



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 ولی عصر (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.  
کلیدواژه- 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

مقدمه

شکل ۱: پیکربندی سیستم ۴ ترازوی مدل W هامیلتونی سیستم‌های کوانتومی در حضور نور به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = H_0 + V(t) \quad (1)$$

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 نوشت:

$$V_{nm} = -\vec{\mu}_{nm} \cdot \vec{E} = -\mu_{nm}^i E \quad (2)$$

برای یک سیستم با تقارن کروی داریم:

$$\vec{\mu}_{00} = \vec{\mu}_{11} = \vec{\mu}_{22} = 0 \quad (3)$$

فرکانس‌های رابی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_p = \frac{E_{0p} |\mu_{03}^i|}{\hbar}, \quad \Omega_{c1} = \frac{E_{0c1} |\mu_{01}^i|}{\hbar}, \quad \Omega_{c2} = \frac{E_{0c2} |\mu_{02}^i|}{\hbar} \quad (4)$$

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

$$\dot{\rho}_{nm} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \rho]_{nm} + \sum_{E_m > E_n} \Gamma_{nm} \rho_{mm} - \sum_{E_m < E_n} \Gamma_{mn} \rho_{nn} \quad (5)$$

$$\dot{\rho}_{mn} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \rho]_{mn} - \gamma_{mn} \rho_{mn} \quad \text{For } m \neq n \quad (6)$$

که  $\rho_{nm}$  ها درایه‌های ماتریس چگالی،  $\Gamma_{nm}$  آهنگ گذار از تراز  $m$  به تراز  $n$  و  $\gamma_{nm}$  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:

$$\text{Im} \chi^{(1)}(\omega_p) = \frac{N |\mu_{03}^i|^2 f_2}{\epsilon_0 \hbar g} \quad (7)$$

که  $N$  چگالی سیستم‌های چهار ترازوی در واحد حجم است. با استفاده از معادله (7) می‌توان ضریب جذب  $\alpha = (\omega/c) \text{Im} \chi$  را محاسبه کرد. بنابراین برای محاسبه ضریب جذب یک ماده نیاز به محاسبه‌ی  $\mu_{03}^i$  است.

نقاط کوانتومی استوانه‌ای

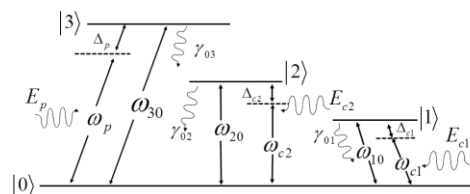
هامیلتونی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H_0 = -\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \nabla^2 + \frac{1}{2} m_e^* \omega_\rho^2 \rho^2 + \frac{1}{2} m_e^* \omega_z^2 z^2$$

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 ترازوی [۱]، چهارترازی [۲] و یا ترازهای بیشتر [۳] قابل مشاهده است. در بعضی از سیستم‌ها مانند سیستم‌های پنج ترازوی 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 ترازوی بر روی ضریب جذب و شفافیت القایی الکترومغناطیسی پرداخته شده است.

ضریب جذب و پدیده‌ی شفافیت القایی

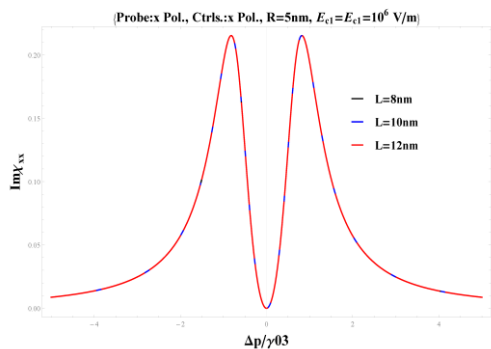
پدیده‌ی EIT در سیستم‌های با ترازهای انرژی مشخص از جمله یک مدل چهار ترازوی قابل مشاهده است. با رخ دادن این پدیده، در فرکانس خاصی جذب اپتیکی صفر می‌شود که این امر دارای اهمیت استراتژیک و پرکاربرد در صنایع ارتباطات و نیز صنایع دفاعی است. در یک مدل چهار ترازوی نیاز به سه گذار مجاز و سه گذار ممنوعه است. در این بخش یک مدل چهار ترازوی از نوع W با ترازهای انرژی  $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$  در نظر گرفته شده است (شکل ۱).  $|0\rangle$  تراز پایه و  $|1\rangle, |2\rangle$  به عنوان ترازهای نیمه پایه و  $|3\rangle$  به عنوان تراز برانگیخته است.  $\Delta_{c1} = \omega_c - \omega_1$ ,  $\Delta_p = \omega_p - \omega_{30}$  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.



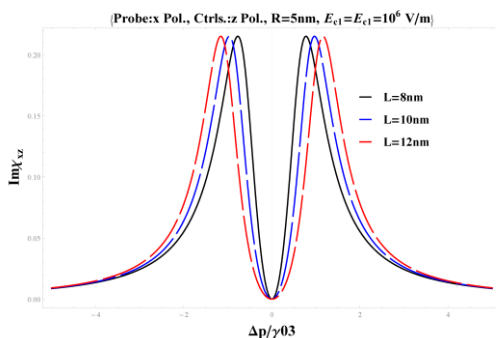
### نمودارهای میزان جذب

نمودارهای میزان جذب بازای قطبش متفاوت برای میدان لیزرهای کنترل و همچنین برای ارتفاعها و شعاعهای متفاوت رسم شده است و در پایان با توجه به شکل نمودارها نتیجه گیری انجام گرفته است:

(الف)

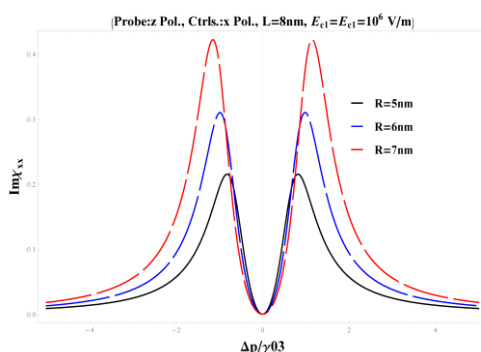


(ب)



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)

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

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

که  $m_e^*$  جرم موثر الکترون و  $\rho$  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:

$$\psi_{n_x, n_y, n_z}(\rho, \varphi, z) = \sqrt{\frac{k_z k_\rho^2}{n_x! n_y! n_z! 2^{n_x+n_y+n_z} \sqrt{\pi}}} e^{-\frac{1}{2}(k_\rho^2 \rho^2 + k_z^2 z^2)}$$

$$H_{n_x}(k_\rho \rho \cos \varphi) H_{n_y}(k_\rho \rho \sin \varphi) H_{n_z}(k_z z)$$

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

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

### محاسبات

به منظور محاسبه  $\mu_{01}^i$ ،  $\mu_{02}^i$  و  $\mu_{03}^i$  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  $|0\rangle = |000\rangle$ ،  $|1\rangle = |100\rangle$ ،  $|2\rangle = |300\rangle$  و  $|3\rangle = |500\rangle$  در نظر گرفته شده است.

### نتیجه گیری و تحلیل داده ها

همانطور که در شکل (۲-الف) مشاهده می شود هنگامی که قطبش میدان کاوشگر در جهت X است افزایش ارتفاع تأثیری 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 تأثیری ندارد شکل (۲-ب).

با توجه به شکل (۳-الف) مشاهده می شود 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 حالی که بر پهنای پنجره شفافیت تأثیری 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 در حالی 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 می کند که افزایش شعاع نقطه کوانتومی زمانی که میدان کاوشگر دارای قطبش Z است تأثیری 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 می شود و میزان جذب در این حالت تغییر نمی کند (۵-ب).

### مراجع

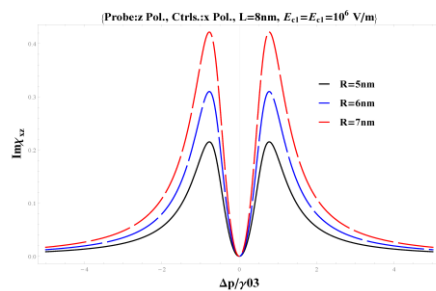
[1] Sadeghi. S. M, Deng an. L, Li. X and Huang. W-P; "Plasmonic (thermal)electromagnetically induced transparency in metallic nanoparticle-quantum dot hybrid systems "; **IOP science, Nanotechnology** 77, . (2009) 633-673.

[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.

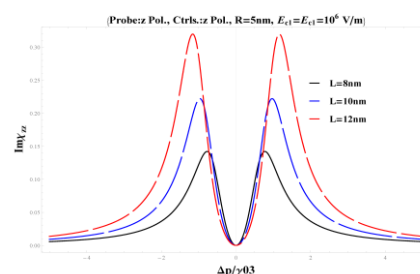
[3] Paspalakis. E, Knight. P. L; "Electromagnetically induced transparency and controlled group velocity in a multilevel system"; **Physical Review A** 66, . (2002) 015802-1.

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

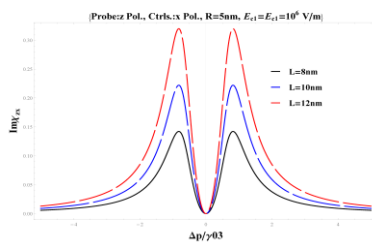
[5] Raki. Z, Askari. H. R, "Effect of light polarization and dimensions of A-type three level cylindrical quantum dot on electromagnetically induced transparency"; **superlattices and microstructures** 65, . (2014) 161-176



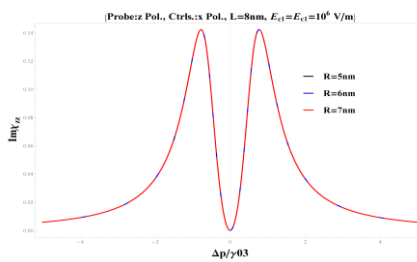
شکل ۳: نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای با شعاع‌های متفاوت در میدان کاوشگر با قطبش X (الف) میدان کنترل با قطبش X (ب) میدان کنترل با قطبش Z (الف)



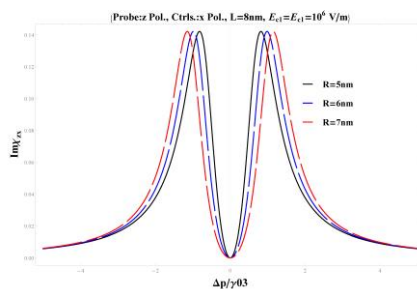
(ب)



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