بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی انتشار لیزر مادون قرمز با طول موج λ=1.550μm در یک سیستم نانوساختار چاه کوانتومی سه‌گانه

جلیل شیری *[۱] ، عبدالله ملک‌زاده[۲]

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

[۲]مرکز اپتیک و لیزر، گروه علوم پایه، دانشگاه امام 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 سه‌گانه از جنس *InGaAs/InP* مورد بحث قرار گرفته است. اثر تونل‌زنی 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 تونل‌زنی قابل کنترل می‌باشد.

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

Propagation of infrared laser beam at λ=1.550μm in a compact triple coupled quantum wells nanostructure

Jalil Shiri *[,1], Abdollah Malakzadeh[2]

[1]Young 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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

مقدمه

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 موردتوجه پژوهشگران زیادی قرارگرفته است. پژوهش‌های تئوری و تجربی برای تحقق انتشار نور فراسرعت و فرو سرعت در یک تک ساختار انجام‌شده است. خصوصیات جذب و پاشندگی در محیط‌های حالت‌جامد نظیر بلورهای فوتونیکی و مواد نیم‌رساناها موردتوجه زیادی قرارگرفته است[۱،۲]. چاه‌های کوانتومی، نانو ساختارهای نیم¬رسانایی هستند که حرکت الکترون‌های نوار رسانش آن‌ها در دو بعد فضایی محدودشده است؛ بنابراین الکترون‌ها و حفره‌ها می‌توانند مجموعه گسسته‌ای از انرژی‌ها را داشته باشند. چاه‌های کوانتومی دارای مزایایی چون ساختار انعطاف‌پذیر و قابل‌کنترل در تداخل‌های قوی است. یکی دیگر از خصوصیات مهم این ساختار داشتن زمان پهن‌شدگی بلند است[۳]. تاکنون چندین ویژگی مهم ازجمله کنترل همدوسی کوانتومی در چاه¬های کوانتومی موردبررسی قرارگرفته است[۴،۵]. همدوسی کوانتومی در ساختـارهای چاه کوانتـومی توسط اعمال یک میـدان لیزر و یا تونل‌زنی الکترون ایجاد می‌شود که در آن با اعمال یک پالس دمش نوری یک الکترون به تراز بالاتر برانگیخته‌شده 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 ωp، و فرکانس رابی $\Omega_p = \frac{\mu E}{\hbar}$، بین تراز پایه و 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 به‌صورت زیر نوشته میشود.

$$H = H_0 + H_1 \qquad (۱)$$

که

$$H_0 = \sum_{j=0}^{5} E_j \,|j\rangle\langle j| \qquad (۲)$$

$$H_1 = [\Omega_p e^{-i\omega_p t}\,|0\rangle\langle 1| + \wp\,\varepsilon\,|0\rangle\langle 1| + T_{12}\,|1\rangle\langle 2| + T_{23}\,|2\rangle\langle 3|\, H.c.], \qquad (۳)$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
\dot{\rho}_{00} &= -i\,\Omega_p(\rho_{01}-\rho_{10}) - \Lambda\rho_{00} + (\gamma_{10}+\Lambda)\rho_{11} + \gamma_{20}\rho_{22} + \gamma_{30}\rho_{33}\\
\dot{\rho}_{11} &= i\,\Omega_p(\rho_{01}-\rho_{10}) + \Lambda\rho_{00} - (\gamma_{10}+\Lambda)\rho_{11} + iT_{12}(\rho_{12}-\rho_{21})\\
\dot{\rho}_{22} &= -iT_{12}(\rho_{12}-\rho_{21}) + iT_{23}(\rho_{23}-\rho_{32}) - \gamma_{20}\rho_{22}\\
\dot{\rho}_{33} &= -iT_{23}(\rho_{23}-\rho_{32}) - \gamma_{30}\rho_{33}
\end{aligned} \qquad (۵)$$

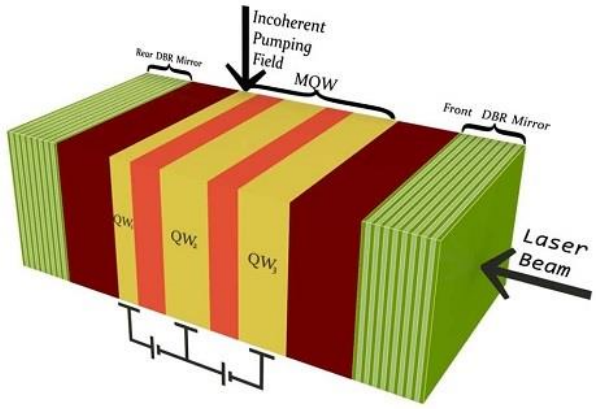
که در روابط فوق، $\delta_p = \omega_{10} - \omega_p$، نامیزانی پروپ بین ترازهای $|0\rangle \to |1\rangle$ است که دران $\omega_{10} = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$ می‌باشد. نرخ واهلش کل به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Gamma_{0n} = \gamma_{n0}/2 + \gamma_{n0}^{dph}\,,\ \Gamma_{mn} = (\gamma_{n0}+\gamma_{m0})/2 + \gamma_{mn}^{dph}$$
$$m,n = 1,2,3 \quad , \ m \neq n \qquad (۶)$$

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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]



شکل ۱ سیستم چاه کوانتومی سه‌گانه از جنس InGaAs/InP

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

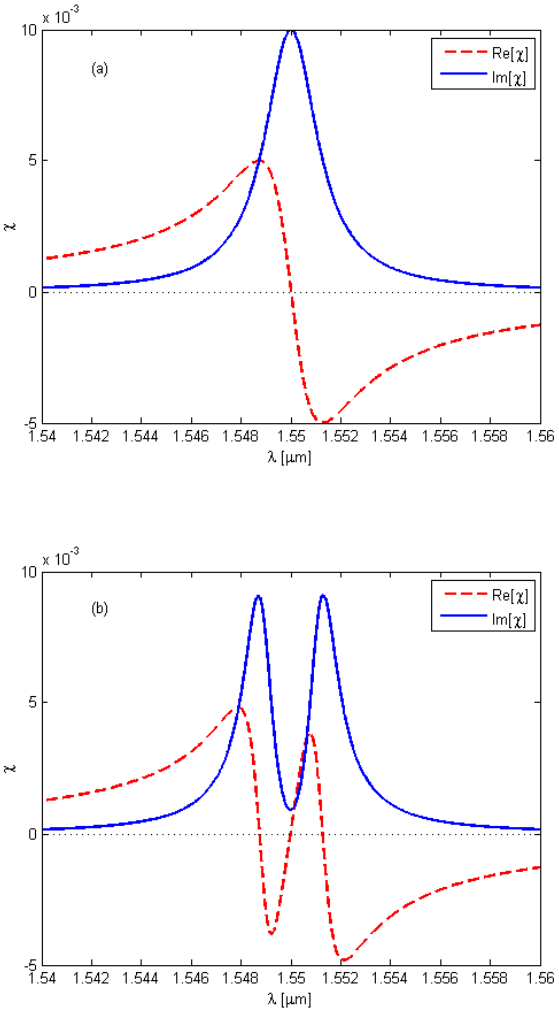
$$\chi = \frac{2N\wp}{E\,\varepsilon_0}\rho_{01} \quad \text{که} \qquad (۷)$$

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 می‌باشد. پاشندگی نقش مهمی در به دست آوردن سرعت گروه v_g دارد که از طریق رابطه‌ی زیر از شیب پاشندگی بدست می آید.

$$v_g = \frac{c}{1 + 2\pi\chi'(\nu_p) + 2\pi\nu_p\,(\partial\chi'(\nu_p)/\partial\nu_p)} \qquad (۸)$$

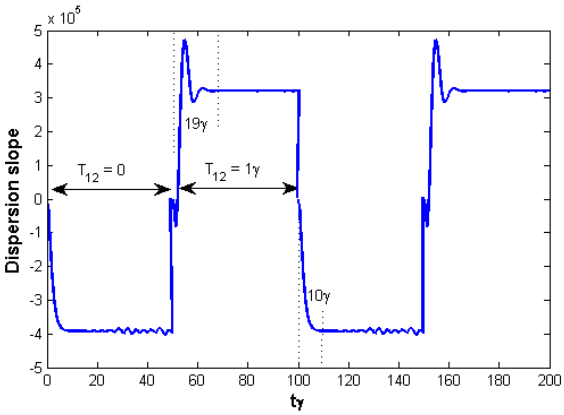
۲- بحث و نتایج

در شکل ۲ نمودارهای جذب (بخش موهومی پذیرفتاری الکتریکی) و پاشندگی (بخش حقیقی پذیرفتاری الکتریکی) نشان داده‌شده است. در شکل (۲-الف) اثر تونل زنی وارد نشده و یک پیک جذب در طول موج λ=1.550μm وجود خواهد داشت و شیب پاشندگی نیز حول طول موج λ=1.550μm ، منفی است. در شکل (۲-ب) اثر اعمال تونل زنی T_{12} نشان داده‌شده 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 پیداکرده است و این موضوع می‌تواند مبنایی برای طراحی یک کلید باشد.



شکل۲. نمودار جذب و پاشندگی به ازای پارامترهای (الف)$T_{12} = T_{23} = 0$ (ب) $T_{12} = 1\gamma$, $T_{23} = 0$

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

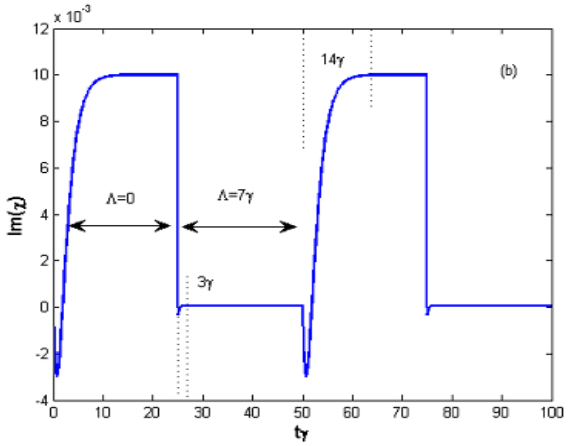


شکل ۳ نمودار کلیدزنی سرعت گروه بر اساس تونل زنی به ازای پارامترهای
$T_{12} = (0,1\gamma)$, $T_{23} = 0$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

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 صفرتا ۵۰ پیکوثانیه شیب پاشندگی منفی است و با توجه به رابطه (۸) انتشار فراسرعت نور را بدست می‌دهد. با اعمال تونل‌زنی بینQW1 و QW2یعنی به ازای $T_{12}=1\gamma$ ، شیب پاشندگی در بازه ۵۰ الی ۱۰۰پیکوثانیه مثبت شده که منجر به انتشار فروسرعت نور خواهد شد. تغییرات شیب پاشندگی برای حالت‌پایا در شکل ۲(الف)و(ب) نیز نشان داده شده است. زمان لازم برای این فرآیند کلید زنی با توجه به شکل۳ بین ۱۰ تا ۱۹ پیکوثانیه 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 صفرتا ۱۰ پیکوثانیه ضمن داشتن یک حالت نوسانی، افزایش یافته و بعدازآن تا لحظه ۲۵ پیکوثانیه به یک مقدار ثابت مثبت می‌رسد و با اعمال پمپاژ ناهمدوس جذب نور از لحظه‌ی ۲۵ الی ۵۰ پیکوثانیه کاهش‌یافته و به یک مقدار ثابت نزدیک به صفر می‌رسد. با توجه به شکل۴ زمان کلید زنی لازم برای تغییر جذب از یک مقدار بالا به یک مقدار بسیار نزدیک به صفر و برعکس بین ۳ تا ۱۴ پیکوثانیه تخمین زده می‌شود.

۳- نتیجه‌گیری

ویژگی‌های حالت‌پایا و گذرای جذب و پاشندگی نور لیزر کاوشگر در یک سامانه چاه کوانتومی موردبحث قرار گرفت. نشان داده شد که جذب و پاشندگی و سرعت گروه نور از طریق پارامتر تونل‌زنی قابل‌کنترل 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 پیکوثانیه تخمین زده شد. این فرآیند می‌تواند به دلیل داشتن سرعت کلیدزنی بالا و قابل‌کنترل بودن آن در بسیاری از سامانه‌های ارتباطی اپتیکی مورداستفاده 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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]