بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# اثر لایه‌ی روغن بر پاسخ نوری یک حسگر تشدید پلاسمون سطحی

نجمه رضایی کریم‌اباد[۱]، مجید رشیدی هویه[۱]، حسین مظفری[۱]

[۱]گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

**چکیده – حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی به علت حساسیت، دقت و سرعت پاسخ به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. به منظور تحریک پلاسمون‌های سطحی، حسگر، متشکل از یک لایه‌ی فلزی ( عمدتا طلا یا نقره) که روی یک زیرلایه نشانده شده است، ممکن است روی سطح منشور قرار گیرد. به منظور افزایش کارایی و کاهش انعکاس از سطح مشترک منشور-زیرلایه، از یک روغن شفاف استفاده می‌شود. در این تحقیق، اثر لایه‌ی روغن موجود بین دوسطح منشور و زیرلایه بر پاسخ حسگر به طور نظری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد برای محیط حسگری هوا کارایی حسگر تحت تاثیر لایه‌ی روغن نیست در حالی که برای محیط حسگری آب در ضخامت-های بیشتر از ۱۰۰ نانومتر لایه-ی روغن، حسگر کارایی خود را از دست می‌دهد.**

کلید واژه- تشدید پلاسمون سطحی، حسگر تشدید پلاسمون سطحی، موج میرا.

# Effect of Oil Layer on the Optical Response of Surface Plasmon Resonance Sensor

Najme Rezaie[1], Majid Rashidi Huyeh[1], Hossein Mozafari[1]

[1]Department of Physics, University of Sistan and Baluchestan, 98135-674, Zahedan, Iran.

Abstract- Surface plasmon resonance (SPR) sensors are interesting because of their high sensitivity, resolution, accuracy and fast optical response. For exciting the surface plasmons, the sensor, including a thin gold or silver layer coted on an optical glass substrate, may be placed on surface of a prism. To increase efficiency of sensor detection, a transparent optical oil may be used at prism-substrate interface. In this paper, the effect of oil layer at prism–substrate interface on the sensor response is studied theoretically. The results show that although the sensor efficiency isn't affected by oil layer in the air medium, it is lost by an oil layer more than 100 of nm in water medium.

Keywords: surface plasmon resonance, sensor, evanescent wave

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-03 ]



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## مقدمه

تشدید پلاسمون سطحی یک روش بسیار حساس، سریع و تکرارپذیر است که به کارگیری آن بدون توجه به اصول نسبتا پیچیده‌ی پدیده‌ی تشدید پلاسمون سطحی، آن را ارزشمند کرده است و برای مشاهدات تغییرات اندک خواص نوری در نزدیکی سطح به کار برده می‌شود[۱]. این روش به طور گسترده به عنوان اساس آشکارسازی در بسیاری از حسگرهایی که در زمینه‌هایی مختلف مانند آشکارسازی گاز یا سنجش‌های شیمیایی و زیستی کاربرد دارند، استفاده می‌شود [۲ و ۳]. اولین مورد استفاده از تشدید پلاسمون سطحی برای آشکارسازی، توسط لیدبرک و همکارانش در سال ۱۹۸۳ گزارش شده است و پس از آن تحقیقات تئوری و تجربی زیادی در این زمینه انجام گرفته است[۴].

برای جلوگیری از آسیب دیدن منشور و قابلیت استفاده مجدد از آن، به جای لایه‌نشانی مستقیم لایه‌ی فلزی روی سطح منشور، لایه‌ی فلزی ابتدا روی یک زیرلایه‌ی شیشه‌ای لایه-نشانی می‌شود و سپس زیرلایه به وسیله‌ی روغن اپتیکی روی منشور قرار می‌گیرد. وجود این لایه‌ها می‌تواند بر پاسخ نوری سیستم و به خصوص تشدید پلاسمون سطحی تاثیر گذارد که لازم است در ارزیابی‌ها اعمال گردد. این اثرات شامل بازتاب‌های متوالی از لایه‌ی روغن در مرز مشترک منشور-زیرلایه است. در این تحقیق پاسخ نوری یک سامانه‌ی تشدید پلاسمون سطحی شامل یک حسگر پلاسمون سطحی که توسط روغن اپتیکی روی سطح یک منشور قرار گرفته، مورد بررسی قرار می‌گیرد و با حالتی که لایه‌ی فلزی مستقیما روی منشور قرار گرفته، مقایسه می‌شود.

## مبانی نظری

پلاسمون‌های سطحی، نوسان جمعی الکترون‌های آزاد در مرز مشترک فلز-دی‌الکتریک، تحت تابش امواج الکترو مغناطیسی به وجود می‌آیند. این نوسانات الکترون‌ها در سطح منجر به ایجاد یک موج پلاسمون سطحی می‌شود که عدد موج آن عبارت است از[۵]:

$$K_{sp} = \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}\right)^{1/2} \qquad (۱)$$

موج پلاسمون سطحی توسط باریکه نور قطبیده p (نور با قطبش TM، که بردار میدان الکتریکی موازی با صفحه تابش است) برانگیخته می‌شود. وقتی مؤلفه‌ی موازی سطح عدد موج نور تابشی و عدد موج پلاسمون سطحی با هم برابر شوند، پدیده‌ی تشدید اتفاق می‌افتد. تحت چنین شرایطی انرژی فوتون فرودی توسط پلاسمون سطحی جذب می‌شود. بنابراین پدیده‌ی تشدید در زاویه‌ای تحت عنوان زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی $\theta_{spr}$، اتفاق می‌افتد که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$n_p \sin(\theta_{spr}) = \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}\right)^{1/2} \qquad (۲)$$

که $n_p$ ضریب شکست منشور، $\varepsilon_m$ و $\varepsilon_d$ به ترتیب ثابت دی-الکتریک لایه فلزی و ثابت دی‌الکتریک محیط اطراف لایه فلزی است. بنابراین شرایط تشدید به زاویه‌ی تابش، طول‌موج نور تابشی، ضرایب شکست محیط‌های فلز، دی‌الکتریک و محیط اطراف لایه‌ی فلزی بستگی دارد. به دلیل حساسیت زاویه‌ی تشدید به ضریب شکست محیط اطراف لایه‌ی فلزی، این روش کاربردهای فراوانی به ویژه در حسگرها داراست.

همان‌گونه که اشاره شد، در عمل ممکن است لایه‌ی فلزی روی سطح یک شیشه‌ی اپتیکی (لامل) لایه‌نشانی شود و سپس به منظور تحریک پلاسمون سطحی، از یک منشور استفاده شود. به منظور کاهش یا حذف انعکاس از سطح مشترک منشور-زیرلایه، از روغن شفاف اپتیکی در سطح مشترک منشور-زیرلایه استفاده می‌شود (شکل ۱). در چنین حالتی انعکاس‌های متوالی در فصل مشترک منشور-لایه روغن و لایه روغن-زیرلایه، می‌تواند بر مقدار بازتاب کل تأثیر گذارد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

## مدل

به منظور بررسی اثر لایه‌ی روغن بر پاسخ حسگر تشدید پلاسمون سطحی، از مدلی بر اساس تداخل چندگانه استفاده شد. مطابق شکل ۱، حسگری شامل یک لایه‌ی نازک فلزی( طلا یا نقره) روی یک زیرلایه با ضخامت حدود یک میلی‌متر، را در نظر می‌گیریم. این حسگر توسط لایه‌ی نازکی از روغن روی سطح یک منشور نیم‌استوانه‌ای قرار گرفته است. بخشی از نور تابیده شده، به طور متوالی از سطح منشور-لایه روغن و لایه روغن-زیرلایه منعکس می‌شود. نور فرودی پس از عبوراز لایه‌ی روغن، به طور متوالی از سطح مشترک زیرلایه-فلز و فلز-محیط، بازتاب می‌شود. بدین ترتیب ضریب بازتاب $R$ ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

$$R = R_O + R_m \qquad (۳)$$

$$R_O = R_1 \qquad (۴)$$

$$R_m = R_2 \left(1 - R_1\right)^2 \qquad (۵)$$

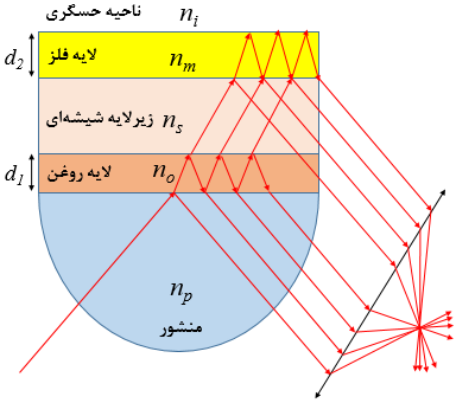
که $R_1$ و $R_2$ به ترتیب ضرایب بازتاب از لایه روغن و لایه‌ی فلزی و $R_m$ ضریب بازتاب از لایه‌ی فلز در حسگر در حضور لایه‌ی روغن است.

به منظور محاسبه‌ی ضریب بازتاب، از تداخل متوالی امواج از لایه‌ی روغن و فلز استفاده شد. دامنه‌ی بازتاب، $R$، از لایه‌ای به ضخامت $d$ و ضریب‌شکست $n_k$ با توجه به روابط زیر به دست می‌آید[۶]:



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-03 ]




شکل ۱. ساختار حسگر تشدید پلاسمون سطحی

$$r=\frac{(M_{11}+M_{12}q_t)q_0-(M_{21}+M_{22}q_t)}{(M_{11}+M_{12}q_t)q_0+(M_{21}+M_{22}q_t)} \quad (۶)$$

$r$ دامنه‌ی بازتاب و $q_0$ و $q_t$ به ترتیب پارامترهای محیط تابشی و عبوری هستند که برای قطبش موازی عبارت است از:

$$q_k=\frac{\cos(\theta_k)}{\tilde{n}_k} \quad (۷)$$

$M_{ij}$ عناصر ماتریس انتقال لایه‌اند که به صورت زیر داده میشود:

$$M_k=\begin{bmatrix}\cos\beta_k & -i\sin\beta_k/q_k\\ -iq_k\sin\beta_k & \cos\beta_k\end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$\beta_k=\frac{2\pi n_k}{\lambda 0}d\cos(\theta_k) \quad (۹)$$

$$R=|r|^2 \quad (۱۰)$$

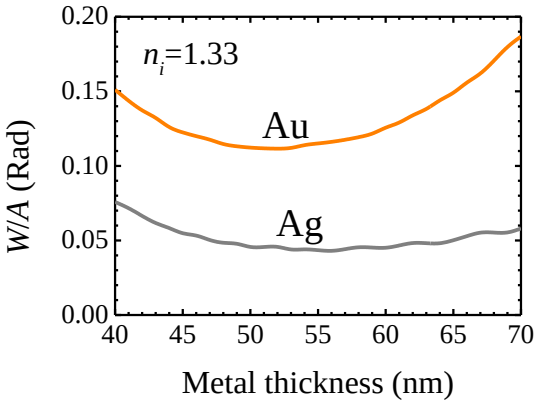
$\lambda_0$ و $\theta_k$ به ترتیب طول‌موج نور فرودی و زاویه فرود است.

## نتایج

مدل مذکور جهت بررسی اثر لایه‌ی روغن بر پاسخ نوری حسگر تشدید پلاسمون سطحی به کار برده شده است. ابتدا ضخامت بهینه برای دو فلز نقره و طلا ارزیابی شد و سپس پاسخ حسگر با لحاظ لایه‌ی روغن و بدون لایه‌ی روغن با یکدیگر مقایسه شدند.

### ضخامت بهینه

کارایی حسگر SPR توسط دو پارامتر حساسیت و دقت آشکارسازی مشخص می‌شود. دقت آشکارسازی به دقت در اندازه‌گیری زاویه‌ی تشدید و در نتیجه دقت در اندازه‌گیری ضریب‌شکست ناحیه‌ی حسگری بستگی دارد. دقت اندازه‌گیری زاویه‌ی تشدید نیز به پهنای منحنی SPR بستگی دارد. هرچه منحنی SPR باریک‌تر باشد دقت آشکارسازی بیشتری خواهیم داشت[۵]. پارامتر حساسیت آشکارسازی به صورت نسبت پهنا به دامنه (کمینه مقدار $R$) تعریف می‌شود. بهینه ضخامت لایه‌ی فلز، ضخامتی است که پارامتر مذکور کمینه باشد. به منظور تعیین ضخامت بهینه برای فلزات نقره و طلا، مقدار $R$، بدون لحاظ لایه‌ی روغن، بر حسب ضخامت به دست آمد. در این محاسبات مقدار طول‌موج نور فرودی، ضریب‌شکست منشور و محیط بیرونی به ترتیب $\lambda$=633nm، $n_p$=1.4 و $n_o$=1.3، ضریب‌شکست زیرلایه $n_s$=1.48، و ضریب شکست طلا و نقره به ترتیب برابر با $n_{Au}$=0.1726+3.4218i و $n_{Ag}$=0.1355+4.0116i در نظر گرفته شد. لازم به توضیح است که این مقادیر مطابق مقادیر نوعی مورد استفاده در این نوع حسگرها می‌باشد. نتایج در نمودار شکل ۲ آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ضخامت بهینه برای فلز نقره و طلا به ترتیب ۵۴ و ۵۲ نانومتر به دست آمد که در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.




شکل ۲. نسبت پهنا به دامنه منحنی تشدید به ازای ضخامت‌های مختلف دو فلز طلا و نقره

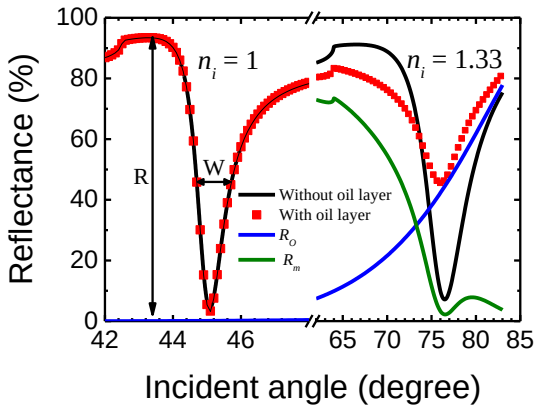
### اثر لایه‌ی روغن

اجازه دهید ابتدا پاسخ حسگر در حضور لایه‌ی روغن و پاسخ حسگر بدون لایه‌ی روغن را با یکدیگر مقایسه کنیم. نتایج در شکل ۳ برای فلز طلا، به ازای ضریب‌شکست‌های مختلف محیط حسگری هوا با $n=1$ و آب با $n=1.33$ و ضخامت لایه‌ی روغن $d_1$=100nm آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای محیط بیرونی هوا اثر لایه‌ی روغن صفر است و منحنی-های تشدید برای دو حسگر با هم تفاوتی ندارند. اما برای محیط بیرونی آب زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی و دامنه‌ی آن تحت تاثیر لایه‌ی روغن است. این رفتار عمدتا به مکان زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی بستگی دارد. در حقیقت زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی برای محیط حسگری هوا در زاویه‌ی حدود ۴۵ درجه قرار دارد در حالی که برای محیط حسگری آب در زاویه‌ی حدود ۷۵ درجه قرار دارد. از طرفی مقدار بازتاب نور از لایه‌ی روغن با افزایش زاویه، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که مقدار بازتاب از لایه‌ی روغن از حدود صفر در زاویه‌ی ۴۵ درجه به حدود ۵۰٪ برای زاویه‌ی ۷۵ درجه (منحنی‌های آبی نمودار) افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار بازتاب با افزایش زاویه افزایش می‌یابد، اثر حضور لایه‌ی روغن در مورد محیط بیرونی آب قابل توجه است.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-03 ]



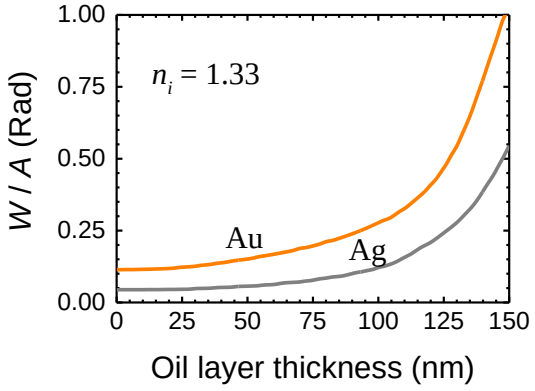

شکل ۳. بازتابندگی برحسب زاویه فرودی برای دو حسگر در حضور لایه‌ی روغن و بدون لایه‌ی روغن؛ $w$ و $R$ به ترتیب پهنا و دامنه‌ی سیگنال می‌باشد.

## اثر ضخامت لایه‌ی روغن

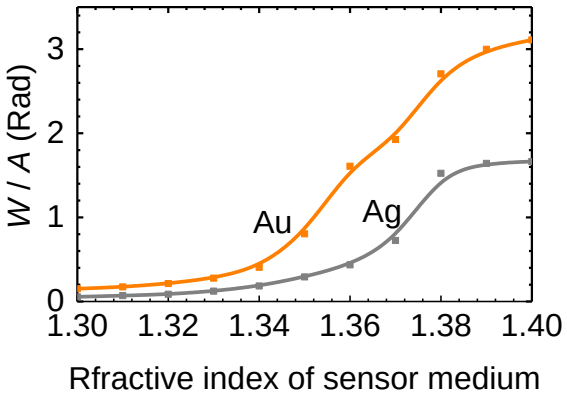
به منظور بررسی اثر ضخامت لایه‌ی روغن بر پاسخ نوری حسگر تشدید پلاسمون سطحی، نسبت پهنا به دامنه برای ضخامت-های مختلف لایه‌ی روغن از ۰ تا ۱۵۰ نانومتر محاسبه شد. برای ناحیه‌ی حسگری هوا، زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی کماکان در زوایای حدود ۴۵ درجه تشکیل می‌شود، لذا ضخامت لایه‌ی روغن تاثیر چندانی بر منحنی تشدید پلاسمون-های سطحی ندارد و نسبت پهنا به دامنه تقریبا ثابت است. اما برای حالتی که ضریب‌شکست محیط حسگری ۱,۳۳ باشد، ضخامت لایه‌ی روغن نقش مهمی در پاسخ نوری حسگر ایفا می‌کند. این مهم در نمودار شکل ۴ آمده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود نسبت پهنا به دامنه، برای ضخامت‌های لایه‌ی روغن کمتر از ۱۰۰ نانومتر، افزایش کمی دارد ولی با افزایش ضخامت از ۱۰۰ تا حدود ۱۵۰ نانومتر، به شدت افزایش می‌یابد و برای ضخامت‌های بیش‌تر از ۱۵۰ نانومتر، به دلیل بازتاب عمده‌ی نور از لایه‌ی روغن در زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی، عملا پدیده‌ی تشدید پلاسمون سطحی قابل مشاهده نیست.

## کارایی

با توجه به اینکه نسبت پهنا به دامنه به ازای ضریب‌شکست‌های مختلف ناحیه‌ی حسگری متغیر است، کارایی حسگر برای همه-ی محیط‌های حسگری یکسان نیست. در اینجا نسبت پهنا به دامنه به ازای ضریب‌شکست‌های مختلف ناحیه‌ی حسگری محاسبه و ضخامت لایه‌ی روغن ۱۰۰ نانومتر در نظر گرفته شد. برای ناحیه‌ی حسگری هوا (۱ تا ۱,۱)، زاویه‌ی تشدید پلاسمون سطحی کماکان در زوایای حدود ۴۵ درجه تشکیل می‌شود، لذا نسبت پهنا به دامنه تقریبا ثابت است. ولی با توجه به شکل ۵، با تغییر ضریب شکست ناحیه‌ی حسگری، از ۱,۳ تا ۱,۴، نسبت پهنا به دامنه منحنی تشدید، تا ۱,۳۴ به آرامی و از ۱,۳۴ به بعد، به شدت تغییر می‌کند. بنابراین برای ضریب‌شکست‌های بیش‌تر از ۱,۳۴، سامانه‌ی حسگری کارایی خود را از دست می-دهد.




شکل ۴. نسبت پهنا به دامنه به ازای ضخامت‌های مختلف لایه روغن




شکل ۵. نسبت پهنا به دامنه به ازای ضریب‌شکست‌های مختلف ناحیه‌ی حسگری

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر لایه‌ی روغن در سطح مشترک حسگر-منشور بر پاسخ نوری سامانه حسگر تشدید پلاسمون سطحی مورد مطالعه قرار گرفت. برای محیط حسگری هوا حضور لایه‌ی روغن تاثیری بر منحنی تشدید پلاسمون سطحی ندارد در حالی که برای محیط حسگری آب منحنی تشدید پلاسمون سطحی عملا در ضخامت‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر قابل مشاهده است.

## مراجع


[1] Reather H, “Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings“, Springer, Berlin Heidelberg New York, vol 111, 1988.

[2] Homola J, Yee SS, Myszka D, “Surface plasmon resonance biosensors”, Ligler FS, Rowe Taitt CA (eds) Optical biosensors: present and future, Elsevier, Amsterdam, pp 207–251, 2002.

[3] Homola J, “Present and future of surface plasmon resonance biosensors”, Anal Bioanal Chem 377:528–539, 2003.

[4] Liedberg B, Nylander C, Lunstr I, “Surface Plasmon resonance for gas detection and biosensing”, Sensors and Actuators, B4, pp 299–304, 1983.

[5] Anuj k. Shama, Rajan Jha, B. D. Gupa, “Fiber-Optic Sensors Based on Surface Plasmon Resonance: A Comprehensive Review”, IEEE Sensors Journal, VOL. 7, NO. 8, AUGUST 2007.

[6] Masahiro Yamamoto, “ Surface Plasmon Resonance (SPR) Theory: Tutorial”, Department of Energy and Hydrocarbon Chemistry, Kyoto University, Kyoto-Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, 615-8510, JAPAN, 2002




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-03 ]