

## تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر ایجاد تبهگنی ترازهای انرژی در پاد نقطه کوانتومی

مجید ابراهیمزاده<sup>۱</sup>، مهناز غفاری<sup>\*۲</sup>، لادن غفاری<sup>۳</sup>

۱. دکتری فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. کارشناسی ارشد فیزیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳. کارشناسی فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

## The Effect of External Magnetic Field on the Creation of Energy Levels Degeneracy in a Quantum Anti-Dot

M. Ebrahimzadeh<sup>1</sup>, M. Ghaffari<sup>\*2</sup>, L. Ghaffari<sup>3</sup>

1. Ph.D. of Physics, Shiraz University, Shiraz, Iran

2. M.A. of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3. B.A of Physics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2021/01/28 Accepted: 2021/02/21

Original Article

مقاله پژوهشی

### Abstract

In this paper, the effect of a magnetic field on 2p energy levels of  $[\text{Ga}]_{1-x}[\text{Al}]_x\text{As}/\text{GaAs}/[\text{Ga}]_{1-x}[\text{Al}]_x\text{As}$  quantum anti-dot has been investigated. To this aim, based on the perturbation theory and in the presence of an external magnetic field, the energy eigenvalue of the 2p state of this nano-structure is obtained. Then, on the basis of theoretical predictions and numerical calculations, it will be shown that the magnetic field does not always eliminate the degeneracies of energy levels and under certain conditions, the magnetic field itself is the cause of a new degeneracy in the energy levels. Furthermore, it is proved that changes in the height of the potential barrier will remove the degeneracy created after the application of the magnetic field.

### Keywords

Quantum Antidote, Magnetic Field, Perturbation Theory, Potential Barrier

### چکیده

در این مقاله تأثیر میدان مغناطیسی بر ترازهای انرژی  $2p$  در پاد نقطه کوانتومی  $[\text{Ga}]_{1-x}[\text{Al}]_x\text{As}/\text{GaAs}/[\text{Ga}]_{1-x}[\text{Al}]_x\text{As}$  بررسی می‌شود. بدین منظور ابتدا بر اساس نظریه اختلال و در حضور میدان مغناطیسی خارجی، ویژه مقادیر انرژی  $2p$  این نانو ساختار به دست آورده می‌شود. سپس بر اساس پیش‌بینی‌های تئوریو همچنین با محاسبات عددی نشان داده خواهد شد که میدان مغناطیسی همیشه باعث از بین رفتن تبهگنی ترازهای انرژی نمی‌شود و تحت شرایطی خاص، میدان مغناطیسی خود سبب به‌وجود آمدن تبهگنی جدید در ترازهای انرژی می‌شود. در ادامه نشان خواهیم داد تغییرات انرژی بر حسب ارتفاع سد پتانسیل باعث حذف کامل تبهگنی‌های ایجاد شده بعد از اعمال میدان مغناطیسی خواهد شد.

### واژه‌های کلیدی

پادنقطه کوانتومی، میدان مغناطیسی، نظریه اختلال، سد پتانسیل

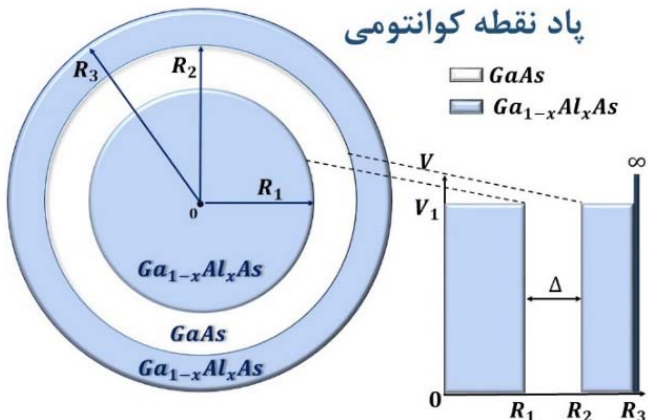
## مقدمه

در طی چند دهه اخیر با توجه به رشد سریع فناوری نانو، نانو ساختارهایی مانند نقاط کوانتومی<sup>۱</sup> و پاد نقاط کوانتومی<sup>۲</sup> به دلیل کاربرد آنها در دستگاه‌های فوتولتائیک، نانوایستیک و نانو الکترونیک، مورد توجه چشمگیر دانشمندان قرار گرفته است. این ساختارها را می‌توان به عنوان اتم‌های مصنوعی ساخته دست بشر طبقه‌بندی کرد؛ به طوری که حرکت الکترون‌ها از هر جهت محدود است. محدودیت حامل‌های بار منجر به ایجاد طیف انرژی گسسته و در نتیجه باعث ایجاد بسیاری از خصوصیات منحصر به فرد از جمله تغییر در رسانایی، خواص اپتیکی و ... در این ساختارها می‌گردد [۱-۸]. اخیراً ساختارهای اپتیکی و الکترونیکی نقاط و پاد نقاط کوانتومی با اشکال متفاوت (کروی، استوانه‌ای و ...) در حضور پتانسیل‌های متفاوت (متناهی، نامتناهی، گاوسی و ...) مورد مطالعه قرار گرفته است [۹-۱۲].

مطالعات نشان داده‌اند که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی از دیگر عواملی هستند که می‌توانند خواص فیزیکی این نانو ساختارها را تغییر دهند [۱۳-۱۸]. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده تا کنون، اعمال میدان مغناطیسی خارجی، باعث می‌شود که هر تراز انرژی به  $2l + 1$  زیر تراز شکافته شود که در اینجا  $l$  عدد کوانتومی مداری است. این امر باعث از بین رفتن تپه‌گی انرژی و ایجاد خطوط طیفی جدید می‌شود که تاثیر بسزایی در خواص فیزیکی نانو ساختارهای اشاره شده دارد. بنابراین از آنجا که با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، ترازهای انرژی و در نتیجه خواص فیزیکی تغییر می‌کند، مطالعه تاثیر اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر این نانو ساختارها، در دهه‌های اخیر به یک موضوع بسیار جالب و جذاب از نظر تئوری و تجربی، برای محققان تبدیل شده است [۱۹-۲۰]. در این مقاله اثر میدان مغناطیسی خارجی بر ترازهای انرژی پاد نقطه کوانتومی بررسی می‌شود. به این منظور در قسمت تئوری مبانی بر اساس نظریه اختلال ترازهای انرژی به دست می‌آیند و در قسمت سوم نتایج تجربی بر اساس محاسبات عددی مشخص می‌گردند و در انتها نیز نتیجه‌گیری علمی بیان می‌شود.

## تئوری

در شکل (۱) مدل نانو ساختار کروی پاد نقطه کوانتومی سه لایه  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  آورده شده است:



شکل ۱. پاد نقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$

که در آن شعاع هسته،  $R_1$  شعاع هسته،  $R_3$  شعاع کل و  $\Delta = R_2 - R_1$  می‌باشد.

در غیاب میدان مغناطیسی هامیلتونی برای سیستم بیان شده، با ناخالصی هیدروژنی در مرکز، هنگامی که الکترون با سد پتانسیل متناهی محدود شده است، به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۱]:

$$H = \frac{p^2}{2m^*} - \frac{ke^2Z}{\epsilon|\vec{r}|} + V_C(r) \quad (1)$$

بعد از اعمال میدان مغناطیسی، هامیلتونی این سیستم به صورت زیر تغییر می‌کند [۲۲]:

$$H = \frac{1}{2m^*} \left( \vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 - \frac{ke^2Z}{\epsilon|\vec{r}|} + V_C(r) \quad (2)$$

در اینجا  $\vec{p} = -i\hbar\nabla$  تکانه خطی و  $e$ ،  $m^*$  و  $\epsilon$  به ترتیب، بار الکترون، جرم مؤثر الکترون و ثابت دی الکتریک،  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  هستند و  $\vec{A}$  پتانسیل برداری است که می‌توان آن را به صورت  $\vec{A} = \frac{1}{2} \vec{B} \times \vec{r}$  نوشت.  $V_C(r)$

1. Quantum Dot
2. Quantum Antidot

که لاپلاسین در مختصات کروی به صورت زیر تعریف می شود [۲۳]:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] \quad (۸)$$

که

$$L^2 = -\hbar^2 \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] \quad (۹)$$

از این رو می توان نوشت:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) - \frac{L^2}{\hbar^2 r^2} \quad (۱۰)$$

و در نتیجه هامیلتونین  $H^0$  در رابطه (۷) به صورت زیر نوشته می شود:

$$H^0 = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) - \frac{L^2}{r^2} - \frac{2}{r} + V_C \quad (۱۱)$$

$H^I$  در رابطه (۶) جمله اختلالی است:

$$H^I = \gamma l_z + \frac{1}{4} \gamma^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (۱۲)$$

که در آن زاویه بین  $r$  و محور  $z$  است. معادله ویژه مقداری برای هامیلتونین مختل نشده  $H^0$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$H^0 \Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi) = E_{nl}^{(0)} \Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi) \quad (۱۳)$$

پتانسیل محدودیت کوانتومی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$V_C(r) = \begin{cases} V_1 & R \leq R_1 \\ V_0 & R_1 < R \leq R_2 \\ V_1 & R_2 < R \leq R_3 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن  $V_0$  و  $V_1$  ارتفاع سد پتانسیل هستند:

$$\begin{aligned} V_0 &= 0 \\ V_1 &= Q_C 1.247 \text{xeV} (V_1 = Q_C 239.81 \text{xRy}^*) \end{aligned} \quad (۴)$$

که دو پارامتر  $x$  و  $y$  غلظت آلومینیوم ( $Al$ ) و  $Q_C$  پارامتر جبران است ( $Q_C = 0.6$ ). با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی در راستای محور  $z$  داریم:

$$H = \frac{-\hbar^2 \nabla^2}{2m^*} + \frac{e^2 B^2 r^2 \sin^2 \theta}{8m^* c^2} + \frac{e \vec{B} l_z}{2m^* c} - \frac{ke^2 Z}{\varepsilon |\vec{r}|} + V_C(r) \quad (۵)$$

که در آن  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  و  $\theta$  زاویه بین  $r$  و محور  $z$  می باشد. اگر  $\gamma = \frac{a_0^* e B}{\hbar c}$  و  $a_0^* = \frac{4\pi \varepsilon \hbar^2}{m^* e^2}$  را به ترتیب به عنوان بزرگی میدان مغناطیسی، واحد فاصله و واحد انرژی موثر ریدبرگ در نظر بگیریم و همچنین در واحد ریدبرگ مقدار  $m_e = \frac{1}{2}$ ,  $e = \sqrt{2}$ ,  $\hbar = 1$ ,  $k = 1$  فرض کنیم آنگاه رابطه (۵) به رابطه (۶) زیر تبدیل می گردد:

$$H = -\nabla^2 + \frac{1}{4} \gamma^2 r^2 \sin^2 \theta + \gamma l_z - \frac{2}{r} + V_C(r) \quad (۶)$$

که  $H^0$  هامیلتونین مختل نشده است:

$$H^0 = -\nabla^2 - \frac{2}{r} + V_C \quad (۷)$$

که در اینجا  $\Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi)$  تابع موج بهنجار شده الکترون است که می‌تواند به دو قسمت شعاعی و زاویه‌ای، مانند زیر جدا شود:

که در اینجا  $\Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi)$  تابع موج بهنجار شده الکترون است که می‌تواند به دو قسمت شعاعی و زاویه‌ای، مانند زیر جدا شود:

$$\Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi) = R_{nl}^{(0)}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (۱۴)$$

که در اینجا  $\Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi)$  تابع موج بهنجار شده الکترون است که می‌تواند به دو قسمت شعاعی و زاویه‌ای، مانند زیر جدا شود:

که در اینجا  $\Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi)$  تابع موج بهنجار شده الکترون است که می‌تواند به دو قسمت شعاعی و زاویه‌ای، مانند زیر جدا شود:

$$E_{2,1,m} = \begin{cases} E_{2,1}^0 - \gamma + \frac{\gamma^2}{4} \langle 2,1|r^2|2,1 \rangle (1, -1 | \sin^2 \theta | 1, -1), & m = -1 \\ E_{2,1}^0 + \frac{\gamma^2}{4} \langle 2,1|r^2|2,1 \rangle (1, 0 | \sin^2 \theta | 1, 0), & m = 0 \\ E_{2,1}^0 + \gamma + \frac{\gamma^2}{4} \langle 2,1|r^2|2,1 \rangle (1, 1 | \sin^2 \theta | 1, 1), & m = +1 \end{cases} \quad (۱۵)$$

که در اینجا  $\Psi_{nlm}^{(0)}(r, \theta, \varphi)$  تابع موج بهنجار شده الکترون است که می‌تواند به دو قسمت شعاعی و زاویه‌ای، مانند زیر جدا شود:

$$E_{2,1,m} = \begin{cases} E_{2,1}^0 - \gamma + \frac{1}{5} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, & m = -1 \\ E_{2,1}^0 + \frac{1}{10} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, & m = 0 \\ E_{2,1}^0 + \gamma + \frac{1}{5} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, & m = +1 \end{cases} \quad (۱۶)$$

$$E_m^l = \begin{cases} -\gamma + \frac{1}{5} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, & m = -1 \\ \frac{1}{10} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, & m = 0 \\ \gamma + \frac{1}{5} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, & m = +1 \end{cases} \quad (۱۷)$$

همان گونه که مشاهده می‌شود، اعمال میدان مغناطیسی باعث شکافته شدن تراز  $2p$  به سه زیر تراز  $2p_{+1}$  با شیفیت انرژی  $(E_{+1}^l)$ ،  $2p_0$  با شیفیت انرژی  $(E_0^l)$  و  $2p_{-1}$  با شیفیت انرژی  $(E_{-1}^l)$  می‌شود. همانطور که معادله (۱۷) نشان می‌دهد،  $(E_{+1}^l)$  همیشه از  $(E_0^l)$  و  $(E_{-1}^l)$  بیشتر است، بنابراین بعد از اعمال میدان مغناطیسی، منحنی  $2p_{+1}$  همیشه از منحنی  $2p_0$  و  $2p_{-1}$  بالاتر قرار گرفته و هیچ برخوردی با این دو منحنی نخواهد داشت و در نتیجه باعث ایجاد تبهگنی جدیدی نخواهد شد. اما با دقت در معادله (۱۷) می‌توان دریافت که برای مقدار خاص  $\gamma = \gamma_c$ ،  $E_{-1}^l$  برابر با  $E_0^l$  شده و منحنی‌های  $2p_0$  و  $2p_{-1}$  برحسب  $\gamma$  با هم برخورد می‌کنند و این امر باعث به وجود آمدن یک تبهگنی جدید بعد از اعمال میدان مغناطیسی می‌شود. شرط ایجاد تبهگنی در تراز  $2p$  بعد از اعمال میدان مغناطیسی با معادله (۱۷) داده می‌شود:

$$E_0^l = E_{-1}^l \Rightarrow -\gamma + \frac{1}{5} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1} = \frac{1}{10} \gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1} \quad (۱۸)$$

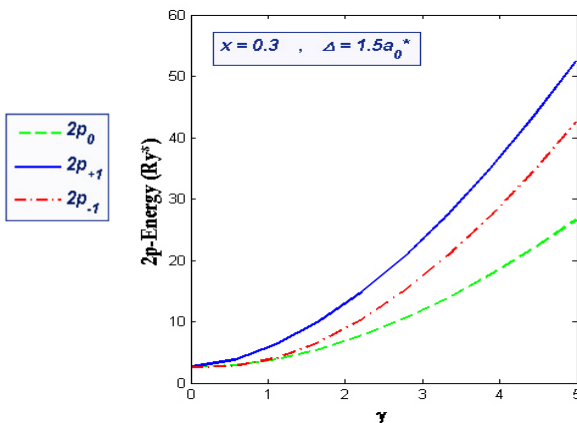
$$\gamma = \gamma_c = \frac{10}{\langle r^2 \rangle_{2,1}}$$

در این مقدار خاص  $\gamma$ ، انرژی برای  $2p_0$  و  $2p_{-1}$  یکسان است و آنها دوباره تبهگن می‌شوند و منحنی‌های آنها بر حسب  $\gamma$  دارای نقطه تلاقی در نقطه  $\gamma_c$  است. برای

جدول ۲. تغییرات انرژی تراز 2p بر حسب  $\gamma$  برای پاد نقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  انرژی در  $Ry^*$  ارائه شده است

$\gamma$	$2p_{-1}$	$2p_0$	$2p_{+1}$	$\gamma_c$
۰	۲/۵۹۲	۲/۵۹۲	۲/۵۹۲	۰/۹۳۵
۱	۳/۷۱۰	۳/۶۵۶	۵/۷۱۰	۰/۹۵۳
۲	۸/۸۲۶	۶/۷۸۷	۱۲/۸۲۶	۱/۰۰۸
۳	۱۷/۳۵۱	۱۱/۸۱۴	۲۳/۳۵۱	۱/۰۸۹
۴	۲۸/۷۰۹	۱۸/۵۰۲	۳۶/۷۰۹	۱/۱۷۲
۵	۴۲/۵۷۸	۲۶/۶۴۲	۵۲/۵۷۸	۱/۲۴۵

شکل (۲) تغییرات انرژی تراز 2p بر حسب  $\gamma$  را برای پاد نقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود اعمال میدان مغناطیسی در ابتدا باعث شکافته شدن تراز 2p به سه زیر تراز  $2p_{-1}$ ،  $2p_0$  و  $2p_{+1}$  و از بین رفتن کامل تبهگنی سه گانه این تراز می‌شود. همان گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود افزایش میدان مغناطیسی باعث افزایش انرژی هر سه زیر تراز  $2p_{-1}$ ،  $2p_0$  و  $2p_{+1}$  می‌شود که این افزایش در  $2p_{+1}$  همیشه بیشتر از دو تراز دیگر بوده و بنابراین منحنی این تراز هیچ‌گاه با دو تراز دیگر برخوردی نخواهد داشت و در نتیجه این تراز باعث به وجود آمدن تبهگنی جدیدی در اثر اعمال میدان مغناطیسی نمی‌شود. اما همان طور که در بخش تئوری رابطه (۱۸) پیش‌بینی شد با افزایش میدان مغناطیسی، به دلیل سرعت رشد بیشتر انرژی تراز  $2p_{-1}$  در مقایسه با انرژی تراز  $2p_0$  منحنی انرژی این تراز در نقطه‌ای با منحنی انرژی تراز  $2p_0$  برخورد کرده و در نقطه تلاقی این دو منحنی، انرژی‌های این ترازها با هم برابر شده و آنها در مقدار خاص  $\gamma_c$  دوباره تبهگن می‌شوند.



شکل ۲. تغییرات انرژی تراز 2P بر حسب  $\gamma$  با  $R_1 = 2.5a_0^*$ ،  $x = 0.3$  و  $R_3 = 5a_0^*$

$\gamma > \gamma_c$  منحنی  $2p_{-1}$  بالاتر از منحنی  $2p_0$  بوده و مقادیر بیشتری خواهد داشت.

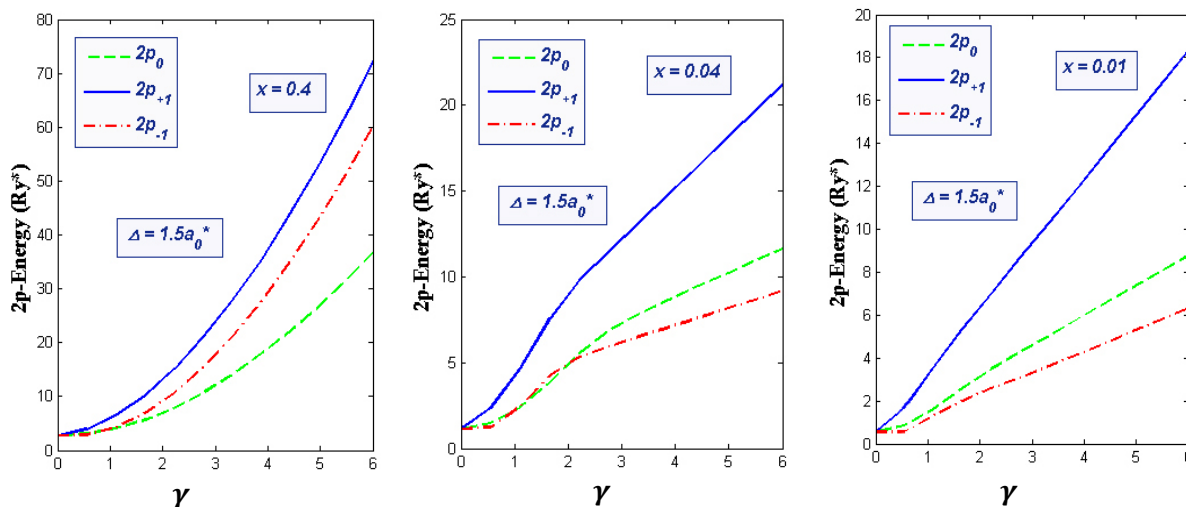
### نتایج تجربی

در این بخش به بررسی اثر میدان مغناطیسی بر تراز انرژی 2P پادنقاط کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  پرداخته می‌شود. نتایج محاسبات عددی به ازای مقادیر ثابت جدول (۱) ارائه شده است:

جدول ۱. مقادیر ثابت استفاده شده در محاسبات عددی

کمیت	نماد اندازه	کمیت	نماد	اندازه
جرم موثر	$m^*$	جرم الکترون	$m_0$	$0.067m_0$
ثابت دی‌الکتریک	$\epsilon$	ثابت دی‌الکتریک	$\epsilon_0$	$13.18\epsilon_0$
انرژی موثر ریدبرگ	$Ry^*$	شعاع موثر بور	$a_0^*$	$5.2meV$
چگالی حجمی	$\sigma_v$	سرعت نور در خلاء	$c$	$3 \times 10^{22}$

در جدول (۲) تغییرات انرژی 2P و مقادیر  $\gamma_c$  برای  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  به ازای  $R_1 = 2.5a_0^*$ ،  $R_3 = 5a_0^*$ ،  $\Delta = 1.5a_0^*$  و  $x = 0.3$  در محدوده تغییرات  $0 \leq \gamma \leq 5$  آورده شده است. وقتی که  $0 \leq \gamma \leq 5$  است در نتیجه محدوده  $\gamma_c$  به صورت  $0.935 \leq \gamma_c \leq 1.245$  می‌باشد و چون محدوده  $\gamma_c$  کاملاً در محدوده  $\gamma$  قرار دارد، بنابراین انتظار داریم که در نقطه‌ای بین ۰/۹۳۵ تا ۱/۲۴۵ یک برخورد بین دو منحنی  $2p_{-1}$  و  $2p_0$  رخ دهد و انرژی این دو تراز در این نقطه خاص دوباره تبهگن شود. که این موضوع آشکارا در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۳. تغییرات انرژی پاد نقطه کوانتومی بر حسب  $\gamma$  با  $R_1 = 2.5a_0^*$  و  $R_3 = 5a_0^*$  برای سه مقدار متفاوت از غلظت آلومینیوم  $x$  با ارتفاع سد پتانسیل

### بحث و نتیجه گیری

در این مقاله اثرات میدان مغناطیسی خارجی و ارتفاع سد پتانسیل بر ترازهای انرژی 2P پادنقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  بررسی شده است. بر اساس نظریه اختلال با به دست آوردن زیر ترازهای انرژی 2P پیش بینی شد که اعمال میدان مغناطیسی در ابتدا باعث شکافته شدن تراز 2p به سه زیر تراز  $2p_{-1}$ ،  $2p_0$  و  $2p_{+1}$  و از بین رفتن کامل تبهگنی سه گانه این تراز می شود. افزایش میدان مغناطیسی باعث افزایش انرژی هر سه زیر تراز  $2p_{-1}$  و  $2p_0$  و  $2p_{+1}$  می گردد که این افزایش باعث می شود منحنی انرژی تراز  $2p_{-1}$  در نقطه ای با منحنی انرژی تراز  $2p_0$  برخورد کرده و در نقطه تلاقی این دو منحنی، انرژی های این ترازها با هم برابر شده و آنها در مقدار خاص  $\gamma_c$  دوباره تبهگن گردند. تمامی محاسبات عددی نیز مبین این موارد بودند. در ادامه نشان داده شد که تغییر  $x$  یا غلظت آلومینیوم، که تنظیم کننده ارتفاع سد پتانسیل است، تأثیر مستقیمی در ایجاد و یا حذف تبهگنی به وجود آمده در پادنقطه کوانتومی دارد که می توان با کاهش غلظت آلومینیوم به طور کامل تبهگنی ایجاد شده را از بین برد.

از آنجا که در پاد نقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs$  بعد از اعمال میدان مغناطیسی، ترازهای انرژی در نقطه ای خاصی دوباره تبهگن می شوند، می توان با تغییر غلظت آلومینیوم (تغییر ارتفاع سد پتانسیل) برای از بین بردن کامل این تبهگنی به صورت زیر اقدام نمود (شکل (۳)).

همان طور که از شکل (۳) پیداست، تغییر  $x$  یا غلظت آلومینیوم، که تنظیم کننده ارتفاع سد پتانسیل است، تأثیر مستقیمی در ایجاد و یا حذف تبهگنی به وجود آمده در پادنقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  دارد. همان طور که در شکل (۳) دیده می شود برای  $x = 0.4$ ، نمودار زیر ترازهای انرژی دارای تبهگنی هستند که با کم شدن مقدار  $x$ ، ( $x = 0.01$ )، این تبهگنی از بین رفته و نهایتاً منحنی های انرژی کاملاً از هم فاصله گرفته و در مدل پادنقطه کوانتومی  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  هیچ تلاقی بین نمودارها مشاهده نمی شود و در نتیجه هیچ تبهگنی باقی نمی ماند.

## References

- [1] B. C. akir, Y. Yakar, and A. Ozmen, "Linear and nonlinear absorption coefficients of spherical quantum dot inside external magnetic field, *Physica B* 510, 86–91 (2017).
- [2] F. Rahimi, T. Ghaffary, Y. Naimi and H. Khajehazad, "Effect of magnetic field on energy states and optical properties of quantum dots and quantum antidots, *Opt. Quant. Electron.* 53, 47-62 (2021).
- [3] E. B. Al, E. Kasapoglu, H. Sari and I. S'okmen, "Zeeman splitting, Zeeman transitions and optical absorption of an electron confined in spherical quantum dots under the magnetic field, *Phil. Mag.* 101, 117-128 (2021).
- [4] V. A. Holovatsky, O. M. Voitsekhivska and M. Ya. Yakhnevych, "Effect of magnetic field on an electronic structure and intraband quantum transitions in multishell quantum dots, *Physica E* 93, 295–300 (2017).
- [5] C. Heyn and C. A. Duque, "Donor impurity related optical and electronic properties of cylindrical GaAs – AlxGa1-xAs quantum dots under tilted electric and magnetic fields, *Sci. Rep.* 10, 9155 (2020).
- [6] Gh. Safarpour, M. A. Izadi, M. Novzari and E. Niknam, "External electric field effect on the nonlinear optical properties of a laser dressed donor impurity in a GaAs spherical quantum dot confined at the center of a Ga1-xAlxAs cylindrical nano-wire, *Indian J. Pure Appl. Phys.* 53, 247-256 (2015).
- [7] H. Khajehazad, T. Ghaffary, M. Ebrahimzadeh, "Microwave Absorption Properties of Fe2O3/Paraffin Wax Nanocomposite, *Asian J. Chem.*, 25(13) 7651-7652, (2013).
- [8] H. Sari, E. Kasapoglu, S. Sakiroglu, I. S'okmen and C. A. Duque, "Impurity-related optical response in a 2D and 3D quantum dot with Gaussian confinement under intense laser field, *Phil. Mag.* 100, 619-641 (2020).
- [9] M. G. Barseghyan, H. M. Baghrmalyan, A. A. Kirakosyan and D. Laroze, "The transition from double to single quantum dot induced by THz laser field, *Physica E* 116, 113758 (2020).
- [10] D. Laroze, M. Barseghyan, A. Radu and A. A. Kirakosyan, "Laser driven impurity states in twodimensional quantum dots and quantum rings, *Physica B* 501, 1-4 (2016).
- [11] T. Ghaffary, M. Ebrahimzadeh, M.M. Gharahbeigi, L. Shahmandi, "Fabrication of iron nanowire arrays using nanoporous anodic alumina template, *Asian J. Chem.*, 24(7), 3237-3239, (2012).
- [12] Baser, P., Elagoz, S., Kartal, D.: "The effects of pressure and barrier height on donor binding energy in GaAs/Ga1-xAlxAs As cylindrical quantum well wires. *Physica B* 405, 3239–3249 (2010)
- [13] Çakır, B., Atav, Ülfet, Yakar, Y., Özmen, A.: "Calculation of Zeeman splitting and Zeeman transition energies of spherical quantum dot in uniform magnetic field. *Chem. Phys.* 475, 61–68 (2016)
- [14] Çakır, B., Yakar, Y., Özmen, A.: "Linear and nonlinear absorption coefficients of spherical quantum dot inside external magnetic field. *Physica B* 510, 86–91 (2017)
- [15] S. M. Bilankohi, M. Ebrahimzadeh, T. Ghaffary, M. Zeidiyam, "Scattering, absorption and extinction properties of Al/TiO2 core/shell nanospheres, *Indian Journal of Science and Technology*, 8(S9), 1–14 (2015).
- [16] Davatolhagh, S., Jafari, A.R., Vahdani, M.R.K.: "Oscillator strengths of the intersubband electronic transitions in the hydrogenic nano-antidots. *Superlattices Microstructures* 51, 62–72 (2012)
- [17] S. Ghajarpour-Nobandegani and M. J. Karimi, "Effects of hydrogenic impurity and external fields on the optical absorption in a ring-shaped elliptical

- quantum dot, *Opt. Mater.* 82, 75-80 (2018).
- [18] S. M. Bilankohi, M. Ebrahimzadeh, T. Ghaffary, Study of the properties of Au/Ag core/shell nanoparticles and its application, *Indian Journal of Science and Technology*, 8(S9), 31-33 (2015).
- [19] K. S. Rahul, N. Devaraj, R. K. Babu, S. Mathew, K. Salini and V. Mathew, Intraband absorption of D center in CdSe/CdS/CdSe/CdS multilayer quantum dot, *J. Phys. Chem. Solid.* 106, 99-104 (2017).
- [20] R. Khordad, H. Bahramiyan and S. A. Mohammadi, Influence of impurity on binding energy and optical properties of lens shaped quantum dots: Finite element method and Arnoldi algorithm, *Chin. J. Phys.* 54, 20-32 (2016).
- [21] P. Hosseinpour, A. Soltani-Vala and J. Barvestani, Effect of impurity on the absorption of a parabolic quantum dot with including Rashba spin-orbit interaction, *Physica E* 80, 48-52 (2016).
- [22] H. Ghaforyan, T. Ghaffary, S. Mohammadibilankohi, M. Hasanpour, M. Ebrahimzadeh, R. Pincak, M. Farkhan, Effect of ultrasound waves intensity on the removal of Congo red dye from the textile industry wastewater by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@TiO<sub>2</sub> core-shell nanospheres, *Bulgarian Chemical Communications*, 51(1), 10-15 (2019).
- [23] E. C. Niculescu and D. Bejan, Nonlinear optical properties of GaAs pyramidal quantum dots: Effects of elliptically polarized radiation, impurity, and magnetic applied fields, *Physica E* 74, 51-58 (2015).
- [24] E. Kasapoglu, F. Ungan, H. Sari, I. Sökmen, M. E. MoraRamos and C. A. Duque, Donor impurity states and related optical responses in triangular quantum dots under applied electric field, Superlattice. *Microst.* 73, 171-184 (2014).