

مطالعه نور کند در یک کامپوزیت متشکل از نانوذرات استوانه‌ای هسته- پوسته تزریق شده در یک دی‌الکتریک

مهسا مرادیگی، نادر دانش‌فر و طیبیه ناصری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی: ndaneshfar@razi.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۴/۱۲)

چکیده

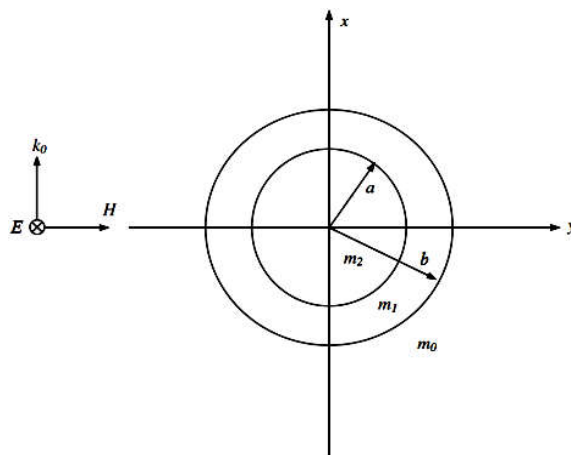
در این مقاله نور کند (فرو سرعت) در یک کامپوزیت متشکل از نانوذرات هسته- پوسته، فلز- نیم رسانای تزریق شده در یک دی‌الکتریک که تحت تابش موج الکترومغناطیس قرار گرفته است، مطالعه می‌شود. عامل کاهش سرعت گروه نور به صورت تابعی از بسامد نور فرودی بحث و تحلیل می‌شود. اثر ضخامت پوسته، جنس مواد تشکیل دهنده هسته و پوسته و همچنین شکل هندسی نانوذرات بر عامل کند کنندگی بررسی می‌شود. اثر برهم‌کنش پلاسمون- اکسایتون روی نور کند یا فروسرعت بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نور کند، فروسرعت، نانوذرات هسته- پوسته

۱. مقدمه

اخیر در سیستم‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. اخیراً، تأثیر ضخامت و مقدار ضریب شکست مؤثر نقص بر روی سرعت نور در بلور فوتونیک یک بعدی بررسی شده است [۱]. هم چنین بررسی‌های دیگری نیز بر روی نور کند در سیستم بلور فوتونیک انجام شده است [۲-۵]. به عنوان مثال، پناهپور و همکاران شفافیت القایی و نور کند را در فراماده‌های پلکستونیک با در نظر گرفتن یک نانوذره نقره کروی که در فاصله مشخص از ذره کروی تشکیل شده از کلراید مس که دارای شعاع یکسان هستند مطالعه کرده‌اند [۶]. همچنین مناسا^۱ ضریب کاهش سرعت نور را برای نانوذرات کروی سه

امروزه کنترل نور و ساخت ادوات مربوط به آن به علت کاربرد در حوزه‌هایی همچون فوتونیک، اپتیک غیرخطی، حافظه‌های نوری و کلید زنی نوری از اهمیت بالایی برخوردار است. در این میان مبحث نور کند (نور فروسرعت) و مدیریت آن برای رسیدن به این هدف و کاربرد های که به دست می‌دهد، مورد توجه قرار گرفته است. با انتشار نور در یک محیط و کاهش سرعت گروه نور، نور کند ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، توانایی کنترل سرعت نور بر حسب اینکه سرعت گروه کاهش یابد، نور کند یا فروسرعت نامیده می‌شود. نور کند در سال‌های



شکل ۱. سطح مقطع نانواستوانه هسته-پوسته با فرض تابش عمودی موج بر محور استوانه و موازی بودن میدان الکتریکی با محور آن.

الکتروپدینامیک نانوذرات استوانه‌ای با حل معادلات ماکسول مورد بررسی قرار گرفته می‌شود تا بتوان ضرایب پراکندگی را به دست آورد. سپس با معرفی ضریب شکست مؤثر سیستمی متشکل از نانوذرات استوانه‌ای تزریق شده در محیطی دی‌الکتریک که وابسته به ضریب پراکندگی است، به بررسی نور کند پرداخته می‌شود. در پایان نیز مقایسه‌ای بین ضریب کاهش سرعت نور در سیستم مذکور با سیستم دیگری شامل نانوذرات کروی هسته-پوسته تزریق شده در همان محیط، انجام می‌شود. مطابق شکل ۱، سطح مقطع یک نانو ذره استوانه‌ای هسته-پوسته هم‌مرکز متشکل از هسته‌ای به شعاع a و ضریب شکست m_1 و پوسته‌ای در اطراف هسته به شعاع b و ضریب شکست m_2 که این سیستم در محیطی با ضریب شکست m_0 قرار گرفته است را نشان می‌دهد. در این شکل محور z منطبق با محور نانواستوانه در نظر گرفته شده است و مختصات بردارهای موج (k_0) و میدان الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) نشان داده شده‌اند.

معادلات موج برای برای چنین سیستمی به شکل زیر است:

$$\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 m_0^2 \vec{E} = 0, \quad \nabla^2 \vec{B} + k_0^2 m_0^2 \vec{B} = 0, \quad (1)$$

که در آن $k_0 = \frac{\omega}{c}$ و $m_0^2 = \epsilon$ است.

با فرض آن که میدان الکتریکی فرودی موازی با محور استوانه و در جهت z باشد $(\vec{E} = E_z(\rho, \phi)\hat{e}_z)$ ، برای پاسخ معادلات

لایه تزریق شده در محیط دی‌الکتریک بررسی کرده است [۷] و [۸]. لازم به ذکر است که امروزه سیستم‌های هیبریدی متشکل از فلز-نیم‌رسانا به علت جفت‌شدگی قوی بین پلاسمون‌های فلز و اکسایتون‌های نیم‌رسانا به علت کاربردشان در طراحی و توسعه ابزارهای نوری نانومقیاس و نانو سنسورها و همچنین کاربرد در نانوفتونیک و نانوپلاسمونیک بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۹].

در مقاله حاضر، برای نخستین بار نور کند یا فرورسعت برای نانوذرات استوانه‌ای هسته-پوسته که هسته از جنس فلز و پوسته یک نیم‌رسانای کلراید مس ($CuCl$) که دارای تشدید اکسایتونی قوی در حدود 3.2×10^2 eV و همچنین پهنای طیفی کوچکی است، مطالعه می‌شود. در حقیقت، انتخاب فلز و نیم‌رسانا به علت جفت‌شدگی بین پلاسمون فلز و اکسایتون نیم‌رسانا است. با توزیع نانو ذرات استوانه‌ای هسته-پوسته در محیطی با ثابت دی‌الکتریک به بررسی نور فرورسعت پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در طراحی این سیستم، فرض شده است که توزیع نانو ذرات استوانه‌ای به گونه‌ای باشد که جهت تابش موج، عمود بر محور نانوذرات استوانه‌ای و تابش میدان الکتریکی موازی با آنها باشد.

۲. الکتروپدینامیک نانوذرات استوانه‌ای هسته-پوسته

به منظور بررسی پارامتر کاهنده سرعت نور، در ابتدا

جدول ۱. معرفی پارامترهای تابع دی‌الکتریک برای فلزات طلا، نقره و آلومینیوم [۱۱].

نوع ماده	$\epsilon_{p,\infty}$	ω_p (ev)	γ (ev)
نقره	۳٫۷	۲٫۹	۰٫۰۲
طلا	۶٫۹	۸٫۹	۰٫۰۷
آلومینیوم	۰٫۷	۱۲٫۷	۰٫۱۳

که با استفاده از معادلات فوق می‌توان ضرایب مجهول b_{nII} ، $b_n^{(v)}$ ، $B_n^{(v)}$ ، $b_n^{(l)}$ را به دست آورد.

در این پژوهش، برای نواحی مختلف نانوذرات از فلزات مختلف و نیم‌رسانای $CuCl$ استفاده شده است که در این پیکربندی برای تابع دی‌الکتریک فلز از تقریب درود استفاده شده [۷ و ۸] که رابطه آن به شکل معادله (۸) است و مقادیر پارامترهای موجود در این رابطه برای فلزات طلا، نقره و آلومینیوم مطابق جدول ۱ است [۱۱]:

$$\epsilon^{(metal)}(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (8)$$

همچنین برای تابع دی‌الکتریک نیم‌رسانا از تقریب لورنتس استفاده شده که رابطه آن به شکل زیر است:

$$\epsilon^{(CuCl)}(\omega) = \epsilon_{ex} + \frac{f\gamma}{\omega_s - \omega - i\gamma}, \quad (9)$$

که مقادیر پارامترهای موجود در این رابطه برای $CuCl$ عبارتند از [۷ و ۸]:

$$\epsilon_{ex} = ۵٫۵۹ \text{ و } f = ۶۳۲, \hbar\gamma = ۴۹٫۲۰۶ \mu eV, \hbar\omega_s = ۳٫۳۰۲۱۶ eV$$

۳. تابع دی‌الکتریک مؤثر و عامل کاهش سرعت نور

تغییرات سرعت گروه نور در محیط‌های مختلف پاشنده و غیرپاشنده از اهمیت زیادی برخوردار است. سرعت نور در محیط‌های غیرپاشنده مانند خلأ یکتاست و به ازای بسامدهای مختلف یک نور، سرعت گروه تغییری ندارد و همواره یک عدد است؛ مانند سرعت نور در خلأ که برابر با c است. اما در محیط‌های پاشنده، برای سرعت گروه به ازای بسامدهای مختلف از یک نور در ماده، ضریب شکست‌های متفاوتی خواهیم داشت. آهنگ پیشروی پوش مدولاسیون را سرعت

موج در مختصات استوانه‌ای (ρ, φ, z) ، می‌توان با جداسازی متغیرها، به رابطه زیر برای میدان الکتریکی رسید [۱۰]:

$$E_z(\rho, \varphi) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n Z_n(k\rho) e^{in\varphi} \\ = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n Z_n(m_s k_s \rho) e^{in\varphi}, \quad (2)$$

بدین ترتیب، میدان الکتریکی برای نواحی مختلف استوانه‌ای هسته-پوسته، به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{E}_z &= E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n \{ J_n(m_s k_s \rho) \\ &- b_{nII} H_n(m_s k_s \rho) \} e^{in\varphi} \hat{e}_z, & \rho \geq b \\ \bar{E}_z &= E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n \{ B_n^{(l)} J_n(m_l k_l \rho) \\ &- b_n^{(l)} H_n(m_l k_l \rho) \} e^{in\varphi} \hat{e}_z, & a \leq \rho \leq b \\ \bar{E}_z &= E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n \{ B_n^{(v)} J_n(m_v k_v \rho) \} \\ &e^{in\varphi} \hat{e}_z, & \rho \leq a \end{aligned} \right. \quad (3)$$

که $B_n^{(v)}$ ، $B_n^{(l)}$ ، $b_n^{(l)}$ ، b_{nII} پراکنندگی برای نواحی مختلف نانو استوانه هسته-پوسته، $H_n = J_n + iY_n$ و E_0 دامنه میدان است. با اعمال شرایط پیوستگی میدان الکتریکی و مشتق آن، معادلات زیر حاصل می‌شوند:

$$\bar{E}_z \Big|_{\rho=b} = \bar{E}_z \Big|_{\rho=b} \\ b_{nII} m_s H_n(m_s k_s b) - b_n^{(l)} m_l H_n(m_l k_l b) \\ + B_n^{(l)} m_l J_n(m_l k_l b) = m_s J_n(m_s k_s b), \quad (4)$$

$$\bar{E}_z \Big|_{\rho=a} = \bar{E}_z \Big|_{\rho=a} \\ - b_n^{(l)} m_l H_n(m_l k_l a) + B_n^{(l)} J_n(m_l k_l a) \\ - B_n^{(v)} m_v J_n(m_v k_v a) = 0, \quad (5)$$

$$\bar{E}_z \Big|_{\rho=b} = \bar{E}_z \Big|_{\rho=b} \\ b_{nII} m_s H_n'(m_s k_s b) - b_n^{(l)} m_l H_n'(m_l k_l b) \\ + B_n^{(l)} m_l J_n'(m_l k_l b) = m_s J_n'(m_s k_s b), \quad (6)$$

$$\bar{E}_z \Big|_{\rho=a} = \bar{E}_z \Big|_{\rho=a} \\ - b_n^{(l)} m_l H_n'(m_l k_l a) + B_n^{(l)} m_l J_n'(m_l k_l a) \\ - B_n^{(v)} m_v J_n'(m_v k_v a) = 0 \quad (7)$$

چگالی تعداد نانوذرات، c سرعت نور در خلأ، $m_0 = \sqrt{\epsilon_0}$ ضریب شکست مربوط به ناحیه اطراف نانوذرات، $n_{eff}(\omega) = \sqrt{\epsilon_{eff}(\omega)}$ ضریب مؤثر شکست، L طول نانو ذرات استوانه‌ای (برای $L \gg R$ که R شعاع استوانه است در محاسبات $L = 10 \mu m, R = 20 nm$ فرض شده‌اند)،

$$s_{sphere}(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) a_{nl},$$

$a_{nl}(\omega)$ ضریب پراکندگی $s_{cylinder}(\omega) = \frac{1}{2\pi} [b_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (b_{nll})]$ نانوذرات کروی و $b_{nll}(\omega)$ ضریب پراکندگی نانوذرات استوانه‌ای هستند. همانند ضرایب پراکندگی نانوذرات استوانه‌ای هسته-پوسته در قسمت قبل که محاسبه شدند، ضریب پراکندگی نانوذرات کروی هسته-پوسته را نیز می‌توان به دست آورد (پیوست الف).

۴. بحث و نتیجه‌گیری

شکل ۲، اثر شعاع هسته نانوذرات بر میزان کاهش سرعت نور در سیستمی شامل نانو استوانه‌های هسته-پوسته تزریق شده در محیطی از جنس شیشه با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 2.25$ با فرض $b = 20 nm$ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که اگر جنس پوسته‌ها از نقره و هسته‌ها $CuCl$ باشند به علت جفت‌شدگی پلاسمون-اکسایتون، با افزایش شعاع هسته فلزی در نانوذرات استوانه‌ای، به علت افزایش جذب، ضریب کاهش سرعت نور کاهش می‌یابد. بنابراین، کاهش سرعت نور منجر به افزایش شدت میدان می‌شود. حال آن که در بازه انرژی $3.362 - 3.355 eV$ ، این کاهش در بسامدهای بالاتر (انتقال آبی) و در بازه انرژی $3.268 - 3.263 eV$ در انرژی‌های کمتری (انتقال قرمز) صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که جفت‌شدگی بین پلاسمون‌های فلز و اکسایتون‌های نیم‌رسانا باعث شکافتگی خط اکسایتون شده و منجر به جابه‌جایی بسامد تشدید پلاسمون می‌شود.

در شکل ۳، اثر جنس هسته نانو ذرات بر میزان کاهش سرعت نور در سیستمی شامل نانو استوانه‌های هسته-پوسته

گروه نامند.

با توجه به این که $v_g^{-1} = \frac{\partial k}{\partial \omega}$ و بردار موج مؤثر وابسته به بسامد فوتون $k_{eff} = n_{eff}(\omega) \omega / c$ است، خواهیم داشت:

$$v_g^{-1} = \frac{\partial k_{eff}}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \left(n_{eff}(\omega) + \omega \frac{\partial n_{eff}(\omega)}{\partial \omega} \right) = v_p^{-1} + \frac{S(\omega)}{c}, \quad (10)$$

طبق رابطه اخیر، $S(\omega)$ یک عامل کاهشنده یا افزایشنده برای سرعت گروه است و اگر دارای مقدار مثبت باشد، سرعت گروه کمتر از سرعت فاز خواهد بود و شاهد ایجاد نور کند یا فرورسعت هستیم [۷]. مطابق رابطه فوق، یک پالس نوری با بسامد ω دارای ضریب شکست گروه $n_g = n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}$ (با افزایش بسامد، ضریب شکست کاهش می‌یابد) پاشندگی بی‌هنجار یا غیرعادی است و اگر $\frac{dn}{d\omega} > 0$ (با افزایش بسامد، ضریب شکست افزایش یابد) پاشندگی هنجار یا عادی است [۱۲].

برای آن که عامل کاهش یا افزایش سرعت گروه نور برای یک کامپوزیت (سیستم نانوذرات کروی یا استوانه‌ای هسته-پوسته فلز-نیم‌رسانای تزریق شده در دی‌الکتریک) بررسی شود، لازم است که ضریب شکست مؤثری که در بردارنده نانوذرات و محیط اطراف آنهاست، را محاسبه کنیم. دویل نشان داد که برای نانوذرات کروی، می‌توان تابع دی‌الکتریک مؤثری معرفی کرد که از رابطه کلازیوس-موسوتی به دست می‌آید [۱۳ و ۱۴]. این نتیجه به نانو ذرات استوانه‌ای نیز قابل تعمیم است. بنابراین ضریب شکست مؤثر برای نانوذرات کروی و استوانه‌ای به ترتیب به شکل زیر نوشته می‌شوند [۱۵-۲۰]:

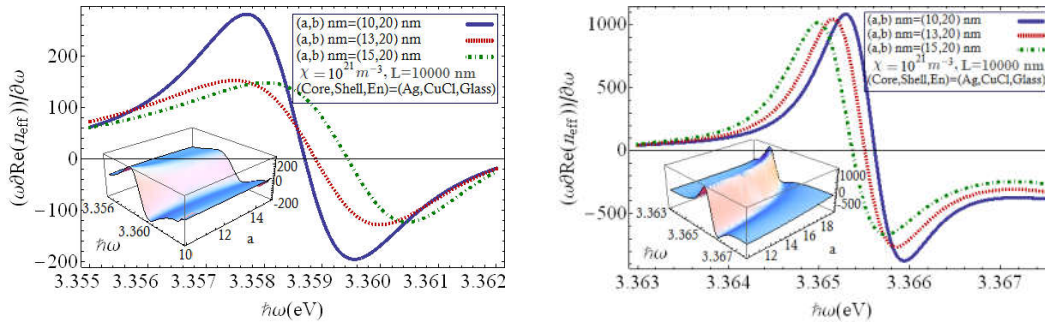
$$n_{eff}^2(\omega) = m_0^2 \frac{\omega^3 - 2irs_{sphere}(\omega)}{\omega^3 + irS_{sphere}(\omega)}, \quad (11)$$

$$n_{eff}^2(\omega) = m_0^2 \frac{\omega^3 - irS_{cylinder}(\omega)}{\omega^3 + irS_{cylinder}(\omega)}, \quad (12)$$

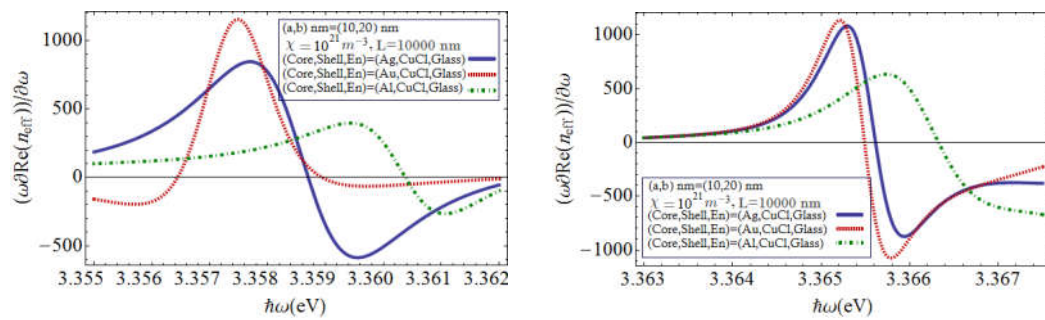
که در آن $r_{cylinder} = \pi L N c^2 m_0^{-2}$ ، $r_{sphere} = 2\pi c^2 m_0^{-3}$

۱. Doyle

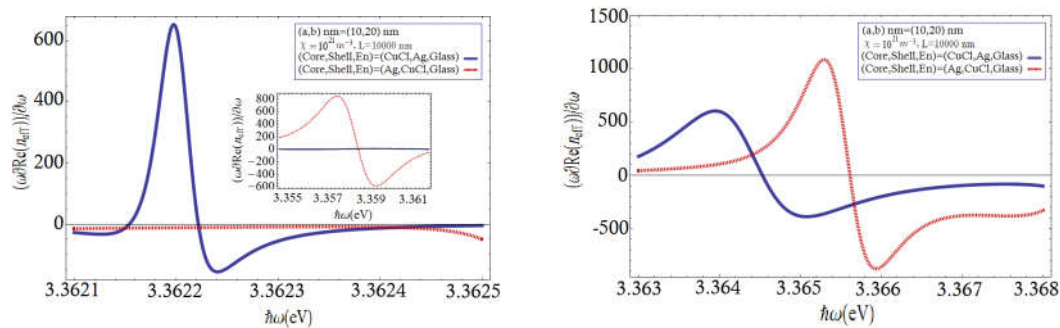
۲. Clausius-Mosotti



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اثر شعاع هسته نانوذرات بر میزان کاهش سرعت نور در نانوذرات استوانه‌ای هسته- پوسته (فلز- نیم‌رسانا) تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = ۲/۲۵$ با فرض $\chi = 10^{21} m^{-3}$ و $\mathcal{N} = ۱۰^{۲۱} m^{-3}$ و $b = ۲۰ nm$



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اثر جنس هسته نانوذرات بر میزان کاهش سرعت نور در نانوذرات استوانه‌ای هسته- پوسته (فلز- نیم‌رسانا) تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = ۲/۲۵$ با فرض $\chi = 10^{21} m^{-3}$ و $\mathcal{N} = ۱۰^{۲۱} m^{-3}$ و $b = ۲۰ nm$ و $a = ۱۰ nm$

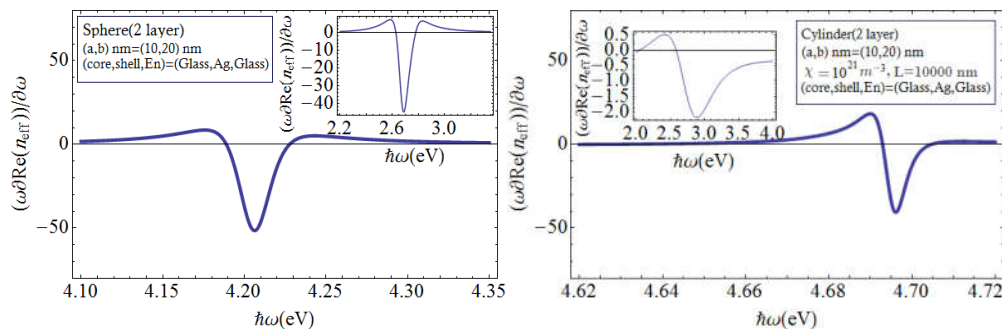


شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بررسی جنس هسته و پوسته نانوذره بر میزان کاهش سرعت نور در نانوذرات استوانه‌ای هسته- پوسته تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = ۲/۲۵$ با فرض $\chi = 10^{21} m^{-3}$ و $\mathcal{N} = ۱۰^{۲۱} m^{-3}$ و $b = ۲۰ nm$ و $a = ۱۰ nm$

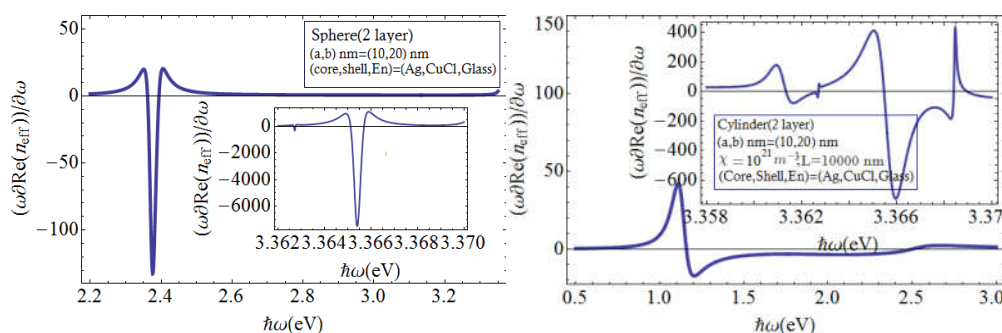
آلومینیوم در انرژی کمتری افزایش یافته در حالی که نسبت به طلا انتقال آبی صورت گرفته است. بنابراین برای تنظیم طول موج مورد نظر می‌توان از فلزات پلاسمونیک در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی برای کاربردهای خاص استفاده کرد.

شکل ۴، اثر جنس لایه‌های مختلف نانوذرات را بر میزان کاهش سرعت نور در سیستمی شامل نانو ذرات استوانه‌ای

تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = ۲/۲۵$ با فرض همان گونه $b = ۲۰ nm$ و $a = ۱۰ nm$ نشان داده شده است. که نتایج نشان می‌دهند، با انتخاب جنس هسته از فلز طلا در بازه انرژی $eV (۳/۳۶۸ - ۳/۳۶۳)$ ، میزان کاهش سرعت نور در بسامد پایینی نسبت به نقره و آلومینیوم افزایش می‌یابد. اگر جنس فلز از نقره باشد ضریب کاهش سرعت نور نسبت به



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه میزان کاهش سرعت نور در نانو ذرات استوانه‌ای و کروی دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 2/25$ - فلز تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 2/25$ با فرض $\chi = 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ، $a = 10 \text{ nm}$ و $b = 20 \text{ nm}$.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه میزان کاهش سرعت نور در نانو ذرات استوانه‌ای و کروی فلز- نیم‌رسانای تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 2/25$ با فرض $\chi = 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ، $a = 10 \text{ nm}$ و $b = 20 \text{ nm}$.

دی‌الکتریک نشان داده شده است. این نمودارها، مقایسه‌ای بین میزان کاهش سرعت نور در سیستمی متشکل از نانوذرات استوانه‌ای و نانوذرات کروی هسته- پوسته تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 2/25$ با فرض $a = 10 \text{ nm}$ و $b = 20 \text{ nm}$ را نشان می‌دهند. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، برای نانوذرات کروی و نانوذرات استوانه‌ای دی‌الکتریک-فلز، در بازه‌های انرژی $2-4 \text{ eV}$ و $4-5 \text{ eV}$ ، کاهش در سرعت نور دیده می‌شود که ضریب کاهش سرعت نور در نانوذرات کروی نسبت به نانوذرات استوانه‌ای بیشتر است. برای نانوذرات فلز- نیم‌رسانا نیز با توجه به شکل ۶، در سه بسامد مختلف سرعت نور با کندی مواجه می‌شود که این وضعیت در نانوذرات کروی قوی‌تر و در انرژی بیشتری رخ می‌دهد.

در حقیقت در شکل ۵ برهم‌کنش پلاسمون- پلاسمون

هسته- پوسته تزریق شده در محیطی با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 2/25$ با فرض $a = 10 \text{ nm}$ و $b = 20 \text{ nm}$ نمایش می‌دهد. در بازه‌های انرژی نشان داده شده برای نانواستوانه‌های نیم‌رسانا- فلز به علت وجود فلز در پوسته و افزایش جذب، میزان کاهش سرعت نور نسبت به فلز- نیم‌رسانا کمتر خواهد بود. این شکل به وضوح جفت‌شدگی قوی پلاسمون- اکسایتون و اثر آن روی پارامتر کاهش سرعت نور را نشان می‌دهد. هنگامی که هسته نیم‌رسانا است و پوسته فلز پلاسمونیک، جذب تشدید در ناحیه بسامدهای پایین قرار دارد. در صورتی که هسته فلز انتخاب شود و پوسته نیم‌رسانا، قله جذب به سمت بسامدهای بیشتر جابه‌جا می‌شود که این بدین معنی است که با تغییر هسته از نیم‌رسانا به فلز انتقال آبی اتفاق می‌افتد.

در شکل ۵ و ۶، اثر شکل هندسی نانوذرات بر میزان کاهش سرعت نور در سیستمی متشکل از نانوذرات تزریق شده در

$$\bar{E} = E_r(r, \theta) \hat{e}_r + E_\theta(r, \theta) \hat{e}_\theta, \quad (15\text{-الف})$$

$$B_{\varphi, n}(r, \theta) = z_n(kr) P_n^m(\cos(\theta)). \quad (15\text{-ب})$$

اگر فرض کنیم که F نشانگر هر ناحیه باشد با در نظر گرفتن $x = r/b$ و $u_F = bk_F$ که شعاع پوسته است، k_F عدد موج مختلط مربوط به ناحیه F است که برابر است با $k_F = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_F(\omega)}$. $m_F(\omega) = \sqrt{\epsilon_F(\omega)}$ ضریب شکست مربوط به هر ناحیه است، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به شکل زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \bar{E}_n(x, \theta) = & -\frac{i u_0}{(u_F)^2 x} \left[\left[F_n^{(0)} J_n(u_F x) \right. \right. \\ & \left. \left. + F_n^{(v)} Y_n(u_F x) \right] G_n(\cos(\theta)) \hat{e}_r \right. \\ & \left. + \left\{ F_n^{(0)} [(u_F x) J_{n-1}(u_F x) - n Y_n \right. \right. \\ & \left. \left. (u_F x)] + F_n^{(v)} [(u_F x) J_{n-1}(u_F x) \right. \right. \\ & \left. \left. - n Y_n(u_F x)] \right\} P_n^1(\cos(\theta)) \hat{e}_\theta \right], \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_n(x, \theta) = & \left[F_n^{(0)} J_l(u_F x) + F_n^{(v)} Y_n(u_F x) \right] \\ & P_n^1(\cos(\theta)) \hat{e}_\varphi, \quad (17) \end{aligned}$$

که P_l^m چند جمله‌ای‌های لژاندر و G_l به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} G_n(s) = & \frac{d}{ds} \left[\sqrt{1-s^2} P_n^1(s) \right] = \frac{n}{\sqrt{1-s^2}} \\ & \left[s P_n^1(s) - P_{n+1}^1(s) \right], \quad (18) \end{aligned}$$

میدان‌ها برای نواحی مختلف تفکیک می‌شوند، به عنوان نمونه پاسخ‌های میدان مغناطیسی برای نواحی مختلف به شکل معادله (۱۹) تفکیک می‌شوند و در ادامه شرط پیوستگی میدان‌ها اعمال می‌شود.

$$\begin{cases} \bar{B}_{\varphi, n} = C_n J_n(u_r x), & 0 \leq r \leq a \\ \bar{B}_{\varphi, n} = B_n^{(0)} J_n(u_r x) + B_n^{(v)} Y_n(u_r x), & a \leq r \leq b \\ \bar{B}_{\varphi, n} = J_n(u_r x) + a_{nl} H_n^{(0)}(u_r x), & r \geq b \end{cases} \quad (19)$$

که $H_n^{(0)} = J_n + i Y_n$ است.

با اعمال شرایط مرزی، یعنی پیوستگی \bar{B}_φ و همچنین پیوستگی \bar{E}_θ در $r = a$ و $r = b$ ضرایب مجهول C_n ، $B_n^{(0)}$ ، $B_n^{(v)}$ و a_{nl} به دست می‌آیند.

وجود دارد در صورتی که در شکل ۶ برهم‌کنش پلاسمون-اکسایتون غالب است. و برهم‌کنش قوی پلاسمون-اکسایتون منجر به ظهور قله‌های تشدید جدیدی می‌شود.

در نتیجه، در این مقاله، برای نخستین بار نور کند یا فرورسعت برای نانوذرات استوانه‌ای هسته-پوسته تزریق شده در محیط دی‌الکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. اثر ضخامت و جنس مواد تشکیل دهنده نانوذرات استوانه‌ای هسته-پوسته بر ضریب کاهنده سرعت نور مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با بررسی نور فرورسعت یا نور کند در سیستمی متشکل از نانوذرات کروی هسته-پوسته تزریق شده در همان محیط، عامل کاهش سرعت گروه نور برای این دو سیستم مقایسه شد. نشان داده شد که کاهش سرعت نور برای هر دو سیستم با یک جابه‌جایی در انرژی در بسامدهای مختلف رخ می‌دهد که می‌توان از این خاصیت به عنوان یک حسگر استفاده کرد. علاوه بر این، از آنجا که هندسه نانوذره در کاربردهایی همچون حافظه‌های نوری، کلیدزنی نوری و مخابرات نوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بنابراین، در بعضی کاربردها می‌توان به جای نانوذرات کروی از نانوذرات استوانه‌ای استفاده کرد.

پیوست (الف)

برای بررسی الکترودینامیک نانو ذرات کروی هسته-پوسته هم مرکز متشکل از هسته‌ای به شعاع a و ضریب شکست m_1 و پوسته‌ای در اطراف هسته به شعاع b و ضریب شکست m_2 که این سیستم در محیطی با ضریب شکست m_0 قرار گرفته است، معادلات موج برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی فرودی به صورت $e^{-i\omega t}$ ، به شکل زیر است:

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0, \quad \nabla^2 \bar{B} + k^2 \bar{B} = 0, \quad (13)$$

حل معادلات فوق در مختصات کروی با در نظر گرفتن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (با لحاظ کردن تقارن سمتی) که در فرمول (۱۴) و (۱۵) داده شده‌اند، به شکل رابطه (۱۶) است.

$$\bar{B} = B_\varphi(r, \theta) \hat{e}_\varphi, \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 & B_n^{(l)}(u_*)^\gamma [u_\gamma J_{n-1}(u_\gamma) - n J_n(u_\gamma)] \\
 & + B_n^{(\gamma)}(u_*)^\gamma [u_\gamma J_{n-1}(u_\gamma) - n J_n(u_\gamma)] \\
 & - a_{nl}(u_*)^\gamma [u_\gamma J_{n-1}(u_\gamma) - n J_n(u_\gamma)] \\
 & = (u_\gamma)^\gamma [u_\gamma J_{n-1}(u_\gamma) - n J_n(u_\gamma)].
 \end{aligned} \tag{۲۳}$$

$$B_n^{(l)} J_n \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) + B_n^{(\gamma)} Y_n \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) - C_n J_n \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) = 0, \tag{۲۰}$$

$$B_n^{(l)} J_n(u_\gamma) + B_n^{(\gamma)} Y_n(u_\gamma) - a_{nl} H_n^{(l)}(u_*) = J_n(u_*), \tag{۲۱}$$

$$\begin{aligned}
 & B_n^{(l)}(u_\gamma)^\gamma \left[u_\gamma \frac{a}{b} J_{n-1} \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) - n J_n \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) \right] \\
 & + B_n^{(\gamma)}(u_\gamma)^\gamma \left[u_\gamma \frac{a}{b} J_{n-1} \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) - n J_n \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) \right] \\
 & - C_n (u_\gamma)^\gamma \left[u_\gamma \frac{a}{b} J_{n-1} \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) - n J_n \left(u_\gamma \frac{a}{b} \right) \right] = 0,
 \end{aligned} \tag{۲۲}$$

مراجع

۱. ع بانج و م اسدنیا فرد جهرمی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۳۱۶ (۱۳۹۵) ۸۷
۲. A R Bananej and M Asadnia-Fard-Jahromi, *Iranian Journal of Physics Research* **16** 3 (2016) 87.
۳. V Varmazyari, H Habibiyan, and H Ghaforifard, *Transactions On. App. Phys.* **1** (2014) 55.
۴. V Varmazyari, H Habibiyan, and H Ghaforifard, *JOSA B* **4** (2014) 771.
۵. V Varmazyari, H Habibiyan, and H Ghaforifard, *J. American Science* **9** (2013) 84.
۶. V Varmazyari, H Habibiyan, and H Ghaforifard, *Appl. Optics.* **26** (2013) 64.
۷. A Panahpour, Y Silani, M Farrokhan, A V Lavrinenko, and H Latifi, *JOSA B* **29** (2012) 2212.
۸. J T Manassah, *Phys. Rev. A* **87** (2013) 053845.
۹. J T Manassah, *Phys. Rev. A* **88** (2013) 535803.
۱۰. N T Fofang, N K Grady, Z Fan, A O Govorov, and N J Halas, *Nano. Lett.* **11** (2011) 1556.
۱۱. Y B Wu, Y F Wang, and X W Cao, *J. Appl. Phys.* **105** (2009) 023103.
۱۲. P West, S Ishii, G Naik, N Emani, V Shalae, and A Boltasseva, *Laser Photonics Rev.* **4** (2010) 795.
۱۳. E Hecht, *Optics*, 4th ed, Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley, San Francisco (2002).
۱۴. W T Doyle, *Phys. Rev. B* **39** (1989) 9852.
۱۵. J D Jackson, "Classical electrodynamics", 3rd edn. Wiley, New York (1996).
۱۶. A Sihvola and IV Lindell, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* **8** (1989) 37.
۱۷. A D Yaghjian, *IEEE* **68** (1980) 2.
۱۸. A D Yaghjian, *American J. Phys.* **53** (1985) 01731.
۱۹. C F Bohren and D R Huffman, "Absorption and scattering of light by small particles", John Wiley (1998).
۲۰. D Stroud and F P Pan, *Phys. Rev. B* **17** (1978) 4.
۲۱. J T Manassah, *Plasmonics* **9** (2015) 11468.