



بررسی انتشار لیزر مادون قرمز با طول موج $\lambda=1.550\mu\text{m}$ در یک سیستم نانو ساختار چاه کوانتومی سه گانه

جلیل شیری^{۱*}، عبدالله ملک زاده^۲

^۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ مرکز اپتیک و لیزر، گروه علوم پایه، دانشگاه امان حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده - ادر این مقاله انتشار لیزر مادون قرمز در طول موج مخابراتی ۱.۵۵ میکرومتر و کلیدزنی الکترواپتیکی در یک سیستم چاه کوانتومی سه گانه از جنس *InGaAs/InP* مورد بحث قرار گرفته است. اثر تونل زنی بر روی جذب و پاشندگی مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده خواهد شد که تغییر سرعت گروه پالس نوری از فراسرعت به فرو سرعت و بالعکس، توسط پارامترهای تونل زنی قابل کنترل می باشد.

کلید واژه - جذب و پاشندگی، سرعت گروه، تونل زنی، پمپاژ ناهمدوسی

Propagation of infrared laser beam at $\lambda=1.550\mu\text{m}$ in a compact triple coupled quantum wells nanostructure

Jalil Shiri^{*,1}, Abdollah Malakzadeh²

¹Young Researchers and Elite Club, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Center for Laser and Optics, Basic Sciences Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract- Based on *InGaAs/InP* triple coupled quantum well heterostructure an optical switch is suggested. the effect of tunneling on the absorption and the dispersion is discussed. We show that the group velocity of a light pulse can be controlled from superluminal to subluminal (or vice versa) just by controlling tunneling between quantum wells and an incoherent pumping field.

Keywords: Quantum wells, Absorption and Dispersion, Group velocity, Tunnelling effect, incoherent pumping field

مقدمه

برانگیخته چاه کوانتومی اول اعمال می‌شود. در اینجا μ ، ممان دوقطبی گذار الکترون و E دامنه میدان الکتریکی میدان کاوشگر است. هامیلتونی در تصویر اندرکنش برای این سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$H = H_0 + H_1 \quad (1)$$

که

$$H_0 = \sum_{j=0}^5 E_j |j\rangle\langle j| \quad (2)$$

$$H_1 = [\Omega_p e^{-i\omega_p t} |0\rangle\langle 1| + \epsilon |0\rangle\langle 1| + T_{12} |1\rangle\langle 2| + T_{23} |2\rangle\langle 3| H.c.], \quad (3)$$

در اینجا پارامتر T مربوط به تونل‌زنی است. انرژی مربوط به هر تراز با رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود

$$E_j = \hbar\omega_j, \quad (j = 0, 1, 2, 3) \quad (4)$$

معادلات ماتریس چگالی برای جمعیت ترازهای الکترونی در تقریب موج چرخان و مختصات دوران یافته عبارت است از

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{00} &= -i\Omega_p(\rho_{01} - \rho_{10}) - \Lambda\rho_{00} + (\gamma_{10} + \Lambda)\rho_{11} + \gamma_{20}\rho_{22} + \gamma_{30}\rho_{33} \\ \dot{\rho}_{11} &= i\Omega_p(\rho_{01} - \rho_{10}) + \Lambda\rho_{00} - (\gamma_{10} + \Lambda)\rho_{11} + iT_{12}(\rho_{12} - \rho_{21}) \\ \dot{\rho}_{22} &= -iT_{12}(\rho_{12} - \rho_{21}) + iT_{23}(\rho_{23} - \rho_{32}) - \gamma_{20}\rho_{22} \\ \dot{\rho}_{33} &= -iT_{23}(\rho_{23} - \rho_{32}) - \gamma_{30}\rho_{33} \end{aligned} \quad (5)$$

که در روابط فوق، $\delta_p = \omega_{10} - \omega_p$ ، نامیزانی پروپ بین ترازهای $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ است که در آن $\omega_{10} = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$ می‌باشد. نرخ واهلش کل به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Gamma_{0n} = \gamma_{n0}/2 + \gamma_{n0}^{dph}, \Gamma_{mn} = (\gamma_{n0} + \gamma_{m0})/2 + \gamma_{mn}^{dph} \quad (6)$$

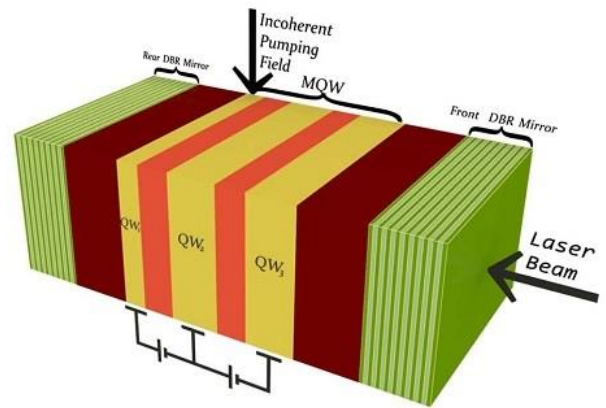
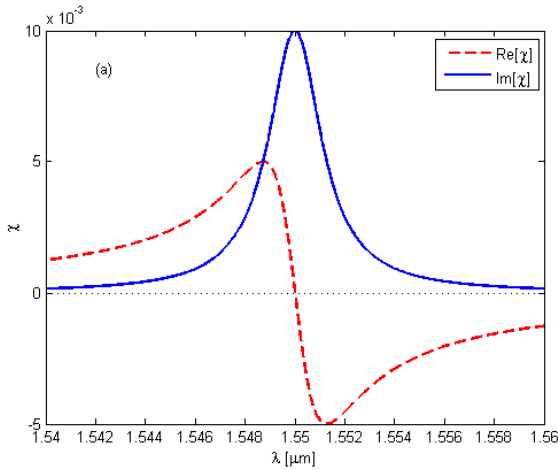
$m, n = 1, 2, 3, \quad m \neq n$

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

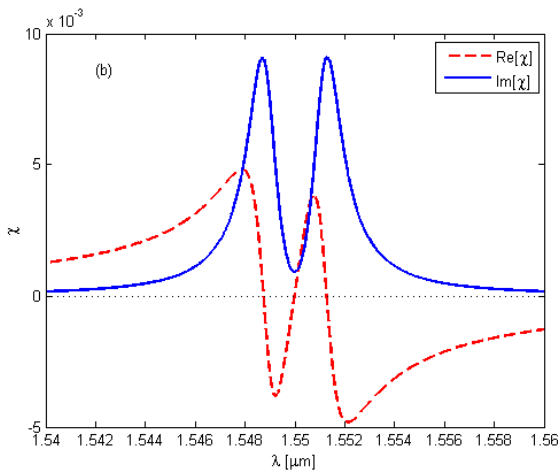
بررسی خصوصیات نوری جذب و پاشندگی در محیط‌های همدوس و همچنین کنترل سرعت گروه پالس نوری از فراسرعت به فرو سرعت و یا برعکس اخیراً مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. پژوهش‌های تئوری و تجربی برای تحقق انتشار نور فراسرعت و فرو سرعت در یک تک ساختار انجام شده است. خصوصیات جذب و پاشندگی در محیط‌های حالت جامد نظیر بلورهای فوتونیک و مواد نیم‌رساناها مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱، ۲]. چاه‌های کوانتومی، نانو ساختارهای نیم‌رسانایی هستند که حرکت الکترون‌های نوار رسانش آن‌ها در دو بعد فضایی محدود شده است؛ بنابراین الکترون‌ها و حفره‌ها می‌توانند مجموعه گسسته‌ای از انرژی‌ها را داشته باشند. چاه‌های کوانتومی دارای مزایایی چون ساختار انعطاف‌پذیر و قابل کنترل در تداخل‌های قوی است. یکی دیگر از خصوصیات مهم این ساختار داشتن زمان پهن‌شدگی بلند است [۳]. تاکنون چندین ویژگی مهم از جمله کنترل همدوسی کوانتومی در چاه‌های کوانتومی مورد بررسی قرار گرفته است [۴، ۵]. همدوسی کوانتومی در ساختارهای چاه کوانتومی توسط اعمال یک میدان لیزر و یا تونل‌زنی الکترون ایجاد می‌شود که در آن با اعمال یک پالس دمش نوری یک الکترون به تراز بالاتر برانگیخته شده و با اثر یک ولتاژ خارجی می‌توان آن را کنترل کرد [۶].

۱- روش تهیه مقاله

در شکل ۱ سیستم شامل سه چاه کوانتومی از جنس InGaAs که توسط لایه‌ای از جنس InP از هم جدا شده اند، با تراز پایه $|0\rangle$ و تراز تحریکی $|1\rangle$ در چاه کوانتوم اول و ترازهای تحریکی $|2\rangle$ و $|3\rangle$ به ترتیب در چاه‌های کوانتومی QW2، QW3 را در نظر می‌گیریم. با اعمال یک میدان الکترومغناطیسی کاوشگر، الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش چاه کوانتومی اول، که اختلاف انرژی بیشتری را در بین سطوح ایجاد می‌کند، برانگیخته می‌شود. این الکترون برانگیخته همچنین می‌تواند به چاه کوانتومی دوم و سوم تونل زده و میزان این تونل زنی توسط ولتاژ اعمالی به سیستم کنترل می‌شود. در این مدل میدان کاوشگر با فرکانس ω_p و فرکانس رابی $\Omega_p = \frac{\mu E}{\hbar}$ ، بین تراز پایه و



شکل ۱ سیستم چاه کوانتومی سه گانه از جنس InGaAs/InP



برای به دست آوردن قسمت خطی پذیرفتاری الکتریکی نیازمند حل ماتریس چگالی در شرایط پایا هستیم. در سیستم مورد مطالعه فوق، پذیرفتاری میدان کاوشگر ضعیف با ρ_{01} تعیین می شود.

$$\chi = \frac{2N \wp}{E \epsilon_0} \rho_{01} \quad (7)$$

در رابطه فوق، N چگالی حاملین بار در چاه کوانتومی است. قسمت حقیقی و موهومی پذیرفتاری الکتریکی $(\chi = \chi' + i \chi'')$ ، به ترتیب بیانگر پاشندگی و جذب نور در محیط می باشد. پاشندگی نقش مهمی در به دست آوردن سرعت گروه v_g دارد که از طریق رابطه‌ی زیر از شیب پاشندگی بدست می آید.

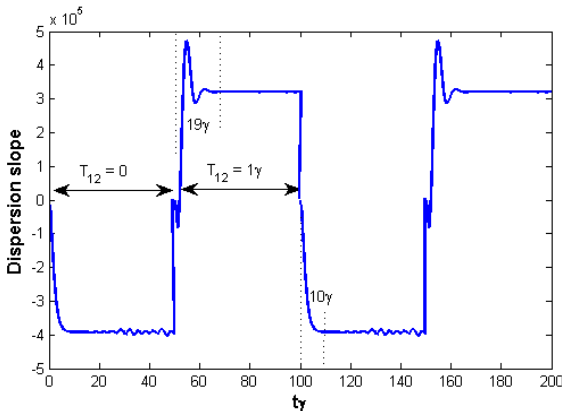
$$v_g = \frac{c}{1 + 2\pi\chi'(v_p) + 2\pi v_p (\partial\chi'/\partial v_p)} \quad (8)$$

۲- بحث و نتایج

در شکل ۲ نمودارهای جذب (بخش موهومی پذیرفتاری الکتریکی) و پاشندگی (بخش حقیقی پذیرفتاری الکتریکی) نشان داده شده است. در شکل (۲-الف) اثر تونل زنی وارد نشده و یک پیک جذب در طول موج $\lambda = 1.550 \mu m$ وجود خواهد داشت و شیب پاشندگی نیز حول طول موج $\lambda = 1.550 \mu m$ ، منفی است. در شکل (۲-ب) اثر اعمال تونل زنی T_{12} نشان داده شده است. در این حالت تونل زنی T_{12} با ایجاد همدوسی در سیستم موجب کاهش چشمگیر جذب در ناحیه طول موج کاوشگر شده است. از طرفی شیب پاشندگی از منفی به مثبت تغییر پیدا کرده است و این موضوع می تواند مبنایی برای طراحی یک کلید باشد.

شکل ۲. نمودار جذب و پاشندگی به ازای پارامترهای $T_{12} = T_{23} = 0$ (ب) $T_{12} = 1\gamma$, $T_{23} = 0$ (الف)

سایر پارامترها عبارتند از:
 $\gamma_{20} = \gamma_{30} = 0.1 \gamma_{10}$, $\gamma_{10} = 0.6 THz$, $\Gamma_{01} = \gamma = 1 THz$, $\Lambda = 0$
 $\omega_{12} = \omega_{13} = 0.1\gamma$, $\Omega_p = 0.01\gamma$,,



شکل ۳ نمودار کلیدزنی سرعت گروه بر اساس تونل زنی به ازای پارامترهای $T_{12} = (0, 1\gamma)$, $T_{23} = 0$

تخمین زده می‌شود.

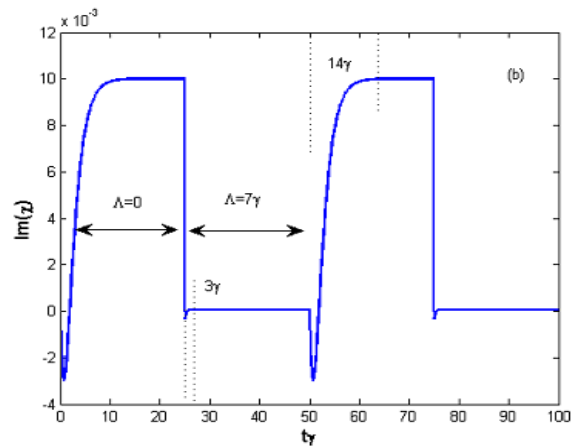
۳- نتیجه‌گیری

ویژگی‌های حالت پایا و گذرای جذب و پاشندگی نور لیزر کاوشگر در یک سامانه چاه کوانتومی مورد بحث قرار گرفت. نشان داده شد که جذب و پاشندگی و سرعت گروه نور از طریق پارامتر تونل‌زنی قابل کنترل است. زمان کلید زنی برای تغییر انتشار فراسرعت نور به فروسرعت نور و برعکس بین ۱۰ تا ۱۹ پیکو ثانیه تخمین زده شد. همچنین زمان لازم برای کلید زنی جذب نور از یک مقدار بالا به مقدار صفر بین ۳ الی ۱۴ پیکو ثانیه تخمین زده شد. این فرآیند می‌تواند به دلیل داشتن سرعت کلیدزنی بالا و قابل کنترل بودن آن در بسیاری از سامانه‌های ارتباطی اپتیکی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] Chi Che, Qiqi Han, Jing Ma, Yanping Zhou, Siyuan Yu, Liying Tan, "Electron radiation effects on InAs/GaAs quantum dot lasers," *Laser Phys.* 22, 8, 1317-1320 (2012).
- [2] Z. Wang, "Control of the probe absorption via incoherent pumping fields in asymmetric semiconductor quantum wells," *Ann. Phys.* 326, 340-349 (2011).
- [3] G. B. Serapiglia, E. Paspalakis, C. Sirtori, K. L. Vodopyanov, and C. C. Phillips, *Phys. Rev. Lett.* 84, 1019 (2000).
- [4] J.M. Villas-Bôas, A.O. Govorov, S.E. Ulloa, *Phys. Rev. B*, 69, 125342 (2004).
- [5] J. F. Dynes, M. D. Frogley, J. Rodger, and C. C. Phillips, *Phys. Rev. B* 72, 085323 (2005).
- [6] C.J. Chang-Hasnain, P.C. Ku, J. Kim, S.L. Chuang, *Proc. IEEE*, 91, 1884 (2003) and references therein.

شکل ۳ نمودار کلید زنی برای تغییر شیب پاشندگی (قسمت حقیقی χ) از مثبت به منفی (و برعکس) که متناظر با تغییر سرعت گروه از فروسرعت به فراسرعت (و برعکس) می‌باشد را نشان می‌دهد. در ابتدا تونل‌زنی T_{12} را صفر اختیار می‌کنیم که در این حالت در بازه صفر تا ۵۰ پیکو ثانیه شیب پاشندگی منفی است و با توجه به رابطه (۸) انتشار فراسرعت نور را بدست می‌دهد. با اعمال تونل‌زنی بین $QW1$ و $QW2$ یعنی به ازای $T_{12} = 1\gamma$ ، شیب پاشندگی در بازه ۵۰ الی ۱۰۰ پیکو ثانیه مثبت شده که منجر به انتشار فروسرعت نور خواهد شد. تغییرات شیب پاشندگی برای حالت پایا در شکل ۲(الف) و (ب) نیز نشان داده شده است. زمان لازم برای این فرآیند کلید زنی با توجه به شکل ۳ بین ۱۰ تا ۱۹ پیکو ثانیه تخمین زده می‌شود.



شکل ۴ نمودار سوئیچ زنی جذب به ازای پارامترهای

$$T_{12} = 0, \Lambda = (0, 7\gamma), T_{23} = 0$$

نمودار شکل ۴ اثر پمپاژ ناهمدوس را به روی جذب نور کاوشگر در حالت گذرا نشان می‌دهد. تونل‌زنی T_{12} دارای مقدار ثابت 1γ می‌باشد و پمپاژ ناهمدوس بین مقادیر صفر و 7γ تغییر می‌کند. ملاحظه می‌شود برای حالتی که پمپاژ ناهمدوس صفر است جذب نور پروپ با گذشت زمان از لحظه صفر تا ۱۰ پیکو ثانیه ضمن داشتن یک حالت نوسانی، افزایش یافته و بعد از آن تا لحظه ۲۵ پیکو ثانیه به یک مقدار ثابت مثبت می‌رسد و با اعمال پمپاژ ناهمدوس جذب نور از لحظه ۲۵ الی ۵۰ پیکو ثانیه کاهش یافته و به یک مقدار ثابت نزدیک به صفر می‌رسد. با توجه به شکل ۴ زمان کلید زنی لازم برای تغییر جذب از یک مقدار بالا به یک مقدار بسیار نزدیک به صفر و برعکس بین ۳ تا ۱۴ پیکو ثانیه