



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

قباد حیدرپور* و نادر دانش‌فر

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی: aheydarpour3@gmail.com

ndaneshfar@razi.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸)

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 به دست 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

اتم‌ها، نقطه‌های کوانتومی یک طیف انرژی گسسته را نشان می‌دهند که باعث می‌شود از آنها به طور کلی به عنوان "اتم‌های مصنوعی" نام برده شوند. 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 و ۲].

نقطه کوانتومی^۳ (QD) نیم‌رسانا یک نانو ساختار 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

۱. Double Quantum Dot

۲. Triple Quantum Dot

۳. Quantum Dot

دوگانه در مولکول‌های نقطه کوانتومی بررسی شده است [۹] و [۱۰]. در این مقاله، جذب و پاشندگی خطی و همچنین جذب و پاشندگی غیرخطی یک مولکول نقطه کوانتومی متشکل از دو نقطه کوانتومی و یک مولکول نقطه کوانتومی تشکیل شده از سه نقطه کوانتومی که به وسیله تونل‌زنی جفت شده‌اند مورد مطالعه و مقایسه قرار می‌گیرند. برای رسیدن به این هدف در بخش ۲، تئوری مسئله بیان می‌شود. در بخش ۳، نتایج عددی به‌دست آمده مورد بحث قرار می‌گیرند و در پایان، نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲. مدل و تئوری مسئله

فرض کنید یک مولکول نقطه کوانتومی متشکل از دو یا سه نقطه کوانتومی تحت تابش یک موج الکترومغناطیسی با بسامد ω_p و دامنه E_p قرار می‌گیرد که به عنوان میدان لیزر کاوشگر (پروب) شناخته می‌شود. در شکل‌های ۱. الف و ۱. 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 به وجود می‌آید که با حالت $|1\rangle$ نشان داده شده است [۱۱]. تحت جفت‌شدگی تونلی الکترون می‌تواند از نقطه کوانتومی اول به نقطه کوانتومی دوم (شکل ۱. الف) و برای مولکول نقطه کوانتومی متشکل از سه نقطه کوانتومی (شکل ۱. 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. تحت تقریب موج چرخان (RWA) [۱۲] و تقریب دوقطبی الکتریکی و با اعمال عملگر تبدیل واحد که عبارات نوسانی وابسته به زمان را حذف می‌کند، هامیلتونی سامانه به صورت زیر نوشته می‌شود (با فرض $\hbar = 1$) [۱۰]:

بنابراین نقاط کوانتومی نیمه‌هادی نسبت به اتم‌های واقعی از نظر کاربرد در فناوری‌هایی مانند نانو الکترونیک و نانو فوتونیک مزایای مهمی دارند. 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 شبه‌ذره جدید به نام اکسایتون را تشکیل می‌دهد. همچنین از ترکیب دو یا چند نقطه کوانتومی، مولکول‌های نقطه کوانتومی (QDMs)^۱ 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. همچنین می‌توان ساختار چند سطحی از حالت‌های برانگیخته ایجاد کرد و برای بررسی پدیده‌های همدوس کوانتومی نظیر تقسیم اتلر-تاووز و سه‌گانه مولو [۳]، شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT)^۲ [۴]، فلورسانس تشدید [۵] و [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 پروتو لیزر را از طریق یک محیط چگال با استفاده از یک پروتو لیزر فراهم می‌کند. پدیده اپتیکی دیگری که می‌تواند برای حالت‌های برانگیخته اکسایتونی رخ دهد و مشابه شفافیت القایی الکترومغناطیسی در یک سامانه اتمی سه سطحی است، شفافیت القایی تونل‌زنی (TIT)^۳ 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 دروازه‌های الکتریکی اصلاح کرد [۸]. در پژوهش‌های دیگری، شفافیت القایی تونل‌زنی و همچنین شفافیت القایی تونل‌زنی

۱. Quantum Dot Molecules

۲. Electromagnetically Induced Transparency

۳. Tunneling Induced Transparency

۴. Rotating Wave Approximation (RWA)

تونل‌زنی را نشان می‌دهند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\delta_p = \omega_s - \omega_p, \quad (2)$$

$$\delta_1 = \delta_p - \omega_{12},$$

$\delta_2 = \delta_p - \omega_{12} - \omega_{23}$, که ω_p بسامد میدان کاوشگر و ω_{mn} بسامد انتقال بین حالت‌های $|n\rangle$ و $|m\rangle$ است.

با استفاده از روش دامنه احتمال و با توجه به این که بردار حالت وابسته به زمان به صورت زیر است [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 [۱۱]، معادلات دینامیکی برای دامنه‌های احتمال در تصویر برهمکنش به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۰ و ۱۳]:

$$i\dot{c}_0 = -\Omega_p c_1,$$

$$i\dot{c}_1 = -\Omega_p c_0 - T_1 c_2 + (\delta_p - i\gamma_1) c_1,$$

$$i\dot{c}_2 = -T_1 c_1 - T_2 c_3 + (\delta_p - \delta_1 - i\gamma_2) c_2,$$

$$i\dot{c}_3 = -T_2 c_2 + (\delta_p - \delta_1 - \delta_2 - i\gamma_3) c_3, \quad (4)$$

که γ_i نرخ فروافت مؤثر با $i=3, 2, 1$ است. با حل همزمان معادلات بالا در حالت پایا و همچنین با استفاده از شرط:

$$\sum_{i=0}^3 |c_i(t)|^2 = 1, \quad (5)$$

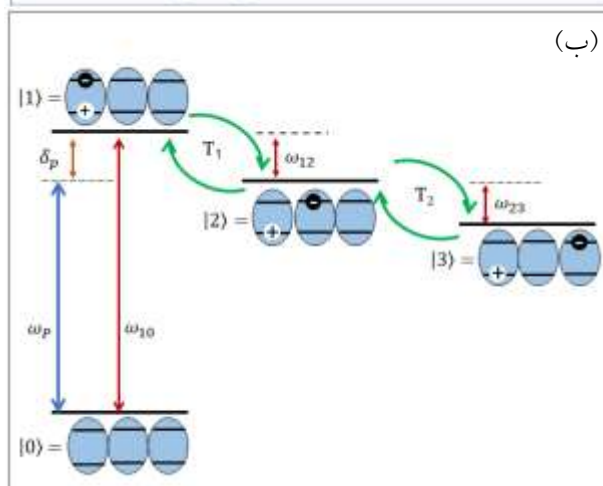
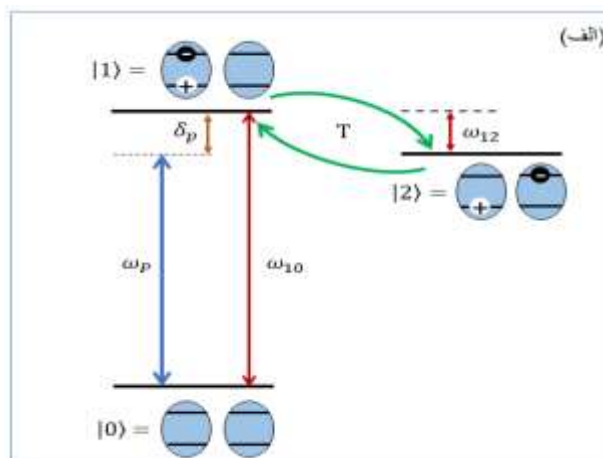
مؤلفه‌های ماتریس چگالی به دست می‌آیند. قطبش و پذیرفتاری از طریق رابطه زیر با هم ارتباط دارند [۱۴]:

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

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

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

پاسخ محیط متشکل از مولکول‌های نقطه کوانتومی به میدان لیزر کاوشگر توسط پذیرفتاری بیان می‌شود که متناسب با عنصر ماتریس چگالی ρ_{01} است. بیانگر همدوسی بین حالت‌های $|0\rangle$ و



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

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

که در آن $\Omega_p = \left(\frac{\mu_{01} E_p}{\hbar} \right)$ بسامد رابی برای انتقال از $|0\rangle$ به $|1\rangle$ است که در آن μ_{01} عنصر ماتریس گشتاور دوقطبی است و E_p دامنه الکتریکی میدان لیزر کاوشگر را نشان می‌دهد. همچنین T_1 و T_2 جفت‌شدگی‌های مربوط به تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی هستند که وابسته به ویژگی‌های حامل و میدان الکتریکی اعمالی هستند. علاوه‌براین، δ_p ، δ_1 و δ_2 به ترتیب ناکوکی (نامیزانی) ناشی از میدان لیزر کاوشگر و جفت‌های

دوگانه و سه گانه [۱۳].

پارامترها	مقادیر
$\hbar\omega_1$	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_1	۰ - ۶/۶ μeV
Γ_2, Γ_3	$10^{-2} \Gamma_1$
γ_1	۲ - ۱۰ μeV
γ_2, γ_3	$10^{-2} \gamma_1$

$$\chi_{DQD}^{(r)} = \frac{\Gamma |\mu_{e1}|^r}{3V\epsilon\hbar^r} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^r}{\Gamma_2}} \frac{1}{\left| \Gamma_1 - \frac{T_1^r}{\Gamma_2} \right|^r} \left(1 + T_1^r \frac{1}{|\Gamma_2|^r} \right), \quad (14)$$

۳. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به دست 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. به‌هرحال، مقادیر پارامترهای استفاده شده در محاسبات مطابق جدول ۱ است و سایر مقادیر لازم و خصوصیات ساختاری نقطه کوانتومی استوانه‌ای جهت استفاده در محاسبات از مراجع [۸، ۱۵ و ۱۶] استفاده شده است.

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 $T_2 = 0$ ،

$\delta_1 = \delta_2 = 0$ و $\gamma_2 = \gamma_3 = 10^{-2} \gamma_1$ در محاسبات اعمال شده‌اند [۱۳]. همچنین در این شکل‌ها، Γ_1 نرخ فروافت 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، الکترون قادر به

اول برای میدان کاوشگر به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$\chi = \frac{\Gamma |\mu_{e1}|^r}{V\epsilon\hbar\Omega_p} \rho_{e1}, \quad (8)$$

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

$$\chi_{TQD}^{(1)} = \frac{\Gamma |\mu_{e1}|^r}{V\epsilon\hbar} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^r \Gamma_2}{\Gamma_1 \Gamma_2 - T_2^r}}, \quad (9)$$

$$\chi_{TQD}^{(r)} = \frac{\Gamma |\mu_{e1}|^r}{3V\epsilon\hbar^r} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^r \Gamma_2}{\Gamma_1 \Gamma_2 - T_2^r}} \frac{1}{\left| \Gamma_1 - \frac{T_1^r \Gamma_2}{\Gamma_1 \Gamma_2 - T_2^r} \right|^r} \times \left(1 + T_1^r \frac{\Gamma_2^r}{|\Gamma_1 \Gamma_2 - T_2^r|^r} + (T_1 T_2)^r \frac{1}{|\Gamma_1 \Gamma_2 - T_2^r|^r} \right), \quad (10)$$

در روابط بالا Γ ضریب جایگزیدگی (تحدید) اپتیکی، V حجم نقطه کوانتومی، ϵ گذردهی خلأ و μ_{e1} عنصر ماتریس گشتاور دو قطبی الکتریکی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

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

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 ، Γ_2 و Γ_3 به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\Gamma_1 = \delta_p - i\gamma_1$$

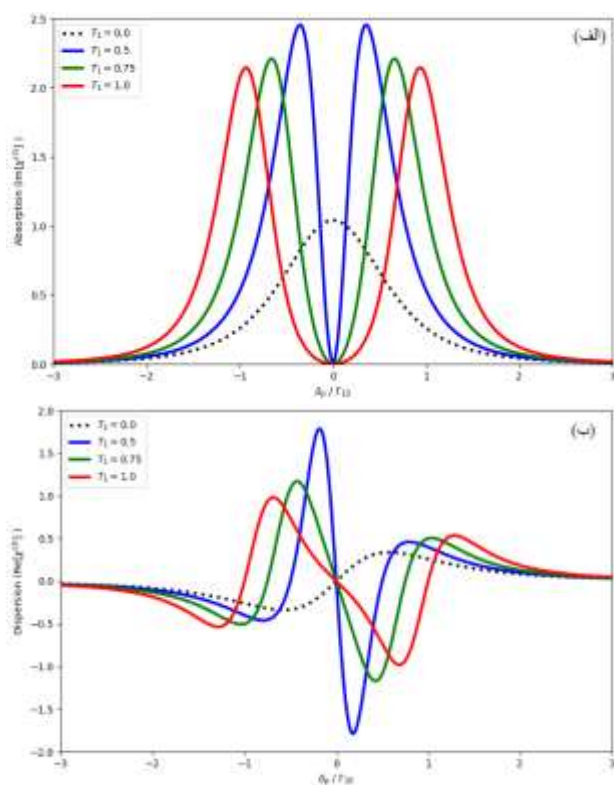
$$\Gamma_2 = \delta_p - \delta_1 - i\gamma_2, \quad (12)$$

$$\Gamma_3 = \delta_p - \delta_1 - \delta_2 - i\gamma_3$$

در حالتی که $T_1 \neq 0$ و $T_2 = 0$ ، معادلات (۹) و (۱۰) برای یک مولکول نقطه کوانتومی دوگانه به صورت زیر در می‌آیند:

$$\chi_{DQD}^{(1)} = \frac{\Gamma |\mu_{e1}|^r}{V\epsilon\hbar} \frac{1}{\Gamma_1 - \frac{T_1^r}{\Gamma_2}}, \quad (13)$$

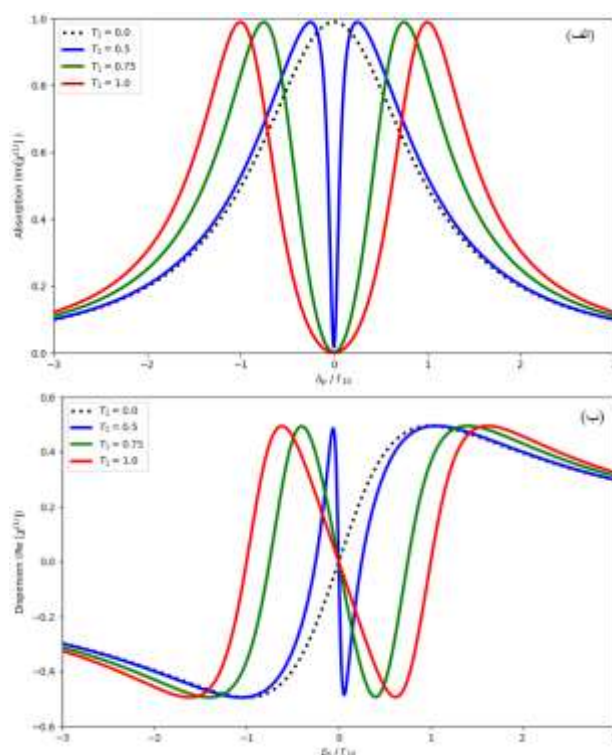
جدول ۱. مقادیر تجربی پارامترها برای مولکول‌های نقطه کوانتومی



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

می‌یابد.

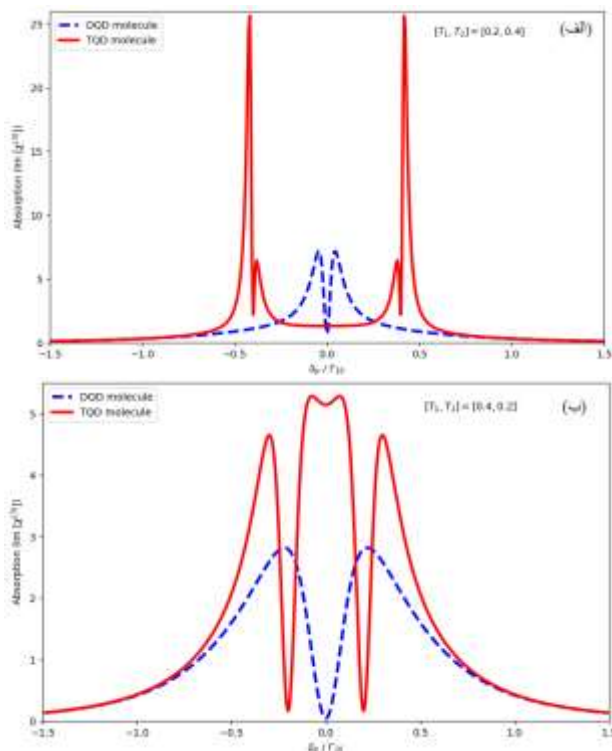
در شکل ۳، جذب و پاشندگی غیرخطی به صورت تابعی از نامیزانی میدان با پارامترهای $T_1 = 0$ ، $\delta_1 = \delta_2 = 0$ و $\gamma_1 = \gamma_2 = 10^{-3}$ رسم شده است. همانطور که در شکل ۳ الف مشاهده می‌شود، با افزایش T_1 پهنای پنجره شفافیت القایی تونل‌زنی افزایش می‌یابد اما دامنه قله‌ها کاهش می‌یابد که با 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 فرایند تداخل مخرب بین دو مسیر (کانال) اپتیکی رقابتی یا به شکافتگی در دو مؤلفه 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 قله تشدیدی ایجاد می‌شود. در همان ناحیه بسامدی، بخش حقیقی پذیرفتاری نوری (شکل ۳ ب) به دلیل



شکل ۲. تغییرات (الف) جذب و (ب) پاشندگی پذیرفتاری مرتبه اول برحسب ناکوکی میدان لیزر کاوندی برای مولکول نقطه کوانتومی دوگانه.

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 قله تشدیدی مشاهده می‌شود (شکل ۲ الف). اما در حضور جفت تونل‌زنی T_1 ($T_1 \neq 0$ و $T_2 = 0$) سامانه تبدیل به یک مولکول نقطه کوانتومی متشکل از دو نقطه کوانتومی می‌شود و یک پنجره شفافیت ایجاد می‌شود و دو قله تشدیدی ظاهر می‌شود که بزرگی یکسان دارند.

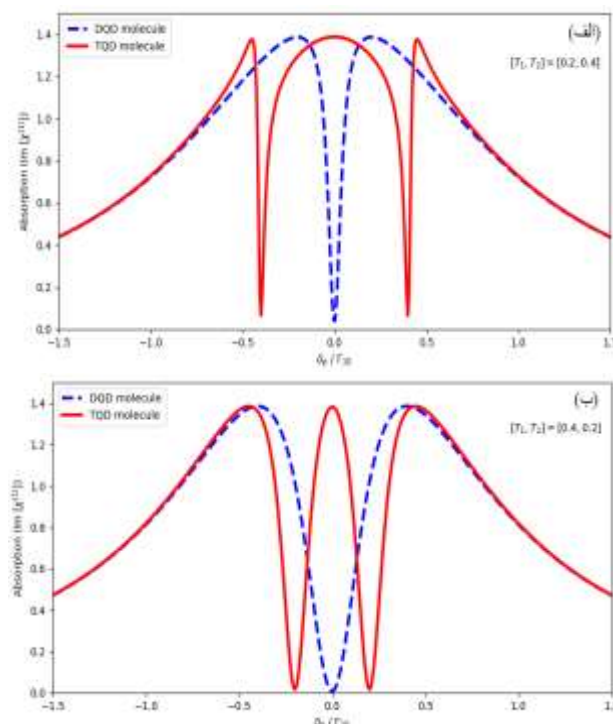
بنابراین، با اعمال جفت تونل‌زنی T_1 سامانه تبدیل به یک مولکول نقطه کوانتومی دوگانه می‌شود و در قسمت موهومی پذیرفتاری مرتبه اول آن که جذب خطی را نمایش می‌دهد یک پنجره شفافیت ایجاد می‌شود (شکل ۲ الف). در شکل ۲ ب که نمایانگر قسمت حقیقی پذیرفتاری خطی است نیز یک شیب تند ایجاد می‌شود که نشان از پاشندگی است.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



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

پنجره شفافیت القایی ایجاد می‌شود. با افزایش T_1 پهنای پنجره افزایش می‌یابد. به عبارت ساده‌تر، با افزایش شدت تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی، پهنای پنجره شفافیت افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که پهنای پنجره شفافیت را می‌توان با تنظیم پارامتر تونل‌زنی تغییر داد.

با افزایش تعداد نقاط کوانتومی در یک مولکول نقطه کوانتومی نیم‌رسانا، تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش تعداد پنجره‌های شفافیت القایی ناشی از تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی می‌شود. این رفتار بدین علت است که با در نظر گرفتن جفت‌شدگی T_p ، سامانه تبدیل به یک مولکول نقطه کوانتومی سه‌گانه (TQD) می‌شود که منجر به ایجاد دو پنجره TIT می‌شود. در چنین مولکول‌هایی، تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی نزدیک به هم می‌تواند منجر به هم‌دوسی اتمی و تداخل کوانتومی شود که شفافیت نتیجه تداخل مخرب ایجاد شده بین دو مسیر نوری است.



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

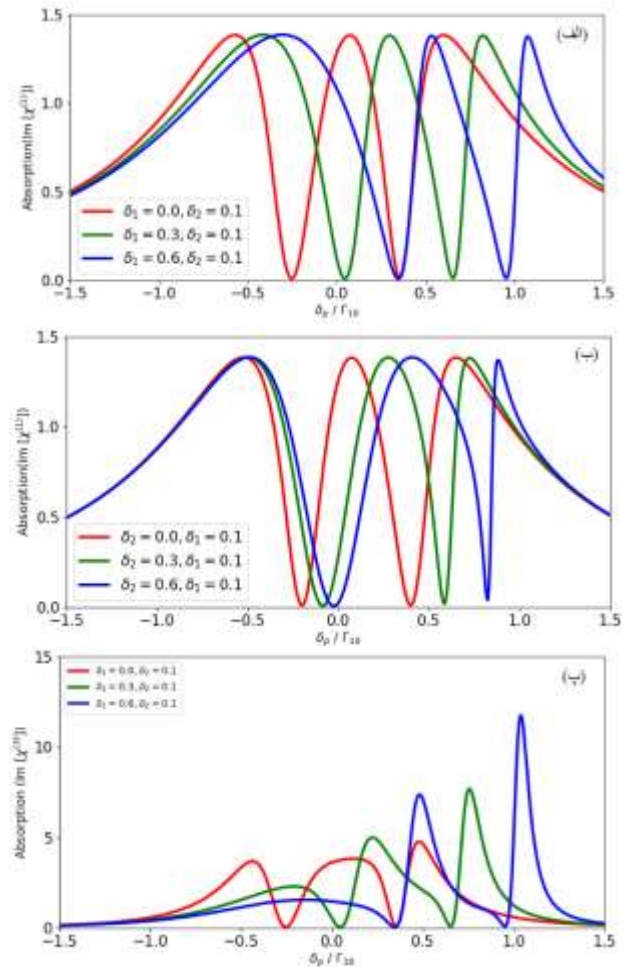
شفافیت القایی تونل‌سازی، شیب تند دارد که می‌تواند برای تولید نور کند استفاده شود.

همانگونه که در شکل‌های ۲ و ۳، ب. قسمت حقیقی پذیرفتاری برحسب نامیزانی رسم شده است، به دلیل شفافیت ناشی از تونل‌سازی، با افزایش پارامتر تونل‌زنی T_1 شیب تغییر کرده که این نتیجه شرایط مناسبی را برای تولید نور کند (آهسته)^۱ فراهم می‌کند [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 به دست آمده در شکل‌های 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 می‌شود، به علت تونل‌زنی بین دو نقطه کوانتومی فقط یک

می‌شود [۱۳]. وقتی فقط تونل‌زنی بین دو نقطه کوانتومی در یک مولکول DQD رخ می‌دهد یک پنجره شفافیت القایی ناشی از تونل‌زنی بین نقاط و کوانتومی مشاهده می‌شود. اما این رفتار برای یک مولکول متشکل از سه نقطه کوانتومی که الکترون‌ها می‌توانند ابتدا از نقطه کوانتومی اول به نقطه کوانتومی دوم و سپس از نقطه کوانتومی دوم به نقطه کوانتومی سوم تونل بزنند و دو تونل‌زنی با پارامتر جفت‌شدگی T_1 و T_2 وجود دارد، متفاوت است و تعداد پنجره‌ها افزایش می‌یابد. نتایج برای یک مولکول TQD وقتی $T_1 = 0.4 \mu eV$ و $T_2 = 0.2 \mu eV$ است و ب هنگامی که $T_1 = 0.2 \mu eV$ و $T_2 = 0.4 \mu eV$ در شکل ۴ الف و ب به دست آمده است که با تغییر شدت جفت‌شدگی بین نقاط کوانتومی می‌توان بزرگی و پهنای پنجره TIT را تنظیم کرد. به‌هرحال، از نظر کاربردی، مولکول‌های نقطه کوانتومی متشکل از دو یا سه نقطه کوانتومی که به ترتیب DQD و TQD نامیده می‌شوند، می‌توانند در حوزه شفافیت القایی الکترومغناطیسی، شفافیت القایی تونلی، درهم‌تنیدگی و غیرخطیت کر استفاده شوند [۱۳].

در شکل ۶ جذب خطی برای مولکول نقطه کوانتومی سه‌گانه (TQD) با مقادیر مختلف ناکوکی ناشی از جفت‌شدگی‌های تونلی در حالتی که $T_1 = 0.5 \mu eV$ و $T_2 = 0.3 \mu eV$ رسم شده است. در ۶ الف شکل طیف جذب خطی به ازای $\delta_1 = 0.1$ ثابت، برای سه مقدار مختلف δ_2 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 به دست آمده نشان می‌دهند دو پنجره شفافیت در طیف ظاهر می‌شود به طوری که با افزایش نامیزانی δ_1 یا δ_2 طیف به سمت نامیزانی مثبت (بسامه‌های بیشتر) جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی بسامدی برای حالتی که δ_1 ثابت و δ_2 افزایش می‌یابد 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 که در شکل ۶ ب 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



شکل ۶. جذب خطی در مولکول نقطه کوانتومی سه‌گانه (الف) با δ_1 متغیر و مقدار ثابت $\delta_2 = 0.1$ (ب) و مقدار ثابت $\delta_1 = 0.1$ و مقدار متغیر δ_2 و $T_1 = 0.5 \mu eV$, $T_2 = 0.3 \mu eV$.

در یک مولکول TQD به‌جای یک پنجره شفافیت دو پنجره شفافیت ایجاد می‌شود که ناشی از جفت‌شدگی تونل دوم است. 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 می‌شود که قله‌های جذب برای مولکول نقطه کوانتومی سه‌گانه با چندین مرتبه بزرگی نسبت به مولکول نقطه کوانتومی دوگانه به دست آمده است. دلیل آن این است که برای DQD جذب غیرخطی مطابق رابطه (۱۴) متناسب با مربع جفت‌شدگی تونلی T_1 است. این در حالی است که برای TQD جذب غیرخطی مطابق رابطه (۱۰) متناسب با مربع $T_1 T_2$ است. علاوه بر این، افزایش جذب غیرخطی مرتبه سوم برای TQD به علت برهمکنش دو جفت تونل‌زنی T_1 و T_2 ناشی

نیم‌رسانا که توسط تونل‌زنی جفت می‌شوند و مولکول‌های نقطه کوانتومی نامیده می‌شوند در این کار پژوهشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست 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 شود که با افزایش شدت تونل‌زنی، پهنای پنجره شفافیت افزایش می‌یابد. به هر حال، نتایج حاصل از این کار می‌تواند در طراحی و ساخت افزاره‌های مبتنی بر اثر تونل‌زنی در مولکول‌های نقطه کوانتومی و تنظیم پنجره شفافیت القایی ناشی از تونل زنی بین نقاط کوانتومی مورد استفاده قرار گیرد.

ازای $\delta_1 = 0.1$ 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 جابه‌جایی بسامدی قوی به سمت راست (انتقال آبی) می‌شود و علاوه بر این، پهنای دو قله جذب کاهش می‌یابد. به هر حال، 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

در نتیجه، خواص اپتیکی خطی و غیرخطی نقاط کوانتومی

مراجع

1. K Agarwal, H Rai, and S Mondal, *Mater. Res. Express*, **10**, 6 (2023) 062001.
2. S Gandhi, et al., *Int. J. Nano Dimens.* **14** (2023) 29.
3. X Xu, et al., *Science* **317** (2007) 929.
4. S Marcinkevicius, A Gushterov, and J P Reithmaier, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 041113.
5. A Nick Vamivakas, et al., *Nat. Phys.* **5** (2009) 198.
6. E B Flagg, et al., *Nat. Phys.* **5** (2009) 203.
7. Z Lu and K D Zhu, *J. Phys. B* **42** (2009) 015502.
8. H S Borges, et al., *Phys. Rev. B* **85** (2012) 115425.
9. G Dai, *Physica B* **456** (2015) 163.
10. S C Tian, et al., *Physica E* **69** (2015) 349.
11. S G Kosionis and E Paspalakis, *Appl. Sci.* **11** (2021) 11714.
12. M O Scully and M S Zubairy, "Quantum Optics" Cambridge Univ. Press (1997).
13. S C Tian, et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **31** (2014) 0740.
14. R W Boyd, "Nonlinear Optics" Third Edition, Academic Press, Inc., USA. (2008).
15. J Kim, et al., *J. Phys. Condens. Matter* **16** (2004) S3727.
16. Y Hu, G Cheng, and A Chen, *Opt. Express*, **28** (2020) 29805.
17. S G Kosionis and E Paspalakis, *J. Appl. Phys.* **134** (2023) 243107.