بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

شفافیت الکترومغناطیسی القایی در یک ساختارچاه کوانتومی متقارن نوع Y

مژده اقبال پور، سعید باطبی، حمید رحیم پور سلیمانی

گروه فیزیک دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده – در این مقاله ، یک ساختار چاه کوانتومی متقارن برای تحقیق یک ساختار چهار سطحی Y شکل پیشنهاد شده است. بعلاوه، شفافیت القایی الکترومغناطیسی در این ساختار در برهم کنش با میدان های لیزری همدوس به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص اپتیکی این سیستم مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که با انتخاب پارامترهای مناسب می توان رفتار اپتیکی و شفافیت القایی سیستم را کنترل کرد.

کلید واژه- شفافیت القایی الکترومغناطیسی، چاه کوانتومی. ساختار چهار سطحی Y شکل.

Electromagnetically induced transparency in a symmetric quantum well Y-type structure

Mojde Eghbalpour, Saeed Batebi, H. Rahimpour Soleimani

Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Iran

In this paper, we propose a symmetric quantum well structure to realize four levels Y type structure. In addition, we numerically study electromagnetically induced transparency (EIT) behavior of this structure in the presence of coherent laser fields. The optical properties of the system are investigated and it is shown that by choosing appropriate parameters one can control the optical behavior of the system and EIT.

Keywords: Electromagnetically induced transparency, Quantum well, Four levels Y type structure

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

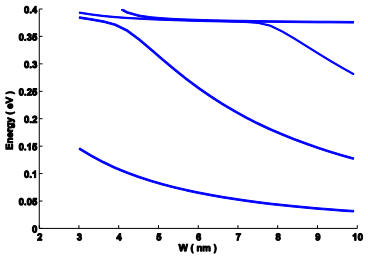
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

کاربردهای بسیار زیاد سیستم هایی نظیر چاه های کوانتومی، سیم های کوانتومی و نقاط کوانتومی باعث شده که توجه محققین به این موضوع جلب شود. سیستم های اتمی با محدودیت های زیادی مواجه می شوند در حالی که در سیستم های نانو ساختاری می توان با عوض کردن مواد، اندازه و ابعاد سیستم، تقارن سیستم و بسیاری از موارد دیگر، سطوح انرژی مورد نیاز را طراحی و پیدا کرد، خاصیتی که در سیستم های اتمی نمی توان یافت. یکی از این ساختارهای کوانتومی، چاه پتانسیل است که با کنترل پارامترهای این ساختار می توان سیستم های با کارایی بالا ایجاد کرد و این امر موجب شده تا بررسی خواص اپتیکی چاه های کوانتومی در مرکز توجه قرار گیرد. ساختار گذارهای بین نواری در چاه های کوانتومی در سال های اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف ساخته اند چه از دیدگاه تئوری [۱] و چه از دیدگاه عملی [۲]. به طور مثال اثرات غیر خطی چاه های کوانتومی متقارن با سه باند انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است[۳]. از جمله پدیده هایی که بسیار به آن پرداخته شده است شفافیت القایی الکترومغناطیسی است [۴-۶]. در این مقاله به بررسی شفافیت یک میدان کاوشگر ضعیف در یک چاه کوانتومی چهار ترازی Y که با دو میدان جفت کننده قوی برهم کنش می کند می پردازیم .

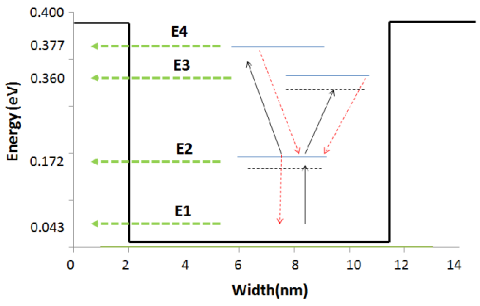
۲- تئوری

برای تحقق و دستیابی به یک ساختار چهار سطحی Y شکل یک ساختار چاه کوانتومی GaAs را که بین دو سد $Al_{0/3}Ga_{0/7}As$ ساندویچ شده است، پیشنهاد می شود.. پارامترهای عناصر تشکیل دهنده نانو ساختار عبارتند از: انرژی تراز ظرفیت $E = 0\ eV$ ، جرم موثر $m_c = 0/07\ m$ که m جرم الکترون است و برای AlAs داریم، $E_c = 1/25eV$ و $m_c = 0/15m$. با ترکیب خطی از آنها E_c و m_c را برای $AlAs - GaAs$ بدست می آوریم. سپس با حل عددی معادله شرودینگر با جرم متغییر برای چاه پتانسیل و تغییر ضخامت، انرژی چهار تراز پایینی را بدست آوردیم (شکل ۱). که عبارتند از $E_1 = 0/043eV$، $E_2 = 0/172eV$ ، $E_3 = 0/360eV$ و $E_4 = 0/377eV$. شکل ۲ باند های انرژی چاه کوانتومی حاصل از حل معادله شرودینگر را نشان می دهد.



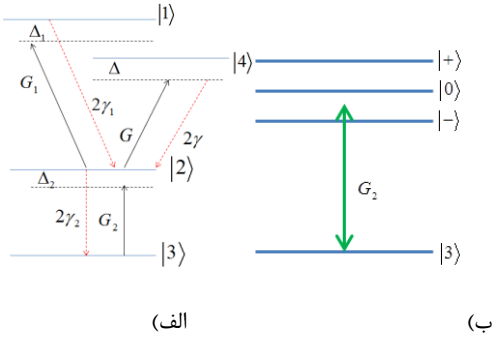
شکل ۱: نمودار انرژی چهار تراز پایین چاه کوانتومی GaAs که بین دو سد $Al_{0/3}Ga_{0/7}As$ ساندویچ شده است برحسب پهنای چاه W.

با توجه به شکل بالا مشاهده می شود که برای چاه پتانسیل ذکر شده، در پهنای تقریبی ۹ نانومتر می توان چهار تراز انرژی داشت که برای طراحی سیستم چهار ترازی Y مناسب است.



شکل ۲: ساختار چاه کوانتومی GaAs و ترازهای انرژی به همراه ترازهای سیستم Y.

در شکل ۳ یک میدان کاوشگر با فرکانس w_2 و فرکانس رابی $G_2 = \vec{\mu}_{32}.\vec{\varepsilon}_2/\hbar$ تراز $|3\rangle$ را به $|2\rangle$ می‌برد، و تراز $|2\rangle$ با میدان های تمایز پذیر



شکل ۳:الف) نمودار انرژی یک اتم چهار ترازی نوع Y. ب) جفت شدگی تراز $|2\rangle$ با ترازهای $|4\rangle$ و $|1\rangle$ و ایجاد حالات پوشیده.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

با فرکانس w_1 و فرکانس رابی $G_1 = \vec{\mu}_{21}.\vec{\varepsilon}_2/\hbar$ و فرکانس w و فرکانس رابی $G = \vec{\mu}_{24}.\vec{\mathcal{E}}/\hbar$ به ترتیب با تراز های $|1\rangle$ و $|4\rangle$ جفت می‌شود. میدان های جفت کننده G و G_1 بسیار قوی تر از میدان کاوشگر G_2 هستند همچنین در این مقاله فرض کرده ایم که کمیت های G، G_1 و G_2 مقادیری حقیقی هستند. کمیت های $2\gamma_1$ و 2γ نرخ فروافت خودبخودی ترازهای $|1\rangle$ و $|4\rangle$ به تراز $|2\rangle$ است و $2\gamma_2$ مربوط به نرخ فروافت از تراز $|2\rangle$ به $|3\rangle$ است. در تصویر برهم کنش و با تقریب موج چرخان معادلات حرکت ماتریس های چگالی را می توان بدست آورد [۷].

$$\frac{d\rho_{11}}{dt} = -2\gamma_1\rho_{11} - (-iG_1\rho_{12} + H.c.)$$

$$\frac{d\rho_{33}}{dt} = 2\gamma_2\rho_{22} + (-iG_2\rho_{23} + H.c.)$$

$$\frac{d\rho_{44}}{dt} = -2\gamma\rho_{44} - (-iG\rho_{42} + H.c.)$$

$$\frac{d\rho_{12}}{dt} = -(\gamma_1 + \gamma_2 + i\Delta_1)\rho_{12} - iG_1^*\rho_{11} - iG_2\rho_{13} - iG^*\rho_{14}$$

$$\frac{d\rho_{13}}{dt} = -(\gamma_1 + i\Delta_1 + i\Delta_2)\rho_{13} - iG_2^*\rho_{12} + iG_1^*\rho_{23} \qquad (۱)$$

$$\frac{d\rho_{14}}{dt} = -(\gamma_1 + \gamma + i\Delta_1 - i\Delta)\rho_{14} - iG\rho_{12} + iG_1^*\rho_{24}$$

$$\frac{d\rho_{23}}{dt} = -(\gamma_2 + i\Delta_2)\rho_{23} + iG_1\rho_{13} - iG_2^*\rho_{33} + iG\rho_{43}$$

$$\frac{d\rho_{24}}{dt} = -(\gamma + \gamma_2 - i\Delta)\rho_{24} + iG_1\rho_{14} - iG\rho_{22} + iG_2^*\rho_{34} + iG\rho_{44}$$

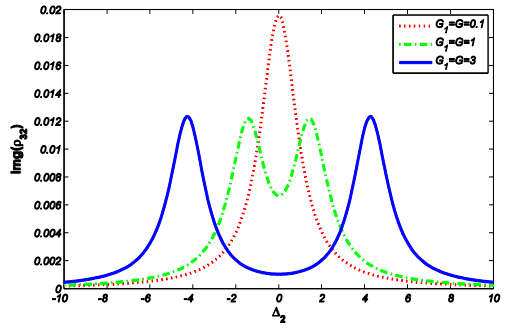
$$\frac{d\rho_{34}}{dt} = -(\gamma - i\Delta_2 - i\Delta)\rho_{34} - iG\rho_{32} + iG_2\rho_{24}$$

معادلات بدست آمده از شرط $\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} + \rho_{44} = 1$ و $\rho_{ij} = \rho_{ji}^*$ پیروی می کنند. ناکوکی های مربوط به میدان های کاوشگر ، جفت کننده به ترتیب برابرند با $\Delta_1 = w_{21} - w_1$، $\Delta_2 = w_{23} - w_2$ و $\Delta = w_{42} - w$.

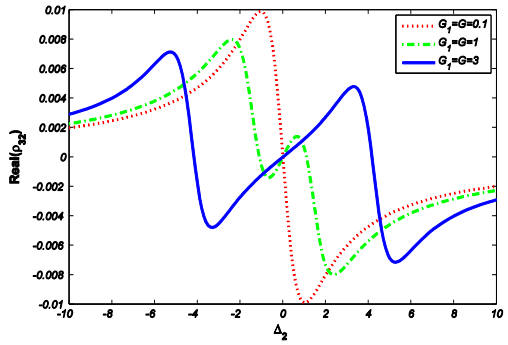
۳- بحث و نتیجه گیری

برای مطالعه پاشندگی و جذب میدان کاوشگر فرض کنیم میدان های جفت کننده در حالت تشدید قرار دارند، $G_1 = G$، $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$ و $\Delta_1 = \Delta$، همان طور که در شکل ۴ الف) دیده می شود میزان جذب سیستم هنگامی که اندازه میدان‌های جفت کننده برابر با ۰/۱ است برای میدان کاوشگر در نقطه تشدید ماکسیمم است (نقطه چین قرمز)، همچنین در شکل ۴ ب) دیده می شود که نمودار پاشندگی در هنگام عبور از نقطه تشدید شیب خیلی تندی را از خود نشان می دهد. وقتی اندازه میدان های جفت کننده به ۳ افزایش می یابد نمودار جذب یک پنجره شفافیت با دو قله مجزا را نشان می دهد (خط آبی). که علت آن را می توان بوجود آمدن حالت های پوشیده $|0\rangle$ و $|\pm\rangle$ دانست. حالت پایه $|3\rangle$ به علت قانون انتخاب پاریته فقط با حالت $|2\rangle$ جفت می شود در نتیجه نمی تواند با حالت $|0\rangle$ جفت شود و قله جذب مربوط به گذار $|3\rangle$ به $|0\rangle$ از بین می رود و دو قله گذار مربوط به جفت شدگی بین $|3\rangle$ و $|\pm\rangle$ ظاهر می شوند. همچنین برای نمودار پاشندگی دیده می شود که شیب نمودار از مثبت (ابرلومینال) به منفی (زیرلومینال) در نقطه تشدید میدان کاوشگر تغییر علامت می دهد که عامل آن همان ایجاد دو قله مجزا می باشد.

الف)



ب)



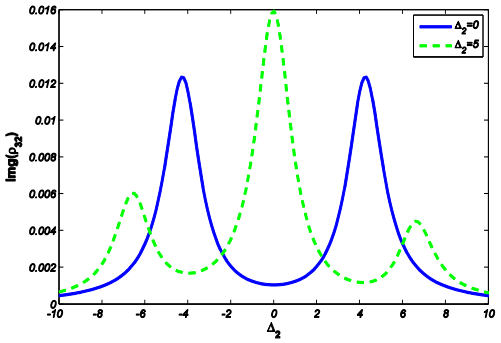
شکل ۴: نمودار الف) جذب و ب) پاشندگی میدان کاوشگر برای مقادیر مختلف میدان های جفت کننده. G_2 =./4 و $\Delta_1 = \Delta = 0$

راه دیگری که برای کنترل شفافیت القایی الکترومغناطیسی می توان پیشنهاد کرد تغییر ناکوکی

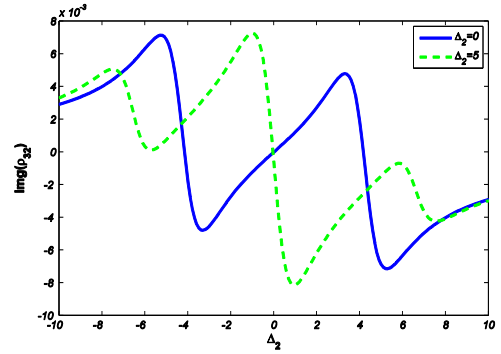
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

میدان های جفت کننده است. شکل ۵ الف) نمودار جذب و ب) نمودار پاشندگی مربوط به میدان کاوشگر را نشان می‌دهد. اگر مقدار نا کوکی میدان های جفت کننده را برابر و مخالف در نظر بگیریم، $\Delta_1 = -\Delta$، و مانند قسمت قبل مقدار میدان ها را مساوی، $G_1 = G = 3$، در نظر بگیریم، در حالتی که $\Delta_1 = 0$ نمودار آبی مربوط به شکل ۴ الف دوباره نمایان می شود. اما هنگامی که میزان ناکوکی به $\Delta_1 = 5$ افزایش یابد شفافیت برای میدان کاوشگر در نقطه تشدید تبدیل به جذب می شود(همچنین در مورد پاشندگی، نور زیرلومینال تبدیل به نور ابرلومینال می‌شود) با وجود این که افزایش میزان ناکوکی باعث از بین رفتن پنجره شفافیت در نقطه تشدید می شود اما منجر به ظهور دو پنجره شفافیت دیگر در دو طرف نقطه تشدید شده است. در این دو پنجره شفافیت همانطور که از نمودار پاشندگی معلوم است ما نور زیرلومینال خواهیم داشت.

الف)



ب)



شکل ۵ : نمودار الف) و ب) به ترتیب تغییرات جذب و پاشندگی میدان کاوشگر G_2 برای مقادیر مختلف ناکوکی میدان های جفت کننده.

۴- جمع بندی

در این مقاله رفتار حالت پایای یک میدان ضعیف کاوشگر واقع در چاه پتانسیل متقارن نوع Y مورد مطالعه قرار گرفت. ما تغییرات رفتار جذب و پاشندگی سیستم را نسبت به تغییر ناکوکی و شدت میدان های جفت کننده بررسی کردیم مشاهده شد که با انتخاب دقیق میزان ناکوکی می توان طیف جذب سیستم را کنترل کرد به طوری که دو پنجره شفافیت به طور هم زمان ظاهر شوند. همچنین با تعیین میزان شدت میدان های جفت کننده توانستیم پهنا و شفافیت پنجره ها را کنترل کنیم. بالاخره با بررسی رفتار پاشندگی سیستم توانستیم سرعت گروه نور را کنترل کرده از زیرلومینال به ابرلومینال تغییر دهیم.

مراجع

[1] Noda S.,Uenura T., Yamashita T., Sasaki A., *All Optical Modulation using an N-Doped Quantum-Well Structure*, **J. Appl. Phys.** 68 (1990) 6529.

[2] Julien F. H., Lourtioz J. M., Herschkorn N., Pocholle P., Le Roux G., *Optical Saturation of Intersubband Absorption in GaAs-Al x Ga1 −x As Quantum Wells*, **App. Phys. Lett.** 53 (1988) 116.

[3] Serapglia G. B. Paspalakis E., Sirtori C., Vodopyanov K., Phillips C. C., *Laser-Induced Quantum Coherence in Semiconductor Quantum Well*, **Phys. Rev. Lett.** 84(2000)1019.

[4] Silvestri L., Bassani F., Czajkowski G., *Electromagnetically Induced Transparency in Quantum Wells*, **Phys. Stat. Sol.** 190(2002)683.

[5] Wei W. H., Wu M. X., Optical absorption and *Electromagnetically Induced Transparency in Semiconductor Quantum Well Driven by Intense Terahertz Field*, **Chin. Phys. B.** 21(2012)107102.

[6] Phillips C. C., Paspalakis E., Serapiglia G. B., Sirtori C., Vodopyanov K. L., "*Observation of Electromagnetically Induced Transparency and Measurements of Subband Dynamics in Asemiconductor Quantum Well*," **Physica E** 7(2000), 166.

[7] Hou B. P., Wang S. J., *Effect of VIC on single- and two-photon absorption in a four level Y type atomic system*, **Phys. Lett. A.** 69 (2004) 053805.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]