

مطالعه دوپایایی نوری در یک نانوذره فلزی هیدرودینامیک

نادر دانش فر و زینب نورمحمدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی: ndaneshfar@razi.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵)

چکیده

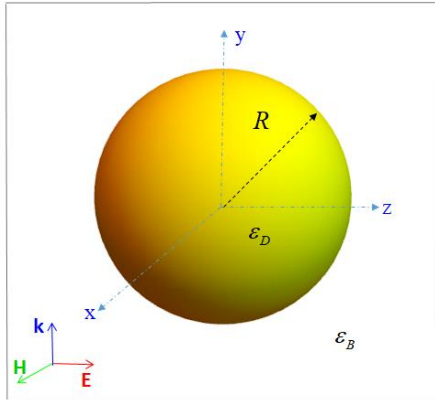
در این مقاله، دوپایایی (دوپایداری) نوری در یک نانوذره پلاسمونیک با استفاده از مدل هیدرودینامیک برای الکترون‌های رسانش بررسی می‌شود. نشان داده می‌شود که آستانه دوپایایی نوری، ناحیه دوپایدار و شکل پسماند نوری وابسته به جنس نانوذره و ثابت دی الکتریک محیط اطراف نانوذره پلاسمونیک است.

واژه‌های کلیدی: دوپایایی نوری، نانوذره پلاسمونیک، مدل هیدرودینامیک

۱. مقدمه

در سال‌های گذشته، کنترل نور و شناخت پدیده‌های نوری خطی و غیر خطی به علت کاربرد در حوزه‌هایی همچون فوتونیک، اپتیک غیر خطی و مخابرات نوری از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از اثرات نوری غیر خطی، کنترل نور توسط نور است که دوپایایی (دوپایداری) نوری نامیده می‌شود. دوپایداری نوری یک پدیده نوری غیر خطی است که سیستم به ازای یک مقدار ورودی، دو مقدار خروجی متفاوت و پایدار دارد. به عبارت دیگر، دوپایداری نوری یکی از مهم‌ترین پدیده‌های نوری غیر خطی است که کاربرد بسیاری در کلیدهای تمام نوری، حافظه‌های نوری، پردازش اطلاعات، مدولاسیون سیگنال‌های نور و ... دارد، که در آن به ازای یک میدان ورودی،

دو میدان خروجی حاصل می‌شود [۱-۳]. در سال‌های اخیر خواص نوری نانوساختارهای پلاسمونیک به علت خواص منحصر بفردشان به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در واقع، یکی از جذاب‌ترین و مفیدترین جنبه‌های نانوساختارها، پاسخ نوری و خواص نوری آنهاست. تحقیقات نشان داده که نانوساختارهای فلزی نامزدهای خوبی برای کاربردهای نوری غیرخطی هستند [۴]. یعنی پاسخ نوری غیر خطی ذاتی الکترون‌های رسانش در مواد پلاسمونیک فرصت‌هایی را برای طراحی ویژگی‌های نوری غیر خطی مرتبه دوم و سوم نانوساختارهای پلاسمونیک و کنترل نور با نور با استفاده از غیر خطی‌های نوع کر و همچنین دستیابی به تولید هماهنگ را فراهم می‌کند [۵].



شکل ۱. نانوکره فلزی که تحت تابش موج الکترومغناطیس قرار گرفته است.

عدد موج طولی غیر موضعی است. در محیط اطراف نانوذره، چگالی بار آزاد و چگالی جریانی صفر است. بنابراین، با حل معادلات فوق، پتانسیل نرده‌ای الکتریکی و چگالی الکترون آزاد درون و بیرون نانوذره کروی عبارتند از [۶ و ۷]:

$$\left\{ \begin{aligned} n_{in} &= \sum_{l,m} A_l j_l(k_{NL}r) Y_{lm}(\theta, \phi), \quad n_{out} = 0, \\ \varphi_{in}(r < R, \theta, \phi) &= \sum_{l,m} \left(D_l r^l - \frac{e}{\epsilon_s \epsilon_\infty k_{NL}^r} A_l j_l(k_{NL}r) \right) Y_{lm}(\theta, \phi), \quad (2) \\ \varphi_{out}(r > R, \theta, \phi) &= \sum_{l,m} (B_l r^l + C_l r^{-(l+1)}) Y_{lm}(\theta, \phi), \\ \psi_{in} &= \frac{1}{i\omega - \gamma} (\epsilon_s \omega_p^r \varphi_{in} - e \beta^r n_{in}), \end{aligned} \right.$$

که $j_l(x)$ تابع بسل کروی و $Y_{lm}(\theta, \phi)$ هماهنگ کروی است. به ازای $l \geq 2$ ضرایب صفر و فقط ضرایب با $l = 1$ غیر صفر هستند. علاوه بر این، چون $\vec{E} = E_s \hat{z}$ پس $B_l = -E_s$ است. سایر ضرایب مجهول با استفاده از شرایط مرزی و پس از انجام عملیات جبری به دست می‌آیند [۵]. با داشتن ضرایب، پتانسیل و بنابراین میدان الکتریکی در نواحی درون و بیرون نانوذره حاصل می‌شود. میدان الکتریکی در نواحی درون و بیرون نانوکره به ترتیب عبارتند از [۵]:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{E}_{in} &= -\left(D_1 - \frac{e}{\epsilon_s \epsilon_\infty k_{NL}^r} A_1 j_1'(k_{NL}r) \right) \cos \theta \hat{e}_r + \left(D_1 r - \frac{e}{\epsilon_s \epsilon_\infty k_{NL}^r} A_1 j_1(k_{NL}r) \right) \frac{\sin \theta}{r} \hat{e}_\theta, \\ \vec{E}_{out} &= (E_s + r C_1 r^{-r}) \cos \theta \hat{e}_r + (-E_s r + C_1 r^{-r}) \frac{\sin \theta}{r} \hat{e}_\theta, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

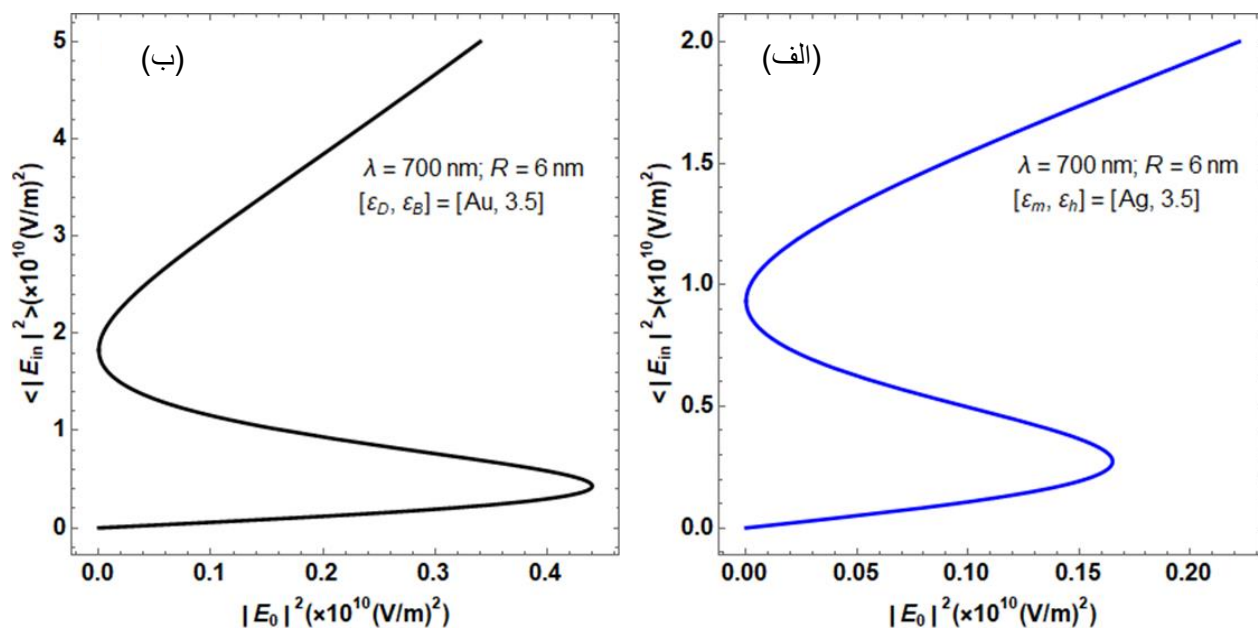
در این مقاله، برای نخستین بار دوپایایی نوری در نانوذرات پلاسمونیک با هندسه کروی با استفاده از تئوری هیدرو دینامیک مطالعه می‌شود. به عبارت دیگر، دوپایداری نوری برای یک نانوذره پلاسمونیک با در نظر گرفتن پاسخ غیر موضعی هیدرو دینامیکی بررسی می‌شود.

۲. تئوری مسئله

فرض کنید یک نانوذره هیدرو دینامیک فلزی با شعاع R و تابع دی الکتریک ϵ_D که در محیطی با دی الکتریک همگن ϵ_B قرار گرفته است، تحت تابش الکترومغناطیسی تکفام با بسامد ω قرار می‌گیرد (شکل ۱). الکترون‌های رسانش نانوکره فلزی با استفاده از مدل هیدرو دینامیک نیمه کلاسیکی توصیف می‌شوند که پاسخ غیر موضعی را در نظر می‌گیرد. لازم به ذکر است که نام مدل هیدرو دینامیک بدین علت است که گاز الکترونی با استفاده از معادلات هیدرو دینامیک توصیف می‌شود. نقطه شروع برای به دست آوردن میدان الکتریکی موضعی درون و بیرون نانوذره، حل معادلات ماکسول بر حسب چگالی الکترونی آزاد و جریانی الکترون آزاد و معادله هیدرو دینامیک غیر موضعی است. بر این اساس، با استفاده از معادلات ماکسول معادله هیدرو دینامیک غیر موضعی $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -i\omega en$ ، معادله پیوستگی $\frac{\beta^r}{\omega(\omega + i\gamma)} \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{J}) + \vec{J} = \epsilon_s \sigma \vec{E}$ که رابطه بین چگالی الکترون و چگالی جریانی الکترون آزاد را بیان می‌کند، و همچنین استفاده از $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$ و $\vec{J} = -\vec{\nabla} \psi$ مجموعه معادلات زیر به دست می‌آیند [۶]:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla^r n &= k_{NL}^r n, \\ \nabla^r \varphi &= \frac{e}{\epsilon_s \epsilon_\infty} n, \\ \psi &= \frac{1}{i\omega - \gamma} (\epsilon_s \omega_p^r \varphi - e \beta^r n), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

که φ پتانسیل نرده‌ای الکتریکی و ψ پتانسیل نرده‌ای جریانی، n چگالی، $\beta = \sqrt{\frac{r}{\rho}} v_F$ و v_F سرعت فرمی است. همچنین



شکل ۲. دوپایایی نوری حاصل از یک نانوذره پلاسمونیک با در نظر گرفتن پاسخ غیر موضعی.

۳. بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، نانوذرات فلزی از جنس طلا و نقره انتخاب شده است، زیرا این فلزات اتلاف کمی در محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک دارند. علاوه بر این، از نانوذرات نقره یا طلا که بیشترین قابلیت را در پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی دارند، می توان در تولید امواج سطحی موسوم به «پلاسمون سطحی» استفاده کرد [۹].

شکل ۲، دوپایداری نوری حاصل از یک نانوذره طلا و یک نانوذره نقره به شعاع ۶ نانومتر را که در محیطی با گذردهی ۳/۵ قرار گرفته است، نشان می دهد. شکل ۲. الف و ۲. ب به ترتیب پاسخ نوری غیرخطی مربوط به یک نانوذره پلاسمونیک از جنس نقره و طلا را، در حالتی که پاسخ غیر موضعی در نظر گرفته شده است، نشان می دهد. از آنجا که نانوذرات فلزی توانایی کنترل نور در مقیاس نانو را دارند، بنابراین نامزدهای خوبی برای بررسی پدیده نوری دوپایداری هستند. همان طوری که مشاهده می شود، نه تنها آستانه پایین و بالای کلیدزنی متفاوت است، بلکه پهنای ناحیه دوپایدار نیز متفاوت است. این شکل نتیجه می شود که علاوه بر ناحیه دوپایدار، آستانه

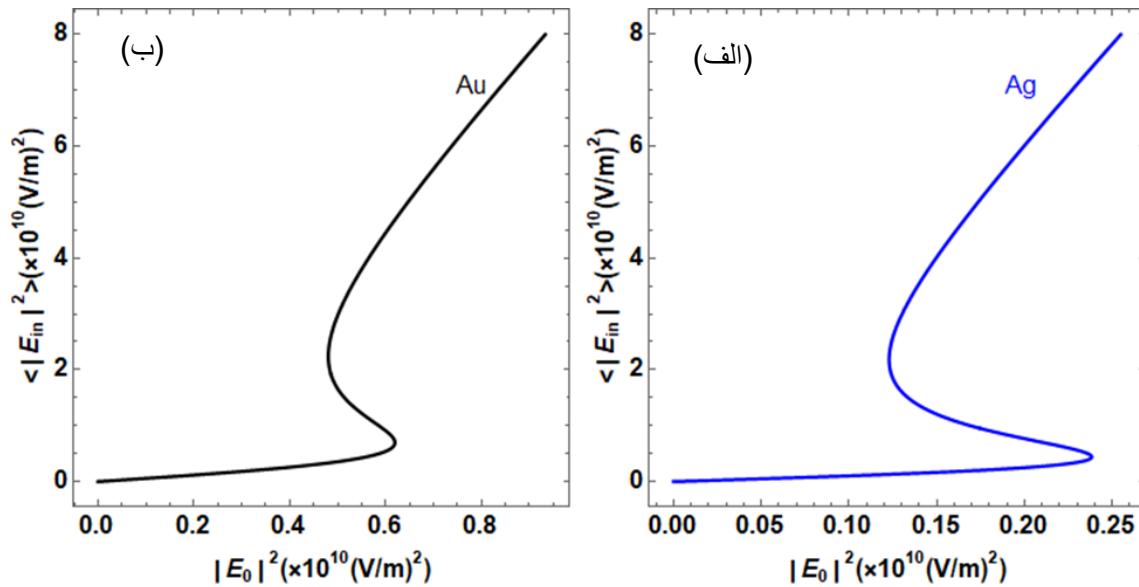
برای بررسی پدیده غیرخطی دوپایایی نوری، متوسط میدان موضعی محاسبه می شود که عبارت است از:

$$\langle |E_{in}|^2 \rangle = \frac{1}{V} \int_V \vec{E}_{in}^* \cdot \vec{E}_{in} dV, \quad (4)$$

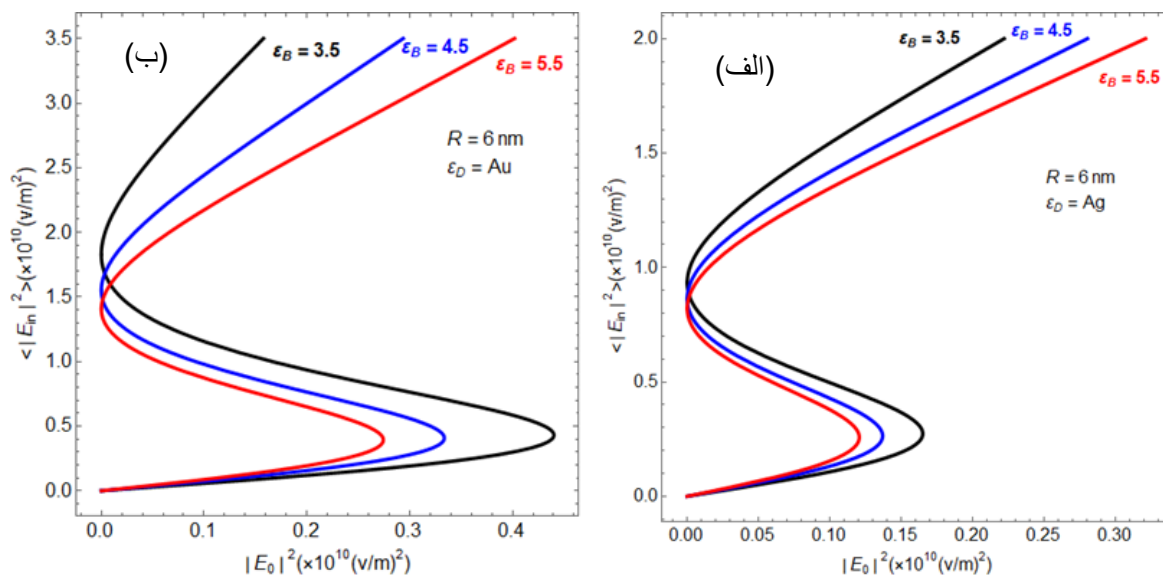
که V حجم است. ذکر این نکته ضروری است که برای داشتن دوپایداری نوری نیاز به محیط اپتیکی غیرخطی همچون یک فلز غیرخطی است. بنابراین بایستی تابع دی الکتریک نانوذره را به شکل غیر خطی نوشت [۸]:

$$\tilde{\epsilon}_m = \epsilon_m + \chi |E|^2 \approx \epsilon_m + \chi \langle |E_{in}|^2 \rangle, \quad (5)$$

که $\chi (\cong 4/4 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2})$ پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم است. همچنین ϵ_m تابع دی الکتریک فلز وابسته به بسامد است که پاسخ موضعی را توصیف می کند و توسط مدل درود، $\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\gamma\omega)$ تعیین می شود [۹]. بایستی توجه شود برای نانوذرات کوچک، بسامد برخورد (بسامد پراکندگی الکترون) به شکل، $\gamma = \gamma_{bulk} + Av_F / R$ ، نوشته شود، که R شعاع ذره، $v_F (= 1/4 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ سرعت فرمی و A یک ثابت است که معمولاً از مرتبه واحد است [۱۰] و [۱۱].



شکل ۳. دوپایایی نوری حاصل از یک نانوذره پلاسمونیک در نظر گرفتن پاسخ غیر موضعی هنگامی که $\gamma = \gamma_{bulk} + Av_F / R$ است.



شکل ۴. اثر محیط اطراف نانوذره روی دوپایایی نوری حاصل از یک نانوذره فلزی هیدرودینامیک با ساختار کروی غیر موضعی.

$$\lambda = 700 \text{ nm}, R = 6 \text{ nm}$$

که توسط محیطی با گذردهی $3/5$ احاطه شده است را نشان می‌دهند. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، وقتی که اثر اندازه ذرات در نظر گرفته شود رفتار طیف دوپایدار حاصل از یک نانوذره پلاسمونیک تغییر می‌کند و آستانه کلیدزنی بالا و پایین و همچنین پهنای ناحیه دوپایدار تغییر کرده و منجر به کاهش ناحیه دوپایدار می‌شود. یکی دیگر از پارامترهایی که به شدت روی کارکرد یک افزاره نوری همچون یک کلید نوری و

کلیدزنی نیز بستگی به نوع فلز پلاسمونیک دارد که برای کاربردهایی همچون حافظه‌های نوری مناسب است [۱۲].

شکل ۳ اثر اندازه نانوذره به علت پراکندگی الکترون‌های رسانش در فلزات روی پاسخ نوری غیر خطی یک نانوذره فلزی، با در نظر گرفتن پاسخ غیرموضعی را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ الف و ۳ ب به ترتیب پاسخ نوری غیرخطی مربوط به یک نانوذره پلاسمونیک نقره و طلا با شعاع ۶ نانومتر

در نتیجه، در این مقاله، دوپایایی نوری برای یک نانوذره پلاسمونیک کروی با استفاده از تئوری هیدرودینامیک بررسی شد. نشان داده شد که آستانه کلیدزنی پایین و بالا، و همچنین پهنای ناحیه پایدار با انتخاب مناسب پارامترهایی همچون ثابت دی الکتریک محیط اطراف و جنس فلز نانوذره قابل تنظیم است، که برای طراحی کلیدهای تمام نوری و حافظه‌های نوری بسیار مناسب است. به عبارت دیگر، با انتخاب مناسب جنس فلز نانوذره و محیطی که درون آن قرار گرفته، شدت و آستانه کلیدزنی و پهنای ناحیه دوپایدار نیز می‌تواند کنترل و تنظیم شود.

یا حافظه نوری اثر می‌گذارد، محیطی است که این وسیله در آن قرار می‌گیرد. بر این اساس، در شکل ۴، اثر محیط اطراف روی دوپایایی نوری حاصل از یک نانوذره فلزی هیدرودینامیک با ساختار کروی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش گذردهی محیط اطراف، آستانه تغییر کرده و منجر به کاهش ناحیه دوپایدار می‌شود، به طوری که برای محیط‌هایی که از نظر اپتیکی غلیظ هستند، این ناحیه به طور فیزیکی دست‌یافتنی نیست. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که با کنترل و تنظیم محیط اطراف نانوذره، می‌توان علاوه بر کنترل آستانه پایین و بالا که برای کلیدهای تمام نوری مفید است، به ناحیه پایدار مورد نظر دست یافت.

مراجع

- Mortensen, *J. Phys. Condens. Matter* **27** (2015) 183204.
8. H Chen, Y Zhang, B Zhang, and L Gao, *Scientific Reports* **6** (2016) 21741.
9. P West, S Ishii, G Naik, N Emani, V Shalaev, and A Boltasseva, *Laser Photonics Rev.* **4** (2010) 795.
10. J A Scholl, A L Koh, and J A Dionne, *Nature* **483** (2012) 421.
11. N Daneshfar and T Naseri, *J. Appl. Phys.* **121** (2017) 023111.
12. N Daneshfar, T Naseri, and H Foroughi, *Plasmonics* **13** (2018) 385.
1. A Pinchuk, *J. Phys. D: Appl. Phys* **36** (2003) 460.
2. N. Daneshfar, H. Foroughi, *Physica E* **83** (2016) 268.
3. X C Jiang, Y W Zhou, D L Gao, Y Huang, and L Gao, *Optics Express* **28** (2020) 17384.
4. F X Wang, F J Rodriguez, H Husu and M Kauranen, *Nonlinear Optics and Quantum Optics*, **40**(2010) 43.
5. Z Noormohammadi, 'Nonlinear Optical properties in metallic nanoparticles: A comparative study' MSc Thesis, Razi University (1399).
6. S Raza, W Yan, N Stenger, M Wubs, and N Asger Mortensen, *Opt. Express* **21** (2013) 27334.
7. S Raza, S I Bozhevolnyi, M Wubs and N Asger