Matrix Elements in Semiconductor Lasers Aryamanesh, Sina ; Bagheri, Meysam ;Rahimpour soleimani, Hamid<sup>1</sup>; Arabshahi, Hadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Guilan, Science College, Rasht

<sup>2</sup> Department of Physics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

### Abstract

*In this article, we have computed optical transition matrix in quantum wells. For a precise description of the system, holes band structure has been investigated using Luttinger-Kohn Hamiltonian in presence of strain. For conduction band, we used effective mass approximation. Results show that interband transitions are different for TE and TM polarization. Probability of each transition has also computed.*

PACS No 78

فرآیندهای با سرعت بالا است در لیزرهای نیمرسانا است [۲۰]. مطالعه ساختار نواری و بهره لیزر نیمرسانا می تواند در درک پهنای خطی پالس، پهنای نواری دوپینگ، تقویت و تولید پالس های کوتاه کمک نماید. [۳] در این مقاله، ما به بررسی و محاسبه

مقدمه

طیف سنجی پمپ-پروپ در حد فمتو ثانیه اسبابی مناسب و ارزشمند برای مطالعه بنیادی دینامیک غیر تعادلی حامل ها و

حالت های بلوخ حفره در نقطه گاما به شکل  $P$  می باشند. برای محاسبه حالت های حفره ما از روش هامیلتونی لوتینگر-کوهن [۴،۶] استفاده می کنیم. با توجه به اینکه انرژی اسپین-مدار  $GaAs$  حدود  $۳۴۰$  میلی الکترون ولت است ما از نوار  $SO$  صرف نظر می کنیم و هامیلتونی  $۴ \times ۴ [V]$  را در نظر می گیریم. با استفاده از تبدیل واحد شن [۸]، هامیلتونی لوتینگر را می توان به صورت بلوک قطری زیر نوشت:

$$H = \begin{bmatrix} H^U & 0 \\ 0 & H^L \end{bmatrix} \quad (3)$$

که هر بلوک آن بصورت زیر می باشد.

$$H^{U(L)} = - \begin{bmatrix} P+Q-V_h & R \\ R^\dagger & P-Q-V_h \end{bmatrix} \quad (4)$$

که  $V_h$  پتانسیل حفره ها می باشد که به سمت پایین منفی در نظر گرفته شده است.

بقیه ترم های هامیلتونی به صورت زیر می باشند.

$$\begin{aligned} P &\equiv E_v + \frac{\hbar^2 \gamma_1}{2m} \left( k_x^2 + k_y^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \\ &+ a_v \left[ \mathcal{E}_{xx}(z) + \mathcal{E}_{yy}(z) + \mathcal{E}_{zz}(z) \right] \\ Q &\equiv \frac{\hbar^2 \gamma_2}{2m} \left( k_x^2 + k_y^2 + 2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \\ &- \frac{b}{2} \left[ \mathcal{E}_{xx}(z) + \mathcal{E}_{yy}(z) - 2\mathcal{E}_{zz}(z) \right] \\ R &\equiv \frac{\hbar^2}{2m} \left( -\sqrt{3}\gamma_2(k_x^2 - k_y^2) + i2\sqrt{3}\gamma_3 k_x k_y \right) \\ &+ \frac{b}{2} \sqrt{3} \left[ \mathcal{E}_{xx}(z) - \mathcal{E}_{yy}(z) \right] - i \frac{d}{2} \mathcal{E}_{xy}(z) \end{aligned} \quad (5)$$

که  $\gamma$ ها ضرایب لوتینگر می باشند. پایه های هامیلتونی (۴) ترکیب خطی از اسپینورهای  $(\pm 3/2, \pm 1/2)$  بصورت زیر می باشند [۹].

ساختار نواری حفره ها در چاه کوانتومی  $InGaAs$  و بررسی پاسخ چاه به نور لیزر فرودی با قطبش های مختلف پرداخته ایم. برای بررسی ساختار نواری از روش لوتینگر-کوهن [۴] که بر اساس نظریه اختلالی  $k.p$  است استفاده نموده ایم. مشاهده شده است که احتمال گذار از حفره های سنگین و سبک به زیرنوارهای رسانش در حالت  $TE$  و  $TM$  متفاوت می باشند. نتایج پیش بینی می کند که گذار از حفره های سنگین در حالت  $TE$  و از حفره های سبک در حالت  $TM$  به زیرنوارهای رسانش محتمل ترین گذارها می باشند.

### روش محاسباتی

برای محاسبه ماتریس گذار، در ابتدا می باید ساختار نواری چاه کوانتومی را محاسبه نمود. برای نوار رسانش، ما از تقریب معادله شرودینگر با جرم موثر استفاده نموده ایم. قسمت دوره ای تابع موج بلوخ را نیز به صورت  $S$  گونه  $(|1/2; \pm 1/2\rangle)$  در نظر گرفته ایم. بدین ترتیب برای نوار رسانش داریم:

$$\left[ \frac{-\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \frac{1}{m_c^*(z)} \frac{d}{dz} + U_{con}(z) + \frac{\hbar^2 k_r^2}{2m_c^*(z)} \right] F_{n,k}(z) = E_n F_{n,k}(z) \quad (1)$$

که مسیر رشد را در راستای  $Z$  انتخاب نموده و  $U_{con}(z)$  معرف انرژی پتانسیل الکترون در نوار رسانش است. در محاسبات جرم موثر الکترون در چاه  $GaAs$  را برابر با  $0.067m$  و در  $InAs$  را  $0.023m$  در نظر گرفتیم [۵].

$U_{con}(z)$  را نیز برابر با  $0.66$  اختلاف بین انرژی گاف بین سد و چاه فرض نموده ایم. بدین ترتیب، تابع موج الکترون در نوار رسانش بصورت زیر خواهد بود.

$$\Psi_{n,k_r}^{c,\sigma}(r) = \frac{e^{ik_r \cdot \rho}}{\sqrt{A}} F_{n,k}(z) \begin{bmatrix} |J=1/2; \sigma=1/2\rangle \\ |J=1/2; \sigma=-1/2\rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

که برداری در صفحه  $x-y$  می باشد.

e جهت قطبش نور فرودی است. توجه به روابط (۲،۶،۷) برای مدهای TE و TM خواهیم داشت:

$$|x.P|^2 = \frac{3}{4} \langle F_n | g_m^1 \rangle^2 + \frac{1}{3} \langle F_n | g_m^2 \rangle^2 M_b^2 \text{ for TE} \quad (9)$$

$$|z.P|^2 = \langle F_n | g_m^2 \rangle^2 M_b^2 \text{ for TM} \quad (10)$$

و  $3M_b^2 = \langle S | P_x | X \rangle^2$  می باشد و ضرایب موجود در معادله (۹) ناشی از انتگرال گیری روی زاویه  $(\phi)$  می باشد. ثابت های مورد استفاده در مورد سد و چاه در جدول زیر لیست شده اند [۵].

	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
GaAs	۶،۸۵	۲،۱	۲،۹
InAs	۲۰،۴	۸،۳	۹،۱

### نتایج و بحث

شکل ۱ ساختار نواری حفره ها را برای چاهی با طول ۶۰Å را نشان می دهد. ناهمسانگردی ها نشان دهنده مخلوط شدن حالت های حفره سنگین و سبک در نقاط دور از مرکز بریلوین است.

به علت اینکه انرژی شکافت اسپین-مدار در GaAs به حدود ۳۴۰ میلی الکترون ولت است که انرژی زیادی می باشد، ما صرفا به بررسی زیرنوارهای حفره های سبک و سنگین پرداخته ایم. تصویر ۱ در شکل ۲ ماتریس گذار برای TE می باشد. همانطور که از تصویر مشخص است محتمل ترین گذار مربوط به گذار از نواره حفره سنگین به رسانش است. بر خلاف این حالت، در گذار TM محتمل ترین انتقال مربوط به گذار از حفره سبک به نوار رسانش است.

$$|1\rangle = v^* |3/2, 3/2\rangle - v |3/2, -3/2\rangle$$

$$|2\rangle = w^* |3/2, -1/2\rangle - w |3/2, 1/2\rangle$$

$$|v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\frac{3\pi}{4} - \frac{3\xi}{2})} \sum, |w\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(-\frac{\pi}{4} + \frac{\xi}{2})} \quad (6)$$

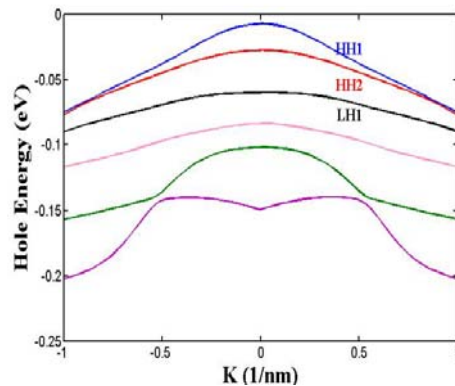
$$\xi = a \tan\left(\frac{k_y}{k_x}\right)$$

با توجه به ساختار متقارن چاه مورد مطالعه با قطری کردن  $H^U$  می توان ساختار نواری حفره ها را بدست آورد. برای حل معادلات بالا از روش تفاضل محدود استفاده شده است. برای برقراری پیوستگی بار و جریان مشتق های درجه یک و دو در معادله (۵) از روش ارائه شده در استفاده نموده ایم. با توجه به پایه ها معرفی شده در رابطه ۶، تابع موج حفره ها به صورت زیر خواهد بود.

$$\Psi_{k_t}^U(r) = \frac{e^{ik_t.r}}{\sqrt{A}} [g^1(k_t, z) |1\rangle + g^2(k_t, z) |2\rangle] \quad (7)$$

که توابع  $(g^i)$  ویژه حالت های هامیلتونی  $(\xi)$  هستند. حال می توانیم ماتریس اپتیکی را برای مدهای TE و TM محاسبه کنیم. ماتریس اپتیکی به صورت زیر بیان می شود.

$$|e.P_{n,m}^{\sigma,U}| = |\langle \Psi_{n,k_t}^{c,\sigma} | P | \Psi_{k_t}^U \rangle|^2 \quad (8)$$



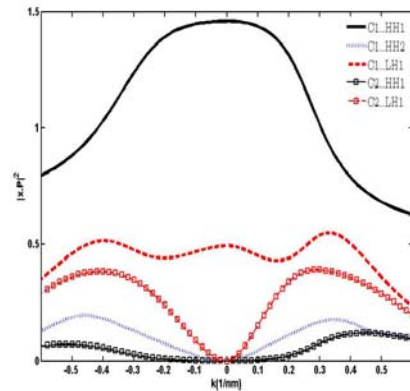
شکل ۱. ساختار باند ظرفیت در چاه کوانتومی InGaAs/AlGaAs در حضور تنش

## نتیجه گیری

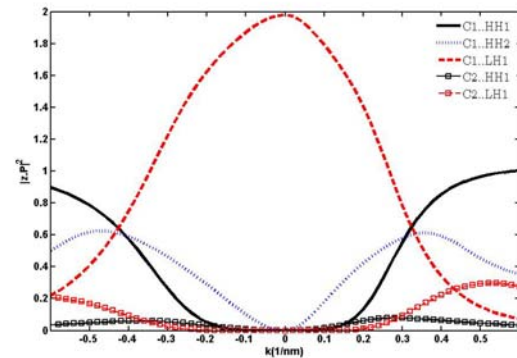
در این مقاله به بررسی ساختار نوار ظرفیت چاه کوانتومی با استفاده از هامیلتونی لوتینگر در حضور تنش پرداختیم. نتایج ترکیب شدن حالت های حفره سبک و سنگین را در خارج از مرکز بریلوین به خوبی نشان می داد. این ترکیب شدن باعث پیدایش ناهمسانگردی هایی در ساختار نواری می گردد. در ادامه به بررسی پاسخ چاه کوانتومی به تابش فرودی با قطبش های متفاوت پرداختیم. نتایج نشان می داد که بر خلاف حالت بالک، در چاه کوانتومی ماتریس گذار برای قطبش TE و TM متفاوت است.

## مرجع ها

- [1] C. Johnson and A. Mooradian, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, p. 8539-8558, 1986.
- [2] M. Wiesenfeld, R. S. Tucker and M. Downey, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1307, 1987.
- [3] J. Pipreck, " *Semiconductor Optoelectronic Devices*," Academic Press, 2003.
- [4] J. M. Luttinger and W. Kohn, *Phys. Rev. Lett.*, **65**, p. 869-883, 1955.
- [5] S. Adachi, *J. Appl. Phys.*, **58**, 1985.
- [6] I. Vurgaftman and J. Singh, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **30**, No.9, 1994.
- [7] W. W. Chow and S. W. Koch, '*Semiconductor-laser Fundamental*', Springer, 1999.
- [8] D. A. Broido and L. J. Shem, *Phys. Rev. B.* **31**, p. **888-892**, 1985.
- [9] G. D. Sanders, C. K. Sun, J. G. Fujimoto, H. K. Choi, C. A. Wang and C. J. Stanton, *Phys. Rev. B.*, **50**, 12, 1994.



شکل ۲. مولفه های ماتریس گذار برای TE تصاویر به خوبی وابستگی ماتریس گذار به قطبش نور فرودی در چاه کوانتومی را نشان می دهند.



شکل ۳. مولفه های ماتریس گذار برای TM تصاویر به خوبی وابستگی ماتریس گذار به قطبش نور فرودی در چاه کوانتومی را نشان می دهند.

چنین رفتاری قابل انتظار بود زیرا نوار حفره های سنگین ترکیبی از حالت های  $|3/2; \pm 3/2\rangle$  است که هیچ سهمی در  $g^2$  در مرکز بریلوین ندارد. از شکل مشخص است که گذار به زیر نوار دوم رسانش با احتمال بسیار کمتری صورت می گیرد. نکته دیگر در شکل این است در قطبش TM در مرکز بریلوین فقط گذار از حفره سبک وجود دارد در صورتی که در قطبش TE، گذار از نوارهای دیگر نیز محتمل است که این اتفاق ریشه در تفاوت تعاریف گذارهای مختلف در معادله ۹ دارد.