

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

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵)

چکیده

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

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

۱. مقدمه

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

(MNP)^۲ است. این ساختارها امکان مطالعه فیزیک را در وجه

مشترک علم مکانیک کلاسیک و کوانتوم میسر کرده و فناوری

لازم برای ساخت امکانات کوانتومی را در دسترس قرار داده

است

[۱-۸]. در حقیقت، پاسخ اپتیکی کوانتوم 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^۳ نام دارد. در سامانه‌های

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 سامانه‌های نوین باعث شده مطالعه این گونه ساختارهای

هیبریدی به موضوع جالبی برای کاربردهای نوری، الکترونیکی و

بیولوژیکی تبدیل شود. یکی از مهم‌ترین آنها سامانه‌های هیبریدی

۱. Semiconductor Quantum Dot

۲. Metallic Nano Particle

۳. Plexcitonic Modes

تحت تابش یک میدان قوی با دامنه E_0 و بسامد ω که میدان کاوشگر (پمپ) نامیده می شود قرار می گیرد. با اعمال این میدان، دو قطبی هایی در کوانتوم دات و نانو ذره القا می شود که باعث ایجاد برهم کنش دو قطبی - دو قطبی بین آنها می شود. فرض می شود کل سامانه 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 دو تراز اکسایتونی مجزا دارد 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 کاوشگر منجر به گذار دو قطبی بین ترازهای |2> → |1> از طریق تراز مجازی می شود. لازم به ذکر است که پایستگی انرژی به شرط $\omega_{12} = 2\omega$ منجر می شود. دو قطبی الکتریکی های القا شده در کوانتوم دات و نانوذرات باعث ایجاد میدان های الکتریکی در اطراف آنها می شوند که برهم کنش بین آنها از نوع برهم کنش دو قطبی - دو قطبی 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]:

$$E_{ddi}^{qd} = \frac{S_\alpha P_{qd}}{4\pi\epsilon_h\epsilon_{eff}R_1^3},$$

$$E_{\gamma ddi}^{qd} = \frac{S_\alpha P_{qd}}{4\pi\epsilon_h\epsilon_{eff}R_1^3}, \quad (1)$$

$$E_{ddi}^{mnp(\gamma)} = \frac{S_\alpha P_{mnp(\gamma)}}{4\pi\epsilon_h\epsilon_{eff}R_{(\gamma)}^3}.$$

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

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

هیبریدی مذکور تونل زنی مستقیم بین MNP و SQD وجود ندارد. با این حال، به خاطر اندرکنش کولنی دور برد، برهم کنش دو قطبی-دو قطبی (DDI) 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 طوری که در برهم کنش با نور نقطه کوانتومی رفتار کوانتومی و نانوذره فلزی رفتار کلاسیکی را به نمایش می گذارد. علاوه بر این در برهم کنش تابش، میدان فرودی با شدت بالا با این سامانه هیبریدی متشکل از نانوذره پلاسمونیک و نقطه کوانتومی منجر به ظهور پدیده های اپتیکی غیر خطی مانند تولید همافنگ دوم (SHG) ^۱، تولید جمع بسامدی (SFG) ^۲، تولید تفاضل بسامدی (DFG) ^۳، تولید همافنگ سوم (THG) ^۴، جذب دو فوتونی (TPA) ^۵ و غیره است [۹-۱۲]. به عنوان مثال، فرایند تولید همافنگ 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 سیگنال تابش شده بایستی اثر پارامترهای سامانه 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 سامانه مطابق شکل ۱ در نظر می گیریم که از سه ذره تشکیل شده است. سامانه مورد نظر ما متشکل از دو نانو ذره فلزی بیضوی با اندازه های مختلف است. در طرفین آنها کوانتوم دات با فاصله های مختلف R_1 و R_2 قرار گرفته است. مجموعه

۱. Dipole-dipole interaction (DDI)

۲. Second Harmonic Generation

۳. Sum Frequency Generation

۴. Difference frequency Generation

۵. Third Harmonic Generation

۶. Two Photon Absorption

۷. Optical bistability

دو محور یکسان نسبت به محور سوم کمتر باشد نانو ذره کشیده و اگر بزرگتر باشد نانو ذره پهن شده است. میدان‌های الکتریکی مؤثر 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 نانوذره دیگر است. میدان‌های الکتریکی مذکور منجر به ایجاد قطبش در نانو ذره می‌شوند که رابطه آن تحت تقریب شبه ایستا به صورت زیر است [۱۱]:

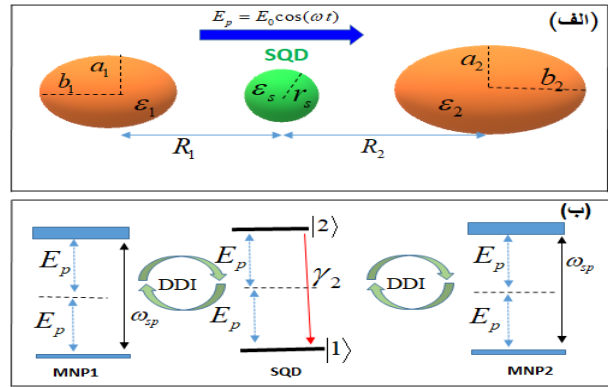
$$p_{mnp(j)} = [\chi_j^{(1)}(E_{ddi}^{qd} + E_{shg}^{qd}) + \chi_j^{(2)} E_p^\tau] e^{-i\omega t}, \quad (j=1,2) \quad (3)$$

اشاره به نانوذرات با حجم $V_{(j)}$ دارد و $\chi_{(j)}^{(1)}$ و $\chi_{(j)}^{(2)}$ به ترتیب پذیرفتاری مرتبه اول و دوم هستند و از رابطه زیر به دست می‌آیند:

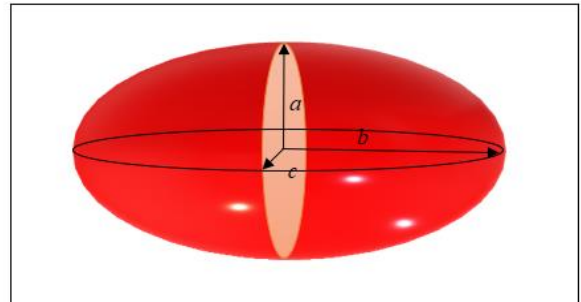
$$\chi_{(j)}^{(1)} = V_{(j)} \frac{\epsilon_{env}(\epsilon_j(\omega) - \epsilon_{env})}{\epsilon_{env} + \xi_{a_j, b_j}(\epsilon_j(\omega) - \epsilon_{env})}. \quad (4)$$

که بیانگر آن است که مقدار پذیرفتاری مرتبه اول متناسب با تابع دی‌الکتریک وابسته به بسامد نانوذرات است، و برای محاسبه آن از مدل درود استفاده می‌شود. به علاوه $\chi_{(j)}^{(2)} \propto (\chi_{(j)}^{(1)}(\omega))^2 \chi_{(j)}^{(1)}(2\omega)$ پذیرفتاری مرتبه دوم است که با مقدار پذیرفتاری مرتبه اول متناسب است. در رابطه مربوط به پذیرفتاری خطی مرتبه اول کمیت عامل شکل $(\xi_{a,b})$ دیده می‌شود. این کمیت وابسته به ویژگی‌های هندسی نانوذره است که در ادامه توضیح داده می‌شود. ریخت‌شناسی نانوذره پلاسمونیک در نظر گرفته شده در این مقاله در شکل ۲ توضیح داده شده است.

مطابق شکل ۲، نانو ذره بیضی گون سه محور اصلی a ، b و c دارد 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 بیضوی 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 یک است که در این حالت عامل شکل به صورت تعریف می‌شود [۱۴ و ۱۵]:



شکل ۱. (الف) طرح سامانه هیبریدی مورد مطالعه شامل کوانتوم دات که بین دو نانوذره بیضوی قرار دارد و تحت تأثیر میدان الکتریکی کاوشگر (پروپ) قرار دارد. (ب) ترازهای انرژی کوانتوم دات و نانوذرات که برهم کنش دو قطبی - دو قطبی باهم دارند.



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

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

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

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

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

r_s شعاع کوانتوم دات و $a_{(j)}$ و $b_{(j)}$ طول محوره‌های نانوذرات بیضوی است. توجه داشته باشید که هر نانو ذره بیضوی در این پروژه دو محور یکسان دارد که نسبت به محور سوم می‌تواند اندازه کمتر یا بیشتری داشته باشد. چنانچه طول

اول $\Omega_{rp} = k_{ln} E_p^\dagger / \sqrt{2} \hbar \epsilon_{eff}^\dagger$ بسامد رابی دو فوتونی ناشی از جذب مستقیم دو فوتون از میدان کاوشگر توسط کوانتوم دات است. جمله دوم $\Omega_{sh} = \Omega_{sh}^{mnp_1} + \Omega_{sh}^{mnp_2}$ بسامد رابی ناشی از تأثیر میدان‌های هارمونیک دوم نانوذرات بر روی کوانتوم دات است. سومین جمله $\Omega_{ddi} = \Lambda_{ddi}^{rp} + \Lambda_{ddi}^{dp} + \Lambda_{ddi}^{sh}$ بسامد رابی ناشی از برهمکنش کوانتوم دات با میدان حاصل از دو قطبی‌های نانوذرات است که این دو قطبی‌ها خود از سه میدان کاوشگر، میدان هارمونیک دوم و میدان دو قطبی‌های کوانتوم دات تأثیر می‌پذیرد. از دو قسمت آخر می‌توان به عنوان جملات خود برهمکنشی نام برد [۱۷]. با حل معادلات (۷) در شرایط پایا $\rho_{11} = -i\Lambda_{12} / d_{11}$ به دست می‌آید که $d_{11} = \gamma_r / 2 - i\delta_{r1} - i\Delta_s$ و $\Lambda_{12} = \Omega_{rp} + \Omega_{sh} + \Omega_{ddi}$ است [۱۵ و ۱۸].

۳. نتایج عددی و بحث

در این بخش نتایج عددی مربوط به شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات در سامانه نا متقارن MNP-SQD-را مورد بحث قرار گرفته و نشان داده می‌شود که چگونه ویژگی‌های هندسی نانوذرات و جهت قطبش میدان فرودی اثر قوی روی شدت هارمونیک دوم دارد. فرض می‌شود که نانو ذره‌ها از جنس نقره است و ثابت دی‌الکتریک کوانتوم دات و دی‌الکتریک سیلیکا را به ترتیب ۶/۲۵ و ۲/۲۵ در نظر می‌گیریم. همچنین شعاع کوانتوم دات ۳ نانومتر است. در نانو ذره کشیده $r=2$ و در نانو ذره پخت (پهن شده) $r=0.5$ اختیار شده است. همچنین نرخ واهلش $\gamma_r = 1 \mu eV$ و شدت میدان فرودی $I = 1 \text{ W/cm}^2$ است.

به علاوه اندازه نانو ذره‌ها در حالت کشیده و پهن شده به ترتیب عبارت است از:

$$a_1 = 5 \text{ nm}, b_1 = 10 \text{ nm}, a_2 = 6 \text{ nm}, b_2 = 12 \text{ nm}$$

$$a_1 = 10 \text{ nm}, b_1 = 5 \text{ nm}, a_2 = 12 \text{ nm}, b_2 = 6 \text{ nm}$$

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

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

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

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

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

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

که $f = \frac{1}{r^2} - 1$ است. با توجه به جهت میدان اعمال شده و شکل نانو ذره می‌توان عبارت مناسب را برای عامل 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_{11} از عناصر ماتریس چگالی وابسته است که باید آن را محاسبه کرد. برای محاسبه عنصر ρ_{11} ، معادلات حرکت عناصر ماتریس چگالی را تحت تقریب پایا و با اعمال فرض اولیه $\rho_{11} + \rho_{22} = 1$ حل می‌کنیم [۱۶]. بنابراین، با استفاده از معادله حرکت، معادلات ماتریس چگالی دو فوتونی سامانه دوترازه عبارتند از:

$$\dot{\rho}_{11} = i\Lambda_{12}\rho_{22} - i\Lambda_{12}^*\rho_{11} + \gamma_r\rho_{22}, \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_{22} = i\Lambda_{12}^*\rho_{11} - i\Lambda_{12}\rho_{22} - \gamma_r\rho_{22},$$

$$\dot{\rho}_{12} = i\Lambda_{12}(\rho_{22} - \rho_{11}) + i\Delta\rho_{11} - i\Delta_s\rho_{11} - \frac{1}{2}\gamma_r\rho_{11},$$

که $\Delta_s = 2\omega_s |\Omega_{r1}| / \gamma_r$ است. در این رابطه، ω_s بسامد استارک است. γ_r نرخ واهلش از تراز $|2\rangle$ به تراز $|1\rangle$ و Ω_{r1} بسامد رابی^۱ است. همچنین $\Delta = 2\omega - \omega_{r1}$ ، پارامتر نامیزانی بین گذار اتمی و بسامد میدان کاوشگر در جذب دو فوتونی است. علاوه بر این، $\Lambda_{12} = \Omega_{rp} + \Omega_{sh} + \Omega_{ddi}$ است. جمله

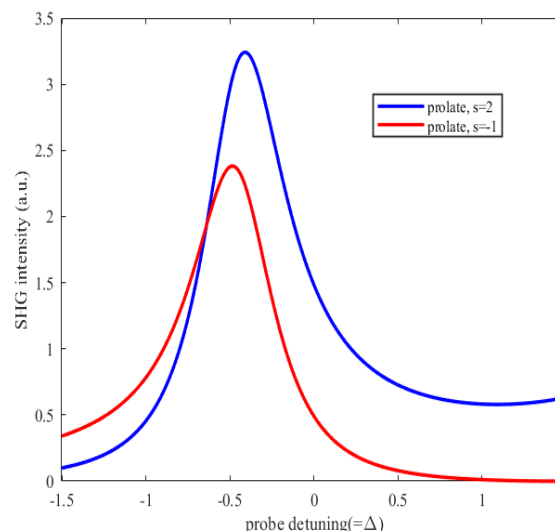
^۱ Rabi Frequency

عمود بر محور اصلی می‌تابد شدت هارمونیک تولید شده ضعیف‌تر می‌شود. میدان‌های مؤثر بر کوانتوم دات حاصل برنهی میان میدان کاوشگر خارجی و میدان‌های القایی داخلی ناشی از برهمکنش‌ها است. با توجه به شکل ۳ مشخص می‌شود که اگر جهت قطبش میدان فرودی عمود بر محور اصلی سامانه باشد شدت هارمونیک تولید شده کاهش یافته و قله تشدید به سمت بسامدهای کوتاه‌تر میل می‌کند. در نتیجه تداخل بین میدان‌های اعمال شده بر کوانتوم دات ویرانگر است. در حالی که اگر قطبش میدان فرودی موازی با محور اصلی سامانه باشد، شدت سیگنال تولید شده افزایش می‌یابد.

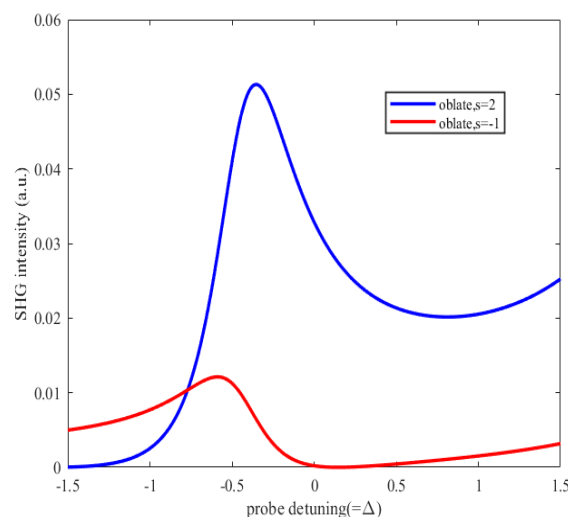
در شکل ۴، هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات در دو حالت قطبش میدان فرودی موازی و عمود بر محور اصلی باشد در شرایطی که نانو ذره‌ها پخت باشند در نظر گرفته شده است. همانطور که در این مورد نیز دیده می‌شود وقتی که قطبش میدان فرودی موازی با محور اصلی سامانه باشد شدت هارمونیک دوم بیشتر است.

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 شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که وقتی نانو ذره 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 کوانتوم دات بین دو نانو ذره فلزی کشیده بیضوی قرار داده می‌شود نانو ذره‌های کشیده نسبت به حالتی که دو نانو ذره 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].

برای درک بهتر رفتار سامانه هنگامی که شکل هندسی نانو ذرات تغییر می‌کند برای درک بهتر رفتار سامانه در شکل ۶ عامل شکل برای نانو ذرات کشیده و پخت (پهن شده) برحسب مقدار مربوط به نسبت محورها رسم شده است. با توجه به اندازه‌ای که برای ابعاد نانو ذره‌ها در دو حالت کشیده و پخت اختیار کرده‌ایم نسبت محورها برای نانو ذره کشیده ۵/۰ و برای نانو



شکل ۳. شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات دوترازه وقتی نانو ذره‌ها کشیده هستند، در دو حالت میدان فرودی موازی محور اصلی سامانه (نمودار آبی) و میدان فرودی عمود بر محور اصلی سامانه (نمودار قرمز).



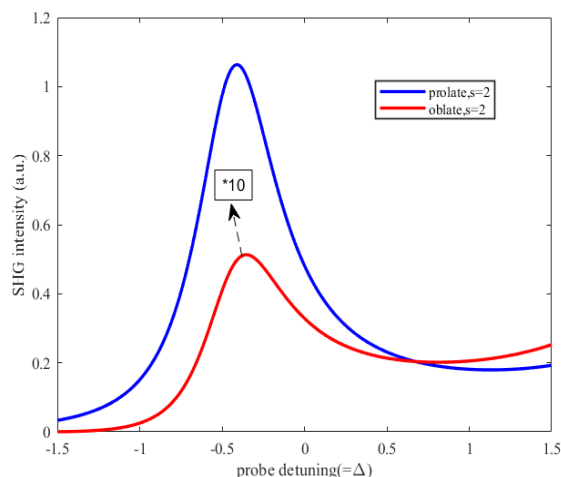
شکل ۴. شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات دوترازه وقتی دو نانو ذره فلزی پخت هستند در دو حالت میدان فرودی موازی محور اصلی سامانه (نمودار آبی) و میدان فرودی عمود بر محور اصلی سامانه است.

در شکل ۳، نمودار تغییرات شدت هارمونیک دوم ناشی از کوانتوم دات به صورت تابعی از پارامتر نامیزانی برای نانو ذره کشیده در حالتی که میدان فرودی موازی با محور اصلی سامانه ($s_{\alpha} = 2$) است به رنگ آبی و در حالتی که عمود بر محور اصلی سامانه ($s_{\alpha} = -1$) است با رنگ قرمز رسم شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند در شرایطی که میدان به صورت

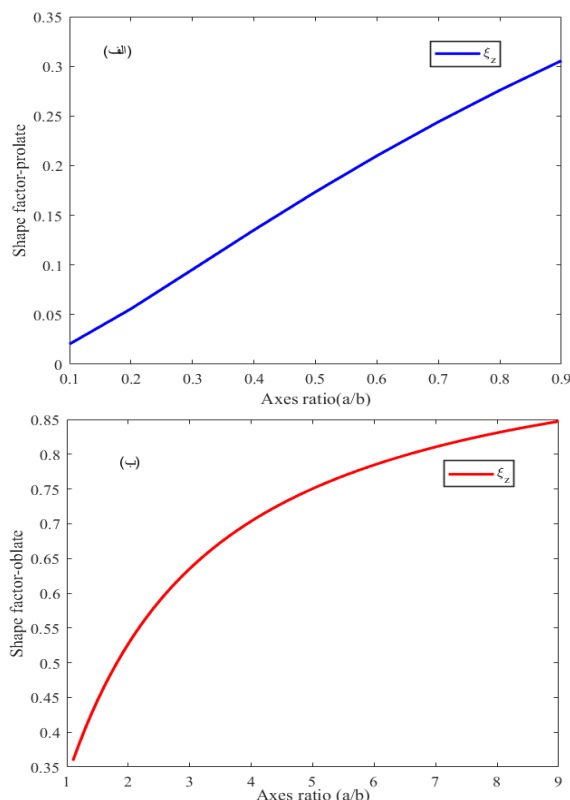
ذره پخت ۲ است. همانطور که مشخص است عامل شکل در نانو ذره کشیده برای این نسبت محورها بین ۰/۱ تا ۰/۲ است. در حالی که این مقدار برای نانو ذره پخت از ۰.۵ تجاوز می کند. بنابراین می توان دریافت که مقدار پارامتر شکل برای نانو ذره کشیده نسبت به عامل شکل نانو ذره پخت (پهن شده) کمتر است که منجر به ایجاد قطبش پذیری قوی تر می شود. این بدین معنی است که نانو ذره کشیده منجر به ایجاد میدان الکتریکی قوی تری شده که افزایش شدت هارمونیک دوم را در پی دارد.

۴. نتیجه گیری

با محاسبه شدت هارمونیک دوم تولید شده توسط کوانتوم دات در سامانه هیبریدی نانو ذره-کوانتوم دات-نانو ذره می توان نتیجه گرفت که در یک سامانه هیبریدی متشکل از دونانو ذره فلزی جفت شده با یک کوانتم دات نیم رسانا، وقتی میدان اعمال شده بر سامانه با محور اصلی آن موازی باشد، تداخل بین میدان خارجی و میدان های القایی داخلی از نوع سازنده و اگر عمود باشد از نوع ویرانگر است. همین سازنده یا ویرانگر بودن تداخلها منجر به تقویت و تضعیف شدت میدان هارمونیک دوم گسیل شده از کوانتوم دات می شود. علاوه بر این، هنگامی که جهت قطبش نور تابشی موازی با محور سامانه باشد، شدت هارمونیک دوم افزایش می یابد و یک جابه جایی در طیف مشاهده می شود. علاوه بر این، شکل نانو ذرات پارامتر مهم دیگری است که شدت سیگنال هارمونیک دوم حساس به آن است. نتایج حاصل از این کار می تواند در طراحی افزاره های 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 ذره ها پخت هستند (نمودار قرمز) و میدان اعمال شده را راستای محور سامانه است.



شکل ۶. مقدار عامل شکل برای اندازه های مختلف محورها در (الف) نانو ذره پخت (پهن شده) و (ب) نانو ذره کشیده.

مراجع

1. M Sin and C Racknor, *JOSA B* **32** (2015) 10.
2. W Yang, A Chen, Z Huang, and R Lee, *Optical Society of America*, **23** (2015) 10.
3. J Yan, W Zhang, S Duan, X Zhao, and A Gorov, *Physical review B* **77** (2008) 165301.
4. Y He, J Li, and K Zhu, *J. Opt. Soc. Am. B* **29** (2012) 5.

5. R Artuso and G Bryant, *Acta. Phys. Pol. A*, **122**, 2 (2012) 289.
6. M Anton, F Carreno, S Melle, O Calderon, and E Cabrera, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 155305.
7. H Akram, M Abdullah, and A H Al-khursan, *Sci. Rep.* **12** (2022) 21495.
8. T Nakanishi, K Sugiyama and M Kitano, *Phys. Rev. A* **67** (2003) 043809.
9. J Gondar, R Cipelatti, and G Marques, *Braz. J. Phys.*, **36**, 3B (2006) 968.
10. M Singh, *Nanotechnology* **24** (2013) 125701.
11. R Boyd, "Nonlinear Optics", New York, USA (2008).
12. P Meystre and M Sargent III, "Element of Quantum Optics" Springer (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.* **1** (2013) 460.
18. M Rashidi and N Daneshfar, *Eur. Phys. J. Plus.* **138** (2023) 765.
19. C Hubert, L Billot, P -M Adam, R Bachelot, P Royer, J Grand, D Gindre, K D Dorkenoo, and A Fort, *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 181105.