

اثر قطبش نور بر خواص ترموپلاسمونیک آرایه‌ای از نانوذرات دایمر شش گوشه

فهیمة نوری کوهانی و عباس آذریان

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم

پست الکترونیکی: f.noori@stu.qom.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷)

چکیده:

کاربرد نانوذرات به علت خواص ویژه آنها در سال‌های اخیر بیشتر شده است. یکی از خواص نانوذرات این است که در اثر تابش امواج الکترومغناطیسی به آنها تولید، گرما می‌کنند. با تابش نور بر سطح نانوذرات فلزی به علت برهمکنش الکترون‌های رسانش نانوذره فلزی با نور، پلاسمون‌های سطحی تشکیل می‌شود و آنها را تبدیل به نانومنیع‌های گرمایی می‌کند. شدت گرمای تولید شده و تغییرات دما را می‌توان با عواملی از جمله پیکربندی خاصی از نانوذرات به صورت آرایه، تنظیم کرد. در این مقاله، به ارائه نتایج شبیه‌سازی تحلیلی توزیع دما در آرایه‌ای مسطح از نانوذرات دایمر شش گوشه از جنس طلا پرداخته می‌شود و بررسی می‌شود که با تغییر زاویه قطبش نور فرودی، مقدار و توزیع دمایی آرایه چه تغییری خواهد کرد. زاویه قطبش نور فرودی صفر درجه (موازی با محور دایمر) و ۴۵ درجه و ۹۰ درجه (عمود بر محور دایمر) در نظر گرفته می‌شود و با توجه به طول موج‌های تشدید در هر قطبش، توزیع و مقدار دما شبیه‌سازی شده است. در قطبش ۹۰ درجه در طول موج ۱۳۳۴ نانومتر، جذب نور بیشتر است و در این طول موج تغییرات دمایی زیادی در آرایه ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پلاسمونیک، تشدید پلاسمون سطحی، ترموپلاسمونیک، نانوذرات دوتایی شش گوشه، آرایه‌ای از نانوذرات، قطبش

۱. مقدمه

پیکربندی و چینش متنوع استفاده می‌شود. در دهه گذشته، تحقیقات زیادی در مورد آرایه‌های نانوذرات فلزی گزارش شده است. در زمینه‌های تحقیقاتی مانند نانوشیمی، نانوحسگرهای زیستی، تولید گرما، افزایش فلورسانس، پراکندگی رامان ارتقا یافته سطحی، جفت‌شدگی نوری آلی- معدنی و ... ردپایی از کاربردهای آنها دیده می‌شود [۳].

اولین بار به طور تجربی، گووروف، ریچاردسون و همکارانش نشان دادند که هنگام نوردهی به تعداد زیادی از نانوذرات طلا پراکنده شده در یک محلول، توزیع دما در اطراف هر نانوذره قرار نگرفته و این توزیع در سراسر مجموعه آرایه نانوذرات به صورت یکنواخت می‌باشد. همچنین می‌توان با چینش خاصی از نانوذرات در طول موج‌های خاصی، دمایی کاملاً موضعی تولید کرد. این توزیع دما می‌تواند در کاربردهای متنوع استفاده

هنگامی که نور به نانوذرات فلزی، برخورد می‌کند، به دلیل جذب نور توسط ذرات، نانوذرات به نانو منابع بسیار کارآمد گرما تبدیل می‌شوند و اگر طول موج نور فرودی با طول موج تشدید ذرات متناسب باشد، تولید گرما بیشتر خواهد بود [۱]. گرمایی که نانوذرات تولید می‌کنند کاربردهای متنوع و متعدد و همچنین دستاوردهای امیدوارکننده در نانو تکنولوژی دارد؛ از جمله می‌توان درمان سرطان به روش گرمانوری، نانو جراحی، تحویل دارو، تصویربرداری گرمانوری، نانوشیمی، نانوفیزیک، کنترل و توزیع دما در مقیاس نانو و ... را نام برد [۲].

علاوه بر استفاده از نانوذرات فلزی در شکل‌ها و اندازه‌های متعدد از آنها، امروزه از آرایه‌هایی از نانوساختارهای فلزی، با

خواص ترموپلاسمونیک آرایه دویبعدی از نانوذرات دایمر شش ضلعی که حالت‌های پلاسمونی متعدد دارند، استفاده شده است. با تغییر قطبش نور فرودی، به بررسی تغییرات گرمایی که توسط آرایه ایجاد می‌شود پرداخته می‌شود و نتایج با یک دایمر شش گوشه مقایسه خواهد شد.

این نانوذرات به صورت دایمر با طول 214 نانومتر است که از دو ذره شش گوشه با فاصله $g = 4nm$ ساخته شده است و هر ذره با شعاع محاطی $L_1 = 60nm$ و دارای حفره‌ای به صورت نامتقارن با شعاع $L_2 = 40nm$ است و مرکز حفره از مرکز نانوذرات فاصله $s = 18nm$ دارد و همچنین هر دو نانوذره دایمر از جنس طلا هستند و با استفاده از داده‌های جانسون و کریستی خواص فلز طلا [۷]، توصیف شده است (شکل ۱)، که معمولاً در یک آرایه، ذرات بر روی یک بستر قرار می‌گیرند. در اینجا از زیرلایه عایق آلومینا استفاده شده است (شکل ۲).

قبل از ارائه نتایج، به بیان چارچوب‌های تئوری اپتیک و ترمودینامیکی که برای بررسی پدیده‌های ترموپلاسمونیک نیازمند است پرداخته می‌شود.

۲. مبانی نظری

هنگامی که یک نانوذره فلزی در معرض نور قرار می‌گیرد، مقداری از نور را جذب و مقداری از آن را بازتاب می‌کند. رابطه توان جذب نانوذره به صورت زیر است:

$$P_{abs} = \frac{1}{4} \text{Re} \int J^* \cdot E_{int} dv, \quad (1)$$

که dv المان حجم و E_{int} میدان الکتریکی نور فرودی است. رابطه سطح مقطع جذب را با توجه به رابطه توان تابش می‌توان به این صورت تعریف کرد:

$$\sigma_{abs} = \frac{P_{abs}}{|S_i|} = k \text{Im}(\alpha), \quad (2)$$

که $S_i = \frac{1}{\eta} |E_i|^2$ اندازه بردار پوینتینگ موج فرودی و α قطبش پذیری است.

از طرفی برای یک آرایه دویبعدی متناوب شامل N نانوذره در

شود؛ مثلاً در درمان سرطان و تومورها که به توزیع یکنواخت و موضعی نیاز است، مناسب است [۳].

از نظر تئوری، تکنیک‌های عددی اخیراً برای مدل‌سازی رفتار ترموپلاسمونیک یک نانوذره فلزی منفرد تحت تابش، چه تحت نور پیوسته و چه تپی، توسعه یافته است. اما مجموعه‌ای از نانوذرات به صورت آرایه، معمولاً مشکل پیچیده‌تری دارند و برای کل سامانه و انجام شبیه‌سازی‌های عددی نه تنها حافظه بیشتری از سامانه کامپیوتری را بلکه زمان طولانی‌تری برای انجام پردازش مصرف می‌کند.

آرایه‌ای متناوب از نانوذرات، محاسبات را آسان‌تر می‌کند؛ زیرا مطالعات را می‌توان به یک سلول واحد شبکه کاهش داد. با این حال، محاسبه توزیع دما بر روی یک نانوذره به عنوان سلول واحد از آرایه منطقی نیست، زیرا در هر صورت افزایش دمای تولید شده توسط تعداد نامتناهی از ذرات، توزیع متفاوتی دارند. با این وجود بهتر است تعداد محدودی از نانوذرات در محاسبات مشخص شوند. این ویژگی باعث می‌شود هر گونه محاسبه دمای تولید شده توسط آرایه پیچیده شود. در نتیجه به طور نظری برای ساده کردن بحث و استخراج آسان توزیع دما، ساده‌سازی‌هایی در نظر گرفته می‌شود، از جمله توزیع منظمی از نانوذرات مانند شبکه‌های یک بعدی (خطی) و دو بعدی (اعم از مربع یا شش ضلعی). همچنین جهت ساده‌سازی فرمول‌های ساده‌ای را برای تخمین افزایش دما در نظر گرفته می‌شود و یا پیش فرض‌هایی از جمله محدودیت‌های توزیع دما در مجاورت هر نانوذره و تغییرات دما به صورت مکانی در نظر گرفته می‌شود [۱].

اثرات اتلاف موضعی که منجر به تولید گرما در نانوذرات فلزی می‌شود مستقیماً با توصیف بخش موهومی توابع پاسخ دینامیکی نانو ساختارها مانند گذردهی دی‌الکتریک فلز $\epsilon(\omega)$ و شدت نور فرودی $I(r, \omega)$ مرتبط است [۴]. در حالی که ثابت دی‌الکتریک فقط به ماهیت فلز بستگی دارد، توزیع شدت میدان الکتریکی نوری القا شده در نانوذره به حضور تشدیدهای پلاسمونی وابسته است [۵]. این تشدیدها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند؛ زیرا مقدار گرمای منتقل شده به ذره را می‌توان با تنظیم طول موج فرودی درون یا خارج از محدوده تشدید تنظیم کرد [۶].

در این مقاله، از یک طرح شبیه‌سازی جهت تحلیل و بررسی

در آرایه میدان‌های موضعی $E_i(r_i, \omega_i)$ ، که توسط میدان نور در مرکز ذرات القا می‌شود، مجموعه‌ای از معادلات جفت‌شده N ذره وجود دارد که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\mathcal{E}(\omega) = \mathcal{M}(\omega) \mathcal{E}_i(\omega) \quad (6)$$

$\mathcal{E}_i(\omega)$ ابر بردار میدان الکتریکی نور ورودی است که شامل N میدان الکتریکی برخوردی در مکان‌های ذرات و $\mathcal{E}(\omega)$ ابر بردار خروجی است که حاوی مقادیر میدان الکتریکی موضعی است. برای N ذره قطبش‌پذیر، ماتریس جفت‌کننده $\mathcal{M}(\omega)$ یک ماتریس $(3N \times 3N)$ است:

$$\mathcal{M}(\omega) = 1 - \mathcal{A}(\omega) \quad (7)$$

که \mathcal{A} ماتریس همانی است و با رابطه ماتریس زیر توصیف می‌شود:

$$\mathcal{A}(\omega) = \begin{pmatrix} \mathcal{A}_{11}(\omega) & \dots & \mathcal{A}_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{A}_{N1}(\omega) & \dots & \mathcal{A}_{NN}(\omega) \end{pmatrix} \quad (8)$$

کمیت $\mathcal{A}(\omega)$ بر اساس قطبش‌پذیری ذرات است:

$$\mathcal{A}(\omega) \propto \alpha(\omega) \quad (9)$$

در طول فرایند تابش نور، دما به دلیل اثر الکتریکی گرمایی ژول که در داخل ذرات فلز ایجاد می‌شود، افزایش می‌یابد. این انرژی اتلافی را می‌توان با محاسبه توان در واحد حجم تلف شده در داخل فلز توصیف کرد. از میدان الکتریکی $E_i(r_i, t)$ و بردار القایی $D_i(r_i, t)$ می‌توان مقدار توان تلف شده توسط ذره فلزی را به دست آورد. در واحدهای الکترواستاتیکی CGS، این منجر به رابطه زیر می‌شود:

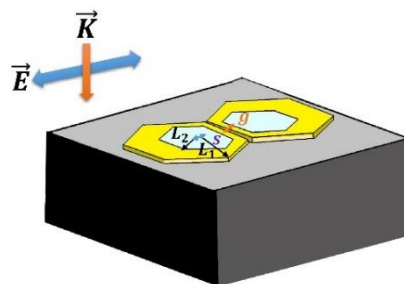
$$Q(r_i) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_i} dr \left\langle E_i(r, \omega) \cdot \frac{\partial}{\partial t} D_i(r, \omega) \right\rangle \quad (10)$$

در ادامه، رابطه بین $E_i(r, \omega)$ و $D_i(r, \omega)$ را با در نظر گرفتن ذرات غیر کرومی می‌توان به شکل زیر نوشت:

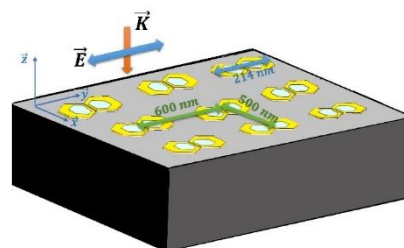
$$D_{i,\alpha}(r, \omega) = \sum_{\beta} \varepsilon_{\alpha\beta}(\omega) E_{\beta}(r, \omega) \quad (11)$$

که α و β دو شاخص دکارتی هستند. با فرض یک ماتریس قطری برای $\varepsilon_{\alpha,\beta}(\omega)$ ، به دست می‌آید:

$$Q(r_i) = \frac{\omega}{4\pi} \int_{V_i} dr \left\{ \sum_{\alpha} \text{Im} \varepsilon_{\alpha,\alpha}(\omega) |E_{i,\alpha}(\omega)|^2 \right\} \quad (12)$$



شکل ۱. طرحواره‌ای از یک دایمر شش گوشه.



شکل ۲. نمایی از آرایه بررسی شده.

مکان مجموعه‌ای از N بردار $r_i = (L_i, Z)$ ، تعریف می‌شود [۸]. می‌توان با یک مدل تحلیلی ساده با استفاده از قطبش‌پذیری ناهمسانگرد، رابطه قطبش‌پذیری آرایه را توصیف کرد. هنگامی که محور بلند ذرات در امتداد محور Y همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، قرار داده می‌شوند، تانسور قطبش‌پذیری مورب است و به صورت رابطه زیر است.

$$\alpha(\omega) = \begin{pmatrix} \alpha_{\perp}(\omega) & \circ & \circ \\ \circ & \alpha_{\parallel}(\omega) & \circ \\ \circ & \circ & \alpha_{\parallel}(\omega) \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در آن $\alpha_{\perp}(\omega)$ و $\alpha_{\parallel}(\omega)$ دو جزء مستقل هستند. هنگامی که یک موج تخت الکترومغناطیسی تک رنگ با بسامد ω و دامنه میدان الکتریکی E_i به نانوذرات برخورد می‌کند، میدان الکتریکی توسط نانوذرات با رابطه زیر افزایش می‌یابد:

$$(4)$$

$$E_i(r, \omega) = E_i [\exp(-in_i k_z z) + \text{Re xp}(-in_i k_z z)],$$

در که آن بردار موج در خلأ است و $R = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ ضریب بازتاب فرنل است که به ترتیب با شاخص‌های نوری محیط اطراف (n_1) و بستر دی الکتریک (n_2) بیان می‌شود. قطبش موج فرودی با زاویه θ را می‌توان با رابطه زیر توصیف کرد:

$$E_i = E_i (\cos(\theta), \sin(\theta), 0), \quad (5)$$

۳. نتایج و بحث

در این مقاله، به روش المان محدود در حوزه زمان (FDTD)، سطح مقطع جذب آرایه محاسبه شده و سپس توزیع دما بر روی سطوح و محیط اطراف نانوذرات بررسی شده است.

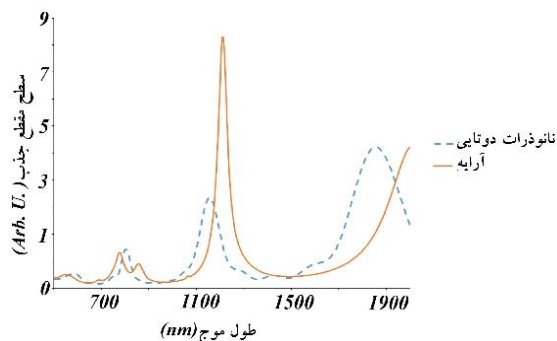
در تمام شبیه‌سازی‌ها، از تابش موج تخت با انرژی بین $۶,۲eV$ تا $۰,۶۲eV$ با شدت $I = \frac{kW}{m^2}$ استفاده شده است.

هنگامی که نانوذرات فلزی در یک آرایه منظم قرار می‌گیرند، ممکن است نور را به گونه‌ای پراکنده کنند تا امواج پراکنده شوند. اگر یکی از این امواج پراکنده که در صفحه آرایه منتشر می‌شوند با الکترون‌های رسانش نانوذرات منفرد برهمکنش کند، باعث می‌شود قله تشدید پلاسمونی طیف جذب بسیار باریک، کمتر از ۱ تا ۲ نانومتر، شود [۹].

آرایه‌ای که در این مقاله بررسی شده (طرحواره شکل ۲)، آرایه‌ای دو بعدی از نانوذرات دوتایی شش ضلعی با دوره تناوب ۶۰۰ نانومتر در راستای محور x و ۵۰۰ نانومتر در راستای محور y است که همه نانوذرات بر روی زیرلایه قرار دارند.

ابتدا به بررسی طیف جذب در قطبش موازی پرداختیم. این طیف در شکل ۳ آورده شده است که نسبت به طیف جذب دایمر نسبتاً تیزتر و قله بلندتر است. بلندترین قله طیف جذب آرایه در طول موج ۱۲۰۰ نانومتری اتفاق افتاده است.

توزیع دمایی در طول موج قله آرایه (۱۲۰۰ نانومتر) مطابق شکل ۴ الف است؛ بیشینه تغییرات دما ۶۰ درجه است که ذرات به صورت غیر یکنواخت گرما تولید می‌کنند. همچنین توزیع دمایی را در طول موج ۷۸۵ نانومتر که یک لیزر پر کاربرد در ترموپلاسمونیک است، شبیه‌سازی کردیم. شکل ۴ ب این توزیع دما را نمایش می‌دهد. این توزیع دما نشان می‌دهد نه تنها مقدار تغییرات دما برابر با ۵۸ درجه است بلکه دما به شدت موضعی است. مساحت گرم شده آرایه در دو طول موج بسیار متفاوت است. در طول موج ۱۲۰۰ نانومتر، تغییرات دما در مساحت بزرگ‌تری اتفاق افتاده است در حالی که در طول موج ۷۸۵ نانومتر، تغییرات دما بر روی نانو دایمر مرکزی است و تغییرات دمای ذرات اطراف بسیار کم است. چنین توزیع گرمایی آرایه در طول موج ۷۸۵ نانومتر می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به دمای شدیداً موضعی است، استفاده شود.



شکل ۳. مقایسه طیف جذب آرایه از نانوذرات دوتایی شش ضلعی و یک دوتایی شش ضلعی.

معادله (۱۲) کلی است و هیچ گونه تقریبی ندارد و در مورد هندسه‌های دلخواه و هر نوع ماده‌ای کاربرد دارد.

اگر سهم چند قطبی بالاتر از دو قطبی نادیده گرفته شود، می‌توان در این مورد، گذردهی ذره i را با رابطه زیر بیان کرد که در آن $\delta(r-r_i)$ توزیع دیراک مرکز محل ذره r را نشان می‌دهد:

(۱۳)

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \varepsilon\pi\alpha(\omega) = \begin{pmatrix} \alpha_{\perp}(\omega) & \circ & \circ \\ \circ & \alpha_{\parallel}(\omega) & \circ \\ \circ & \circ & \alpha_{\parallel}(\omega) \end{pmatrix} \delta(r-r_i),$$

و رابطه (۱۲) به صورت زیر ساده خواهد شد:

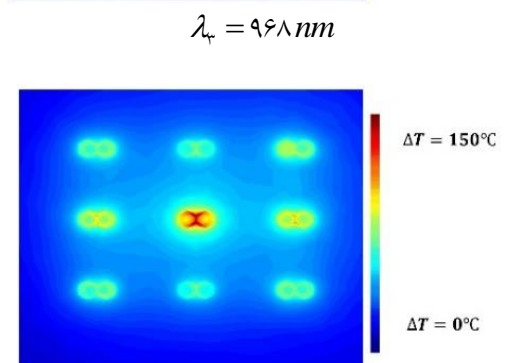
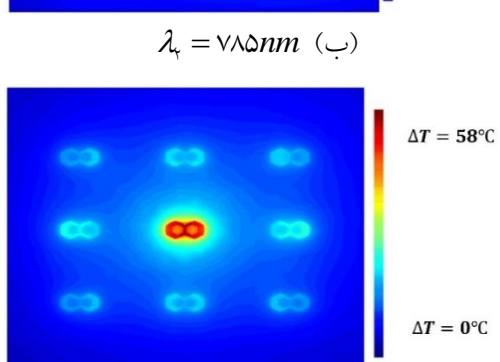
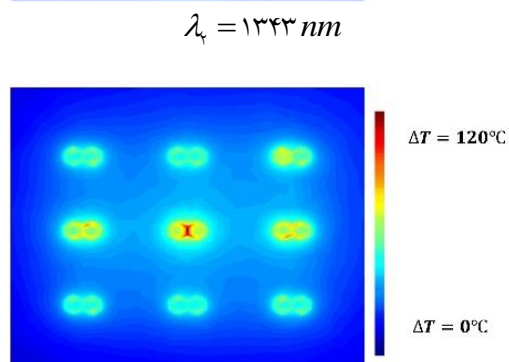
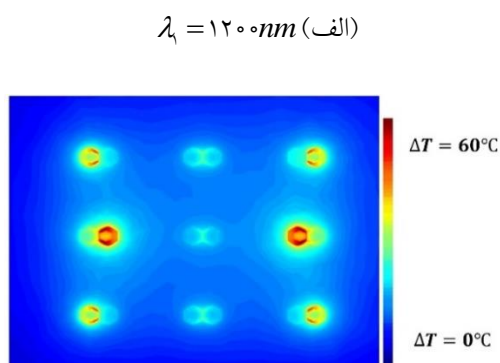
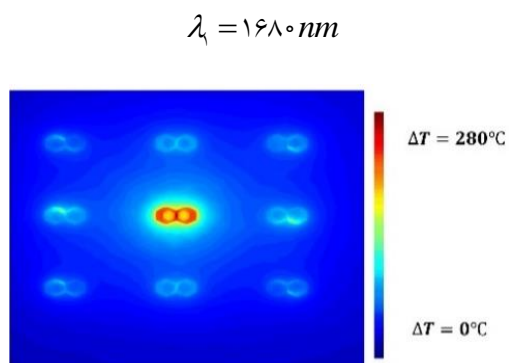
$$Q(r_i) = \frac{\omega}{\gamma} \left\{ \begin{aligned} & \left| \text{Im} \alpha_{\perp}(\omega) |E_{i,y}(r_i, \omega)|^2 + \right. \\ & \left. \left| \text{Im} \alpha_{\parallel}(\omega) |E_{i,x}(r_i, \omega)|^2 + |E_{i,z}(r_i, \omega)|^2 \right| \right\}, \end{aligned} \right. \quad (14)$$

برای محاسبات دقیق‌تر، دماهای موضعی و گرادیان‌های دما را باید فراتر از تقریب دو قطبی در نظر گرفت.

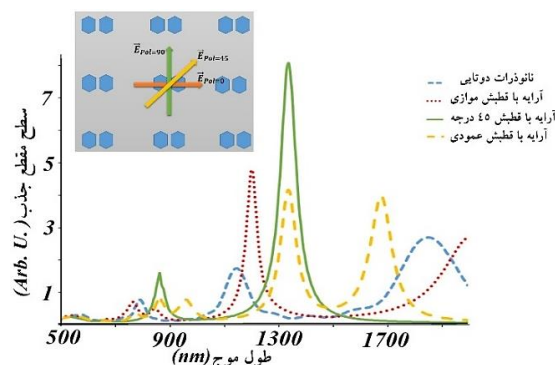
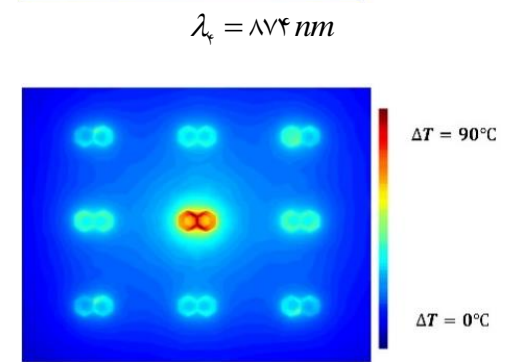
که در این معادله، تأثیر نسبی هر دو حالت پلاسمون عرضی و طولی به وضوح از طریق دو جزء قطبش‌پذیری نانوذرات طولی ظاهر می‌شود. تغییرات دما را با معادله پواسون حرارتی زیر می‌توان توصیف کرد:

$$\Delta T(\lambda, \theta) = \frac{1}{4\pi\kappa} \sum_{j=1}^{n_p} \frac{Q(r_{p,j})}{|R_{obs} - r_{p,j}|}, \quad (15)$$

که در آن κ رسانایی حرارتی محیطی است و R_{obs} یک نقطه مشاهده واقع در مجاورت نمونه را تعریف می‌کند [۳].



شکل ۴. (الف) توزیع دمایی آرایه نانوذرات دوتایی شش ضلعی در طول موج قله جذب نور با قطبش صفر درجه (۱۲۰۰ نانومتر). (ب) توزیع دمایی آرایه نانوذرات دوتایی شش ضلعی در طول موج ۷۸۵ نانومتر.



شکل ۵. طیف جذب یک دوتایی شش ضلعی و آرایه‌ای از نانوذرات دوتایی شش ضلعی در قطبش صفر درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه.

شکل ۶. چهار توزیع دمایی آرایه نانوذرات دوتایی شش ضلعی با قطبش ۴۵ درجه در طول موج‌هایی که جذب بیشتر است.

بیشینه دماها، با کاهش طول موج کاهش یافته که با توجه به محل قله‌ها که در طول موج‌های کوتاه‌تر، در توافق است. همچنین شکل ۷ توزیع دما در طول موج ۷۸۵ نانومتر قطبش ۴۵ درجه را نمایش می‌دهد که دمایی نسبتاً کمتر از قله‌های قطبش ۴۵ درجه ایجاد می‌کند.

شکل ۵ سطح مقطع جذب بر حسب طول موج در قطبش موازی و عمودی و ۴۵ درجه را نمایش می‌دهد. مطابق با این نمودار قطبش موازی بلندترین قله یا بیشترین جذب را دارد. چهار قله طیف جذب قطبش ۴۵ درجه در طول موج‌های ۱۶۸۰، ۱۳۴۳، ۹۶۸ و ۸۷۴ نانومتر اتفاق افتاده است؛ از این رو تغییرات و توزیع دما در این طول موج‌ها و همچنین طول موج ۷۸۵ نانومتر در شکل ۶ آورده شده است. در این قطبش (۴۵ درجه) بیشترین تغییرات دما در طول موج اولین قله اتفاق می‌افتد و بقیه

در قطبش‌های پرداخته می‌شود. علاوه بر بررسی آرایه در قطبش موازی، نور را با قطبش ۴۵ درجه و همچنین ۹۰ درجه (قطبش عمودی) به ذرات تابانده و نتایج این بررسی در ادامه آورده شده است.

شکل ۵ طیف سطح مقطع جذب یک دایمر، آرایه با قطبش موازی، ۴۵ درجه و عمودی است. در قطبش عمودی جذب به شدت افزایش می‌یابد و شامل دو قله است که حتی قله دوم نیز نسبت به قله‌های دوم قطبش‌های دیگر نسبتاً بلندتر است. در قطبش ۴۵ درجه، ۴ قله عمده دیده می‌شود که تقریباً دو به دو هم ارتفاع هستند.

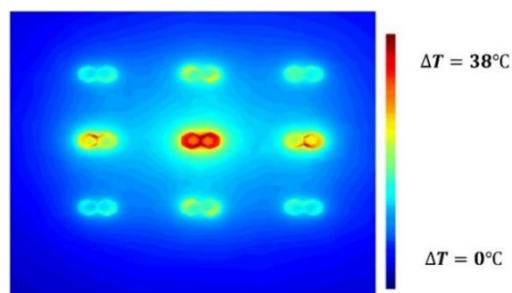
توزیع دما در طول موج ۷۸۵ نانومتر برای قطبش ۴۵ درجه در شکل ۷ آورده شده است و مقدار دما نسبت به قطبش‌های دیگر کمتر و برابر با $\Delta T = 38^\circ C$ است.

در مورد قطبش ۹۰ درجه یا عمودی، قله جذب طیف سطح مقطع جذب نسبت به بقیه قله‌های طیف جذب بلندتر است. پس انتظار تغییرات دمایی شدیدی در این قطبش وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل ۸ آورده شده است. بلندترین قله مربوط به طول موج ۱۳۳۴ نانومتر است. در این طول موج تغییرات دما به شدت موضعی و بالاست ($\Delta T = 52^\circ C$). البته این تغییرات دمایی بالا در کارهای تجربی کارایی ندارد. قله دوم در طول موج ۸۷۴ نانومتر ایجاد شده و شبیه‌سازی دما نشان می‌دهد دما موضعی است و تغییرات دمایی ۱۵۰ درجه است.

نهایتاً توزیع تغییرات دما در طول موج ۷۸۵ نانومتر برای قطبش ۹۰ درجه در شکل ۹ آورده شده است و مقدار تغییرات دما $\Delta T = 4^\circ C$ است و توزیع دما نه تنها موضعی نیست بلکه نسبت به دیگر قطبش‌ها توزیع یکنواخت‌تری دارد.

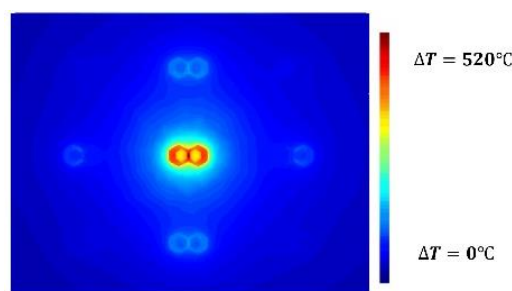
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر تغییر جهت قطبش نور فرودی بر یک آرایه دوبعدی شامل نانودایمرهای شش ضلعی با دوره تناوب ۶۰۰ نانومتر در راستای محور x و ۵۰۰ نانومتر در راستای محور y که همه نانوذرات بر روی زیرلایه قرار دارند، بررسی شد. بر اساس تحقیقات و شبیه‌سازی صورت گرفته نتایج بیانگر آن

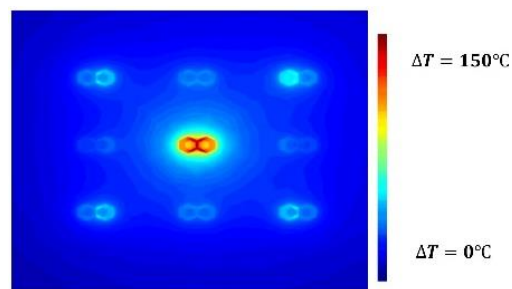


شکل ۷. توزیع دمایی آرایه نانوذرات دوتایی شش ضلعی با قطبش ۴۵ درجه در طول موج ۷۸۵ نانومتر.

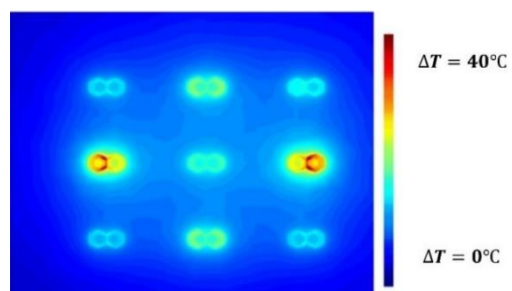
$$\lambda_1 = 1334 \text{ nm}$$



$$\lambda_2 = 874 \text{ nm}$$



شکل ۸. دو توزیع دمایی آرایه نانوذرات دوتایی شش ضلعی با قطبش ۹۰ درجه در طول موج‌هایی که جذب بیشتر است.



شکل ۹. توزیع دمایی آرایه نانوذرات دوتایی شش ضلعی با قطبش ۹۰ درجه در طول موج ۷۸۵ نانومتر.

شکل ۸ توزیع دما در قله‌های جذب قطبش ۹۰ درجه را نمایش می‌دهند و شکل ۹ توزیع دما طول موج ۷۸۵ نانومتر را در قطبش ۹۰ درجه نمایش می‌دهد. در ادامه به تحلیل توزیع دما

است که تغییرات و توزیع گرمایی که نانوذرات ایجاد می‌کنند چه در سطح نانوذرات و چه در محیط اطرافشان نه تنها به جهت قطبش نور فرودی بلکه به طول موج نور فرودی وابسته است. در طیف جذب قطبش موازی با محور طولی نانوذرات دایمر یک قله خیلی بلند به وجود می‌آید که توزیع دمایی غیر یکنواخت و غیر موضعی با بیشینه مقدار ۶۰ درجه ایجاد می‌کند. در قطبش ۴۵ درجه شاهد بروز چهار قله پلاسمونی در طیف

جذب هستیم. هر کدام از طول موج‌های این چهار قله توزیع دمایی متفاوتی دارند و نهایتاً در قطبش ۹۰ درجه یا عمودی بر محور طولی نانوذرات دو قله بلند دیده می‌شود که در طول موج ۱۳۳۴ نانومتر جذب به شدت افزایشی است. این طول موج دمایی شدیدی در نانوذرات به وجود می‌آورد همچنین توزیع دمایی موضعی است.

مراجع

1. A Govorov and H R Hugh *Nano today* **2**, 1 (2007) 30.
2. G Baffou, F Cichos and R Quidant *Nature Materials* **19**, 9 (2020) 946.
3. Ch Girard, P R Wiecha and Erik Dujardin *Journal of Optics* **20**, 7 (2018) 075004.
4. G Baffou and R Quidant *Laser & Photonics Reviews* **7**, 2 (2013) 171.
5. Ch Enkrich, M Wegener, S Linden, S Burger, L Zschiedrich, F Schmidt, J F Zhou, Th Koschny and C M Soukoulis *Physical review letters* **95**, 20 (2005) 203901.
6. Z Coppens, J Wei Li, D G Walker, and J G Valentine *Nano letters* **13**, 3 (2013) 1023.
7. P B Johnson and R Christy *Physical review B* **6**, 12 (1972) 4370.
8. J Donner, S J Morales-Dalmau, I Alda, R Marty, and R Quidant *ACS Photonics* **2**, 3 (2015) 355.
9. S A Maier *Springer* **1** (2007) 245.