



بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



تشخیص نفت خام بوسیله حسگر ضریب شکست تارنوری مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی

مهديه سادات جعفری، آیدا آرای و حسین ثقفی فر

پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

چکیده - در این تحقیق، از پدیده تشدید پلاسمون سطحی در اندازه گیری ویژگی های نفت خام مخازن و خطوط لوله استفاده شده است. حسگر تارنوری مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی با ساختار ۵ لایه تارنوری / کروم / نقره / کبالت / تانتالم پنت اکسید پیشنهاد و شبیه سازی شده است. با در نظر گرفتن ۴ نوع متفاوت نفت خام با محدوده ضریب شکست بین ۱.۴۴-۱.۵۶ ویژگی های حسگر مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت بهینه برای لایه های مختلف ساختار با بررسی مقدار $FWHM$ بیناب عبوری از حسگر، حاصل شده اند.

کلید واژه- تارنوری، حسگر، رزونانس پلاسمون سطحی، ضریب شکست

Crude oil detection by refractive index fiber optic sensor based on surface plasmon polariton

Mahdie Sadat Jafari, Ayda Aray, Hossien Saghafifar

Optics and laser science and technology research center, Malek Ashtar University of Technology, shahinshahr

Abstract- In this paper, Surface Plasmon Resonance is used to measure crude oil properties in tanks and pipelines. A fiber optic surface plasmon resonance sensor is proposed and simulated based on a 5 layer structure consisting of Optical Fiber/Chromium/silver/ Cobalt/Ta₂O₅. considering 4 different crude oil with the refractive index of 1.44-1.56, the proposed sensor is characterized. Optimum thicknesses for different layers are obtained by investigation of the FWHM of transmitted spectra.

Keywords: Fiber Optic, Sensor, Surface Plasmon Resonance, Refractive Index

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

۱- مقدمه

اندازه‌گیری خواص فیزیکی و ترموفیزیکی نفت خام و هیدروکربن‌های آن، در صنعت از اهمیت خاصی برخوردار است. خواص این سیال نقش مهمی در امکان‌سنجی انجام عملیات‌ها، طراحی و مدیریت مخازن، پالایش و پردازش بازی می‌کند [۱]. از طرفی در تجزیه و تحلیل مایعات هیدروکربنی چالش‌های بسیاری، از جمله: فشار بالا، شرایط دمایی و همچنین غیرشفاف بودن نمونه وجود دارد. غیر شفاف بودن نفت خام، به مشکلی برای تعیین خصوصیات نوری این ماده تبدیل شده است. علاوه بر این، برای نمونه‌گیری، تجزیه و تحلیل در چاه‌ها، خطوط لوله و در سیستم‌های چند فاز (آب، نفت، و گاز) این خصوصیت پیچیدگی بیشتری ایجاد می‌کند و اندازه‌گیری مطمئن خواص این سیال، نیازمند روش‌های اندازه‌گیری کاربردی-تری می‌باشد. ضریب شکست (RI) مشخصه مهمی است که می‌تواند جهت برآورد خواص این ماده، مانند چگالی، ثابت بحرانی و ظرفیت گرمایی مورد استفاده قرار گیرد. دستگاه سنجش ضریب شکست^۱ برای اندازه‌گیری RI مایعات شفاف و نیمه شفاف مورد استفاده قرار می‌گیرد اما برای مایعات مات مانند نفت خام سنگین و فوق سنگین مناسب نیست. یک روش برای حل این مساله رقیق کردن نفت خام با حلال، اندازه‌گیری RI از مخلوط رقیق شده و سپس محاسبه RI برای نمونه رقیق نشده با استفاده از روابط حاکم است [۲]. با این حال این روش، برای اندازه‌گیری مداوم RI عملی نیست و رقیق‌سازی می‌تواند اثرات ناخواسته‌ای بر خواص پیچیده طبیعی مایعات داشته باشد. پدیده تشدید پلاسمون سطحی را در سطح فلز و دی‌الکتریک تحت شرایط بازتاب کلی داخلی می‌توان مشاهده کرد. در شرایط تشدید، بخشی از انرژی تابشی ورودی به الکترون‌های در حال نوسان تزویج شده و در نتیجه نور بازتاب یافته کاهش خواهد یافت [۳]. از طرفی نقطه‌ی دره رزونانس به هندسه لایه‌های نازک فلزی و RI محیط پیرامون وابسته است. در نتیجه تشخیص تغییرات جزئی در خواص مواد با پیمایش دره رزونانس امکان‌پذیر می‌باشد. و هیچ محدودیتی بر رقت نفت‌های سنگین و فوق سنگین در اندازه‌گیری اعمال نمی‌شود. این روش با پاسخ دهی مستقیم برای نظارت مستمر در مخازن و

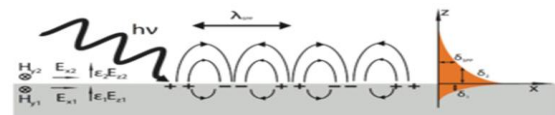
خطوط لوله مناسب است.

در این تحقیق سعی شده از پدیده پلاریتون پلاسمون سطحی در حسگر تار نوری برای تشخیص نفت خام استفاده شود. با توجه به دقت و حساسیت حسگر SPR در تشخیص و همچنین پاسخگویی سریع، به شبیه‌سازی این ساختار حسگری پرداخته خواهد شد. با در نظر گرفتن ساختار تارنوری/کروم/نقره/کبالت/تانتالم پنت اکسید و شبیه‌سازی بر اساس ماتریس انتقال عملکرد این حسگر بررسی خواهد شد.

۲- حسگر ضریب شکست تار نوری مبتنی بر

پلاریتون پلاسمون سطحی

حسگرهای تار نوری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی (SPR) به دلیل حساسیت بالا، اندازه کوچک و مصونیت از امواج الکترومغناطیس بسیار مورد توجه هستند.



شکل ۱: انتشار امواج پلاسمون سطحی در مرز فلز - دی‌الکتریک

زمانی که یک موج نور با زاویه بزرگتر از زاویه بحرانی به سطح تار نوری برخورد می‌کند یک موج میرا شونده در سطح تار نوری و فیلم دی‌الکتریک تولید می‌نماید (شکل ۱). چنانچه ضخامت لایه فلز به حد کافی کم باشد موج میرا شونده به پلاسمون سطحی در مرز واسط فلز-محیط پیرامون تزویج می‌شود. بدین منظور باید ثابت‌های انتشار موج میرا شونده و پلاسمون سطحی برابر باشند. از آنجا که شرایط تشدید این موج شدیداً به ویژگی‌های محیط پیرامون حسگر از قبیل RI آن بستگی دارد، می‌توان از این پدیده بعنوان حسگر RI بهره گرفت.

۳- پلاریتون پلاسمون سطحی

پلاسمون‌های سطحی در واقع امواج با قطبش TM هستند. میدان متناظر با این امواج در دو محیط به صورت عمود بر سطح افت نمایی دارد که این امر در شکل ۱ نشان داده شده است.

با استفاده از معادلات ماکسول، ثابت انتشار پلاریتون‌های پلاسمون سطحی از رابطه زیر به دست می‌آید [۴]:

$$K_{SP} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (1)$$

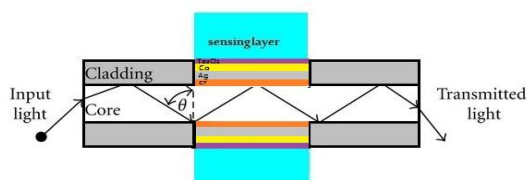
که ϵ_m و ϵ_s به ترتیب ثابت دی‌الکتریک لایه فلزی و محیط دی‌الکتریک، ω بسامد و c سرعت نور هستند.

^۱refractometer

۵- ساختار حسگر ضریب شکست تار نوری و

نتایج شبیه سازی

به منظور تحریک پلاسمون سطحی در ساختار ارائه شده از فلز نقره استفاده می‌شود (شکل ۳). که به ترتیب لایه-های کروم، نقره، کبالت و تانتالوم پنت اکسید روی تار نوری ای با غلاف کاهش یافته با ضریب شکست ۱/۴۵۷ قرار می‌گیرند.



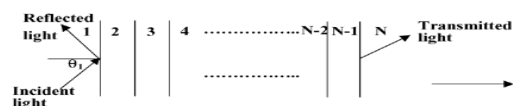
شکل ۳: ساختار حسگری تار نوری

ضخامت لایه کروم ۴۰nm، لایه نقره ۳۵nm، لایه کبالت ۹۰nm و لایه تانتالوم پنت اکسید ۸۰nm انتخاب شده است. چنانچه در شکل ۴ نشان داده شده است و با توجه به رابطه (۱) تغییر ضریب شکست نفت خام، باعث تغییر ثابت انتشار و در نتیجه شرایط تزویج پلاسمون سطحی فلز شده و طول موج تشدید تغییر خواهد کرد و دره در بیناب بازتابی جابه جا خواهد شد. بنابراین می‌توان نوع نفت خام را تشخیص داد. شکل ۴ طیف SPR را برای چهار نوع نفت خام با ضرایب شکست ۱.۴۴۵، ۱.۴۶۷، ۱.۵۰۵، ۱.۵۵۶ نشان می‌دهد. که به ترتیب مربوط به نفت خام لوئیزیانای جنوبی LA، نیجریه، اکوادور و کانادا هستند. طبق نتایج شبیه سازی، تشدید SPR برای این سیالات به ترتیب در طول موج‌های ۴۹۳.۸، ۴۸۵.۸، ۴۷۶.۳، ۴۶۸.۸ تشکیل شده است. چنانچه در شکل ۵ مشاهده می‌شود با تغییر RI نفت خام طول موج تشدید SPR نیز تغییر خواهد کرد. نهایتاً این تغییر را می‌توان با توجه به توضیحات ارائه شده جهت تعیین RI نفت خام بکار گرفت. بدین ترتیب در کاربردهای میدانی با داشتن طول موج تشدید می‌توان RI و متعاقباً ویژگی‌های سیال مورد نظر را به دست آورد. همچنین هرگونه تغییر در RI نفت خام با تغییر محل دره SPR قابل تشخیص بوده و بنابراین وجود ناخالصی و یا حلال‌ها مستقیماً قابل تشخیص خواهد بود. با توجه به اهمیت دقت حسگر برای تشخیص دقیق نفت خام، تغییرات FWHM نسبت به محیط پیرامون باید مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تغییر ضخامت لایه‌های حسگر بر دقت آن تاثیر گذار است. چنانچه در شکل ۶ نشان داده

طبق رابطه (۱) امواج الکترومغناطیسی TM با امواج پلاسمون سطحی تزویج و با توجه به اتلاف بالا، از بیناب عبوری حذف می‌شوند. بدین ترتیب در شرایط تشدید شاهد دره‌ای در بیناب عبوری خواهیم بود [۳] که به تغییر RI محیط پیرامون حسگر بستگی خواهد داشت. از طرفی دقت حسگر با پهنای بیناب بازتابی (FWHM) رابطه عکس دارد و هرچه پهنای بیناب کمتر باشد حسگر دقت بیشتری خواهد داشت [۵].

۴- شبیه سازی با روش ماتریس انتقال

پدیده پلاریتون پلاسمون سطحی را می‌توان با استفاده از بازتاب فرنل و ماتریس انتقال بررسی نمود [۶]. برای یک ساختار N لایه که در شکل ۲ نشان داده شده است، در امتداد محور Z و با در نظر گرفتن ضخامت d_k ، ثابت گذردهی ϵ_k ، و ضریب شکست n_k برای هر لایه، روابط زیر حاصل می‌شوند که میدان‌های مماسی در اولین لایه را به آخرین لایه مرتبط می‌کنند. در این ماتریس مشخصه ساختار M، که در رابطه (۲) [۶] نشان داده شده است، U_1 و V_1 به ترتیب میدان‌های مماسی الکتریکی و مغناطیسی در مرز لایه‌های اول و دوم؛ و U_{N-1} و V_{N-1} پارامترهای مرتبط با مرز لایه‌های N و N-1 ام هستند.



شکل ۲: مدل N لایه برای تعیین شدت نور بازتابی

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M = \prod_{k=2}^{N-1} M_k$$

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & -i \sin \beta_k \\ -iq_k \sin \beta_k & q_k \cos \beta_k \end{bmatrix}$$

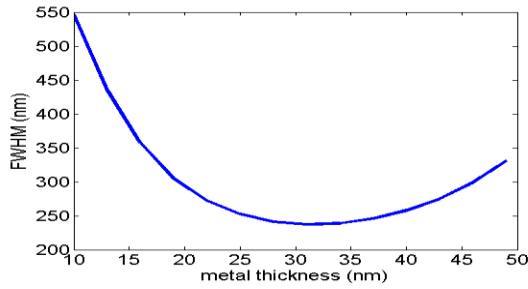
$$q_k = \left(\frac{\mu_k}{\epsilon_k}\right)^{1/2} \cos \theta_k = \frac{(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}}{\epsilon_k}$$

$$\beta_k = \frac{2\pi d_k}{\lambda} (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}$$

$$R_p = |r_p|^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، r_p بیانگر دامنه ضریب بازتاب و R_p شدت بازتاب است. با تزویج میدان الکترومغناطیسی فرودی با امواج پلاسمون سطحی، شاهد کاهش R_p در طول موج تشدید خواهیم بود. این امر به صورت ایجاد یک دره در بیناب بازتابی نمایان می‌شود.

FWHM افزایش یافته و در نتیجه دقت حسگر کاهش خواهد یافت.



شکل ۸: تغییر $FWHM$ حسگر با تغییر ضخامت لایه نقره از 10 nm تا 50 nm

۶- نتیجه گیری

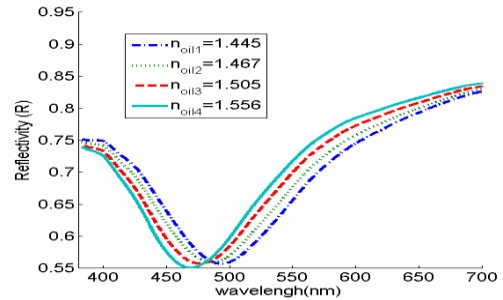
حسگرهای پلاریتون پلاسمون سطحی به دلیل این که مبتنی بر تغییرات RI محیط عمل می کنند، می توانند با طراحی پیکربندی مناسب بمنظور تشخیص ماده ای خاص طراحی شوند. حسگرهای پلاریتون پلاسمون سطحی طراحی شده به منظور تشخیص نفت خام به دلیل دقت مناسب می توانند جهت تشخیص این ماده مورد استفاده قرار بگیرد. با توجه به نتایج به دست آمده از نمودارهای $FWHM$ در شکل های ۸ و ۹ با انتخاب ضخامت مناسب برای لایه های به کار رفته حسگری با دقت قابل قبول برای تشخیص RI نفت خام و در نتیجه تشخیص این ماده طراحی شد. ضخامت های 30 nm تا 35 nm نقره و ضخامت های 70 nm تا 100 nm تانتالم پنت اکسید برای طراحی حسگر مناسب تر خواهند بود.

در این تحقیق با پیکربندی تارنوری/کروم 40 nm نقره 35 nm کبات 90 nm تانتالم پنت اکسید 80 nm حسگر ضریب شکست تار نوری مبتنی بر پلاریتون پلاسمون سطحی برای تشخیص نفت خام طراحی شد.

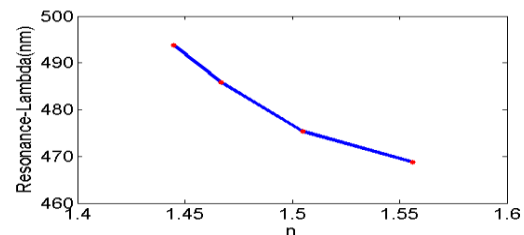
مراجع

- [1] H. Giles, N. C. O. Mills, "Crude Oils: Their Sampling, Analysis, and Evaluation" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [2] J. S. Buckley, J. J. Wang, "Crude Oil and Asphaltene Characterization for Prediction of Wetting Alteration", *Pet. Sci. Eng.*, 33, 19–202, 2002.
- [3] ED. Palik, G. Ghosh, "Handbook of optical constants of solids. Academic", San Diego, 199.
- [4] H. Raether, "Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings", Springer Verlag, 1988.
- [5] S. A. Zynio, A. V. Samoylov, E. R. Surovtseva, V. M. Mirsky, Y. M. Shirsov, "Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance", *Sensors*, vol. 2, pp. 62–70, 2002.
- [6] B. D. Gupta, A. K. Sharma, "Sensitivity evaluation of a multi-layered surface plasmon resonance-based fiber optic sensor: a theoretical study," *Sensors and Actuators B*, vol. 107, no. 1 pp. 40-46, 2005.

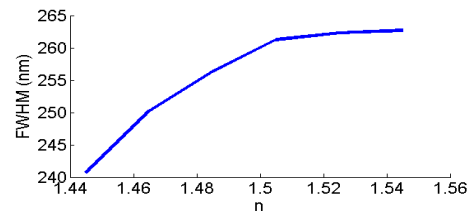
شده است، حسگر در ضرایب شکست پایین تر $FWHM$ کمتر و در نتیجه دقت بیشتری دارد.



شکل ۴: طیف پلاسمون سطحی چهار نفت خام مربوط به لوئیزیانای جنوبی LA، نیجریه، اکوادور و کانادا

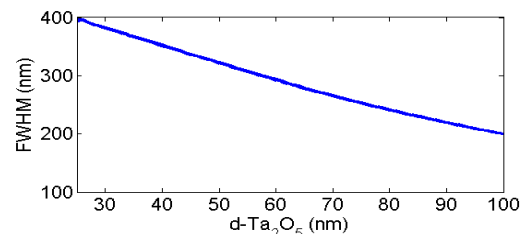


شکل ۵: تغییرات طول موج تشدید پلاسمون سطحی با تغییر نوع نفت خام های لوئیزیانای جنوبی LA، نیجریه، اکوادور و کانادا



شکل ۶: تغییر $FWHM$ حسگر با تغییر ضریب شکست محیط پیرامون از 1.44 تا 1.56

چنانچه در شکل ۷ نشان داده شده افزایش ضخامت لایه تانتالم پنت اکسید باعث کاهش $FWHM$ می شود و در نتیجه بیشترین دقت در ضخامت های بالاتر Ta_2O_5 به دست می آید. با توجه به شکل ۷ حسگر در ضخامت های بین 70 nm تا 100 nm دقت بیشتری خواهد داشت.



شکل ۷: تغییر $FWHM$ حسگر با تغییر ضخامت لایه Ta_2O_5 از 25 nm تا 100 nm

چنانچه در شکل ۸ نشان داده شده است، افزایش ضخامت لایه نقره حداکثر تا ضخامت های 30 nm تا 35 nm باعث کاهش $FWHM$ شده اما در ضخامت های بیشتر،