بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

کنترل همدوس سرعت گروه از طریق تونل‌زنی در مولکول نقطه کوانتومی

نسیم صمدی، زهرا عارفی‌نیا و مصطفی صحرایی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

n.samadi۹۸@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده - نانو ساختارهای نیمر سانا به خاطر دارا بودن ویژگی‌های الکتریکی و نوری منح صر به فرد شان به عنوان سامانه‌های نوین کلیدزنی نوری در د ستگاه‌های مخابراتی مطرح شده‌اند. در این مقاله اثر تونل‌زنی بر رفتار جذب و پا شندگی باریکه کاو شگر در یک نانوساختار نقطه‌ی کوانتومی دوگانه به صورت چهار ترازی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اعمال ولتاژ گیت بر انتشار باریکه کاوشگر در نتیجه جذب و پاشندگی و سرعت گروه آن اثر گذار است. با اعمال تونل‌زنی جذب و پاشندگی تغییر کرده و می‌توان فراسرعت را به فروسرعت نور کلیدزنی کرد.

کلید واژه- تونل‌زنی، فراسرعت نور، فروسرعت نور، نانوساختار نقطه کوانتومی

Coherent control of group velocity via tunneling effect in quantum dot molecule

Nasim Samadi, Zahra Arefinia, and Mostafa Sahrai

Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran
n.samadi۹۸@ms.tabrizu.ac.ir

Abstract- Semiconductor nanostructures have been proposed as novel optical switching systems in telecommunication systems due to their unique electrical and optical properties. In this paper, the effect of tunneling on probe field absorption and dispersion for a quantum dot molecule is investigated. The results show that applying voltage gate affects on probe beam propagation, and thus its absorption, dispersion and group velocity. By applying gate voltages, absorption and dispersion may change with the tunneling effect, and light propagation from superluminal to subluminal can be switched.

Keywords: Tunneling, Superluminal, Subluminal, Quantum dot nanostructures

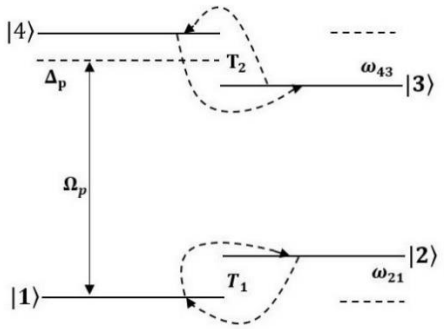
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

مقدمه

در سال‌های اخیر، با توسعه و گسترش فناوری‌های مرتبط با ادوات و مدارهای مجتمع نوری، انتقال و پردازش نور از اهمیت به سزایی برخوردار شده است. با افزایش سرعت پردازش و انتقال نوری، کاهش زمان کلیدزنی نوری در سامانه‌های مخابراتی مورد توجه واقع شده است [۱-۳]. نانوساختارهای نیمرسانا به خاطر دارا بودن ویژگی‌های الکتریکی و نوری منحصر به فردشان به عنوان سامانه‌های نوین کلیدزنی نوری مطرح شده اند [۲]. برای طراحی و ساخت سامانه‌های کلیدزنی نوری مبتنی بر نانوساختارهای کوانتومی، می‌بایست عوامل موثر بر زمان کلیدزنی نوری در این ساختارها را بررسی نمود. ویژگی‌های نوری نقاط کوانتومی را می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای توسط میدان خارجی و نحوه‌ی تونل‌زنی کنترل نمود که به همین جهت، در سال‌های اخیر استفاده از سامانه‌های مبتنی بر نقاط کوانتومی نیمرسانا، مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است [۳]. سامانه‌های نقاط کوانتومی چهارترازی دوگانه به دلیل داشتن ویژگی تونل‌زنی بسیار سریع به منظور ساخت یک سامانه‌های کلیدزنی تمام نوری پیشنهاد شده اند [۴و۵]. در این مقاله، ساختاری متشکل از دو نقطه‌ی کوانتومی نیمرسانا به صورت سامانه چهارترازی دوگانه تزویج شده، مورد بررسی قرار گرفته است و اثرات تونل‌زنی بر رفتار جذب و پاشندگی باریکه کاوشگر مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل و معادلات

ساختار شماتیک سطح انرژی سامانه نقاط کوانتومی نیمرسانای چهارترازی دوگانه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، یک نقطه کوانتومی دوگانه با تراز پایین‌تر باند ظرفیت $|1\rangle$ و تراز بالاتر باند رسانش $|4\rangle$ در نقطه کوانتومی سمت چپ هستند و تراز پایین‌تر باند ظرفیت $|2\rangle$ و تراز بالایی باند رسانش $|3\rangle$ در نقطه کوانتومی دوم هستند. تراز $|1\rangle$ به وسیله نور ضعیف کاوشگر با دامنه‌ی میدان E_p و فرکانس رابی $\Omega p = (\vec{E}p \cdot \vec{\mu}_{14})/\hbar$ به تراز $|4\rangle$ تزویج شده است. در این رابطه، گشتاور دو قطبی اتمی متناظر با گذار $|1\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ می‌باشد. با اعمال ولتاژهای گیت، تراز $|4\rangle$ به تراز $|3\rangle$ و تراز $|1\rangle$ به تراز $|2\rangle$ نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۱: سطح انرژی سامانه‌ی چهارترازی دوگانه [۶]

معادلات ماتریس چگالی در مختصات دوران یافته به صورت زیر هستند [۶و۷]:

$$\dot{\rho}_{11} = \frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{41} - \rho_{14}) + \frac{i}{2}T_1(\rho_{21} - \rho_{12}) + \gamma_4\rho_{22} + \gamma_1\rho_{44}$$
$$\dot{\rho}_{21} = -\frac{i}{2}\Omega_p\rho_{24} + \frac{i}{2}T_1(\rho_{11} - \rho_{22}) - \left(i\omega_{21} + \frac{1}{2}\Gamma_{21}\right)\rho_{21}$$
$$\dot{\rho}_{22} = \frac{i}{2}T_1(\rho_{12} - \rho_{21}) - \gamma_4\rho_{22} + \gamma_3\rho_{33}$$
$$\dot{\rho}_{31} = -\frac{i}{2}\Omega_p\rho_{34}\left(i(\Delta_p - \omega_{43}) + \frac{1}{2}\Gamma_{31}\right)\rho_{31} + \frac{i}{2}T_2\rho_{41} - \frac{i}{2}T_1\rho_{32}$$
$$\dot{\rho}_{32} = -\left(i(\Delta_p - \omega_{43} - \omega_{21}) + \frac{1}{2}\Gamma_{32}\right)\rho_{32} - \frac{i}{2}T_1\rho_{31} + \frac{i}{2}T_2\rho_{42}$$
$$\dot{\rho}_{33} = \frac{i}{2}T_2(\rho_{43} - \rho_{34}) - \gamma_3\rho_{33}$$
$$\dot{\rho}_{41} = \frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{11} - \rho_{44}) + \frac{i}{2}T_2\rho_{31} - \frac{i}{2}T_1\rho_{42} - \left(i\Delta_p + \frac{1}{2}\Gamma_{41}\right)\rho_{41}$$
$$\dot{\rho}_{42} = -\left(i(\Delta_p - \omega_{21}) + \frac{1}{2}\Gamma_{42}\right)\rho_{42} + \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{12} + \frac{i}{2}T_2\rho_{32} - \frac{i}{2}T_1\rho_{41}$$
$$\dot{\rho}_{43} = -\left(i\omega_{43} + \frac{1}{2}\Gamma_{43}\right)\rho_{43} + \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{13} + \frac{i}{2}T_2(\rho_{33} - \rho_{44})$$
$$\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1 \qquad (1)$$

در این روابط Δ_p نامیزانی میدان کاوشگر با گذار مربوطه، ρ_{mn} جملات مربوط به عملگر ماتریس چگالی، Γ_{mn} نرخ واهلش جمعیت، γ_{mn} گذار پهن شدگی خطوط طیفی و ω_{mn}

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

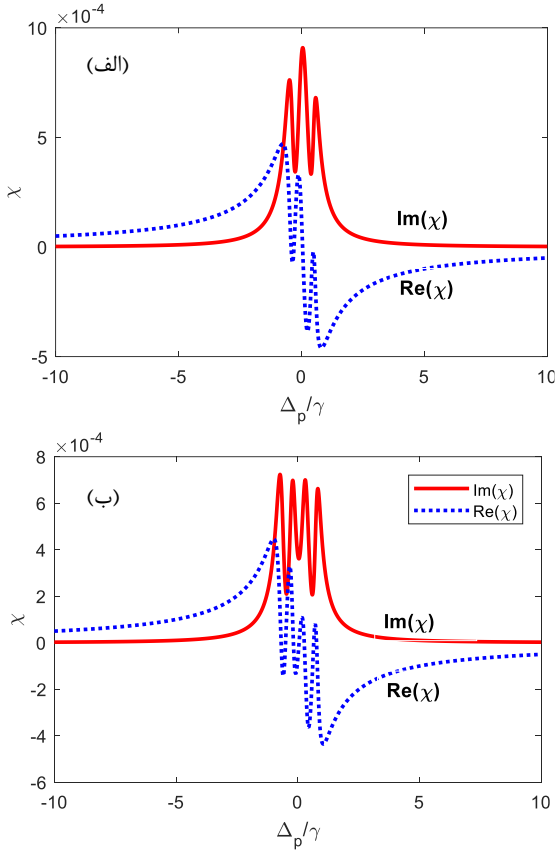
نامیزانی از تراز m به تراز n، است. پارامترهای T_1 و T_2 المان‌های تونل‌زنی در ماتریس بین نقاط همسایه هستند. در حالت کلی پذیرفتاری الکتریکی ماده از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\chi = \frac{2\mu_{41}}{\varepsilon . E_p}\rho_{41} \qquad (2)$$

پذیرفتاری الکتریکی ماده را به‌صورت $\chi=\chi'+i\chi''$ داریم که χ' قسمت حقیقی پذیرفتاری الکتریکی متناظر با پاشندگی و χ'' قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی متناظر با جذب در سیستم است. سرعت گروه متناسب با شیب پاشندگی است. شاخص گروه $n_g=c/v_g$ بوده که در این رابطه c سرعت نور در خلأ و v_g سرعت گروه است [۷].

نتایج و بحث

اعمال ولتاژ گیت و ایجاد تونل‌زنی داخلی در سامانه‌ی مولکول نقطه‌ی کوانتومی، همدوسی کوانتومی در سامانه را ایجاد می‌کند. تونل‌زنی باعث تغییر جذب و پاشندگی محیط شده که در این بخش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۲ (الف) به ازای $T_1=0.5$ و $T_2=0.5$ ملاحظه می‌شود که در طیف جذبی قله مرکزی دارای یک مقدار حداکثر بوده و محیط جذب خطی قوی را تجربه می‌کند. مشاهده می‌کنیم که شیب منفی پاشندگی مربوط به انتشار فراسرعت نور با بیشینه جذب همراه است. در نمودار (ب) به ازای $T_1=1$ و $T_2=1$ ملاحظه می‌شود با افزایش ولتاژ گیت و با افزایش T_1 تونل‌زنی الکترون در ترازهای $|1\rangle$ و $|2\rangle$، جذب خطی کاهش یافته و شیب پاشندگی به مثبت تبدیل می‌شود که مربوط به انتشار فروسرعت نور است. در عین حال منحنی پاشندگی بسیار شیب دار است که با افزایش تونل‌زنی الکترونی T_1 ملاحظه شد. در شکل (۳) ظهور و ناپدید شدن قله‌ای را در نمای جذب در نزدیک مرکز مشاهده می‌شود. بنابراین تغییراتی در علامت شیب پاشندگی ناشی از تغییر نرخ تونل‌زنی ایجاد می‌شود که باعث تغییر در سرعت گروه تپ کاوشگر از فروسرعت به فراسرعت می‌شود.

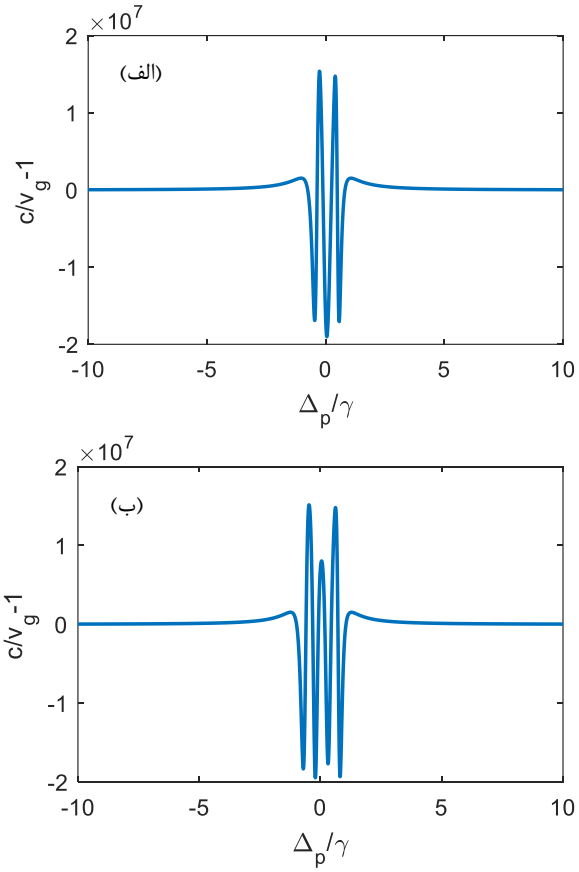


شکل ۲: نمودار تاثیر تونل‌زنی بر جذب و پاشندگی بر حسب نامیزانی میدان کاوشگر در حالت پایا (الف) $T_1=0.5$ و $T_2=0.5$ و (ب) $T_1=1$ و $T_2=0.5$ درحالت پایا که مقادیر کمیت‌ها به صورت زیر می‌باشند [۶و۷]:
$\Gamma_{32}=0.1\gamma$, $\Gamma_{31}=0.1\gamma$, $\Gamma_{41}=1.0\gamma$, $\Gamma_{42}=0.3\gamma$, $\omega_{43}=0.05\gamma$, $\omega_{21}=0.05\gamma$, $\Omega_p=0.001\gamma$, $\Delta_P=0$

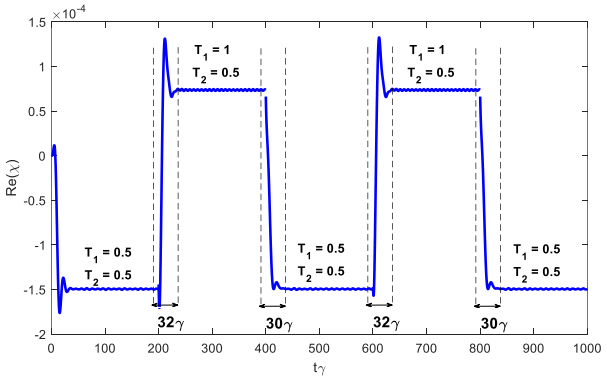
این تغییر همانطور که در نشان داده شده است پیوسته با کنترل تونل‌زنی می‌توان کلیدزنی انجام داد، به گونه‌ای که در صورت تغییر از $T_1=0.5$ و $T_2=0.5$ به $T_1=1$ و $T_2=0.5$ پاشندگی از منفی به مثبت تغییر می‌کند و این همان کلیدزنی از فراسرعت به فروسرعت نور می‌باشد زمان کلیدزنی از فراسرعت نور به فروسرعت نور ۳۲□ و از فروسرعت نور به فراسرعت نور ۳۰□ است (شکل۴). بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان با اعمال ولتاژ گیت و پارامتر تونل‌زنی یک کلیدزنی قابل کنترل از نظر نوری برای انتشار موج بین انتشار فراسرعت و فروسرعت را ارائه داد. روش

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

پیشنهادی به دلیل طراحی انعطاف‌پذیر به راحتی قابل کنترل است و می‌تواند برای بهینه‌سازی و کنترل روند کلیدزنی نوری در سامانه حالت جامد نقطه‌ی کوانتومی استفاده شود.



شکل ۳: نمودار تاثیر تونل‌زنی بر سرعت گروه (الف) $T_1=1$ و $T_2=1$ و (ب) $T_1=1$ و $T_2=0.5$. مقادیر کمیت‌ها مطابق شکل ۲ است.



شکل ۴: نمودار کلیدزنی پاشندگی بر اساس تغییرات تونل‌زنی که مقادیر کمیت‌ها مطابق شکل ۲ است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار جذب و پاشندگی باریکه‌ی کاوشگر در یک نانو ساختار نقطه کوانتومی دوگانه‌ی چهارترازی در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در ساختار نقاط کوانتومی نیمرسانای مورد مطالعه، اعمال ولتاژ گیت بر انتشار باریکه کاوشگر در نتیجه جذب و پاشندگی آن اثر گذار بوده و با اثر تونل‌زنی می‌توان جذب، پاشندگی و سرعت گروه را کنترل کرد. سرعت گروه از فراسرعت به فروسرعت کلیدزنی می‌شود. از این سامانه می‌توان برای ساخت کلیدزن نوری مورد استفاده قرار گیرد که کاربرد فراوانی در ارتباطات کوانتومی و محاسبات کوانتومی دارد.

مرجع‌ها

[۱] D. J. Gauthier and R. W. Boyd, Fast Light, “Fast Light, Slow Light and Optical Precursors: What Does It All Mean?”, Photonics Spectra, Vol. ٤١, (٢٠٠٧).

[۲] J. Kim, O. Benson, H. Kan, and Y. Yamamoto, “A Single-Photon Turnstile Device”, Nature, Vol. ٣٩٧, pp. ٥٠٠, ١٩٩٩.

[۳] M. Razavy, *Quantum Theory of Tunneling*, Chap. ٢ and ٣, World Scientific, ٢٠١٤.

[٤] M. Mahmoudi and M. Sahrai, “Absorption-Free Superluminal Light Propagation in a Quantum-Dot Molecule”, Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures, Vol. ٤١, pp. ١٧٧٢, ٢٠٠٩.

[٥] W. W. Chow, H. C. Schneider, and M. C. Phillips, “Theory of Quantum-Coherence Phenomena in Semiconductor Quantum Dots”, Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys., Vol. ٦٨, pp. ١٠, ٢٠٠٣.

[٦] S. H. Asadpour et al., “Enhancement of Kerr nonlinearity at long wavelength in a quantum dot nanostructure”, Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures, Vol. ٤٣, No. ١٠, pp. ١٧٥٩–١٧٦٢, ٢٠١١.

[٧] M. Sahrai, A. Maleki, R. Hemmati, and M. Mahmoudi, “Transient dispersion and absorption in a V-shaped atomic system,” The European Physical Journal D, Vol. ٥٦, No. ١, pp: ١٠٥-١١٢, ٢٠٠٩.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]