بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

شبیه سازی حسگر فشار تار نوری کنار ساییده مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی

علی لطفعلیان[۱]، آیدا آرای[۲]، مجتبی ارجمند[۲،۱]، حسین ثقفی‌فر[۱]

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر- پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر

۲- دانشگاه اصفهان – دانشکده علوم – گروه فیزیک

چکیده - در این مقاله با بکارگیری تغییر ضریب شکست ناشی از تغییر فشار و استفاده از ماتریس انتقال، عملکرد یک حسگر فشار مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی شبیه سازی شده است. با تغییر ضخامت لایه غلاف و فلز، تاثیر پارامترهای ساختاری بر عملکرد حسگر بررسی شده و ضخامت بهینه فلز ۴۵ نانومتر بدست آمده است. برای پلیمری با مدول یانگ ۰/۲ MPa تغییر طول موج تشدید بر حسب فشار از مرتبه ۹۰۰۰ nm/MPa حاصل خواهد شد.

کلید واژه- پلاریتون پلاسمون سطحی، حسگر فشار، ماتریس انتقال، مدول یانگ.

Simulation of side-polished fiber optic pressure sensor based on surface plasmon polariton

Ali Lotfalian[۱], Ayda Aray[۱,۲], Mojtaba Arjmand[۱,۲], and Hossein Saghafifar[۱]

۱- Optics and Laser Research Institute, Malek-Ashtar University of Technology

۲- Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan

Abstract- According to pressure induced refractive index variation, a pressure sensor based on surface plasmon polariton has been simulated using transfer matrix method. In order to study of important parameters on operation of this kind of sensor, the effect of clad and metal thickness has been simulated. Results show that the optimum metal thickness is about ۴۵ nm. It is found that for polymer with ۰.۲ MPa Young's modulus, variation of wavelength versus pressure is about ۹۰۰۰ nm/MPa.

Keywords: Pressure sensor, Surface plasmon plariton,Young's modulus.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-19]

۱- مقدمه

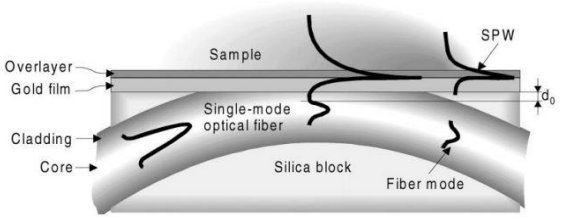
استفاده از موجبرهای نوری به عنوان محیط دی الکتریک بمنظور برانگیختگی پلاریتون پلاسمون سطحی از سال ۱۹۹۵ مطرح شده است [۱]. با توجه به وابستگی این مدهای تشدیدی به ویژگی‌های سطح و محیط مجاور بویژه ضریب شکست، می‌توان به حسگرهای دقیق صنعتی و پزشکی دست یافت [۲]. از طرفی به علت وابستگی ضریب شکست به برخی کمیت‌های فیزیکی از جمله دما و فشار، می‌توان از این نوع حسگرها برای اندازه‌گیری این کمیت‌ها استفاده کرد. بعنوان مثال، تعیین مقدار دقیق فشار کاربردهای بسیاری در علم هواشناسی، صنعت فضایی و همچنین پایش چاه‌های نفت دارد. با توجه به این نیاز، شبیه‌سازی عملکرد یک حسگر فشار تار نوری مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی ارائه شده است. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف چون قطر غلاف تار نوری و ضخامت لایه فلزی بر عملکرد حسگر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲- بررسی نظری

حسگر پلاریتون پلاسمون سطحی بر مبنای برانگیختگی نوسانات الکترون آزاد در مرز واسط فلز-دی الکتریک عمل می‌کند. تحریک این نوسانات با بکارگیری میدان نوری محوشونده با قطبش TM انجام می‌شود. بدین منظور تاکنون دو آرایش اتوو [۱] و کرشمن [۲] پیشنهاد شده است. از آنجا که هدایت نور در تار نوری مبتنی بر بازتاب کلی داخلی است؛ می‌توان با استفاده از تار نوری کنار سائیده با لایه نشانی فلز، این نوسانات را تحریک نمود (شکل ۱). با حل معادلات ماکسول و اعمال شرایط مرزی برای قطبش TM، رابطه ۱ بدست می‌آید [۳]:

$$\frac{\beta_1}{\varepsilon_1}=\frac{\beta_2}{\varepsilon_2} \qquad (۱)$$

که در آن ε_1 و ε_2 به ترتیب گذردهی مربوط به لایه فلز و دی الکتریک می‌باشند. علاوه بر این به منظور تحریک پلاسمون‌های سطحی بوسیله امواج الکترومغناطیسی، باید شرط جورشدگی فازی برآورده شود. با بکارگیری این رابطه، طول موج تشدید پلاریتون های پلاسمون سطحی حاصل خواهد شد:



شکل ۱- برانگیختگی پلاریتون پلاسمون سحطی در تار نوری کنار ساییده شده [۳].

$$k_x=\frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}} \qquad (۲)$$

با بکارگیری بخش حقیقی رابطه ۲ می‌توان طول‌موج تشدید را بدست آورد [۳]:

$$\lambda_{res}=\frac{2\pi}{k_x^{'}}\approx\sqrt{\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1^{'}+\varepsilon_2}}\lambda \qquad (۳)$$

تابع دی الکتریک فلز نیز از رابطه درود بدست می‌آید [۶]:

$$\varepsilon(\lambda)=1-\frac{\lambda^2\lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c+i\lambda)} \qquad (۴)$$

که λ_p و λ_c به ترتیب بیانگر طول‌موج پلاسما و طول-موج برخورد با مقادیر $۱/۲۶۶۸\times۱۰^{-۷}$ و $۸/۹۳۴۲\times۱۰^{-۶}$ می‌باشند. چنانچه مشاهده می‌شود طول‌موج تشدید به گذردهی لایه دی الکتریک اطراف لایه فلزی بستگی دارد که این امر برای کاربردهای حسگری الزامی است. از طرفی چنانچه محیط پیرامون تار نوری را پلیمری با مدول یانگ E_p احاطه کرده باشد اعمال فشار می‌تواند منجر به تغییر چگالی و در نتیجه تغییر ضریب شکست محیط پیرامون حسگر شود. این امر به نوبه خود به صورت تغییر طول‌موج تشدید مشاهده خواهد شد. تغییرات چگالی بر اثر اعمال فشار از رابطه ۵ حاصل می‌شود [۵]:

$$\delta\rho=-\rho\frac{V}{V-V_f}\frac{\delta l}{l}=-\frac{\rho}{\nu_p}\varepsilon \qquad (۵)$$

که در آن ν_p بیانگر حجم نسبی است و برای پلیمر مقدار آن یک درنظر گرفته می‌شود. ε کرنش محوری است که از طریق مدول یانگ E_p و طبق رابطه ۶ به تغییرات فشار وابسته است:

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-19]

$$\varepsilon = \frac{-\Delta p}{E_p} \qquad (۶)$$

بنابراین می‌توان تغییرات چگالی بر حسب تغییرات فشار را به صورت رابطه ۷ نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{\rho}{v_p E_p} \qquad (۷)$$

در دمای ثابت و برای یک طول موج خاص داریم [۵]:

$$\rho \frac{\partial n}{\partial \rho} = (1-\Theta)\frac{(n^2-1)(n^2+2)}{6n} \qquad (۸)$$

که در آن:

$$\Theta = -\frac{\rho}{R_{LL}}\frac{\partial R_{LL}}{\partial \rho} = -\frac{\rho}{\alpha_m}\frac{\partial \alpha_m}{\partial \rho} = -\frac{\partial \ln \alpha_m}{\partial \ln \rho} \qquad (۹)$$

از طرفی با به کار گیری روابط ۷ و ۸ داریم:

$$\frac{\partial n}{\partial p} = \frac{\partial n}{\partial \rho}\frac{\partial \rho}{\partial p} = (\rho \frac{\partial n}{\partial \rho})\frac{1}{v_p E_p} \qquad (۱۰)$$

که برای پلیمرها [۶]:

$$\left(\rho \frac{\partial n}{\partial \rho}\right)_T \approx 0.50$$

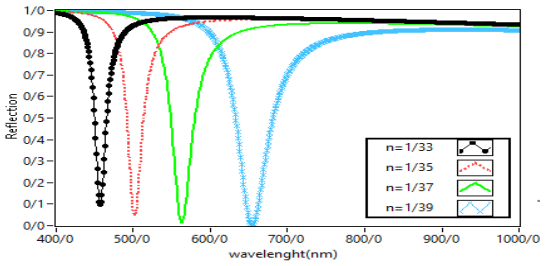
از روابط ۴ و ۱۰ مشاهده می‌شود که تغییرات فشار باعث تغییر طول‌موج تشدید می‌شود:

$$\frac{\Delta \lambda_{res}}{\Delta P} = \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial n_P}\frac{\partial n_p}{\partial P} = \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial n_P}\left(\rho \frac{\partial n}{\partial \rho}\right)_T \frac{1}{v_p E_p} \qquad (۱۱)$$

در رابطه ۱۱ تغییرات طول موج تشدید بر حسب تغییرات ضریب شکست مقدار عددی معینی است. از این رابطه مشخص است که با اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج ناشی از تغییر ضریب شکست، می‌توان میزان تغییرات فشار را محاسبه کرد.

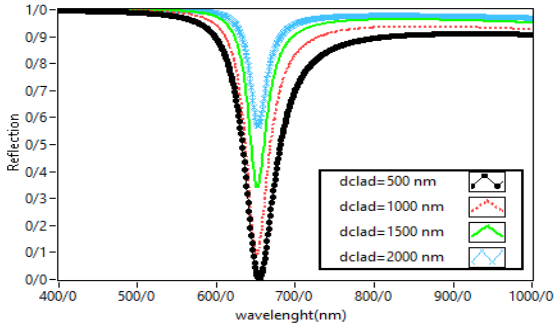
۲-۱- نتایج شبیه سازی و بحث

بمنظور شبیه‌سازی حسگر فشار تار نوری مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی از روش ماتریس انتقال [۴] استفاده شده است. محاسبات صورت گرفته، با در نظر گرفتن فلز طلا بر روی تار نوری و نیز ضرایب سلمایر برای غلاف و هسته [۷] انجام شده است. ضریب شکست طلا با بکارگیری رابطه درود، رابطه ۴، بدست آمده است. با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ضریب شکست برای محیط پیرامون حسگر، تغییرات بازتاب نور بر حسب طول‌موج محاسبه شده و نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲- تغییرات طول موج تشدید برای مقادیر مختلف ضریب شکست محیط پیرامون حسگر.

چنانچه در این شکل مشخص است؛ افزایش ضریب شکست، منجر به افزایش طول موج تشدید خواهد شد. از طرفی قطر غلاف تار نوری بر عملکرد حسگر پلاسمون سطحی تاثیر خواهد گذاشت. بینیاب عبوری از تار نوری با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف غلاف، در شکل ۳ نشان داده شده است؛ که در آن ضخامت فلز ۴۵nm و ضریب شکست لایه آخر ۱/۳۹ فرض شده است. همان طور که از شکل دیده می‌شود کاهش ضخامت غلاف باقیمانده، تاثیری در طول‌موج تشدید ندارد اما سبب تغییر قدرت برهمکنش نور با امواج پلاسمون سطحی و در نتیجه افزایش پهنا و نیز کاهش عمق نفوذ خواهد شد.

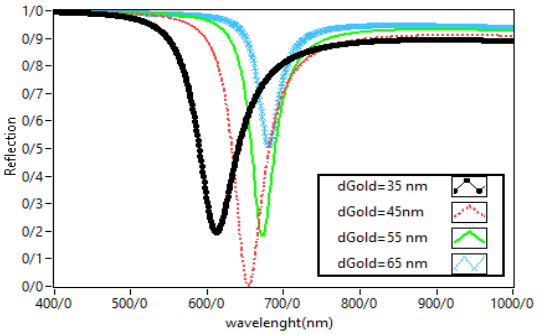


شکل ۳- تاثیر ضخامت غلاف تار نوری بر عمق دره بینیاب.

یکی دیگر از عوامل موثر در عملکرد حسگر پلاریتون سطحی، ضخامت لایه فلزی می‌باشد. با در نظر گرفتن

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-19]

ضخامت غلاف ۵۰۰ نانومتر و ضریب شکست پلیمر ۱/۳۹، تاثیر تغییر ضخامت فلز بررسی شده و نتیجه در شکل ۴ نشان داده شده است.

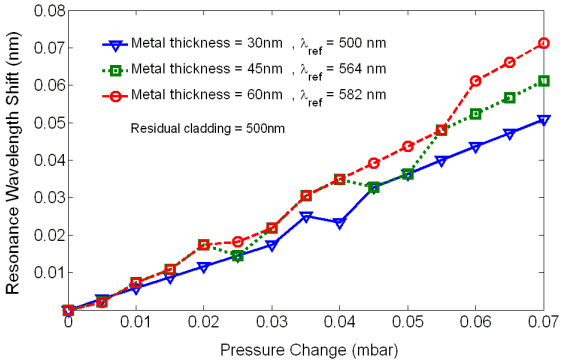


شکل۴- تاثیر ضخامت لایه فلز بر عمق دره و جابجایی طول‌موج تشدید.

با توجه به شکل ۴ عملکرد بهینه حسگر از نظر دقت اندازه‌گیری، به ازای ضخامت فلز ۴۵ nm حاصل می‌شود و برای ضخامت‌های کمتر و یا بیشتر از ضخامت بهینه، شاهد افزایش پهنای طیف و یا کاهش عمق دره خواهیم بود. پاسخ حسگر به صورت تابعی از فشار به ازای ضخامت‌های مختلف فلز در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود پاسخ حسگر رفتاری تقریبا خطی دارد و حساسیت آن نیز برای هر سه مقدار ضخامت فلز تقریبا یکسان است. مقدار حساسیت حسگر در اندازه‌گیری تغییرات فشار حدود ۰/۹ nm/mbar محاسبه شده است.

جدول ۱- مقادیر عددی مربوط به حسگر فشار طراحی شده بر پایه پلاریتون پلاسمون سطحی.

ضخامت غلاف باقیمانده	۵۰۰ nm
ضخامت بهینه لایه طلا	۴۵ nm
مدول یانگ پلیمر	۰/۲۷۵ MPa
حساسیت حسگر	۹۰۰۰ nm/MPa (۰/۹ nm/mbar) معادل با ۵۰۰۰ nm/RIU
حداقل فشار قابل تشخیص	۰/۰۱ mbar (با در نظر گرفتن دقت دستگاه بیناب سنج = ۱۰ pm)



شکل۵- پاسخ حسگر به صورت تابعی از تغییرات فشار

در جدول ۱ اطلاعات مربوط به حسگر طراحی شده برای تشخیص فشار از مرتبه میلی‌بار ارائه شده است. نکته مهم در تعیین مدول یانگ پلیمر، دقت دستگاه بیناب‌سنج است.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با ارایه روابط حاکم بر پلاریتون پلاسمون سطحی، به شبیه‌سازی حسگر فشار تار نوری کنار سائیده پرداخته شده است. مهمترین عامل در تعیین عملکرد حسگرهای فشار پلاریتون پلاسمون سطحی، مدول یانگ پلیمر بکار رفته در ساختار حسگر است. با بررسی ضخامت‌های مختلف غلاف تار نوری نتیجه می‌شود که با سایش هرچه بیشتر غلاف تار نوری، پهنای بیناب تشدیدی کمتر و عمق دره بیشتر می‌شود. در مقاله ارائه شده ضخامت بهینه لایه فلز، بررسی و مقدار آن برابر ۴۵nm حاصل شده است.

مراجع

[۱] Richard B M Schasfoort, Anna, Handbook of Surface Plasmon Resonance,RSCpoblishing,۲۰۰۸,pp ٤١٤-٤١٨

[۲] *O.S.Wolfbeis, surface plasmon resonance based sensor,pp ۱- ۹,Springer ,* ۲۰۰٦

[۳] *Radan SlavõÂka, , JirÏõÂ Homola, JirÏõÂ CÏ tyrokyÂ, Eduard Brynda, Novel spectral fiber optic sensor based on surface plasmon resonance,Elsevier, Sensors and Actuators B ٧٤ (٢٠٠١) ١٠٦-١١١*

[٤] B.D. Gupta, Anuj K. Sharma, Sensitivity evaluation of a multi-layered surface plasmon resonance-based fiber optic sensor: a theoretical study,Elsevier, *Sensors and Actuators B ١٠٧(٢٠٠٥) ٤٠-٤٦.*

[٥] Haokun Mi , Yongjiao Wang , Pan Jin , Liang Lei, Design of a ultrahigh-sensitivity SPR-based optical fiber pressure sensor,Elsevier,Optik.

[٦] Zhiyi Zhan , Ping Zhao, Peng Lin, Fengguo Sun, Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications,Elsevier, Polymer ٤٧ (٢٠٠٦) ٤٨٩٣-٤٨٩٦.

[٧] Ajoy Ghatak,anintrodution to fiber optic,Cambrige uni,١٩٩

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-19]