

# فعالیت مگنتو- اپتیکی قابل تنظیم در نانوذره‌ی هسته- پوسته‌ی طلا سیلیسیوم

همتی کلی، حمیده<sup>۱</sup>؛ نصیری، مجتبی<sup>۱</sup>؛ مددی، ابراهیم<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک دانشگاه زنجان

<sup>۲</sup> گروه علوم مهندسی و فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا

## چکیده

توانایی کنترل انتشار نور در حوزه مرئی و مادون قرمز نزدیک با استفاده از نانوساختارها، موضوع تحقیقات گسترده‌ای در دهه‌های گذشته بوده است. پاسخ مگنتو- اپتیکی در توده‌ی فلزات نجیب ناچیز است اما نانوذرات این فلزات در میدان‌های مغناطیسی کوچک پاسخ قابل توجهی در نزدیکی تشدید پلاسمونی نشان می‌دهند. در این مقاله سطح مقطع پراکندگی نانوذرات هسته- پوسته طلا- سیلیسیوم در میدان‌های مغناطیسی ثابت خارجی و همچنین دورنگی دایره‌ای در طیف پراکندگی مورد مطالعه قرار گرفته است. بیشینه‌ی پیک منحنی‌های سطح مقطع پراکندگی به سمت موج‌های بلند انتقال می‌یابد. همچنین مکان بیشینه‌ی نمودار دورنگی دایره‌ای بر حسب شعاع هسته‌ی طلا رفتار نوسانی دارد.

واژه‌های کلیدی: دورنگی دایره‌ای، سطح مقطع پراکندگی، فعالیت مگنتو- اپتیکی

## Tunable Magneto-optical Activity of Au@Si Core-Shell Nanoparticle

Hemmati Koli, Hamideh<sup>1</sup>; Nasiri, Mojtaba<sup>1</sup>; madadi, Ebrahim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Basic Sciences, Department of Physics, University of Zanjan

<sup>2</sup> Department of Physics and Engineering Sciences, Imam Khomeini International University-Buein Zahra Higher Education Center of Technology

## Abstract

The ability to control the propagation of light in the visible and near-infrared domain by means of nanostructures has been a matter of intense research in the past decades. The magneto-optical response of bulk noble metals is negligible. However, noble metal NPs exhibit sizable magneto-optical response at low external magnetic fields. In this paper, the scattering cross-section of a gold-silicon core-shell nanoparticle in a static magnetic field, as well as its circular dichroism are studied. As the radius of the core increases, the maximum peak of the scattering cross-section curves is shifted to long wavelengths. In addition, the location of the maximum in the dichroism spectrum show oscillatory behavior.

**Keywords:** Circular dichroism, Scattering cross-section, Magneto-optical activity

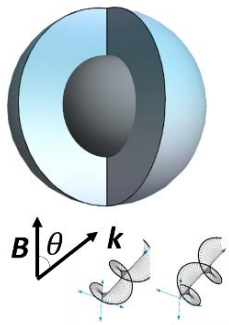
PACS No

## مقدمه

محدودیت‌هایی به دلیل اتلاف بالا دارند و تنها رزونانس دوقطبی الکتریکی در سازه‌های ساده (کره، میله و غیره) وجود دارد. از سوی دیگر، نانوذرات دی الکتریک با ضریب شکست بالا و ضریب خاموشی کم (Ge, Si و غیره) تشدید مغناطیسی و الکتریکی قوی را در محدوده مرئی و نزدیک به فرسرخ حفظ می‌کنند. ترکیبی از

نانوذرات پلاسمونیک (Au, Ag و غیره) به دلیل تواناییشان در افزایش میدان الکترومغناطیسی، کاربردهای گسترده‌ای از جمله اپتیک و زیست پزشکی [۱] دارند. با این حال، ذرات فلزی

در این مقاله ما نانوذره‌ی طلا به شعاع ۴۰ نانومتر که با سیلیکون لایه نشانی شده و شعاع کلی نانوذره هسته-پوسته به ۲۲۵ نانومتر می‌رسد را تحت تابش میدان الکترومغناطیسی قرار می‌دهیم. قطبش میدان فرودی دوحلت چپگرد و راستگرد بوده و همچنین جهت نسبی میدان و جهت تابش (بردار موج  $k$ )، یکسان در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱) طرح کلی نانوذره هسته-پوسته

میدان الکترومغناطیسی پس زمینه اعمالی بر روی نانوذره به صورت زیر است:

$$E_b = E_0 e^{-i\frac{2\pi z}{\sqrt{2}\lambda}} (e_x \pm i e_y) \quad (1)$$

میدان مغناطیسی پایا  $B_0 = 8000G$  است که تاثیر آن در ویژگی‌های مواد و در تانسور قطبش پذیری مشخص می‌شود. در حضور میدان مغناطیسی تقارن مسئله شکسته شده و گذردهی مواد دچار تغییر شده و به صورت ماتریس ۳ در ۳ و نامتقارن با مولفه‌های مختلط و متناسب با فرکانس نور خواهد بود. تانسور قطبش پذیری به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon_r(\omega) = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}(\omega) & iG_0\omega_c e_z & -iG_0\omega_c e_y \\ -iG_0\omega_c e_z & \epsilon_{yy}(\omega) & iG_0\omega_c e_x \\ iG_0\omega_c e_y & -iG_0\omega_c e_x & \epsilon_{zz}(\omega) \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن:

$$\epsilon_{xx}(\omega) = \epsilon_{yy}(\omega) = \epsilon_{zz}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (3)$$

مزایای هر دو نوع نانوذرات تشدیدکننده باعث ایجاد اثرات نوری مختلف می‌شود: پراکندگی پهن بلند یک طرفه [۲] و ویژگی‌های پراکندگی تصویری مجدد [۳].

نانوذرات سیلیکونی کروی با اندازه‌های چند صد نانومتری، یک سیستم نوری منحصربه‌فرد را نشان می‌دهند. طبق پیش‌بینی‌های نظری مبتنی بر نظریه Mie، آنها می‌توانند تشدید مغناطیسی قوی را در محدوده طیفی مرئی نشان دهند. مکانیسم اصلی تحریک چنین حالت‌هایی در داخل نانوذرات بسیار شبیه به تشدیدگرهای حلقه‌ای است، اما نانوذرات سیلیکون تلفات بسیار کمتری دارند و می‌توانند طول موج رزونانس مغناطیسی را به فرکانس‌های مرئی منتقل کنند [۴].

در میدان‌های مغناطیسی پایین (کمتر از  $10^4 G$ )، پاسخ مگنتوآپتیکی در توده‌ی فلزات نجیب ناچیز است. اما نانوذرات فلزی نجیب پاسخ مگنتوآپتیکی قابل توجهی را نشان می‌دهند [۵].

نانوذرات فلزی نوسانات جمعی الکترون‌های رسانای سطحی خود را در یک میدان الکترومغناطیسی فرودی نشان می‌دهند. این رزونانس‌های پلاسمون سطح موضعی (LSPRs) به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در کاربردهای مدرن مانند پراکندگی رامان تقویت‌شده‌ی سطحی، حسگرهای زیستی فیبر نوری، سکوهای حسگر، تقویت‌شده و فوق پراکنده، آنتن‌های نوری استفاده شده‌اند [۶].

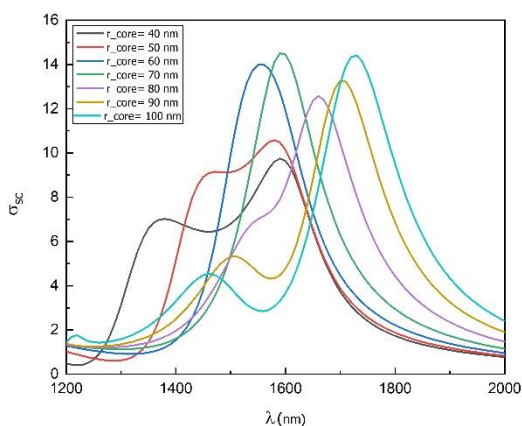
نانوساختارهای فلز-دی الکتریک تشدیدکننده از نوع هسته-پوسته می‌توانند خواص نوری غیرعادی ناشی از همپوشانی طیفی رزونانس‌های الکتریکی و مغناطیسی اجزای نانوساختار را ارائه دهند [۷].

در این مقاله، پاسخ مگنتو-آپتیکی نانوذره هسته-پوسته‌ی طلا-سیلیکون تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت خارجی بررسی می‌شود. نشان می‌دهیم به دلیل تداخل سازنده‌ی تشدید دوقطبی الکتریکی هسته و دوقطبی مغناطیسی پوسته در یک اندازه مشخص هسته، طیف پراکندگی بهینه می‌شود و در این حالت طیف دورنگی بیشینه می‌شود.

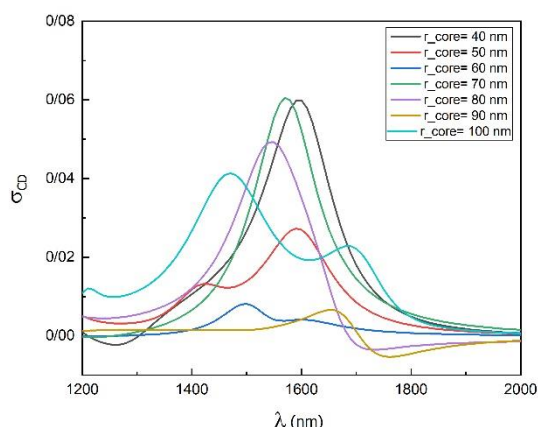
تئوری:

## نتایج:

نمودار سطح مقطع پراکندگی نرمال شده به سطح مقطع هندسی (بی بعد) برای قطبش راستگرد رسم شده است.



شکل ۲) نمودار سطح مقطع پراکندگی نرمال شده برای نانوذره هسته-پوسته با شعاع‌های مختلف هسته (میدان مغناطیسی موازی با امواج الکترومغناطیسی  $\vec{B} \parallel \vec{k}$ )



شکل ۳) نمودار سطح مقطع پراکندگی دورنگی دایره‌ای برای نانوذره هسته-پوسته با شعاع‌های مختلف هسته (میدان موازی با امواج الکترومغناطیسی  $\vec{B} \parallel \vec{k}$ )

نمودار شکل (۲) سطح مقطع پراکندگی بر حسب طول موج (حالت میدان موازی با امواج الکترومغناطیسی) را برای شعاع‌های مختلف هسته از ۴۰ تا ۱۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع هسته، بیشینه پیک منحنی‌های سطح مقطع پراکندگی به سمت طول موج‌های بلند انتقال می‌یابد.

$$G_0 = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)^2} \quad (4)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (5)$$

$$\omega_c = \frac{B_0 e}{m_e} \quad (6)$$

که  $\omega_p$  (فرکانس پلاسمونی) و  $\gamma$  از ویژگی‌های مواد ناشی می‌شود و  $\omega_c$  بسامد سیکلوترونی است.

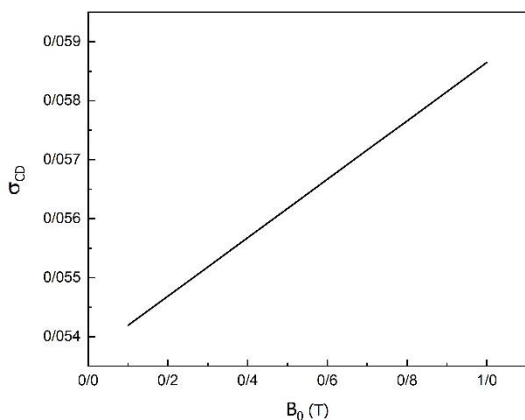
اصولاً در بیشتر سیستم‌ها، اینکه موج فرودی بر ذره، راستگرد باشد یا چپگرد، در سطح مقطع پراکندگی یا جذب تفاوتی ایجاد نمی‌کند. اما اگر میدان مغناطیسی هم حضور داشته باشد به دلیل خاصیت دست‌سازنی که به وجود می‌آید در اینصورت جذب و پراکندگی برای قطبش راستگرد و چپگرد متفاوت خواهد بود که عموماً این تفاوت، خود را در مقادیر سطح مقطع جذب یا پراکندگی نشان می‌دهد. اختلاف سطح مقطع پراکندگی یا جذب برای قطبش راستگرد و چپگرد، سطح مقطع دورنگی دایره‌ای نامیده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_{CD} = \sigma_+ - \sigma_- \quad (7)$$

## روش حل مسئله:

مسئله‌ی پیش رو با روش المان محدود توسط نرم‌افزار کامسول محاسبه و حل می‌شود. این روش (FEM) یک روش عددی کلی برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی در دو یا سه متغیر فضایی (به عنوان مثال، برخی مسائل مقدار مرزی) است. برای حل یک مسئله، FEM یک سیستم بزرگ را به بخش‌های کوچکتر و ساده‌تر تقسیم می‌کند که عناصر محدود نامیده می‌شوند. این امر با گسسته‌سازی فضایی خاص در ابعاد فضا به دست می‌آید، که با ساخت شبکه‌ای از جسم اجرا می‌شود.

سطح مقطع پراکندگی را برای قطبش راستگرد و چپگرد به ازای شعاع‌های مختلف هسته به دست می‌آوریم. این کار را برای حالتی که جهت نسبی میدان و جهت تابش امواج الکترومغناطیسی یکسان باشد محاسبه می‌کنیم.



شکل ۵) رابطه‌ی سطح مقطع دورنگی دایره‌ای با میدان مغناطیسی خارجی

### نتیجه گیری

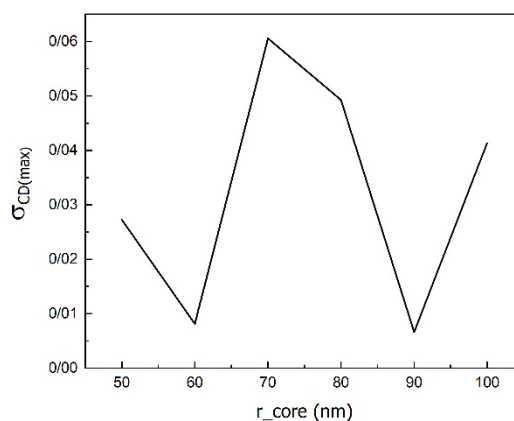
برای نانوذره هسته-پوسته طلا-سیلیسیم در حضور میدان مغناطیسی پایا اختلاف سطح مقطع پراکندگی برای دو قطبش راستگرد و چپگرد ( درحالت میدان موازی با امواج الکترومغناطیسی  $\vec{B} \parallel \vec{k}$  ) باعث ایجاد دورنگی دایره‌ای می‌شود که این متاثر از شکست تقارن مسئله و گذردهی نامتقارن و وابسته به بسامد پلاسמוنی مواد به کاررفته در ساختار نانوذره است. با افزایش شعاع هسته، بیشینه پیک منحنی‌های سطح مقطع پراکندگی به سمت طول موج‌های بلند انتقال می‌یابد. همچنین مکان بیشینه نمودار دورنگی دایره‌ای برحسب شعاع هسته طلا رفتار نوسانی دارد.

### مرجع‌ها

- [1] Maier, S.A., *Plasmonics: fundamentals and applications*. Vol. 1. 2007: Springer.
- [2] Liu, W., et al., *Broadband unidirectional scattering by magneto-electric core-shell nanoparticles*. ACS nano, 2012. 6(6): p. 5489-5497.
- [3] Zuev, D.A., et al., *Fabrication of Hybrid Nanostructures via Nanoscale Laser-Induced Reshaping for Advanced Light Manipulation*. Advanced Materials, 2016. 28(16): p. 3087-3093.
- [4] Kuznetsov, A.I., et al., *Magnetic light*. Scientific reports, 2012. 2(1): p. 1-6.
- [5] Mohammadzadeh, A. and M. Miri, *Magnetic linear and circular dichroism of planar sets of hollow silver nanoparticles: engineering the spectra by hollow size*. JOSA B, 2016. 33(4): p. 711-719.
- [6] Seyedheydari, F., et al., *Electromagnetic response of nanoparticles with a metallic core and a semiconductor shell*. Journal of Physics Communications, 2021. 5(1): p. 015002.
- [7] Larin, A., Y. Sun, and D. Zuev. *Numerical design of Au/Si core-shell nanoparticles*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. IOP Publishing.

نمودار شکل (۳) سطح مقطع پراکندگی دورنگی دایره‌ای را برای نانوذره هسته-پوسته با شعاع‌های مختلف هسته طلا (میدان موازی با امواج الکترومغناطیسی) نشان می‌دهد.

در نمودار شکل (۴) بیشینه‌ی سطح مقطع پراکندگی دورنگی دایره‌ای نرمال شده به سطح مقطع هندسی را برای شعاع‌های مختلف نشان داده شده است. به دلیل تداخل سازنده‌ی تشدید دوقطبی الکتریکی و مغناطیسی برای اندازه‌ی هسته‌ی ۷۰ نانومتر، پراکندگی دارای یک قله‌ی بهینه است. به همین دلیل طیف دورنگی دایره‌ای آن دارای اندازه‌ی قابل توجهی در این سایز است. درحالی که در طیف پراکندگی برای هسته‌های با اندازه‌های دیگر دو پیک مربوط به دوقطبی الکتریکی و دوقطبی مغناطیسی وجود دارد.



شکل ۴) نمودار تغییرات بیشینه سطح مقطع پراکندگی دورنگی دایره‌ای با شعاع‌های مختلف هسته

برای بررسی اینکه دورنگی دایره‌ای با میدان مغناطیسی چگونه تغییر می‌کند، طول موج و اندازه شعاع هسته را در حالت دورنگی دایره‌ای بیشینه (شعاع ۷۰ نانومتر و ۱۵۷۰ نانومتر، طول موج پیک آن) ثابت کردیم و سپس دورنگی دایره‌ای را برحسب میدان مغناطیسی متغیر (۱-۱.۰ تسلا) رسم کردیم. (شکل ۵)

همانطور که از شکل ۵ مشخص است، مشاهده می‌شود با افزایش میدان مغناطیسی خارجی اعمالی، سطح مقطع پراکندگی دورنگی دایره‌ای به صورت خطی افزایش می‌یابد.