

مطالعه خواص اپتیکی خطی و غیرخطی مولکول‌های نقطه کوانتومی: شفافیت القایی تونل‌زنی

قباد حیدرپور^۱، نادر دانش‌فر^۱

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی:

gh.heydarpour@stu.razi.ac.ir

ndaneshfar@razi.ac.ir

چکیده

در این مقاله، خواص اپتیکی خطی و غیرخطی مولکول‌های نقطه کوانتومی متشکل از دو نقطه کوانتومی و همچنین سه نقطه کوانتومی که به ترتیب مولکول نقطه کوانتومی دوتایی (DQD)^۱ و مولکول نقطه کوانتومی سه‌تایی (TQD)^۲ نامیده می‌شوند، با استفاده از روش دامنه احتمال مورد مطالعه قرار می‌گیرند و نتایج بدست آمده با هم مقایسه می‌شوند. با حل معادلات حالت این سامانه‌ها در تصویر برهمکنش، تحت تقریب موج چرخان و تقریب دوقطبی، پذیرفتاری‌های مرتبه اول و سوم برای مولکول‌های نقطه کوانتومی دوگانه و سه‌گانه محاسبه می‌شوند. همچنین در مولکول‌های نقطه کوانتومی مانند DQD و TQD پدیده‌ای که شفافیت القایی تونل‌زنی نامیده می‌شود و مشابه با شفافیت القایی الکترومغناطیس است بررسی می‌شود. اثر پارامترهای کلیدی سامانه همچون جفت‌شدگی‌های تونلی بین نقاط کوانتومی و شدت تونل‌زنی روی پاسخ اپتیکی خطی و غیرخطی مولکول‌های نقطه کوانتومی چندگانه DQD و TQD مطالعه می‌شود. نشان داده می‌شود که مکان و پهنای پنجره ایجاد شده شفافیت القایی تونل‌زنی در مولکول‌های نقطه کوانتومی دوتایی و سه‌تایی را می‌توان با تغییر پارامترهای فیزیکی تنظیم کرد.

واژه‌های کلیدی: مولکول نقطه کوانتومی، تونل‌زنی، شفافیت القایی تونل‌زنی

۱. مقدمه

می‌دهند که باعث می‌شود از آنها به طور کلی به عنوان "اتم‌های مصنوعی" نام ببرند. ویژگی‌های فوق‌العاده نقاط کوانتومی مانند بازده کوانتومی بالا، ضریب تحریک بزرگ‌تر، طیف انتشار کوچک‌تر، اندازه و طول موج انتشار وابسته به ترکیب، کاربردهای گسترده‌ای در بسیاری از زمینه‌ها دارد [۱،۲]. بنابراین نقاط

نقطه کوانتومی^۳ (QD) نیم‌رسانا یک نانوساختار است که در آن حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها در هر سه جهت فضایی محدود می‌شود. نتیجه چنین محصور شدنی این است که در قیاس با اتم‌ها، نقطه‌های کوانتومی یک طیف انرژی گسسته را نشان

¹ Double Quantum Dot

² Triple Quantum Dot

³ Quantum Dot

کوانتومی نیمه هادی دارای مزایای مهمی نسبت به اتم‌های واقعی از نظر کاربرد در فناوری‌های مانند نانو الکترونیک و نانو فوتونیک هستند. هنگامی که نقطه کوانتومی یک فوتون را جذب می‌کند، یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته می‌شود و حفره‌ای در جای خود باقی می‌گذارد. جفت الکترون-حفره یک شبه ذره جدید به نام اکسایتون را تشکیل می‌دهد. همچنین از ترکیب دو یا چند نقطه کوانتومی، مولکول‌های نقطه کوانتومی (QDMs)¹ تشکیل می‌شوند. به عبارت دیگر، وقتی دو یا چند نقطه کوانتومی که توسط تونل‌زنی جفت شوند، می‌توانند مولکول‌های نقطه کوانتومی را تشکیل دهند، که در آن می‌توان تونل‌زنی الکترون‌ها یا حفره‌ها را توسط یک میدان الکتریکی خارجی کنترل کرد و ساختار چند سطحی از حالت‌های برانگیخته ایجاد کرد و برای بررسی پدیده‌های هم‌دوسی کوانتومی نظیر تقسیم اتلر-تاونز و سه‌گانه مولو [۳]، شفافیت القایی الکترومغناطیسی² (EIT) [۴]، فلورسانس تشدید [۵،۶] و همچنین نور کند کنترل شده [۷] به کار برد.

شفافیت القایی الکترومغناطیسی که نقش مهمی در برهمکنش نور با ماده ایفا می‌کند یک پدیده اپتیکی است که امکان عبور پرتو لیزر را از طریق یک محیط چگال با استفاده از یک پرتو لیزر را فراهم می‌کند. پدیده اپتیکی دیگری که می‌تواند برای حالت‌های برانگیخته اکسایتونیک رخ دهد و مشابه شفافیت القایی الکترومغناطیسی در یک سامانه‌ی اتمی سه سطحی است، شفافیت القایی تونل‌زنی³ (TIT) نامیده می‌شود. در این زمینه، بورژس و همکارانش طرحی را برای ایجاد شفافیت القایی با استفاده از تونل‌زنی در یک مولکول نقطه کوانتومی متشکل از دو نقطه کوانتومی پیشنهاد کردند که شفافیت القایی تونل‌زنی نامیده می‌شود و نشان دادند که از طریق TIT، خواص اپتیکی محیط‌های این دو نقطه کوانتومی را می‌توان با استفاده از گیت‌های الکتریکی اصلاح کرد [۸]. در پژوهش‌های دیگری، شفافیت القایی تونل‌زنی و همچنین شفافیت القایی تونل‌زنی دوگانه در مولکول‌های نقطه کوانتومی بررسی شده است [۹،۱۰]. در این مقاله، جذب و پاشندگی خطی و همچنین جذب و پاشندگی غیرخطی یک

۲. مدل و تئوری مسئله

فرض کنید یک مولکول نقطه کوانتومی متشکل از دو یا سه نقطه کوانتومی که تحت تابش یک موج الکترومغناطیسی با فرکانس ω_p و دامنه E_p قرار می‌گیرد که بعنوان میدان لیزر کاوشگر (پروب) شناخته می‌شود. در شکل‌های الف و ب ساختار اتمی مولکول نقطه کوانتومی دوتایی متشکل از دو نقطه کوانتومی (DQD) و مولکول نقطه کوانتومی سه‌تایی متشکل از سه نقطه کوانتومی (TQD) نشان داده شده است. در غیاب میدان لیزر هیچ اکسایتونی در داخل نقاط کوانتومی نداریم، که مطابق با حالت $|0\rangle$ است. با اعمال میدان لیزری، یک اکسایتون مستقیم در داخل نقطه کوانتومی اول بوجود می‌آید که با حالت $|1\rangle$ نشان داده شده است [۱۱]. تحت جفت شدگی تونلی الکترون می‌تواند از نقطه کوانتومی اول به نقطه کوانتومی دوم (شکل الف) و برای مولکول نقطه کوانتومی متشکل از سه نقطه کوانتومی (شکل ب) می‌تواند از نقطه کوانتومی دوم به نقطه کوانتومی سوم تونل بزند و اکسایتون غیرمستقیم را ایجاد کند، حالت‌هایی که در شکل ۱ به ترتیب با $|2\rangle$ و $|3\rangle$ نشان داده شده‌اند.

³ Tunneling Induced Transparency

¹ Quantum Dot Molecules

² Electromagnetically Induced Transparency

الکتريکی اعمالی هستند. علاوه بر این، δ_p و δ_1 و δ_2 به ترتیب ناکوکی (نامیزانی) ناشی از میدان لیزر کاوشگر و جفت‌های تونل‌زنی را نشان می‌دهند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\begin{aligned} \delta_p &= \omega_{10} - \omega_p \\ \delta_1 &= \delta_p - \omega_{12} \\ \delta_2 &= \delta_p - \omega_{12} - \omega_{23} \end{aligned} \quad (2)$$

که ω_p فرکانس میدان کاوشگر و ω_{mn} فرکانس انتقال بین حالت‌های $|m\rangle$ و $|n\rangle$ است. با استفاده از روش دامنه احتمال و با توجه به اینکه بردار حالت وابسته به زمان بصورت زیر می‌باشد [۱۰]:

$$|\psi_i(t)\rangle = \sum_{i=0}^3 c_i(t) |i\rangle \quad (3)$$

با جایگذاری روابط (۱) و (۳) در معادله شرودینگر وابسته به زمان و استفاده از نظریه ویسکوف-ویگنر^۲ [۱۱] معادلات دینامیکی را برای دامنه‌های احتمال در تصویر برهمکنش به صورت زیر بدست می‌آیند [۱۰، ۱۳]:

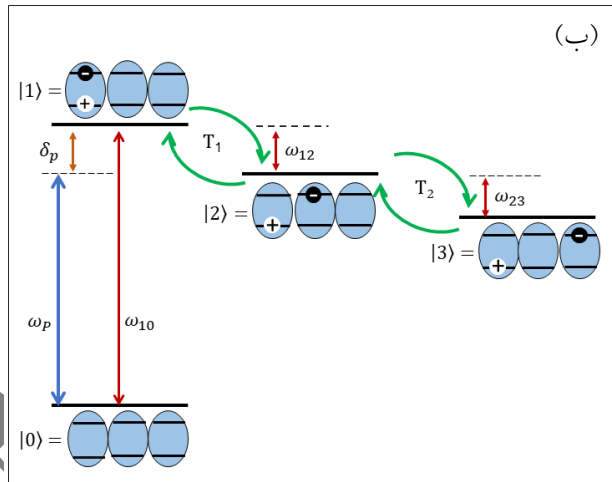
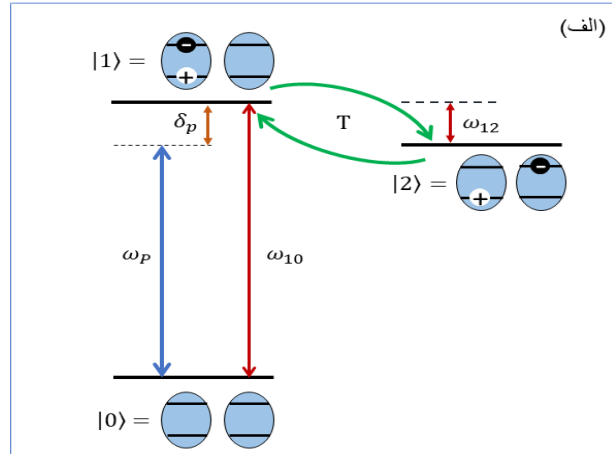
$$\begin{aligned} i\dot{c}_0 &= -\Omega_p c_1 \\ i\dot{c}_1 &= -\Omega_p c_0 - T_1 c_2 + (\delta_p - i\gamma_1) c_1 \\ i\dot{c}_2 &= -T_1 c_1 - T_2 c_3 + (\delta_p - \delta_1 - i\gamma_2) c_2 \\ i\dot{c}_3 &= -T_2 c_2 + (\delta_p - \delta_1 - \delta_2 - i\gamma_3) c_3 \end{aligned} \quad (4)$$

که γ_i نرخ فروافت موثر با $i=1,2,3$ است. با حل همزمان معادلات بالا در حالت پایا و همچنین با استفاده از شرط $\sum_{i=0}^3 |c_i|^2 = 1$ (۵) مولفه‌های ماتریس چگالی بدست می‌آیند. قطبش و پذیرفتاری از طریق رابطه‌ی زیر با هم ارتباط دارند [۱۴]:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_p \mathbf{E}_p \quad (6)$$

که در آن \mathbf{E}_p میدان پروب است. همچنین اگر N تعداد اتم‌ها در واحد حجم باشد، رابطه قطبش با عملگر دوقطبی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{P} = N \langle \mu \rangle = N \text{Tr}(\rho \mu) \quad (7)$$



شکل ۱. پیکربندی و سطوح مربوط به (الف) مولکول نقطه کوانتومی دوتایی (دوگانه) و (ب) مولکول نقطه کوانتومی سه‌تایی (سه‌گانه)

تحت تقریب موج چرخان (RWA) [۱۲] و تقریب دوقطبی الکتريکی و با اعمال عملگر تبدیل واحد که عبارات نوسانی وابسته به زمان را حذف می‌کند، هامیلتونی سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود (با فرض $\hbar = 1$) [۱۰]:

$$H_I = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_p & 0 & 0 \\ -\Omega_p & \delta_p & -T_1 & 0 \\ 0 & -T_1 & \delta_p - \delta_1 & -T_2 \\ 0 & 0 & -T_2 & \delta_p - \delta_1 - \delta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که $\Omega_p = (\frac{\mu_{01} \cdot E_p}{\hbar})$ فرکانس رابی برای انتقال از $|0\rangle$ به $|1\rangle$ است که در آن μ_{01} عنصر ماتریس گشتاور دوقطبی است و E_p دامنه الکتريکی میدان لیزر کاوشگر را نشان می‌دهد. همچنین T_1 و T_2 جفت شدگی‌های مربوط به تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی هستند که وابسته به ویژگی‌های حامل و میدان

² Weisskopf-Wigner

¹ Rotating Wave Approximation (RWA)

$$\chi_{\text{DQD}}^{(3)} = \frac{\Gamma|\mu_{01}|^4}{3V\varepsilon_0\hbar^3} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^2}{\Gamma_2}} \left(\frac{1}{\left| \Gamma_1 - \frac{T_1^2}{\Gamma_2} \right|^2} \left(1 + \frac{T_1^2}{|\Gamma_2|^2} \right) \right) \quad (14)$$

۳. نتایج و بحث

در این بخش نتایج بدست آمده جذب و پاشندگی خطی و غیرخطی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که طیف جذبی متناسب با قسمت موهومی پذیرفتاری و پاشندگی متناسب با قسمت حقیقی پذیرفتاری است. بهر حال، مقادیر پارامترهای استفاده شده در محاسبات مطابق جدول زیر (جدول ۱) می‌باشد و سایر مقادیر لازم و خصوصیات ساختاری نقطه کوانتومی استوانه‌ای جهت استفاده در محاسبات از مراجع [۸، ۱۵، ۱۶] استفاده شده است.

جدول ۱. مقادیر تجربی پارامترها برای مولکول‌های نقطه کوانتومی دوگانه و سه‌گانه [۱۳]

پارامترها	مقادیر
$\hbar\omega_{10}$	۱/۶ eV
$\hbar\omega_{12}, \hbar\omega_{13}$	(-۰.۰۱) - ۰.۰۱ meV
Ω_p	۱ μeV
T_1, T_2	۰ - ۱ μeV
Γ_{10}	۰ - ۶/۶ μeV
Γ_{20}, Γ_{30}	$10^{-2} \Gamma_{10}$
γ_1	۲ - ۱۰ μeV
γ_2, γ_3	$10^{-3} \gamma_1$

در شکل ۲ جذب و پاشندگی خطی بر حسب ناکوکی میدان لیزر کاوشگر با و بدون در نظر گرفتن اثر تونل‌زنی رسم شده است. پارامترهای $T_2=0$ و $\delta_1 = \delta_2 = 0$ و $\gamma_2 = \gamma_3$ است. همچنین در این شکل‌ها Γ_{10} نرخ فرو افت از تراز برانگیخته به تراز پایه است. همانگونه که در شکل ۲ الف و شکل ۲ ب مشاهده می‌شود در حالتی که بین دو نقطه کوانتومی تونل‌زنی اتفاق نمی‌افتد،

پاسخ محیط متشکل از مولکول‌های نقطه کوانتومی به میدان لیزر کاوشگر توسط پذیرفتاری بیان می‌شود که متناسب با عنصر ماتریس چگالی ρ_{01} است که بیانگر همدوسی بین حالت‌های |0> و |1> است. بنابراین، با استفاده از روابط (۶) و (۷)، پذیرفتاری مرتبه اول برای میدان کاوشگر به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$\chi = \frac{\Gamma|\mu_{01}|^2}{V\varepsilon_0\hbar\Omega_p} \rho_{01} \quad (8)$$

به روش مشابه می‌توان پذیرفتاری مرتبه سوم را نیز به دست آورد. بهر حال، پذیرفتاری‌های مرتبه اول و سوم برای مولکول نقطه کوانتومی سه‌گانه با بسط پذیرفتاری بر حسب فرکانس رابی Ω_p به صورت زیر بدست می‌آیند [۱۳]:

$$\chi_{\text{TQD}}^{(1)} = \frac{\Gamma|\mu_{01}|^2}{V\varepsilon_0\hbar} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^2\Gamma_3}{\Gamma_2\Gamma_3 - T_2^2}} \quad (9)$$

$$\chi_{\text{TQD}}^{(3)} = \frac{\Gamma|\mu_{01}|^4}{3V\varepsilon_0\hbar^3} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^2\Gamma_3}{\Gamma_2\Gamma_3 - T_2^2}} \frac{1}{\left| \Gamma_1 - \frac{T_1^2\Gamma_3}{\Gamma_2\Gamma_3 - T_2^2} \right|^2} \times (1 + T_1^2 \frac{\Gamma_3^2}{|\Gamma_2\Gamma_3 - T_2^2|^2} + (T_1 T_2)^2 \frac{1}{|\Gamma_2\Gamma_3 - T_2^2|^2}) \quad (10)$$

که در روابط بالا Γ فاکتور جایگزینی (تحدید) اپتیکی، V حجم نقطه کوانتومی، ε_0 گذردهی خلا و μ_{01} عنصر ماتریس گشتاور دوقطبی الکتریکی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۸، ۱۲، ۱۵، ۱۶]:

$$\mu_{mn} = \mu_{nm}^* = e\langle m|x|n\rangle \begin{cases} = 0, n = m \\ \neq 0, n \neq m \end{cases} \quad (11)$$

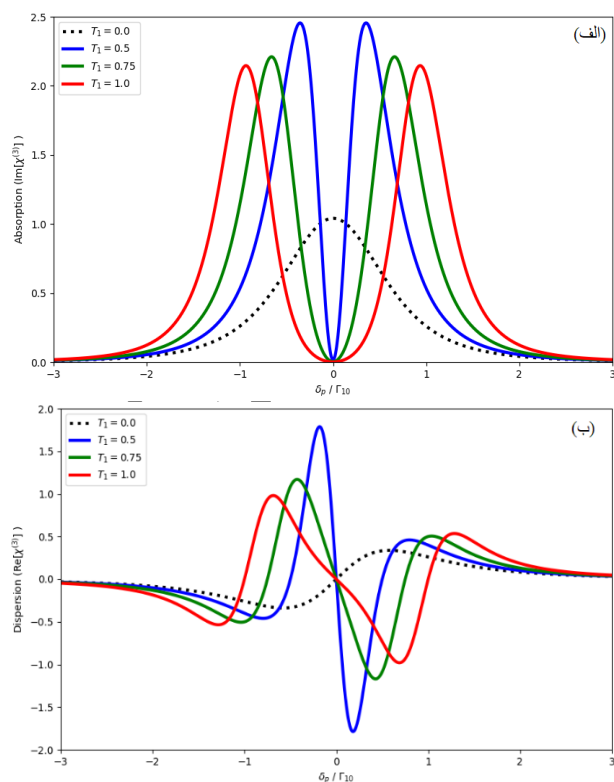
همچنین، در معادلات فوق T_1 و T_2 جفت شدگی‌های مربوط به تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی هستند که وابسته به ویژگی‌های حامل و میدان الکتریکی خارجی هستند. علاوه بر این، Γ_1 و Γ_2 و Γ_3 به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \delta_p - i\gamma_1 \\ \Gamma_2 &= \delta_p - \delta_1 - i\gamma_2 \end{aligned} \quad (12)$$

$\Gamma_3 = \delta_p - \delta_1 - \delta_2 - i\gamma_3$
یعنی در حالتی که $T_2 = 0$ و $T_1 \neq 0$ معادلات (۹) و (۱۰) برای یک مولکول نقطه کوانتومی دوگانه به صورت زیر در می‌آیند:

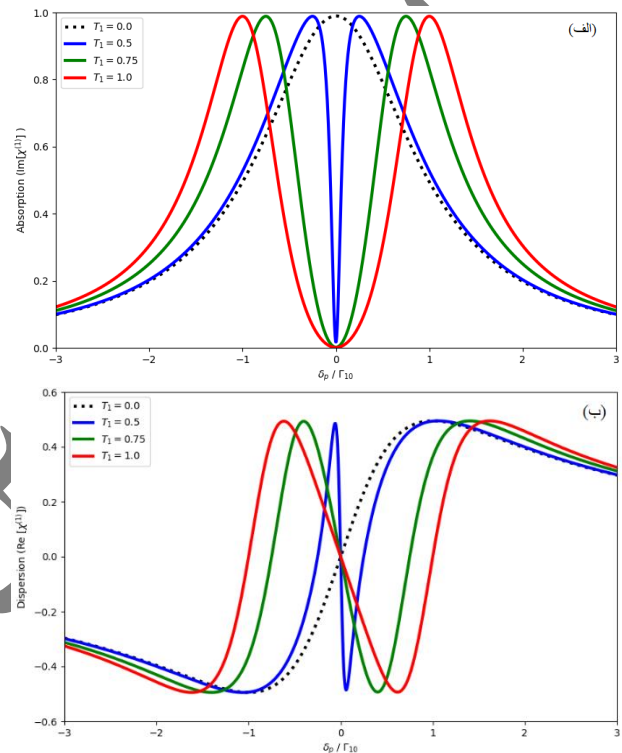
$$\chi_{\text{DQD}}^{(1)} = \frac{\Gamma|\mu_{01}|^2}{V\varepsilon_0\hbar} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^2}{\Gamma_2}} \quad (13)$$

در شکل ۳ جذب و پاشندگی غیرخطی بصورت تابعی از نامیزانی میدان با پارامترهای $T_2=0$ و $\delta_1 = \delta_2 = 0$ و $\gamma_2 = \gamma_3 = 10^{-3}\gamma_1$ رسم شده است. همانطور که در شکل ۳(الف) مشاهده می‌شود با افزایش T_1 پهنای پنجره شفافیت القایی تونل‌زنی افزایش می‌یابد اما دامنه پیک‌ها کاهش می‌یابد که با توجه به رابطه (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که جذب و پاشندگی خطی برای مولکول نقطه کوانتومی دوگانه متناسب با توان دوم T_1 است. لازم به ذکر است که، شفافیت نتیجه تداخل مخرب تولید شده بین دو مسیر نوری است. بنابراین کاهش جذب را می‌توان به عنوان یک فرآیند تداخل مخرب بین دو مسیر (کانال) اپتیکی رقابتی یا به شکافتگی در دو مولفه طیف جذب تفسیر کرد [۸] بنابراین، در رژیم تونل‌زنی ضعیف، پهنای پنجره شفافیت به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و در غیاب پدیده تونل‌زنی فقط یک پیک تشدید ایجاد می‌شود. در همان ناحیه فرکانسی، بخش حقیقی پذیرفتاری نوری [شکل ۳(ب)] به دلیل شفافیت القایی تونل‌سازی، شیب تند دارد که می‌تواند برای تولید نور کند استفاده شود.



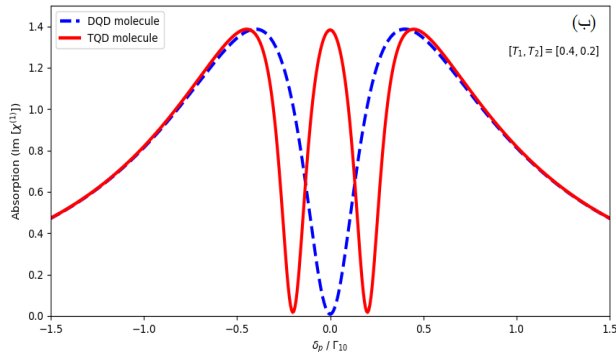
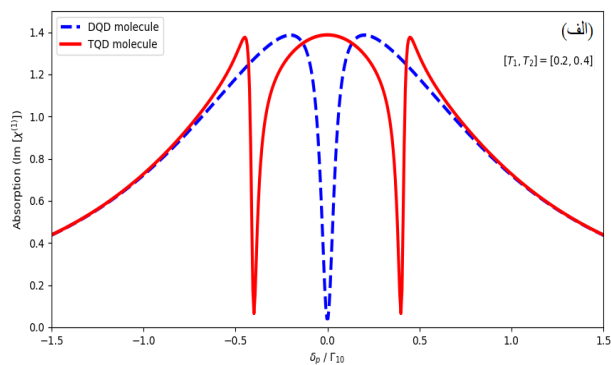
شکل ۳. تغییرات (الف) جذب و (ب) پاشندگی پذیرفتاری مرتبه سوم برحسب ناکوکی میدان لیزر برای مولکول نقطه کوانتومی دوگانه.

الکترون قادر به تونل‌زنی از نقطه کوانتومی اول به سایر نقاط کوانتومی نیست، بنابراین سامانه به یک نقطه کوانتومی با یک حالت برانگیخته و یک حالت پایه تبدیل می‌شود (خطوط نقطه چین) و فقط یک پیک تشدید مشاهده می‌شود (شکل ۲ الف). اما در حضور جفت تونل‌زنی T_1 ($T_1 \neq 0$ و $T_2 = 0$) سیستم تبدیل به یک مولکول نقطه کوانتومی متشکل از دو نقطه کوانتومی می‌شود و یک پنجره شفافیت ایجاد می‌شود و دو پیک تشدید ظاهر می‌شوند که دارای بزرگی یکسان هستند.

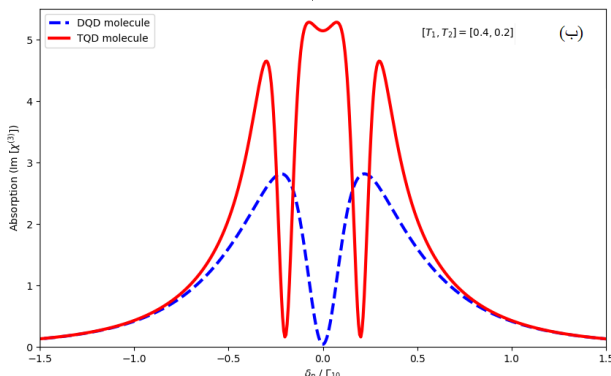
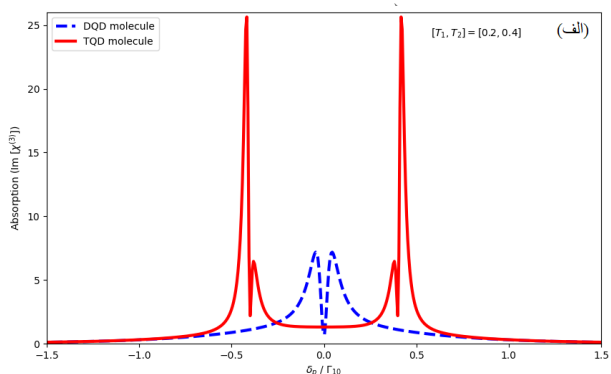


شکل ۴. تغییرات (الف) جذب و (ب) پاشندگی پذیرفتاری مرتبه اول برحسب ناکوکی میدان لیزر پروب برای مولکول نقطه کوانتومی دوگانه.

بنابراین، با اعمال جفت تونل‌زنی T_1 سیستم تبدیل به یک مولکول نقطه کوانتومی دوگانه می‌شود و در قسمت موهومی پذیرفتاری مرتبه اول آن که جذب خطی را نمایش می‌دهد یک پنجره شفافیت ایجاد می‌شود [شکل ۲(الف)]. شکل ۲(ب) که نمایانگر قسمت حقیقی پذیرفتاری خطی است نیز یک شیب تند ایجاد می‌شود که نشان از پاشندگی است. با افزایش شدت تونل‌زنی پهنای پنجره شفافیت گسترش می‌یابد و همچنین شیب نمودار پاشندگی نیز هموارتر می‌شود و شیب تند خطی کاهش می‌یابد.



شکل ۴. جذب غیرخطی در مولکول نقطه کوانتومی دوگانه (نقطه چین آبی) و مولکول نقطه کوانتومی سه گانه (خط قرمز). (الف) $T_1=0.2 \mu\text{eV}$ و $T_2=0.4 \mu\text{eV}$ و (ب) $T_1=0.4 \mu\text{eV}$ و $T_2=0.2 \mu\text{eV}$.

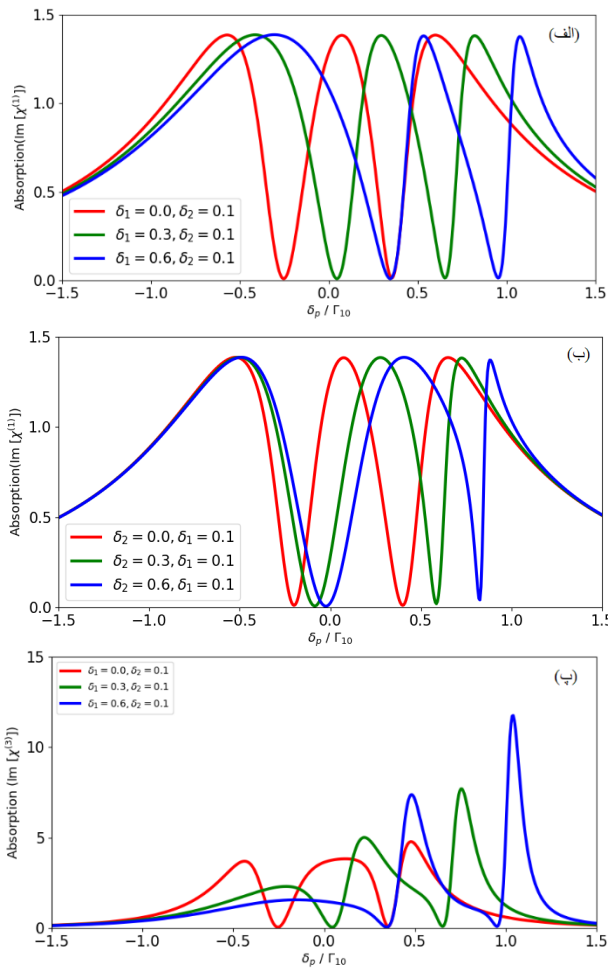


همانگونه که در شکل های ۲ و ۳ (ب) قسمت حقیقی پذیرفتاری برحسب نامیزانی رسم شده است، به دلیل شفافیت ناشی از تونل سازی، با افزایش پارامتر تونل زنی T_1 شیب تغییر کرده که این نتیجه شرایط مناسبی برای تولید نور کند (آهسته)¹ فراهم می کند [۱۷].

در شکل ۴ طیف جذب خطی و در شکل ۵ طیف جذب غیرخطی برای دو نوع مولکول DQD و TQD رسم شده است. برای هر دو نوع مولکول DQD و TQD به منظور مقایسه نشان داده شده است. نتایج بدست آمده در شکل های ۴ و ۵، برای مولکول DQD با $T_1 \neq 0$ و $T_2 = 0$ رسم شده است مادامی که برای مولکول TQD، $T_1 \neq 0$ و $T_2 \neq 0$ است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است وقتی یک مولکول DQD در نظر گرفته می شود به علت تونل زنی بین دو نقطه کوانتومی فقط یک پنجره شفافیت القایی ایجاد می شود. با افزایش T_1 پهنای پنجره افزایش می یابد. به عبارت ساده تر، با افزایش شدت تونل زنی بین نقاط کوانتومی، پهنای پنجره شفافیت افزایش می یابد. این نتیجه نشان می دهد که پهنای پنجره شفافیت را می توان با تنظیم پارامتر تونل زنی تغییر داد.

با افزایش تعداد نقاط کوانتومی در یک مولکول نقطه کوانتومی نیمرسانا، تونل زنی بین نقاط کوانتومی افزایش می یابد که منجر به افزایش تعداد پنجره های شفافیت القایی ناشی از تونل زنی بین نقاط کوانتومی می شود. این رفتار بدین علت است که با در نظر گرفتن جفت شدگی T_2 ، سامانه تبدیل به یک مولکول نقطه کوانتومی سه گانه (TQD) می شود که منجر به ایجاد دو پنجره TIT می شود. در چنین مولکول هایی، تونل زنی بین نقاط کوانتومی نزدیک به هم می تواند منجر به هم دوسی اتمی و تداخل کوانتومی شود که شفافیت نتیجه تداخل مخرب ایجاد شده بین دو مسیر نوری است. در حقیقت، پنجره شفافیت ناشی از تونل زنی که در مولکول های دو نقطه کوانتومی ظاهر می شود، در یک مولکول TQD به دلیل جفت شدن با نقطه کوانتومی سوم، دو پنجره ظاهر می شود.

¹ Slow light



شکل ۵. جذب خطی در مولکول نقطه کوانتومی سه گانه (الف) با δ_1 متغیر و مقدار ثابت $\delta_2 = 0.1$ (ب) با مقدار ثابت $\delta_1 = 0.1$ و مقدار متغیر δ_2 . $T_1 = 0.5 \mu\text{eV}$, $T_2 = 0.3 \mu\text{eV}$

در شکل ۶ جذب خطی برای مولکول نقطه کوانتومی سه گانه (TQD) با مقادیر مختلف ناکوکی ناشی از جفت شدگی های تونلی در حالتی که $T_1 = 0.5 \mu\text{eV}$, $T_2 = 0.3 \mu\text{eV}$ رسم شده است. در شکل ۶ (الف) طیف جذب خطی به ازای $\delta_2 = 0.1$ ثابت، برای سه مقدار مختلف δ_1 رسم شده است. در صورتی که شکل ۶ (ب) طیف جذب خطی به ازای $\delta_1 = 0.1$ ثابت، برای سه مقدار مختلف δ_2 رسم شده است. همانگونه که نتایج بدست آمده نشان می دهند دو پنجره شفافیت در طیف ظاهر می شود بطوریکه با افزایش نامیزانی δ_1 یا δ_2 طیف به سمت نامیزانی مثبت (فرکانس های بیشتر) جابجا می شود. این جابجایی فرکانسی برای حالتی که δ_2 ثابت و δ_1 افزایش می یابد بیشتر است. علاوه بر این، دو پنجره شفافیت ایجاد شده در صورتی متقارن خواهند بود که مقدار δ_1 یا δ_2 صفر باشد. در مقایسه با شکل ۶ الف، همانگونه

شکل ۵. جذب غیرخطی در مولکول نقطه کوانتومی دو گانه (نقطه چین آبی) و مولکول نقطه کوانتومی سه گانه (خط قرمز). (الف) $T_1 = 0.2 \mu\text{eV}$ و $T_2 = 0.4 \mu\text{eV}$ (ب) و $T_1 = 0.4 \mu\text{eV}$ و $T_2 = 0.2 \mu\text{eV}$.

در شکل ۵ (الف) و ۵ (ب) قسمت موهومی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم برای هر دو نوع مولکول نقطه کوانتومی DQD و TQD رسم شده است. مشاهده می شود که پیکهای جذب برای مولکول نقطه کوانتومی سه گانه با چندین مرتبه بزرگی نسبت به مولکول نقطه کوانتومی دو گانه بدست آمده است که دلیل آن این است که برای DQD جذب غیرخطی مطابق رابطه ی (۱۴) متناسب با مربع جفت تونلی T_1 است در حالی که برای TQD جذب غیرخطی مطابق رابطه ی (۱۰) متناسب با مربع $T_1 T_2$ است. علاوه بر این، افزایش جذب غیرخطی مرتبه سوم برای TQD علت برهمکنش دو جفت تونل زنی T_1 و T_2 ناشی می شود [۱۳]. وقتی فقط تونل زنی بین دو نقطه کوانتومی در یک مولکول DQD رخ می دهد یک پنجره شفافیت القایی ناشی از تونل زنی بین نقاط و کوانتومی مشاهده می شود. اما این رفتار برای یک مولکول متشکل از سه نقطه کوانتومی که الکترون ها می توانند ابتدا از نقطه کوانتومی اول به نقطه کوانتومی دوم و سپس از نقطه کوانتومی دوم به نقطه کوانتومی سوم تونل بزنند و دو تونل زنی با پارامتر جفت شدگی T_1 و T_2 وجود دارد، متفاوت است و تعداد پنجره ها افزایش می یابد. نتایج برای یک مولکول TQD وقتی $T_1 = 0.4 \mu\text{eV}$ و $T_2 = 0.2 \mu\text{eV}$ است و هنگامی که $T_1 = 0.2 \mu\text{eV}$ و $T_2 = 0.4 \mu\text{eV}$ در شکل ۴ (الف) و (ب) بدست آمده است که با تغییر شدت جفت شدگی بین نقاط کوانتومی می توان بزرگی و پهنای پنجره TIT را تنظیم کرد. بهر حال، از نظر کاربردی، مولکول های نقطه کوانتومی متشکل از دو یا سه نقطه کوانتومی که به ترتیب DQD و TQD نامیده می شوند، می توانند در حوزه شفافیت القایی الکترومغناطیسی، شفافیت القایی تونلی، درهم تنیدگی و غیرخطیت کر استفاده شوند [۱۳].

در نتیجه، خواص اپتیکی خطی و غیرخطی نقاط کوانتومی نیم‌رسانا که توسط تونل‌زنی جفت می‌شوند و مولکول‌های نقطه کوانتومی نامیده می‌شوند در این کار پژوهشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که شفافیت ناشی از تونل‌زنی در مولکول‌های نقطه کوانتومی دوتایی و سه‌تایی با تنظیم پارامترهای فیزیکی قابل کنترل است. همچنین، نشان داده شد که تونل زدن بین نقاط می‌تواند باعث ایجاد پنجره شفاف در طیف جذبی می‌شود که با افزایش شدت تونل‌زنی پهنای پنجره شفافیت افزایش می‌یابد. به‌رحال، نتایج حاصل از این کار می‌تواند در طراحی و ساخت افزارهای مبتنی بر اثر تونل‌زنی در مولکول‌های نقطه کوانتومی و تنظیم پنجره شفافیت القایی ناشی از تونل زنی بین نقاط کوانتومی مورد استفاده قرار گیرد.

که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار δ_2 تقارن دو پنجره شفافیت کاهش یافته و پهنای پنجره چپ افزایش یافته و پهنای پنجره سمت راست کاهش می‌یابد. در شکل ۶ (پ) طیف جذب غیرخطی به ازای $\delta_2 = 0.1$ ثابت، برای سه مقدار مختلف δ_1 رسم شده است. همانگونه که نتایج عددی نشان می‌دهند دو پنجره شفافیت اما نامتقارن در طیف مشاهده می‌شود که با افزایش δ_1 ، طیف متحمل یک جابجایی فرکانسی قوی به سمت راست (انتقال آبی) می‌شود و علاوه بر این، پهنای دو پیک جذب کاهش می‌یابد. به‌رحال، این رفتار به ما امکان می‌دهد که بتوان پنجره شفافیت و طیف جذب را کنترل کرد که برای کاربردهایی که پیشتر ذکر شد مفید هستند.

۴. نتیجه‌گیری

مراجع

1. K. Agarwal, H. Rai, and S. Mondal, "Quantum dots: an overview of synthesis, properties, and applications," *Mater. Res. Express*, **10**, 062001 (2023).
2. S. Gandhi, P. Sutariya, H. Soni, and D. Chaudhari, "Quantum dots: Application in medical science," *Int. J. Nano Dimens.* **14**, 29-40 (2023).
3. X. Xu, B. Sun, P. R. Berman, D. G. Steel, A. S. Bracker, D. Gammon, and L. J. Sham, "Coherent optical spectroscopy of a strongly driven quantum dot," *Science*, **317**, 929-932 (2007).
4. S. Marcinkevicius, A. Gushterov, and J. P. Reithmaier, "Transient electromagnetically induced transparency in self assembled quantum dots," *Appl. Phys. Lett.* **92**, 041113 (2008).
5. A. Nick Vamivakas, Y. Zhao, C. Y. Lu, and M. Atatüre, "Spinresolved quantum-dot resonance fluorescence," *Nat. Phys.* **5**, 198-202 (2009).
6. E. B. Flagg, A. Müller, J. W. Robertson, S. Founta, D. G. Deppe, M. Xiao, W. Ma, G. J. Salamo, and C. K. Shih, "Resonantly driven coherent oscillations in a solid-state quantum emitter," *Nat. Phys.* **5**, 203-207 (2009).
7. Z. Lu, and K.-D. Zhu, "Slow light in an artificial hybrid nanocrystal complex," *J. Phys. B* **42**, 015502 (2009).
8. H. S. Borges, L. Sanz, J. M. Villas-Boas, O. O. Diniz Neto, and A. M. Alcalde, "Tunneling induced transparency and slow light in quantum dot molecules," *Phys. Rev. B* **85**, 115425 (2012).
9. G. Dai, "Controllable double-tunneling induced transparency in quantum dot molecules," *Physica B* **456**, 163-166 (2015).
10. S.C. Tian, R.G. Wan, E.B. Xing, J.M. Rong, H. Wu, L.J. Wang, S.L. Shu, C.Z. Tong, Y.Q. Ning, "Tunneling induced transparency and giant Kerr nonlinearity in multiple quantum dot molecules," *Physica E* **69**, 349-353 (2015).
11. S.G. Kosionis, E. Paspalakis, "Controlling the Pump-Probe Optical Response in Asymmetric Tunneling-Controlled Double Quantum Dot Molecule-Metal Nanoparticle Hybrids," *Applied Sciences* **11**, 11714 (2021).
12. M. O. Scully and M. S. Zubairy, *Quantum Optics* (Cambridge Univ. Press, 1997).
13. S.C. Tian, R.G. Wan, C.Z. Tong, Y.Q. Ning, "Giant Kerr nonlinearity induced by tunneling in triple quantum dot molecules," *J. Opt. Soc. Am. B* **31**, 0740-3224 (2014).
14. R. W. Boyd, *Nonlinear Optics* (Third Edition, Academic Press, Inc., USA. 2008).
15. J. Kim, S. L. Chuang, P. C. Ku, and C. J. Chang-Hasnain, "Slow light using semiconductor quantum dots," *J. Phys. Condens. Matter* **16**, S3727 (2004).
16. Y. Hu, G. Cheng, and A. Chen, "Tunneling-induced phase grating in quantum dot molecules," *Opt. Express*, **28**, 29805 (2020).
17. S. G. Kosionis and E. Paspalakis, "Tunneling induced transparency and slow light in an asymmetric double quantum dot molecule-Metal nanoparticle hybrid", *J. Appl. Phys.* **134**, 243107 (2023).

نسخه پیش از انتشار