



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

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه قم، گروه فیزیک nasrinfallah72@gmail.com

^۲عضو 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 دی الکتریک 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 عموماً با اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر شدت، فاز، زاویه و طول موج نور می‌توان تغییرات ایجاد شده بر روی پلاسمون را دنبال نمود. از میان این روش‌ها، روش اندازه‌گیری فاز دارای حساسیت بیشتری است. در این مقاله ایده‌ای جهت افزایش حساسیت فاز حسگر SPR مبتنی بر کنترل قطبش نور پدیدار شده و عملکرد آن به صورت نظری و تجربی تایید می‌شود.

کلیدواژه - اندازه‌گیری فاز، تشدید پلاسمون سطحی، تداخل سنجی قطبشی هتروداйн مسیر مشترک

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

Nasrin fallah¹, Seyed Hashem Aref²

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

²Assistant 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.

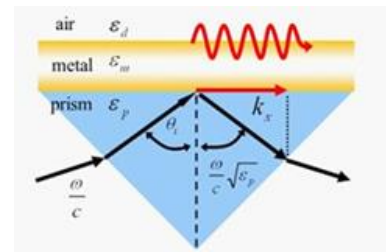
Keywords: Surface Plasmon Resonance, Phase Measurement, Common-Path Heterodyne Interferometry (CPHI)

مقدمه

پلاریتون- پلاسمون سطحی موج الکترومغناطیسی است که در سطح مشترک فلز و دی الکتریک انتشار می یابد. این موج در اثر جفت شدگی نوسانات پلاسمون سطحی با پرتو نور فرودی ایجاد می شود. دامنه ی میدان الکترومغناطیس این امواج در راستای عمود بر فصل مشترک میرا می شود. تشدید پلاسمون سطحی (SPR)، عموماً در محدوده طیفی مرئی تا فرابنفش اتفاق می افتد. تشدید پلاسمون سطحی به شدت به اندازه، شکل، نوع فلز و محیط دی الکتریک اطراف آن وابسته است. کاربردهای فراوانی برای SPR در زمینه های مختلف از نانو اپتیک و نانو الکترونیک تا حسگرهای زیستی گزارش شده است [۱ و ۲]. پلاسمون های سطحی را به روش های مختلفی نظیر کرشمن، اتو و استفاده از پراشه می توان تحریک نمود. آشکارسازی فاز در حسگرهای مبتنی بر SPR یکی از دقیق ترین و حساس ترین روش ها محسوب می شود [۲]. برای اندازه گیری فاز روش های مختلفی از جمله تداخل سنجی هموداین و هتروداين نوری [۱] و هتروداين قطبشی مسیر مشترک [۳] پیشنهاد شده است. در اینجا ایده ای برای افزایش حساسیت فاز در روش تداخل سنجی هتروداين قطبشی پیشنهاد و کارایی آن از نظر تئوری و تجربی مورد بررسی قرار می گیرد.

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 می دهد.

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 می شوند [۱]:

$$k_{spp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta_{SPR} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (۱)$$

چن و همکاران [۳] برای اولین بار یک سیستم تداخل سنجی هتروداين قطبشی مسیر مشترک (CPHI) برای اندازه گیری فاز SPR پیشنهاد داده اند. 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 هتروداين 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 مولفه های قطبشی $\pm 45^\circ$ توسط آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی و سپس از طریق دستگاه قفل شونده فازی، اختلاف فاز آنها ثبت می گردد. در این آزمایش طلای ۲۲ عیار با ضخامت 45 nm به روش تبخیری بر روی منشور BK7 لایه نشانی شده است. مطابق تحلیل های نظری و اثبات تجربی، تایید می گردد که حساسیت فاز در زاویه سمتی خاصی از QWP افزایش محسوسی می یابد. تحلیل چیدمان آزمایشگاهی براساس تحلیل جونز در [۲] انجام شده است. سیگنال های خروجی (برای مولفه های قطبشی $\pm 45^\circ$) با رابطه زیر بیان می شوند:

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

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

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

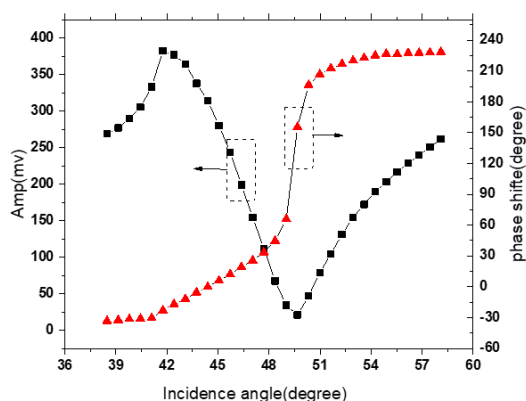
$$(۵)$$

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

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

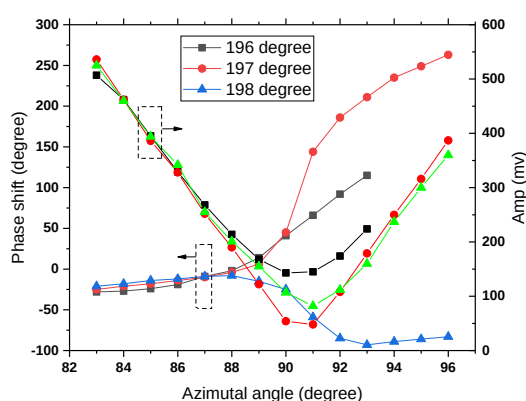
نتایج تجربی

در بخش تجربی ابتدا با استفاده از چیدمان پایه چن [۳۰] زاویه SPR اندازه گیری می شود. نتایج مربوط به تغییرات شدت و فاز نسبت به زاویه فرود نور در شکل (۴) ارائه شده است.

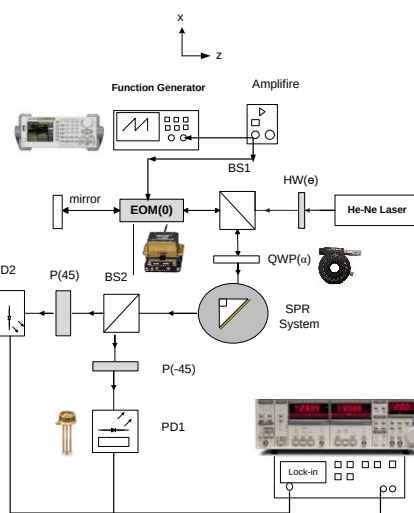


شکل ۴: نمودار زاویه فرودی بر حسب شدت و فاز

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 می گردد. شکل (۵) نمودار تغییرات فاز و شدت را به ازای زوایای مختلف فرود نور بر حسب زوایای سمتی مختلف نشان می دهد.

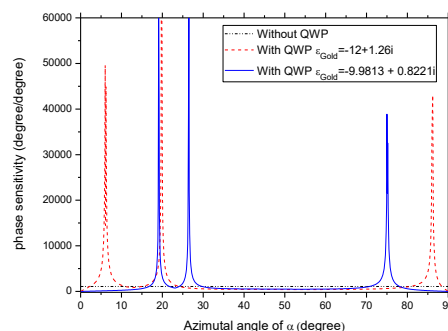


شکل ۵: تغییرات شدت و فاز بر حسب زاویه سمتی α



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

با استفاده از معادلات فوق و دیگر روابط لازم می توان 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 شبیه سازی از مقادیر مختلف ثابت دی الکتریک برای طلای خالص (در محدوده ۳۰ تا ۷۰ نانومتر) شامل مقدار $\epsilon_{gold} = -9.9813 + 0.8221i$ از مرجع [۵] و مقدار $\epsilon_{gold} = -12 + 1.26i$ از مرجع [۴] استفاده شده است. شکل (۳) نتایج شبیه سازی حساسیت فاز برای هر دو مورد ارائه شده است. با توجه به نمودار در زوایای مشخصی از زاویه سمتی حساسیت فاز بطور محسوسی افزایش می یابد و مقدار این زوایا نیز به مقدار ثابت دی الکتریک طلای وارد شده در شبیه سازی بستگی دارد.



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

مطابق شکل حساسیت فاز به میزان $3/5$ 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.

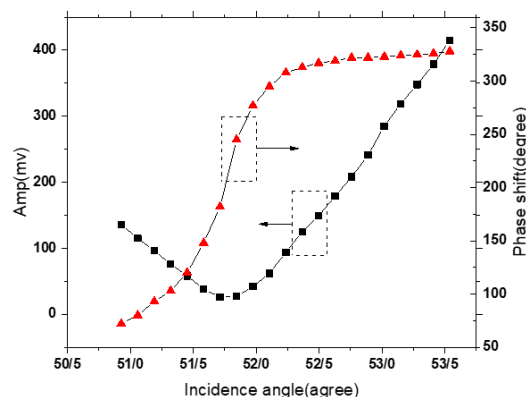
نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی و اندازه‌گیری فاز موج پلاسمون سطحی به روش سیستم تداخل‌سنجی شبه‌هتروداین 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 $3/5$ برابر افزایش می‌یابد.

مرجع‌ها

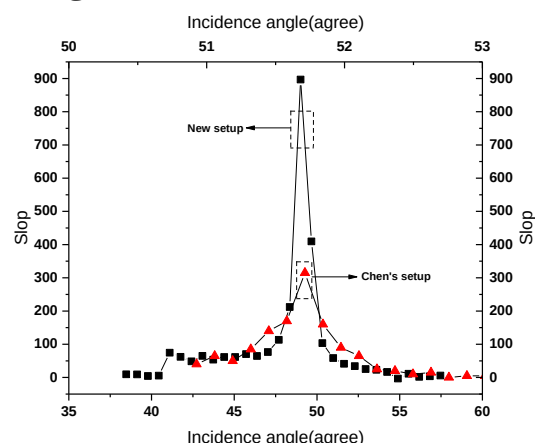
- [1] Shen, S., Liu, T., & Guo, J. Optical phase-shift detection of surface plasmon resonance. *Applied optics*, 37(10), 1747-1751, 1998.
- [2] Aref, S. H. SPR phase sensitivity enhancement in common-path polarization heterodyne interferometer by polarization tuning. *Optik*, 156, 619-627, 2018.
- [3] 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.

در ادامه تیغه ربع موج را در زاویه سمتی 91° درجه تیغه ربع موج ثابت نگه داشته و این بار میزچه با دقت $0/2^\circ$ 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 $51/5^\circ$ و 52° مشاهده می‌شود.



شکل ۶: تغییرات شدت و فاز برحسب زوایای فرود در زاویه سمتی 91° 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.