

مطالعه اثر قطبش و پارامتر شکل روی پاسخ اپتیکی غیرخطی یک مولکول هیبریدی متشکل از یک کوانتم دات نیم‌رسانا جفت شده با دو نانوذره فلزی: تولید هارمونیک دوم

نادر دانش‌فر و مینا رشیدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی: m.rashidi@razi.ac.ir

چکیده:

در این مقاله تولید هارمونیک دوم در یک سیستم هیبریدی (مولکول هیبریدی) متشکل از دو نانو ذره بیضوی شکل که با یک کوانتم دات نیم رسانا جفت می‌شوند وقتی که سیستم تحت تابش یک میدان لیزر قرار می‌گیرد با استفاده از روش ماتریس چگالی بررسی می‌شود. این میدان اعمال شده قطبشی را بر روی کوانتم دات نیم رسانا و هر دو نانو ذره پلاسمونیک متفاوت ایجاد می‌کند، و نانوذرات قطبیده شده از طریق برهمکنش دوقطبی-دوقطبی با کوانتم دات برهمکنش می‌کنند. ثابت می‌شود که تولید هارمونیک دوم قویا به جهت قطبش میدان فرودی و فاکتور شکل نانو ذرات پلاسمونیک بیضوی کشیده و پخت که با کوانتم دات جفت می‌شوند هنگامی که میدان به کار رفته موازی یا عمود بر با محور اصلی سیستم می‌تابد، بستگی دارد. مطالعه بر هم کنش نور - ماده در چنین مولکول هیبریدی می‌تواند برای طراحی وسایل نوری مبتنی بر برهم کنش پلاسمون-اکسایتون-پلاسمون مناسب باشد.

واژه‌های کلیدی: مولکول هیبریدی، تولید هارمونیک دوم، نانو ذره فلزی، کوانتم دات نیم‌رسانا.

هیبریدی متشکل از نقطه کوانتومی نیم‌رسانا (SQD) و نانو ذره

فلزی (MNP)^۱ است. این ساختارها امکان مطالعه فیزیکی را در

وجه مشترک علم مکانیک کلاسیک و کوانتوم میسر کرده و

تکنولوژی لازم برای ساخت امکانات کوانتومی را در دسترس

قرار داده است [۱-۸]. در حقیقت، پاسخ اپتیکی کوانتم دات‌ها

و نانو ذره‌های فلزی به ترتیب اکسیتون‌ها و پلاسمون‌های

سطحی هستند که زمانی که با هم ترویج می‌شوند به ظهور

حالت هیبریدی منجر خواهد شد که مدهای پلکسایتونی^۲ نام

دارد. در سیستم‌های هیبریدی مذکور تونل زنی مستقیم بین

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر ترکیب نانوذرات فلزی و نیم‌رسانا با خواص

الکتریکی و اپتیکی متفاوت منجر به طراحی یک ساختار

ترکیبی (هیبریدی) جدید شده است که ویژگی‌های منحصر بفرد

این سیستم‌های نوین باعث شده مطالعه این گونه ساختارهای

هیبریدی به موضوع جالبی برای کاربردهای نوری، الکترونیکی

و بیولوژیکی تبدیل شود. یکی از مهم‌ترین آنها سیستم‌های

¹ Semiconductor Quantum Dot

² Metallic Nano Particle

³ Plexcitonic Modes

⁴ dipole-dipole interaction (DDI)

MNP و SQD وجود ندارد. با این حال، بخاطر اندرکنش کولنی دور برد، برهم کنش دوقطبی-دوقطبی (DDI)^۱ به وجود می آید که امکان انتقال اطلاعات را فراهم می کند. برای توصیف رفتار نانو ذرات فلزی از مکانیک کلاسیک و برای توصیف رفتار نقطه کوانتومی از مکانیک کوانتومی استفاده می شود به طوریکه در برهم کنش با نور نقطه کوانتومی رفتار کوانتومی و نانوذره فلزی رفتار کلاسیکی را به نمایش می گذارد. علاوه بر این، در برهمکنش تابش میدان فرودی با شدت بالا با این سیستم هیبریدی متشکل از نانوذره پلاسمونیک و نقطه کوانتومی منجر به ظهور پدیده های اپتیکی غیر خطی مانند تولید هماهنگ دوم (SHG)^۲، تولید جمع فرکانسی (SFG)^۳، تولید نفاصل فرکانسی (DFG)^۴، تولید هماهنگ سوم (THG)^۵، جذب دو فوتونی (TPA)^۶ و دو است [۹-۱۲]. بعنوان مثال، فرآیند تولید هماهنگ دوم که در آن دو فوتون با بسامد یکسان در نانو ساختار جفت می شوند و یک فوتون با بسامد دو برابر از آن ساطع می شود، به علت کاربردهای گسترده ای که دارد توجه زیادی را به خود جلب کرده است. لازم به ذکر است که شدت پدیده های اپتیکی غیرخطی معمولاً خیلی ضعیف است و برای افزایش شدت سگنال تابش شده بایستی اثر پارامترهای سیستم بررسی شوند. براین اساس، در این مقاله اثر قطبش شکل ذره روی شدت هارمونیک تولید شده توسط کوانتم دات بررسی می شود.

۲. مدل و تئوری مسئله

برای مطالعه اثر قطبش و شکل نانوذره روی شدت هارمونیک تولید شده یک سیستم مطابق شکل ۱ در نظر می گیریم که از سه ذره تشکیل شده است. سیستم مورد نظر ما متشکل از دو نانو ذره فلزی بیضوی با اندازه های مختلف است که در طرفین کوانتوم دات با فاصله های مختلف R_1 و R_2 قرار گرفته است که تحت تابش یک میدان قوی با دامنه E_0 و فرکانس ω دامنه

که میدان کاوشگر (پمپ) نامیده می شود. با اعمال این میدان دو قطبی هایی در کوانتوم دات و نانو ذره ها القا می شود که باعث ایجاد برهم کنش دوقطبی-دوقطبی بین آنها می شود. فرض می شود کل سیستم در محیطی با ثابت دی الکتریک ϵ_{env} قرار گرفته است. فرض می کنیم کوانتوم دات نیم رسانا با شعاع r_s و تابع دی الکتریک ϵ_s دارای دو تراز اکسایتونی مجزا است که |1> تراز پایه و |2> تراز برانگیخته است و اختلاف انرژی بین حالت های انرژی برابر با $\hbar\omega_{12}$ است (شکل ۱ ب). جذب دو فوتون به طور همزمان از میدان پروب منجر به گذار دوقطبی بین ترازهای |2> → |1> از طریق تراز مجازی می شود. لازم به ذکر است که پایستگی انرژی شرط $\omega_{12} = 2\omega$ را نتیجه می دهد. دو قطبی الکتریکی های القا شده در کوانتوم دات و نانو ذرات باعث ایجاد میدان های الکتریکی در اطراف آنها می شود که برهمکنش بین آنها از نوع برهم کنش دوقطبی-دوقطبی است. میدان الکتریکی ناشی از دو قطبی های القا شده در کوانتوم دات در محل هر نانو ذره را به ترتیب با E_{ddi}^{qd} و E_{ddi}^{qd} نشان می دهیم و میدان الکتریکی ناشی از نانو ذره یک و دو را در محل کوانتوم دات به ترتیب با E_{ddi}^{mnp} و E_{ddi}^{mnp} نمایش می دهیم. رابطه مربوط به هر یک از این میدان ها به صورت زیر است: [۱ و ۱۳].

$$E_{ddi}^{qd} = \frac{s_\alpha P_{qd}}{4\pi\epsilon_h\epsilon_{eff}R_i^r},$$

$$E_{ddi}^{qd} = \frac{s_\alpha P_{qd}}{4\pi\epsilon_h\epsilon_{eff}R_i^r}, \quad (1)$$

$$E_{ddi}^{mnp(\gamma)} = \frac{s_\alpha P_{mnp(\gamma)}}{4\pi\epsilon_h\epsilon_{eff}R_{(\gamma)}^r}.$$

در روابط فوق s_α پارامتر قطبش و $\epsilon_{eff} = \frac{2\epsilon_{env} + \epsilon_h}{3}$ است.

که ϵ_{env} و ϵ_s به ترتیب ثابت دی الکتریک محیط میزبان و کوانتوم دات است.

⁵ Second Harmonic Generation

⁶ Second Harmonic Generation

⁷ Sum Frequency Generation

⁸ Difference frequency Generation

⁹ Third Harmonic Generation

¹⁰ Two Photon Absorption

¹¹ Optical bistability

به محور سوم می‌تواند اندازه کمتر یا بیشتری داشته باشد. چنانچه طول دو محور یکسان نسبت به محور سوم کمتر باشد نانو ذره کشیده و اگر بزرگتر باشد نانو ذره پهن شده است. میدان‌های الکتریکی موثر بر هر نانو ذره چند قسمت دارد: اول میدان خارجی که به طور مستقیم بر آن‌ها اعمال می‌شود، دوم میدان‌های دو قطبی و هارمونیک دوم ناشی از کوانتوم دات و قسمت سوم میدان‌های دو قطبی و هارمونیک دوم ناشی از نانو ذره دیگر می‌باشد. میدان‌های الکتریکی مذکور منجر به ایجاد قطبش در نانو ذره می‌شوند که رابطه آن تحت تقریب شبه ایستا به صورت زیر می‌باشد [۱۱]:

$$P_{mnp(j)} = [\chi_j^{(1)} (E_{ddi}^{qd} + E_{shg}^{qd}) + \chi_j^{(2)} E_p^*] e^{-i\omega t}, \quad (j=1,2) \quad (3)$$

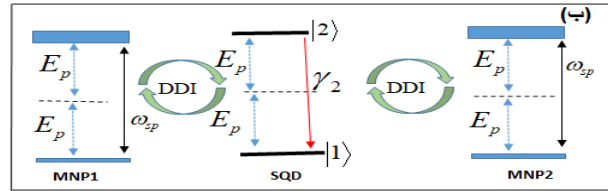
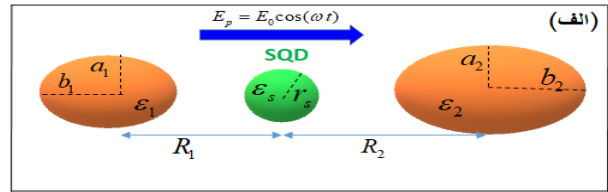
که j اشاره به نانو ذرات با حجم $V_{(j)}$ دارد و $\chi_j^{(1)}$ و $\chi_j^{(2)}$ به ترتیب پذیرفتاری مرتبه اول و دوم می‌باشند و از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$\chi_j^{(1)} = V_{(j)} \frac{\epsilon_{env} (\epsilon_j(\omega) - \epsilon_{env})}{\epsilon_{env} + \xi_{a_j, b_j} (\epsilon_j(\omega) - \epsilon_{env})}. \quad (4)$$

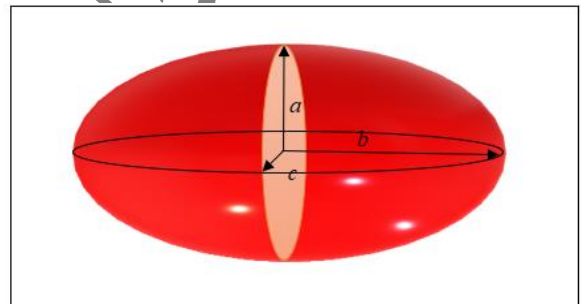
که بیانگر آنست که مقدار پذیرفتاری مرتبه اول متناسب با تابع دی الکتریک وابسته به فرکانس نانو ذرات است، که برای محاسبه آن از مدل درود استفاده می‌شود. بعلاوه $\chi_j^{(2)} \propto (\chi_j^{(1)}(\omega))^2 \chi_j^{(1)}(2\omega)$ پذیرفتاری مرتبه دوم است که با مقدار پذیرفتاری مرتبه اول متناسب است. در رابطه مربوط به پذیرفتاری خطی مرتبه اول کمیت فاکتور شکل $(\xi_{a,b}^2)$ دیده می‌شود که این کمیت وابسته به ویژگی‌های هندسی نانو ذره است که در ادامه توضیح داده می‌شود. مورفولوژی نانو ذره پلاسمونیک در نظر گرفته شده در این مقاله در شکل ۲ توضیح داده شده است.

مطابق شکل ۲، نانو ذره بیضی گون دارای سه محور اصلی a ، b و c است که بسته به اندازه هر یک از محورها ویژگی‌های فیزیکی آن می‌تواند تغییر کند. حالتی که در این مقاله در نظر گرفته می‌شود مربوط به نانو ذره بیضی کشیده در راستای قائم (Prolate) و پخت (پهن شده) (Oblate). در نانو ذره کشیده

با دو محور یکسان نسبت $r = \frac{b}{a(=c)}$ مقداری بزرگتر از



شکل ۱. الف) طرح سیستم هیبریدی مورد مطالعه شامل کوانتوم دات که بین دو نانو ذره بیضوی قرار دارد و تحت تاثیر میدان الکتریکی پروب (کاشگر) قرار دارد. ب) ترانه‌های انرژی کوانتوم دات و نانو ذرات که برهم کنش دو قطبی-دو قطبی باهم دارند.



شکل ۲. طرح واره‌ای از نانو ذره بیضوی با سه محور اصلی a ، b ، و c .

هم چنین $P_{qd} = k_{12} \rho_{12} E_s e^{(-i\omega t)} + c.c.$ قطبش غیر خطی کوانتوم دات تحت تاثیر جذب دو فوتونی است [۱۲]. k_{12} ضریب جذب دو فوتونی، ρ_{12} عنصر ماتریس چگالی و $c.c.$ به همیوگ مختلط اشاره دارد. P_{mnp} نیز قطبش نانو ذره است که با میدان‌های موثر بر آن متناسب است.

به علت جذب همزمان دو فوتون از موج فرودی پدیده غیر خطی تولید همهانگ دوم بروز پیدا می‌کند که میدان ناشی از سیگنال‌های آن در اطراف هر ذره به صورت زیر است.

$$E_{shg}^{qd} = \frac{P_{qd}}{(\frac{4}{3}\pi r_s^3) \epsilon_{env}}, \quad (2)$$

$$E_{shg}^{mnp(j)} = \frac{P_{mnp}}{\pi a_{(j)}^2 b_{(j)} \epsilon_{env}}.$$

که شعاع کوانتوم دات و $a_{(j)}$ و $b_{(j)}$ طول محورهای نانو ذرات بیضوی می‌باشد. توجه داشته باشید که هر نانو ذره بیضوی در این پروژه دارای دو محور یکسان می‌باشد که نسبت

¹ Shape factor

یک است که در این حالت فاکتور شکل به صورت تعریف می‌شود [۱۵و۱۴].

$$\xi_z = \left(\frac{1-e^z}{e^z}\right)\left(-1 + \frac{1}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e}\right), \quad (5)$$

$$\xi_x = \xi_y = \frac{1-\xi_z}{2},$$

که $e^2 = 1 - \frac{1}{r^2}$ می‌باشد. همانطور که مشخص است به علت مساوی بودن دو محور a و c فاکتور شکل مربوط به محورهای مربوط نیز با هم برابر خواهند شد. در حالیکه برای نانو ذره پَخت، مقدار r از کمتر از یک است و فاکتور شکل برای نانو ذره پَخت به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\xi_z = \left(\frac{1+f^z}{f^z}\right)\left(1 - \frac{1}{f} \arctan f\right), \quad (6)$$

$$\xi_x = \xi_y = \frac{1-\xi_z}{2},$$

که $f = \frac{1}{r^2} - 1$ است. با توجه به جهت میدان اعمال شده و شکل نانو ذره می‌توان عبارت مناسب را برای فاکتور شکل مورد استفاده قرار داد. شدت میدان هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات متناسب با مجذور دامنه میدان الکتریکی هارمونیک دوم است $(I_{shg}^{qd} \propto (E_{shg}^{qd})^2)$ ، که طبق معادله ۲ و عبارت مربوط به قطبش کوانتوم دات، این میدان نیز به عنصر ρ_{21} از عناصر ماتریس چگالی وابسته می‌باشد که باید آن را محاسبه کرد. برای محاسبه عنصر ρ_{21} ، با استفاده از معادله حرکت معادلات ماتریس چگالی دو-فوتونی برای سیستم دو ترازه را بدست آورد و سپس با حل معادلات حرکت در حالت پایا^۱ و با استفاده از $\rho_{11} + \rho_{22} = 1$ ، می‌توان ρ_{21} را محاسبه کرد [۱۶]. بنابراین، با استفاده از معادله حرکت، معادلات ماتریس چگالی دو فوتونی سیستم دو ترازه عبارتند از:

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{11} &= i\Lambda_{12}\rho_{22} - i\Lambda_{12}^*\rho_{21} + \gamma_2\rho_{22} \\ \dot{\rho}_{22} &= i\Lambda_{12}^*\rho_{21} - i\Lambda_{12}\rho_{22} - \gamma_2\rho_{22} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_{21} = i\Lambda_{12}(\rho_{22} - \rho_{11}) + i\Delta\rho_{11} - i\Delta_S\rho_{11} - \frac{1}{2}\gamma_2\rho_{21}$$

که $\Delta_S = 2\omega_s |\Omega_{12}| / \gamma_2$ می‌باشد. در این رابطه ω_s فرکانس

استارک^۲ است. γ_2 نرخ واهلش^۳ از تراز^۳ |۲> به تراز^۱ |۱> است و Ω_{12} فرکانس رابی^۴ می‌باشد. همچنین $\Delta = 2\omega - \omega_{12}$ ، پارامتر نامیزانی بین گذار اتمی و فرکانس میدان کاوشگر در جذب دو فوتونی است. علاوه بر این، جمله $\Lambda_{12} = \Omega_{2p} + \Omega_{sh} + \Omega_{ddi}$ می‌باشد که از ترکیب سه جمله تشکیل شده است: جمله اول $\Omega_{2p} = k_{ln} E_p^x / \sqrt{2} \hbar \epsilon_{eff}^x$ فرکانس رابی دو فوتونی ناشی از جذب مستقیم دو فوتون از میدان کاوشگر توسط کوانتوم دات است، جمله دوم $\Omega_{sh} = \Omega_{sh}^{mnp} + \Omega_{sh}^{mmp}$ فرکانس رابی ناشی از تاثیر میدان‌های هارمونیک دوم نانو ذرات بر روی کوانتوم دات است و سومین جمله $\Omega_{ddi} = \Lambda_{ddi}^{2p} + \Lambda_{ddi}^{dp} + \Lambda_{ddi}^{sh}$ فرکانس رابی ناشی از بر هم کنش کوانتوم دات با میدان حاصل از دو قطبی‌های نانو ذرات است که این دو قطبی‌ها خود از سه میدان پروب، میدان هارمونیک دوم و میدان دو قطبی‌های کوانتوم دات تاثیر می‌پذیرد. از دو قسمت آخر می‌توان بعنوان جملات خود بر هم کنشی نام برد [۱۷]. با حل معادلات^۷ در شرایط پایا $\rho_{21} = -i\Lambda_{12} / d_{21}$ به دست می‌آید که $\Lambda_{12} = \Omega_{2p} + \Omega_{sh} + \Omega_{ddi}$ و $d_{21} = \gamma_2 / 2 - i\delta_{21} - i\Delta_S$ است [۱۸و۱۰].

۳. نتایج عددی و بحث

در این بخش نتایج عددی مربوط به شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات در سیستم نا متقارن MNP-SQD- را مورد بحث قرار گرفته و نشان داده می‌شود که چگونه ویژگی‌های هندسی نانو ذرات و جهت قطبش میدان فرودی اثر قوی روی شدت هارمونیک دوم دارد. فرض می‌شود که نانو ذره‌ها از جنس نقره است و ثابت دی الکتریک کوانتوم دات و دی الکتریک سیلیکا را به ترتیب ۶.۲۵ و ۲.۲۵ در نظر می‌گیریم. هم چنین شعاع کوانتوم دات ۳ نانومتر است. در نانو ذره کشیده، $r=2$ و در نانو ذره پَخت (پهن شده)، $r=0.5$ اختیار شده است. همچنین نرخ واهلش $\gamma_2 = 1 \mu eV$ و شدت میدان فرودی $I = 1 w / cm^2$ است.

¹ Steady State Approximation

² Stark Frequency

³ Damping Rate

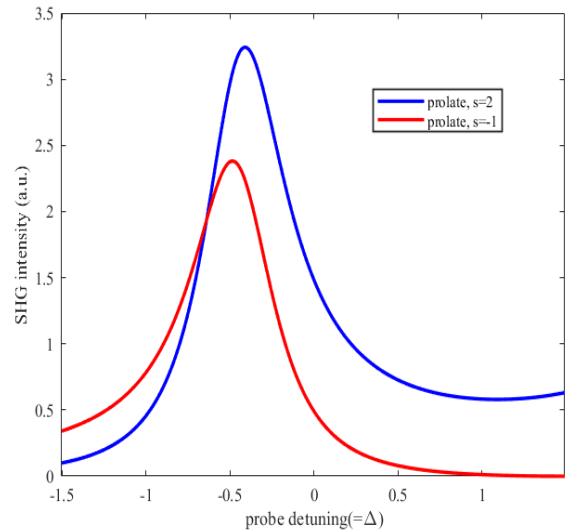
⁴ Rabi Frequency

در شکل 3. نمودار تغییرات شدت هارمونیک دوم ناشی از کوانتوم دات به صورت تابعی از پارامتر نامیزانی برای نانوذره کشیده در حالتی که میدان فرودی موازی با محور اصلی سیستم ($s_\alpha = 2$) است به رنگ آبی و درحالتی که عمود بر محور اصلی سیستم ($s_\alpha = -1$) است با رنگ قرمز رسم شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند در شرایطی که میدان به صورت عمود بر محور اصلی می‌تابد شدت هارمونیک تولید شده ضعیف تر می‌شود. میدان‌های موثر بر کوانتوم دات حاصل برنهی میان میدان پروب خارجی و میدان‌های القایی داخلی ناشی از برهم کنش‌ها است. با توجه به شکل ۳ مشخص می‌شود که اگر جهت قطبش میدان فرودی عمود بر محور اصلی سیستم باشد شدت هارمونیک تولید شده کاهش یافته و پیک تشدید به سمت فرکانس‌های کوتاه تر میل می‌کند. در نتیجه تداخل بین میدان‌های اعمال شده بر کوانتوم دات ویرانگر است. در حالیکه اگر قطبش میدان فرودی موازی با محور اصلی سیستم باشد، شدت سیگنال تولید شده افزایش می‌یابد.

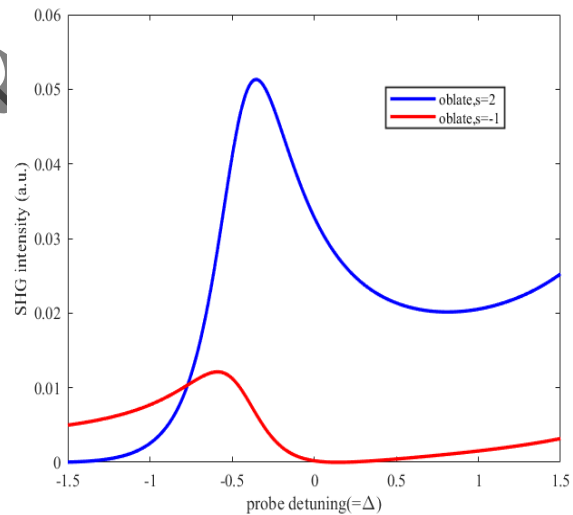
در شکل ۴، هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات در دو حالت قطبش میدان فرودی موازی و عمود بر محور اصلی باشد در شرایطی که نانو ذره‌ها پخت باشند در نظر گرفته شده است. همانطور که در این مورد نیز دیده می‌شود وقتی که قطبش میدان فرودی موازی با محور اصلی سیستم باشد شدت هارمونیک دوم بیشتر است.

در شکل ۵ شدت هارمونیک تولید شده را برای کوانتوم دات در حالتی که شکل نانو ذره‌ها تغییر کند بررسی شده است و نتایج مقایسه شده اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که وقتی نانوذره کشیده باشد (نمودار آبی) شدت هارمونیک تولید شده نسبت به حالتی که نانو ذره پخت (نمودار قرمز) است افزایش یافته است. بنابراین در حالتی که یک کوانتم دات بین دو نانوذره فلزی کشیده بیضوی قرار داده می‌شود نانو ذره‌های کشیده نسبت به حالتی که دو نانوذره پخت (پهن شده) باشند، شدت هارمونیک دوم افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین، تولید هارمونیک دوم به شدت به جهت قطبش نور فرودی بستگی دارد [۱۹].

اصلی سیستم (نمودار قرمز).



شکل ۳. شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات دو ترازه وقتی نانوذره‌ها prolate هستند، در دو حالت میدان فرودی موازی محور اصلی سیستم (نمودار آبی) و میدان فرودی عمود بر محور اصلی سیستم (نمودار قرمز).



شکل ۴. شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات دو ترازه وقتی دو نانو ذره فلزی oblate هستند در دو حالت میدان فرودی موازی محور اصلی سیستم (نمودار آبی) و میدان فرودی عمود بر محور اصلی سیستم است.

به علاوه اندازه نانو ذره‌ها در حالت کشیده و پهن شده به ترتیب برابر

$$a_1 = 5nm, b_1 = 10nm, a_2 = 6nm, b_2 = 12nm$$

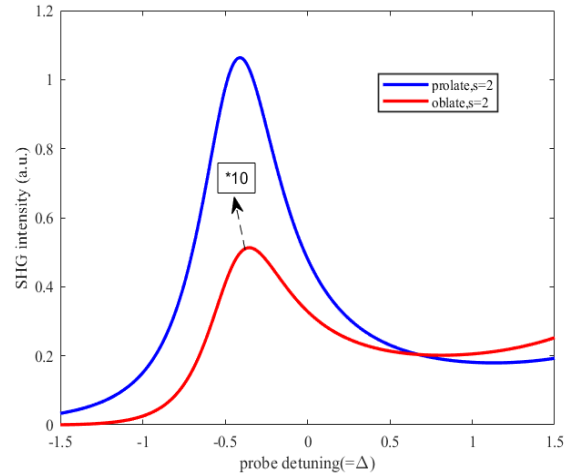
$$a_1 = 10nm, b_1 = 5nm, a_2 = 12nm, b_2 = 6nm$$

فاصله سطح نانو ذره ۱ از سطح کوانتوم دات ۱۰ نانومتر و فاصله سطح نانوذره دوم از کوانتوم دات ۱۲ نانومتر اختیار شده است.

برای درک بهتر رفتار سیستم در شکل ۶ فاکتور شکل برای نانو ذرات کشیده و پخت (پهن شده) برحسب مقدار مربوط به نسبت محورها رسم شده است. با توجه به اندازه ای که برای ابعاد نانو ذره‌ها در دو حالت کشیده و پخت اختیار کرده ایم نسبت محورها برای نانو ذره کشیده ۰.۵ و برای نانو ذره پخت ۲ می‌باشد که همانطور که مشخص است فاکتور شکل در نانو ذره کشیده برای این نسبت محورها بین ۰.۱ تا ۰.۲ است در حالیکه این مقدار برای نانو ذره پخت از ۰.۵ تجاوز می‌کند. بنابراین می‌توان دریافت که مقدار پارامتر شکل برای نانو ذره کشیده نسبت به فاکتور شکل نانو ذره پخت (پهن شده) کمتر است که منجر به ایجاد قطبش پذیری قویتر می‌شود. این بدین معنی است که نانو ذره کشیده منجر به ایجاد میدان الکتریکی قویتری شده که افزایش شدت هارمونیک دوم را در پی دارد.

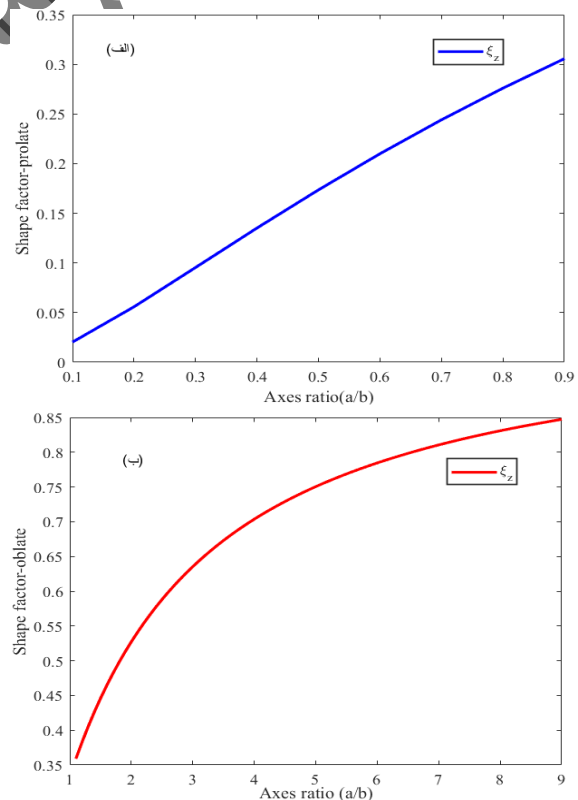
۴. نتیجه گیری

با محاسبه شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات در سیستم هیبریدی نانو ذره-کوانتوم دات-نانو ذره می‌توان نتیجه گرفت که در یک سیستم هیبریدی متشکل از دونانو ذره فلزی جفت شده با یک کوانتم دات نیم‌رسانا وقتی میدان اعمال شده بر سیستم با محور اصلی آن موازی باشد تداخل بین میدان خارجی و میدان‌های القایی داخلی از نوع سازنده و اگر عمود باشد از نوع ویرانگر است که همین سازنده با ویرانگر بودن تداخل‌ها منجر به تقویت و تضعیف شدت میدان هارمونیک دوم گسیل شده از کوانتوم دات می‌شود. علاوه بر این، هنگامی که جهت قطبش نور تابشی موازی با محور سیستم باشد، شدت هارمونیک دوم افزایش می‌یابد و یک جابجایی در طیف مشاهده می‌شود. علاوه بر این، شکل نانو ذرات پارامتر مهم دیگری است که شدت سیگنال هارمونیک دوم حساس به آن است. نتایج حاصل از این کار می‌تواند در طراحی افزاره‌های مبتنی بر سیگنال هارمونیک دوم در مقیاس نانو استفاده شود.



شکل ۵. مقایسه شدت هارمونیک تولید شده توسط کوانتوم دات در دو حالت مختلف وقتی نانو ذرات پلاسمونیک کشیده هستند (نمودار آبی) و وقتی نانو ذره‌ها پخت هستند (نمودار قرمز) و میدان اعمال شده را راستای محور سیستم است.

برای درک بهتر رفتار سیستم هنگامی که شکل هندسی نانو ذرات تغییر می‌کند.



شکل ۶. مقدار فاکتور شکل برای اندازه‌های مختلف محورها در الف) نانو ذره پخت (پهن شده) و ب) نانو ذره کشیده

1. M Singh and C Racknor, JOSA B, vol. 32, No. 10 (2015).
2. W Yang, A Chen, Z Huang and R Lee, Optical Society of America, vol. 23, No. 10(2015).
3. J Yan, W Zhang, S Duan, X Zhao and A Gorov Physical review B 77, 165301 (2008).
4. Y He, J Li and K Zhu, J. Opt. Soc. Am, B vol. 29, No. 5 (2012)
5. R Artuso and G Bryant, Acta. Phys. Pol. A, Vol. 122, No. 2, 289 (2012).
6. M Anton, F Carreno, S Melle, O Calderon and E Cabrera, Phys. Rev. B 86, 155305 (2012).
7. H Akram, M Abdullah, A H. Al-khursan, Sci. Rep. vol. 12, 21495 (2022).
8. T Nakanishi, K Sugiyama and M Kitano, Phys. Rev. A 67, 043809 (2003).
9. J Gondar, R Cipolatti and G Marques, Braz. J. Phys., vol. 36, No. 3B, 968 (2006).
10. M Singh, Nanotechnology 24, 125701 (2013).
11. R Boyd, "Nonlinear Optics", New York, USA (2008).
12. P Meystre and M Sargent III, "Element of Quantum Optics" (2007).
13. J David Jackson, "Classical Electrodynamics", Professor Emeritus of Physic, Berkeley, (1925).
14. D Sarid and W Challener, "Modern introduction to surface plasmons", Cambridge University press, (2010).
15. H.C Van de Hulst, "Light Scattering by Small Particle", Dover Publications, Inc. New York, (1981).
16. S Rand, "Nonlinear and quantum optics using the density matrix", OXFORD university press, (2010).
17. J. D. Cox, M. R. Singh, C. von Bilderling, and A. V. Bragas, Adv. Optical Mater. vol. 1, 460 (2013).
18. M Rashidi, N Daneshfar, Eur. Phys. J. Plus, vol. 138, 765 (2023).
19. C. Hubert, L. Billot, P.-M. Adam, R. Bachelot, and P. Royer, J. Grand, D. Gindre, K. D. Dorkenoo, and A. Fort, Appl. Phys. Lett. vol. 90, 181105 (2007).