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 فوق حساس بر پایه تشدید پلاسمون سطحی دور برد

علی جندقیان[۱]، علی لطفعلیان[۲*]، آیدا آرای[۲]، مجتبی ارجمند[۲]، عزالدین مهاجرانی[۱] و حسین ثقفی فر[۲].

۱.پژوهشکده لیزر و پلاسما،دانشگاه شهید بهشتی.

۲. پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

چکیده – در این مقاله حسگر فشار بر پایه تشدید پلاسمون سطحی دور برد و نیز روابط مربوط به تغییر ضریب شکست پلیمر بر اثر تغییر فشار مورد بررسی قرار گرفته است. تشدید پلاریتون های سطحی دور برد باعث افزایش حساسیت خواهد داشت. با توجه به تاثیر ضخامت های لایه دی الکتریک و لایه فلزی بر عملکرد این نوع حسگر، ضخامت بهینه مورد تحلیل قرار گرفته است و ضخامت ۱۵ نانومتر برای لایه نقره تعیین می شود. با به کارگیری پارامتر های بهینه، حسگر تغییر بازتاب بین ۰/۰۳۵ تا ۰/۷۶۵ برای فشار کمتر از ۹۶kPa ..را حس خواهد کرد.حساسیت این نوع حسگر از مرتبه $\frac{Deg}{MPa}$ ۸/۶×۱۰$^{-۶}$به دست می آید.

کلید واژه- پلیمر، تشدید پلاسمون سطحی دور برد ،حساسیت، حسگر فشار .

Simulation of ultra sensitive pressure sensor based on long range surface plasmon resonance.

A.jandaghian[۱],A.lotfalian*[۲],A.aray[۲],M.arjmand[۲],E.mohajerani[۱] and H.saghafifar[۲].

۱. Laser and Plasma Institute, .Shahid Beheshti University.

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

Abstract- In this study, a pressure sensor based on surface plasmon resonance and also the relations of the change in refractive index that is affected by the change of pressure is numerically investigated. The use of long range surface plasmon resonance will be more sensitive so the effect of metal and dielectric layer thickness on the operation of this type of sensor and optimum thickness is analyzed. For metal, the optimal thickness of ۱۵ nm were obtained. For structure with optimal parameters, the sensor is able to vary the reflectance from ۰.۰۳۵ to ۰.۷۶۵ by applying a pressure as low as ۰.۹۶ kPa. The sensitivity of sensor is calculated about ۸.۶× ۱۰$^{-۶}$ deg/MPa.

Keywords: Long rang surface plasmon resonance , Polymer, Pressure sensor, Sensitivity .

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

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

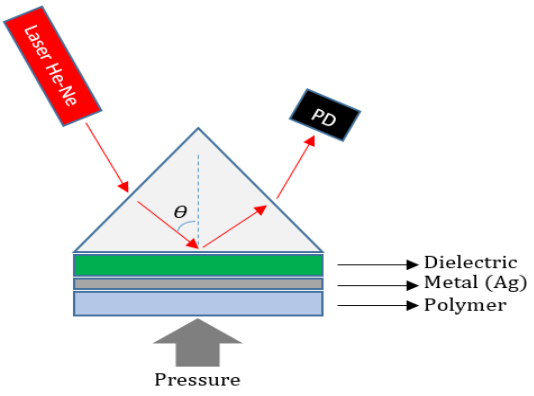
۱- مقدمه

با توجه به اهمیت اندازه گیری دقیق فشار در تجهیزات هواشناسی، صنعت خودروسازی و همچنین پایش چاه های نفت[۱] پیشرفت های زیادی در افزاره های اندازه گیری فشار صورت گرفته است. برخی از ویژگی ها از جمله نوفه پذیری کمتر، کم خطر بودن برای محیط اندازه گیری و نیز دقت بالا برتری حسگرهای نوری نسبت به دیگر حسگر ها از جمله حسگرهای الکتریکی را رقم زده است[۲]. از جمله حسگرهای نوری، حسگرهای بر پایه تشدید پلاسمون سطحی می باشد که استفاده از به عنوان حسگرهای شیمیایی سال هاست ارایه شده است[۳]. استفاده از تشدید پلاسمون سطحی دور برد[۱] به عنوان پایه حسگرهای فشار باعث افزایش حساسیت این نوع حسگرها می شود. در این مقاله طرز کار حسگر فشار بر پایه LRSPR بررسی و شبیه سازی شده و همچنین برخی از ویژگی های آن با حسگر فشار بر پایه پلاسمون سطحی مقایسه می شود.

۲- ساختار و روابط کلی

۲-۱- اصول اولیه

شکل ۱ طرحواره ای از یک حسگر فشار بر پایه LRSPR را نشان می دهد. ساختار چند لایه نشان داده شده شامل منشور از جنس BK۷، لایه دی الکتریک، لایه فلز از جنس نقره و نیز پلیمر با مدول یانگ معلوم می باشد.



شکل ۱ طرحواره ای از حسگر فشار بر پایه LRSPR .

ساختار بالا بر پایه بازتاب کلی داخلی عمل می کند و در آن لایه نقره بین دو لایه دی الکتریک برای تشکیل ساختار نیمه متقارن که برای برانگیزش ساختار LRSPR مورد نیاز است قرار گرفته است، هنگامی که نور ورودی به منشور دارای قطبش TM باشد بر اثر بازتاب کلی داخلی و پس از زاویه حد جور شدگی فاز برای تشدید پلاسمون سطحی رخ می دهد. با توجه به ساختار متقارن موجود، پلاسمون های سطحی تشکیل شده در دو طرف لایه فلزی می تواند با هم تزویج شوند و به LRSPR تبدیل می شود که افزایش حساسیت نسبت به پلاسمون سطحی معمولی را به همراه خواهد داشت[۴]. تشدید پلاسمون سطحی به ویژگی های لایه دی الکتریک مجاور فلز وابسته است و تغییر در ضریب شکست این لایه باعث تغییر در ویژگی های تشدید از جمله زاویه تشدید می شود. تغییر فشار اطراف لایه دی الکتریک باعث تغییر چگالی پلیمر شده و تغییر چگالی باعث تغییر ضریب شکست لایه پلیمری و در نتیجه تغییر زاویه تشدید پلاسمون سطحی می شود.

۲-۲- بررسی تئوری

چنانچه محیط پیرامون لایه فلزی را یک پلیمر با مدول یانگ E_p احاطه کرده باشد، تغییرات چگالی بر اثر اعمال فشار از رابطه ۱ حاصل می شود[۵]:

$$\delta\rho = -\rho\frac{V}{V-V_f}\frac{\delta l}{l} = -\frac{\rho}{\nu_p}\varepsilon \qquad (۱)$$

که در آن ν_p نشان دهنده حجم نسبی است و برای پلیمر مقدار آن یک در نظر گرفته می شود. مقدار ε کرنش محوری، توسط مدول یانگ و با رابطه زیر به تغییرات فشار وابسته می شود:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta p}{E_p} \qquad (۲)$$

بنابراین می توان تغییرات چگالی بر حسب تغییرات فشار را به صورت رابطه ۳ نوشت:

$$\frac{\partial\rho}{\partial p} = \frac{\rho}{\upsilon_p E_p} \qquad (۳)$$

در دمای ثابت و برای یک طول موج خاص خواهیم

---

[۱] Long Range Surface Plasmon Resonance(LRSPR)
Resonance(LRSPR)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

داشت[۵]:

$$\rho\frac{\partial n}{\partial \rho}=(1-\Theta)\frac{(n^2-1)(n^2+2)}{6n} \qquad (۴)$$

که در آن:

$$\Theta=-\frac{\rho}{R_{LL}}\frac{\partial R_{LL}}{\partial \rho}=-\frac{\rho}{\alpha_m}\frac{\partial \alpha_m}{\partial \rho}=-\frac{\partial \ln \alpha_m}{\partial \ln \rho} \qquad (۵)$$

از طرفی با به کار گیری رابطه ۳ و ۴ داریم:

$$\frac{\partial n}{\partial p}=\frac{\partial n}{\partial \rho}\frac{\partial \rho}{\partial p}=(\rho\frac{\partial n}{\partial \rho})\frac{1}{\nu_p E_p} \qquad (۶)$$

که برای پلیمر ها[۶]:

$$\left(\rho\frac{\partial n}{\partial \rho}\right)_T\approx 0.50 \qquad (۷)$$

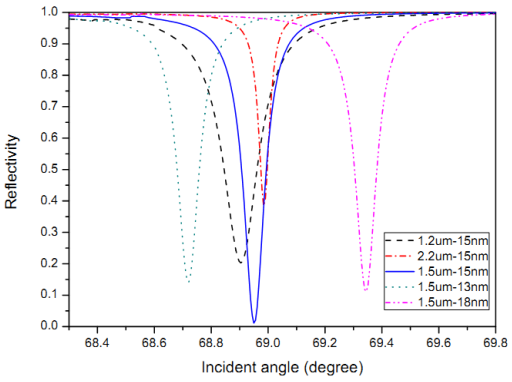
از رابطه ۶ و شرط پلاسمون سطحی نتیجه می شود که تغییرات فشار باعث تغییر زاویه تشدید می شود :

$$\frac{\Delta\theta_{res}}{\Delta P}=\frac{\partial\theta_{res}}{\partial n_P}\frac{\partial n_p}{\partial P}=\frac{\partial\theta_{res}}{\partial n_P}\cdot\left(\rho\frac{\partial n}{\partial \rho}\right)_T\frac{1}{\nu_p E_p} \qquad (۱۳)$$

در رابطه بالا تغییرات زاویه تشدید بر حسب تغییرات ضریب شکست مقدار عددی معینی است. مقدار بازتاب از ساختار برای قطبش TM با استفاده از ماتریس انتقال محاسبه شده است[۷] .

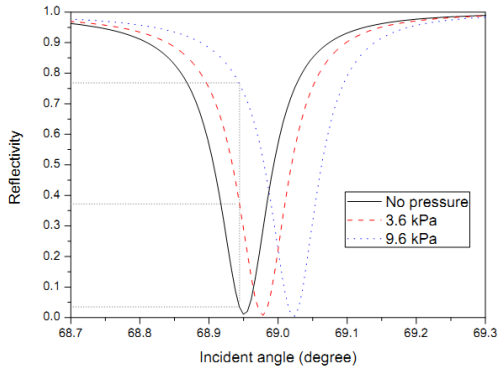
۲-۳- شبیه سازی و تحلیل نتایج

بعد از معرفی ساختار باید سطوح مختلف را برای رسیدن به بهترین بازده، بهینه کرد. منشور، لایه دی الکتریک، لایه نقره و نیز لایه پلیمری به ترتیب به عنوان سطوح ۱، ۲، ۳و ۴در نظر گرفته می شود. ضریب شکست منشور n_1=۱.۵۱۵(شیشه BK۷)، n_2=۱.۴۱ (لایه دی الکتریک)، n_3=۴.۰۲+۰.۱۳۴i(لایه نقره) وn_4=۱.۴۰(لایه پلیمر) فرض شده و در محاسبات از آن استفاده شده است. طول موج نور ورودی برابر ۶۳۲.۸ نانومتر فرض شده است و چون در محدوده طیف مریی می باشد استفاده از آن در برپایی های تجربی راحت تر خواهد بود. شکل ۲ نمودار بازتاب مربوط به حسگر برای ضخامت های مختلف نقره و دی الکتریک را نشان می دهد. برای رسیدن به بیشترین عمق دره و نیز کمترین مقدار FWHM ضخامت بهینه مربوط به نقره و دی الکتریک به ترتیب برابر ۱۵ نانومتر و ۱.۵ میکرون تعیین می شود..



شکل ۲ تاثیر ضخامت فلز و لایه دی الکتریک

ضخامت لایه پلیمر باید بگونه ای باشد که ساختار نیمه متقارن مورد نیاز برای برانگیزش LRSPR را حفظ کند و نیز تغییر فشار باعث تغییر ضریب شکست محیط اطراف لایه نقره شود، شکل ۳ تغییر زاویه تشدید LRSPR را نشان می دهد. تغییر فشار به اندازه ۹.۶ kPa باعث تغییر ضریب شکست به اندازه ۰.۰۰۱۶ و نیز تغییر زاویه به اندازه ۰.۰۷۴۵ درجه می شود.

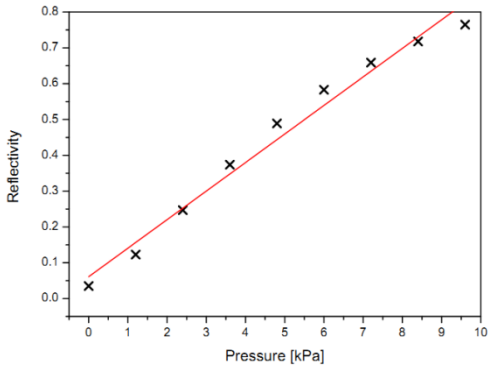


شکل ۳ جابجایی زاویه تشدید بر اثر تغییر فشار

برای دسترسی به بیشترین کنتراست برای حسگر، زوایه بر روی ۶۸.۹۲ درجه تنظیم می شود. تغییر فشار به اندازه ۹.۶ kPa باعث تغییر بازتاب از ۰.۰۳۵ به ۰.۷۶۵را می

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

شود. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده رابطه خطی بین تغییر فشار و تغییر بازتاب در این ناحیه وجود دارد که برای اندازه گیری تغییر فشار توسط حسگر لازم است.



شکل ۴ نمودار بازتاب بر حسب تغییر فشار

پایین بودن کیفیت لایه نشانی نقره باعث کاهش تزویج پلاسمون های سطحی می شود و نیز ایده آل نبودن موازی سازی نور ورودی و همچنین جمع آوری نور بازتابی باعث ایجاد یک تغییر اندک در حساسیت محاسبه شده و بدست آمده در ساختار های تجربی می شود. جدول ۱ مقایسه ای بین حسگر فشار بر پایه LRSPR و SPRرا نشان می دهد.

جدول۱ مقایسه برخی از ویژگی های حسگر بر پایه LRSPR و SPR.

	حسگر بر پایه SPR	حسگر بر پایه LRSPR
جنس منشور	BK۷	BK۷
ضخامت بهینه لایه دی الکتریک	ندارد	۱۵۰۰
ضخامت لایه پلیمر	۱۰۰۰	۱۰۰۰
ضخامت بهینه فلز (نقره)	۴۵	۱۵
مدول یانگ پلیمر	۳ MPa	۳Mpa
FWHM	۴.۶۶۶	۰.۰۸۷۹
ناحیه پویایی	۷۰ kPa	۱۰ kPa

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به اهمیت اندازه گیری فشار، حسگرهای فشار بر پایه تشدید پلاسمون سطحی دور برد معرفی شده است. حسگر بر پایه LRSPR به دلیل ساختار متقارن و نیز اندازه گیری مقدار تغییر ضریب شکست حجمی و باتوجه به روابط ارایه شده که تغییر ضریب شکست حجمی در پلیمر را نشان می دهد این نوع حسگر نسبت به حسگر های SPR حساسیت بیشتری دارند. برخی عوامل از جمله ضخامت لایه دی الکتریک و فلز در علمکرد حسگر اهمیت دارند، از این رو ضخامت های بهینه برای ساختار مورد بررسی قرار گرفته و ضخامت فلز و دی الکتریک به ترتیب ۱۵ و ۱۵۰۰ نانومتر تعیین می شود. مقدار مدول یانگ پلیمر نقش زیادی در حساسیت حسگر فشار دارد، برای حسگر با مدول یانگ ۳MPa تغییر بازتاب بین ۰.۰۳۵ تا ۰.۷۶۵ برای فشار کمتر از kPa۰.۹۶ اندازه گیری می شود و با توجه به تغییر فشار از مرتبه kPa در چاه های نفت هنگام حفاری استفاده از این نوع حسگر ارایه می شود.

مراجع

[۱] F.S young Jr.Adam T bourgoyne Jr,applied drilling engineering.sociliti of petroleum enfineers,۱۹۹۱.pp۲٤٦-۲۹٤.

[۲] Radan SlavõÂka, JirÏõÂ Homola, JirÏõÂ CÏ tyroky,Eduard Beryna , Novel spectral fiber optic sensor based on surface plasmon resonance ,Elsevier, Sensors and Actuators B ۷٤ (۲۰۰۱) ۱۰٦-۱۱۱.

[۳] Wolfbeis., Surface Plasmon Resonance Based Sensors, pp. ۱-۹, Springer, ۲۰۰٦.

[٤] Xueliang Shi, Shilie Zheng, Hao Chi, Xiaofeng Jin, Xianmin Zhang,, All-optical modulator with long range surface plasmon resonance, Optics & Laser Technology ٤۹ (۲۰۱۳) ۳۱٦_۳۱۹.

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

[٦] Zhiyi Zhang , Ping Zhao, Peng Lin, Fengguo Sun, Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications,Elsevier, Polymer ٤۷ (۲۰۰٦) ٤۸۹۳_٤۸۹٦.

[۷] 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 ۱۰۷ (۲۰۰٥) ٤۰_٤٦.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]