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

بررسی حساسیت سنسور فیبرنوری بر پایه تشدید پلاسمون سطحی با نانو لایه فلزی

مهسا محرمی، محمد کوهی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، گروه فیزیک، تبریز، ایران

چکیده – در این مقاله قابلیت استفاده از نانو لایه های فلزی در حسگر فیبر نوری بر اساس تشدید پلاسمون سطحی بطور تئوری بررسی شده است. حساسیت سنسور فیبر نوری بر پایه تشدید پلاسمون سطحی با دو فلز مجزای (طلا و نقره) و ضخامت های مختلف لایه ی نازک فلز بطور عددی بدست آمده است. نتایج محاسبات نشان داده اند که با افزایش ضخامت لایه نازک فلزی حساسیت سنسور فیبرنوری نیز افزایش می یابد. بعلاوه، مشخص شده است که در حالت ضخامتهای یکسان برای دو فلز، حساسیت سنسور فیبر نوری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی با لایه طلا بیشتر از نقره است.

کلید واژه- تشدید پلاسمون سطحی، حساسیت، حسگر، فیبر نوری

Investigation of Sensitivity of the Surface Plasmon Resonance Based Fiber Optic Sensor with Metal Nanolayer

Mahsa Moharrami, Mohammad Kouhi

Department of Physics, College of Science, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Abstract- In this paper the capability of metals nanolayer used in surface plasmon resonance (SPR) based fiber optic sensing is investigated theoretically. The sensitivity of the SPR based fiber optic sensor with two different metals (gold and silver) and various thickness of the metal film is obtained numerically. The calculation results are shown that with increasing of thickness of the metal film the sensitivity of fiber optic sensor is increased too. Furthermore, it is found that in the SPR based fiber optic sensor with same thickness of two metals, Au metal film has further sensitivity than Ag.

Keywords: surface plasmon resonance, sensitivity, sensor, fiber optic

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

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

۱- مقدمه

تشدید پلاسمون سطحی یکی از پدیده های جالبی است که به دلیل داشتن کاربردهای متعدد اپتیکی و فوتونیکی مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. اولین مورد استفاده تشدید پلاسمون سطحی (SPR) برای آشکارسازی توسط لیدبرگ و همکارانش[۱] در سال ۱۹۸۳ گزارش شده است. از آن به بعد تحقیقات تجربی و تئوری زیادی در این زمینه انجام گرفته است[۲-۵].

نوسان دسته جمعی الکترونهای آزاد در سطح پلاسما باعث انتشار موج الکترومغناطیسی عرضی به موازات مرز مشترک فلز-دی الکتریک می شود،که موج پلاسمون سطحی مینامند.موج پلاسمون سطحی توسط باریکه نور پلاریزه p (نور پلاریزه TM- ،بردار میدان الکتریکی موازی صفحه فرودی) برانگیخته میشود. وقتی ثابت انتشار نور تابشی و موج پلاسمون سطحی با هم برابر باشند، تشدید اتفاق می افتد. شرایط تشدید بستگی به زاویه تابش و طول موج نور تابشی و همچنین ضرایب شکست محیط های فلز و دی الکتریک دارد. دو روش برای بررسی تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد. اگر طول موج نور تابشی ثابت و زایه تابش تغییر داده شود به ازای زاویه ای که تشدید اتفاق می افتد با افت شدید در شدت نور بازتابی مواجه خواهیم شد، این روش بررسی زاویه ای نامیده می شود. در روش دوم یعنی بررسی طیفی یا طول موجی با ثابت نگه داشتن زاویه تابش طول موج نور تابشی تغییر داده می شود که تشدید در یک طول موج خاص اتفاق می افتد. پارامتر تشدید (زاویه یا طول موج) بستگی به ضرایب شکست محیط دی الکتریک و فلز دارد.

اندازه بزرگ ادوات حسگر تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر منشور موجب محدودیت حرکت مکانیکی می شود. همچنین، این نوع حسگرها نمی توانند در کاربردهای کنترل از راه دور مورد استفاده قرار بگیرند. در حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر نوری محدودیت های فوق حل شده است. در این مقاله ضخامت نانو لایه ی فلزات طلا و نقره تغییر و حساسیت سنسور با استفاده از روش بررسی طول موجی بصورت عددی محاسبه شده است. نتایج نشان می دهند با افزایش ضخامت لایه فلزی برای هردو فلز طلا ونقره، حساسیت افزایش می یابد.

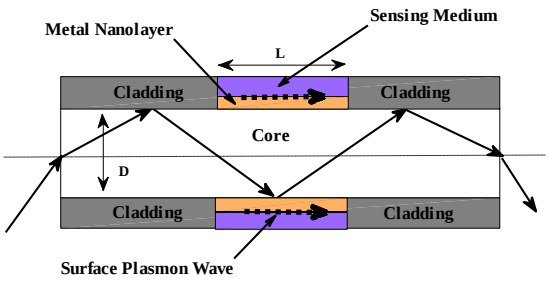
۲- تئوری و روش

شکل ۱ شمای حسگر مورد مطالعه در این مقاله را نشان می دهد. پوشش پلاستیکی اطراف هسته فیبر نوری با ضریب شکست پله ای از قسمت میانی برداشته شده و با لایه ی نازکی از فلزات طلا و نقره لایه نشانی شده و توسط محیط حساس احاطه میشود. نور از یک انتها وارد فیبر شده و بعد از بازتابهای کلی متوالی در انتهای دیگر آشکار سازی می شود. تغییر جزئی ضریب شکست محیط حساس باعث تغییر شدت نور عبوری از فیبر خواهد شد.

در این مقاله برای محاسبه توان عبوری نور تابشی، با استفاده از روش ماتریسی مدل N لایه ای [6] ابتدا ضریب بازتاب r_p نور تابشی پلاریزهP بدست می آید. سپس بازتابندگی $R_p = |r_p|^2$ محاسبه و طبق معادله(۵) در محاسبه توان عبوری نرمالیزه مورد استفاده قرار می گیرد.

لایه ی اول هسته فیبر از جنس سیلیکای گداخته بوده و ضریب شکست آن مطابق رابطه ی پراکندگی سئلمییر به طول موج بستگی دارد:

$$n_1(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1\lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2\lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3\lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2}} \qquad (۱)$$



شکل ۱: حسگر تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر نوری

که طول موج λ بر حسب میکرو متر بوده و مقادیر ضرایب سئلمییر بصورت زیر هستند[7]:

$$a_1 = 0.6962663, a_2 = 0.4079426, a_3 = 0.8974794$$
$$b_1 = 0.0684043\mu m, b_2 = 0.1162414\mu m, b_3 = 9.896161\mu m$$

لایه دوم نانو فلزات با ضخامتهای متغیر میباشد. ثابت دی الکتریک هر فلز مطابق مدل درود قابل محاسبه است:

$$\varepsilon_m(\lambda) = 1 - \frac{\lambda^2\lambda_c}{\lambda_p^2(\lambda_c + i\lambda)} \qquad (۲)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

طول موجهای پلاسما و برخورد طلا و نقره عبارتند از[۸] :

$$for\ Gold\ \lambda_p = 0.16826\mu m, \lambda_c = 8.9342\mu m$$
$$for\ Silver\ \lambda_p = 0.14541\mu m, \lambda_c = 17.614\mu m$$

لایه سوم محیط حساس (دی الکتریک) بوده ضریب شکست آن از ۱,۳۰تا ۱,۳۶ تغییر داده شده است. شرط تشدید موج پلاسمون سطحی عبارت است از:

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sin\theta = \mathrm{Re}\{K_{sp}\} \qquad (۳)$$

که در آن $K_{sp} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}}$ ثابت انتشار پلاسمون سطحی و c سرعت نور در خلاء است. طرف چپ معادله(۳) ثابت انتشار نور تابشی تحت زاویه θ و طرف راست آن قسمت حقیقی ثابت انتشار پلاسمون سطحی را نشان می دهد.

با فرض اینکه تمام پرتوهای تابشی، بتوانند داخل فیبرنوری شوند، توزیع زاویه ای توان باریکه های هدایت شده در داخل فیبر نوری از رابطه زیر بدست می آید[9]:

$$dP \propto \frac{{n_1}^2 \sin\theta\cos\theta}{(1-{n_1}^2\cos^2\theta)^2} d\theta \qquad (۴)$$

که θ زاویه بین باریکه با خط عمود بر سطح هسته فیبر و پوشش بوده و n_1 ضریب شکست هسته فیبر است. برای محاسبه توان عبوری موثر، بازتابندگی را به توان تعداد بازتابها در طول ناحیه حساس رسانده و توان عبوری نرمالیزه را از رابطه زیر بدست می آوریم[4,5]:

$$P_{trans} = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\frac{\pi}{2}} {R_p}^{N_{ref}(\theta)} \left[\frac{{n_1}^2 \sin\theta\cos\theta}{(1-{n_1}^2\cos^2\theta)^2}\right] d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{{n_1}^2 \sin\theta\cos\theta}{(1-{n_1}^2\cos^2\theta)^2}\right] d\theta} \qquad (۵)$$

که در آن $N_{ref}(\theta) = \frac{L}{D\tan\theta}$ تعداد بازتابهای کلی در طول L محیط حساس برای باریکه ای که با خط عمود بر سطح (هسته فیبر- لایه فلز) زاویه θ درست می کند را نشان می دهد. قطر هسته فیبر نوری با D نشان داده شده است. با فرض اینکه ضرایب شکست هسته فیبر با n_1 و پوشش با n_{cl} نشان داده شوند زاویه حد از رابطه $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{n_{cl}}{n_1}\right)$ بدست می آید.

وقتی توان عبوری نرمالیزه به صورت تابعی از طول موج محاسبه می شود، برای یک مقدار ضریب شکست ناحیه حساس به ازای طول موج تشدید توان عبوری مینیمم خواهد شد. اگر ضریب شکست محیط حساس به اندازه δn_s تغییر کند طول موج تشدید به اندازه $\delta\lambda_{res}$ جابجا می شود. حساسیت سنسور نوری تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر نوری بصورت نسبت اندازه جابجایی طول موج تشدید به تغییر ضریب شکست ($S_n = \frac{\delta\lambda_{res}}{\delta n_s}$) تعریف می شود.

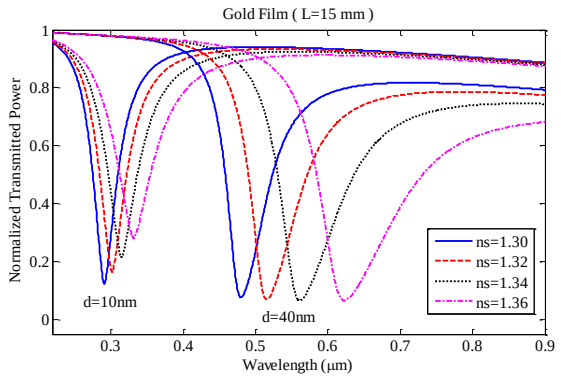
۳- نتایج و بحث

برای محاسبات عددی در این مقاله گشودگی عددی فیبر نوری NA=0.18 قطر فیبرنوری D=600μm و طول ناحیه حساس L=15mm انتخاب شده است. برای دو ضخامت d=10nm و d=40nm لایه های نازک طلا و نقره با تغییر دادن ضریب شکست ناحیه حساس توان نرمالیزه عبوری بطور عددی محاسبه شده است.

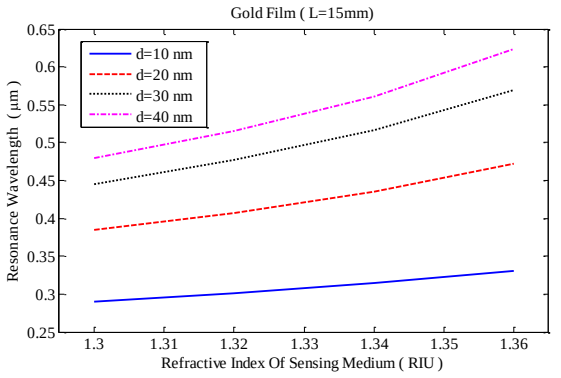
شکل ۲ توان نرمالیزه نور عبوری از حسگر فیبر نوری با نانو لایه طلا را بصورت تابعی از طول موج نشان می دهد. ضریب شکست ناحیه حساس به عنوان پارامتر انتخاب شده و برای دو ضخامت مختلف نانولایه طلا توان عبوری نشان داده شده است.

مطابق شکل ۳ با افزایش ضریب شکست ناحیه حساس، طول موج تشدید افزایش می یابد. این افزایش خطی طول موج تشدید با ضریب شکست محیط حساس برای همه مقادیر ضخامتهای نانولایه فلزی می تواند با توجه به تغییرات ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی توجیه شود. طبق رابطه ۳ بخش حقیقی ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی در تعیین شرایط تشدید نقش اساسی دارد. برای ضرایب شکست کوچکتر محیط حساس، بخش حقیقی ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی کوچکتر بوده و بنابراین، شرایط تشدید در طول موجهای کوچکتر برآورده می شود[۶]. بطور مشابه، برای ضرایب شکست بزرگتر محیط حساس شرایط تشدید به دلیل بزرگتر بودن ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی در طول موجهای بزرگتر اتفاق می افتد.

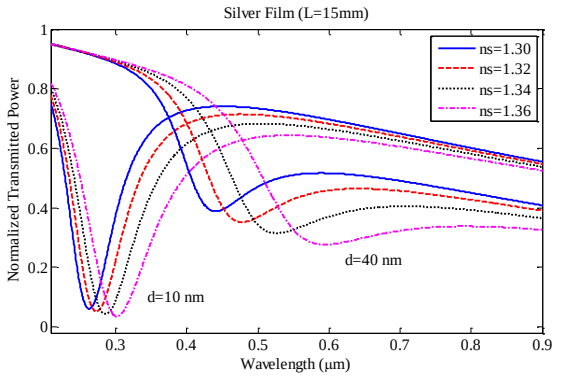
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]



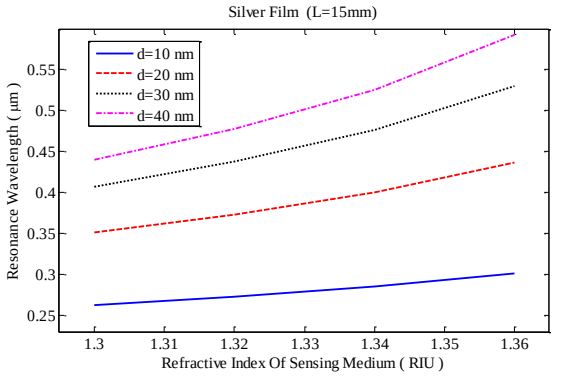
شکل ۲: توان نرمالیزه عبوری برحسب طول موج برای نانو لایه طلا



شکل ۳: طول موج تشدید برحسب ضریب شکست (نانولایه ی طلا)



شکل ۴: توان نرمالیزه عبوری برحسب طول موج برای نانو لایه نقره



شکل ۵: طول موج تشدید برحسب ضریب شکست (نانولایه ی نقره)

شکل ۴ توان نرمالیزه عبوری برحسب طول موج را برای نانولایه نقره نشان می دهد. در شکل ۵ تغییرات طول موج تشدید با ضریب شکست ناحیه حساس وقتی از لایه نازک نقره استفاده می شود نشان داده شده است.

در ضخامت ۴۰ نانومتر لایه طلا با تغییر ضریب شکست ناحیه حساس از ۱,۳۰ تا ۱,۳۶ طول موج تشدید از طول موج۰,۴۷۹۵ میکرومتر به ۰,۶۲۳۰ میکرومتر انتقال یافته است. یعنی حساسیت سنسور نوری تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبرنوری با نانولایه طلا 2.54μm/RIU است. در حالیکه حساسیت در همین ضخامت برای لایه نقره2.39μm/RIU است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار حسگر نوری تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر نوری معرفی شد. با تغییر ضخامت نانو لایه ی فلزات طلا و نقره، حساسیت سنسور با استفاده از روش بررسی طول موجی بصورت عددی محاسبه شد. نتایج نشان می دهند با افزایش ضخامت نانو لایه فلزی برای هردو فلز طلا ونقره، حساسیت افزایش می یابد. در ضخامت یکسان ۴۰ نانومتر حساسیت سنسور در حالت استفاده از طلا بیشتر از مورد نقره است.

مراجع

[1] Liedberg B., Nylander C., Lunstr I., *Surface Plasmon resonance for gas detection and biosensing*, **Sensors and Actuators B**, 4 (1983) 299–304.

[2] Sharma N.K., Gupta B. D., *Absorption-based fiber optic surface plasmon resonance sensor:a theoretical evaluation*, **Sensors and Actuators B**, 100(2004)423–431.

[3] Diaz-Herrera N., et al., *In situ salinity measurements in seawater with a fibre-optic probe*, **Measurement Science and Technology**, 17 (2006) 2227–2232.

[4] Sharma N.K., *Performances of different metals in optical fibre-based surface plasmon resonance sensor*, **Pramana – J. Phys.**, 78 (2012) 417-427.

[5] Rani M., Shukla S., Sharma N.K., Sajal V., *Theoretical study of nanocomposites based fiber optic SPR sensor*, **OpticsCommunications** , 313 (2014) 303–314.

[6] Sharma N.K., Gupta B.D., *On the performance of different bimetallic combinations in surface plasmon resonance based fiber optic sensors*,**J.Appl.Phys.** 101(2007) 093111.

[7] Ghatak A.K., Thyagarajan K., *An Introduction to Fiber Optics*, P.82-83, first ed., CambridgeUniversity Press, Cambridge (UK), 1999.

[8] Ordal M. A., et al, *Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared*, **Appl. Opt.** 22 (1983) 1099-1120.

[9] Gupta B.D., et al., *Evanescent wave absorption sensors basedon uniform and tapered fibers: A comparative study of their sensitivities*, **Int. J.Optoelectron.**, 8 (1993) 409–418.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]