

بررسی شفافیت القایی الکترومغناطیسی در یک سامانه ترکیبی نقطه کوانتومی-نانو ذره فلزی با استفاده از نظریه مای الکترومغناطیسی در حالت خطی سامانه بررسی می‌شود.

فاطمه خادم پیر^۱، حسن رنجبر عسکری^۱، علی اصغری نژاد^۱

چکیده

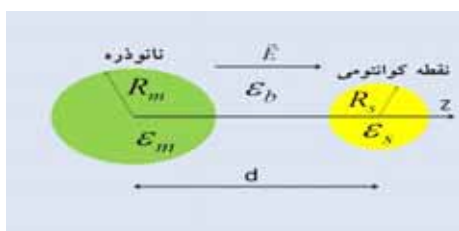
در این مقاله شفافیت القایی الکترومغناطیسی در یک سامانه ترکیبی شامل یک نانو ذره فلزی کروی و یک نقطه کوانتومی کروی با استفاده از نظریه مای و همچنین تأثیر پارامترهای ساختاری این سامانه بر شفافیت القایی الکترومغناطیسی در حالت خطی سامانه بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شفافیت القایی الکترومغناطیسی، سامانه ترکیبی، نانو ذره فلزی، نقطه کوانتومی کروی، نظریه مای

کوانتومی ظاهر می‌شود که در این مقاله این تاثیر با نظریه مای^۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- سامانه فیزیکی

سامانه‌ی به صورت شکل ۱ در نظر بگیرید که در یک میدان الکتریکی یکنواخت قرار دارد.



شکل ۱: سامانه ترکیبی شامل نانوذره فلزی کروی و نقطه کوانتومی کروی درون یک میدان الکتریکی یکنواخت.

در اینجا نقطه کوانتومی یک سامانه سه ترازه مدل نردبانی است. ترازهای این سامانه را به صورت $|0\rangle$ ، $|1\rangle$ و $|2\rangle$ در نظر می‌گیریم که انرژی این ترازها به ترتیب روبه‌رواست: $E_0 < E_1 < E_2$. چون مدل این سامانه

۱- مقدمه

امروزه به علت پیشرفت‌های شگرفی که در زمینه اپتیک و مکانیک کوانتومی به دست آمده است، می‌توان خواص اپتیکی ماده را با استفاده از نور لیزر تغییر داد. یکی از این موارد، پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی (یا به اختصار EIT^۲) است. این پدیده در سامانه‌های سه ترازه^[۱]، چهار ترازه^[۲] و با ترازهای بیشتر قابل مشاهده است. شفافیت القایی الکترومغناطیسی یک پدیده کوانتومی است که بر اثر تداخل هم‌دوس نور دو لیزر مختلف هنگام عبور از یک محیط اتمی روی می‌دهد و منجر به حذف جذب و ایجاد شفافیت در محیط می‌شود^[۳]. در یک سامانه متشکل از یک نانو ذره فلزی و یک نقطه کوانتومی، با تابیده شدن لیزر، علاوه بر اثر مستقیم میدان نور فرودی، میدانی متناسب با تاثیر لیزر بر نانو ذره فلزی در نقطه

۱. گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان.

F.Khadempir@ymail.com

2 Electromagnetically induced transparency

3 Mie theory

$$\begin{aligned}\tilde{H}_{00} &= -2\Delta_p \\ \tilde{H}_{01} &= -(\Omega_p + Nf_{3p} \bar{\mu}_{01} \cdot (\tilde{\rho}_{01} \bar{\mu}_{10} + \tilde{\rho}_{12} \bar{\mu}_{21})) \\ \tilde{H}_{12} &= -(\Omega_c + Nf_{3c} \bar{\mu}_{12} \cdot (\tilde{\rho}_{01} \bar{\mu}_{10} + \tilde{\rho}_{12} \bar{\mu}_{21})) \quad (۶) \\ \tilde{H}_{22} &= 2\Delta_c \\ \tilde{H}_{21} &= \tilde{H}_{12}^*, \tilde{H}_{20} = \tilde{H}_{02}^*\end{aligned}$$

که در آن Ω_p و Ω_c بسامدهای رابی مربوط به لیزر کاوشگر و لیزر کنترل می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Omega_p = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{eff} \hbar} |\mu_{01}| E_{0p} (1 + A_{zp}) \quad (۷-۱)$$

$$\Omega_c = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{eff} \hbar} |\mu_{12}| E_{0c} (1 + A_{zc}) \quad (۷-۲)$$

در غیاب نانوذره فلزی فقط جمله اول معادلات بسامد رابی حضور دارند اما در این جا به دلیل سامانه ترکیبی ما، یک جمله دیگر نیز به این معادلات اضافه شده است. A_{zc} و A_{zp} ضرایبی هستند که از نظریه مای به دست می‌آیند و طبق این نظریه به شعاع نانوذره فلزی، شعاع نقطه کوانتومی کروی، فاصله‌ی بین مراکز نانوذره فلزی و نقطه کوانتومی و به ترتیب به طول موج ω_p و ω_c وابسته‌اند. همچنین داریم $\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_s + 2\varepsilon_b}{3}$ ، که ε_s ثابت دی‌الکتریک نقطه کوانتومی و ε_b ثابت دی‌الکتریک محیط است و برای جمله \tilde{H} داخل معادلات داریم:

$$f_{3,i} = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{S_{\ell} \varepsilon_b \gamma_{\ell}(\omega_i) R_m^{2\ell+1}}{\varepsilon_{eff}^2 d^{2\ell+4}}, i = p, c \quad (۸)$$

که ناشی از جمله سوم میدان است.

۳- میدان الکتریکی نور پراکنده با استفاده از نظریه مای

از نظریه مای برای میدان پراکنده شده توسط نانوذره استفاده می‌کنیم. طبق این نظریه میدان پراکنده به صورت زیر به دست می‌آید:

نردبانی است، بنابراین گذار $|2\rangle \leftrightarrow |0\rangle$ گذار ممنوعه و گذارهای $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ و $|1\rangle \leftrightarrow |0\rangle$ مجازاند. فرض کنید که پتانسیل محدود کننده به صورت کروی باشد یعنی:

$$\hat{V}(\vec{r}) = \frac{1}{2} m_e^* \omega_0^2 r^2 \quad (۱)$$

که در آن جرم مؤثر الکترون و ω_0 بسامد مشخصه پتانسیل محدود کننده است. هامیلتونی این سامانه در عدم حضور نور به صورت زیر است:

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \nabla^2 + \hat{V}(\vec{r}) \quad (۲)$$

که ترازهای $|0\rangle$ ، $|1\rangle$ و $|2\rangle$ ویژه کت‌ها و E_0 ، E_1 و E_2 ویژه مقادیر آن هستند. اما در حضور نور، به علت برهم کنش میدان الکتریکی نور با الکترون‌های نقطه‌ی کوانتومی و نانوذره فلزی با استفاده از تقریب دو قطبی الکتریکی، پتانسیل اختلال به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{H}_1(t) = -\vec{\mu} \cdot \vec{E}(t) \quad (۳)$$

بنابراین هامیلتونی کل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_1(t) \quad (۴)$$

در سامانه ترکیبی، با استفاده از تقریب دوقطبی و تقریب موج چرخان، هامیلتونی سامانه در پایه چرخان به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tilde{H} = \begin{pmatrix} \tilde{H}_{00} & \tilde{H}_{01} & 0 \\ \tilde{H}_{10} & 0 & \tilde{H}_{12} \\ 0 & \tilde{H}_{21} & \tilde{H}_{22} \end{pmatrix} \quad (۵)$$

که عناصر ماتریس هامیلتونین به شکل زیر هستند:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{N}_{e11} &= \frac{2Z_1(\rho)}{\rho} \cos(\phi) \rho_1^1(\cos\theta) \hat{e}_r + \cos(\phi) \\ &\frac{d\rho_1^1(\cos\theta)}{d\theta} \times \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} [\rho Z_1(\rho)] \hat{e}_\phi = N_r \hat{e}_r + N_\phi \hat{e}_\phi \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{M}_{o11} &= \frac{1}{\sin(\theta)} \cos(\phi) \rho_1^1(\cos(\theta)) Z_1(\rho) \hat{e}_\theta - \\ &\sin(\phi) \frac{d\rho_1^1(\cos\theta)}{d\theta} Z_1(\rho) \hat{e}_\phi = M_\theta \hat{e}_\theta + M_\phi \hat{e}_\phi \end{aligned} \right. \quad (16)$$

با بسط بردارهای یکه در دستگاه مختصات دکارتی، میدان پراکنده شده به صورت ضریبی از میدان الکتریکی اولیه به دست می آید.

در صورت قرار دادن نقطه کوانتومی کروی در کنار این نانوذره فلزی، \vec{E}_s میدان پراکنده شده از نانوذره در نقطه کوانتومی به شکل زیر محاسبه شد:

$$\vec{E}_s = \frac{\epsilon_b}{2\epsilon_{eff}} E_0 \vec{A} \quad (17)$$

که داریم:

$$\vec{A} = A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k} \quad (18)$$

معادله‌ی حاکم بر تحول زمانی عناصر ماتریس چگالی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{mm} &= -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \rho]_{mm} + \sum_{E_m \rangle E_n} \Gamma_{nm} \rho_{mm} - \sum_{E_m \langle E_n} \Gamma_{mn} \rho_{mm} \\ \dot{\rho}_{mn} &= -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \rho]_{mn} - \gamma_{mn} \rho_{mn}, m \neq n \end{aligned} \quad (19)$$

این معادلات را در پایه‌ی \tilde{H} بسط داده و با فرض حالت پایا، جواب معادله به صورت زیر بدست می آید:

$$\vec{E}_s = \sum_{n=1}^{\infty} \vec{E}_n (i a_n \vec{N}_{emn} - b_n \vec{M}_{omn}) \quad (9)$$

$$\vec{N}_{emn} = \frac{Z_n(\rho)}{\rho} \cos\phi n(n+1) P_n^m(\cos\theta) \hat{e}_r + \cos m\phi \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial\rho} [\rho Z_n(\rho)] \hat{e}_\phi \quad (10)$$

$$\vec{M}_{omn} = \frac{m}{\sin\theta} \cos m\phi P_n^m(\cos\theta) Z_n(\rho) \hat{e}_\theta - \sin m\phi \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} Z_n(\rho) \hat{e}_\phi$$

که a_n و b_n ضرایب پراکندگی هستند و داریم:

$$(11)$$

$$a_n = \frac{m \psi_n(m x) \psi_n'(x) - \psi_n(x) \psi_n'(m x)}{m \psi_n(m x) \xi_n'(x) - \xi_n(x) \psi_n'(m x)}$$

$$b_n = \frac{\psi_n(m x) \psi_n'(x) - m \psi_n(x) \psi_n'(m x)}{\psi_n(m x) \xi_n'(x) - m \xi_n(x) \psi_n'(m x)}$$

که m حاصل تقسیم ضریب شکست نانوکره به ضریب شکست محیط اطراف آن است [۴].

در صورت کوچک بودن ابعاد نانوذره در مقابل طول موج نور فرودی، از تقریب دوقطبی استفاده می شود و معادله \vec{E}_s به معادله زیر کاهش می یابد:

$$\vec{E}_s = E_0 (i a_1 \vec{N}_{e11} - b_1 \vec{M}_{o11}) \quad (12)$$

که ضرایب به شکل زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{cases} a_1 = -2i \frac{x^3}{3} \times \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \\ b_1 = -i \frac{x^5}{45} (m^2 - 1) \end{cases} \quad (13)$$

$$E_1 = \frac{3}{2} i E_0 \quad (14)$$

2- میدان پراکنده شده از نانوذره فلزی بر روی نقطه کوانتومی اثر گذاشته و میدان دومی در آن به شکل زیر ایجاد می‌کند:

$$\vec{E}_2^{in} = \frac{\epsilon_b}{2\epsilon_{eff}} E_0 \vec{A} \quad (24)$$

3- بر اثر برهم‌کنش بین میدان و نقطه کوانتومی و نانوذره، توزیع بار این دو به هم می‌ریزد و در اطراف آن‌ها میدان دو قطبی الکتریکی ایجاد می‌شود، که برهم‌کنش بین این دو میدان، میدان زیر را در نقطه کوانتومی به وجود می‌آورد [۵]:

$$\vec{E}_{in}^3 = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{S_{\ell} \epsilon_b \gamma_{\ell} R_m^{2\ell+1}}{\epsilon_{eff}^2 d^{2\ell+4}} \vec{P}_{QD} \quad (25)$$

که در آن \vec{P}_{QD} گشتاور دو قطبی الکتریکی نقطه‌ی کوانتومی است و داریم $S_{\ell} = (\ell+1)^2$ برای قطبش در جهت z و $S_{\ell} = P'_{\ell}(1)$ برای قطبش در جهت x ، که $P'_{\ell}(x)$ مشتق تابع لژاندر است. همچنین $\gamma_{\ell} = \frac{\epsilon_m(\omega) - \epsilon_b}{\epsilon_m(\omega) + (1 + \frac{1}{\ell})\epsilon_b}$ حال با استفاده از اطلاعات موجود، قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی مرتبه اول را بر حسب (Δ_p / γ_{01}) رسم می‌کنیم.

۵-۱ تأثیر نانو ذره در ضریب جذب سامانه

در شکل ۲، قسمت موهومی پذیرفتاری سامانه بر حسب (Δ_p / γ_{01}) ، در دو حالت روشن بودن و خاموش بودن لیزر کنترل رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود در حضور لیزر کنترل یک پنجره شفافیت در سامانه ایجاد شده است.

(۲۰)

$$\tilde{\rho}_{01}^{(1)} = \frac{i(\gamma_{02} - i\Delta c - i\Delta p)\Omega_p}{2\left(-\frac{\Omega_c^2}{4} - (-\gamma_{02} + i(\Delta p + \Delta c))(i(\gamma_{01} + \Delta p) - \frac{if_{3p}|\mu_{01}|^2}{\hbar})\right)}$$

رابطه‌ی بین قطبش ماده و ماتریس چگالی آن به صورت زیر است:

$$\vec{P} = \text{Trace}(\tilde{\rho} \vec{\mu}) \quad (21)$$

که در آن $\tilde{\rho}$ نمایش ماتریس چگالی در پایه‌ی \vec{H} است. با استفاده از معادله‌ی (۲۱) و رابطه‌ی بین قطبش و تانسور پذیرفتاری الکتریکی، پذیرفتاری الکتریکی مرتبه‌ی اول سامانه به صورت زیر بدست می‌آید:

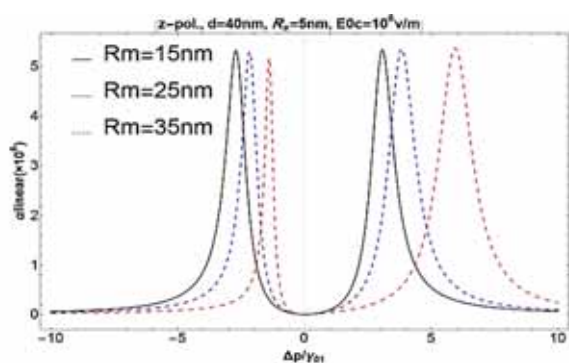
$$\chi^{(1)} = \frac{2N |\mu_{01}|^2}{\epsilon_0 \hbar \Omega_p} \tilde{\rho}_{01}^{(1)} \quad (22)$$

۴- میدان الکتریکی مؤثر بر نقطه کوانتومی کروی در حضور نانوذره فلزی

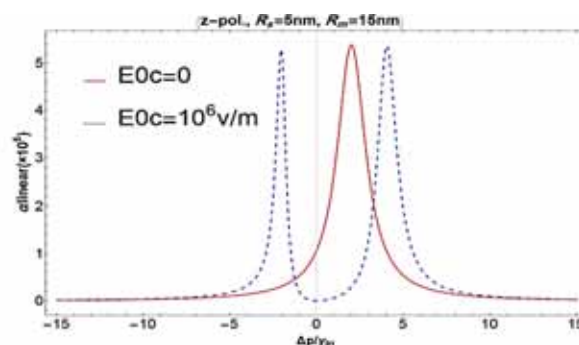
چون ابعاد نانوذره‌ی فلزی و نقطه‌ی کوانتومی در مقایسه با طول موج نور فرودی خیلی کوچکتر است، تقریباً می‌توان فرض کرد که در محل نقطه‌ی کوانتومی و نانو ذره، میدان الکتریکی نور یکنواخت است. میدان الکتریکی کل داخل نقطه‌ی کوانتومی از سه قسمت زیر تشکیل شده است:

1- ضریب ثابتی از میدان الکتریکی اولیه که در داخل نقطه‌ی کوانتومی به وجود می‌آید به صورت زیر است [۵]:

$$\vec{E}_1^{in} = \frac{\epsilon_b}{2\epsilon_{eff}} \vec{E}_0 \quad (23)$$



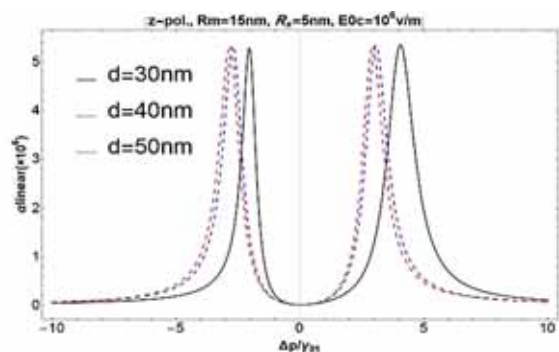
شکل ۴: نمودار تأثیر شعاع نانوذره بر پنجره‌ی شفافیت.



شکل ۲: نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی در حضور و عدم حضور لیزر کنترل.

۴-۵ تأثیر d بر پنجره‌ی شفافیت

در شکل ۵، قسمت موهومی پذیرفتاری سامانه برای مقادیر متفاوت فاصله نانوذره و نقطه کوانتومی رسم شده است. همانگونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، با افزایش d ، پهنای پنجره کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش فاصله اثر میدان پراکنده شده از نانوذره بر نقطه کوانتومی کاهش می‌یابد.



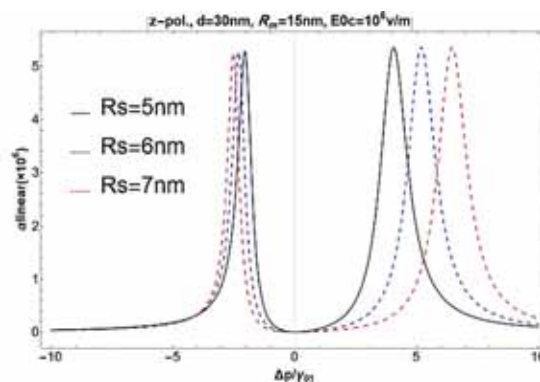
شکل ۵: نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی برای مقادیر مختلف d .

۵-۵ تأثیر $E0c$ بر پنجره شفافیت

همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود هر چه مقدار میدان الکتریکی لیزر کنترل بیشتر شود، پنجره شفافیت بازتر می‌شود اما مکان کمترین مقدار ضریب جذب ثابت می‌ماند.

۲-۵ تأثیر شعاع نقطه کوانتومی بر پنجره شفافیت

در شکل ۳، تأثیر شعاع نقطه‌ی کوانتومی بر پنجره‌ی شفافیت نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش شعاع نقطه‌ی کوانتومی، پهنای پنجره افزایش می‌یابد و علت این است که با افزایش شعاع نقطه‌ی کوانتومی، طیف انرژی سامانه دچار تغییر می‌شود.



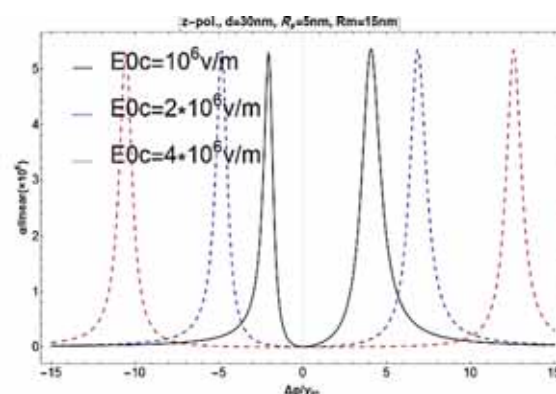
شکل ۳: نمودار تأثیر شعاع نقطه کوانتومی بر پنجره شفافیت.

۳-۵ تأثیر شعاع نانوذره بر پنجره‌ی شفافیت

در شکل ۴، قسمت موهومی پذیرفتاری برای سه شعاع متفاوت نانوذره رسم شده است، که دیده می‌شود با افزایش شعاع نانوذره، پهنای پنجره شفافیت افزایش می‌یابد.

مرجع ها

- [1] P. Lunneman, J. Mork, "Reducing the impact of inhomogeneous broadening on quantum dot based electromagnetically induced transparency", *Applied Physics Letters*, 94 (2009)
- [2] H. J. Li, G. Huang, "Two-component spatial optical solitons in a four-state ladder system via electromagnetically induced transparency", *Physics Letters A*, 372 (2008)
- [3] B. Vaseghi, N. Mohebi, "Effects of external fields, dimension and pressure on the electromagnetically induced transparency of quantum dots", *Luminescence*, 134 (2013)
- [4] *Absorption and scattering of light by small particles*. C. F. Bohren, D. R. Huffman. John Wiley & Sons, Inc. (1998)
- [5] Jie-Yun Yan, Wei Zhang, Suqing Duan, Xian-Geng Zhao, and Alexander O. Govorov, "Optical properties of coupled metal-semiconductor and metal-molecule nanocrystal complexes: Role of multipole effects", *Physics Review B* 77,165301 (2008)



شکل ۶: نمودار قسمت موهومی پذیرفتاری الکتریکی برای مقادیر مختلف E_{0c} .

نتیجه گیری

در یک سامانه ترکیبی متشکل از یک نقطه کوانتومی کروی و یک نانوذره فلزی، بدون در نظر گرفتن قسمت غیرخطی مشاهده شد که افزایش شعاع نقطه کوانتومی، موجب پهن شدن پهنای پنجره شفافیت و افزایش شعاع نانوذره و میدان کنترل نیز باعث پهن شدن پنجره شفافیت می‌شود. در نهایت تغییر در فاصله بین نقطه کوانتومی و نانوذره موجب کاهش پنجره شفافیت می‌شود.