

بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران ۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



دوفامی دایروی مغناطیسی خوشه مسطح از نانوذرات توخالی نقره

عاطفه محمدزاده، میرفائز میری

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فیزیک

چکیده – در این مقاله پاسخ اپتومغناطیسی خوشه ای مسطح از نانوذرات توخالی نقره را مورد بررسی قرار داده ایم. طیف جذب و طیف دوفامی دایروی دو ساختار هندسی متفاوت را محاسبه کرده ایم. برای توصیف برهمکنش بین نور و نانوذرات از معادلات دوقطبی-دوقطبی استفاده کرده ایم. مشاهده کردیم که با تغییر ضخامت پوسته نانوذره، فرکانس قله جذب و پهنا در نصف مقدار بیشینه طیف جذب، تغییر پیدا می کند. همچنین با تغییر شکل خوشه، ارتفاع قله طیف جذب و طیف دوفامی دایروی به شدت تغییر پیدا می کند.

کلید واژه- برهمکنش نور و ماده، پاسخ اپتومغناطیسی، طیف جذب و دوفامی دایروی، معادلات دوقطبی جفت شده، نانوذره.

Magnetic Circular Dichroism of Planar Sets of Hollow Silver Nanoparticles

Atefeh Mohammadzadeh, MirFaez Miri

Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, we study the magneto-optical properties of planar sets of hollow silver nanoparticles clusters. The absorption and circular dichroism spectra of two different clusters is calculated. We use the coupled-dipole equations to describe the interaction of the electromagnetic wave with particles. By changing the hollow size, the peak frequency absorption and half-width of the absorption spectrum change. By changing the shape of the cluster, the maximum of the absorption and circular dichroism spectra change drastically.

Keywords: Interaction between light and matter, magneto-optical response, Absorption and circular dichroism spectra, Coupled-dipole equations, Nanoparticle.

۱– مقدمه

بررسی خواص اپتیکی نانوذرات در سال های اخیر، توجه بسیاری از گروه های تحقیقاتی را به خود جلب کرده است. نشان داده شده است که ساختارهای آرایه ای منظم، خوشه های تصادفی و فرکتالی پاسخ اپتیکی متفاوتی از خود نشان می دهند [1-3].

در اثر برهمکنش الکترومغناطیسی، خوشه های متشکل از نانوذرات پلاسمونی، خواص اپتیکی قابل توجه ای از خود نشان می دهند. آرایه مارپیچ متشکل از نانوذرات طلا از خود دوفامی دایروی (CD) نشان می دهد [5,4]. این طیف CD پلاسمونی در ناحیه فرکانسی نور مرئی قرار دارد، در حالی که پاسخ CD ملکول های کایرال طبیعی در ناحیه طیفی فرابنفش قرار می گیرد. برای افزایش پهنای باند پاسخ CD، استفاده از شبکه مربعی دو بعدی پهنای باند پاسخ CD، استفاده از شبکه مربعی دو بعدی متشکل از زنجیره نانوذرات پیچ خورده، پیشنهاد شده مربکه مستطیلی متشکل از نانوذرات از خود طیف CD پلاسمونی نشان می دهد [7].

پاسخ اپتومغناطیسی نانوذرات فلزی در حضور میدان مغناطیسی ضعیف و در فرکانس تشدید پلاسمونی ذرات، قابل توجه است [8]. پاسخ اپتومغناطیسی وابسته به شرایط هندسی سیستم است [9].

در این مقاله از نانوذرات فلزی توخالی استفاده شده است. ساخت نانوذرات توخالی طلا و نقره در مراجع [13-10] گزارش داده شده است. مزیت ویژه ذرات توخالی نسبت به سایر ذرات، تغییر فرکانس تشدید پلاسمونی ذره با تغییر ضخامت پوسته است [10].

۲- معرفی مدل محاسباتی

۲-۱- تانسور قطبش پذیری نانوذرات توخالی

مشابه با مرجع [8] ما از مدل درود برای توصیف پاسخ اپتومغناطیسی فلز کپه ای استفاده می کنیم. معادله حرکت الکترون ها به این صورت است:

$$m_e \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = -m_e \gamma \frac{d \vec{x}}{dt} - e \left(\vec{E}(t) + \frac{1}{c} \frac{d \vec{x}}{dt} \times \vec{B} \right) \quad (1)$$

که $\vec{E}(t) = \operatorname{Re}\left[\vec{E}(\omega)\exp(-i\omega t)\right]$ میدان الکتریکی ique فرودی و $\vec{E}(t) = \operatorname{Re}\left[\vec{E}(\omega)\exp(-i\omega t)\right]$ میدان مغناطیسی iput فرودی و $\vec{B} = B\left(b_x, b_y, b_z\right)$ میدان مغناطیسی iput humiling the method of the

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}(\omega) & iG\omega_{c}b_{z} & -iG\omega_{c}b_{y} \\ -iG\omega_{c}b_{z} & \varepsilon_{xx}(\omega) & iG\omega_{c}b_{x} \\ iG\omega_{c}b_{y} & -iG\omega_{c}b_{x} & \varepsilon_{xx}(\omega) \end{pmatrix}$$
(Y)

 $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{\text{Drude}} = \omega_{xx}$ ماتریس یکه، \hat{I} ماتریس یکه، $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{\text{Drude}} = \omega_{xx}$ است. $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2/m_e} = 1 - \omega_p^2 / \left[\omega(\omega + i\gamma)^2\right]$ جملات غیرقطری تانسور $\hat{\sigma}$ متناسب با ω_c است که البته اندازه آن کم است. در نتیجه پاسخ اپتومغناطیسی فلزات نجیب کپه ای بسیار ضعیف است.

نانوذره فلزی کروی توخالی با شعاع داخلی R_{in} ، شعاع خارجی R_{out} ، تانسور دی الکتریک کره داخلی $\hat{I}(\omega) + i \varepsilon_i^{"}(\omega) \hat{I} = (\varepsilon_i'(\omega) + i \varepsilon_i^{"}(\omega)) \hat{I}$ و تانسور دی الکتریک پوسته خارجی $(\omega) - \hat{\varepsilon}_0(\omega) + i \hat{\varepsilon}_0(\omega) \hat{\varepsilon}_0$ در نظر می گیریم. فرض می کنیم $\lambda \square R_{out}$ است. تانسور قطبش پذیری کلاسیوس-موساتی $\hat{\alpha}_0$ برای این نانوذره توخالی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{0} &= R_{\text{out}}^{2} \\ &\frac{\left(\hat{\varepsilon}_{0} - \varepsilon_{m}\hat{I}\right)\left(\varepsilon_{i}\hat{I} + 2\hat{\varepsilon}_{0}\right) + f\left(\varepsilon_{i}\hat{I} - \hat{\varepsilon}_{0}\right)\left(2\hat{\varepsilon}_{0} + \varepsilon_{m}\hat{I}\right)}{\left(\hat{\varepsilon}_{0} + 2\varepsilon_{m}\hat{I}\right)\left(\varepsilon_{i}\hat{I} + 2\hat{\varepsilon}_{0}\right) + f\left(\varepsilon_{i}\hat{I} - \hat{\varepsilon}_{0}\right)\left(2\hat{\varepsilon}_{0} - 2\varepsilon_{m}\hat{I}\right)} \end{aligned}$$

$$(\textbf{\r{r}})$$

در اینجا $\hat{F}_m \hat{I}$ تانسور دی الکتریک محیط زمینه، و

ها است. در نتیجه معادله جفت شده ممان دوقطبی ها را به این صورت می توان نوشت: $\vec{p}_i(\omega) = \varepsilon_m \hat{\alpha}(\omega) \Biggl(\vec{E}(\vec{r}_i, \omega) + \sum_{j=1}^N \hat{W}(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \cdot \vec{p}_j(\omega) \Biggr) \Biggr)$ (Y)

عبارات \vec{r}_i و $\operatorname{Re}\left[\vec{p}_i\left(\omega\right)\exp\left(-i\,\omega t\right)\right]$ به ترتیب مکان و دوقطبی ذره i را مشخص می کند. تابع گرین \hat{W} به این صورت تعریف می شود [2,3]: $\hat{W}\left(\vec{r}\right) = \left[\left(1-ik|r|\right)\left(\frac{3\vec{r}r-|r|^2\hat{I}}{\varepsilon_m|r|^5}\right) + k^2\left(\frac{|r|^2\hat{I}-\vec{r}r}{\varepsilon_m|r|^3}\right)\right]e^{ik|r|}$ (٨)

که $\sqrt{\varepsilon_m} / c$ مقطع جذب نیز به این صورت بدست می آید: $\sigma_{abs} = -\frac{4\pi\omega}{\varepsilon_m^{3/2}c \left|\vec{E}\right|^2} \operatorname{Im}\left(\sum_i \vec{p}_i^{\dagger} \frac{1}{\hat{\alpha}} \vec{p}_i + \frac{2}{3} i k^3 \left|\vec{p}_i\right|^2\right),$ $= -\frac{4\pi\omega}{\varepsilon_m^{3/2}c \left|\vec{E}\right|^2} \operatorname{Im}\left(\sum_i \vec{p}_i^{\dagger} \frac{1}{\hat{\alpha}_0} \vec{p}_i\right)$

(۹)

شعاع پوسته خارجی ذره را برابر R_{out} و واحد سطح مقطع خوشه N_l ذره ای را برابر $\pi N_l R_{out}^2$ در نظر می گیریم. طیف CD اختلاف سطح مقطع جذب نور راستگرد و چپگرد است.

۳- نتایج محاسبات

در ادامه ابتدا شبکه دو بعدی مستطیلی با ثابت شبکه c در ادامه ابتدا شبکه دو بعدی مستطیلی با ثابت شبکه B = 60nm و a = 60nm شبکه $\sqrt{N_{I}}$ و $\sqrt{N_{I}}$ ستون دارد. نور فرودی و شبکه میدان مغناطیسی استاتیک عمود بر صفحه ذرات تابیده شده است. $R_{out} = 20nm$ $E_m = 1$, $N_I = 225$, $R_{out} = 20nm$ و شده است. شکل شماره (۱) را نگاه \hat{K} کنید. در قسمت (۵) سلح مقطع جذب نور راستگرد و در قسمت (b) طیف CD ساختار مورد بحث رسم شده است.

 $f = (R_{in}/R_{out})^3$ نسبت حجم کره داخلی به کل حجم نانوذره است. معادله (۳) به وضوح نشان می دهد که با تغییر f پاسخ اپتومغناطیسی نانوذره را می توان کنترل کرد. با جایگذاری تانسور دی الکتریک (۲) به جای تانسور دی الکتریک لایه خارجی نانوذره، تانسور قطبش پذیری $\hat{\alpha}_0$ به صورت زیر تعریف می شود. جملات غیرقطری را تا مرتبه اول ω_c/ω نگه می داریم:

$$\hat{\alpha}_{0}(\omega) = \begin{pmatrix} \alpha_{0,xx} & iFG \,\omega_{c} b_{z} & -iFG \,\omega_{c} b_{y} \\ -iFG \,\omega_{c} b_{z} & \alpha_{0,xx} & iFG \,\omega_{c} b_{x} \\ iFG \,\omega_{c} b_{y} & -iFG \,\omega_{c} b_{x} & \alpha_{0,xx} \end{pmatrix}$$
(f)

که

$$\begin{aligned} \alpha_{0,xx} &= R_{out}^{3} \\ \frac{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{m})(\varepsilon_{i} + 2\varepsilon\varepsilon_{xx}) + f(\varepsilon_{i} - \varepsilon_{xx})(2\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{m})}{(\varepsilon_{xx} + 2\varepsilon_{m})(\varepsilon_{i} + 2\varepsilon_{xx}) + f(\varepsilon_{i} - \varepsilon_{xx})(2\varepsilon_{xx} - 2\varepsilon_{m})} \end{aligned}$$

$$(\Delta)$$

در نتیجه تشدید پلاسمون سطحی زمانی اتفاق می افتد که قسمت حقیقی مخرج عبارت (۵) برابر صفر شود. جملات غیرقطری تانسور \hat{a}_0 متناسب با w_c و در نتیجه کوچک هستند. پارامتر F به صورت زیر بدست می آید:

$$F(\omega) = 3R_{\text{out}}^{3} (1-f) \frac{(\varepsilon_{i} + 2\varepsilon_{xx})^{2} + 2f(\varepsilon_{i} - \varepsilon_{xx})^{2}}{L^{2}(\omega)}$$
(\$)

در فرکانسی که $0 = \left[L^2(\omega) \right]$ است، این پارامتر بزرگ می شود و در نتیجه نانوذره فلزی از خود فعالیت اپتومغناطیسی قوی نشان می دهد.

۲-۲-معادلات جفت شده دوقطبی

خوشه ای متشکل از N_I نانوذره یکسان که با میدان $\vec{E}(r,t) = \operatorname{Re}\left[\vec{E}(r,\omega)\exp(-i\,\omega t)\right] = \operatorname{Re}\left[\vec{E}(r,\omega)\exp(-i\,\omega t)\right]$ برهمکنش دارد را در نظر می گیریم. در تقریب دوقطبی، هر نانوذره را با یک دوقطبی نقطه ای و تانسور قطبش پذیری $\hat{\alpha}$ تقریب می زنیم. میدان الکتریکی موضعی که بر روی هرکدام از نانوذرات اعمال می شود مجموعی از میدان فرودی و میدان های ثانویه تابشی از سایر دوقطبی b' = 2.5a' = 150nm را در نظر می گیریم . شبکه b' = 2.5a' = 150nm میدان مغناطیسی استاتیک عمود بر صفحه ذرات تابیده میدان مغناطیسی استاتیک عمود بر صفحه ذرات تابیده شده است. $N_I/3$ و $\varepsilon_m = 1$ ، $N_I = 243$ ، $R_{out} = 20nm$. شده است. در این حالت با تغییر \hat{K} است. $B = 8000G\hat{k}$ أ از ۲ تا ۲.۶ قله طیف سطح مقطع جذب از طول موج f از ۲ تا ۲.۶ قله طیف سطح مقطع جذب از طول موج 360nm به طول موج 111nm افزایش پیدا کرده است.

همان طور که مشخص است پاسخ اپتیکی خوشه ذرات به شدت وابسته به هندسه سیستم است که دلیل آن وابستگی زیاد برهمکنش دوقطبی- دوقطبی به مکان نانوذرات است. برای مثال ارتفاع قله طیف جذب و طیف CD شبکه شکل (۲) نسبت به شبکه شکل (۱)، تقریباً دو برابر افزایش یافته است.

مراجع

- S. K. Ghosh and T. Pal, "Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: from theory to applications," Chem. Rev. 107, 4797–4862, 2007.
- [2] V. A. Markel, and T. F. George, eds., Optics of Nanostructured Materials, Wiley, 2001.
- [3] V. M. Shalaev, Nonlinear Optics of Random Media: Fractal Composites and Metal-Dielectric Films, Springer-Verlag, 2000.
- [4] Z. Fan and A. O. Govorov, "Plasmonic circular dichroism of chiral metal nanoparticle assemblies," Nano Lett. 10, 2580–2587, 2010.
- [5] Z. Fan and A. O. Govorov, "Helical metal nanoparticle assemblies with defects: Plasmonic chirality and circular dichroism," J. Phys. Chem. C 115, 13254–13261, 2011.
- [6] S. Droulias and V. Yannopapas, "Broad-band giant circular dichroism in metamaterials of twisted chains of metallic nanoparticles," J. Phys. Chem. C 117, 1130–1135, 2013.
- [7] V. Yannopapas, "Circular dichroism in planar nonchiral plasmonic metamaterials," Opt. Lett. 34, 632–634, 2009.
- [8] B. Sepúlveda, J. B. González-Díaz, A. García-Martín, L. M. Lechuga, and G. Armelles, "Plasmon-induced magnetooptical activity in nanosized gold disks," Phys. Rev. Lett. 104, 147401, 2010.
- [9] S. Pakdel, and M. F. Miri, "Faraday rotation and circular dichroism spectra of gold and silver nanoparticle aggregates," Phys. Rev. B 86, 235445, 2012.
- [10] H. P. Liang, L. J. Wan, C. L. Bai, and L. Jiang, "Gold hollow nanospheres: tunable surface plasmon resonance controlled by interior-cavity sizes," J. Phys. Chem. B 109, 7795–7800, 2005.
- [11] C. Huang, J. Jiang, M. Lu, L. Sun, E. I. Meletis, and Y. Hao, "Capturing electrochemically evolved nanobubbles by electroless deposition. A facile route to the synthesis of hollow nanoparticles," Nano Lett. 9, 4297–4301, 2009.
- [12] Y. Sun, B. Mayers, and Y. Xia, "Metal nanostructures with hollow interiors," Adv. Mater. 15, 641–646, 2003.
- [13] A. Ben Moshe and G. Markovich, "Synthesis of single crystal hollow silver nanoparticles in a fast reactiondiffusion process," Chemistry of Materials 23, 1239–1245, 2011.



شکل (۱): طیف جذب نور راستگرد (a) و طیف CD (b) بر حسب طول موج نور فرودی برای f های متفاوت. 225 N است. بر روی هر کدام از نقاط یک نانوذره فلزی قرار گرفته است.

تاثیر پارامتر f بر روی نتایج کاملاً مشخص است. برای مثال با تغییر f از ۲ تا ۲۰ قله طیف سطح مقطع جذب از طول موج 357nm به طول موج 507nm انتقال یافته است. پارامتر FWHM نیز از 38nm به تا35nm افزایش پیدا کرده است. بعلاوه با افزایش f پهنای طیف CDبه صورت قابل توجهی افزایش پیدا کرده است.

در ادامه کار، بر روی هر کدام از نقاط شبکه مستطیلی، سه نانوذره که هر کدام در راس یک مثلث متساوی الساقین قرار گرفته اند را جایگزین می کنیم. شکل (۲) را نگاه کنید.



شکل (۲): طیف جذب نور راستگرد (a) و طیف CD (b) ر حسب طول موج نور فرودی برای fهای متفاوت. $N_I = 243$ است. بر روی هر کدام از نقاط یک نانوذره فلزی قرار گرفته است.

در شکل (۲) ثابت شبکه a = 2a' = 120nm و