

Magneto-optical response of oblate and prolate spheroidal nanoparticles of silver

AtousaKhalilizade¹, EbrahimMadadi^{**2}, Mojtaba Nasiri¹

¹Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

²Department of Physics and Engineering Sciences, Imam Khomeini International University-Buein Zahra Higher Education Center of Technology, Buein Zahra, Iran

Received: 14.11.2019 Final revised: 28.04.2021 Accepted:03.08.2021

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.16978](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.16978)

Abstract

Silver nanoparticles are important in technological and medical applications. The geometrical tuning of the magneto-optical property of these nanoparticles is interesting. As a result of localized surface plasmon resonance of these nanoparticles in the visible and near-infrared, a large circular dichroism is appeared close to surface plasmon resonance. In this paper, the circular dichroism of oblate and prolate spheroidal nanoparticles in the presence of a static magnetic field is studied. A large redshift is observed in the circular dichroism spectrum of the dimer of oblate spheroids. Also, the magnitude of circular dichroism in an asymmetric configuration of the dimer is observed in comparison to the circular dichroism of the dimer of the same volume spherical nanoparticles, which shows the measurements are very easier.

Keywords: Circular dichroism, Spheroidal nanoparticles, Coupled-dipole method

*Corresponding Author: e.madadi@bzeng.ikiu.ac.ir

پاسخ مگنتوآپتیکی نانوذرات بیضی گون پخت و کشیده نقره

آتوسا خلیلی زاده¹، ابراهیم مددی^{2*}، مجتبی نصیری¹

¹گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

²گروه علوم مهندسی و فیزیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوین زهرا، بوین زهرا، ایران

دریافت: 1398/08/23 ویرایش نهائی: 1400/02/08 پذیرش: 1400/05/12

Doi link: [10.22055/JRMB.2021.16978](https://doi.org/10.22055/JRMB.2021.16978)

چکیده

نانوذرات نقره در تکنولوژی و پزشکی دارای اهمیت بسیاری هستند. از جمله ویژگی‌های جالب توجه این ذرات پاسخ مگنتوآپتیکی قابل تنظیم برحسب هندسه آنها است. در نتیجه تشدید پلاسمون‌های سطحی موضعی در این نانوذرات که در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک قرار دارد، این ذرات در حضور میدان مغناطیسی پایا و در نزدیکی محل تشدید پلاسمون‌های سطحی دورنگی دایره‌ای بزرگ و قابل اندازه‌گیری نشان می‌دهند. در این مقاله دورنگی دایره‌ای تک ذره و دیمری از ذرات بیضی گون کشیده و پخت که تحت میدان مغناطیسی پایا قرار دارند مورد مطالعه قرار گرفته است. در طیف دو رنگی دایره‌ای این نانو ذرات، انتقال به قرمز شدید برای دیمر ذرات پخت مشاهده می‌شود. همچنین شدت دورنگی دایره‌ای در پیکربندی‌های نامتقارن در مقایسه با ذرات کروی حدود ده برابر بزرگتر است که اندازه‌گیری آن را آسان‌تر می‌نماید.

کلیدواژگان: دورنگی دایره‌ای، نانو ذره بیضی گون، دو قطبی جفت شده

مقدمه

الکترونیک موضعی در داخل ذره می‌شود. نوسان الکترون‌ها و میدان برانگیزاننده آنها هم‌دوس است و همچون نوسانگری است که رفتاری متناسب با بار، جرم مؤثر الکترون‌ها و چگالی الکترون‌ها دارد. در نتیجه، بسیاری از پدیده‌هایی که با پلاسمون‌های سطحی در فلزات همراه هستند، با مدل ساده نوسانگر هماهنگ قابل درک می‌باشند [1].

اخیراً مطالعاتی در زمینه جفت‌شدگی مگنتو پلاسمونیک بین موجبرهای مگنتوآپتیکی و شبکه‌ای کوچکتر از طول موج از طلا انجام گرفته است [2]. همچنین در زمینه

جفت‌شدگی امواج الکترومغناطیسی فرودی با الکترون‌های آزاد نوار رسانش یک سطح رسانا یا الکترون‌های سطحی یک نانوذره منجر به نوسان‌های جمعی بار الکترونیک شده که پلاسمون‌های سطحی گفته می‌شوند. ویژگی‌های اپتیکی نانوذرات فلزی که از تحریک پلاسمون سطحی آنها ناشی می‌شوند، توجه بسیاری را در حوزه اپتیک تجربی و نظری به‌خود جلب کرده است. در نانوذرات فلزی، میدان الکترومغناطیسی الکترون‌های آزاد رسانشی را نسبت به شبکه یون‌های مثبت آنها جابه‌جا می‌کند و در نتیجه سبب ایجاد میدان

* نویسنده مسئول: e.madadi@bzeng.ikiu.ac.ir



حسگرهای زیستی، موفقیت‌هایی در مورد حسگرهای ویروسی صورت پذیرفته است [3].

تشدید پلاسمون‌های سطحی موضعی¹ (LSPR) در نانوذرات فلزات نجیب، منجر به ویژگی‌های جالب توجهی می‌شود [4]. نقره فلز نجیبی است که نانوذرات آن مورد توجه بسیاری است. این فلز نجیب از دیرباز برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت [5، 6]. از آنجایی که فلزات نجیب با سلول‌های زیستی سازگارند می‌توان آنها را در تشخیص بیماری‌هایی مانند سرطان، تصویربرداری‌های پزشکی و درمان این بیماری‌ها به کار گرفت. به دلیل حساسیت زیاد پلاسمون‌های سطحی و قابل تنظیم بودن آنها با انتخاب مناسب شکل و اندازه در نانوذرات نقره [4]، این ذرات انتخاب مناسبی برای کاربردهایی نظیر تصویربرداری و حسگرهای اپتیکی هستند. همچنین از این ذرات در ساخت خط‌کش پلاسمونی [7]، سلول‌های خورشیدی [8] و در برخی واکنش‌های شیمیایی به عنوان کاتالیزور استفاده شده است [9].

ویژگی‌های هندسی و ساختاری خواص مگنتوآپتیکی یک نانو ساختار را کنترل می‌کنند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به دست‌سازنی² اشاره نمود. اگر یک ذره و تصویرش در یک صفحه روی هم قرار گیرند و بر هم منطبق نگردند، آن ذره دارای ویژگی دست‌سازنی است [10، 11]. از خواص جالب توجه ویژگی دست‌سازنی ذرات، جذب متفاوت قطبش‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی فرودی بر آنها است [12]. در ساختارهای دست‌ساز، میزان جذب نور فرودی برای

قطبش‌های دایره‌ای راستگرد و چپگرد متفاوت هستند، که این تفاوت دورنگی دایره‌ای³ را مشخص می‌کند [12]. خاصیت دورنگی دایره‌ای در حسگرهای زیستی، ابزارهای الکتریکی نوری و ساخت مواد با ضریب شکست منفی به کار برده شده است [13، 15]. دورنگی دایره‌ای برای ذرات کروی با توزیع‌های مختلف محاسبه و اندازه‌گیری شده‌اند [12]. همچنین دورنگی دایره‌ای برای نانو ذرات بیضیگون کشیده هسته-پوسته محاسبه شده و قابلیت تنظیم دورنگی دایره‌ای برحسب اندازه هسته مطالعه شده است [15].

در این مقاله با استفاده از روش دوقطبی‌های جفت شده دو رنگی دایره‌ای برای تک ذره و دایمر نانو ذرات بیضیگون پخت و کشیده با مقطع دایره‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این روش، با توجه به اندازه بسیار کوچک ذرات در مقایسه با طول موج پرتو فرودی، هر ذره به صورت یک دو قطبی و میدان الکتریکی در هر نقطه به صورت برآیند میدان فرودی و میدان‌های پراکنده شده از ذرات دیگر در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله به اثر نسبت نیم قطر بزرگ به نیم قطر کوچک در بیضیگون با مقطع دایره‌ای و همچنین اثر جهت‌گیری این ذرات نسبت به یکدیگر و نسبت به میدان الکترومغناطیسی فرودی در حضور میدان مغناطیسی خارجی به عنوان یکی از پارامترهای کنترلی پرداخته شده است. نشان می‌دهیم که در نانو ذرات بیضیگون پخت با درجه پختی بالا انتقال به قرمز بسیار بزرگی رخ می‌دهد که می‌تواند مورد توجه واقع گردد.

³Circular dichroism

¹Localized Surface Plasmon Resonance

²Chirality

مدل و رهیافت بررسی سامانه

برای بررسی خواص مگنتوآپتیکی با استفاده از مدل الکترون آزاد درود در سیستم سانتی-متر-گرم-ثانیه (cgs)، معادله حرکت الکترون تحت تابش میدان فرودی $\vec{E}(t) = \vec{E}(\omega) \exp(-i\omega t)$ و میدان مغناطیسی استاتیکی $\vec{B} = B(n_x, n_y, n_z)$ نوشته می‌شود:

$$m_e \ddot{\vec{x}} = -m_e \Gamma \dot{\vec{x}} - e(\vec{E}(t) + \frac{1}{c} \dot{\vec{x}} \times \vec{B}) \quad 1$$

که به ترتیب $e, \Gamma, \vec{x}, m_e, c$ ، بار الکترون، ثابت واهلش، بردار جابه‌جایی، جرم مؤثر الکترون‌ها و سرعت نور هستند. با حل معادله حرکت تانسور دی‌الکتریک به‌دست می‌آید [12]:

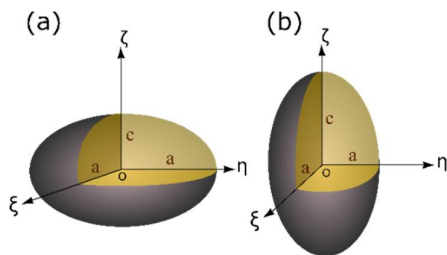
$$\vec{\varepsilon}(\omega) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}(\omega) & iG\omega_c b_z & -iG\omega_c b_y \\ -iG\omega_c b_z & \varepsilon_{yy}(\omega) & iG\omega_c b_x \\ iG\omega_c b_y & -iG\omega_c b_x & \varepsilon_{zz}(\omega) \end{pmatrix} \quad 2$$

در این رابطه، تانسور دی‌الکتریک تا مرتبه اول ω_c/ω حساب شده است که $\omega_c = eB/m_e$ فرکانس سیکلوترونی است. همچنین $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2/m_e}$ فرکانس پلاسמוنی و $G = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)^2}$ هستند. همچنین مؤلفه‌های قطری تانسور دی‌الکتریک به‌صورت به‌دست $\varepsilon_{xx}(\omega) = \varepsilon_{yy}(\omega) = \varepsilon_{zz}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\gamma\omega)}$

می‌آیند [۱۰، ۱۳]. برای توده ماده، فرکانس سیکلوترونی ω_c در عناصر غیر قطری تانسور، در مقایسه با عناصر قطری آن بسیار کوچکتر و قابل چشم‌پوشی است ولی این مقادیر برای نانو ذرات در نزدیکی قله پلاسمونی آنها مقادیر قابل توجهی دارند و اثرات مگنتوآپتیکی را سبب می‌شوند. نور فرودی با قطبش دایره‌ای مدهای پلاسمونی دایره‌ای را برانگیخته می‌کند. دو مد پلاسمونی دایره‌ای

راستگرد و چپگرد در حالتی که $B=0$ است تبهگن بوده و فرکانس تشدید برابر دارند. وقتی که میدان مغناطیسی ایستای خارجی روشن می‌شود این تبهگنی از بین می‌رود. در نتیجه نیروی اعمالی بر الکترون‌هایی که به‌طور جمعی در مدارهای دایره‌ای در حال نوسان هستند جمله اضافه در نیروی لورنتز $\vec{F} = -e\vec{E}(t) - \frac{1}{c} \dot{\vec{x}} \times \vec{B}$ را احساس می‌کنند. سرانجام حرکات دایره‌ای جمعی بارها تحت تأثیر جهت چرخش قطبش نور فرودی قرار گرفته و محدود می‌شوند و در فرکانس تشدید پلاسمونی با توجه به جهت چرخش بردار میدان الکتريکی نور، انتقال به وجود می‌آید [14].

برای بررسی خواص مگنتوآپتیکی، ذرات بیضی‌گون با نیم قطرهای a, b و c را در نظر می‌گیریم که در حالت بیضی‌گون پخت $a = b > c$ و در مورد بیضی‌گون کشیده $a = b < c$ هستند.



شکل 1 هندسه کلی (a) بیضی‌گون پخت و (b) بیضی‌گون کشیده.

تابع دی‌الکتریک نانو ذرات را $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ و ثابت دی‌الکتریک محیط را ε_m در نظر می‌گیریم. عناصر قطری تانسور قطبش‌پذیری در دستگاه محلی نانو ذره به‌صورت زیر نوشته می‌شود [17]:

$$\vec{\alpha}_{0,j} = \frac{V}{4\pi} [(\vec{\varepsilon} - \varepsilon_m \vec{I})][(\varepsilon_m \vec{I} + (\vec{\varepsilon} - \varepsilon_m \vec{I})L_j)]^{-1},$$

$$j = \xi, \eta, \zeta.$$

پلاسمون‌های عرضی و طولی تقویت می‌شوند. با صفر شدن مخرج رابطه \mathfrak{S}_j ، عناصر غیر قطری ماتریس تقویت می‌شوند که با تشدید پلاسمونی اندکی فرق دارد و خواص مگنتوایپتیکی سیستم را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های قطری ماتریس قطبش‌پذیری در دستگاه متصل به ذره، خود ماتریس‌هایی از مرتبه سه می‌باشند، صورت کلی رابطه قطبش‌پذیری را می‌توان از بردار قطبش ذره تحت تابش میدان الکتریکی $\vec{E}(\vec{r}, t)$ به‌دست آورد [18]:

$$\vec{P} = \varepsilon_m \alpha_{0,\xi} (\vec{E} \cdot \hat{e}_x) \hat{e}_x + \varepsilon_m \alpha_{0,\xi} (\vec{E} \cdot \hat{e}_y) \hat{e}_y + \varepsilon_m \alpha_{0,\zeta} (\vec{E} \cdot \hat{e}_z) \hat{e}_z \quad 8$$

که به‌صورت تانسور زیر است:

$$\vec{\alpha}_{0,p}(\omega) = \begin{pmatrix} \alpha_{0,\xi,xx} & \alpha_{0,\xi,xy} & \alpha_{0,\xi,xz} \\ -\alpha_{0,\xi,xy} & \alpha_{0,\xi,xx} & \alpha_{0,\xi,yz} \\ -\alpha_{0,\xi,xz} & -\alpha_{0,\xi,yz} & \alpha_{0,\zeta,xx} \end{pmatrix} \quad 9$$

در نهایت تانسور قطبش‌پذیری که قضیه اپتیکی را اقتناع می‌کند، $(\vec{\alpha}_p = (\vec{\alpha}_{0p}^{-1} - \frac{2}{3} ik^3 \vec{I})^{-1})$ ، برای محاسبه جذب اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [19]. تانسور قطبش‌پذیری با استفاده از ماتریس دوران R_l برای ذره l ام و به‌صورت $\alpha_{L,l} = R_l \alpha_p R_l^{-1}$ از دستگاه محلی متصل به ذره به دستگاه ثابت آزمایشگاه تبدیل می‌گردد که [13]:

$$R_l = \begin{pmatrix} \cos \theta_l \cos \phi_l & -\sin \phi_l & \sin \theta_l \cos \phi_l \\ \cos \theta_l \sin \phi_l & \cos \phi_l & \sin \theta_l \sin \phi_l \\ -\sin \theta_l & 0 & \cos \theta_l \end{pmatrix} \quad 10$$

در اینجا θ_l و ϕ_l زوایای قطبی و سمتی نیم‌قطر بزرگ برای ذره l ام می‌باشند.

که V حجم نانو ذره است. $\alpha_{0,\xi}$ و $\alpha_{0,\zeta}$ به‌ترتیب قطبش‌پذیری عرضی و طولی بیضیگون، \vec{I} ماتریس واحد و L_j عامل هندسی است [16] که برای ذرات بیضی‌گون پخت مطابق رابطه:

$$L_\zeta = \frac{g(e)}{2e^2} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} g(e) \right] - \frac{g^2(e)}{2}, \quad 4$$

$$g(e) = \left(\frac{1-e^2}{e^2} \right)^{1/2}, \quad e^2 = 1 - \frac{c^2}{a^2}.$$

به‌دست می‌آید. با توجه به تقارن بیضی‌گون L_ξ مطابق رابطه $L_\zeta + 2L_\xi = 1$ قابل محاسبه است. همچنین برای بیضی‌گون کشیده عامل هندسی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_\zeta = \left(\frac{1-e}{e^2} \right) \left(-1 + \frac{1}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} \right), \quad e^2 = 1 - \frac{a^2}{c^2} \quad 5$$

با توجه به تقارن بیضی‌گون L_ξ مطابق رابطه $L_\zeta + 2L_\xi = 1$ قابل محاسبه است. e خروج از مرکز بیضی‌گون است و برای حالت خاص کره، مقدار 1 را

$$\vec{\alpha}_{0,j}(\omega) = \begin{pmatrix} \alpha_{0,j,xx} & i\omega_c b_z \mathfrak{S}_j & -i\omega_c b_y \mathfrak{S}_j \\ -i\omega_c b_z \mathfrak{S}_j & \alpha_{0,j,xx} & i\omega_c b_x \mathfrak{S}_j \\ i\omega_c b_y \mathfrak{S}_j & -i\omega_c b_x \mathfrak{S}_j & \alpha_{0,j,xx} \end{pmatrix} \quad 6$$

اختیار می‌کند [18]. تانسور قطبش‌پذیری در رابطه 3 تا مرتبه اول ω_c/ω به‌صورت زیر ساده می‌شود [16]:

$$\alpha_{0,j,xx} = \frac{V}{4\pi} \frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + L_j(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_m)}, \quad 7$$

$$\mathfrak{S}_j = \frac{V}{4\pi} \frac{\varepsilon_m}{(\varepsilon_m + L_j(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_m))^2},$$

که $\zeta_j = \xi_j = j$ است. با صفر شدن مخرج کسر رابطه $\alpha_{0,j,xx}$ برای $\zeta_j = \xi_j$ و $j = \zeta_j$ به‌ترتیب،

میدان و \hat{e} بردار قطبش نور تابشی است و بردار قطبش، برای قطبش دایره‌ای چپگرد (\hat{e}_+) و راستگرد (\hat{e}_-) طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{e}_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\cos\theta \cos\varphi \mp i \sin\varphi, \cos\theta \sin\varphi \pm i \cos\varphi, -\sin\theta) \quad 13$$

بردار موج میدان فرودی نیز به صورت زیر است:

$$\hat{k} = (\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta) \quad 14$$

سطح مقطع جذب مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [12,21]:

$$\sigma = \frac{4\pi\omega}{\varepsilon_m^{3/2} c |\vec{E}_0|^2} \text{Im} \sum_l \vec{d}_l^+ \vec{\alpha}_{L,l}^{-1} \vec{d}_l \quad 15$$

اختلاف سطح مقطع جذب باریکه فرودی با دو قطبش دایره‌ای راستگرد و چپگرد، دورنگی دایره‌ای نامیده می‌شود که طبق رابطه $\sigma_{CD} = \sigma_+ - \sigma_-$ تعریف می‌گردد [16].

نتایج

در این بخش نتایج مربوط به دورنگی دایره‌ای ذرات بیضی‌گون پخت و کشیده برای نسبت‌های ابعادی¹ مختلف گزارش می‌شود. همان‌طور که پیشتر گفته شد، در نوع خاص بیضی‌گون‌های مورد مطالعه ما که نوع ساده‌تری از هندسه کلی بیضی‌گون‌ها است، از سه نیم‌محور بیضی‌گون، دو نیم‌محور هم‌اندازه هستند و در نتیجه یک سطح مقطع دایره‌ای ایجاد می‌نمایند. نسبت ابعادی در مورد این مسأله به صورت نسبت اندازه نیم‌محور نابرابر به اندازه نیم‌محور برابر تعریف می‌شود و با توجه به شکل 1 به صورت نسبت c/a می‌باشد.

برای اینکه اثر اندازه نانوذرات بر ویژگی‌های اپتیکی را وارد کنیم از رابطه زیر به همراه اندازه‌گیری‌های تجربی مقاله جانسون و کریستی [20] برای توده ماده استفاده می‌کنیم:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^{\infty} + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma_{bulk}\omega} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega} \quad 11$$

که در این رابطه $\Gamma = \Gamma_{bulk} + \nu_f / L_{eff}$ و ν_f به ترتیب، ثابت واهلش وابسته به اندازه ذره و سرعت فرمی هستند. L_{eff} طول پویش آزاد میانگین است و طبق رابطه $L_{eff} = 4V/S$ به دست می‌آید که در آن V حجم ذره و S مساحت سطح ذره مورد مطالعه است [21]. مقادیر فرکانس پلاسמוنی، سرعت فرمی و ثابت واهلش برای توده نقره به ترتیب برابرند با $1,386 \times 10^{16} \text{Hz}$ ، $1,39 \times 10^8 \text{cm/s}$ و $4,584 \times 10^{13} \text{Hz}$. ذرات در خلأ با ضریب دی‌الکتریک $\varepsilon_m = 1$ قرار دارند.

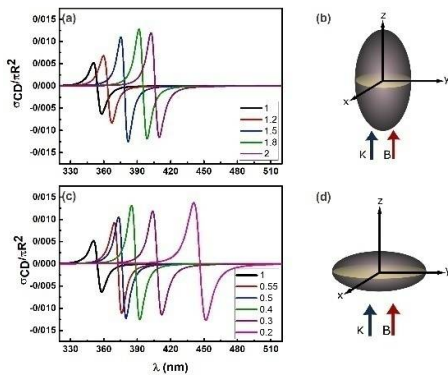
در روش دوقطبی‌های جفت شده میدان پراکنده کل ناشی از یک نانو ذره در یک نقطه مشخص، به دلیل پراکندگی میدان فرودی از آن نانو ذره و تأثیر میدان‌های پراکنده شده سایر ذرات بر آن نانو ذره می‌باشد. در این روش، برای سیستم N ذره‌ای، ممان دوقطبی که ذره j ام در ذره i ام ایجاد می‌نماید، به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\vec{d}_i = \varepsilon_m \vec{\alpha}_i [\vec{E}_{inc}(\vec{r}_i) + \sum_j \vec{W}(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \cdot \vec{d}_j]. \quad 12$$

در رابطه فوق، $\vec{W}(\vec{r}_i - \vec{r}_j)$ میدانی است که دوقطبی j ام در محل ذره i ام ایجاد می‌کند [12]. میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی تابشی به صورت $E(r, \omega) = E_0 \hat{e}^{ik \cdot r}$ در نظر گرفته می‌شود که E_0 دامنه

¹Aspect ratio

به 403nm برای بیضی گون کشیده با نسبت ابعادی 2 انتقال به قرمز نشان می دهد و شدت آن بیش از دو برابر تقویت می شود که اندازه گیری آزمایشگاهی آن را ساده تر می کند.



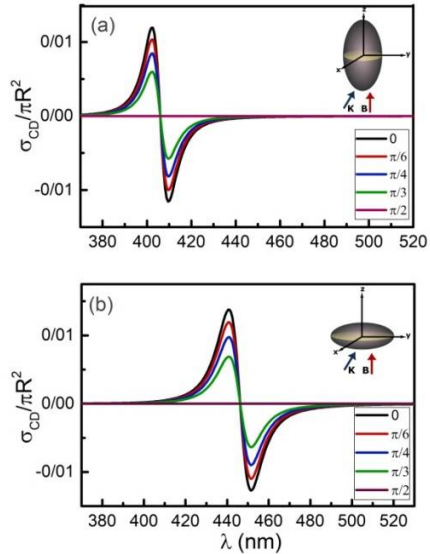
شکل 1. طیف دورنگی دایره ای برای نسبت های ابعادی متفاوت برای یک تک ذره بیضی گون (a) کشیده و (b) پخت.

در شکل 2b دورنگی دایره ای یک تک ذره بیضی گون پخت برای نسبت های ابعادی متفاوت نشان داده می شود که با پخت تر شدن بیضی گون شاهد جابه جایی در محل بیشینه های مثبت به سمت طول موج های بلند هستیم. به عنوان مثال، بیشینه دورنگی دایره ای از 350nm برای کره با نسبت ابعادی 1 به 441nm برای بیضی گون پخت با نسبت ابعادی 0/2 انتقال به قرمز نشان می دهد.

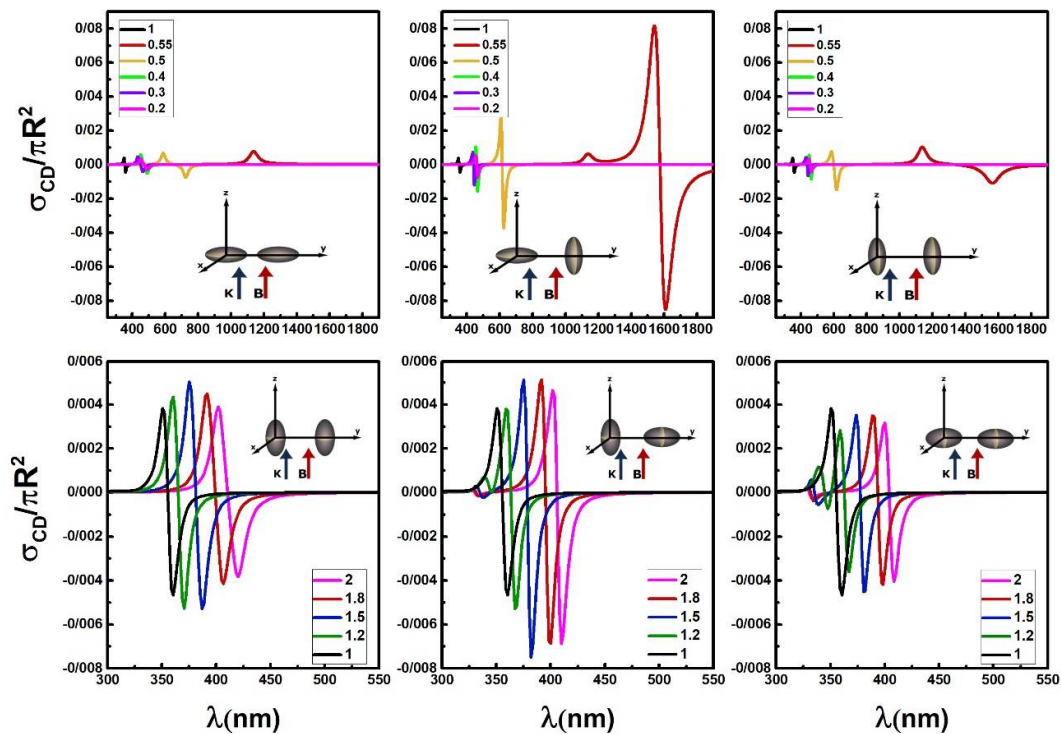
به عبارت دیگر این نسبت ابعادی، چگونگی تفاوت هندسه بیضی گون از کره را نشان می دهد و معیاری برای چگونگی کشیدگی یا پختی بیضی گون است. برای بیضی گون پخت مقادیر نسبت ابعادی کمتر از یک و برای بیضی گون کشیده بزرگتر از عدد 1 است. تغییرات اندازه نیم محوره های بیضی گون ها به گونه ای تنظیم گردیده است که حجم آنها همواره برابر با حجم کره ای با شعاع 15,75nm باشد. ذرات مورد مطالعه، تحت میدان مغناطیسی پایای 8000G قرار دارند که در جهت محور Z اعمال می شود. در ادامه همه نمودارها به سطح مقطع مؤثر کره هم حجم با شعاع 15,75nm، بهنجار شده است.

شکل 2 دورنگی دایره ای را برای یک تک ذره بیضی گون کشیده (a) و بیضی گون پخت (b) برای نسبت های ابعادی متفاوت نشان می دهد. با توجه به اینکه $\vec{k} \parallel \vec{B} \parallel \vec{z}$ است و باریکه فرودی سطح مقطع دایره ای در هر دو بیضی گون را مشاهده می کند فقط پلاسمون های عرضی تحریک می شوند. اثر مگنتوآپتیکی ناشی از عناصر غیر قطری تانسور قطبش پذیری است و با صفر شدن مخرج کسر عناصر غیر قطری تقویت $(\text{Re}[(\epsilon_m + L_{\xi}(\epsilon_{0,xx} - \epsilon_m))^2] = 0)$ می شوند که در نزدیکی تشدید پلاسمونی که به دلیل صفر شدن مخرج کسر در رابطه 8 ظاهر می شوند، قرار $(\text{Re}[\epsilon_m + L_{\xi}(\epsilon_{0,xx} - \epsilon_m)] = 0)$ دارند. همان طور که مشاهده می شود، برای بیضی گون های کشیده تر (شکل 2a)، بیشینه های دورنگی به سمت طول موج های بلندتر جابه جا می شود و شدت دورنگی تقویت می شود. با توجه به شکل بیشینه مثبت طیف دورنگی از 350nm برای کره با نسبت ابعادی 1

در شکل 3، اثر جهت تابش میدان الکترومغناطیسی بر نانوذرات بیضی‌گون مطالعه شده است. برای $\vec{k} \parallel \vec{B} \parallel \hat{z}$ طیف دورنگی بیشترین مقدار دارد و با افزایش زاویه بین میدان مغناطیسی پایا و بردار موج تابشی کاهش می‌یابد و برای حالت $\vec{k} \perp \vec{B} \parallel \hat{z}$ به‌طور کامل از بین می‌رود. شکل 4، طیف پاسخ مگنتوآپتیکی را برای دایمر نانوذرات بیضی‌گون پخت (ردیف بالا) و کشیده (ردیف پایین) نشان می‌دهد. در این شکل، اثر نسبت ابعادی ذرات برای پیکربندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



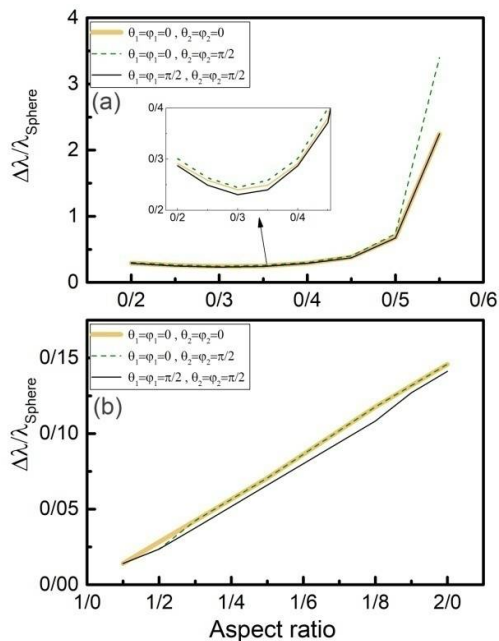
شکل 3. اثر جهت تابش موج فرودی بر یک تک ذره بیضی‌گون (a) کشیده به‌نسبت ابعادی 2 و (b) پخت به‌نسبت ابعادی 0.2.



شکل 4. دورنگی دایره‌ای برای دایمر ذرات بیضی‌گون پخت (ردیف بالا) و کشیده (ردیف پایین) برای پیکربندی‌های مختلف و نسبت‌های ابعادی مختلف ذرات.

قرمز است. به‌عنوان مثال، محل بیشینه در شکل 4b که نامتقارن‌ترین شکل است از طول‌موج 350nm برای دایمر نانو کره به‌طول‌موج 1542nm برای دایمر

در شکل‌های 4a تا 4c برای دایمر نانو ذرات بیضی‌گون پخت، اثر نهایی تغییر نسبت ابعادی نانوذرات، انتقال محل بیشینه پاسخ مگنتوآپتیکی به‌سمت طول موج‌های



شکل 5. محل بیشینه دورنگی دایره‌ای دیمر ذرات بیضی‌گون (a) پخت و (b) کشیده برای پیکربندی‌های مختلف.

به‌طور خلاصه، در این پژوهش پاسخ مگنتواینتیکی نانوذرات بیضی‌گون پخت و کشیده برحسب نسبت ابعادی در حضور میدان مغناطیسی استاتیکی و برای ذرات هم حجم به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گرفت. برای مطالعه نظری، از روش دوقطبی‌های جفت شده برای محاسبه میدان الکتریکی در هر نقطه از فضا استفاده شد و سطح مقطع جذب برای میدان فرودی با قطبش‌های دایره‌ای محاسبه گردید. ذرات بیضی‌گون در حضور میدان مغناطیسی ثابت خاصیت دست‌سازنی پیدا کرده و دورنگی دایره‌ای از خود نشان می‌دهند. اثر کلی تغییرات نسبت ابعادی انتقال بیشینه دو رنگی دایره‌ای به‌طول موج‌های قرمز است. این خاصیت در ذرات بیضی‌گون پخت انتقال‌های بسیار بزرگتری نشان می‌دهند. بنابراین از این هندسه‌های پیشنهادی می‌توان به‌عنوان فیلترهای مناسبی برای عبور سیگنال‌های با فرکانس‌های بالا یا پایین در ناحیه فرو سرخ نزدیک و مرئی استفاده کرد.

نانوذرات بیضی‌گون پخت با نسبت ابعادی 0/55 انتقال پیدا می‌کند. همچنین به‌دلیل سطح مقطع نامتقارن در این پیکربندی دورنگی دایره‌ای قابل توجهی در طول موج 1140nm مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه دیگر در این پیکربندی، مقدار بزرگ دورنگی دایره‌ای آن در مقایسه با دو شکل دیگر است. به‌عنوان مثال دورنگی دایره‌ای برای نانو ذرات با نسبت ابعادی 0/55 در شکل 4b حدود 10 مرتبه بزرگتر از مقدار آن در شکل‌های 4a و 4c است. از دیگر نکات قابل توجه در دیمرهای نانوذرات بیضی‌گون پخت، می‌توان به رفتار جالب آن برای نسبت‌های ابعادی 0/2 تا 0/4 اشاره کرد که ابتدا از مقدار 1 برای کره تا مقدار 0/2 برای بیضی‌گون به‌سمت قرمز منتقل شده و سپس تا نسبت ابعادی 0/3 به‌سمت آبی منتقل می‌شود و مجدداً برای نسبت‌های ابعادی بزرگتر به‌سمت قرمز انتقال می‌یابد. نانوذرات بیضی‌گون کشیده محل بیشینه دورنگی دایره‌ای برحسب افزایش نسبت ابعادی به‌صورت یکنواخت به‌سمت طول موج‌های قرمز انتقال پیدا می‌کند. رفتار اشاره شده در بالا برای پیکربندی‌های مختلف دیمر نانوذرات در نمودارهای شکل 5 نمایش داده شده است.

- [8] V. Thamilselvi, K.V. Radha, A Review On the Diverse Application of Silver Nanoparticles, *IOSR Journal of Pharmacy* **7** (2017) 21-27.
<http://iosrphr.org/papers/v7i1V1/E0701012127.pdf>
- [9] Z.J. Jiang, C.Y. Liu, L.W. Sun, Catalytic Properties of silver nanoparticles supported on silica sphere, *The Journal of Physical Chemistry B* **109** (2005) 1730-1735.
<https://doi.org/10.1021/jp046032g>
- [10] A.O. Govorov, Plasmon-Induced Circular Dichroism of a Chiral Molecule in the Vicinity of Metal Nanocrystals. Application to Various Geometries, *The Journal of Physical Chemistry C* **115** (2011) 7914–7923.
<https://doi.org/10.1021/jp1121432>
- [11] Z. Fan, A.O. Govorov, Plasmonic Circular Dichroism of Chiral Metal Nanoparticle Assemblies, *Nano Letters* **10** (2010) 2580-2587.
<https://doi.org/10.1021/nl101231b>
- [12] S. Pakdel, M. Miri, Faraday rotation and circular dichroism spectra of gold and silver nanoparticle aggregates, *Physical Review B* **86** (2012) 235445-1.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.235445>
- [13] M.D. Malinsky, K.L. Kelly, G.C. Schatz, R.P.V. Duyne, Nanosphere Lithography: Effect of Substrate on the Localized Surface Plasmon Resonance Spectrum of Silver Nanoparticles, *The Journal of Physical Chemistry B* **105** (2010) 2343-2350.
<https://doi.org/10.1021/jp002906x>
- [14] F. Pineider, G. Campo, V. Bonanni, C. J. Fernandez, G. Mattei, A. Caneschi, D. Gatteschi, C. Sangregorio, Circular Magnetoplasmonic Modes in Gold Nanoparticles, *Nano Letters* **13** (2013) 4785-
- مرجع‌ها
- [1] M.L. Brongersma, P.G. Kik, *Surface Plasmon Nanophotonics*, Springer, Netherlands (2007).
<https://www.springer.com/gp/book/9781402043499>
- [2] S. Abadian, G. Magno, V. Yam, B. Dagens, Integrated magneto-plasmonic isolation enhancement based on coupled resonances in subwavelength gold grating, *Optics Communications* **483** (2021) 126633.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126633>
- [3] S. Szunerits, T.N. Saada, D. Meziane, R. Boukherroub, Magneto-Optical Nanostructures for Viral Sensing, *Nanomaterials* **10** (2020) 1271.
<https://dx.doi.org/10.3390/nano10071271>
- [4] P.K. Jain, X. Huang, I.H. El-Sayed, M.A. El-Sayed, Noble Metals on the Nanoscale: Optical and Photothermal Properties and Some Applications in Imaging, Sensing, Biology, and Medicine, *Accounts of Chemical Research* **41** (2008) 1578-1586.
<https://doi.org/10.1021/ar7002804>
- [5] P.K. Jain, X. Huang, I.H. El-Sayed, M.A. El-Sayed, Review of Some Interesting Surface Plasmon Resonance-enhanced Properties of Noble Metal Nanoparticles and Their Applications to Biosystems, *Plasmonics* **2** (2007) 107-118.
<https://doi.org/10.1007/s11468-007-9031-1>
- [6] M. Ahamed, M.S. AlSalhi, M.K.J. Siddiqui, Silver nanoparticle applications and human health, *Clinica Chimica Acta* **411** (2010) 1841-1848.
<https://doi.org/10.1016/j.cca.2010.08.016>
- [7] D. Pozo, *Silver Nanoparticles*, IntechOpen (2010).
<https://www.intechopen.com/books/3621>

- [19] S. Albaladejo, R. Gómez-Medina, L.S. Froufe-Pérez, H. Marinchio, R. Carminati, J.f. Torrado, J. Armelles, A. Garsía-Martín, J.J. Sáenz, Radiative corrections to the polarizability tensor of an electrically small anisotropic dielectric particle, *Optics Express* **18** (2007) 3556-3567. <https://doi.org/10.1364/OE.18.003556>
- [20] P.B. Johnson, R.W. Christy, Optical constants of the noble metals, *Physical Review* **B6** (1972) 4370-4370. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
- [21] A. Mohammadzadeh, M. Miri, Magnetic linear and circular dichroism of planar sets of hollow silver nanoparticles: engineering the spectra by hollow size, *Journal of the Optical Society of America B* **33** (2016) 711-719. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.000711>
4789. <https://doi.org/10.1021/nl402394p>
- [15] E. Verhagen, L. Kuipers, A. Polman, Enhanced nonlinear optical effects with a tapered Plasmonic waveguide, *Nano Letters* **7** (2007) 334-337. <https://doi.org/10.1021/nl062440f>
- [16] E. Madadi, A. Khalilizadeh, M. Nasiri, Tunable magneto-optical linear and circular dichroism spectra for a dimer of core-shell prolate spheroids, *Journal of the Optical Society of America B* **36** (2019) 991-998. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.000991>
- [17] A.H. Sihvola, Dielectric polarizability of a sphere with arbitrary anisotropy, *Optics Letters* **19** (1994) 430-432. <https://doi.org/10.1364/OL.19.000430>
- [18] C.F. Bohren, D.R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley, United States of America, (1998) 130-157. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527618156>