

حساسیت طیفی بالا به روش حسگری چندمدی در حسگر تشدید پلاسمون سطحی و استفاده از آن جهت اندازه گیری 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 می دهیم. نشان می دهیم که حساسیت طیفی قابل توجه حسگر تشدید پلاسمون سطحی، اندازه گیری ضخامت لایه جاذب را امکان پذیر می سازد.

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

۱. مقدمه

روش های افزایش حساسیت طیفی صورت گرفته است. برخی از این روش ها 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 می باشد [۵]. با توجه به این که حساسیت طیفی بالای حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی همواره به هم پوشانی مدی^۳ و یا ماهیت پلاسمون های 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 برهم کنش های زیستی، آشکارسازی مواد شیمیایی و همچنین تشخیص های پزشکی گشته است [۱]. در سال های اخیر مطالعات متعددی در زمینه

۱. Surface plasmon resonance sensor

۲. Spectral sensitivity

۳. Modal overlap

به صورت جابه جایی طیفی ظاهر می شود که این امر امکان اندازه گیری ضخامت یک تک لایه را در کاربردهای زیستی فراهم می آورد.

۲. حسگر تشدید پلاسمون سطحی

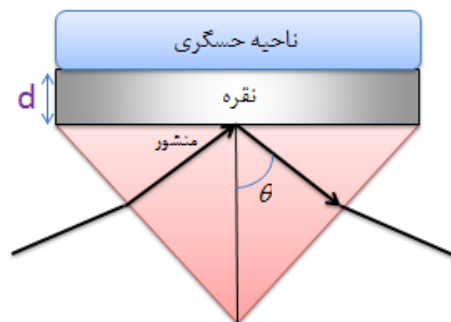
حسگر تشدید پلاسمون سطحی که در این قسمت به معرفی آن می پردازیم، مطابق شکل ۱ متشکل از یک ساختار سه لایه ای است که به ترتیب منشور با ضریب شکست $n_p = 1.76$ ، لایه بسیار نازکی از نقره به ضخامت $d = 50$ نانومتر و ناحیه حسگری با ضریب شکست $n_M = 1.32$ می باشد. در این حسگر پرتو فرودی با زاویه بزرگتر از زاویه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

می دانیم که موجی که در یک دی الکتریک و بر اثر انعکاس داخلی کلی در فصل مشترک با یک دی الکتریک دیگر به وجود می آید، یک موج تخت غیرهمگن خواهد بود، چرا که در امتداد سطح منتشر و در جهت عمود بر آن میرا می شود، 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 می شود و دامنه آن به صورت نمایی و با افزایش فاصله از فصل مشترک میرا می گردد [۶]. بنابراین در نتیجه انتقال انرژی پرتو فرودی و برانگیختگی میرا، پلاسمون سطحی در فصل مشترک نقره- هوا برانگیخته می شود 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 گونه ای 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 می رسد.

بنابراین در این مقاله در ابتدا با در نظر گرفتن حسگر تشدید پلاسمون سطحی و معرفی ساختار آن و با توجه به این که عمده ترین فلزاتی که در کاربردهای مختلف در آن مورد استفاده قرار می گیرند طلا و نقره هستند، طیف بازتابندگی برحسب طول موج آن را برای دو حالت طلا و نقره محاسبه می کنیم [۶]. سپس در پی یافتن منشأ حساسیت طیفی بالای حسگر تشدید پلاسمون سطحی به روش حسگری چند مدی^۱، به محاسبه حساسیت طیفی می پردازیم تا نشان دهیم که استفاده از مدهای اپتیکی متعدد^۲ در این حسگر دسترسی به حساسیت طیفی بالا را در آن امکان پذیر می سازد [۵]. این بررسی قبلاً تنها در محدوده طول موج های 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 می کنیم، 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 گونه ای تغییر می دهیم 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 می دهیم 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 می باشد، ضریب انعکاس فرنل یک چند لایه ای را به صورت زیر به دست می آوریم:

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

همان طور که از محاسبات بالا مشخص است، برای محاسبه طیف بازتابندگی نیازمند تابع دی الکتریک نقره می باشیم. بنابراین تابع دی الکتریک نقره را به صورت زیر معرفی می کنیم [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 $\mu_p = 17000 \text{ nm}$ و $\lambda_p = 282 \text{ nm}$ ، $\varepsilon_{\infty} = 4$ می باشد. همچنین طول موج λ برحسب نانومتر مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به روابط ذکر شده، طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی با کمک برنامه نویسی در متلب شبیه سازی شده و نتیجه در محدوده طول موجی ۵۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر به صورت زیر به دست می آید:

همان طور که نمودار شکل ۲ نشان می دهد، مطابق انتظار و در نتیجه تحریک پلاسمون سطحی، یک کمینه در طیف بازتابندگی مشاهده می گردد. همچنین مطابق شکل، اعمال اختلالی به میزان $\Delta n = 0.1$ ، منجر به جابه جایی طیفی می گردد (در ادامه همین میزان اختلال، برای حالتی که در ساختار حسگر از طلا استفاده می کنیم، به سیستم وارد می شود).

در ادامه و با توجه به این که طلا نسبت به نقره پایدارتر بوده و همچنین به لحاظ زیستی سازگاری بهتری از خود نشان می دهد به محاسبه طیف بازتابندگی آن در همان محدوده طول موجی مورد فوق، می پردازیم. 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 می گذارند. از آن جمله می توان 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 می پردازیم و در حالت اول محاسبات را برای حالتی انجام می دهیم که در ساختار حسگر فلز نقره به کار رفته است. به این منظور و برای شبیه سازی طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی، با در نظر گرفتن N فصل مشترک تخت، میزان انعکاس از یک چند لایه ای را برای پرتویی با قطبش مغناطیسی عرضی، با حل معادلات ماکسول و به روش ماتریس انتقال محاسبه می کنیم. با در نظر گرفتن صفحه xoz به عنوان صفحه فرود داریم:

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

که در آن هر محیط:

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

و ε_i گذردهی هر محیط می باشد، همچنین:

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

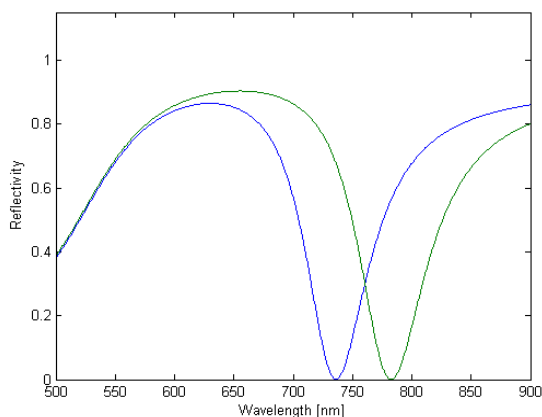
$$k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1}, \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

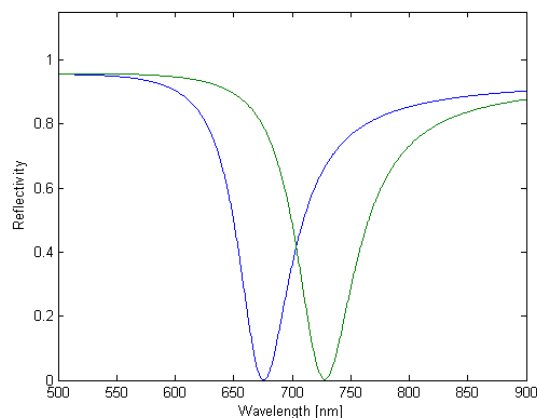
که در آن λ طول موج پرتو فرودی می باشد. علاوه بر این برای هر فصل مشترک داریم:

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

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 به‌روش حسگری چندمدی

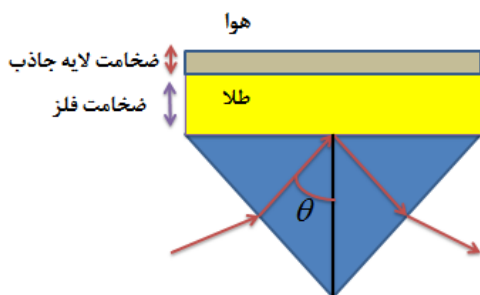
با توجه به نمودار شکل‌های ۲ و ۳، و همچنین با توجه به این‌که حساسیت طیفی به‌صورت نسبت تغییرات در طول موج تشدید به تغییرات ضریب شکست اندازه‌گیری می‌شود، ملاحظه می‌شود که حساسیت طیفی در این حسگر از مرتبه $10^3 \frac{\text{nm}}{\text{RIU}}$ می‌باشد که RIU واحد تغییرات ضریب شکست است. این حساسیت طیفی بالا 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 به‌واسطه استفاده از مدهای اپتیکی متعدد در حسگر می‌باشد. به این منظور و برای آن‌که به‌روش حسگری چندمدی حساسیت طیفی حسگر تشدید پلاسمون سطحی را محاسبه کنیم از تحلیل روابط پاشندگی آغاز می‌کنیم، با توجه به آن‌که 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]:

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

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، به‌صورت عددی مورد محاسبه قرار می‌گیرد که در نتیجه شکل ۳ به‌دست می‌آید.

با مقایسه نمودار شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌کنیم که در طول موج‌های کوچک‌تر از ۶۰۰ نانومتر طیف بازتابندگی حسگر برای طلا به‌طور مشهودی با نقره متفاوت است. این تفاوت و به‌عبارتی 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.

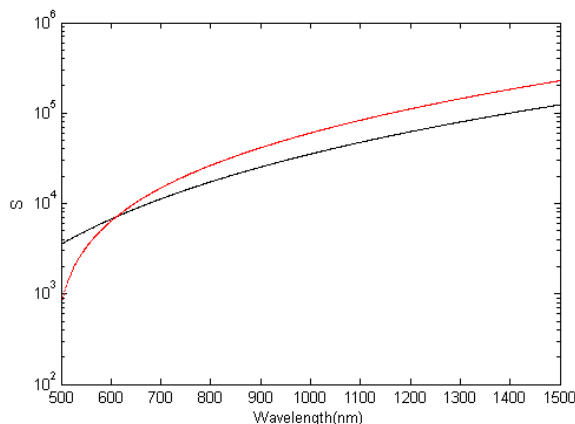
همان‌طور که از نمودار شکل ۴ بر می‌آید، ملاحظه می‌کنیم که به روش حسگری چندمدی، در این حسگر در دو حالت متفاوت و در محدوده طول موجی مشخص، می‌توان به حساسیت طیفی بالا و از مرتبه $10^4 - 10^5 \frac{\text{nm}}{\text{RIU}}$ دسترسی پیدا کرد (واحد حساسیت طیفی می‌باشد).

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 این که 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 آن که 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

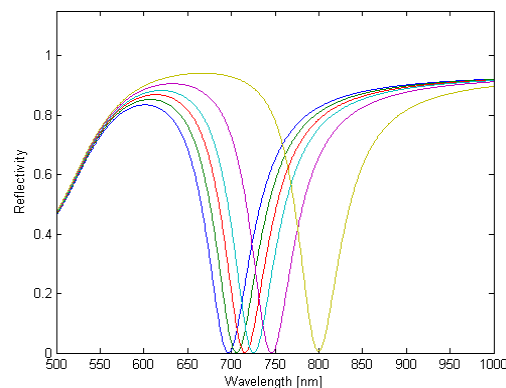
۲. Phase index

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 می گیرند، طیف بازتابندگی حسگر تشدید پلاسمون سطحی را برای هر کدام از آنها محاسبه کردیم و نشان دادیم که طیف بازتابندگی برای طلا در طول موج های کوچک تر از ۶۰۰ نانومتر به دلیل افزایش جذب نسبت به نقره رفتار متفاوتی نشان می دهد.

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 به روش حسگری چندمدی رسیدن به حساسیت طیفی از مرتبه $10^5 - 10^4 \frac{\text{nm}}{\text{RIU}}$ در این حسگر امکان پذیر 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، جابه جایی طیفی قابل توجهی ظاهر می شود و در نتیجه می توان از آن جهت آشکارسازی و تعیین ضخامت مولکول های زیستی استفاده کرد.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) جابه جایی 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 می کنیم 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 مدل سازی ثابت دی الکتریک آن، شبیه سازی طیف بازتابندگی را با استفاده از رابطه (۹) انجام داده ایم. نتیجه به صورت نمودار (۶) حاصل شد.

مطابق نمودار شکل (۶) ملاحظه می کنیم که با تغییر ضخامت لایه جاذب به میزان بسیار کوچک در نمودار بازتابندگی جابه جایی طیفی ظاهر می شود، در نتیجه ساختار این حسگر را می توان در جهت آشکارسازی مولکول های 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.