بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

افزایش بهره بدون وارونی جمعیت در سیستم های ترکیبی

زهرا طاهری، سیده حمیده کاظمی و محمد محمودی

گروه فیزیک دانشگاه زنجان، صندوق پستی ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، زنجان

چکیده – در این مقاله، اثرات نوری در یک سیستم ترکیبی پیچیده‌ی متشکل از یک نقطه‌ی کوانتومی نیمه هادی و یک نانو فلز که با یک میدان ضعیف برهم‌کنش دارد، بررسی می‌شود. از معادلات ماتریس چگالی غیرخطی برای توصیف خواص نوری نقطه‌ی کوانتومی، نانو فلز و کل سیستم استفاده شده است. سپس، وابستگی پذیرفتاری های این اجزا به فاصله‌ی بین ذره‌ایِ نقطه کوانتوم و نانو فلز بررسی شده است. نشان داده می‌شود که در طیف وسیعی از فرکانس‌ها، پذیرفتاری نقطه کوانتومی منجر به بهره بدون وارونگی شده و محاسبه شده است این پذیرفتاری به شدت به حضور نانو فلز بستگی دارد.

کلید واژه- پذیرفتاری خطی، سیستم دو ترازی، نانو فلز، نقطه کوانتوم.

Enhancement of gain without inversion in hybrid systems

Zahra Taheri, Seyedeh Hamideh Kazemi and Mohammad Mahmoudi

Department of Physics, University of Zanjan, University Blvd, 45371-38791, Zanjan, Iran

Abstract- In this paper, optical effects of a hybrid complex system consisting of a semiconductor quantum dot and a metal nanoparticle interacting with a weak field is investigated. Nonlinear density matrix equations are used in order to describe optical properties of the quantum dot, the nanoparticle, and the entire system. Then, dependency of the susceptibilities of these component on the interparticle distance between the quantum dot and the nanoparticle is studied. It is demonstrated that for a wide range of frequencies, susceptibility of the quantum dot leads to gain without inversion and is calculated that the susceptibility is severely dependent on presence of the metal nanoparticle.

Keywords: Linear Susceptibility, Two-Level System, Metal Nanoparticle, Quantum Dot.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

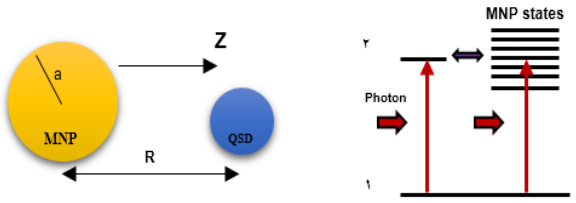
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، ویژگی‌های اپتیکی نانو سیستم‌های متشکل از یک نیمه رسانای نقطه کوانتومی (SQD) جفت شده با یک نانو فلز کروی (MNP) که از طریق پیوند کولنی با یکدیگر تعامل دارند، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۱]. قرار دادن نقطه‌ی کوانتومی در کنار یک نانو فلز، منجر به تغییر میدان الکترومغناطیسی این سیستم کوانتومی شده که این تغییر از طریق بر هم‌کنش بین اکسیتون‌ها از نقاط کوانتومی [۳،۲] و پلاسمون‌های سطحی از نانو فلزات حاصل می‌شود. قرار گرفتن نقطه‌ی کوانتومی و نانو فلز کنار هم، منجر به چندین پدیده‌ی جالب شده است؛ برای مثال: متارزونانس پلاسمونی [۴]، دو پایایی نوری [۵]، پاسخ نوری غیر خطی [۶]، بهره بدون وارونگی [۷] و پذیرفتاری نوری [۸]. شایان ذکر است که همه‌ی این پدیده‌ها، تحت برهم‌کنش با یک میدان کاوشگر مطالعه شده‌اند. در این مقاله، خواص اپتیکی این سیستم ترکیبی را بررسی کرده و نشان خواهیم داد که پذیرفتاری نانو فلز و نیمه هادی نقطه کوانتومی، به شدت تحت تاثیر یکدیگر بوده و پذیرفتاری کل سیستم نیز تحت تاثیر فاصله‌ی بین این دو ذره است.

۲-مدل‌ها و معادلات

یک ساختار ترکیبی متشکل از یک MNP (در این‌جا طلا) با شعاع a و یک SQD کروی در نظر گرفته شده‌است که در محیط آب با ثابت دی الکتریک ε_{env} قرار گرفته‌است. فاصله‌ی مرکز تا مرکز بین دو ذره R فرض شده که $R >> a$ و همچنین شعاع نقطه کوانتومی بسیار کوچک‌تر از شعاع نانو فلز است (شکل ۱). SQD یک سیستم دو ترازی بوده که تراز $|1\rangle$ حالت پایه و تراز $|2\rangle$ حالت برانگیخته را نشان می دهد و اختلاف انرژی بین دو تراز $\hbar\omega_0$ است. برهم‌کنش بین SQDو MNP، از طریق گشتاور دو قطبی الکتریکی بزرگ SQD و تشدید پلاسمون‌های MNP صورت می‌گیرد. در این‌جا، میدان جفت کننده در راستای محور Z قطبیده شده است. تابع دی الکتریک مختلط MNP، $\varepsilon_m(\omega)$، که وابسته به فرکانس است، به صورت مجموع سهم‌های الکترون آزاد و گذارهای بین باندی (الکترون‌های مقید) بیان می‌شود [۹].



شکل ۱: سیستم ترکیبی نقطه‌ی کوانتومی و نانو فلز

در تقریب موج چرخان، میدان به صورت

$$E_{ext} = E_0 e^{-i\omega t}, \quad (۱)$$

و معادله‌ی حرکت سیستم به صورت

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar}[H,\rho] - \frac{1}{2}(\Gamma\rho + \rho\Gamma), \quad (۲)$$

در می‌آید. فرم صحیح میدان در حضور نانو فلز به شکل زیر است [۱۰]:

$$\text{ک } E_{SQD} = \frac{\hbar}{\mu_{12}}[(\Omega + G\sigma)\ e^{-i\omega t} + (\Omega^* + G^*\sigma^*)\ e^{i\omega t}], \quad (۳)$$

$$\text{ه } \sigma = \rho_{21}e^{-i\omega t}, \sigma^* = \rho_{12}e^{i\omega t} \text{ و}$$

$$\Omega = \frac{E_0\mu_{12}}{2\hbar\varepsilon_{eff1}}(1 + \frac{S_\alpha\gamma_1 a^3}{R^3}),$$

$$G = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{4\pi\varepsilon_{env}} \frac{(n+1)^2\gamma_n{\mu_{12}}^2}{\hbar\varepsilon_{eff1}} \frac{a^{2n+1}}{R^{2n+4}}, \quad (۴)$$

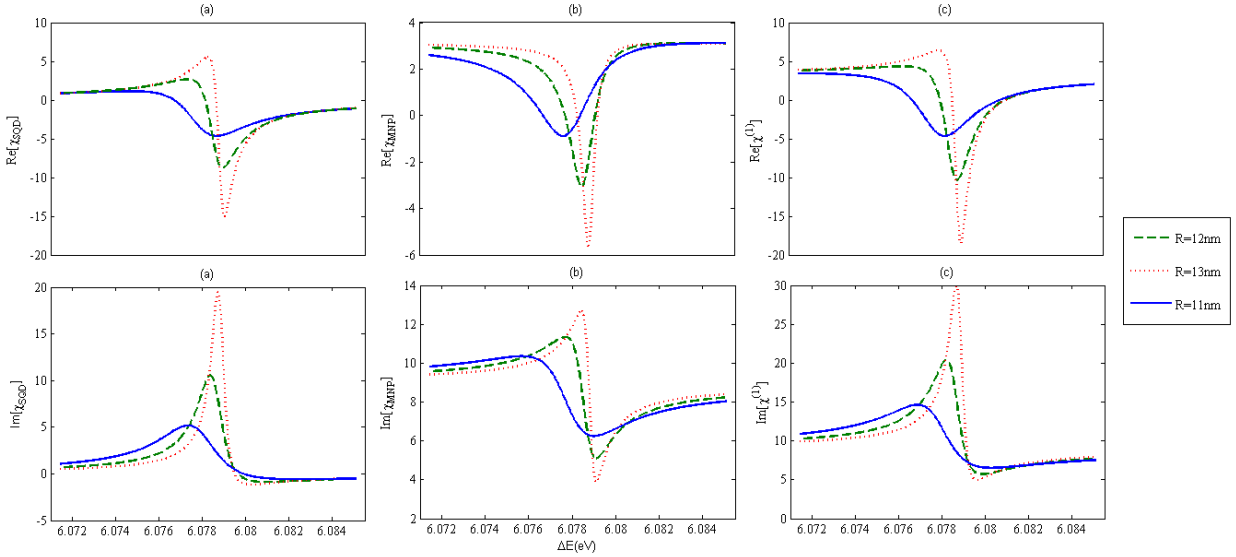
در این‌جا $N=10$ و E_{SQD} از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{SQD} = \frac{E_0}{2\varepsilon_{eff1}} + \frac{E_0}{2\varepsilon_{eff1}} \frac{S_\alpha\gamma_1 P_{SQD} a^3}{R^3} + \frac{(n+1)^2\gamma_n P_{MNP}}{\varepsilon_{eff1}} \frac{a^{2n+1}}{R^{2n+4}}. \quad (۵)$$

جمله‌ی اول رابطه‌ی بالا نقش مستقیم میدان خارجی را نشان داده، جمله‌ی دوم آن، نشان دهنده‌ی میدان تولیدی توسط پلاسمون‌ها است که به طور مستقیم توسط میدان تولید شده و جمله‌ی سوم، سهم غیر مستقیم SQD است که با پلاسمون‌ها برهم‌کنش دو قطبی دارد و با رابطه‌ی مقابل $P_{SQD} = \mu_{12}\rho_{21}$ توصیف می شود. هم‌چنین تابع دی الکتریک نانو فلز، $\gamma_n = (\varepsilon_m(\omega) - \varepsilon_{env})/(\varepsilon_m(\omega) + (n+1/n)\varepsilon_{env})$ بوده و ثابت دی الکتریک موثر به صورت $\varepsilon_{eff1} = (2\varepsilon_{env} + \varepsilon_s)/3\varepsilon_{env}$ تعریف می‌شود.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]



شکل ۲ : طیف پذیرفتاری SQD (a)، پذیرفتاری MNP (b)، و پذیرفتاری کل سیستم (c) برحسب نامیزانی میدان اعمال شده. پارامترهای این سیستم عبارتند از: $\Gamma/V=5\times10^{23}m^{-3}$, $a=7.5nm$, $\mu_{12}=0.65enm$, $\hbar\omega_0=2.5eV$, $\varepsilon_{env}=1.8\varepsilon_0$, $\varepsilon_s=6\varepsilon_0$, $T_1=0.8ns$ و $T_2=0.3ns$.

در ادامه، معادلات ماتریس چگالی سیستم تحت تقریب موج چرخان به صورت زیر در می آید:

$$\dot{\sigma}(t)=-\frac{1}{T_2}\sigma(t)+i\Omega\Delta(t)+iG\Delta(t)\sigma(t)+i\delta\sigma(t),$$

که $\dot{\Delta}(t)=2i\Omega^*\sigma(t)-2i\Omega\sigma^*(t)+4G_I\sigma(t)\sigma^*(t)$

$$-\frac{\Delta(t)-1}{T_1}. \qquad (۶)$$

در معادلات بالا، کمیت $\Delta(t)=\sigma_{22}-\sigma_{11}$ که عددی حقیقی است، اختلاف جمعیت بین دو تراز ۱ و ۲ را نشان داده و $\delta=\omega-\omega_0$، نامیزانی میدان اعمال شده از تشدید است، علاوه بر این، T_1 زمان واهلش جمعیت و T_2 واهلش ناشی از فرآیند وافازی SQD است.

در نهایت، با حل معادلات ماتریس چگالی در حالت پایا به روابط تحلیلی زیر برای پذیرفتاری خطی SQD و MNP خواهیم رسید

$$\chi_{SQD}=-\frac{\Gamma}{V}\frac{{\mu_{12}}^2\kappa T_2}{\hbar\varepsilon_0}\times\frac{T_2(\delta+G_R)-i(1+T_2G_I)}{[(1+T_2G_I)^2+T_2^2(\delta+G_R)^2]},$$

$$\chi_{MNP}=3\gamma_1[\frac{\varepsilon_{env}}{\varepsilon_0}-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{eff1}}\frac{S_\alpha\mu_{12}^2\kappa T_2}{\hbar R^3}$$

$$\times\frac{T_2(\delta+G_R)-i(1+T_2G_I)}{[(1+T_2G_I)^2+T_2^2(\delta+G_R)^2]}]. \qquad (۷)$$

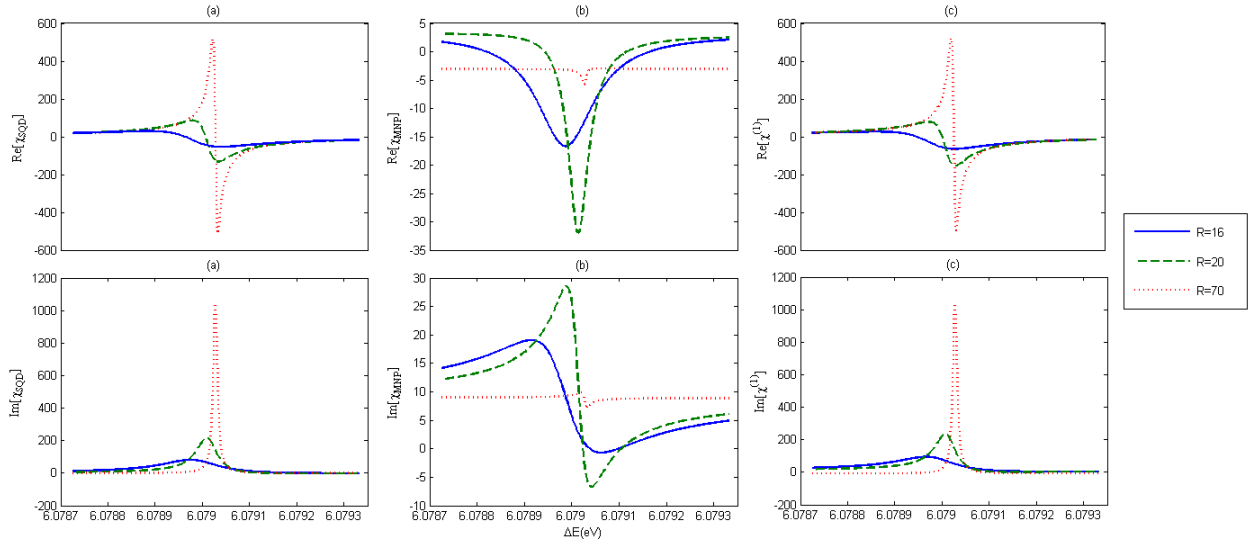
پر واضح است که پذیرفتاری کل سیستم ترکیبی به صورت $\chi=\chi_{SQD}+\chi_{MNP}$ خواهد بود.

۳- پذیرفتاری‌های نانو فلز، نقطه کوانتومی و سیستم ترکیبی

در شکل‌های ۲ و ۳، پذیرفتاری خطی SQD، MNP و کل سیستم در فاصله‌های مختلف مرکز تا مرکز MNP-SQD و بر حسب تابعی از نامیزانی [$\Delta E=\hbar\delta=\hbar(\omega-\omega_0)$] از میدان ضعیف، بررسی شده‌اند. در شکل ۲، پذیرفتاری در فاصله‌های کوچک R بررسی شده، در حالی که شکل ۳ این کمیت را برای فاصله‌های دورتر به تصویر می‌کشد. برای بخش حقیقی پذیرفتاری ($\mathrm{Re}[\chi_{SQD}]$)، توجه داشته باشید که موقعیت تشدید با افزایش فاصله R به طرف نامیزانی بیشتر می‌رود. قابل توجه‌ترین نکته‌ی این نمودارها، درنمودار مربوط به ضریب جذب ($\mathrm{Im}[\chi_{SQD}]$) است که در محدوده‌ی خاصی از نامیزانی (سمت راست)، پیک جذب منفی می‌شود. این مقدار منفیِ بخش موهومی ($\mathrm{Im}[\chi_{SQD}]$) نشان می‌دهد در ناحیه‌ای از فرکانس‌ها بهره وجود دارد که منشاء آن به برهم‌کنش منسجم بین SQD و پلاسمون‌های سطحی MNP ، و انتقال انرژی بین MNP و SQD ناشی از این برهم‌کنش برمی گردد. همان طور که از شکل ۳ بر می‌آید، پیک جذب در فاصله‌های دور عملا از بین می‌رود. برای فهمیدن فعل و انفعالات بین اکسیتون‌ها در SQD و پلاسمون‌های MNP،

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]



شکل ۳: طیف پذیرفتاری SQD (a)، پذیرفتاری MNP (b) و پذیرفتاری کل سیستم (c) برحسب نامیزانی میدان اعمال شده و برای فواصل دورتر. سایر پارامترهای این سیستم مشابه پارامترهای شکل ۲ است.

به قسمت (b) شکل‌های ۲ و ۳ توجه می‌کنیم که در شکل ۳(b)، برای فاصله‌ی $R = 20nm$ بخش موهومی در ناحیه‌ای از نامیزانی، منفی می‌شود. با این حال حتی با وجود منفی شدن قسمتی از $\mathrm{Im}[\chi_{SQD}]$ و $\mathrm{Im}[\chi_{MNP}]$، بخش موهومی پذیرفتاری کل سیستم $\mathrm{Im}[\chi^{(1)}]$ همیشه مثبت است که ناشی از نگه‌داری انرژی سیستم است.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، خواص اپتیکی یک سیستم ترکیبی متشکل از یک نقطه‌ی کوانتومی و یک نانو فلز کروی بررسی شده است که با یک میدان الکترومغناطیسی برهم‌کنش می‌کند. همان طور که انتظار می‌رفت فاصله ی بین ذره‌ای نقش مهمی در تعیین این خواص دارد به طوری که پذیرفتاری خطیِ SQD منجر به یک طیف جذبی غیرلورنتسی می‌شود. علاوه بر آن، طیف جذبیِ SQD برای ناحیه‌ای از فرکانس‌ها صفر بوده و در عین حال برای فرکانس‌های خاصی، بهره بدون وارونگی جمعیت مشاهده شده است. لازم به توضیح است که برای این سیستم، حتی برای حالتی که پذیرفتاری های SQD و MNP منفی باشد، بخش موهومی پذیرفتاری کل همیشه مثبت است.

مراجع

[1] W. Zhang, A. O. Govorov and G. W Bryant, Semiconductor-metal nanoparticle molecules: Hybrid excitons and the nonlinear Fano effect, Phys. Rev. Lett. 97, 14, 2006.

[2] S. M. Sadeghi. The inhibition of optical excitations and enhancement of Rabi flopping in hybrid quantum dot–metallic nanoparticle systems, Nanotechnology 20.22, 2009.

[۳] محمودی، محمد، *فراتر از سرعت نور*، انتشارات دانشگاه زنجان، ۱۳۹۵.

[4] S. M. Sadeghi, Plasmonic metaresonances: Molecular resonances in quantum dot–metallic nanoparticle conjugates, Phys. Rev. B 79.23, 2009.

[5] J.-B. Li et al., Optical bistability and nonlinearity of coherently coupled exciton-plasmon systems, Optics express 20.2, 1856-1861, 2012.

[6] A. F. Terzis et al., Nonlinear optical susceptibilities of semiconductor quantum dot–metal nanoparticle hybrids, J. Mod. Opt 63.5, 451-461, 2016.

[7] S. M. Sadeghi, Gain without inversion in hybrid quantum dot–metallic nanoparticle systems, Nanotechnology 2010.

[8] K. Dolgaleva, R. W. Boyd and J. E. Sipe, Cascaded nonlinearity caused by local-field effects in the two-level atom, Phys. Rev. A 76.6, 2007.

[9] E. Cottancin et al., Optical properties of noble metal clusters as a function of the size: comparison between experiments and a semi-quantal theory, Theor. Chem. Acc. 116.4-5, 2006.

[10] J. Y. Yan et al., Optical properties of coupled metal-semiconductor and metal-molecule nanocrystal complexes: Role of multipole effects, Phys. Rev. B 77.16, 2008.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]