



بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



طراحی سوئیچ نوری بر مبنای چاه کوانتومی دوگانه جفت شده

جلیل شیری^۱، مصطفی صحرائی^۱، جعفر پورصمد^۲، فروغ بزرگزاده^۱

^۱ پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانشگاه بناب، بناب، ایران

سوئیچ زنی اپتیکی با استفاده از کنترل جذب و پاشندگی نور پروب اعمال شده به یک چاه کوانتومی مربوط به نیم رسانایی از جنس GaAs/AlGaAs مورد بحث قرار گرفته است. نشان داده می شود که جذب و پاشندگی میدان پروب به فرکانس رابی میدان های اعمال شده وابستگی پیدا میکند. همچنین با کنترل فرکانس رابی و تونل زنی می توان سرعت گروه را از فراسرعت به فرو سرعت و بالعکس کنترل نمود.

کلید واژه- پاشندگی، جذب، چاه کوانتومی، سوئیچ زنی، سرعت گروه

Design of an Optical switching based on Semiconductor double coupled quantum well

Jalil Shiri¹, Mostafa Sahrai², Jafar Poursamad² and Forough Bozorgzadeh¹

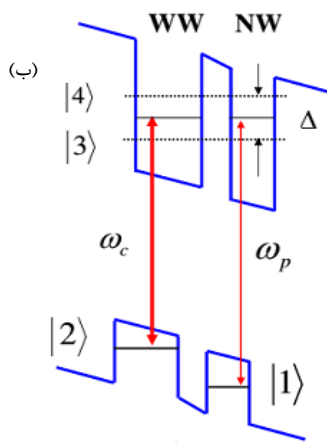
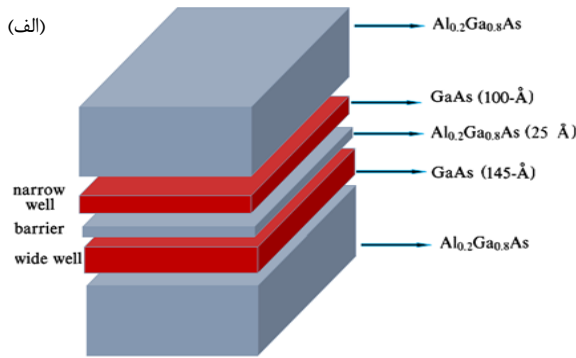
¹ Research institute for applied physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz
² Bonab University, Bonab, Iran

Abstract- An optical switch with controlling the absorption and the dispersion of a probe pulse through a coupled quantum well (CQW) based on GaAs/AlGaAs is investigated. It is shown that the probe dispersion and the absorption are dependent on the Rabi-frequency. Also, by controlling of the Rabi-frequency and tunneling, group velocity of a light pulse can be controlled from superluminal to subluminal or vice versa.

Keywords: Dispersion, Absorption, Quantum well, switching, Group velocity

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

کنترلی هستند و $\vec{\rho}_{ij}$ ($i = 3, 4, j = 1, 2$) ممان دوقطبی‌های گذار مربوطه هستند.



شکل ۱: ساختار چاه کوانتومی دوگانه (الف) شکل هندسی و ضخامت لایه های نیم رسانا (ب) جداسازی نوار ظرفیت و نوار رسانش

هامیلتونی سیستم در تصویر اندرکنش از طریق جملات زیر به دست می‌آیند:

$$H_0 = \hbar \sum_{i=1}^4 \omega_i |i\rangle\langle i| \quad (1)$$

$$H_1 = -\hbar \tilde{\Omega}_{c_1} e^{-i\omega_c t} |4\rangle\langle 2| - \hbar \tilde{\Omega}_{c_2} e^{-i\omega_c t} |3\rangle\langle 2| - \hbar \tilde{\Omega}_{p_1} e^{-i\omega_p t} |4\rangle\langle 1| - \hbar \tilde{\Omega}_{p_2} e^{-i\omega_p t} |3\rangle\langle 1| + c.c \quad (2)$$

$$H_2 = -\hbar \sum_k \begin{bmatrix} g_k^{(1)} e^{-i\nu_k t} |4\rangle\langle 2| \hat{b}_k + g_k^{(2)} e^{-i\nu_k t} |3\rangle\langle 2| \hat{b}_k \\ + g_k^{(3)} e^{-i\nu_k t} |4\rangle\langle 1| \hat{b}_k + g_k^{(4)} e^{-i\nu_k t} |3\rangle\langle 1| \hat{b}_k \\ + g_k^{(5)} e^{-i\nu_k t} |2\rangle\langle 1| \hat{b}_k \end{bmatrix} + c.c \quad (3)$$

عبارت $\hbar \omega_i$ نشان دهنده انرژی بین ترازهای می باشد. $g_k^{(1,2,3,4,5)}$ ضرایب تزویج کننده هستند که هنگام

در سال‌های اخیر قابلیت کنترل خواص اپتیکی محیط توجه زیادی را به خود جلب نموده است. یکی از موضوعات مورد علاقه محققین در این زمینه، بررسی جذب، پاشندگی و انتشار فراسرعت و فروسرعت نور در این محیط‌ها می‌باشد [1]. پاسخ اپتیکی محیط به میدان‌های اعمالی توسط قطبش مشخص می‌گردد و از این طریق می‌توان کمیت‌هایی نظیر جذب، پاشندگی و سرعت گروه نور را در محیط‌ها بدست آورد. شدت میدان کنترل‌کننده بر انتشار باریکه کاوشگر و در نتیجه بر جذب و پاشندگی آن تأثیرگذار است. به تازگی مطالعه‌ی رفتار خطی [2] و غیر خطی [3] مواد نیم‌رسانا بدلیل دارا بودن زمان واهلش سریع، پاسخ نوری غیرخطی بزرگ و انعطاف‌پذیری بالا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [4]. نیم-رساناها در ابعاد پایین مانند چاه کوانتومی کاربرد بسیاری در ادوات الکترونیکی دارند. در این مقاله، قابلیت کنترل خواص اپتیکی محیط توسط شدت میدان کنترل و پدیده‌ی تونل‌زنی، بر انتشار فراسرعت و فروسرعت نور و همچنین افزایش و کاهش جذب نور در یک چاه کوانتومی دوگانه مورد مطالعه قرار گرفته است از چنین ساختاری می‌توان برای ساخت سوئیچ نوری بهره برد که کاربردهای فراوانی در مخابرات نوری و محاسبات کوانتومی دارد.

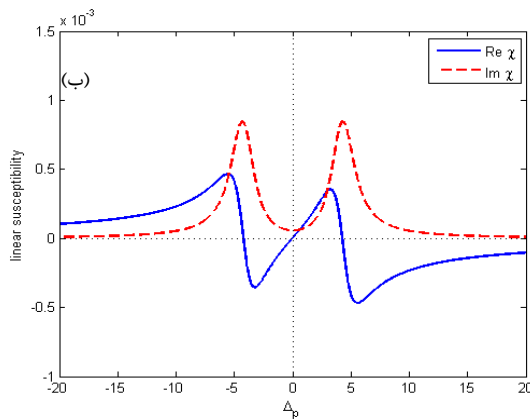
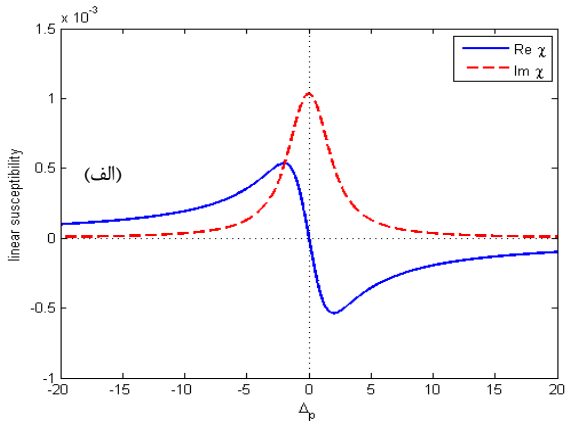
۱- مدل و معادلات

در شکل ۱ ساختار یک چاه پتانسیل دوگانه آلیایده نوع n، شامل چاه عریض با ضخامت ۱۴۵ آنگستروم و ۱۰ جفت از چاه باریک با ضخامت ۱۰۰ آنگستروم هر دو از جنس GaAs که توسط لایه نازکی از Al_{0.2}Ga_{0.8}As به ضخامت ۲۵ آنگستروم از هم جدا شده اند تشکیل شده است [5]. اختلاف انرژی الکترونیکی حالت‌های مقید و نامقید توسط رابطه $\omega_s = \frac{E_4 - E_3}{\hbar} = (\sqrt{\delta^2 + (2T)^2})$ در آن δ شکافتگی ترازها در غیاب تونل‌زنی و T المان ماتریس تونل‌زنی می‌باشد که با اعمال ولتاژ خارجی حاصل می‌شود. ساختار انرژی نیم‌رسانای ذکر شده توسط یک سیستم چهارترازی نشان داده می‌شود. تراز پایه‌ی |1> توسط میدان‌های کاوشگر ضعیف با فرکانس رابی $\Omega_{p1} = \vec{\rho}_{31} \cdot \vec{E}_p / 2\hbar$ و $\Omega_{p1} = \vec{\rho}_{31} \cdot \vec{E}_p / 2\hbar$ به ترتیب به ترازهای |4> و |3> جفت می‌شوند. تراز |2> نیز توسط میدان‌های تزویجی کنترلی با فرکانس های رابی $\Omega_{c1} = \vec{\rho}_{32} \cdot \vec{E}_c / 2\hbar$ و $\Omega_{c2} = \vec{\rho}_{42} \cdot \vec{E}_c / 2\hbar$ به ترتیب به تراز های |3> و |4> جفت می‌شوند. \vec{E}_c و \vec{E}_p دامنه‌ی میدان‌های کاوشگر و

در سامانه است.

۲- نتایج و بحث

در شکل ۲-الف پذیرفتاری خطی بر حسب نامیزانی میدان کاوشگر و به ازای $\Omega_{c1} = \Omega_{c2} = 0.25\gamma$ رسم شده است. همانطور که در نمودار مشخص است با این انتخاب پارامترها، بخش موهومی ضریب پذیرفتاری الکتریکی که با جذب متناسب است یک قله جذبی در $\Delta p = 0$ خواهد داشت. در این حالت، شیب پاشندگی خطی در اطراف واکوکی صفر میدان کاوشگر، منفی است که متناظر با انتشار فراسرعت نور است. در شکل ۲-ب) با افزایش فرکانس رابی به $\Omega_{c1} = \Omega_{c2} = 3\gamma$ ملاحظه می‌شود که جذب نور در اطراف $\Delta p = 0$ کاهش چشمگیری داشته و شیب پاشندگی از منفی به مثبت تغییر یافته است که متناظر با تغییر سرعت گروه از فراسرعت به فرورسعت می‌باشد.



شکل ۲. پذیرفتاری خطی به ازای $\Omega_{c1} = \Omega_{c2} = 0.25\gamma$ (الف) و $\Omega_{c1} = \Omega_{c2} = 3\gamma$ (ب) سایر پارامترها عبارتند از: $\omega_s = 0.1\gamma$, $\Omega_p = 0.001\gamma$, $\gamma_{31} = \gamma_{41} = 3\gamma$, $\gamma_{32} = \gamma_{42} = 0.5\gamma$, $\gamma_2 = 1\gamma$, $\gamma_{12}^{dph} = \gamma_{13}^{dph} = \gamma_{14}^{dph} = \gamma_{23}^{dph} = \gamma_{24}^{dph} = \gamma_{34}^{dph} = 0.1\gamma$.

شکل ۳ سوئیچزنی شیب پاشندگی از مقداری مثبت به یک مقدار منفی و برعکس را نشان می‌دهد که متناظر با تغییر سرعت گروه از فرو سرعت به فرا سرعت و برعکس می-

برهم کنش اتم با k امین مد خلأ (که فرکانس V_k دارد) ظاهر می‌شود. $(\hat{b}_k^\dagger)\hat{b}_k$ عملگرهای فنا (خلق) فوتون در k امین مد خلأ هستند.

دینامیک این سیستم از طریق معادلات ماتریس چگالی توصیف می‌شود

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] \quad (1)$$

با استفاده از تقریب موج چرخان، با جایگذاری معادلات (۱)، (۲) و (۳) در معادله (۴)، معادلات ماتریس چگالی بدست خواهند که در اینجا برخی از جملات آن آورده شده است.

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{22} &= -\gamma_2 \rho_{22} + \gamma_{32} \rho_{33} + \gamma_{42} \rho_{44} + i \Omega_{c_2}^* \rho_{32} - i \Omega_{c_2} \rho_{23} + \\ & i \Omega_{c_1}^* \rho_{42} - i \Omega_{c_1} \rho_{24} \\ \dot{\rho}_{33} &= -\gamma_3 \rho_{33} - i \Omega_{p_2}^* \rho_{31} + i \Omega_{p_2} \rho_{13} + i \Omega_{c_2}^* \rho_{23} - i \Omega_{c_2} \rho_{32} \\ \dot{\rho}_{44} &= -\gamma_4 \rho_{44} - i \Omega_{p_1}^* \rho_{41} + i \Omega_{p_1} \rho_{14} - i \Omega_{c_1}^* \rho_{42} + i \Omega_{c_1} \rho_{24} \\ \dot{\rho}_{12} &= [-\frac{\Gamma_{12}}{2} + i(\Delta_p - \Delta_c)] \rho_{12} + i \Omega_{p_2}^* \rho_{32} - i \Omega_{c_2} \rho_{13} + i \Omega_{p_1}^* \rho_{42} - i \Omega_{c_1} \rho_{14} \\ \dot{\rho}_{13} &= [-\frac{\Gamma_{13}}{2} - i(\frac{\omega_s}{2} - \Delta_p)] \rho_{13} + i \Omega_{p_2}^* (\rho_{33} - \rho_{11}) - i \Omega_{c_2}^* \rho_{12} + i \Omega_{p_1}^* \rho_{43} \\ \dot{\rho}_{14} &= [-\frac{\Gamma_{14}}{2} + i(\frac{\omega_s}{2} + \Delta_p)] \rho_{14} + i \Omega_{p_1}^* (\rho_{44} - \rho_{11}) + i \Omega_{p_2}^* \rho_{34} - i \Omega_{c_1}^* \rho_{12} \\ \rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

پارامترهای واکوکی به صورت $\Delta_c (= \omega_0 - \omega_2 - \omega_c)$ و $\Delta_p (= \omega_0 - \omega_1 - \omega_p)$ تعریف می‌شوند و $\omega_0 (= \frac{\omega_4 + \omega_3}{2})$ فرکانس گذار مرکزی می‌باشد. نرخ واهلش کل به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Gamma_{0n} = \gamma_{n0}/2 + \gamma_{n0}^{dph}, \Gamma_{mn} = (\gamma_{n0} + \gamma_{m0})/2 + \gamma_{mn}^{dph} \quad m, n = 1, 2, 3, \quad m \neq n \quad (3)$$

که شامل واهلش‌های خود بخودی و واهلش فازی ناشی از برهمکنش الکترون-الکترون، ارتعاشات شبکه و ناهمواری سطوح میان لایه‌ها می‌باشد.

سرعت گروه و پذیرفتاری خطی به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آیند

$$v_g = \frac{c}{1 + 2\pi\chi'(v_p) + 2\pi v_p (\partial\chi'(v_p)/\partial v_p)} \quad (4)$$

$$\chi = \frac{2N}{\epsilon_0 \hbar |\Omega_p|} (\delta \rho_{31}^2 \rho_{31}^{(1)} + \delta \rho_{41}^2 \rho_{41}^{(1)}) \quad (5)$$

که در روابط اخیر N چگالی حاملین در نیم‌رسانا می‌باشد و χ' قسمت حقیقی پذیرفتاری الکتریکی متناظر با پاشندگی

متفاوت ω_s را نشان می‌دهد. مطابق با نمودار، به ازای $\omega_s = 0.1\gamma$ شیب پاشندگی از صفر افزایش یافته و در نهایت به یک مقدار ثابت مثبت رسیده است که منجر به انتشار فرورسعت نور خواهد شد و به ازای $\omega_s = 6\gamma$ شیب پاشندگی برای مدت بسیار کوتاهی شیب پاشندگی مثبت شده و سپس به یک مقدار ثابت منفی می‌رسد که متناظر با انتشار فراسرعت نور می‌باشد. شکل ۴-ب سوئیچ‌زنی سرعت گروه را بر اساس تغییرات ω_s نشان می‌دهد. زمان لازم برای سوئیچ سرعت گروه از فرورسعت به فراسرعت حدود ۵ پیکو ثانیه و از فراسرعت به فرورسعت حدود ۸ پیکو ثانیه می‌باشد.

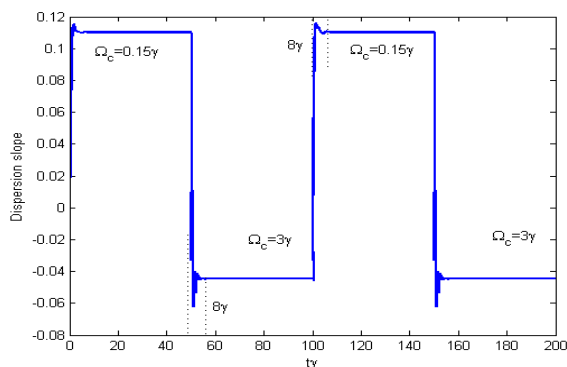
۳- نتیجه گیری

در این مقاله در یک چاه کوانتومی نامتقارن اترتونل زنی و شدت میدان کوپلاژ بر روی ویژگی‌های جذب و پاشندگی میدان کاوشگر بررسی شده است. نشان داده شده است که وابستگی فرکانس رابی و تونل‌زنی شیب پاشندگی را از منفی به مثبت و بالعکس تغییر می‌دهد. همچنین موجب تغییر مقدار جذب نور در این محیط می‌شود. به علت رابطه سرعت گروه با شیب پاشندگی، سرعت گروه نیز از مثبت به منفی و برعکس تغییر می‌کند که از این اثر می‌توان بعنوان عمل سوئیچ زنی در ادوات سوئیچ‌زنی نوری استفاده کرد.

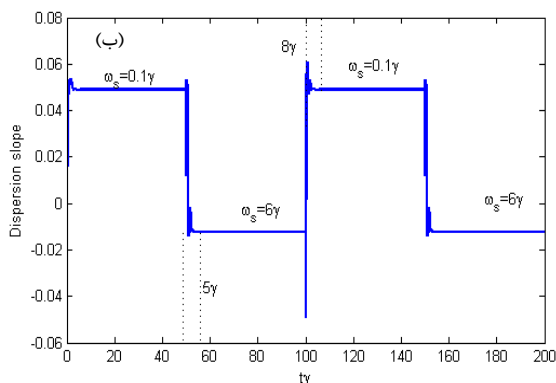
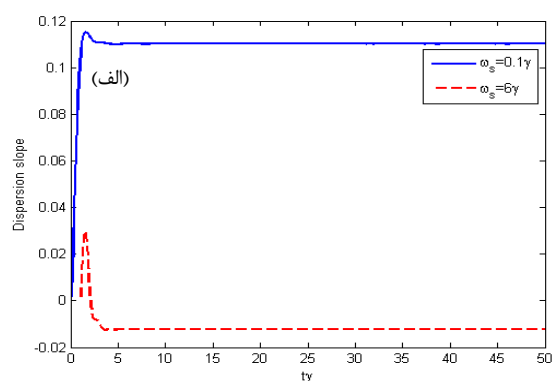
مراجع

- [1] M. Sahrai, A. Maleki, R. Hemmati, and M. Mahmoudi, *Eu r. Phy s. J. D* **56**, 105–112 (2010).
- [2] M. O. Scully, M. S. Zubairy, *Quantum Optics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, (1997).
- [3] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic, San Diego, (1992).
- [4] Amitabh Joshi, *PHYSICAL REVIEW B* **79**, 115315 2009.
- [5] H.G. Roskov, M.C. Nuss, J. Shah, K. Leo, D.A.B. Miller, A.M. Fox, S. Schmitt-Rink, K. Kohler, *Physical Review Letters* **68** (1992) 2216.

باشد. هنگامیکه فرکانس رابی کوچک است شیب پاشندگی منفی است و انتشار نور به صورت فراسرعت خواهد بود. با افزایش فرکانس رابی شیب نمودار مثبت شده، سرعت گروه به فرورسعت تبدیل می‌شود. زمان لازم برای تغییر سرعت گروه بواسطه تغییر فرکانس رابی از فراسرعت به فرورسعت و برعکس، حدود ۸ پیکوثانیه تخمین زده می‌شود.



شکل ۳. سوئیچ‌زنی مربوط به سرعت گروه به ازای $\Omega_{c1} = \Omega_{c2} = (0.15\gamma, 3\gamma)$ سایر پارامترها مانند شکل ۲ می‌باشند.



شکل ۴-الف تحول زمانی شیب پاشندگی به ازای $\omega_s = (0.1\gamma, 6\gamma)$. سوئیچ‌زنی مربوط به سرعت گروه به ازای $\omega_s = (0.1\gamma, 6\gamma)$ بقیه پارامترها همانند شکل ۲ می‌باشد.

شکل ۴-الف نمودار تحول زمانی شیب پاشندگی برای دو مقدار