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

بررسی پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در چاه های کوانتومی

سهیلا یوسف زاده، محمد جواد کریمی، حسن پاکارزاده

گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده – در این مقاله، پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی را در یک چاه کوانتومی مربعی با ساختار GaAs/AlGaAs ***به صورت نظری مورد بررسی قرار می گیرد. اثرهای پهنای چاه و آهنگ گذار روی جذب نوری تحقیق شده است. نتایج نشان می دهد که شفافیت القایی الکترومغناطیسی به دست آمده در این سیستم و فرکانس آن و پنجره شفافیت به پهنای چاه بستگی دارد.***

کلید واژه- شفافیت القایی الکترومغناطیسی، چاه کوانتومی مربعی، جذب نوری.

An investigation of the electromagnetically induced transparency phenomenon in quantum wells

Soheyla Usefzadeh, Mohammad Javad Karimi, Hassan Pakarzadeh

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper, the electromagnetically induced transparency (EIT) in a square GaAs / AlGaAs quantum well is studied theoretically. The effects of the well width and the relaxation rate on the optical absorption are investigated. The results show that the obtained EIT in this system, its frequency and the transparency window depend on the well width.

Keywords: Electromagnetically induced transparency, Square quantum well, Optical absorption.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

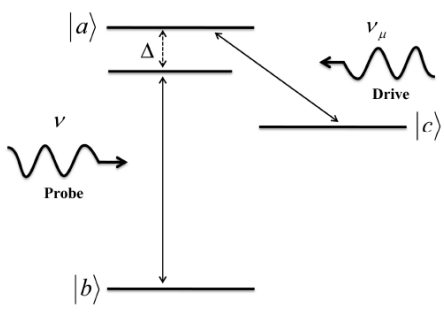
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در واقع تبدیل یک محیط کدر به محیط شفاف است که در سیستم‌های اتمی چند ترازه روی می دهد. این پدیده با اندرکنش نور و ماده توضیح داده می شود. به دلیل اینکه در سیستم‌های چند ترازه، حداقل دو مسیر همدوس برای جذب نور وجود دارد که می توانند بطور ویرانگر تداخل کنند و منجر به حذف جذب شوند، این پدیده در این سیستم ها اتفاق می افتد [1-3]. همدوسی اتمی و تداخل کوانتومی در یک سیستم اتمی، اساس و پایه پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی می باشند. این پدیده اولین بار بصورت نظری توسط کوچارواسکایا و خانین در سال ۱۹۸۸ معرفی شد. سپس در سال ۱۹۹۱ توسط استیون هریس و همکارانش در آزمایش با بخار استرانسیوم مشاهده شد [4]. آزمایش‌های اولیه بر روی پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در محیط‌های گازی انجام شده است. اما به دلیل کاربرد گسترده نیم‌رساناها در ادوات نوری گروه های مختلفی به بررسی این پدیده در نیم‌رساناها پرداخته‌اند. این پدیده در مخابرات، کلیدهای نوری، کنترل سیگنال ها در سیستم های ارتباطی فیبر نوری، رایانه های کوانتومی و آشکارسازهای مادون قرمز که براساس کنترل نور با نور کار می کنند، کاربرد دارد [5-7]. بررسی پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در ساختارهای چاه کوانتومی اهمیت زیادی دارد. برای مثال، قابلیت محدود کردن تعداد مشخصی از چاه های کوانتومی در مقایسه با اتم ها، یا تغییر ویژگی آن ها با عامل های خارجی، اندازه یا حتی تنش های ساختاری را می توان از مزایای این سیستم‌ها دانست. در این مقاله به مطالعه پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در چاه کوانتومی مربعی با ساختار GaAs/AlGaAs می پردازیم.

۲- مبانی نظری

یک سیستم سه ترازه مانند شکل ۱ در نظر می گیریم. تراز $|a\rangle$و تراز $|b\rangle$ با یک میدان ضعیف جستجوگر همدوس با دامنه ε و فرکانس υ به هم مرتبط شده‌اند. همچنین، ترازهای $|a\rangle$و$|c\rangle$ توسط یک میدان قوی کنترلی همدوس با فرکانس υ_μ و فرکانس مختلط $\Omega_\mu e^{-i\varphi_\mu}$ با هم جفت شده اند.



شکل ۱: ترازهای انرژی اتم سه ترازه لاندا شکل برهمکنش کننده با دو میدان لیزری.

آهنگ واهلش اعضای غیرقطری ماتریس چگالی برای $\rho_{ab},\rho_{ac},\rho_{cb}$ به ترتیب $\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3$ می باشند. تحت تاثیر میدان های اعمالی گشتاور دوقطبی بین دو جفت ترازهای اتمی القا می شود. هامیلتونی مربوط به سیستم سه ترازه برهمکنش کننده با دو میدان جستجوگر ضعیف و کنترلی قوی، به صورت زیر تعریف می شود:

$$H = H_0 + H_I \qquad (۱)$$

$$H_0 = \hbar\omega_a|a\rangle\langle a| + \hbar\omega_b|b\rangle\langle b| + \hbar\omega_c|c\rangle\langle c| \qquad (۲)$$

$$H_I = -\frac{1}{2}(\wp_{ab}\varepsilon\exp(-i\upsilon t)|a\rangle\langle b|) - \frac{\hbar}{2}\Omega_\mu\exp(-i\varphi_\mu)\exp(-i\upsilon_\mu t)|a\rangle\langle c|) + H.c. \qquad (۳)$$

که در آن $\wp_{ab}$ عنصر ماتریس گشتاور دوقطبی مربوط به گذار بین ترازهای $|b\rangle$ و $|a\rangle$ و $\Omega_\mu = \frac{\wp_{ab}\varepsilon_\mu}{\hbar}$ فرکانس رابی می باشد [8].

برای بررسی شفافیت القایی الکترومغناطیسی سیستم باید پذیرفتاری نوری آن را به دست بیاوریم. در سیستم‌های اتمی چند ترازه و در سیستم های شبه اتمی مثل چاه کوانتومی معادلات حاکم، معادلات ماتریس چگالی خواهند بود که از معادله شرودینگر نتیجه می شوند. پس عناصر ماتریس چگالی را برای سیستم سه ترازه لاندا شکل محاسبه می‌کنیم.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

$$\dot{\rho}_{ab} = -(i\omega_{ab} + \gamma_1)\rho_{ab} - \frac{i}{2}\frac{\wp_{ab}\varepsilon}{\hbar}\exp(-i\upsilon t)(\rho_{aa} - \rho_{bb}) \quad (۴)$$
$$+\frac{i}{2}\Omega_\mu \exp(-i\varphi_\mu)\exp(-i\upsilon_\mu t)\rho_{cb}$$

$$\dot{\rho}_{cb} = -(i\omega_{cb} + \gamma_3)\rho_{cb} - \frac{i}{2}\frac{\wp_{ab}\varepsilon}{\hbar}\exp(-i\upsilon t)\rho_{ca} \quad (۵)$$
$$+\frac{i}{2}\Omega_\mu \exp(i\varphi_\mu)\exp(i\upsilon_\mu t)\rho_{ab}$$

$$\dot{\rho}_{ac} = -(i\omega_{ac} + \gamma_2)\rho_{ac} + \frac{i}{2}\frac{\wp_{ab}\varepsilon}{\hbar}\exp(-i\upsilon t)\rho_{bc} \quad (۶)$$
$$-\frac{i}{2}\Omega_\mu \exp(-i\varphi_\mu)\exp(-i\upsilon_\mu t)(\rho_{aa} - \rho_{cc})$$

پراکندگی و جذب نوری به ρ_{ab} مربوط می شود. چون الکترون ها در حالت اولیه در تراز $|b\rangle$ قرار دارند، پس در $t = 0$:

$$\rho^0_{bb} = 1,\ \rho^0_{aa} = \rho^0_{cc} = \rho^0_{ca} = 0.$$

با استفاده از معادلات (۴) و (۵) رابطه زیر را به دست می آوریم.

$$\rho_{ab} = \frac{\varepsilon_0 \chi \varepsilon}{2\wp_{ab}} e^{-i\upsilon t}, \quad (۷)$$

پذیرفتاری نوری به صورت یک عدد مختلط بدست می آید که ما می توانیم بخش حقیقی و موهومی آن را بدست بیاوریم.

$$\chi = \chi_1 + i\chi_2 \quad (۸)$$

$$\chi_1 = \frac{N|\wp_{ab}|^2 \Delta[\gamma_3(\gamma_3+\gamma_1) + \Delta^2 - \gamma_1\gamma_3 - \frac{1}{4}\Omega_\mu^2]}{\varepsilon_0 \hbar Z} \quad (۹)$$

$$\chi_2 = \frac{N|\wp_{ab}|^2 [\Delta^2(\gamma_3+\gamma_1) - \gamma_3(\Delta^2 - \gamma_1\gamma_3 - \frac{1}{4}\Omega_\mu^2)]}{\varepsilon_0 \hbar Z} \quad (۱۰)$$

$$Z = (\Delta^2 - \gamma_1\gamma_3 - (\frac{1}{4})\Omega_\mu^2)^2 + \Delta^2(\gamma_3+\gamma_1)^2 \quad (۱۱)$$

که در معادلات بالا N چگالی اتمی سیستم سه ترازه، $\wp_{ab}$ گشتاور دوقطبی بین تراز های $|a\rangle$ و $|b\rangle$ ، $\Delta = \omega_{ab} - \omega_p$ نیز واکوکی میدان جستجوگر است. طبق معادلات (۱۲) و (۱۳) بخش موهومی پذیرفتاری متناسب با ضریب جذب و بخش حقیقی آن نیز با ضریب شکست متناسب است.

$$\alpha(\omega_p) = k\,\mathrm{Im}\,\chi(\omega_p), \quad (۱۲)$$

$$n(\omega_p) = 1 + \frac{1}{2}\mathrm{Re}\,\chi(\omega_p). \quad (۱۳)$$

در این مقاله یک چاه کوانتومی مربعی $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ به پهنای L را در نظر گرفته ایم. معادله شرودینگر مربوطه را با روش ماتریس انتقال حل کرده ایم و ترازهای انرژی و عناصر ماتریس گشتاور دوقطبی را محاسبه کرده ایم. سپس پذیرفتاری نوری چاه کوانتومی مربعی، با استفاده از معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱) محاسبه شده است.

۳- نتیجه‌گیری

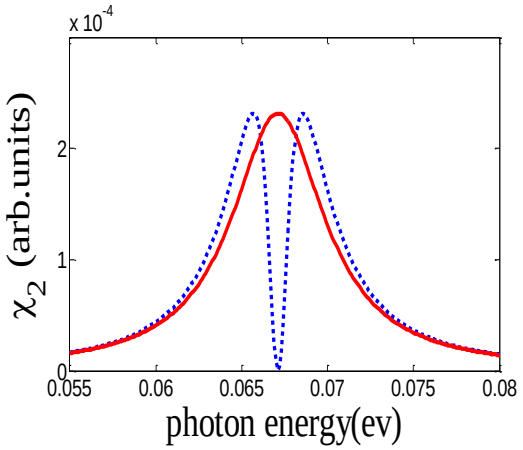
پارامترهای مورد استفاده در این مقاله، $\Omega_\mu = 4.40\times10^{12} rad/s,\quad \gamma_3 = 5\times10^8 Hz$ $N = 5\times10^{18} m^{-},\ \gamma_1 = 5\times10^{12} Hz,$ می باشند.

در شکل ۲ بخش موهومی پذیرفتاری بر حسب انرژی فوتون فرودی رسم شده است. در این شکل، منحنی توپر نشان می‌دهد که در غیاب لیزر کنترلی قوی، بیشترین جذب در انرژی تشدید (اختلاف انرژی دو تراز $|b\rangle$ و $|a\rangle$) رخ می‌دهد. اما منحنی خط چین نشان می‌دهد که حضور لیزر کنترلی قوی جذب سیستم را به حداقل رسانیده و سیستم شفاف می‌شود.

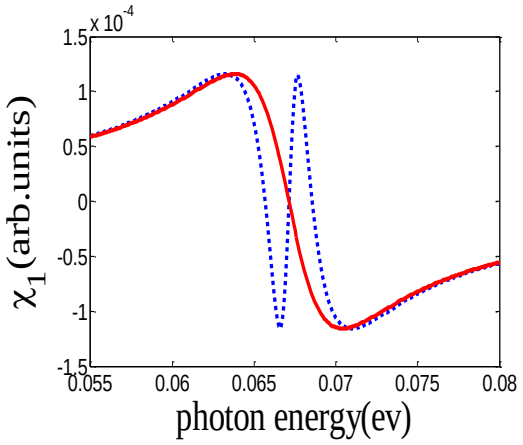
در شکل ۳، بخش حقیقی پذیرفتاری نوری برحسب انرژی فوتون فرودی رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در عدم حضور لیزر کنترلی (منحنی توپر)، در اطراف انرژی تشدید تغییرات ضریب شکست به آهستگی انجام می‌شود. اما در حضور لیزر کنترلی (منحنی خطچین)، دو پیک در اطراف انرژی تشدید داریم و شاهد تغییرات سریع ضریب شکست حول این انرژی که نشان دهنده پراکندگی زیاد در سیستم می باشد، هستیم.

در شکل ۴ دیده می‌شود که با افزایش طول چاه، قله‌های ضریب جذب به سمت انرژی‌های کمتر فوتونی جابجا شده و مقدار آنها کاهش می یابد.

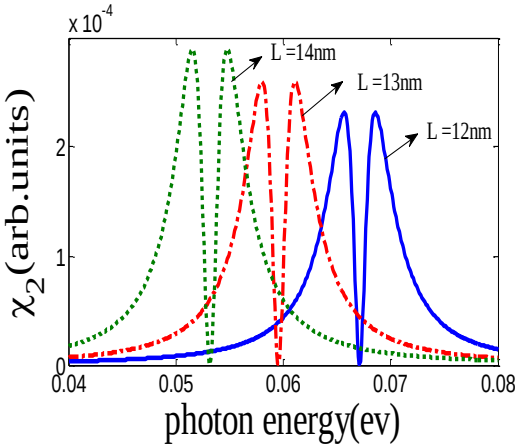
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]



شکل ۲: نمودار ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون فرودی برای L=12nm.

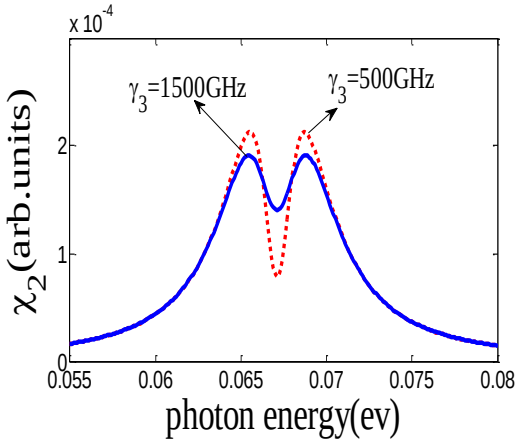


شکل ۳: نمودار تغییرات ضریب شکست برحسب انرژی فوتون فرودی برای L=12nm.



شکل ۴: نمودار ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون فرودی برای طول های مختلف چاه کوانتومی.

دلیل این مطلب این است که با افزایش طول چاه، محدودیت حرکت الکترون کاهش می‌یابد و ترازهای انرژی به یکدیگر نزدیک می‌شوند و همچنین عنصر گشتاور دو قطبی الکتریکی $\wp_{ab}$ کاهش می‌یابد.



شکل ۵: نمودار ضریب شکست بر حسب انرژی فوتون برای آهنگ های گذار مختلف در L=12nm.

در شکل ۵ ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون فرودی برای دو مقدار مختلف آهنگ گذار رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش آهنگ گذار، مقدار ضریب جذب کاهش می‌یابد و همچنین پنجره شفافیت کوچکتر می‌شود.

مراجع

[1] S. E. Harris, J. E. Field, A. Imamoglu, Non-linear optical processes using electromagnetically induced transparency, *Phys. Rev.Lett* **64**(1990) 1107.

[2] G. Alzetta, A. Grozzini, L. Moi, G. orriols, an experimental method for the observation of transitions and laser beat resonance in Na vapor, *Nuovo Cimento B* **36** (1976) 5.

[3] T. van Boxtel, Electromagnetically Induced Transparency in Rydberg Gas, M.Sc. Thesis, *university of Stuttgart* (2008).

[4] K. J. Boller, A. Imamoglo, S. E. Harris, Observation of electromagnetically induced transparency ,*Phys. Rev. Lett.* **66**(1991) 2593.

[5] J. Clarke, H.Chen, W.A. van Wijngaarden, Electromagnetically induced transparency and optical switching in a rubidium cascade system. *Appl. Opt* **40** (2001) 2047.

[6] A. Rostami, G. Rostami, Full-optical realization of tunable low pass optical filters using ring resonators. *Opt. Commun* **240** (2004) 133.

[7] A. Neogi, T. Mozume, H. Yoshida, O. Wada, Intersubband transition at 1. 3 and 1 . 55 Imin a novel coupled InGaAs/AlAsSb quantum well structures. *IEEE Photon. Technol. Lett* **11** (1999) 632.

[8] M. O. Scully, M.S. Zubairy, *Quantum Optics*, Cambridge University. Press, Cambridge, 1997.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]