

تأثیر شعاع و تعداد لایه‌های پادنقطه کوانتومی بر ترازهای انرژی در حضور میدان مغناطیسی

فاطمه رحیمی^۱، تورج غفاری^{۲*}، هادی خواجه آزاد^۳، یعقوب نعیمی^۴

۱. دکترای تخصصی، فیزیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۴. استادیار، گروه فیزیک، مرکز آموزش عالی لامرد، لامرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

The Effect of Radius Size and Number of Layers of Quantum Anti-Dots on Energy Levels in the Presence of the Applied Magnetic Field

F. Rahimi¹, T. Ghaffary^{2*}, H. Khajehazad³, Y. Naimi⁴

1. Ph.D., Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2. Associate Professor, Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3. Assistant Professor, Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

4. Assistant Professor, Department of Physics, Lamerd Higher Education Center, Lamerd, Iran

Received: 2020/10/22 Accepted: 2021/02/21

Original Article

مقاله پژوهشی

Abstract

In this paper, based on the perturbation theory, the energy eigenvalues of two, three, and four-layer quantum anti-dots are obtained. Using numerical calculations, the effects of the magnetic field, radius, and the number of layers of these nanostructures are investigated on 1S and 2P energy levels. The results of this study show that increasing the magnetic field, radius and the number of layers of quantum anti-dot increase the 1S and 2P energy levels. Further calculations show that the applied magnetic field sometimes causes new degeneracies, which can be seen in the 2P energy sublevels.

Keywords

Quantum Anti-Dot, Core Radius Size, Magnetic Field, Degeneracy of Energy Levels

چکیده

در این مقاله ابتدا بر اساس نظریه اختلال ویژه مقادیر انرژی پادنقطه‌های کوانتومی دو، سه و چهار لایه به دست آورده می‌شوند و سپس با استفاده از محاسبات عددی تأثیرات میدان مغناطیسی، شعاع و تعداد لایه‌های این نانوساختارها را بر ترازهای انرژی 1S و 2P مورد مطالعه قرار می‌دهیم. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که افزایش میدان مغناطیسی، افزایش شعاع و افزایش تعداد لایه‌های پادنقطه کوانتومی باعث افزایش ترازهای انرژی 1S و 2P می‌شوند. در ادامه محاسبات نیز مشخص می‌گردد که اعمال میدان مغناطیسی گاه خود باعث ایجاد تبهگنی‌های جدیدی می‌شود که این تبهگنی‌ها را می‌توان به وضوح در زیر ترازهای انرژی 2P مشاهده کرد.

واژه‌های کلیدی

پادنقطه کوانتومی، اندازه شعاع هسته، میدان مغناطیسی، تبهگنی ترازهای انرژی

مقدمه

محدودیت کوانتومی است و برای سیستم‌های مورد بحث به صورت زیر تعریف می‌شود:

A پاد نقاط کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$

$$V_C^A(r) = \begin{cases} V_1 & R \leq R_1 \\ V_0 & R_1 < R \leq R_2 \\ \infty & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

B پاد نقاط کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$

$$V_C^B(r) = \begin{cases} V_1 & R \leq R_1 \\ V_0 & R_1 < R \leq R_2 \\ V_1 & R_2 < R \leq R_3 \\ \infty & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

C پاد نقاط کوانتومی $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-y}Al_yAs$

$$V_C^C(r) = \begin{cases} V_1 & R \leq R_1 \\ V_0 & R_1 < R \leq R_2 \\ V_2 & R_2 < R \leq R_3 \\ V_0 & R_3 < R \leq R_4 \\ \infty & R > R_4 \end{cases} \quad (4)$$

که در آن V_0, V_1, V_2 ارتفاع سد پتانسیل هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$\begin{aligned} V_0 &= 0 \\ V_1 &= Q_C 1.247x eV (V_1 = Q_C 239.81x Ry^*) \\ V_2 &= Q_C 1.247y eV (V_2 = Q_C 239.81y Ry^*) \end{aligned} \quad (5)$$

که x و y غلظت‌های آلومینیوم (Al) و $Q_C = 0.6$ پارامتر جبران به حساب می‌آید.

رابطه ۱ در واحد موثر ریبرگ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = -\nabla^2 + \frac{1}{4}\gamma^2 r^2 \sin^2\theta + \gamma l_z - \frac{2}{r} + V_C(r) \quad (6)$$

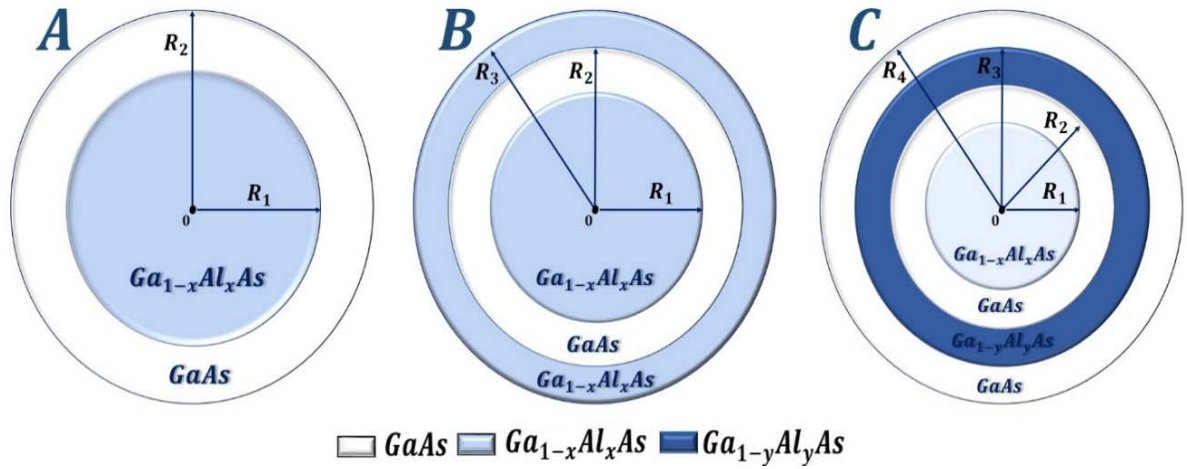
به موازات رشد صنعت نانو، ساختارهای جدید نانو مانند نقاط کوانتومی، پادنقاط کوانتومی، چاه‌ها و سیم‌های کوانتومی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۰ - ۱]. بخش زیادی از این تحقیقات روی محاسبه ساختارهای نواری، ترازهای انرژی، خصوصیات اپتیکی و گذارهای زیرترازی و بخش دیگری از مطالعات روی ساختار پادنقاط کوانتومی در حضور و غیاب میدان مغناطیسی بوده است. پادنقاط کوانتومی زمانی ساخته می‌شود که جای لایه‌ها در نقاط کوانتومی جابه‌جا شود [۱۳ - ۱۱]. ما در این مقاله، به بررسی تغییرات ترازهای انرژی پادنقاط کوانتومی کروی دولایه، سه لایه و چهارلایه با ناخالصی هیدروژنی در حضور میدان مغناطیسی خارجی و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته‌ایم. به منظور تحقیق در جنبه‌های مختلف پادنقاط کوانتومی این مقاله در بخش‌های زیر تنظیم و نگاشته شده است. در بخش ۲ مدل مورد مطالعه معرفی شده و به بیان روابط نظری پرداخته شده است. بخش ۳ به نتایج عددی اختصاص داده یافته و سرانجام در بخش آخر، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

تئوری

با اتصال $Ga_{1-x}Al_xAs, GaAs$ و $Ga_{1-y}Al_yAs$ همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده، می‌توان پادنقاط کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ ، پادنقاط کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ و پادنقاط کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-y}Al_yAs/GaAs$ را ایجاد کرد. در حضور میدان مغناطیسی هامیلتونی برای سیستم‌های بیان شده، با ناخالصی هیدروژنی در مرکز، هنگامی که الکترون با سد پتانسیل متناهی محدود شده است، به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۵]:

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

که $\vec{p} = -i\hbar \vec{\nabla}$ تکانه خطی و e, m^* و ϵ به ترتیب، بار الکترون، جرم مؤثر الکترون و ثابت دی الکتریک، \vec{A} پتانسیل برداری، c سرعت نور در خلاء و $V_C(r)$ پتانسیل



شکل ۱. شمایی از پادنقطه کوانتومی A پادنقطه کوانتومی B ، پادنقطه کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ و پادنقطه کوانتومی $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs/Ga_{1-y}Al_yAs/GaAs$ C

از جداسازی متغیرها به ترتیب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_{1,0,0} = E_{1,0}^0 + \frac{1}{6}\gamma^2 \langle r^2 \rangle_{1,0} \quad (10)$$

$$E_{2,1,m} = \begin{cases} E_{2,1}^0 - \gamma + \frac{1}{5}\gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, m = -1 \\ E_{2,1}^0 + \frac{1}{10}\gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, m = 0 \\ E_{2,1}^0 + \gamma + \frac{1}{5}\gamma^2 \langle r^2 \rangle_{2,1}, m = +1 \end{cases} \quad (11)$$

که در عبارات فوق از $Y_{00} = |0,0\rangle = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$

$$Y_{1,\pm 1} = \quad \text{و} \quad Y_{10} = -\sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos\theta$$

$\langle r^2 \rangle_{1,0} = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin\theta e^{\pm i\varphi}$ استفاده شده است و مقدار $\langle r^2 \rangle_{2,1} = \langle 2,1|r^2|2,1\rangle$ و $\langle 1,0|r^2|1,0\rangle$ چشمداشتی r^2 و $E_{1,0}^0$ و $E_{2,1}^0$ انرژی‌های سیستم در غیاب میدان مغناطیسی برای به ترتیب تراز $1s$ و تراز $2p$ است.

هامیلتونین سیستم‌های مورد بحث را می‌توان با استفاده از روش تفاضل محدود به یک ماتریس تبدیل کرد و سپس با قطری کردن ماتریس حاصل، ترازهای انرژی و

که در آن $\gamma = \frac{a_0^{*2} eB}{\hbar c}$ یک کمیت بدون بُعد برای کنترل بزرگی میدان مغناطیسی، $a_0^* = \frac{4\pi\epsilon\hbar^2}{m^*e^2}$ شعاع مؤثر بور به عنوان واحد فاصله، $Ry^* = \frac{m^*e^4}{32\pi^2\epsilon^2\hbar^2}$ انرژی مؤثر ریذبرگ و θ زاویه بین r و محور z می‌باشد. بر اساس نظریه اختلال، هامیلتونین سیستم را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد:

$$H = H^0 + H^I, \quad (7)$$

که H^0 هامیلتونین مختل نشده:

$$H^0 = -\nabla^2 - \frac{2}{r} + V_C \quad (8)$$

و H^I جمله اختلالی است:

$$H^I = \gamma l_z + \frac{1}{4}\gamma^2 r^2 \sin^2\theta \quad (9)$$

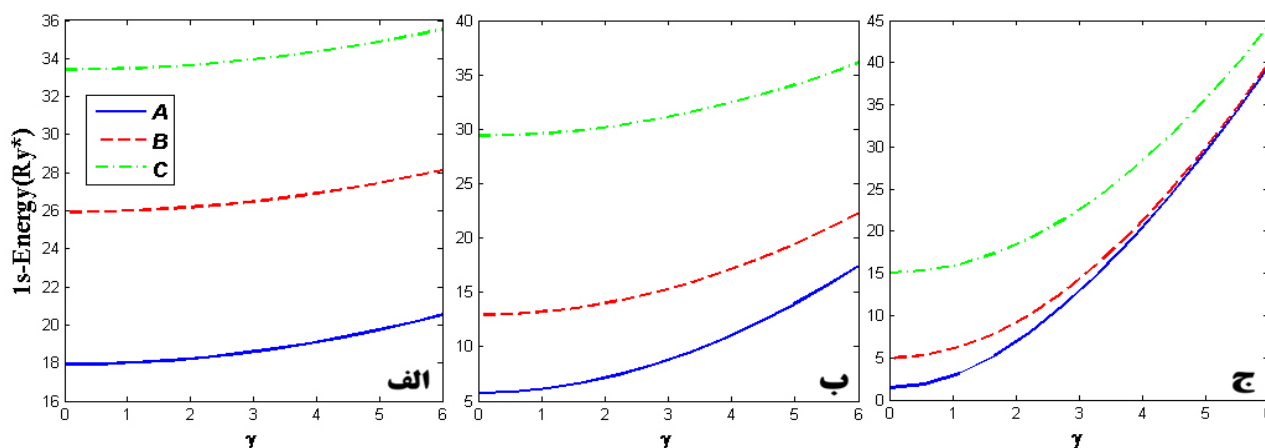
اگر $|1,0,0\rangle$ ویژه حالت هامیلتونی H^0 برای تراز $1s$ باشد و $|2,1,m\rangle$ با $m = -1, 0, +1$ ویژه حالت هامیلتونی H^0 برای تراز $2p$ باشد، آنگاه وقتی H^0 با هامیلتونی مختل H^I می‌شود، تا مرتبه اول اختلال، انرژی $1s$ و $2p$ با استفاده

$10.4nm$ و انرژی موثر ریذبرگ $Ry^* = 5.2mev$ است $Q_C = 0.6, y=0.3, x=0.3$.

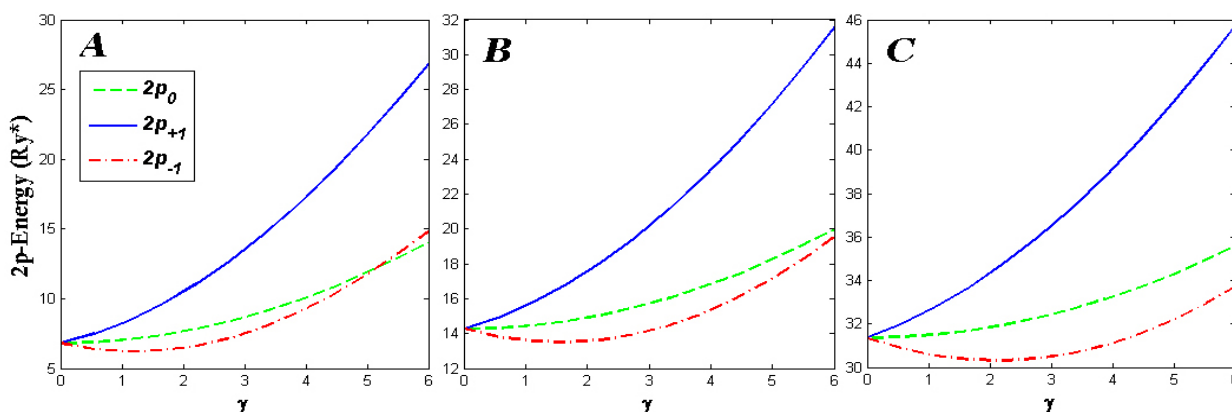
به منظور مقایسه تغییرات ترازهای انرژی سه مدل پاد نقطه کوانتومی معرفی شده تحت تاثیر میدان مغناطیسی با یکدیگر، در ادامه جدول (۱) و شکل‌های (۲) تا (۵)، ارائه

توابع موج مربوط به آن را به دست آورد و به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر ترازهای انرژی این سیستم‌ها پرداخته و آنها را با هم مقایسه کرد.

نتایج عددی



شکل ۲. تغییرات انرژی تراز 1s بر حسب γ برای (الف) شعاع هسته $0.5a_0^*$ و شعاع کل $1a_0^*$ ، (ب) شعاع هسته $1a_0^*$ و شعاع کل $2a_0^*$ و (ج) شعاع هسته $2a_0^*$ و شعاع کل $4a_0^*$



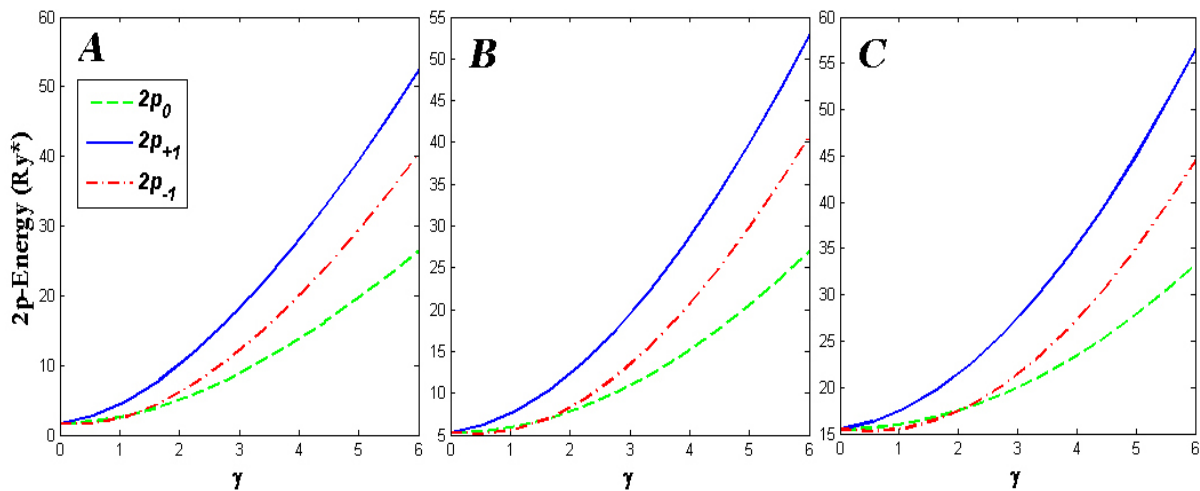
شکل ۳. تغییرات انرژی تراز 2P بر حسب γ برای شعاع هسته $0.5a_0^*$ و شعاع کل $1a_0^*$

شده است.

با فرض اینکه در مدل A، R_1 شعاع هسته، R_2 شعاع کل، در مدل B، R_1 شعاع هسته، R_3 شعاع کل و $\Delta = R_2 - R_1$ و در مدل C، R_1 شعاع هسته، R_4 شعاع کل، $\Delta_1 = R_2 - R_1$ و $\Delta_2 = R_4 - R_3$ باشد،

در این بخش نتیجه محاسبات عددی ما به ازای مقادیر ثابت زیر ارائه شده است.

جرم موثر الکترون $m^* = 0.067m_0$ ($m_0 = 9.109 \times 10^{-31}$ کیلوگرم) و ثابت دی الکتریک $\epsilon = 13.18\epsilon_0$ ، بنابراین شعاع موثر بور a_0^*



شکل ۴. تغییرات انرژی تراز 2P بر حسب γ برای شعاع هسته $1a_0^*$ و شعاع کل $2a_0^*$

جدول ۱. تغییرات انرژی $2p_{+1}$ در سه مقدار متفاوت شعاع هسته و شعاع کل برای سه مدل پادنقطه کوانتومی

γ	شعاع هسته: $2a_0^*$ و شعاع کل: $4a_0^*$			شعاع هسته: $1a_0^*$ و شعاع کل: $2a_0^*$			شعاع هسته: $0.5a_0^*$ و شعاع کل: $1a_0^*$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
۱	۵۶/۶۱۶	۳۲/۹۲۲	۴۱/۱۳۶	۶/۸۱۴	۱۴/۲۷۲	۳۱/۳۶۲	۱/۶۴۹	۵/۲۵۷	۱۵/۴۶۰
۲	۲۴/۴۰۷	۳۴/۰۰۲	۴۲/۲۲۰	۸/۲۲۷	۱۵/۵۹۳	۳۲/۵۹۸	۴/۳۵۳	۷/۵۲۰	۱۷/۴۵۶
۳	۲۵/۹۸۶	۳۵/۲۴۲	۴۳/۴۷۱	۱۰/۴۵۸	۱۷/۵۵۳	۳۴/۳۰۶	۱۰/۱۰۲	۱۲/۲۶۵	۲۱/۴۳۶
۴	۲۷/۴۴۸	۳۶/۶۴۱	۴۴/۸۸۸	۱۳/۴۸۰	۲۰/۱۴۳	۳۶/۴۸۰	۱۸/۱۳۲	۱۹/۳۶۳	۲۷/۳۷۹
۵	۲۹/۰۹۳	۳۸/۱۹۸	۴۶/۴۶۸	۱۷/۲۵۱	۲۳/۳۵۰	۳۹/۱۱۱	۲۷/۹۴۲	۲۸/۶۱۷	۳۵/۲۴۵
۶	۳۰/۹۱۹	۳۹/۹۱۳	۴۸/۲۰۹	۲۱/۷۱۵	۲۷/۱۵۵	۴۲/۱۸۶	۹۳/۳۵۴	۳۹/۷۹۴	۴۴/۹۷۳
۷	۳۲/۹۲۴	۴۱/۷۸۲	۵۰/۱۰۸	۲۶/۸۰۱	۳۱/۵۳۴	۴۵/۶۸۸	۵۲/۲۵۹	۵۲/۶۵۸	۵۶/۴۳۴

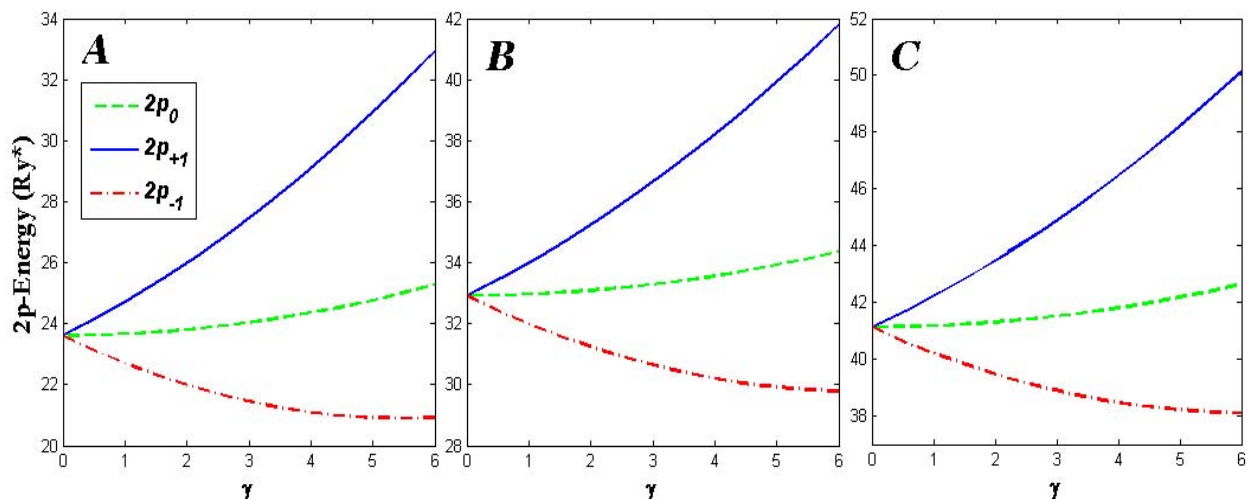
شکل (۲) تغییرات انرژی تراز 1s بر حسب γ را برای سه اندازه مختلف از مدل‌های A، B و C پادنقطه کوانتومی نشان می‌دهد. شکل (۲) الف در شعاع هسته $0.5a_0^*$ و شعاع کل $1a_0^*$ ، شکل (۲) ب در شعاع هسته $1a_0^*$ و شعاع کل $2a_0^*$ و شکل (۲) ج در شعاع هسته $2a_0^*$ و شعاع کل $4a_0^*$ رسم شده است. نمودارهای آبی مربوط به مدل A، نمودارهای قرمز مربوط به مدل B و نمودارهای سبز مربوط به مدل C می‌باشند. شکل (۲) به وضوح نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها در هر سه شعاع بررسی شده، باعث افزایش انرژی تراز 1s پادنقطه کوانتومی می‌شود. با توجه به ثابت بودن شعاع هسته و شعاع کل در هر سه مدل، افزایش تعداد لایه‌ها در پاد

مقادیر شعاع‌های انتخاب شده در جدول (۱) و شکل‌های (۲) تا (۵) به صورت زیر انتخاب شده‌اند.

شعاع هسته: $0.5a_0^*$ و شعاع کل: $1a_0^*$
 $\Delta = 0.25a_0^*$: B و $\Delta_1 = 0.15a_0^*$: C و $\Delta_2 = 0.25a_0^*$
 شعاع هسته: $1a_0^*$ و شعاع کل: $2a_0^*$
 $\Delta = 0.5a_0^*$: B و $\Delta_1 = 0.25a_0^*$: C و $\Delta_2 = 0.25a_0^*$
 شعاع هسته: $2a_0^*$ و شعاع کل: $4a_0^*$
 $\Delta = 1a_0^*$: B و $\Delta_1 = 0.5a_0^*$: C و $\Delta_2 = 0.5a_0^*$

پتانسیل به دلیل افزایش تعداد لایه‌ها است. در شکل (۴) و شکل (۵) که به ترتیب برای شعاع هسته $1a_0^*$ ، شعاع کل $2a_0^*$ و شعاع هسته $2a_0^*$ ، شعاع کل $4a_0^*$ رسم شده‌اند نیز مشاهده می‌شود که افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش انرژی تراز $2P$ پادنقطه کوانتومی می‌شود. به علاوه در شکل (۴) برای مدل A یک برخورد بین منحنی‌های $2p_0$ و $2p_{-1}$ در حدود $\gamma = 5.2$ مشاهده می‌شود که نشان دهنده وجود یک تبهگنی در این مقدار از γ است. با افزایش تعداد لایه‌ها ترازهای انرژی از هم فاصله گرفته و برای این محدوده از γ ، تبهگنی در مدل‌های B و C مشاهده نمی‌شود. با دقت بیشتر در شکل (۴) و میزان شیب نمودارها، می‌توان دریافت که افزایش تعداد لایه‌ها باعث می‌شود که نقطه برخورد بین منحنی‌های $2p_{-1}$ و

نقطه کوانتومی باعث کاهش عرض چاه پتانسیل و در نتیجه افزایش انرژی می‌شود. از طرف دیگر با مقایسه مقدار انرژی در غیاب میدان مغناطیسی یا $\gamma = 0$ مشاهده می‌شود که افزایش شعاع باعث افزایش انرژی در مدل‌های مورد بررسی می‌شود. از طرفی با توجه به شکل (۲) دیده می‌شود که افزایش میدان باعث افزایش انرژی تراز $1s$ در هر سه مدل پادنقطه کوانتومی و برای هر سه شعاع بررسی شده، می‌شود. با توجه به شکل (۲) با افزایش شعاع پادنقطه کوانتومی، میزان تغییرات انرژی به دلیل اعمال میدان مغناطیسی نیز بیشتر شده و پادنقطه کوانتومی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات میدان دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که حساسیت نسبت به تغییرات میدان مغناطیسی با افزایش تعداد لایه‌های



شکل ۵. تغییرات انرژی تراز $2P$ بر حسب γ برای شعاع هسته $2a_0^*$ و شعاع کل $4a_0^*$

$2p_0$ به ازای مقادیر بزرگ‌تری از γ رخ دهد. که این موضوع به وضوح در شکل (۵) قابل مشاهده است. همچنین با مقایسه شکل‌های (۳) تا (۵) درمی‌یابیم که افزایش شعاع پادنقطه کوانتومی در هر سه مدل باعث می‌شود که تبهگنی در γ های کمتری رخ دهد. مقادیر دقیق انرژی تراز $2p_{+1}$ برای هر سه مدل A، B و C پادنقطه کوانتومی برای سه مقدار مختلف از شعاع هسته و پوسته در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به جدول (۱) به صورت دقیق می‌توان مشاهده کرد که افزایش تعداد

پادنقطه کوانتومی، کاهش می‌یابد.

شکل (۳) تغییرات انرژی تراز $2P$ بر حسب γ را برای مدل‌های A، B و C پادنقطه کوانتومی در شعاع هسته $0.5a_0^*$ و شعاع کل $1a_0^*$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد که اعمال میدان مغناطیسی باعث شکافته شدن تراز $2P$ به سه زیرتراز $2p_0$ ، $2p_{-1}$ و $2p_{+1}$ می‌شود. از طرفی شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش انرژی تراز $2P$ پادنقطه کوانتومی می‌شود. که این امر به دلیل کاهش عرض چاه

مشخصاً افزایش تعداد لایه‌ها که معادل با کاهش عرض چاه پتانسیل است، باعث افزایش ترازهای انرژی $1S$ و $2P$ شده است. همچنین افزایش شعاع نیز باعث افزایش انرژی این ترازها می‌گردد. از طرفی با مقایسه زیر ترازهای انرژی $2P$ در می‌یابیم که در حضور میدان مغناطیسی، افزایش شعاع پادنقطه کوانتومی باعث ایجاد تبهگنی‌های جدید در این تراز انرژی می‌گردد.

لایه‌ها برای هر سه شعاع انتخاب شده، باعث افزایش انرژی تراز $2p+1$ می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نظریه اختلال ویژه مقادیر انرژی برای پادنقطه کوانتومی محاسبه گردید. در حضور میدان مغناطیسی تاثیر شعاع و تعداد لایه‌های پادنقطه‌های کوانتومی دو، سه و چهار لایه بر روی ترازهای انرژی $1S$ و $2P$ نشان داده شد. همان گونه که از نتایج بر می‌آید

References

- [1] R. Betancourt-Riera, R. Betancourt-Riera, L.A. Ferrer-Moreno, A.D. Sañu-Ginarte, Theory of electron Raman scattering in a semiconductor core/shell quantum well wire, *Physica B*. 563 (2019) 93–100.
- [2] L. Van-Tan, T. Van Thang, N. Duy Vy, H. Thien Cao, Spin polarization and temperature dependence of electron effective mass in quantum wires, *Physics Letters A*. 383 (2019) 2110–2113.
- [3] K. Jaya Bala, A. John Peter, C. W. Lee, Interband and intersubband optical transition energies in a $Ga_{0.7}In_{0.3}N/GaN$ quantum dot, *Optik*. 183 (2019) 1106–1113.
- [4] Y. Naimi, A.R. Jafari, Oscillator strengths of the intersubband electronic transitions in the multi-layered nano-antidots with hydrogenic impurity, *J. Comput. Electron.* 11(2012) 414-420.
- [5] L. Su, B. Liang, Y. Wang, Q. Yuan, Q. Guo, S. Wang, G. Fu, D.L. Huffaker, Y.I. Mazur, M.E. Ware, Y. Maidaniuk, G.J. Salamo, Abnormal photoluminescence for $GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ quantum dot-ring hybrid nanostructure grown by droplet epitaxy, *Journal of Luminescence*. 195 (2018) 187–192.
- [6] K.A. Rodríguez-Magdaleno, R. Pérez-Álvarez, J.C. Martínez-Orozco, Intra-miniband absorption coefficient in $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ core/shell spherical quantum dot, *Journal of Alloys and Compounds*. 736 (2018) 211–215.
- [7] H. Ghaforyan, M. Ebrahimzadeh, T. Ghaffary, H. Rezazadeh, ZS. Jahromi, Microwave absorbing properties of Ni nanowires grown in nanoporous anodic alumina templates, *Chinese Journal of Physics* 52 (1), 233-238.
- [8] F.K. Boz, B. Nisanci, S. Aktas, S.E. Okan, Energy levels of $GaAs/Al_xGa_{1-x}As/AlAs$ spherical quantum dot with an impurity, *Applied Surface Science*. 387 (2016) 76–81.
- [9] E. Sadeghi, G. Rezaie, Effect of magnetic field on the impurity binding energy of the excited states in spherical quantum dot, *Pramana*. 75 (2010) 749–755,.
- [10] V. Pavlovi, M. Susnjar, K. Petrovi, L. Stevanovi, Electromagnetically induced transparency in a multilayered spherical quantum dot with hydrogenic impurity, *Optical Materials*. 78 (2018) 191-200.
- [11] 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 (2015) 31-33.
- [12] Y. Naimi, A.R. Jafari, Optical properties of quantum dots versus quantum antidots: Effects of hydrostatic pressure

- and temperature, *Journal of Computational Electronics*. 13 (2014) 666-672.
- [13] T. Ghaffary, M. Ebrahimzadeh, MM. Gharahbeigi, L. Shahmandi, Fabrication of iron nanowire arrays using nanoporous anodic alumina template, *Asian Journal of Chemistry* 24 (7), 3237.
- [14] A.R. Jafari, Y. Naimi, Linear and nonlinear optical properties of multilayered spherical nano-systems with donor impurity in the center, *J. Comput. Electron.* 12 (2013) 36-42.
- [15] G.V.B. de Souza, A. Bruno-Alfonso, Finite-difference calculation of donor energy levels in a spherical quantum dot subject to a magnetic field, *Physica E*. 66 (2015) 128-132.