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

تاثیر قطبش میدان لیزرهای کنترل بر ضریب جذب در پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی در نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای مدل W

مرضیه السادات معزی، حسن رنجبر عسکری

رفسنجان، دانشگاه ولی‌عصر(عج)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده- در این مقاله، اثر نوع قطبش لیزرهای کنترل و کاوشگر روی تولید دو پنجره‌ای شفافیت القایی الکترومغناطیسی و هم‌چنین میزان جذب در یک نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای گالیم آرسناید چهار ترازی مدل W با پتانسیل سهموی بررسی شده است. معادله شرودینگر به روش جرم موثر حل شده است. وابستگی شفافیت القایی الکترومغناطیسی و ضریب جذب به شعاع و ارتفاع یک نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای در قطبش‌های مختلف لیزرهای کنترل و کاوشگر بررسی شده است.

کلید واژه- شفافیت القایی الکترومغناطیسی، ضریب جذب، قطبش، نقطه‌ی کوانتومی.

The effect of control lasers polarization on absorption index in Electromagnetically Induced Transparency (EIT) in W-type cylindrical quantum dot

Marziye Al-sadat Moezzi, Hassan Ranjbar Askari

Vali-e-Asr university of Rafsanjan, Faculty of science, department of physics

Abstract- In this paper, effect of the control and probe lasers polarization on generation of the double windows of electromagnetically induced transparency (EIT) and also on absorption coefficient in a W-type GaAs cylindrical quantum dot (QD) with parabolic potential are investigated. The Schrödinger equation is solved in method of effective mass. Dependence of EIT and absorption coefficient on radius and height of cylindrical QD, in the different polarization of the probe and control lasers are also investigated.

Keywords: Absorption index, EIT, Polarization, Quantum dot

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

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

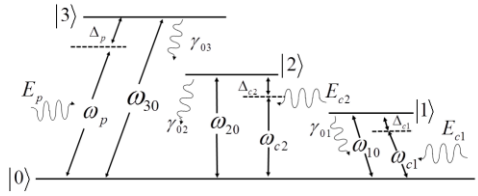
مقدمه

امروزه به علت پیشرفت‌های شگرفی که در زمینه‌ی اپتیک و مکانیک کوانتومی بدست آمده است. می‌توان خواص اپتیکی ماده را با استفاده از نور لیزر تغییر داد. یکی از این موارد، پدیده‌ی شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT) است که به وسیله‌ی آن عبور یا جذب یک نور در یک ماده را با نور دیگری کنترل می‌کنیم. این پدیده در سیستم‌های سه ترازی[۱]، چهارترازی [۲] و یا ترازهای بیشتر [۳] قابل مشاهده است. در بعضی از سیستم‌ها مانند سیستم‌های پنج ترازی می‌توان شفافیت القایی دارای دو پنجره را ایجاد کرد [۴].در این مقاله با رهیافت ماتریس چگالی به بررسی تاثیر تغییر قطبش میدان لیزرهای کاوشگر و کنترل و ابعاد نقاط کوانتومی گالیم‌آرسناید استوانه‌ای با پتانسیل سهموی چهار ترازی بر روی ضریب جذب و شفافیت القایی الکترومغناطیسی پرداخته شده است.

ضریب جذب و پدیده‌ی شفافیت القایی

پدیده‌ی EIT در سیستم‌های با ترازهای انرژی مشخص از جمله یک مدل چهار ترازی قابل مشاهده است. با رخ دادن این پدیده، در فرکانس خاصی جذب اپتیکی صفر می‌شود که این امر دارای اهمیت استراتژیک و پرکاربرد در صنایع ارتباطات و نیز صنایع دفاعی است. در یک مدل چهار ترازی نیاز به سه گذار مجاز و سه گذار ممنوعه است. در این بخش یک مدل چهار ترازی از نوع W با ترازهای انرژی $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle$ و $|3\rangle$ در نظر گرفته شده است (شکل۱). $|0\rangle$ تراز پایه و $|1\rangle, |2\rangle$ به عنوان ترازهای نیمه پایه و $|3\rangle$ به عنوان تراز برانگیخته است. $\Delta_p = \omega_p - \omega_{30}$، $\Delta_{c1} = \omega_c - \omega_1$ و $\Delta_{c2} = \omega_c - \omega_{20}$ به ترتیب عدم تنظیمی لیزر کاوشگر و دو لیزر کنترل نسبت به فرکانس‌های تشدید است.

میدان الکتریکی اعمال شده بر روی این سیستم برابر است با مجموع میدان‌های لیزرهای کاوشگر و کنترل، که طول موج لیزر کاوشگر و دو لیزر کنترل از شعاع موثر اتم (نقطه کوانتومی) خیلی بزرگتر فرض می‌شود.



شکل ۱ : پیکربندی سیستم ۴ ترازی مدل W

هامیلتونی سیستم‌های کوانتومی در حضور نور به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = H_0 + V(t) \qquad (۱)$$

که $\hat{V}(t) = -\vec{\mu}\cdot\vec{E}$ هامیلتونی برهم‌کنش است.

عناصر عملگر دو قطبی الکتریکی را در پایه‌ی $\hat{H}_0$ با تقریب دو قطبی می‌توان به شکل زیر میتوان نوشت:

$$V_{nm} = -\vec{\mu}_{nm}\cdot\vec{E} = -\mu^i_{nm}E \qquad (۲)$$

برای یک سیستم با تقارن کروی داریم:

$$\vec{\mu}_{00} = \vec{\mu}_{11} = \vec{\mu}_{22} = 0 \qquad (۳)$$

فرکانس‌های رابی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_p = \frac{E_{0p}\left|\mu^i_{03}\right|}{\hbar},\quad \Omega_{c1} = \frac{E_{0c1}\left|\mu^i_{01}\right|}{\hbar},\quad \Omega_{c2} = \frac{E_{0c2}\left|\mu^i_{02}\right|}{\hbar} \qquad (۴)$$

فرم کلی معادلات ماتریس چگالی در تقریب موج چرخان و دستگاه دوران یافته به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$\dot{\rho}_{nn} = -\frac{i}{\hbar}\left[\hat{H},\rho\right]_{nn} + \sum_{E_m\rangle E_n}\Gamma_{nm}\rho_{mm} - \sum_{E_m\langle E_n}\Gamma_{mn}\rho_{nn} \qquad (۵)$$

$$\dot{\rho}_{mn} = -\frac{i}{\hbar}\left[\hat{H},\rho\right]_{mn} - \gamma_{mn}\rho_{mn} \quad \text{For } m\neq n \qquad (۶)$$

که ρ_{nm} ها درایه‌های ماتریس چگالی، Γ_{nm} آهنگ گذار از تراز m به تراز n و γ_{nm} نرخ‌های واهلش هستند. با فرض اینکه سیستم در زمان $t=0$ در حالت پایه قرار داشته باشد. با استفاده از رابطه‌ی بین قطبش و میدان الکتریکی در نهایت برای موهومی پذیرفتاری خواهیم داشت:

$$\operatorname{Im}\chi^{(1)}(\omega_p) = \frac{N\left|\mu^i_{03}\right|^2}{\varepsilon_0\hbar}\frac{f_2}{g} \qquad (۷)$$

که N چگالی سیستم‌های چهار ترازی در واحد حجم است. با استفاده از معادله (۷) می‌توان ضریب جذب $\alpha = (\omega/c)\operatorname{Im}\chi$ را محاسبه کرد. بنابراین برای محاسبه ضریب جذب یک ماده نیاز به محاسبه‌ی μ^i_{03} است.

نقاط کوانتومی استوانه‌ای

هامیلتونی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H_\circ = -\frac{\hbar^2}{2m^*_e}\nabla^2 + \frac{1}{2}m^*_e\omega^2_{\circ\rho}\rho^2 + \frac{1}{2}m^*_e\omega^2_{\circ z}z^2$$

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

که $V(\vec{r})$ پتانسیل سهموی نقطه کوانتومی است و برابر است با:

$$V(\vec{r})=\frac{1}{2}m_e^*\left(\omega_{0\rho}^2\rho^2+\omega_{0z}^2z^2\right)$$

که m_e^* جرم موثر الکترون و ρ مولفه شعاعی در دستگاه مختصات استوانه‌ای است. برای یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای با شعاع R و ارتفاع L، $\omega_{0\rho}=\hbar/m_e^*R^2$ و $\omega_{0z}=4\hbar/m_e^*L^2$ فرکانس نوسان الکترون به ترتیب در جهت شعاع و ارتفاع نقطه کوانتومی استوانه‌ای تعریف می‌شوند. با استفاده از جداسازی متغیرها و حل معادله شرودینگر ویژه توابع نقطه کوانتومی استوانه‌ای برابر است با:

$$\psi_{n_xn_yn_z}(\rho,\varphi,z)=\sqrt{\frac{k_zk_\rho^2}{n_x!n_y!n_z!2^{n_x+n_y+n_z}\sqrt{\pi}}}e^{-\frac{1}{2}(k_\rho^2\rho^2+k_z^2z^2)}$$
$$H_{n_x}\left(k_\rho\rho\cos\varphi\right)H_{n_y}\left(k_\rho\rho\sin\varphi\right)H_{n_z}\left(k_zz\right)$$

که n_x، n_y و n_z اعداد کوانتومی و $H_n(x)$ توابع چند جمله‌ای هرمیت هستند به طوری که $\psi_{n_xn_yn_z}(\rho,\varphi,z)$ مولفه ویژه کت هامیلتونی $|n_xn_yn_z\rangle$ در فضای مکان است [۵]. هم‌چنین برای ویژه مقادیر هامیلتونی می‌توان نوشت:

$$E^0_{n_xn_yn_z}=(n_x+n_y+1)\hbar\omega_{0\rho}+(n_z+\frac{1}{2})\hbar\omega_{0z}$$

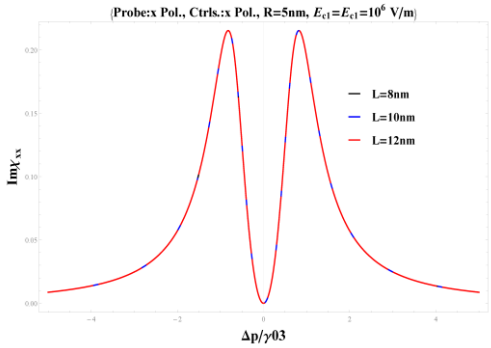
محاسبات

به منظور محاسبه‌ی μ_{01}^i، μ_{02}^i و μ_{03}^i نیاز به مشخص شدن جهت قطبش نور و ترازهای $|0\rangle$، $|1\rangle$، $|2\rangle$ و $|3\rangle$ است. ابتدا جهت قطبش نور را در جهت ارتفاع نقطه کوانتومی استوانه‌ای یا به عبارتی $\vec{E}=E\,\hat{e}_z$ و ویژه حالتهای سیستم به صورت $|0\rangle=|000\rangle$، $|1\rangle=|001\rangle$، $|2\rangle=|003\rangle$ و $|3\rangle=|005\rangle$ در نظر گرفته شده است. جهت قطبش نور را در جهت شعاع نقطه کوانتومی استوانه‌ای یا به عبارتی $\vec{E}=E\,\hat{e}_x$ و ویژه حالتهای سیستم به صورت $|0\rangle=|000\rangle$، $|1\rangle=|100\rangle$، $|2\rangle=|30\rangle$ و $|3\rangle=|50\rangle$ در نظر گرفته شده است.

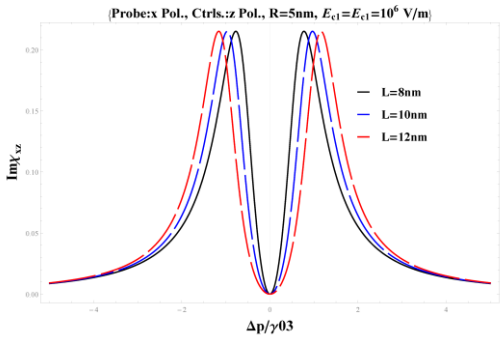
نمودارهای میزان جذب

نمودارهای میزان جذب بازای قطبش متفاوت برای میدان لیزرهای کنترل و هم‌چنین برای ارتفاع‌ها و شعاع‌های متفاوت رسم شده‌است و در پایان با توجه به شکل نمودارها نتیجه‌گیری انجام گرفته‌است:

الف)

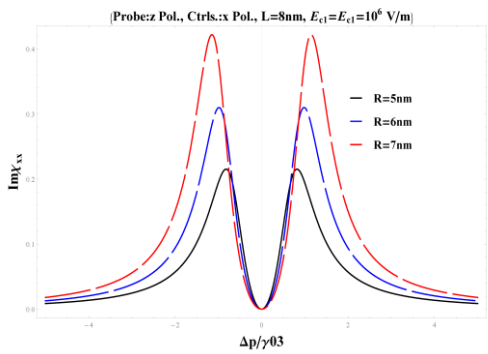


ب)



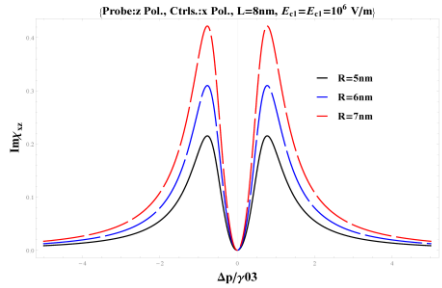
شکل ۲ : نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای با ارتفاع‌های متفاوت در میدان کاوشگر با قطبش x: الف) میدان کنترل با قطبش x ب) میدان کنترل با قطبش z

الف)



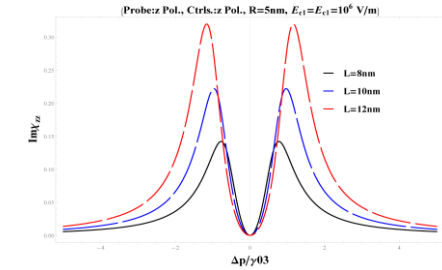
ب)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

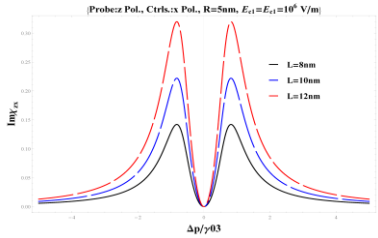


شکل۳: نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای با شعاع‌های متفاوت در میدان کاوشگر باقطبش x الف) میدان کنترل با قطبش x ب) میدان کنترل با قطبش z

الف)

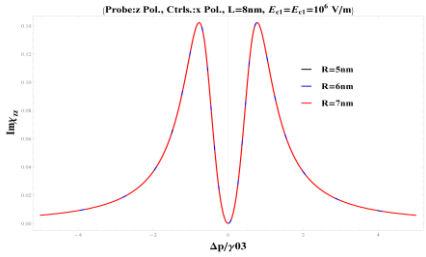


ب)

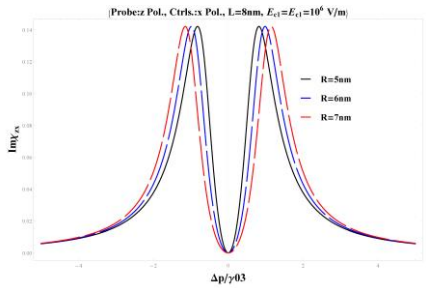


شکل ۴ : نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای با ارتفاع‌های متفاوت در میدان کاوشگر با قطبش z: الف) میدان کنترل با قطبش z ب) میدان کنترل با قطبش x

الف)



ب)



شکل ۵: نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای با شعاع‌های متفاوت در میدان کاوشگر با قطبش z الف) میدان کنترل با قطبش z ب) میدان کنترل با قطبش x

نتیجه‌گیری و تحلیل داده‌ها

همانطور که درشکل (۲-الف) مشاهده می‌شود هنگامی‌که قطبش میدان کاوشگر در جهت x است افزایش ارتفاع تاثیری در پهنای پنجره شفافیت القایی و میزان جذب در میدان کنترل با قطبش x ندارد اما افزایش ارتفاع باعث افزایش پهنای پنجره شفافیت در میدان کنترل با قطبش z شده ولی در میزان جذب تاثیری ندارد شکل (۲-ب).

با توجه به شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود که افزایش شعاع سبب افزایش پهنای پنجره شفافیت با میدان کاوشگر و میدان کنترل با قطبش x شده و نیز میزان جذب را زیاد میکند اما با توجه به شکل(۳-ب) برای میدان کنترل با قطبش z افزایش شعاع میزان جذب را افزایش داده در حالی‌که بر پهنای پنجره شفافیت تاثیری ندارد. شکل (۴-الف) نیز بیانگر افزایش پهنای پنجره شفافیت و میزان جذب با افزایش ارتفاع برای میدان کاوشگر و میدان کنترل با قطبش z است درحالی که با توجه به شکل (۴-ب)برای میدان کنترل با قطبش x پهنای پنجره شفافیت تغییری نکرده ولی میزان جذب افزایش یافته است. شکل (۵-الف) بیان می‌کند که افزایش شعاع نقطه کوانتومی زمانی که میدان کاوشگر دارای قطبش z است تاثیری در پهنای پنجره شفافیت و میزان جذب برای میدان کنترل با قطبش z ندارد اما افزایش شعاع باعث افزایش پهنای پنجره برای میدان کنترل با قطبش x می‌شود و میزان جذب در این حالت تغییر نمی‌کند (۵-ب).

مراجع

[1]Sadeghi. S. M, Deng an. L, Li. X and Huang. W-P; *"Plasmonic (thermal)electromagnetically induced transparency in metallic nanoparticle-quantum dot hybrid systems "*; **IOP science, Nanotechnology** 77, . (2009) 633-673.

[2] Yan. X. A, Wang. L. Q, Yin. B. Y, Song. J. P; *"Electromagnetically induced transparency and enhanced self-kerr nonlinearity in a fourlevel scheme"*; **Optik** 122, . (2011) 986-990.

[3] Paspalakis. E, Knight. P. L; "*Electromagnetically induced transparency and controlled group velocity in a multilevel system*"; **Physical Review A** 66, . (2002) 015802-1.

[4] Beil. F, Klein. J, Nikoghosyan. G, Halfmann. T; *"Electromagnetically induced transparency and retrieval of light pulses in a Λ-type and a Vtype level scheme in Pr3+:Y2SiO5 "*; **IOP Science, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical physics 41**, . (2008) 074001-9.

[5] Raki. Z, Askari. H. R, *"Effect of light polarization and dimensions of Λ-type three level cylindrical quantum dot on electromagnetically induced transparency*"; **superlattices and microstructures** 65, . (2014) 161-176

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]