

حساسیت طیفی بالا به روش حسگری چندمدی در حسگر تشدید پلاسمون سطحی و استفاده از آن جهت اندازه‌گیری ضخامت لایه جاذب با ضریب شکست مشخص

حکیمه محمدحسینی^۱، امیرحسین احمدخان کردبچه^۱ و مجید قناعت شعار^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲. پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۲/۴)

چکیده

در این مقاله حسگر تشدید پلاسمون سطحی را با در نظر گرفتن دو فلز، یک‌بار فلز طلا و در حالت بعدی فلز نقره مطالعه کرده و با استفاده از روش حسگری چند مدی امکان دسترسی به حساسیت طیفی بالا را در آنها مورد بررسی قرار می‌دهیم. نشان می‌دهیم که حساسیت طیفی قابل توجه حسگر تشدید پلاسمون سطحی، اندازه‌گیری ضخامت لایه جاذب را امکان‌پذیر می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: حساسیت طیفی، حسگر تشدید پلاسمون سطحی، روش حسگری چندمدی

۱. مقدمه

روش‌های افزایش حساسیت طیفی صورت گرفته است. برخی از این روش‌ها شامل اضافه کردن توری پراش بر روی سطح فلز [۲]، اضافه کردن یک لایه بافر دی الکتریک بین فلز و منشور جهت استفاده از پلاسمون سطحی بلند برد در فرآیند حسگری [۳]، تغییر ضریب شکست منشور موجود در ساختار حسگر [۴] و استفاده از روش حسگری چندمدی می‌باشد [۵]. با توجه به این که حساسیت طیفی بالای حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی همواره به همپوشانی مدی^۳ و یا ماهیت پلاسمون‌های سطحی منسوب گشته است، مطالعه منشأ آن

حسگر تشدید پلاسمون سطحی^۱ به واسطه داشتن حساسیت طیفی^۲ بالا در میان حسگرهای اپتیکی ضریب شکست همواره مورد توجه قرار گرفته و از زمانی که برای مطالعه فرآیندهای مختلف در سطح فلزات و آشکارسازی گازها معرفی شده تبدیل به ابزاری مهم برای تعیین برهم‌کنش‌های زیستی، آشکارسازی مواد شیمیایی و همچنین تشخیص‌های پزشکی گشته است [۱]. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه

۱. Surface plasmon resonance sensor

۲. Spectral sensitivity

۱. Modal overlap

به صورت جابه‌جایی طیفی ظاهر می‌شود که این امر امکان اندازه‌گیری ضخامت یک تک لایه را در کاربردهای زیستی فراهم می‌آورد.

۲. حسگر تشدید پلاسمون سطحی

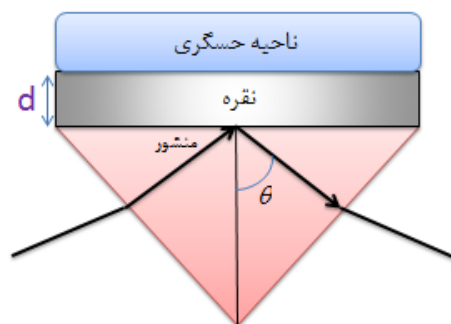
حسگر تشدید پلاسمون سطحی که در این قسمت به معرفی آن می‌پردازیم، مطابق شکل ۱ متشکل از یک ساختار سه لایه‌ای است که به ترتیب منشور با ضریب شکست $n_p = 1.76$ ، لایه بسیار نازکی از نقره به ضخامت $d = 50$ نانومتر و ناحیه حسگری با ضریب شکست $n_M = 1.32$ می‌باشد. در این حسگر پرتو فرودی با زاویه بزرگ‌تر از زاویه بحرانی به فصل مشترک منشور-نقره می‌تابد و در نتیجه انعکاس داخلی موج میرا شده و از لایه نقره که ضخامت ناچیزی دارد تونل‌زنی اتفاق می‌افتد.

می‌دانیم که موجی که در یک دی الکتریک و بر اثر انعکاس داخلی کلی در فصل مشترک با یک دی الکتریک دیگر به وجود می‌آید، یک موج تخت غیرهمگن خواهد بود، چرا که در امتداد سطح منتشر و در جهت عمود بر آن میرا می‌شود، پلاسمون-پلاریتون سطحی مثالی از امواج تخت غیرهمگن و به واقع برانگیختگی الکترومغناطیسی است که به فرم موج و در امتداد فصل مشترک تخت فلز و دی الکتریک منتشر می‌شود و دامنه آن به صورت نمایی و با افزایش فاصله از فصل مشترک میرا می‌گردد [۶]. بنابراین در نتیجه انتقال انرژی پرتو فرودی و برانگیختگی میرا، پلاسمون سطحی در فصل مشترک نقره-هوا برانگیخته می‌شود و انتظار مشاهده کمینه در طیف بازتابندگی را خواهیم داشت [۶].

۱.۲. محاسبه طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون

سطحی و تحلیل آن برای دو حالت طلا و نقره

با توجه به مطالبی که در قسمت قبل در خصوص شرط لازم برای تحریک موج پلاسمون سطحی مطرح شد، زاویه فرودی باید به گونه‌ای انتخاب گردد که انعکاس داخلی کلی در فصل مشترک منشور-فلز اتفاق بیفتد و برای این امر لازم است تا



شکل ۱. حسگر تشدید پلاسمون سطحی.

ضروری به نظر می‌رسد.

بنابراین در این مقاله در ابتدا با در نظر گرفتن حسگر تشدید پلاسمون سطحی و معرفی ساختار آن و با توجه به این که عمده‌ترین فلزاتی که در کاربردهای مختلف در آن مورد استفاده قرار می‌گیرند طلا و نقره هستند، طیف بازتابندگی برحسب طول موج آن را برای دو حالت طلا و نقره محاسبه می‌کنیم [۶]. سپس در پی یافتن منشأ حساسیت طیفی بالای حسگر تشدید پلاسمون سطحی به روش حسگری چند مدی، به محاسبه حساسیت طیفی می‌پردازیم تا نشان دهیم که استفاده از مدهای اپتیکی متعدد^۲ در این حسگر دسترسی به حساسیت طیفی بالا را در آن امکان‌پذیر می‌سازد [۵]. این بررسی قبلاً تنها در محدوده طول موج‌های بلندتر و با استفاده از نقره در ساختار حسگر انجام گرفته بود [۵]. ما در این مقاله این روش را در محدوده طول موجی متفاوتی بررسی می‌کنیم، همچنین با توجه به این محدوده طیفی و با در نظر گرفتن لایه طلا به جای نقره در ساختار حسگر، ضریب شکست منشور، ضریب شکست ناحیه حسگری و زاویه فرود را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که کمینه در نمودار بازتابندگی مشاهده شود.

در نهایت و با توجه به حساسیت طیفی بالای حسگر تشدید پلاسمون سطحی با در نظر گرفتن لایه دیگری با ضریب شکست مشخص در ساختار آن با عنوان لایه جاذب نشان می‌دهیم که تغییر ضخامت این لایه در نمودار بازتابندگی

۲. Multimode sensing scheme

۳. Multiple optical modes

$$\begin{pmatrix} H_{1y} \\ H'_{1y} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} H_{(N+1)y} \\ H'_{(N+1)y} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

که در آن

$$M = \left(\prod_{i=1}^{i=N} M_i \right) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

در نهایت و با توجه به این که H'_{1y} مقدار میدان مغناطیسی در بازتاب می‌باشد، ضریب انعکاس فرنل یک چند لایه‌ای را به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$r^p = \frac{H'_{1y}}{H_{1y}} = \frac{M_{21}}{M_{11}}. \quad (9)$$

همان‌طور که از محاسبات بالا مشخص است، برای محاسبه طیف بازتابندگی نیازمند تابع دی الکتریک نقره می‌باشیم. بنابراین تابع دی الکتریک نقره را به صورت زیر معرفی می‌کنیم [۷]

$$\varepsilon_{Ag}(\lambda) = \varepsilon_{\infty} \left(1 - \frac{1}{\lambda_p^2 \left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{i}{\mu_p \lambda} \right)} \right), \quad (10)$$

در این رابطه $\varepsilon_{\infty} = 4$ ، $\lambda_p = 282 \text{ nm}$ و $\mu_p = 17000 \text{ nm}$ می‌باشد. همچنین طول موج λ برحسب نانومتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به روابط ذکر شده، طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی با کمک برنامه‌نویسی در متلب شبیه‌سازی شده و نتیجه در محدوده طول موجی ۵۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر به صورت زیر به دست می‌آید:

همان‌طور که نمودار شکل ۲ نشان می‌دهد، مطابق انتظار و در نتیجه تحریک پلاسمون سطحی، یک کمینه در طیف بازتابندگی مشاهده می‌گردد. همچنین مطابق شکل، اعمال اختلالی به میزان $\Delta n = 0.01$ ، منجر به جابه‌جایی طیفی می‌گردد (در ادامه همین میزان اختلال، برای حالتی که در ساختار حسگر از طلا استفاده می‌کنیم، به سیستم وارد می‌شود).

در ادامه و با توجه به این که طلا نسبت به نقره پایدارتر بوده و همچنین به لحاظ زیستی سازگاری بهتری از خود نشان می‌دهد به محاسبه طیف بازتابندگی آن در همان محدوده طول موجی مورد فوق، می‌پردازیم. به این منظور و با توجه به این که

سینوس زاویه فرودی بزرگ‌تر، مساوی نسبت ضرایب شکست منشور و فلز باشد. همچنین لازم به ذکر است که عوامل مختلفی بر برانگیختگی پلاسمون سطحی و کمینه موجود در نمودار بازتابندگی تأثیر می‌گذارند. از آن جمله می‌توان به ضخامت فلز مورد استفاده در ساختار حسگر، ضریب شکست منشور، محدوده طیفی مورد نظر، و زاویه فرود اشاره نمود. بنابراین ما با در نظر گرفتن این عوامل زاویه فرود را با ملاحظه شرط انعکاس داخلی کلی به نحوی تغییر دادیم تا کمینه را در بهترین حالت در نمودار مشاهده کنیم، که با در نظر گرفتن زاویه فرودی برابر ۵۲ درجه بهترین نتیجه حاصل شد.

ما در این قسمت به محاسبه طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی می‌پردازیم و در حالت اول محاسبات را برای حالتی انجام می‌دهیم که در ساختار حسگر فلز نقره به کار رفته است. به این منظور و برای شبیه‌سازی طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی، با در نظر گرفتن N فصل مشترک تخت، میزان انعکاس از یک چندلایه‌ای را برای پرتویی با قطبش مغناطیسی عرضی، با حل معادلات ماکسول و به روش ماتریس انتقال محاسبه می‌کنیم. با در نظر گرفتن صفحه xOz به عنوان صفحه فرود داریم:

$$k_{iz} = +\sqrt{\varepsilon_i k_o^2 - k_x^2}, \quad (1)$$

که در آن هر محیط:

$$i = 1, 2, \dots, N+1, \quad (2)$$

و ε_i گذردهی هر محیط می‌باشد، همچنین:

$$k_x = k_1 \sin \theta, \quad (3)$$

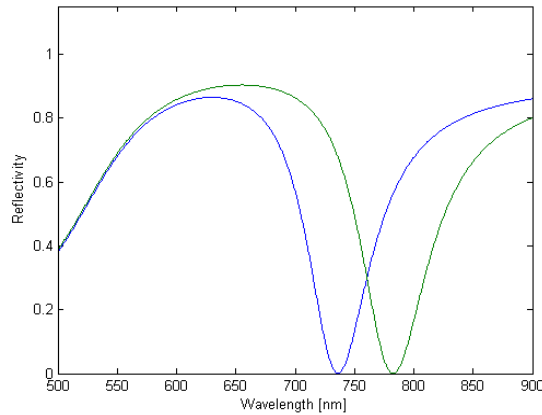
$$k_1 = k_o \sqrt{\varepsilon_1}, \quad (4)$$

$$k_o = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

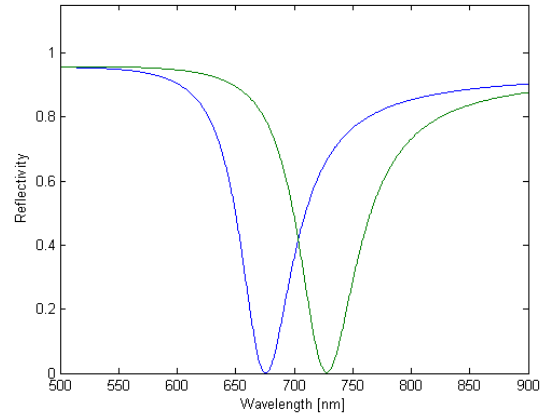
که در آن λ طول موج پرتو فرودی می‌باشد. علاوه بر این برای هر فصل مشترک داریم:

$$K_i^p = \frac{\varepsilon_i k_{(i+1)z}}{\varepsilon_{i+1} k_{iz}}. \quad (6)$$

پس از انجام محاسبات و با توجه به این که H میدان مغناطیسی است خواهیم داشت:



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی با استفاده از طلا در ساختار آن و برای حالت بدون اختلال (آبی) و با اعمال اختلال (سبز).



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی با استفاده از نقره در ساختار آن و برای حالت بدون اختلال (آبی) و با اعمال اختلال (سبز).

به ایجاد تشدیدهای پراتلاف پلاسمونی می‌گردد، با توجه به این مفاهیم مطابق انتظار در نمودار شکل ۳ در طول موج‌های کوچک‌تر از ۶۰۰ نانومتر، میزان بازتابندگی مقدار به مراتب ضعیف‌تری را نسبت به حالت اول، که از فلز نقره استفاده شده است، نشان می‌دهد.

۲.۲. محاسبه حساسیت طیفی حسگر تشدید پلاسمون سطحی به روش حسگری چندمدی

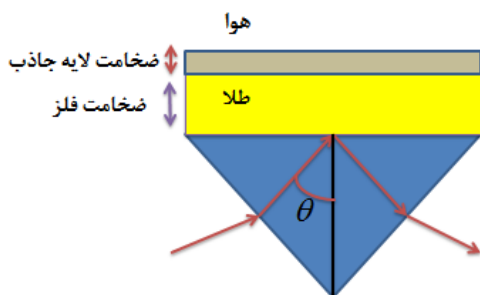
با توجه به نمودار شکل‌های ۲ و ۳، و همچنین با توجه به این که حساسیت طیفی به صورت نسبت تغییرات در طول موج تشدید به تغییرات ضریب شکست اندازه‌گیری می‌شود، ملاحظه می‌شود که حساسیت طیفی در این حسگر از مرتبه $10^3 \frac{\text{nm}}{\text{RIU}}$ می‌باشد که RIU واحد تغییرات ضریب شکست است. این حساسیت طیفی بالا در حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی همواره به همپوشانی مدی منسوب گشته است. در اینجا نشان می‌دهیم که بر خلاف این تصور، بالا بودن حساسیت طیفی به واسطه استفاده از مد‌های اپتیکی متعدد در حسگر می‌باشد. به این منظور و برای آن که به روش حسگری چندمدی حساسیت طیفی حسگر تشدید پلاسمون سطحی را محاسبه کنیم از تحلیل روابط پاشندگی آغاز می‌کنیم، با توجه به آن که تشدید زمانی در

حضور گذارهای میان نواری برای طلا مهم‌ترین دلیل بروز تفاوت میان این دو فلز است، لازم است تا در ابتدا مدلی برای ثابت دی الکتریک طلا ارایه نماییم [۸]:

$$\epsilon_{Au}(\lambda) = \epsilon_{\infty} - \frac{1}{\lambda_p^2 (\sqrt{\lambda^2 + i/\gamma_p \lambda})} + \sum_{i=1,2} \frac{A_i}{\lambda_i} \left[\frac{e^{i\phi_i}}{(\sqrt{\lambda_i - \lambda} - i/\gamma_i)} \right] + \sum_{i=1,2} \frac{A_i}{\lambda_i} \left[\frac{e^{-i\phi_i}}{(\sqrt{\lambda_i + \lambda} + i/\gamma_i)} \right]. \quad (11)$$

با استفاده از مدل تحلیلی ارایه شده در رابطه (۱۱) و همچنین با روشی مشابه آنچه برای نقره ذکر شد طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی برای حالتی که در ساختار حسگر از طلا استفاده می‌شود، به صورت عددی مورد محاسبه قرار می‌گیرد که در نتیجه شکل ۳ به دست می‌آید.

با مقایسه نمودار شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌کنیم که در طول موج‌های کوچک‌تر از ۶۰۰ نانومتر طیف بازتابندگی حسگر برای طلا به طور مشهودی با نقره متفاوت است. این تفاوت و به عبارتی کاهش میزان بازتابندگی در طول موج‌های کوچک‌تر از ۶۰۰ نانومتر در نمودار شکل ۳ ناشی از این واقعیت است که در این محدوده طول موجی، میزان جذب برای طلا در مقایسه با نقره بزرگ‌تر می‌باشد که این امر منجر



شکل ۵. حسگر تشدید پلاسمون سطحی جهت تعیین ضخامت لایه جاذب با ضریب شکست معین.

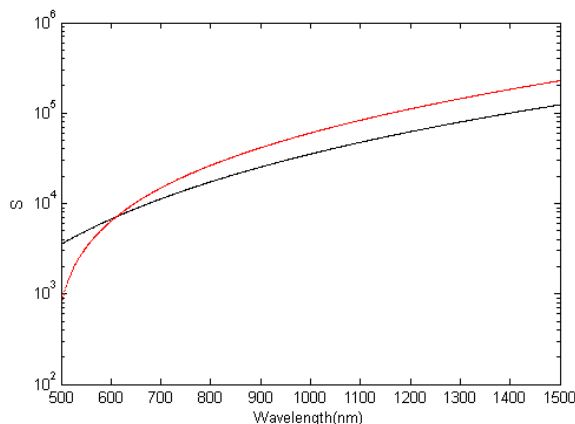
استفاده از رابطه (۱۱) برای حالتی که در ساختار حسگر طلا به کار رفته است انجام می‌دهیم، نتایج به صورت زیر به دست می‌آید.

همان‌طور که از نمودار شکل ۴ بر می‌آید، ملاحظه می‌کنیم که به روش حسگری چندمدی، در این حسگر در دو حالت متفاوت و در محدوده طول موجی مشخص، می‌توان به حساسیت طیفی بالا و از مرتبه $10^4 - 10^5 \frac{\text{nm}}{\text{RIU}}$ دسترسی پیدا کرد ($\frac{\text{nm}}{\text{RIU}}$ واحد حساسیت طیفی می‌باشد).

همچنین مشاهده می‌کنیم که حساسیت طیفی بر حسب طول موج برای طلا مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به نقره به خود اختصاص می‌دهد.

۳. تعیین ضخامت لایه جاذب با ضریب شکست معین در حسگر تشدید پلاسمون سطحی

با توجه به این‌که با محاسبه حساسیت طیفی در حسگر تشدید پلاسمون سطحی به روش حسگری چندمدی نشان دادیم که این حسگر حساسیت طیفی خوبی از خود نشان می‌دهد در این بخش نشان می‌دهیم. می‌توان از این حساسیت طیفی جهت اندازه‌گیری ضخامت لایه جاذب استفاده کرد. همچنین با توجه به آن‌که نشان دادیم با استفاده از طلا در ساختار حسگر تشدید پلاسمون سطحی حساسیت طیفی بزرگ‌تری حاصل می‌شود، ساختار این حسگر را مطابق شکل ۵ در نظر گرفته و در آن به جای نقره از طلا استفاده می‌کنیم. با فرض زاویه فرودی ۳۶



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) حساسیت طیفی حسگر تشدید پلاسمون سطحی بر حسب طول موج پرتو فرودی با در نظر گرفتن نقره (مشکی) و طلا (قرمز)

سیستم اتفاق می‌افتد که بردار موج پرتو فرودی با بردار موج پلاسمون سطحی برابر شود، داریم:

$$k_i(\omega) = k_s(\omega, n) \quad (12)$$

در این رابطه k_i بردار موج پرتو فرودی، ω فرکانس پرتوی فرودی و k_s بردار موج پلاسمون سطحی می‌باشد، همچنین n ضریب شکست ناحیه حسگری است. برای محاسبه حساسیت طیفی از طرفین رابطه (۱۲) مشتق می‌گیریم داریم:

$$\frac{d\omega}{dn} = \frac{\partial k_s / \partial n}{dk_i / d\omega - \partial k_s / \partial \omega} \quad (13)$$

در نتیجه حساسیت طیفی برابر خواهد بود با:

$$S = \frac{d\lambda}{dn} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{\partial k_s}{\partial n} \frac{1}{n_g - n_{gi}} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، n_g و n_{gi} به ترتیب شاخص گروه^۱ و شاخص فاز^۲ مدهای پلاسمون سطحی در طول موج تشدید می‌باشند. با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) و همچنین با استفاده از رابطه (۱۰) برای ثابت دی الکتریک نقره در حالت اول، به تحلیل و محاسبه شاخص فاز و گروه مدهای پلاسمون سطحی و سپس حساسیت طیفی آن می‌پردازیم. پس از آن محاسبات را با

۱. Group index

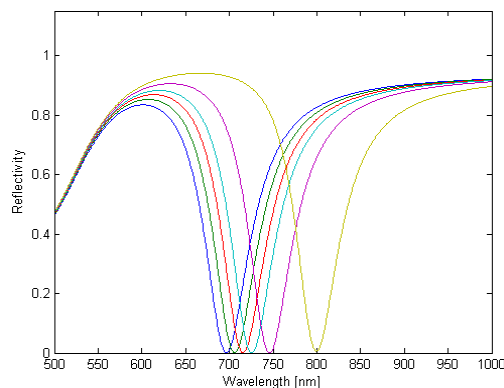
۲. Phase index

تعیین ضخامت آنها مورد استفاده قرار داد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله حسگر تشدید پلاسمون سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که طلا و نقره دو فلزی هستند که در کاربردهای پلاسمونیک بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی را برای هر کدام از آنها محاسبه کردیم و نشان دادیم که طیف بازتابندگی برای طلا در طول موج‌های کوچک‌تر از ۶۰۰ نانومتر به دلیل افزایش جذب نسبت به نقره رفتار متفاوتی نشان می‌دهد.

همچنین با توجه به نمودارهای بازتابندگی برحسب طول موج و میزان حساسیت طیفی در حسگر تشدید پلاسمون سطحی به بررسی منشأ حساسیت طیفی بالا در آن پرداختیم و نشان دادیم که به‌روشنی حسگری چندمدی رسیدن به حساسیت طیفی از مرتبه $10^5 - 10^4 \frac{nm}{RIU}$ در این حسگر امکان‌پذیر است. در نهایت و با توجه به حساسیت طیفی بالاتر و همچنین سازگاری زیستی بهتر طلا، جهت تعیین ضخامت لایه جاذب، از حسگر تشدید پلاسمون سطحی با فلز طلا استفاده کردیم و نشان دادیم که در طیف بازتابندگی، با تغییر ضخامت لایه جاذب به میزان بسیار کوچک، جابه‌جایی طیفی قابل توجهی ظاهر می‌شود و در نتیجه می‌توان از آن جهت آشکارسازی و تعیین ضخامت مولکول‌های زیستی استفاده کرد.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) جابه‌جایی طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی با تغییر ضخامت لایه جاذب به ترتیب برای ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۱۰ نانومتر.

درجه، ضریب شکست منشور ۱٫۷۶، و ضریب شکست لایه جاذب برابر ۱٫۵، مسئله الکترومغناطیسی محاسبه میزان بازتابندگی از حسگر تشدید پلاسمون سطحی را مانند آنچه در بخش (۱.۲) مطرح شد حل می‌کنیم که این بار به جای سه لایه، چهار لایه در ساختار حسگر به کار رفته است.

همچنین با در نظر گرفتن ضخامت لایه طلا به میزان ۵۰ نانومتر و استفاده از رابطه (۱۱) برای مدل‌سازی ثابت دی الکتریک آن، شبیه‌سازی طیف بازتابندگی را با استفاده از رابطه (۹) انجام داده‌ایم. نتیجه به صورت نمودار (۶) حاصل شد.

مطابق نمودار شکل (۶) ملاحظه می‌کنیم که با تغییر ضخامت لایه جاذب به میزان بسیار کوچک در نمودار بازتابندگی جابه‌جایی طیفی ظاهر می‌شود، در نتیجه ساختار این حسگر را می‌توان در جهت آشکارسازی مولکول‌های زیستی و

مراجع

1. I M White and X Fan, optics express, **16**, 2 (2008) 1020.
2. W L Barnes, T W Preist, S C Kitson, and J R Sambles, *Phys. Rev. B* **54** (1996) 6227.
3. R T Deck, D Sarid, G A Olson, and J M Elson, *Appl. Opt.* **22**, (1983) 3397.
4. J S Yuk, D G Hong, J W Jung, S H Jung, H S Kim, J A Han, Y M Kim, and K S Ha, *Eur. Biophys. J.* **35** (2006) 469.
5. Z Yu and S Fan, *Optics Express*, **19**, 11 (2011) 10029.
6. A V Zayats and I I Smolyaninov, *Physics Reports* **408** (2005) 131.
7. E LeRu and P Etchegoin, "Principles of surface Enhanced Raman Spectroscopy and Related Plasmonic Effects", Elsevier (2009) 135.
8. P G Etchegoin, E C Le Ru, and M Meyer, *J. Chem. Phys.* **125** (2006) 164705.