تأثیر نانو ذره طلا روی جذب الکترواپتیکی نقطه کوانتومی چند پوسته

ناصر زمانی[۱]، علیرضا کشاورز[۲] و حمید نادگران[۱]

[۱] بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

[۲] گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - در این مقاله، جذب الکترو اپتیکی یک سیستم دوتایی شامل نانو ذره فلزی(طلا) و نقطه کوانتومی چند پوسته جفت شده به صورت عددی بررسی شده است. اثر نانو ذره فلزی نزدیک نقطه کوانتومی با درنظر گرفتن افزایش میدان موضعی محاسبه شده است. سپس تغییرات جذب الکترو اپتیکی سیستم دوتایی مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که حضور نانو ذره فلزی در نزدیکی نقطه کوانتومی اثرات غیرخطی را افزایش می دهد. همچنین با تغییر شعاع نانوذره فلزی تغییرات غیرخطی نوری گزارش شده است.

کلید واژه- جذب الکترواپتیکی، نانو ذره فلزی، نقطه کوانتومی چند پوسته.

Effect of gold nano particle on Electro absorption process of multi-layer quantum dot

Naser Zamani[1], Alireza Keshavarz[2], and Hamid Nadgaran[1]

[1] Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

[2] Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz 71555-313, Iran

Abstract- In this work, the electro-absorption (EA) process of hybrid structure consisting of metal nano particle (MNP) coupled to multi-layer spherical quantum dot (MSQD) is investigated numerically. The effect of MNP near MSQD is calculated by considering local field enhancement. Then the variation of EA process of hybrid system is studied. The results show that the presence of MNP in the vicinity of MSQD enhances the optical nonlinearity. Also, by changing the radius of MNP, the variations of optical nonlinearity are reported.

Keywords: Metal nano particle, Multi-layered spherical quantum dot, Electro-absorption process.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت **www.opsi.ir** قابل دسترسی باشد.

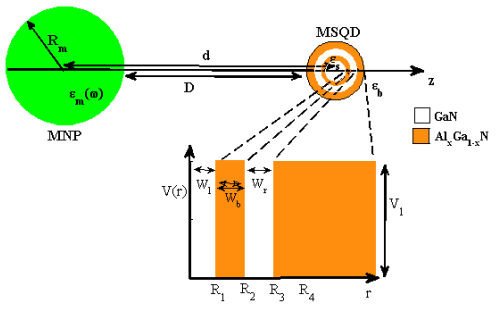
۱- مقدمه

نانو ساختارهای نیمرسانا مانند نقاط کوانتومی، سیم کوانتومی و چاه های کوانتومی به دلیل (i) تولید پاسخ غیرخطی بزرگ، (ii) رخداد گذارها با قدرت نوسانگری[۱] بالا و پهناب باندی باریک[۱] و (iii) کاربردشان در دستگاه های اپتوالکترونیکی، نقش مهمی در اپتیک غیرخطی دارند. بر این اساس، نقاط کوانتومی به دلیل خواص غیر خطی بالا و محدود کردن حامل ها در سه بعد بسیار مورد توجه قرار گرفته اند[۲]. در این زمینه مطالعه خواص نوری نقاط کوانتومی با اشکال هندسی مخلف مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است.

در سال های اخیر، برهمکنش بین نقاط کوانتومی و نانو ذرات فلزی، یکی از موضوعات مهم در مطالعه ساختارهای دوتایی[۲] می باشد[۳]. سیستم های دوتایی نقطه کوانتومی- نانو ذره فلزی برای اندازه گیری های شدت رنگی[۳] DNA مزدوج شده[۴]، سیستم های لیزری بدون کاواک[۵]، و غیره مورد استفاده قرار می گیرد. هدف این مقاله پیدا کردن تأثیر نانو ذره فلزی روی جذب الکترواپتیکی نقطه کوانتومی چند پوسته با تقریب جرم موثر و مبانی میدان موضعی[۴] می باشد.

۲- مبانی نظری

یک سیستم دوتایی شامل نانوذره فلزی در نزدیکی نقطه کوانوتمی چند پوسته را به صورت نشان داده شده در شکل ۱ در نظر می گیریم.



شکل ۱: نمایی از ساختاردوتایی نانوذره فلزی و نقطه کوانتومی

به منظور بدست آوردن توابع موج و ترازهای انرژی نیاز به حل معادله شرودینگر داریم. بنابراین در چارچوب تقریب جرم موثر، هامیلتونی سیستم به صورت زیر داده می شود[۷].

$$H = \frac{-\hbar^2}{2}\nabla_r\left(\frac{1}{m^*(r)}\nabla_r\right)+\frac{l(l+1)\hbar^2}{2m^*(r)r^2}+V(r) \qquad (۱)$$

که $\hbar = h/2\pi$، ثابت پلانک، $m^*(r)$ جرم موثر الکترون وابسته به مکان، r مکان شعاعی الکترون، l عدد کوانتومی تکانه زاویه ای، $V(r)$ پتانسیل محدود شده می باشد که در شکل ۱ نشان داده شده و به صورت زیر تعریف می گردد.

$$V(r)=\begin{cases}0, & 0\le r\le R_1\\ V_0, & R_1<r<R_2\\ 0, & R_2\le r\le R_3\\ V_0, & r>R_3\end{cases} \qquad (۲)$$

به دلیل پیچیدگی حل تحلیلی، ما با استفاده از روش رانگ کوتا مرتبه ۴، توابع موج و ویژه مقادیر انرژی نقطه کوانتومی چند پوسته را بدست می آوریم.

بعد از بدست آوردن مقادیر ویژه انرژی و توابع موج متناظر با آن، با استفاده از روش ماتریس چگالی پذیرفتاری مرتبه سوم را برای دو تراز انرژی پیدا می کنیم. فرض کنیم میدان الکتریکی اعمالی لیزر به صورت $E(t)=E_0\cos(\omega t)$ باشد که در آن E_0 دامنه میدان الکتریکی، و ω بسامد زاویه قطبش، بردار واحد ای میدان اعمالی باشند. فرض کنیم همه فاصله ها کوچک باشند تا اثرهای تأخیری نادیده گرفته شوند همچنین میدان اعمال شده بزرگ باشد تا نویز نیز در نظر گرفته نشود.

حضور نانوذره فلزی هنگام برهمکنش نور باعث تشدید میدان نوری شده و مانند یک دوقطبی عمل می کند بطوریکه پلاسمون سطحی جایگزیده ایجاد می شود. این تشدیدها به اندازه، شکل و محیط دی الکتریک ذره بسیار حساس هستند. همچنین اعمال میدان سبب ایجاد جفت شدگی بین این دو نانوذره می شود. برهمکنش کولنی دور برد باعث ایجاد یک برهمکنش دوقطبی- دوقطبی میان نقطه کوانتومی نیمرسانا و نانوذره فلزی می شود.

---

[۱] Oscillator Strengths
[۲] Hybrid Structures
[۳] Colorimetric Measurements
[۴] Local Theory

هامیلتونی سیستم در تقریب موج- چرخان[۱] را می توان به صورت زیر نوشت[۸]:

$$H = \hbar\omega_{12}a_2^{\dagger}a_2 - \mu E_{MSQD}(a_2^{\dagger}a_1 + a_1^{\dagger}a_2) \qquad (۳)$$

که a_i و $a_i^{\dagger}$ اپراتورهای خلق و فنا از $|i\rangle$ میباشند. μ عنصر ماتریس گذار، ω_{12} بسامد گذار وقتی که الکترون از حالت $|1\rangle$ به حالت $|2\rangle$ گذار انجام می دهد. E_{MSQD} میدان الکتریکی کل که توسط نقطه کوانتومی چند پوسته احساس می شود و شامل میدان اعمال شده و میدان خارجی القا شده، و میدان داخلی تولیدی توسط قطبش نانو ذره فلزی می باشد که به صورت زیر می باشد:

$$E_{MSQD} = \left(\frac{E_0}{\varepsilon_{eff}}\left(1+\frac{g\gamma R_m^3}{d^3}\right)\right) + \frac{s\gamma R_m^3}{2\varepsilon_b\varepsilon_{eff}d^6}P_{MSQD} = f_2 + f_3 \qquad (۴)$$

در اینجا $\gamma = \frac{\varepsilon_m(\omega)-\varepsilon_b}{\varepsilon_m(\omega)+2\varepsilon_b}$، $\varepsilon_{eff} = \frac{3\varepsilon_b}{\varepsilon_s+2\varepsilon_b}$ ثابت دی الکتریک موثر نقطه کوانتومی چند پوسته، $g,(s)=2,(4)$ برای قطبش میدان الکتریکی E_0 موازی با محور z و $g,(s)=-1,(1)$، برای قطبش میدان الکتزیکی عمود بر محور z می باشند. $P_{MSQD} = \mu(\rho_{21}+\rho_{21}^*)$ اشاره به قطبش نقطه کوانتومی چند پوسته متناظر با گذار از حالت $|1\rangle$ به حالت $|2\rangle$ می باشد که در آن ρ_{nm} عنصرهای ماتریس چگالی می باشند. در این تقریب و تقریب حالت پایا، با حل تابع اپتیکی بلاخ ما بدست می آوریم[۸]:

$$\rho_{22} = \frac{2T_1}{\hbar}Im(\mu E\rho_{21}),$$
$$\rho_{21} = \frac{-\Omega\Delta}{(\omega-\omega_{12}+G\Delta+i/T_{20})} \qquad (۵)$$

که

$$\Omega = \frac{\mu f_2}{\hbar},$$
$$G = \frac{s\gamma R_m^3\mu}{\int_b\int_{eff}^2 d^6\hbar} = G_R + iG_I \qquad (۶)$$

که G_R و G_I قسمت حقیقی و موهومی G می باشند. که به ترتیب نشان دهنده جابه جایی انرژی بین ترازها و آهنگ وافازی[۲] می باشند.

پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم برای یک سیستم نقطه کوانتومی دوحالته در حضور نانوذره فلزی با پارامتر $L^{(3)}$ که میدان موضعی می باشد به صورت زیر تغییر می کند $\chi^{(3)} = L^{(3)}\kappa^{(3)}(-2\omega_1+\omega_2;\omega_1,\omega_1,-\omega_2)$ که در آن :

$$\kappa^{(3)}(-2\omega_1+\omega_2;\omega_1,\omega_1,-\omega_2) = \frac{-2i\mu^4 N}{i\hbar(\omega_{12}'-2\omega_1+\omega_2)+\hbar\gamma_{12}'\Big]\Big[i\hbar(\omega_2-\omega_1)+\hbar\gamma_{12}'\Big]\left[\frac{1}{i\hbar(\omega_{12}'-\omega_1)+\hbar\gamma_{12}'}+\frac{1}{i\hbar(\omega_2-\omega_{12}')+\hbar\gamma_{12}'}\right]} \qquad (۷)$$

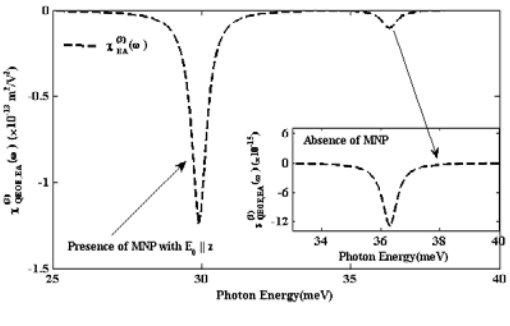
که N چگالی حامل ها می باشد. برای محاسبه جذب الکترواپتیکی ما باید در معادله (۷) $\omega_1 = 0$ و $\omega_2 = -\omega_1$ را جایگزین کنیم.

۳- نتایج عددی و بحث

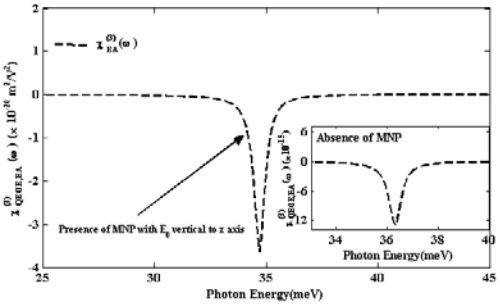
در این بخش تأثیر نزدیکی نانوذره فلزی روی تغییرات پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نقطه کوانتومی چند پوسته نشان داده شده است. پارامترهای مواد مورد استفاده در این مقاله به صورت زیر می باشند، $m^*_{Al_xGa_{1-x}N} = (0.252x+0.228)m_0$ ، $m^*_{GaN} = 0.228m_0$ ، $N = 1\times10^{24}\,m^{-3}$ که $T_{12} = 0.1ps$. $\gamma_{12} = 1/T_{12}$ نانو ذره فلزی مورد استفاده در اینجا طلا می باشد و $\varepsilon_m(\omega)$ ثابت الکتریک آن متناظر با بسامد اعمالی می باشد. اندازه نانو ذره طلا و فاصله بین نانو ذره طلا و نقطه کوانتومی چند پوسته برابر $R_m = 100\,\dot{A}, D = 15\,\dot{A}$ می باشند.

شکل های ۲ و ۳ جذب الکترواپتیکی $\chi^{(3)}_{EA}(\omega)$ نقطه کوانتومی چند پوسته را در نزدیکی نانو ذره فلزی برای دو حالت میدان الکتریکی موازی و عمود بر محور z بر حسب انرژی فوتون نشان می دهند. همانطور که از شکل ها مشاهده می شود با قرار دادن نانوذره در نزدیکی نقطه کوانتومی جذب الکترواپتیکی در انرژی های پایین تر رخ می دهد که ناشی از $\omega_{12}' = \omega_{12} - \Delta G_R$ که G_R در حضور نانوذره فلزی ایجاد می شود. برای حالتی که $E_0 \| z$ ، قله جذب افزایش می یابد و در حالتی که $E_0 \perp z$، قله جذب کاهش می یابد که ناشی از میدان موضعی می باشد که در حالت موازی افزایشی و در حالت عمود کاهشی می باشد.

[۱] Rotating Wave Approximation
[۲] Dephasing Rate



شکل ۲: $\chi^{(3)}_{EA}(\omega)$ به صورت تابعی از انرژی فوتون برای حضور و غیاب نانو ذره فلزی در حالتی که $E_0 \| z$.

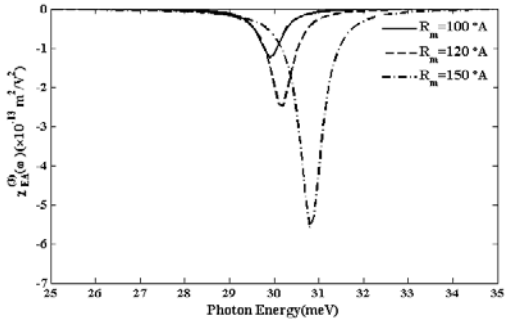


شکل ۳: : $\chi^{(3)}_{EA}(\omega)$ به صورت تابعی از انرژی فوتون برای حضور و غیاب نانو ذره فلزی در حالتی که $E_0 \perp z$.

چون هدف ما افزایش غیرخطی می باشد و از شکل های بالا مشاهده می شود که در حالتی که میدان الکتریکی موازی محور z باشد افزایش غیر خطی رخ می دهد. بنابراین برای شکل های زیر حالت $(E_0 \| z)$ را در نظر می گیریم. به منظور مشاهده تأثیر شعاع نانوذره فلزی بر روی تغییرات جذب الکترواپتیکی، جذب الکترواپتیکی را برحسب انرژی فوتون و شعاع نانوذره در شکل ۴ ترسیم نموده ایم. مشاهده می شود که جذب الکترواپتیکی با افزایش شعاع نانوذره طلا به تدریج افزایش می یابد. همچنین با افزایش شعاع قله جذب به سمت انرژی های بالاتر جابه جا می شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ما تأثیر نانو ذره فلزی را بر روی تغییرات غیر خطی نقطه کوانتومی چند پوسته مطالعه نمودیم. هدف اصلی این مقاله پیدا کردن تأثیر نانو ذره طلا بر روی جذب الکترواپتیکی بود . نتایج نشان می دهند که تأثیر میدان موضعی و برهم کنش های دوقطبی نقش مهمی بر روی تغییرات غیر خطی دارند. همچنین برای حالتی که میدان الکتریکی موازی با محور z باشد افزایش جذب الکترواپتیکی را داریم. نزدیکی نانو ذره طلا باعث می شود که قله جذب در انرژی های پایین تر رخ دهد. با افزایش شعاع نانوذره، جذب افزایش یافته و قله آن به سمت انرژی های بالاتر می رود.



شکل ۴: تغییرات $\chi^{(3)}_{EA}(\omega)$ به صورت تابعی از انرژی فوتون با تغییر شعاع نانو ذره طلا.

مراجع

[1] L. C. West, J. J. Eglash, “First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well”, Appl. Phys. Lett. Vol. 46, No. 12, pp. 1156-1158, 1985.

[2] L. Liu, L. Swierkowski, D. Neilson, J. Szymaiskim “Static and dynamic properties of coupled electron-electron and electron-hole layers” Phys. Rev. B. Vol. 53, No. 12, pp. 7923, 1986.

[3] S. M. Sadeghi, “Coherent control of metallic nanoparticlesnear fields: Nanopulse controllers and functional nanoamplifiers” Phys. Rev. B. Vol. 82, No. 3, pp. 035413, 2010.

[4] Y. Shan, H-Y. Chen and J-J. Xu. “Distance-dependent quenching and enhancing of electrochemiluminescence from a CdS: Mn nanocrystal film by Au nanoparticles for highly sensitive detection of DNA” Chem. Comm. Vol. 8, pp. 905-907, 2009.

[5] T. T. Chiu et. al“Compact microdisk cavity laser with type-II GaSb/GaAs quantum dots”, Appl. Phys. Lett. Vol. 98, pp. 051105, 2011.

[6] A. O. Govorov , et. al, “Semiconductor-metal nanoparticle molecules: Hybrid excitons and the nonlinear Fano effect”, Phys. Revs. Lett. Vol. 97, No. 14, pp. 146804, 2006.

[7] N. Zamani, A. Keshavarz, H. Nadgaran, “Nano multi-layered spherical quantum dot optimization by PSO algorithm: Maximizing the optical absorption coefficient” Superlat. Microstruct. Vol.77, pp. 82-90, 2015.

[8] R. D. Artuso, G. W. Bryant, Strongly coupled quantum dot-metal nanoparticle systems: Exciton-induced transparency, discontinuous response, and suppression as driven quantum oscillator effects." Phys. Rev. B Vol. 82, No. 19, pp. 195419 2010.