

## اثرات گرما- نوری پلاسمون‌های سطحی

نجمه رضایی کریم‌آباد و مجید رشیدی هویه

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴)

### چکیده

حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی به علت حساسیت، دقت و سرعت پاسخ به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. به منظور تحریک پلاسمون‌های سطحی، از یک ساختار کریشمن که در آن لایه فلزی (عمدتاً طلا یا نقره) روی سطح منشور قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. بر اثر تغییر دما، عوامل مختلفی از جمله خواص نوری فلز، منشور و محیط پیرامون، می‌تواند تغییر کند که باعث تغییر در پاسخ حسگرهای پلاسمونی می‌شود. در این مقاله تأثیرات گرمایی بر پاسخ نوری یک حسگر تشدید پلاسمون سطحی به طور نظری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر دما منجر به تغییرات شدید در میزان بازتابندگی و فاز می‌شود. بیشترین اثر مربوط به تغییرات خواص نوری لایه فلزی (طلا در اینجا) بر اثر تغییر دما است.

واژه‌های کلیدی: تشدید پلاسمون سطحی، خواص گرما- نوری، ساختار کریشمن

### ۱. مقدمه

می‌توان به روش‌های کریشمن، اتو، توری‌ها و فیبر نوری اشاره کرد

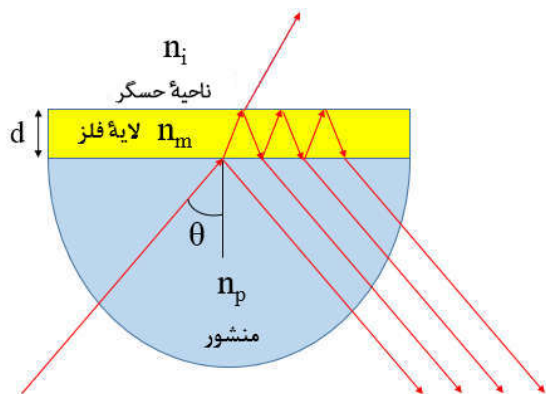
[۱].

در یک ساختار کریشمن، که مورد توجه ما در این مقاله است، از امواج میرا در بارتاب کلی برای تحریک پلاسمون‌های سطحی بهره گرفته می‌شود. در چنین ساختاری خصوصیات نوری و ضخامت لایه فلزی، تأثیر مستقیمی بر رفتار پلاسمون سطحی دارد. از جمله:

۱- با افزایش قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک ( $\tilde{\epsilon} = \epsilon' + j\epsilon''$ )

فیلم فلزی، میرایی افزایش می‌یابد و این باعث پهن‌شدگی قابل توجه منحنی SPR و جابه‌جایی زاویه تشدید به سمت مقادیر بالاتر می‌شود. با این حال تأثیر آن بر زاویه تشدید،

تشدید پلاسمون سطحی، ناشی از نوسانات هماهنگ الکترون‌های آزاد در سطح مشترک فلز- دی‌الکتریک می‌باشد. در حقیقت تحت تابش امواج نورانی به یک سطح مشترک فلز- دی‌الکتریک، الکترون‌های آزاد شروع به نوسان می‌کنند و این نوسانات منجر به ایجاد یک میدان الکتریکی روی این فصل مشترک می‌شود که به آن پلاسمون‌های سطحی گفته می‌شود. در صورتی که مؤلفه مماسی بردار موج نورانی تابیده شده با عدد موج پلاسمون سطحی تطابق یابد، پدیده تشدید پلاسمون سطحی (Surface Plasmon Resonance) اتفاق می‌افتد. روش‌های مختلفی جهت تحریک پلاسمون‌های سطحی معرفی شده‌اند که از جمله



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره یک حسگر پلاسمون سطحی با ساختار کریشمن.

در این مقاله ما علاقه‌مند به بررسی اثر تغییرات گرمایی بر پاسخ نوری یک حسگر تشدید پلاسمون سطحی هستیم. به همین منظور ابتدا مدلی بر اساس تداخل از لایه‌های نازک ارائه می‌شود که به کمک آن می‌توان پاسخ نوری یک حسگر با ساختار کریشمن را به دست آورد. سپس به کمک این مدل و با توجه به خواص گرما-نوری عوامل مؤثر، پاسخ گرما-نوری چنین ساختاری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## ۲. مدل

مطابق شکل ۱، یک حسگر پلاسمون سطحی با ساختار کریشمن نوعی شامل یک لایه نازک فلزی (طلا در اینجا) به ضخامت  $d$  و ضریب شکست  $\tilde{n}_m$  روی یک منشور با ضریب شکست  $n_p$  می‌باشد. دامنه بازتاب  $\tilde{r}$ ، از یک چنین ساختاری با توجه به تداخل پرتوهای چند گانه و به کمک ماتریس انتقال نوری لایه‌های نازک به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۰]:

$$\tilde{r} = \frac{(M_{11} + M_{12} q_f) q_o - (M_{21} + M_{22} q_f)}{(M_{11} + M_{12} q_f) q_o + (M_{21} + M_{22} q_f)} = |\tilde{r}| e^{j\phi} \quad (1)$$

$q_o$  و  $q_f$  به ترتیب پارامترهای محیط تابشی و عبوری هستند که برای قطبش موازی عبارت است از:

$$q_k = \frac{\cos(\theta_k)}{\tilde{n}_k} \quad (2)$$

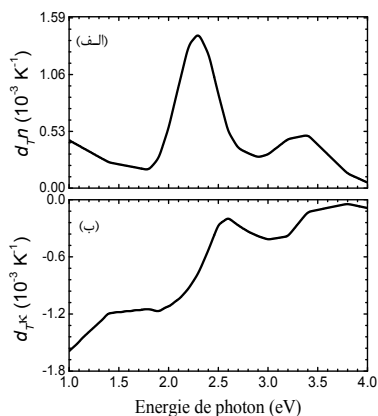
$M_{ij}$  عناصر ماتریس انتقال هستند که برای یک لایه نازک با ضریب شکست  $\tilde{n}_m$  و ضخامت  $d$  تحت تابش یک موج با قطبش موازی

خیلی کم است.

۲- افزایش قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک،  $\epsilon'$ ، تأثیر آشکاری بر زاویه تشدید و انتقال زاویه آن به مقادیر بیشتر و افزایش پهنای منحنی دارد.

۳- تشدید پلاسمون سطحی برای ضخامت‌های فلز کمتر از  $\lambda/8$  مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت، کمینه بازتابندگی منحنی SPR کاهش می‌یابد و این کمینه برای ضخامت‌های بیشتر از  $\lambda/8$  مشاهده نمی‌شود. هنگامی که ضخامت افزایش می‌یابد تغییرات اندکی در زاویه تشدید وجود دارد، با این حال، با توجه به تضعیف زیاد تابش و انتشار نور به داخل منشور، تأثیر قابل توجهی بر پهنای منحنی دارد [۲].

تشدید پلاسمون سطحی یک روش بسیار حساس، سریع و تکرارپذیر است که به کارگیری آن بدون توجه به اصول نسبتاً پیچیده پدیده تشدید پلاسمون سطحی، آن را ارزشمند کرده است و برای مشاهده تغییرات اندک خواص نوری در نزدیکی سطح به کار برده می‌شود [۳]. این روش به طور گسترده به عنوان اساس آشکارسازی در بسیاری از حسگرهایی که در زمینه‌هایی مختلف مانند آشکارسازی گاز یا سنجش‌های شیمیایی و زیستی کاربرد دارند، استفاده می‌شود [۴ و ۵]. در بسیاری از آزمایش‌ها، دما ممکن است به صورت خواسته یا ناخواسته تغییر کند. از یک طرف در برخی از آزمایش‌ها و کاربردهای علمی، ممکن است حسگرهای پلاسمونی در دماهای متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر، با توجه به حساسیت حسگرها به دما، ممکن است این حسگرها را به عنوان حسگر حرارتی پیشنهاد داد. در حقیقت بر اثر تغییر دما، خواص نوری لایه فلزی، زیر لایه (منشور) و محیط پیرامون تغییر می‌کند. این تغییرات به نوبه خود منجر به تغییر در پاسخ حسگر تشدید پلاسمون سطحی می‌شود [۶]. اجازه دهید به این نکته اشاره شود که خواص گرما-نوری در مورد تشدید پلاسمون سطحی موضعی ناشی از نانوذرات فلزات نجیب قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده شده است که بیشترین اثر ناشی از خواص گرما-نوری نانوذره فلزی است که منجر به تغییرات مهمی در محدوده بسامد تشدید پلاسمون سطحی می‌شود [۷-۹].



شکل ۲. تغییرات (الف) ضریب شکست و (ب) ضریب خاموشی طلا نسبت به دما بر حسب انرژی فوتون [۷].

پراکندگی‌های الکترون-الکترون و الکترون-فونون و تغییر در توزیع الکترون‌ها است. این اثرات به طور مستقیم یا غیرمستقیم منجر به تغییر در گذارهای بین نواری و درون نواری و در نتیجه خواص نوری فلز می‌شود [۱۱]. نمودار شکل ۲ نشان دهنده طیف تغییرات دمایی ضریب شکست و ضریب خاموشی طلا می‌باشد که سهم گذارهای درون نواری و بین نواری را شامل می‌شود [۷]. افزایش قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک در دماهای بالا، به طور قابل توجهی باعث کاهش طول انتشار پلاسمون‌های سطحی (کاهش نفوذ میدان درون فلز) می‌شود [۶].

#### ۴. نتایج و بحث

مدل مذکور جهت بررسی خواص گرما- نوری یک ساختار کریشن شکل ۱ به کار برده شد. بدین منظور ضخامت لایه طلای بهینه مقدار ۵۰ nm منظور شد. طول موج مورد نظر ۶۳۲ nm می‌باشد. ضرایب شکست مختلط طلا، منشور و هوا در دمای ۳۰۰ K به ترتیب عبارتند از  $i3/4218 + 0.1726$ ، ۱.۵ و ۱.۱ از طرفی خواص گرما- نوری فلز طلا، منشور و هوا در طول موج یاد شده به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{dn_p}{dT} = 0.534 \times 10^{-5}, \frac{dn_s}{dT} = -0.0113, \frac{dk}{dT} = 4.77609 \times 10^{-4}$$

و  $\frac{dn_i}{dT} = -0.572 \times 10^{-6}$ . نتایج محاسبات در شکل ۳ نشان داده شده است. نمودار آبی در شکل ۳ الف نشان دهنده ضریب بازتاب

(TM) عبارت است از:

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & -i \sin \beta_k / q_k \\ -iq_k \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\beta_k = \frac{\gamma \pi n_k}{\lambda_0} d \cos(\theta_k), \quad (4)$$

$\lambda_0$  و  $\theta_k$  به ترتیب طول موج نور فرودی و زاویه برخورد است.  $n_i$  ضریب شکست محیط پیرامون می‌باشد. در نهایت ضریب بازتاب  $R$  عبارت است از:

$$R = |\tilde{r}|^2 \quad (5)$$

هنگامی که دما تغییر می‌کند، ضریب شکست فلز، منشور و محیط پیرامون نیز ممکن است تغییر کند و لذا منجر به تغییر در فاز و ضریب بازتاب می‌شود. به منظور بررسی این تغییرات، ضرایب گرما- بازتاب  $dTR$  و گرما- فازی  $dT\varphi$  به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$dTR = \frac{R_T - R_0}{T - T_0}, \quad (6)$$

$$dT\varphi = \frac{\varphi_T - \varphi_0}{T - T_0}, \quad (7)$$

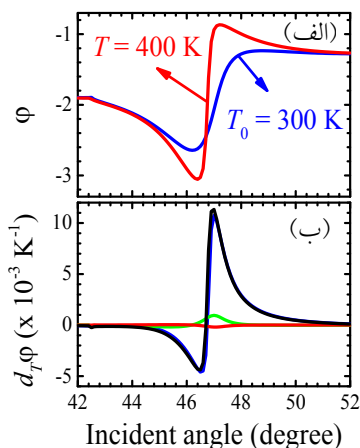
$R_T, \varphi_T, R_0, \varphi_0$  به ترتیب ضرایب بازتاب و فاز در دمای  $T$  و  $T_0$  اند.  $\tilde{r}$  و  $r_T$  (دامنه‌های بازتاب در دماهای  $T$  و  $T_0$ ) به ترتیب با قرار دادن ضرایب شکست در دمای  $T_0$  و دمای  $T$  به دست می‌آیند. ضریب شکست یک ماده در دمای  $T$ ، بر حسب ضرایب گرما- نوری  $\frac{\partial \tilde{n}}{\partial T}$  با توجه به رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\tilde{n}(T) = \tilde{n}(T_0) + \frac{\partial \tilde{n}}{\partial T} \Delta T \quad (8)$$

که  $\tilde{n}(T_0)$  ضریب شکست در دمای  $T_0$  و  $\Delta T$  تغییرات دما می‌باشد. عموماً ضریب گرما- نوری دی‌الکتریک‌ها (شیشه و محیط حسگری در اینجا) در محدوده طیف نوری مقدار ثابتی است در حالی که در مورد فلزات این گونه نیست و به شدت وابسته به بسامد نور فرودی هستند. در بخش بعدی ضریب گرما- نوری طلا که در محاسبات به کار برده شده است به اختصار تشریح می‌شود.

#### ۳. خواص گرما- نوری طلا

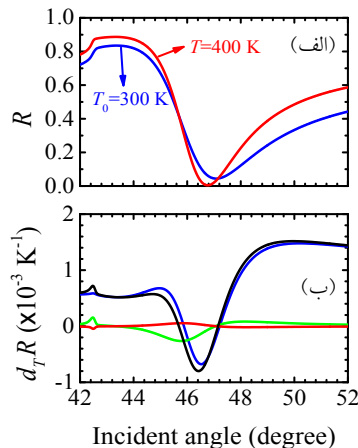
اثرات مختلفی منجر به تغییر خواص نوری طلا بر اثر تغییر دما می‌شود. مهم‌ترین این اثرات، انبساط گرمایی شبکه فلزی، افزایش



**شکل ۴.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) فاز دامنه بازتاب  $\phi$  حسگر شکل ۱ در دو دمای ۳۰۰ و ۴۰۰ کلونین، (ب) تغییرات گرمایی فاز بازتاب  $d_T \phi$  (منحنی سیاه) و سهم خواص گرما-نوری فلز طلا (منحنی آبی)، منشور (منحنی سبز) و محیط حسگری (منحنی قرمز) در  $d_T \phi$ .

می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که سهم هوا برخلاف سهم منشور و فلز است. در حقیقت قسمت حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک طلا به ترتیب منفی و مثبت و تغییرات دمایی قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست با توجه به نمودارهای شکل، به ترتیب مثبت و منفی است. با افزایش دما، هر دو قسمت حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده در مورد تأثیر خواص فلزی بر سازوکار تشدید پلاسمون سطحی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما، زاویه تشدید به سمت زوایای کمتر انتقال و پهنای منحنی کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به این مهم که ضریب گرما نوری منشور مثبت است، با تغییر دما ضریب شکست منشور افزایش می‌یابد. لذا عدد موج در منشور نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه شرط تشدید در زاویه کمتری نسبت به قبل از افزایش دما ایجاد خواهد شد.

به منظور بررسی اثرات گرمایی بر فاز بازتاب، نمودارهای فاز بر حسب زاویه در دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ کلونین با توجه به رابطه ۲ به دست آمد. نتایج در نمودارهای شکل ۴. الف آمده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود تغییرات فاز در اطراف زاویه تشدید پلاسمون سطحی بسیار شدید است. یک کمینه و به دنبال آن یک بیشینه به ترتیب در زاویه‌ای کمتر از زاویه SPR و در زاویه‌ای



**شکل ۳.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) ضریب بازتاب حسگر شکل ۱ در دو دمای ۳۰۰ و ۴۰۰ کلونین، (ب) تغییرات گرمایی ضریب بازتاب  $d_T R$  (منحنی سیاه) و سهم خواص گرما-نوری فلز طلا (منحنی آبی)، منشور (منحنی سبز) و محیط حسگری (منحنی قرمز) در  $d_T R$ .

در دمای  $T_0$  بر حسب زاویه فرودی می‌باشد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، با تغییر زاویه ضریب بازتاب از حدود  $8^\circ$  در زاویه  $43^\circ$  درجه به تدریج کاهش می‌یابد تا در زاویه  $47/2^\circ$  درجه به کمینه مقدار خود نایل می‌یابد. سپس با افزایش زاویه، مقدار ضریب بازتاب به آرامی افزایش می‌یابد. کمینه مشاهده شده ناشی از تشدید پلاسمون سطحی است. با افزایش دما، خواص نوری اجزاء مختلف تغییر می‌کند که منجر به تغییر ضریب بازتاب در زوایای مختلف می‌شود. این مهم در نمودار قرمز رنگ شکل ۳. الف به خوبی دیده می‌شود. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما زاویه تشدید به سمت زوایای کمتر جابه‌جا می‌شود و پهنای SPR نیز کاهش می‌یابد. این رفتار باعث ایجاد یک کمینه در تغییرات دمایی ضریب بازتاب  $d_T R$  نسبت به زاویه تابش می‌شود که به خوبی در نمودار سیاه رنگ شکل ۳. ب نمایان است. ملاحظه می‌شود که بیشترین تغییرات در نزدیکی زاویه SPR اتفاق می‌افتد. در حقیقت عوامل دخیل در تغییرات دمایی ضریب بازتاب تغییر خواص نوری لایه فلزی، منشور و محیط پیرامونی بر اثر تغییر دما می‌باشد. سهم هر کدام از این عوامل در نمودارهای شکل ۳. ب آمده است. در این نمودارها منحنی‌های آبی، سبز و قرمز به ترتیب سهم فلز، منشور و هوا (محیط حسگری) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بیشترین سهم مربوط به فلز طلا

تشدید به سمت مقادیر کمتر انتقال می‌یابد و پهنای منحنی کاهش می‌یابد. این پدیده منجر به تغییرات دمایی ضریب بازتاب  $d_T R$  و فاز  $d_T \varphi$  می‌شود. بیشترین تغییرات در اطراف زاویه تشدید پلاسمون سطحی رخ می‌دهد. عوامل متعددی در این امر سهم‌اند. بررسی‌ها نشان داد که تغییرات دمایی خواص نوری فلز بیشترین نقش را ایفا می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دما در تحلیل نتایج تجربی بسیار مهم است. از طرفی با توجه به حساسیت این نوع حسگرها به دما، امکان طراحی حسگرهای دما با حساسیت بالا بر اساس تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد.

بیشتر از آن مشاهده می‌شود. با افزایش دما دامنه تغییرات افزایش و پهنای آن کاهش می‌یابد. این رفتار موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در منحنی گرما- فازی خواهد شد که در شکل ۴. ب نشان داده شده است (منحنی سیاه). درست مانند تغییرات گرمایی ضریب بازتاب، عوامل مختلفی در تغییرات گرمایی فاز سهم‌اند که سهم فلز از همه بیشتر است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر دما بر پاسخ نوری سامانه حسگر تشدید پلاسمون سطحی مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش دما زاویه

## مراجع

1. D Sarid and W Challener, "Modern introduction to surface plasmons: theory, Mathematica modeling, and applications", Cambridge University Press (2010).
2. G Turhan-Sayan, *Journal of Lightwave Technology* **21** 3 (2003) 805.
3. H Raether, "Surface plasmons on smooth surfaces", Springer (1988).
4. J Homola and S Yee, "Surface plasmon resonance biosensors. Optical Biosensors: Present and Future", Elsevier (2002) 207.
5. J Homola, *Journal of Analytical and bioanalytical chemistry* **377** 3(2003) 528.
6. H Reddy, *et al.*, *Temperature-dependent optical properties of gold thin films*. arXiv preprint arXiv:1604.00064 (2016).
7. M Rashidi-Huyeh and B Palpant, *Physical Review B* **74** 7 (2006) 075405.
8. M R Huyeh, M S Havar, and B Palpant, *Journal of Applied Physics* **112** 10 (2012) 103101.
9. S Hashemi Zadeh, M Rashidi-Huyeh, and B Palpant, *Journal of Applied Physics* **122** 16 (2017) 163108.
10. M Yamamoto, *Rev Polarogr* **48** (2002) 209.
11. M Scarpino, "Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines", Que Publishing (2015).