

## تأثیر ناخالصی گاوسی روی طیف جذبی نقطه کوانتومی قرصی شکل

سیاه سهلان، مهناز؛ بروستانی، جمال

گروه حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

### چکیده

در این مقاله، یک نقطه کوانتومی از جنس GaAs، توسط پتانسیل سهموی ناهمسانگرد در صفحه  $(x-y)$  و پتانسیل چاه نامتناهی در راستای رشد (جهت  $z$ ) مدل بندی شده است. با استفاده از روش عددی قطری سازی تأثیر حضور ناخالصی روی ضریب جذب بین نواری بررسی و نشان داده شده است که در حضور ناخالصی دافعه (جاذبه) ضریب جذب به انرژی بالاتر (پایین تر) جابجا می شود. همچنین نشان داده شده است که اعمال میدان مغناطیسی در حضور ناخالصی باعث افزایش مقدار ضریب جذب و جابجایی قله آن به انرژی های بالاتر می شود و با افزایش ناهمسانگردی ضریب جذب روند کاهشی دارد به انرژی های بالاتر جابجا می شود.

## Effect of Gaussian impurity on the absorption spectra in the disc shaped quantum dot

Siah sahlan, Mahnaz; Barvestani, Jamal

Department of Solid State Physics, Faculty of Physics, University of Tabriz

### Abstract

A GaAs quantum dot is modeled by in-plane anisotropic parabolic potential along  $x-y$  plane and by finite well potential along growth direction ( $z$ -axis). By using diagonalization numerical method, the effect of impurity on the interband absorption coefficient have been investigated and it has been shown that optical absorption spectra show blue-shift (red shift) in the presence of repulsive (attractive) impurity, and it is depicted that by applying of magnetic field in the presence of the impurity leads to increases of the absorption coefficient and shift its peak to the higher energies, and with increasing the anisotropy, linear absorption decreases and the peak values shift to higher energies.

### مقدمه

کپه ای به نمایش می گذارند؛ در واقع ساختارهای الکترونی نقاط کوانتومی نقش مهمی در چگونگی کاربرد آن ایفا می کند. بررسی های اخیر نشان می دهد که ساختار الکترونی نقاط کوانتومی را می توان با تغییر در شکل و اندازه و تعداد الکترون های مربوط به آن تغییر داد، اندازه و هندسه ناهمسانگردی نقش کلیدی را در تعیین گذار انرژی در یک نقطه کوانتومی بازی می کند و برهمکنش های نوری را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد [۲]، علاوه بر این حضور حالت های ناخالصی محبوس شده در ابزارهای نیم رسانا ویژگی های فیزیکی این ساختارها را بطور چشمگیری تغییر می دهد،

پیشرفت های روز افزون در تکنولوژی ساخت مواد نیم رساناهای کم بعد و نیز ویژگی های منحصر بفرد این ساختارها باعث ظهور نسل جدیدی از ابزارهای اپتوالکترونیکی از جمله لیزرهای مادون قرمز، تقویت کننده ها و آشکارسازهای فوتونی شده است. در این میان ساختارهای نقاط کوانتومی به دلیل محبوس بودن سه بعدی بار و گسسته بودن سطوح انرژی الکترونی، کاندیدای اصلی برای مطالعات بنیادی می باشند [۱]. نقاط کوانتومی نیم رسانا خواص نوری و الکترونی کاملاً متفاوتی از نیم رساناهای

$$\Phi_{n_x, i}(x) = \left( 2^{n_x} n_x! \sqrt{\pi} \lambda_{i,x} \right)^{-1/2} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x}{\lambda_{i,x}} \right)^2} H_{n_x} \left( \frac{x}{\lambda_{i,x}} \right) \quad (4)$$

در معادله فوق  $i=hh, lh$  و  $\lambda_{i,x}$  طول نوسانگر است.

تابع موج نوار رسانش از حل معادله شرودینگر با پتانسیل محدود کننده سهموی در راستای (x-y) بدست می آید:

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_x^2 x^2 + \frac{1}{2} m \omega_y^2 y^2 + V_z + V_{im} \quad (5)$$

که P تکانه ذره است که در صورت اعمال میدان مغناطیسی به تکانه تعمیم یافته تبدیل می شود:

$$p \rightarrow \Pi = p + qA \quad (6)$$

و  $V_{im}$  پتانسیل ناخالصی گاوسی است [V]:

$$V_{im} = V_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{a^2}} \quad (7)$$

در معادلات فوق مذکور m جرم موثر الکترون،  $V_0$  قدرت پتانسیل ناخالصی، d معیاری از گسترش فضایی پتانسیل ناخالصی و  $(x_0, y_0)$  نشان دهنده موقعیت ناخالصی است.

ضریب جذب نقطه کوانتومی با استفاده از روش ماتریس چگالی محاسبه می شوند. روابط مربوط به قسمت خطی و غیرخطی به ترتیب به صورت زیر خواهد بود [8]:

$$\alpha^{(1)}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r}} \frac{\sigma_c \hbar \Gamma_0 |M_{fi}|^2}{(E_f - E_i - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_0)^2} \quad (8)$$

$$\alpha^{(3)}(\omega, I) = -\omega \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r}} \left( \frac{I}{2\epsilon_0 n_r c} \right) \frac{4\sigma_c \hbar \Gamma_0 |M_{fi}|^4}{[(E_f - E_i - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_0)^2]^2} \quad (9)$$

که  $\epsilon_0$  گذردهی خلا،  $\sigma_c$  چگالی حامل ها،  $\epsilon_r$  قسمت حقیقی گذردهی،  $|M_{fi}|$  المانهای ماتریس گذار بین حالت های اولیه و نهایی است [9] و  $E_f$  و  $E_i$  انرژی نوار ظرفیت و نوار رسانش در نقطه کوانتومی هستند که با روش قطری سازی هامیلتونی محاسبه می شوند.

### نتایج محاسبات

در این بخش نتایج محاسبات عددی مربوط به انرژی پیوندی و ضریب جذب بین نواری یک نقطه کوانتومی نوعاً از جنس GaAs با پارامترهای قید شده در جدول ۱ ارائه می شود.

افزودن ناخالصی در مواد نیم رسانا به عنوان یک فناوری مفید برای کنترل خواص الکترونی و نوری طیف گسترده ای از نیم رساناها مورد بهره برداری است [۳].

در این مقاله، نقطه کوانتومی GaAs به شکل یک قرص با پتانسیل سهموی ناهمسانگرد در صفحه (x-y) و پتانسیل چاه نامتناهی در راستای رشد (جهت z) فرض می شود. هدف، بررسی تاثیر ناخالصی گاوسی و میدان مغناطیسی بر روی خواص نوری از جمله قسمت های خطی و غیرخطی ضریب جذب، برای گذار بین نواری این نقطه کوانتومی می باشد.

### روش های محاسباتی

در این کار هامیلتونی  $(\epsilon \times \epsilon)$  لاتینگر را برای توصیف نوار ظرفیت در نظر می گیریم [۴ و ۵]:

$$H = \begin{bmatrix} H_{hh} & c & b & 0 \\ c^+ & H_{lh} & 0 & -b \\ b^+ & 0 & H_{lh} & c \\ 0 & -b^+ & c^+ & H_{hh} \end{bmatrix} \begin{matrix} |3/2, 3/2\rangle \\ |3/2, -1/2\rangle \\ |3/2, 1/2\rangle \\ |3/2, -3/2\rangle \end{matrix} \quad (1)$$

که هر یک اعضای ماتریس در معادله ۱ به صورت زیر می باشد:

$$H_{hh} = -\frac{\hbar^2}{2m_0} \left[ (\gamma_1 - 2\gamma_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (\gamma_1 + \gamma_2) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right] + V_z(z) + V_{x,y}(x,y) \quad (2a)$$

$$H_{lh} = -\frac{\hbar^2}{2m_0} \left[ (\gamma_1 + 2\gamma_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (\gamma_1 - \gamma_2) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right] + V_z(z) + V_{x,y}(x,y) \quad (2b)$$

$$b = \frac{\sqrt{3}\hbar^2}{m_0} \gamma_2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (2c)$$

$$c = \frac{\sqrt{3}\hbar^2}{m_0} \gamma_2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (2d)$$

در معادلات بالا  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  پارامترهای لاتینگر هستند.  $V_{x,y}(x,y)$  پتانسیل محدود کننده در صفحه (x-y) است که با پتانسیل سهموی ناهمسانگرد تعریف می شود و حل معادله ویژه مقادری با معادله هامیلتونی ۴ بدون عبارت های غیرقطری در صفحه (x-y)، توابع موج نوسانگر هماهنگ می باشد [6].

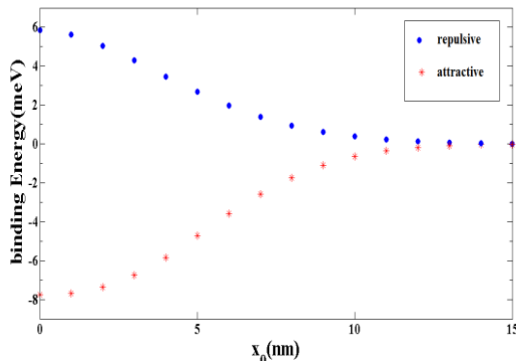
$$\Phi_{n_x, lh}(x) \Phi_{n_y, lh}(y) \quad , \quad \Phi_{n_x, hh}(x) \Phi_{n_y, hh}(y) \quad (3)$$

که  $n_x$  و  $n_y$  به ترتیب اعداد کوانتومی ناشی از محدودیت در راستای x و y هستند، شکل بهنجار تابع موج به صورت زیر است:

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده [۲ و ۱۰]

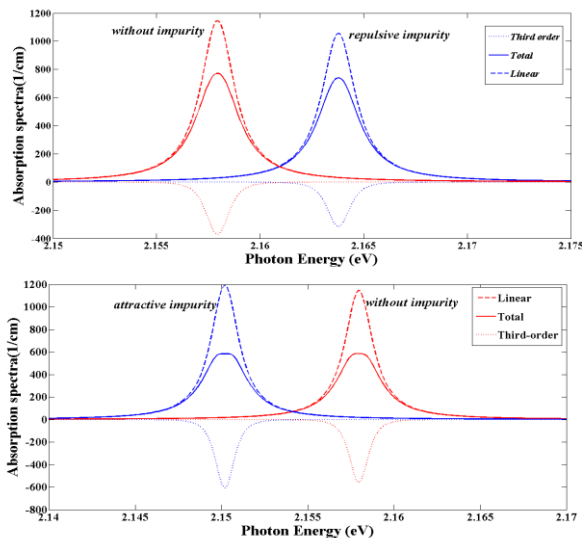
$1.5ps^{-1}$	$\Gamma_0$	1.518(eV)	شکاف انرژی
6.85	پارامتر لاتینگر ( $\gamma_1$ )	$0.067m_0$	جرم موثر
2.1	پارامتر لاتینگر ( $\gamma_2$ )	$3 \times 10^{16}(cm^{-3})$	چگالی حامل
2.9	پارامتر لاتینگر ( $\gamma_3$ )	3.2	ضریب شکست

هرچه فاصله ناخالصی از مرکز افزایش می‌یابد انرژی پیوندی برای ناخالصی دافعه کاهش و برای ناخالصی جاذبه افزایش می‌یابد و همچنین وقتی موقعیت ناخالصی به ۱۵ نانومتر (به اندازه شعاع نقطه کوانتومی) می‌رسد، انرژی پیوندی برای هر دو ناخالصی دافعه و جاذبه صفر می‌شود.



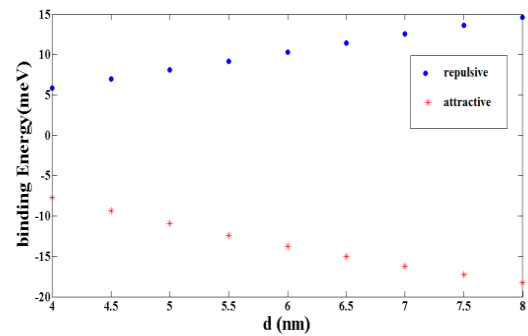
شکل ۳: تغییرات انرژی پیوندی به صورت تابعی از موقعیت ناخالصی، برای ناخالصی دافعه و جاذبه (گستره ناخالصی ۴ nm و قدرت ناخالصی 32 meV)

در شکل ۴ طیف جذبی نقطه کوانتومی به صورت تابعی از شدت فوتون تابشی نشان داده شده است که در حضور ناخالصی دافعه (جاذبه) به انرژی بالاتر جابجا می‌شود دلیل این رفتار این است که در حضور ناخالصی اختلاف بین سطوح انرژی افزایش (کاهش) می‌یابد.

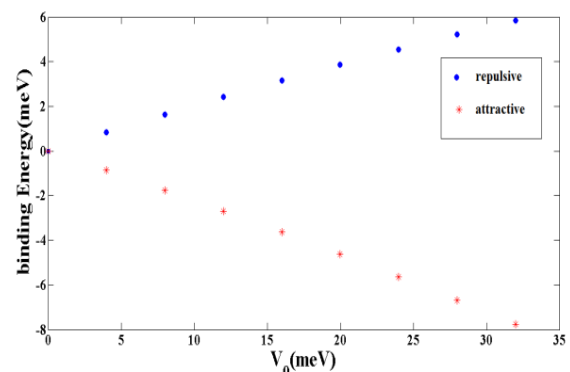


شکل ۴: طیف جذبی نقطه کوانتومی به صورت تابعی از شدت فوتون تابشی مقایسه حضور و عدم حضور ناخالصی دافعه و جاذبه (گستره ناخالصی ۴ nm و قدرت ناخالصی 32 meV و  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ )

در شکل ۱ و ۲ تغییرات انرژی پیوندی به ترتیب برحسب گستره ناخالصی و قدرت ناخالصی رسم شده است که روند تغییرات هر دو شکل یکی است؛ با افزایش گستره ناخالصی و قدرت ناخالصی انرژی پیوندی برای ناخالصی دافعه (جاذبه) افزایش (کاهش) می‌یابد.



شکل ۱: تغییرات انرژی پیوندی به صورت تابعی از گستره ناخالصی، برای ناخالصی دافعه و جاذبه (قدرت ناخالصی 32 meV و  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ )



شکل ۲: تغییرات انرژی پیوندی به صورت تابعی از قدرت ناخالصی، برای ناخالصی دافعه و جاذبه (گستره ناخالصی ۴ nm و  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ )

در شکل ۳ تغییرات انرژی پیوندی به صورت تابعی از موقعیت ناخالصی نشان داده شده است با توجه به شکل مشاهده می‌شود

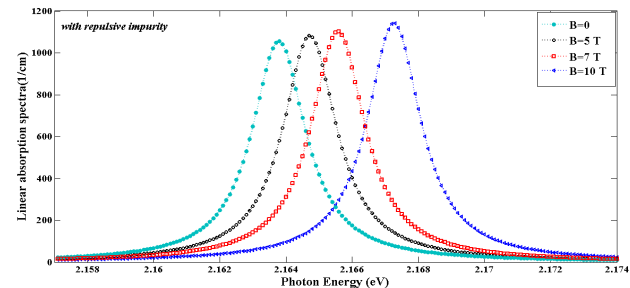
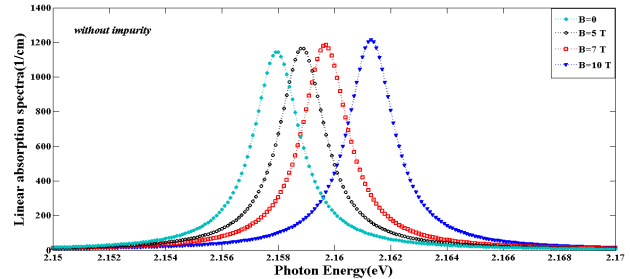
### نتیجه گیری

در این کار نشان داده شد که ضریب جذب خطی و غیرخطی بین نواری متاثر از ناخالصی و میدان مغناطیسی هستند بطوریکه با تغییر هریک از پارامترهای ناخالصی و میدان مغناطیسی، می توان ترازهای انرژی را جابجا کرد و به تبع آن می توان ضریب جذب نقطه کوانتومی را کنترل نمود و مقدار بیشینه ضریب جذب را در انرژی های دلخواه بدست آورد؛ بطوریکه در نقطه کوانتومی مورد فرض ما با افزایش قدرت ناخالصی و گستره ناخالصی دافعه (جاذبه) طیف جذبی به انرژی بالاتر(پایین تر) جابجا می شود همچنین اعمال میدان مغناطیسی در حضور ناخالصی باعث افزایش جذب و جابجایی آن به انرژی بالاتر می شود.

### مرجع ها

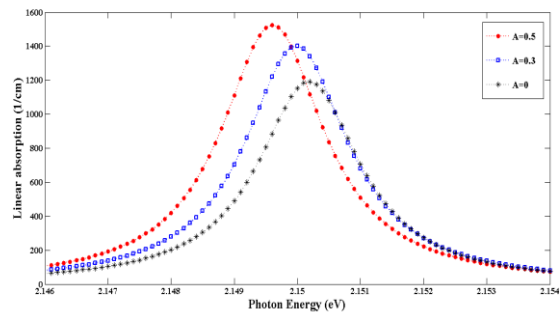
- [1] J. B. Xie, S. Li " *Electronic states of a hydrogenic donor impurity in semiconductor nanostructure*" Phys. Lett. A, **336** (2007) , 120-123.
- [2] C. M. S. Negi, S. K. Gupta, D. Kumar, J. Kumar " *Nonlinear optical absorption and refraction in a strained anisotropic multi-level quantum dot system*" Superlattices and Microstructures, **60** (2013) 462-474.
- [3] E. F. Schubert, " *Doping in III-V Semiconductors*" AT&T Bell Laboratories, Cambridge university press, (1993).
- [4] Sh. Li. Chuang " *Physics of Photonic Devices*" John Wiley, (2009)
- [5] J. M. Luttinger, W. Kohn " *Motion of electrons and holes in perturbed periodic fields*" Phys. Rev, **97** (1955) 869-883 .
- [6] J. Kumar, S. Kapoor, S. K. Gupta, P. K. Sen " *Theoretical investigation of the effect of asymmetry on optical anisotropy and electronic structure of Stranski-Krastanov quantum dots* " Phys. Rev. B, **74** (2006) 115326-115335
- [7] P. Hosseinpour, A. Soltani-Vala, J. Barvestani " *Effect of impurity on the absorption of a parabolic quantum dot with including Rashba spin-orbit interaction*" Physica E, **80** (2016) 48-52.
- [8] D. Ahn and S. L. Chuang " *Calculation of linear and nonlinear intersubband optical absorptions in a quantum well model with an applied electric field*" J. Appl. Phys. **62** (1987) 3052-3055.
- [9] E. O. Kane " *Band Structure of Indium Antimonide*" J. Phys. Chem. Solids, **1** (1957) 249-261
- [10] Sh. Sh. Li, J. B. Xia, Z. L. Yuan, Z. Y. Xu " *Effective-mass theory for InAs/GaAs strained coupled quantum dots*" Phys. Rev. B, **54** (1996) 11575-11581.

در شکل ۵ طیف جذب خطی نقطه کوانتومی در حضور و عدم حضور ناخالصی به صورت تابعی از شدت فوتون تابشی برای مقادیر مختلف از میدان مغناطیسی نشان داده شده است از شکل روشن است که با افزایش میدان مغناطیسی قله ضریب جذب به انرژی بالاتر جابجا می شود و مقدار آن افزایش پیدا کند.



شکل ۵: طیف جذب خطی نقطه کوانتومی به صورت تابعی از شدت فوتون تابشی برای مقادیر مختلف از میدان مغناطیسی (گستره ناخالصی ۴ nm و قدرت ناخالصی 32 meV) و  $(x_0, y_0) = (0, 0)$

در شکل ۶ طیف جذب خطی نقطه کوانتومی به صورت تابعی از شدت فوتون تابشی در حضور ناخالصی جاذبه، برای مقادیر مختلف از پارامتر ناهمسانگردی رسم شده است. با افزایش میزان ناهمسانگردی دیسک طیف جذبی به انرژی پایین تر جابجا می - شود و مقدار آن افزایش می یابد.



شکل ۶: طیف جذب خطی نقطه کوانتومی به صورت تابعی از شدت فوتون تابشی برای مقادیر مختلف ناهمسانگردی