بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
بهمن ۱۳۹۸ ۱۵-۱۶

افزایش حساسیت فاز تشدید پلاسمون سطحی در تداخل سنجی مسیر مشترک

نسرین فلاح[۱] ، سید هاشم عارف[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه قم، گروه فیزیک *nasrinfallah72@gmail.com*

[۲] عضو هیأت علمی دانشگاه قم، گروه فیزیک. *h-aref@qom.ac.ir*

چکیده - تشدید پلاسمون سطحی (SPR) برانگیختگی نوسانات تجمعی بار در فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک است. از آنجا که پلاسمون سطحی حساسیت بالایی نسبت به تغییرات ضریب شکست محیط پیرامون دارد، حسگرهای SPR با کاربردهای تحقیقاتی، آزمایشگاهی و صنعتی طراحی و ساخته شده‌اند. در این حسگرها عموما با اندازه گیری پارامترهایی نظیر شدت، فاز، زاویه و طول‌موج نور می توان تغییرات ایجاد شده بر روی پلاسمون را دنبال نمود. از میان این روش‌ها، روش اندازه‌گیری فاز دارای حساسیت بیشتری است. در این مقاله ایده ای جهت افزایش حساسیت فاز حسگر SPR مبتنی بر کنترل قطبش نور پیشنهاد و عملکرد آن به صورت نظری و تجربی تایید می شود.

کلید واژه- اندازه‌گیری فاز، تشدید پلاسمون سطحی، تداخل سنجی قطبشی هترودایِن مسیر مشترک

Increasing the phase sensitivity of the surface plasmon resonance in common-path interferometry

Nasrin fallah [1], Seyed Hashem Aref[2]

[1]M.S. student, university of Qom, department of physics.

[2]Assistant professor of photonics-physics, university of Qom, department of physics.

Abstract- Surface plasmon resonance (SPR) is the excitation of cumulative charge oscillations in the metal-dielectric interface. Because the surface plasmon is highly sensitive to environmental refractive index changes, SPR sensors are designed and manufactured for research, laboratory and industrial applications. These sensors can generally track changes in the plasmon by measuring parameters such as intensity, phase, angle and wavelength of light. Among these methods the phase measurement method is the most sensitive. This paper proposes the idea of increasing the sensitivity of the SPR phase sensor based on the polarization control of the light and confirms its theoretical and experimental performance.

Keywords: Surface Plasmon Resonance, Phase Measurement, Common-Path Heterodyne Interferometry (CPHI)

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

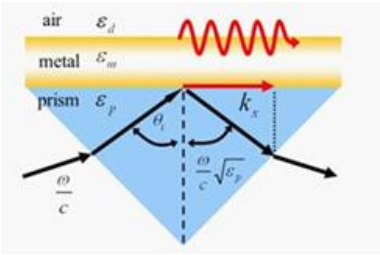
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

مقدمه

پلاریتون- پلاسمون سطحی موج الکترومغناطیسی است که در سطح مشترک فلز و دی‌الکتریک انتشار می‌یابد. این موج در اثر جفت‌شدگی نوسانات پلاسمون سطحی با پرتو نور فرودی ایجاد می‌شود. دامنه‌ی میدان الکترومغناطیس این امواج در راستای عمود بر فصل مشترک میرا می‌شود. تشدید پلاسمون سطحی (SPR)، عموما در محدوده طیفی مرئی تا فرابنفش اتفاق می‌افتد. تشدید پلاسمون سطحی به شدت به اندازه، شکل، نوع فلز ومحیط دی‌الکتریک اطراف آن وابسته است. کاربردهای فراوانی برای SPR در زمینه‌های مختلف از نانو اپتیک و نانو الکترونیک تا حسگرهای زیستی گزارش شده است [۱و۲]. پلاسمون‌های سطحی را به روش‌های مختلفی نظیر کرشمن، اتو و استفاده از پراشه می‌توان تحریک نمود. آشکارسازی فاز در حسگرهای مبتنی بر SPR یکی از دقیق ترین و حساس ترین روش‌ها محسوب می‌شود [۲]. برای اندازه‌گیری فاز روش‌های مختلفی از جمله تداخل‌سنجی همودایِن و هترودایِن نوری [۱] و هترودایِن قطبشی مسیر مشترک [۳] پیشنهاد شده است. در اینجا ایده‌ای برای افزایش حساسیت فاز در روش تداخل‌سنجی هترودایِن قطبشی پیشنهاد و کارایی آن از نظر تئوری و تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اصول نظری و معرفی چیدمان آزمایشگاهی

مطابق با شکل (۱) یک حسگر SPR براساس هندسه کرشمن، متشکل از یک ساختار سه لایه شامل منشور، لایه نازکی از جنس فلز و محیط نمونه است.



شکل (۱): سیستم SPR بر اساس هندسه کرشمن.

هنگامی که مولفه مماسی بردار موج نور فرودی با بردار موج پلاسمون سطحی برابر شود تشدید پلاسمونی رخ می‌دهد.

با استفاده از پارامترهای نشان داده شده در شکل (۱)، بردار موج پلاسمون سطحی (k_{spp}) و زاویه تشدید پلاسمون سطحی به صورت زیر تعریف می‌شوند[۱] :

$$k_{spp} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_p}\sin\theta_{SPR} = k_0\sqrt{\frac{\varepsilon_m\varepsilon_d}{\varepsilon_m+\varepsilon_d}} \qquad (۱)$$

چن و همکاران [۳] برای اولین بار یک سیستم تداخل سنجی هترودایِن قطبشی مسیر مشترک (CPHI) برای اندازه‌گیری فاز SPR پیشنهاد داده‌اند. چیدمان آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق نیز براساس طرح چن و اعمال برخی تغییرات لازم مطابق با شکل (۲) است. مطابق با شکل، نور لیزر هلیوم-نئون با قطبش مناسب پس از دو بار عبور از مدولاتور الکترواپتیکی به موج هترودایِن با بسامد ω تبدیل شده و پس از عبور از تیغه ربع موج (QWP) در زاویه فرود θ پلاسمون سطحی را تحریک نموده و سپس با جداسازی مولفه‌های قطبشی ۴۵±، توسط آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی و سپس از طریق دستگاه قفل‌شونده فازی، اختلاف فاز آنها ثبت می‌گردد. در این آزمایش طلای ۲۲ عیار با ضخامت ۴۵ *nm* به روش تبخیری بر روی منشور BK7 لایه‌نشانی شده است. مطابق تحلیل‌های نظری و اثبات تجربی، تایید می‌گردد که حساسیت فاز در زاویه سمتی خاصی از QWP افزایش محسوسی می‌یابد. تحلیل چیدمان آزمایشگاهی براساس تحلیل جونز در [۲] انجام شده است. سیگنال‌های خروجی(برای مولفه‌های قطبشی ۴۵±) با رابطه زیر بیان می‌شوند:

$$I_{\pm} \propto r_p^2 + r_s^2 + \sqrt{A_{\pm}^{\,2} + B_{\pm}^{\,2}}\cos(\omega t + \phi_{\pm}) \qquad (۲)$$

$$\phi_{\pm} = \tan^{-1}\left(\frac{B_{\pm}}{A_{\pm}}\right) \qquad (۳)$$

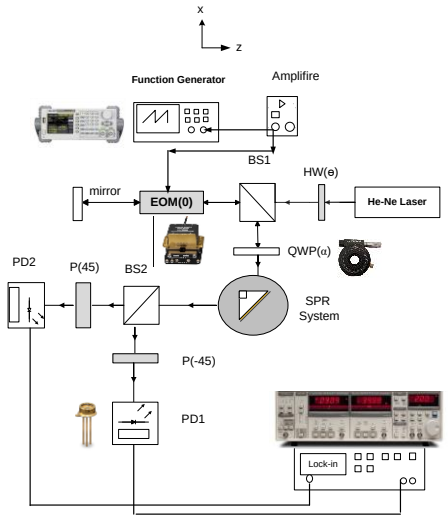
$$A_{\pm} = \pm 2 r_p r_s[\sin^2(2\alpha)\cos(\phi_{ps}) + \cos(2\alpha)\sin(\phi_{ps})] \qquad (۴)$$

$$B_{\pm} = (r_p^2 - r_s^2) \pm (r_p^2 + r_s^2)\sin(2\alpha)\cos(2\alpha) \qquad (۵)$$

مطابق رابطه فوق شدت‌های خروجی و اختلاف فاز آن‌ها تابعی از زاویه سمتی QWP (یعنی α) و فاز موج پلاسمون سطحی (ϕ_{ps}) و r_s و r_p بترتیب ضرایب انعکاس قطبش s و p از لایه فلزی است.

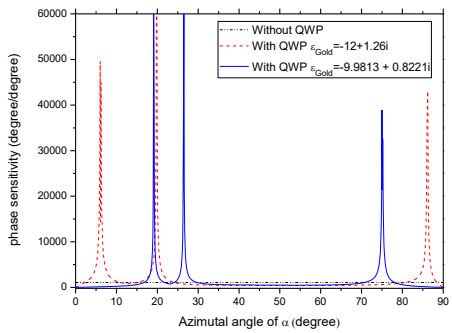
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]



شکل ۲: طرح شماتیک چیدمان تداخل سنجی قطبشی هترودایِن مسیر مشترک

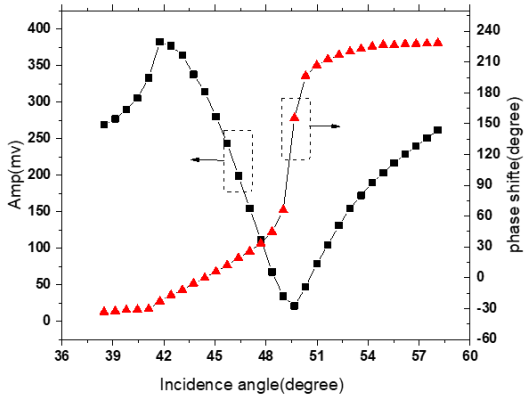
با استفاده از معادلات فوق و دیگر روابط لازم می‌توان حساسیت فاز نسبت به تغییرات زاویه فرودی را در شرایطی که محیط پیرامون هوا است را در زوایای سمتی مختلف QWP برآورد نمود. در این شبیه‌سازی از مقادیر مختلف ثابت دی‌الکتریک برای طلای خالص (در محدوده ۳۰ تا ۷۰ نانومتر) شامل مقدار $\varepsilon_{gold} = -9.9813 + 0.8221i$ از مرجع [۴] و مقدار $\varepsilon_{gold} = -12 + 1.26i$ از مرجع [۵] استفاده شده است. شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی حساسیت فاز برای هر دو مورد ارائه شده است. با توجه به نمودار در زوایای مشخصی از زاویه سمتی حساسیت فاز بطور محسوسی افزایش می‌یابد و مقدار این زوایا نیز به مقدار ثابت دی‌الکتریک طلای وارد شده در شبیه‌سازی بستگی دارد.



شکل ۳: نمودار تغییرات حساسیت فاز بر حسب زاویه سمتی α

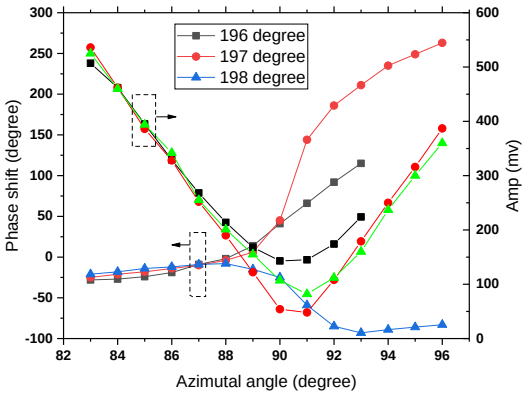
نتایج تجربی

در بخش تجربی ابتدا با استفاده از چیدمان پایه چن [۲و۳] زاویه SPR اندازه‌گیری می‌شود. نتایج مربوط به تغییرات شدت و فاز نسبت به زاویه فرود نور در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴: نمودار زاویه فرودی بر حسب شدت و فاز

حال زاویه فرود نور در چیدمان شکل (۲) را در اطراف زاویه SPR قرار داده و زاویه سمتی QWP را در محدوده مشخصی که انتظار افزایش حساسیت را داریم قرار داده و با تغییر زاویه سمتی در محدوده مناسب وضعیت تغییر فاز و شدت سیگنال ها ثبت می‌گردد. شکل (۵) نمودار تغییرات فاز و شدت را به ازای زوایای مختلف فرود نور بر حسب زوایای سمتی مختلف نشان می‌دهد.

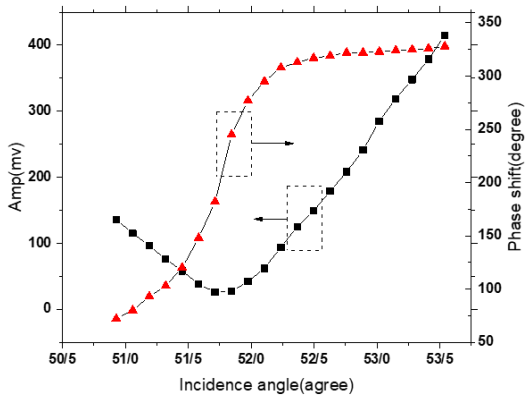


شکل ۵: تغییرات شدت و فاز برحسب زاویه سمتی α

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

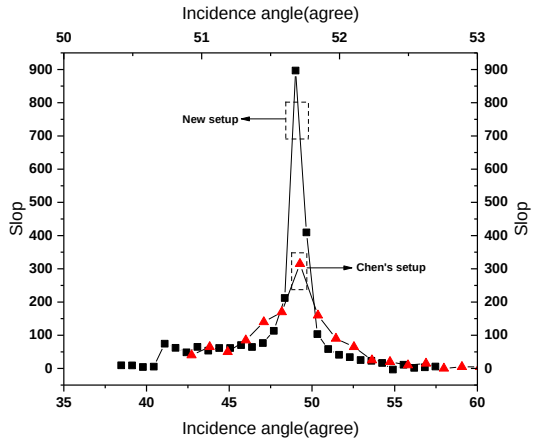
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]

در ادامه تیغه ربع موج را در زاویه سمتی ۹۱ درجه تیغه ربع موج ثابت نگه داشته و این بار میزچه با دقت ۰/۲ درجه در اطراف زاویه تشدید تغییر داده می‌شود. نتایج تغییرات شدت و فاز بدست آمده در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به شکل، بیشترین حساسیت فاز و کمینه شدت در زاویه بین ۵۱/۵ و ۵۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۶: تغییرات شدت و فاز برحسب زوایای فرود در زاویه سمتی ۹۱ درجه با بیشترین حساسیت

با توجه به نتایج تجربی ارائه شده در شکل‌های (۴) و (۶) می‌توان حساسیت فاز را در دو حالت استفاده از چیدمان چن و چیدمان جدید با قابلیت کنترل قطبش محاسبه نمود. شکل (۷) حساسیت فاز محاسبه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مقایسه حساسیت اندازه‌گیری شده فاز برحسب زوایای فرود در چیدمان چن و چیدمان جدید با قابلیت کنترل قطبش.

مطابق شکل حساسیت فاز به میزان ۳/۵ برابر افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت فاز تابعی از زاویه سمتی QWP از طریق کنترل قطبش نور بیضوی در چیدمان جدید است.

نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی و اندازه‌گیری فاز موج پلاسمون سطحی به روش سیستم تداخل‌سنجی شبه‌هترودایِن به دلیل سادگی و دقت مناسب و امکان‌پذیر بودن، پایداری بالا پرداخته شده است. با انجام اصلاحاتی در چیدمان چن و اضافه نمودن تیغه ربع موج و کنترل وضعیت قطبش بیضوی در تداخل‌سنج مسیر مشترک، افزایش حساسیت قابل ملاحظه‌ای در فاز مشاهده شد. نتایج تجربی نشان داد که با انجام اصلاحاتی در چیدمان چن و استفاده از تیغه ربع موج حساسیت فاز SPR به میزان حداقل ۳/۵ برابر افزایش می یابد.

مرجع‌ها

[1] Shen, S., Liu, T., & Guo, J. Optical phase-shift detection of surface plasmon resonance. *Applied optics*, *37*(10), 1747-1751,1998.

[2] Aref, S. H. SPR phase sensitivity enhancement in common-path polarization heterodyne interferometer by polarization tuning. *Optik*, *156*, 619-627,2018.

[3] Su, D. C., Chiu, M. H., & Chen, C. D. Simple two-frequency laser. *Precision engineering*, *18*(2-3), 161-163,1998.

[4] Gwon, H. R., & Lee, S. H. Spectral and angular responses of surface plasmon resonance based on the Kretschmann prism configuration. *Materials transactions*, *51*(6), 1150-1155,2010.

[5] Wang, S. F., Chiu, M. H., Lai, C. W., & Chang, R. S. High-sensitivity small-angle sensor based on surface plasmon resonance technology and heterodyne interferometry. *Applied optics*, *45*(26), 6702-6707,2006.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-03]