

«مقاله پژوهشی»

اثر نانوآنتن شش گوشه نامتقارن بر افزایش گرمای موضعی

فهیمة نوری کوهانی^{1*}، عباس آذریان²

1. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه قم، قم، ایران

2. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه قم، قم، ایران

تاریخ پذیرش: 1401/05/30

تاریخ دریافت: 1401/04/21

Effect of Asymmetric Hexagonal Nanoantenna on Local Heat Increase

F. Noori Kohani^{*1}, A. Azarian²

1. Ph.D. Student, Department of Physics, University of Qom, Qom, Iran

2. Associate Prof., Department of Physics, University of Qom, Qom, Iran

Received: 2022/07/12

Accepted: 2022/08/21

Abstract

When metal nanoparticles are exposed to electromagnetic waves, they generate heat due to the interaction of surface conduction electrons of nanoparticles and their fluctuations, as well as the Joule heating effect. The emerging science of investigating heat produced by nanoparticles is called thermoplasmonics. The heat generated is remotely controlled by light. This generated heat increases the temperature in nanoparticles and the environment. Thermoplasmonics has many applications in various fields such as physics, chemistry, and medicine, and measuring the produced heat is complicated. This article studies the practical method of increasing the local electric field and producing heat by nanoparticles. Placing asymmetric hexagonal nanoparticles as an antenna or amplifier around a rectangular nanoparticle increases the light interaction with the middle nanoparticle. It causes an increase in the local electric field and generated heat by the middle nanoparticle.

Keywords

Plasmonics, Thermoplasmonics, Dimer nanoparticles, Hexagonal nanoparticles, Amplifier, and Heater.

چکیده

نانوذرات فلزی هنگامی که در معرض امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند به علت برهمکنش الکترون‌های رسانش سطحی نانوذرات و نوسانات آنها و همچنین اثر گرمایش ژول گرما تولید می‌کنند. به علم نوظهور بررسی گرمای تولید شده توسط نانوذرات ترموپلاسمونیک گفته می‌شود. گرمای تولید شده از راه دور توسط نور کنترل می‌شود و این گرمای تولید شده باعث افزایش دما در نانو ذرات و محیط می‌شود. علم ترموپلاسمونیک کاربردی زیادی در حوزه‌های مختلف از جمله فیزیک، شیمی و پزشکی دارد و اندازه‌گیری گرمای تولید شده اساساً پیچیده است. در این مقاله به بررسی روش مؤثر بر افزایش میدان الکتریکی موضعی و گرمایی که نانوذرات تولید می‌کنند می‌پردازد. به این صورت که با قرار دادن نانوذرات دوتایی شش گوشه نامتقارن به عنوان آنتن یا تقویت کننده اطراف یک نانوذره مستطیلی شکل، مقدار برهمکنش نور با نانوذره میانی را افزایش می‌دهد و باعث افزایش میدان الکتریکی موضعی و گرمای تولید شده توسط نانوذره میانی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

پلاسمونیک، ترموپلاسمونیک، نانوذرات دوتایی، نانوذرات شش گوشه، تقویت‌کننده و گرم‌کننده

مقدمه

گرمای موضعی ناشی از نانوذرات پلاسمونیک به دلیل کاربردهای آنها توجه زیادی را به خود جلب کرده و در علوم مختلف از جمله سلول‌های خورشیدی [1 و 2]، پزشکی و زیست‌شناسی [3-5]، نانو شیمی [6 و 7]، نانوفیزیک [8] کاربرد دارد. با این حال، دستیابی به دماهای بالا و کاربردی کاری سخت است [9]. با توسعه ترموپلاسمونیک، پژوهشگران سعی کردند به کمک گرمایی که نانوذرات تولید می‌کنند به تغییر دمای بالا و قابل کنترل در محیط دست یابند. این کار با روش‌های مختلف از جمله افزایش شدت تابش نور فرودی بر نانوساختارها انجام شد اما راه حل کاربردی نبود زیرا لیزری با شدت زیاد باعث گرم شدن سایر قسمت‌های سیستم می‌شود. همچنین دمای موضعی یکنواخت نخواهد بود. راه حل دیگر استفاده از نانوذرات بزرگ‌تر بود زیرا گرمایی که نانوذرات تولید می‌کنند به طور خطی وابسته به حجم نانوذرات است و یک نانوذره کوچک در مقایسه با نانوذرات بزرگ‌تر تحت شرایط یکسان، افزایش دمایی کمتری دارد، اما این راه حل نیز کاربردی نبود زیرا اندازه نانوذرات محدود است [10 و 11].

پژوهشگران به دنبال راه حل‌های دیگری از جمله تقویت میدان الکترومغناطیسی موضعی بودند تا راندمان تبدیل نور به گرما به‌طور موضعی بهبود یابد. به این صورت که با ترکیب‌ها و چینش‌های مختلف از نانوذرات، می‌توان میدان الکتریکی را به‌طور موضعی تقویت کرد. Govorov و همکارانش به طور سیستماتیک اثر تقویت نانوذرات دوتایی را به عنوان تقویت‌کننده یا آنتن بر روی نانوذرات کوچک‌تر (نانوکره و نانومیله) مطالعه کردند. از این رو نانوذرات دوتایی مانند نوعی تقویت‌کننده مانند عدسی باعث افزایش دمایی نانوذره مرکزی می‌شوند و برهمکنش بین نور و نانوذره مرکزی را تقویت می‌کنند. به نانوذره‌ای که میان نانوذرات دوتایی قرار دارد به علت اینکه مانند یک منبع گرما عمل می‌کند، گرم‌کننده و به جفت نانوذرات دوتایی تقویت‌کننده گفته می‌شود [12].

در این مقاله از یک نانوذره مستطیل شکل به عنوان گرم‌کننده و یک جفت نانوذره شش‌گوشی به عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است و ابتدا بررسی می‌شود که این نانوذرات دوتایی چه مقدار گرمای نانوذره گرم‌کننده را

تقویت می‌کنند و چه عوامل و پارامترهایی در این چینش بر گرمایی که تولید می‌شود تأثیر دارد.

مبانی نظری

هنگامی که نانوذره در معرض امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد مقداری از نور را جذب می‌کند. سطح مقطع جذب (σ_{abs}) با رابطه زیر به دست می‌آید [13]:

$$\sigma_{abs} = \frac{k}{\epsilon_0 |E_0|^2} \int Im(\epsilon_\omega) |E(r)|^2 dr \quad (1)$$

در این رابطه ϵ_ω تابع دی‌الکتریک ماده نانوذره $k = \frac{n\omega}{c}$ بردار موج، n ضریب شکست محیط اطراف، E_0 دامنه میدان الکتریکی نور فرودی و $E(r)$ میدان الکتریکی کل است. ضمن آنکه انتگرال بر روی حجم نانوذره گرفته می‌شود.

با تابش نور به نانوذرات فلزی، بارهای آزاد نانوذرات با فرکانس میدان الکتریکی تابانده شده، نوسان می‌کنند. این نوسان الکتریکی که چیزی جز یک جریان الکتریکی در یک فلز نیست، باعث اتلاف انرژی می‌شود که به اثر گرمایش ژول معروف است [14]. از این رو، چگالی توان گرمایی در نانوذرات فلزی در هر زمان t و هر مکان r به صورت زیر خواهد بود [13]:

$$q(r) = \frac{\omega}{2} \epsilon_0 Im(\epsilon) |E(r)|^2 \quad (2)$$

بنابراین توان گرمایی کل نانوذره با رابطه زیر بیان می‌شود [13]:

$$Q = \frac{\omega}{2} \epsilon_0 Im(\epsilon) \int |E(r)|^2 dr \quad (3)$$

که در این رابطه ω فرکانس نور فرودی، $Im(\epsilon_\omega)$ تابع دی‌الکتریک و $E(r)$ میدان الکتریکی است و انتگرال بر حجم نانوذرات گرفته می‌شود.

همچنین می‌توان رابطه گرمای تولید شده توسط نانوذرات را با سطح مقطع جذب بیان کرد:

که در آن نماد p و a به ترتیب نانوذرات و هوا را نشان می‌دهند.

$E(r)$ شدت میدان الکتریکی موضعی است که با حل معادله زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} [\nabla \times E(r)] - k_0^2 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E(r) = 0 \quad (9)$$

که در آن ϵ ، μ و σ به ترتیب نفوذپذیری نسبی، گذردهی و ضریب هدایت هستند و k_0 نشان دهنده عدد موج است [20].

نتایج و بحث

در این مقاله سطح مقطع جذب نانوذرات به روش المان محدود در حوزه زمان (FDTD) محاسبه شده است. روش FDTD که در ماژول FDTD Solutions نرم افزار لومریکال استفاده شده است، معادلات ماکسول را حل می‌کند. این روش به طور مستقیم معادلات ماکسول را حل کرده و نیازی به تعریف پتانسیل ندارد. از طرفی در این روش حل دیگر نیازی به وارون سازی ماتریس نبوده و روشی نسبتاً دقیق و پایدار، قابل تعمیم به مسائل غیر خطی و سیستماتیک است. منظور اینکه تحلیل یک ساختار جدید با این روش به مسئله مش بندی تقلیل می‌یابد و دیگر نیاز نیست تا دو مرتبه معادلات پیچیده انتگرالی را بازنویسی کرد.

هدف این روش شبیه سازی بررسی رفتار زمانی میدان های الکترومغناطیس در هر نقطه است. محاسبات با این روش در گستره وسیع تر و با سرعت بیشتری انجام می‌شود و کاربردهای متعددی را در زمینه تابش، پراکندگی و جفت شدگی الکترومغناطیس دارا می‌باشد. این روش اولین بار در سال 1966م توسط کی ایی¹ توصیف شد. تئوری FDTD بر اساس جایگذاری مشتقات زمان و مکان در معادلات ماکسول به روش تفاضل محدود مرکزی است [21].

$$Q(r) = \sigma_{abs} I \quad (4)$$

در این رابطه $I = nc\epsilon_0 E_0^2 / 2$ شدت تابش موج فرودی است [17]. اگر نانوذرات در محیطی با رسانندگی گرمایی κ ، چگالی ρ و ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت c_p در نظر گرفته شوند و این پارامترها ممکن است به مکان نیز وابسته باشند. در چنین محیطی، یک تغییر دمای موضعی $\delta T(r, t)$ منجر به تغییر موضعی تراکم انرژی گرمایی $\delta u_{th}(r, t)$ (انرژی در واحد حجم) می‌شود. رابطه زیر برای ارتباط تغییرات دمایی با تغییر موضعی تراکم انرژی گرمایی برقرار است:

$$u_{th}(r, t) = \rho c_p \delta T \quad (5)$$

علاوه بر این، مطابق با قانون فوریه بردار چگالی شار گرمایی $J_{th}(r, t)$ متناسب با گرادیان دما است:

$$J_{th}(r, t) = -\kappa \nabla T \quad (6)$$

به کمک روابط بالا و پایستگی انرژی، رابطه تغییرات فضا-زمانی دما به صورت زیر به دست خواهد آمد [13]:

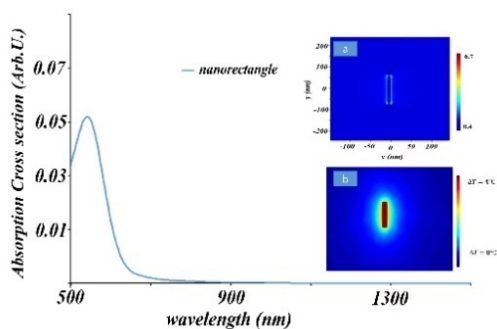
$$\rho c_p \delta_t T - \kappa \nabla^2 T = q \quad (7)$$

می‌توان این معادله را برای نانوذرات مختلف حل کرد و معادله توزیع دما در اطراف نانوذرات را به دست آورد. لازم به ذکر است که چگالی توان حرارتی q فقط در داخل نانوذرات فلزی غیر صفر در نظر گرفته شده و در خارج از نانوذرات فلزی (محیط اطراف) معادله همگن انتشار گرما حل می‌گردد [13].

انتقال گرما در نانوذرات تحت تابش نور و فضای اطرافشان با رابطه زیر بیان می‌شود [19]:

$$\begin{cases} \rho_p c_p \partial_t T(\mathbf{r}, t) - \kappa_p \nabla^2 T(\mathbf{r}, t) = q(\mathbf{r}) & \text{inside} \\ \rho_a c_a \partial_t T(\mathbf{r}, t) - \kappa_a \nabla^2 T(\mathbf{r}, t) = 0 & \text{outside} \end{cases}$$

موج 785 نانومتر که لیزری معروف و پرکاربرد در کارهای پلاسمونیک است، شبیه‌سازی شده و نتایج بیشینه تغییرات دما $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$ را نشان می‌دهد که مقدار بسیار کوچکی است.



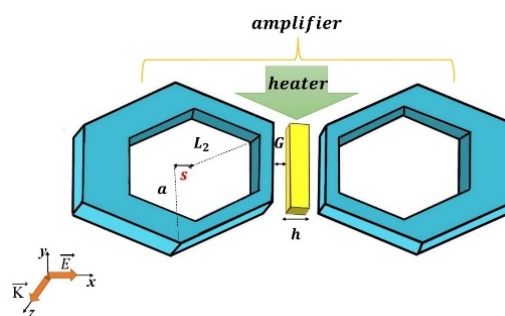
شکل 2. نمودار سطح مقطع جذب نانوذره مستطیل شکل (گرم‌کننده) a. توزیع میدان الکتریکی در طول موج قله جذب. b. توزیع دما در طول موج قله جذب

با قراردادن نانوذرات دوتایی شش‌گوشی به عنوان تقویت‌کننده در طرفین نانوذره مرکزی مستطیلی شکل در طیف جذب 3 قله به علت هیبریداسیون به جای یک قله نانوذره مستطیلی ایجاد می‌شود (شکل 3).

شکل 3 سطح مقطع جذب نانوذرات گرم‌کننده- تقویت‌کننده را با مواد مختلف نمایش می‌دهد. در این شکل فقط تغییر جنس نانوذرات تقویت‌کننده بررسی شده است. نانوذرات شش‌گوشی دوتایی از جنس طلا، نقره و مس به صورت طلا-طلا-طلا (Au-Au-Au)، نقره-طلا-نقره (Ag-Au-Ag) و مس-طلا-مس (Cu-Au-Cu) که با چپش تقویت‌کننده-گرم‌کننده-تقویت‌کننده هستند، در نظر گرفته شده است. هر سه نمودار جذب دارای سه قله بوده ضمن آنکه نمودار نقره جایجایی قرمز بیشتر و همچنین قله‌های بلندتر و تیزتری نسبت به دیگر حالت‌ها دارد.

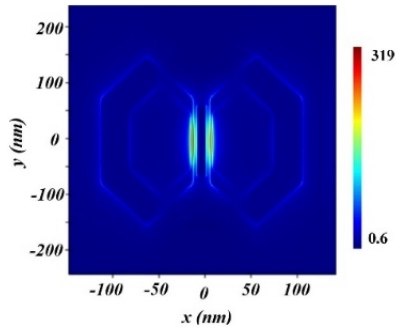
سپس توزیع دما بر روی سطوح و محیط اطراف نانوذرات بررسی گردیده است. در تمام شبیه‌سازی‌ها از تابش موج تخت با انرژی بین $6,2\text{ eV}$ تا $0,62\text{ eV}$ با شدت $I = 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ استفاده شده است و نانوذرات بر روی زیر لایه آلومینا قرار دارند.

شکل 1 نمایش شماتیک از نحوه قرارگیری نانوذرات و پارامترهای هندسی به کار رفته را نشان می‌دهد. نانوذرات دوتایی (دایمر) متشکل از دو نانوذره شش‌ضلعی با شعاع محاطی $L_1 = 60\text{ nm}$ و دارای حفره‌ای با شعاع محاطی نانوذره $L_2 = 40\text{ nm}$ هستند که فاصله مرکز حفره از مرکز نانوذره $S = 18\text{ nm}$ و نانوذره مستطیل شکل دارای ابعاد $10 \times 5\text{ nm}$ است. همچنین قطبش میدان الکتریکی در جهت محور xها در راستای محور طولی نانوذرات دوتایی مطابق با شکل (1) در نظر گرفته شده است. زیرا در این راستا به علت وجود گپ بین نانوذرات هیبریداسیون مدهای پلاسمونی ایجاد می‌شود و باعث افزایش میدان الکتریکی نسی در این ناحیه می‌گردد و در نتیجه تغییرات دمایی بیشتری را بوجود می‌آورد.

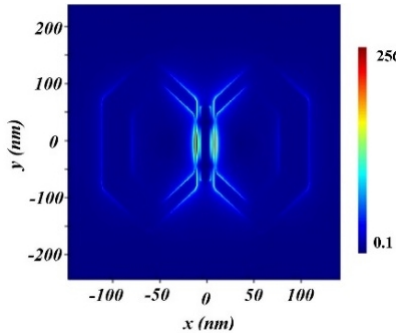


شکل 1. نمای شماتیک نانوذرات دوتایی به عنوان تقویت‌کننده همراه با نانوذره مستطیل شکل به عنوان گرم‌کننده

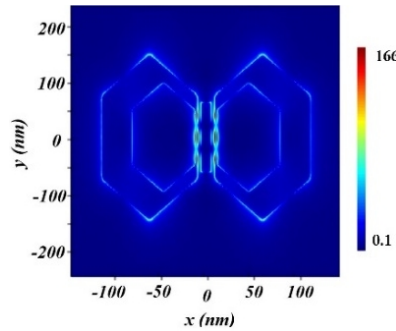
شکل 2 طیف جذب نانوذره مستطیل شکل (گرم‌کننده) در محدوده طول موج 500 تا 2000 نانومتر را نمایش می‌دهد. مطابق با نمودار جذب، مقدار جذب نسبتاً کم است و تنها یک قله در طول موج 535 نانومتر دیده می‌شود. در داخل شکل 1 توزیع میدان الکتریکی روی سطح و اطراف نانوذره مستطیل شکل به ازای طول موج 535 نانومتر (قله جذب) با بیشینه مقدار $6/7$ و توزیع دما با بیشینه مقدار $\Delta T=4^{\circ}\text{C}$ نمایش داده شده است. تغییرات دما در طول



a.



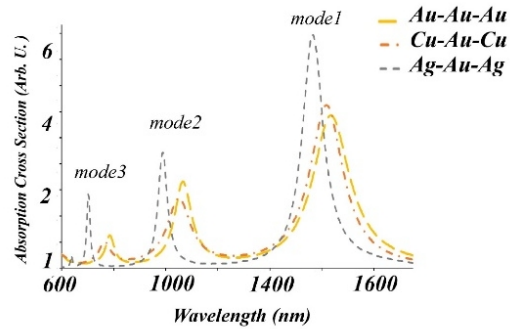
b.



c.

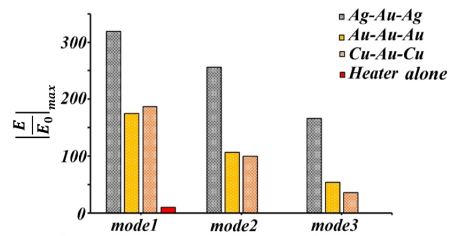
شکل 5. توزیع میدان الکتریکی سه مد گرم کننده- تقویت کننده Ag-Au-Ag. a. مد اول، b. مد دوم و c. مد سوم

همچنین تغییرات دمایی گرم کننده برای مدهای پلاسمونی مختلف و همچنین طول موج 785 نانومتر بررسی شد که نتایج آن در شکل 6 آمده است. بر اساس این نمودار با افزودن تقویت کننده تغییرات دمایی که نانوذرات ایجاد می کنند، افزایش قابل ملاحظه ای یافته است.



شکل 3. طیف جذب گرم کننده- تقویت کننده برای جنس های مختلف تقویت کننده ها

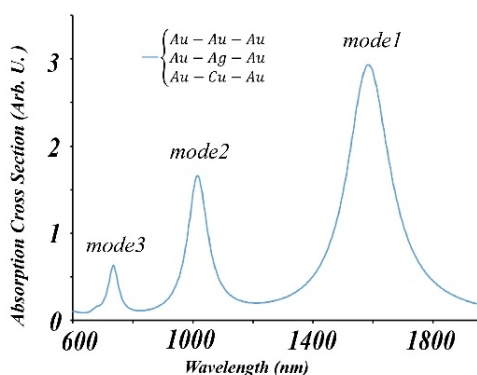
شکل 4 میزان تقویت میدان الکتریکی را با قرار دادن تقویت کننده ها نمایش می دهد. در هر سه مد با قرار دادن تقویت کننده هایی از جنس نقره شاهد افزایش شدید میزان تقویت میدان الکتریکی هستیم بگونه ای که برای مد اول میزان تقویت میدان به بیش از 300 برابر میدان الکتریکی نور فرودی می رسد. میزان تقویت میدان الکتریکی با قرارگیری تقویت کننده هایی از جنس طلا و مس به دلیل داشتن مقادیر مشابه از ثابت های دی الکتریک و رسانندگی تفاوت قابل ملاحظه ای نخواهند داشت.



شکل 4. نمودار بیشینه میدان الکتریکی گرم کننده و گرم کننده- تقویت کننده برای سه مد

سه حالت توزیع تغییرات میدان در گرم کننده- تقویت کننده Ag-Au-Ag برای هر سه مد در شکل 5 آمده است. مطابق با این شکل در مد اول تغییرات میدان به شدت موضعی است و بیشینه تغییرات میدان در گپ بین گرم کننده و تقویت کننده قرار دارد در حالی که برای مدهای دیگر از موضعی بودن و شدت میدان الکتریکی کاسته شده است.

موج‌های مشابهی اتفاق می‌افتد. شکل 8 طیف جذب گرم‌کننده-تقویت‌کننده‌های Au-Au-Au، Au-Ag-Au و Au-Cu-Au را نمایش می‌دهد.



شکل 8. طیف جذب گرم‌کننده-تقویت‌کننده Au-Au-Au، Au-Ag-Au و Au-Cu-Au

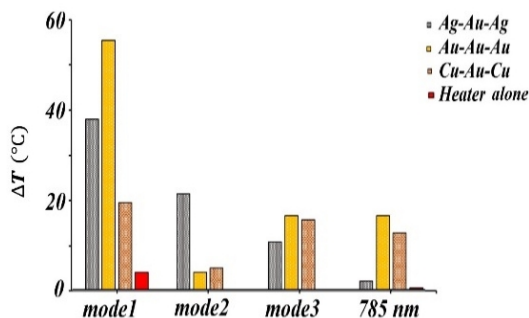
همچنین تغییرات میدان و دما نیز در هر سه مشابه است که این نشان می‌دهد با توجه به ابعاد گرم‌کننده و تقویت‌کننده، تغییر جنس ماده گرم‌کننده تأثیری در تغییر دما و میدان الکتریکی ندارد. زیرا ابعاد گرم‌کننده نسبت به نانوذرات تقویت‌کننده کوچک‌تر است و عمده روش انتقال گرما در نانوذرات به روش رسانش است. از طرفی از آنجا که بین گرم‌کننده و نانوذرات دوتایی، گرما از طریق همرفت انتقال پیدا می‌کند و روش همرفت به علت کوچک بودن ضریب همرفت هوا، گرمای کمی را انتقال می‌دهد، در نتیجه تغییر جنس نانوذرة گرم‌کننده تأثیر چندانی در تغییرات دما نخواهد داشت.

جدول 1 تغییرات میدان الکتریکی و دما را برای سه مد Au-Au-Au، Au-Ag-Au و Au-Cu-Au و همچنین گرم‌کننده به تنهایی نمایش می‌دهد. با توجه به اطلاعات جدول، افزودن نانوانتن باعث افزایش تغییرات میدان و دما نسبت به گرم‌کننده می‌شود.

جدول 1. تغییرات میدان الکتریکی و دما برای سه مد Au-Au-Au، Au-Ag-Au و Au-Cu-Au و گرم‌کننده به

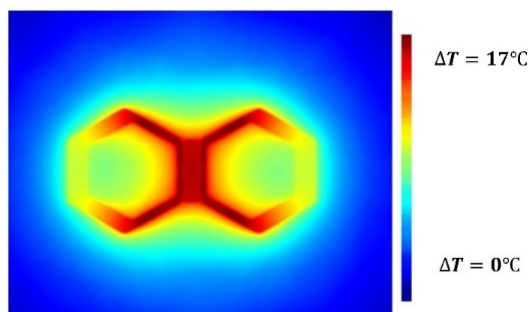
تنهایی

	$\left \frac{E}{E_0} \right _{max_1}$	$\left \frac{E}{E_0} \right _{max_2}$	$\left \frac{E}{E_0} \right _{max_3}$	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_{785}
Au - Au - Au							
Au - Ag - Au	175	134	53.8	105	27	17	17
Au - Cu - Au							
Heater alone	6.7	-	-	4	-	-	0.5



شکل 6. نمودار بیشینه دمای بوجود آمده در اثر قرار دادن تقویت‌کننده با جنس‌های مختلف برای سه مد پلاسمونی و طول موج 785 نانومتر

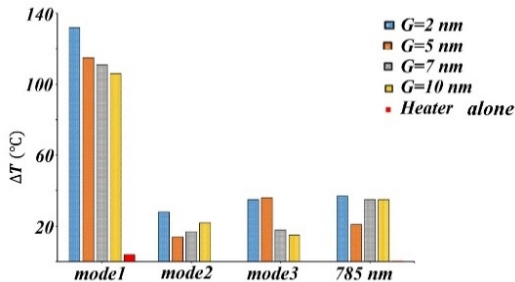
شکل 7 توزیع دمایی گرم‌کننده-تقویت‌کننده Au-Au-Au در طول موج 785 نانومتر را نمایش می‌دهد. بیشینه تغییرات دما در لبه‌های نانوذرات شش‌گوشی نزدیک به گرم‌کننده به علت مساحت کوچک این منطقه و همچنین توزیع بیشینه میدان در این مناطق رخ می‌دهد.



شکل 7. توزیع دمایی گرم‌کننده-تقویت‌کننده Au-Au-Au در طول موج 785 نانومتر

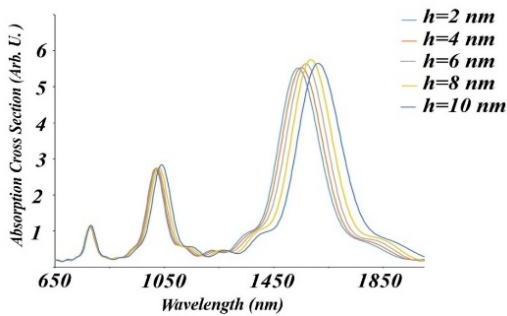
هنگامی که جنس ماده گرم‌کننده را تغییر می‌دهیم یعنی در گرم‌کننده-تقویت‌کننده‌های Au-Au-Au، Au-Ag-Au و Ag-Au تغییراتی در نمودار جذب دیده نمی‌شود و برای هر سه ذره، قله‌های جذب در طول

بیشینه میدان الکتریکی در شکل 11 مطابقت دارد. در مد دوم و سوم برای مقادیر 5 nm و 2 nm G عدم تطابق میان شکل‌های 11 و 12 مشاهده می‌شود که این امر می‌تواند به دلیل کوچک بودن فاصله‌ی گپ و در نتیجه رقابت میان فرآیند همرفت گرما میان تقویت‌کننده‌ها و گرم‌کننده و فرآیند رسانش گرمایی درون تقویت‌کننده‌ها باشد.



شکل 11. نمودار بیشینه دما برای گپ‌های مختلف در سه مد

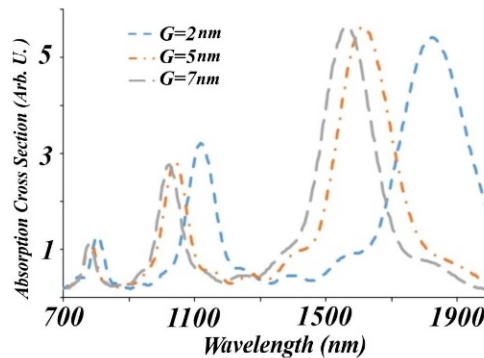
هنگامی که عرض گرم‌کننده از 2 تا 10 نانومتر تغییر می‌یابد، جابه‌جایی قرمز به خصوص در مد اول طیف جذب مشاهده می‌گردد. در مد اول به ازای $h = 8 \text{ nm}$ بیشترین مقدار جذب مشاهده می‌شود. همچنین در مد دوم به ازای $h = 10 \text{ nm}$ جذب بیشتری دیده می‌شود (شکل 12).



شکل 12. طیف جذب بر حسب طول موج برای مقادیر مختلف اندازه گرم‌کننده (h).

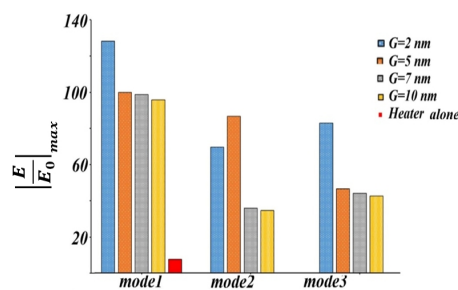
تغییرات بیشینه میدان الکتریکی برای مقادیر مختلف h در شکل 13 نشان داده شده است. بر اساس این نمودار در مد اول، میدان نسبت به دیگر مدها افزایش چشمگیری دارد و بیشترین تغییرات میدان برای اندازه $h = 10 \text{ nm}$ مشاهده می‌گردد. در این حالت تغییرات میدان نسبت به گرم‌کننده افزایش خوبی داشته است.

تغییر گپ یا فاصله بین گرم‌کننده با نانوذرات تقویت‌کننده نیز بر میدان الکتریکی و در نتیجه گرمای تولید شده توسط نانوذرات تأثیر دارد شکل 9 سطح مقطع جذب در گپ‌های مختلف را نمایش می‌دهد. با افزایش گپ، جابه‌جایی آبی رخ خواهد داد و در گپ‌های بزرگ‌تر قله‌هایی در طول موج‌های کوچک‌تر ایجاد می‌شود.



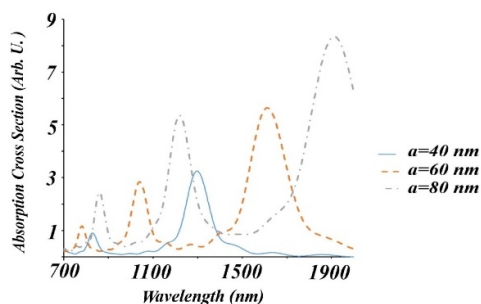
شکل 9. سطح مقطع جذب بر حسب طول موج برای گپ‌های 2 و 5 و 7 نانومتر

شکل 10 نمودار بیشینه میدان الکتریکی نزدیک برای گپ‌های مختلف را نمایش می‌دهد که با افزایش گپ، میدان کاهش یافته، ولی در کل نسبت به یک نانوغرم‌کننده به تنهایی تغییرات میدان افزایش زیادی داشته است.



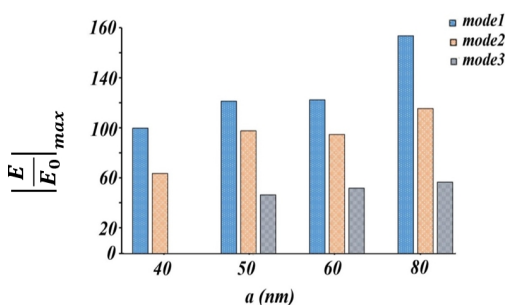
شکل 10. نمودار بیشینه میدان الکتریکی موضعی برای گپ‌های مختلف در سه مد

شکل 11 تغییرات دما را به ازای طول موج‌های بیشینه جذب و طول موج 785 نانومتر نمایش می‌دهد. با افزایش گپ برای مد اول، دما کاهش پیدا کرده است و این رفتار با



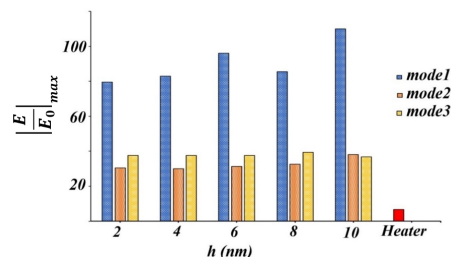
شکل 15. سطح مقطع جذب نانوذرات گرم کننده- تقویت کننده برای تقویت کننده‌هایی با شعاع $a=40,60,80$ nm

سپس بیشینه تغییرات میدان الکتریکی به ازای شعاع‌های مختلف تقویت کننده‌ها شکل 16 آورده شده است. طبق داده‌ها با افزایش شعاع ذرات تقویت کننده، بیشینه میدان الکتریکی افزایش می‌یابد.



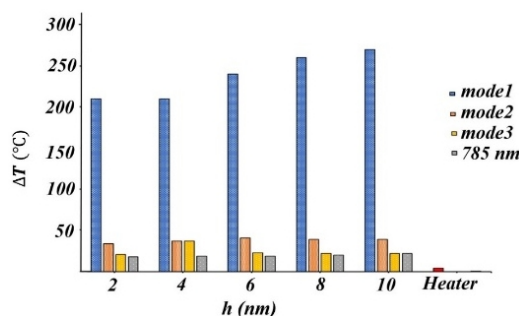
شکل 16. نمودار بیشینه میدان الکتریکی نسبی در شعاع‌های مختلف ذرات تقویت کننده

و در نهایت تغییرات دمایی که به وجود می‌آید در نمودار شکل 17 آمده است. بر اساس این نمودار، تغییرات دما با افزایش شعاع ذرات تقویت کننده افزایش یافته است. ضمن آنکه افزایش دما نسبت به یک افزایش دمای نانوذره گرم کننده به مقدار بسیار قابل توجهی (در حدود 150°C -100) تغییر کرده است.



شکل 13. نمودار بیشینه میدان الکتریکی برای اندازه‌های مختلف گرم کننده (h های مختلف)

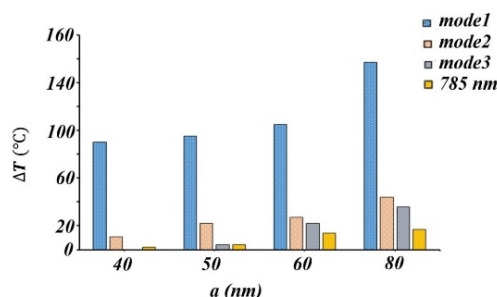
شکل 14 نیز تغییرات دما را به کمک نمودار میله‌ای نمایش می‌دهد. بر اساس این نمودار، در مد اول دما به شدت افزایش پیدا کرده است ولی مدهای دیگر تغییرات دمایی زیر 50 درجه سانتیگراد دارند.



شکل 14. نمودار بیشینه دما برای اندازه‌های مختلف گرم کننده

پارامتر نهایی که بررسی شد تغییر اندازه تقویت کننده‌ها است. با افزایش شعاع نانوذرات تقویت کننده به دلیل آنکه سطح مؤثر بیشتری در معرض نور فرودی قرار می‌گیرند منجر به افزایش جذب شده و لذا انتظار داریم که دمای کل سیستم را افزایش دهد. در این راستا شعاع نانوذرات شش‌گوشی ذرات تقویت کننده را مقادیر 80 nm، $a=40,50,60$ قرار دادیم. شکل 15 طیف جذب مربوطه را نمایش می‌دهد. با افزایش شعاع، جذب به طور چشم‌گیری افزایش یافته که مورد انتظار است.

این مقاله از نانوذرات دوتایی شش گوشه دارای حفره که عدم تقارن دارند جهت افزایش میدان الکتریکی موضعی و گرمای نانوذره مستطیلی شکل استفاده شده است و نتایج نشان می‌دهد که به کمک این چینش نانوذرات و تغییر پارامترهای مختلف از جمله جنس نانوذرات و ابعاد آنها جهت افزایش دما با نانوذرات شش گوشه با شعاع محاطی 80 نانومتر برای حالت Au-Au-Au و گپ 2 نانومتر می‌توان اختلاف بیشینه دما را از 4 درجه سانتیگراد به 157 درجه سانتیگراد رساند و برای میدان الکتریکی موضعی ترکیب Ag-Au-Ag می‌تواند میدان الکتریکی را تا 319 برابر میدان الکتریکی نور فرودی افزایش دهد.



شکل 17. نمودار بیشینه دما برای شعاع‌های مختلف ذرات تقویت‌کننده

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که با قرار دادن دو نانوذره دوتایی اطراف یک نانوذره می‌توان میدان الکتریکی و گرمایی که تولید می‌کند را به مقدار زیادی افزایش داد.

cally delivered light-absorbing gold microparticles. *Journal of Investigative Dermatology*. 2015 Jul 1;135(7):1727-34.

[6] Cognet L, Tardin C, Boyer D, Choquet D, Tamarat P, Lounis B. Single metallic nanoparticle imaging for protein detection in cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2003 Sep 30;100(20):11350-5.

[7] Brick T. Hot-carriers and losses in plasmonic nanostructures.

[8] Govorov AO, Richardson HH. Generating heat with metal nanoparticles. *Nano today*. 2007 Feb 1;2(1):30-8.

[9] Gillibert R, Colas F, de La Chapelle ML, Gucciardi PG. Heat dissipation of metal nanoparticles in the dipole approximation. *Plasmonics*. 2020 Aug;15(4):1001-5.

[10] Khorashad LK, Besteiro LV, Wang Z, Valentine J, Govorov AO. Localization of temperature using plasmonic hot spots in metal nanostructures: The Nano-optical antenna approach and Fano effect. *arXiv preprint arXiv:1604.03585*. 2016 Apr 12.

[11] Keblinski P, Cahill DG, Bodapati A, Sullivan CR, Taton TA. Limits of localized heating by electromagnetically ex-

References

- [1] Tan J, Xie Y, Wang F, Jing L, Ma L. Investigation of optical properties and radiative transfer of TiO₂ nanofluids with the consideration of scattering effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017 Dec 1;115:1103-12.
- [2] Liang H, Wang F, Xu C, Li G, Shuai Y. Full-spectrum solar energy utilization and enhanced solar energy harvesting via photon anti-reflection and scattering performance using biomimetic nanophotonic structure. *ES Energy & Environment*. 2020 May 11;8(4):29-41.
- [3] Assanov GS, Zhanabaev ZZ, Govorov AO, Neiman AB. Modelling of photothermal control of biological cellular oscillators. *The European Physical Journal Special Topics*. 2013 Oct;222(10):2697-704.
- [4] Zograf GP, Petrov MI, Makarov SV, Kivshar YS. All-dielectric thermonanophotonics. *Advances in Optics and Photonics*. 2021 Sep 30;13(3):643-702.
- [5] Paithankar DY, Sakamoto FH, Farinelli WA, Kosiratna G, Blomgren RD, Meyer TJ, Faupel LJ, Kauvar AN, Lloyd JR, Cheung WL, Owczarek WD. Acne treatment based on selective photothermolysis of sebaceous follicles with topi-

- cited nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2006 Sep 1;100(5):054305.
- [12] Govorov AO, Zhang W, Skeini T, Richardson H, Lee J, Kotov NA. Gold nanoparticle ensembles as heaters and actuators: melting and collective plasmon resonances. *Nanoscale Research Letters*. 2006 Jun;1(1):84-90.
- [13] Bohren CF, Huffman DR. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons; 2008 Sep 26.
- [14] Jain PK, Lee KS, El-Sayed IH, El-Sayed MA. Calculated absorption and scattering properties of gold nanoparticles of different size, shape, and composition: applications in biological imaging and biomedicine. *The journal of physical chemistry B*. 2006 Apr 13;110(14):7238-48.
- [15] Baffou G. Thermodynamics of Metal Nanoparticles. *Thermoplasmonics: Heating Metal Nanoparticles Using Light*. 2017:36-80.
- [16] Bell AP, Fairfield JA, McCarthy EK, Mills S, Boland JJ, Baffou G, McCloskey D. Quantitative study of the photothermal properties of metallic nanowire networks. *ACS nano*. 2015 May 26;9(5):5551-8.
- [17] Donner JS. Thermo-plasmonics: controlling and probing temperature on the nanometer scale.
- [18] Khorashad LK, Besteiro LV, Wang Z, Valentine J, Govorov AO. Localization of temperature using plasmonic hot spots in metal nanostructures: The Nano-optical antenna approach and Fano effect. *arXiv preprint arXiv:1604.03585*. 2016 Apr 12.
- [19] Desiatov B, Goykhman I, Levy U. Direct temperature mapping of nanoscale plasmonic devices. *Nano letters*. 2014 Feb 12;14(2):648-52.
- [20] Ren Y, Chen Q, Qi H, Ruan L. Hot spot effect of optical nanoantenna to enhance localized photothermal conversion. *ES Energy & Environment*. 2019 Jan 16;3(2):74-9.
- [21] Taflove A, Hagness SC, Picket-May M. Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method. *The Electrical Engineering Handbook*. 2005 Jan 1;3:629-70.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)