

Research Paper

The Phase Sensitivity Enhancement of the Surface Plasmon Resonance Sensor in the Common-path Polarization Heterodyne Interferometry¹

Seyed Hashem Aref^{2*} and Nasrin Fallah³

Received: 2021.06.30

Revised: 2021.09.15

Accepted: 2021.10.20

Abstract

Surface plasmon resonance (SPR) is the excitation of cumulative charge oscillations in the metal-dielectric interface. Of the various surface plasmon-based measurement methods, phase-based measurement methods are the most accurate and sensitive. The wave phase can be measured with appropriate accuracy by various interferometry methods. The common path polarization heterodyne interferometry method compared to the conventional heterodyne method has the advantage of stability against changes in the ambient due to vibration and temperature changes. Increasing sensitivity has always been considered as one of the important challenges in designing and manufacturing various types of SPR-based sensors. In this study, after a theoretical investigation of enhancement of the phase sensitivity due to the addition of a quarter-wave plate in the common path polarization heterodyne interferometer, the SPR phase change in the standard common path polarization heterodyne interferometer arrangement is measured. Comparing the results with the results of the modified setup proves the phase sensitivity enhancement. Experimental results show a sensitivity enhancement of at least 3.5 times.

Keywords: *Surface Plasmon Resonance, Increased Phase Sensitivity, Phase Measurement, Common-path Polarization Heterodyne Interferometry (CPHI).*

¹ DOI:10.22051/ijap.2021.37091.1227

² Assistant Professor, Photonics Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran. (Corresponding Author). Email: h-aref@qom.ac.ir

³ M. Sc. Graduated, Photonics Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran. Email: nasrinfallah72@gmail.com



افزایش حساسیت فاز در حسگر تشدید پلاسمون سطحی در چیدمان تداخل سنج هتروداین قطبشی مسیر مشترک^۱

سید هاشم عارف^{۲*} و نسرين فلاح^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۶، پاییز ۱۴۰۰

صص ۳۶-۴۸

چکیده

تشدید پلاسمون سطحی (SPR) برانگیختگی نوسانات جمعی بار در فصل مشترک فلز و دی الکتریک است. از میان روش‌های مختلف اندازه‌گیری مبتنی بر پلاسمون سطحی، روش‌های برپایه اندازه‌گیری فاز دارای دقت و حساسیت بیشتری هستند. فاز موج را می‌توان با دقت مناسبی به روش‌های مختلف تداخل سنجی اندازه‌گیری نمود. تداخل سنجی هتروداین قطبشی مسیر مشترک نسبت به روش هتروداین متداول دارای مزیت پایداری در برابر تغییرات ناشی از لرزش و تغییرات دمایی در محیط اطراف است. افزایش حساسیت، به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم در طراحی و ساخت انواع حسگرهای مبتنی بر SPR، همواره مورد توجه بوده است. در این پژوهش، پس از بررسی نظری افزایش حساسیت فاز ناشی از اضافه نمودن تیغه ربع موج در تداخل سنج هتروداین قطبشی مسیر مشترک، تغییر فاز موج پلاسمون سطحی در چیدمان استاندارد تداخل سنج هتروداین قطبشی مسیر مشترک اندازه‌گیری می‌شود و از مقایسه نتایج حاصل با نتایج چیدمان اصلاح شده، افزایش حساسیت به اثبات می‌رسد. نتایج تجربی افزایش حساسیت حداقل ۳/۵ برابر را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: تشدید پلاسمون سطحی، افزایش حساسیت فاز، اندازه‌گیری فاز، تداخل سنجی هتروداین قطبشی مسیر مشترک.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.37091.1227

^۲ استادیار، گروه فیزیک، آزمایشگاه فوتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران. (نویسنده مسئول). Email: h-aref@qom.ac.ir

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد، آزمایشگاه فوتونیک، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران. Email: nasrinfallah72@gmail.com

۱. 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 به وجود می‌آید. دامنه میدان الکترومغناطیسی این امواج در راستای عمود بر فصل مشترک میرا می‌شود. تشدید پلاسمون سطحی^۱ (SPR) به اندازه، شکل، نوع فلز و محیط دی‌الکتریک اطراف آن به شدت وابسته است. SPR برای فلزاتی مانند طلا، نقره و مس در بازه طیفی فرابنفش - مادون قرمز اتفاق می‌افتد [۱] و برای آن، کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از ساخت انواع ادوات اپتوالکترونیکی نظیر موجبرها و مدولاتورها تا حسگرهای زیستی گزارش شده است [۱-۳]. به کمک منشور و از طریق دو هندسه مختلف، یعنی کرشمن^۲ و اتو^۳، می‌توان پلاسمون سطحی را در مرز دی‌الکتریک - فلز تحریک نمود. تحلیل‌ها و آزمایش‌های ارائه‌شده در این مقاله براساس هندسه کرشمن است. پارامترهایی که برای مطالعه و اندازه‌گیری خواص موج پلاسمون سطحی و همچنین ساخت انواع حسگرها استفاده می‌شوند، عبارتند از: شدت، فاز، طول موج و قطبش نور. در مقایسه با سایر شیوه‌ها، آشکارسازی فاز یکی از دقیق‌ترین و حساس‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود [۲]. برای اندازه‌گیری فاز SPR، روش‌های گوناگونی از جمله هتروداین نوری [۳]، قطبش‌سنجی [۴]، بیضی‌سنجی [۵]، هتروداین قطبشی مسیر مشترک^۴ (CPHI) [۶ و ۷] و دیگر شیوه‌های مبتنی بر انواع تکنیک‌های تداخل‌سنجی گزارش شده است.

افزایش حساسیت، به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم در طراحی و ساخت انواع حسگرها، به‌ویژه حسگر ضریب شکست، همواره مورد توجه پژوهشگران قرار دارد. در حسگرهای SPR مبتنی بر اندازه‌گیری فاز، ایده‌های مختلفی پیشنهاد و آزموده شده است. کوه^۵ و همکاران [۷]، با استفاده از اثر زاویه‌سمتی یک تحلیلگر قطبش در CPHI، افزایش حساسیت قابل‌ملاحظه‌ای را نسبت به وضعیت معمول ثبت کردند. استفاده از ترکیب تیغه‌های ربع موج^۶ (QWP) و نیم موج در CPHI به‌منظور ایجاد جابجایی فاز مناسب امکان افزایش حساسیت را فراهم می‌نماید [۸].

¹Surface Plasmon Resonance

²Kretschmann

³Otto

⁴Common-path Polarization Heterodyne Interferometry

⁵Kuo

⁶Quarter Wave Plate

همچنین، استفاده از ترکیب دو تیغه ربع موج در تداخل سنج ماخ - زندر [۹] و یک تیغه ربع موج در تداخل سنج مایکلسون [۱۰] جهت افزایش حساسیت پیشنهاد شده است. در پژوهشی که پیش از این انجام شد [۱۱]، با پیاده سازی چیدمان تجربی مبتنی بر هندسه کرشمن و روش CHPI، موسوم به چیدمان چن^۱ [۶]، تغییرات فاز موج SPR نسبت به زاویه فرود پرتو و نیز میزان جابجایی فاز با تغییرات غلظت ماده نمونه مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه این پژوهش، با هدف افزایش حساسیت فاز SPR، ایده کنترل قطبش در چیدمان CHPI از طریق وارد کردن QWP در ترکیب های مختلف به صورت نظری بررسی و نتایج شبیه سازی آن ارائه شد [۱۲]. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با توجه به نوع چیدمان و شرایط لایه نشانی در زاوایای سمتی مشخصی QWP، امکان افزایش حساسیت به میزان قابل ملاحظه ای وجود دارد [۱۲]. در این مقاله و در ادامه پژوهش های صورت گرفته [۱۱-۱۳]، ایده افزایش حساسیت فاز در اثر تغییر قطبش بیضوی نور، به طور تجربی، مورد بررسی و آزمون قرار می گیرد. در این پژوهش، چیدمان اندازه گیری فاز بر اساس هندسه کرشمن به روش CPHI پیاده سازی می شود و با وارد نمودن QWP در مسیر مناسب تداخل سنج، افزایش حساسیت فاز به دست می آید و با میزان حساسیت با چیدمان استاندارد CPHI مقایسه می گردد.

۲. مروری مختصر بر مبانی نظری SPR

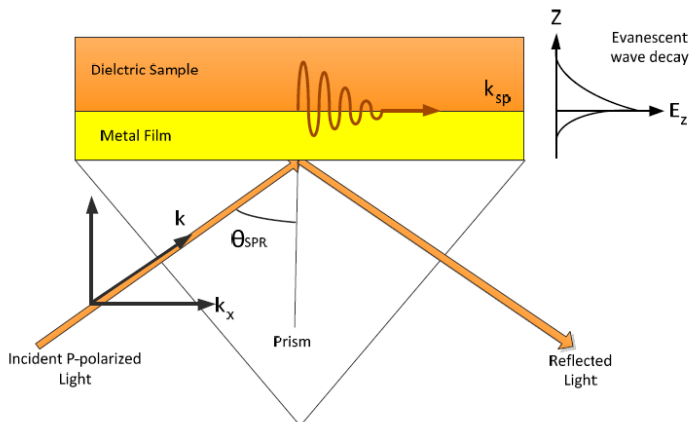
یک حسگر SPR، بر اساس هندسه کرشمن (مطابق با شکل (۱))، متشکل از یک ساختار سه لایه شامل منشور، لایه نازکی از جنس فلز و محیط نمونه است. هنگامی که مؤلفه مماسی بردار موج نور فرودی با بردار موج پلاسمون سطحی برابر شود، تشدید پلاسمونی رخ می دهد [۱]. با استفاده از پارامترهای نشان داده شده در شکل (۱) و با حل معادلات ماکسول و اعمال شرایط مرزی مناسب درمی یابیم که تنها موج با قطبش p روی پلاسمون های سطحی اثر می گذارد و لذا بردار موج پلاسمون سطحی (k_{spp}) و زاویه تشدید پلاسمون سطحی (θ_{SPR}) از روابط زیر قابل محاسبه است [۱۱ و ۱]:

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

$$\theta_{SPR} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \right)$$

^۱Chen





شکل ۱ نمایش هندسه کرشمن و انتشار موج پلاسمون سطحی.

در این رابطه، ω بسامد میدان فرودی، c سرعت نور، k_0 بردار موج نور فرودی، ϵ_m ثابت دی الکتریک فلز، ϵ_d ثابت دی الکتریک محیط، و n ضریب شکست منشور است. ثابت دی الکتریک فلز را می توان براساس مدل درود^۱، با استفاده از رابطه زیر تقریب زد [۱۴]:

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

که در این رابطه، γ ثابت میرایی و ω_p بسامد پلاسمای فلز است. همان گونه که در شکل (۱) دیده می شود، پلاسمون سطحی در راستای موازی با سطح انتشار می یابد و در جهت z عمود بر سطح در هردو محیط دی الکتریک و فلز، میرا می شود. با استفاده از معادلات فرنل در محیط سه لایه می توان ضرایب بازتاب و تغییرات فاز را محاسبه نمود. جزئیات محاسبات قبلاً در مراجع [۱۱] و [۱۲] ارائه شده است.

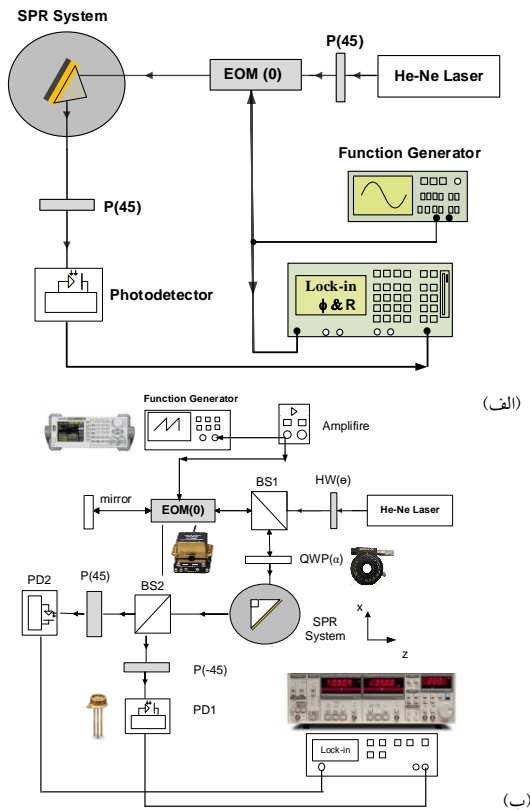
۳. افزایش حساسیت فاز در تداخل سنج هتروداین قطبشی مسیر مشترک

در تداخل سنجی هتروداین نوری، از دو پرتو لیزری با بسامدهای کمی متفاوت استفاده می شود. با برهم نهی این دو پرتو، سیگنالی با بسامد «زنش»، که وابسته به تفاوت بسامد دو پرتو اصلی است، تولید می شود. از مقایسه فاز دو سیگنال الکتریکی تولید شده در خروجی، می توان فاز SPR را با وضوح بالا و در زمان واقعی اندازه گیری نمود. روش هتروداین قطبشی مسیر مشترک (CPHI) نسبت به روش هتروداین متداول دارای مزیت پایداری نسبت به تغییرات محیط اطراف از نظر

¹Drude model

لرزش و تغییرات دمایی است. در واقع در این تداخل سنج، دو مؤلفه قطبش S و P مسیر یکسانی، شامل دو بازوی تداخل سنج را می‌پیمایند و تغییرات ایجاد شده روی فاز یا شدت این دو مؤلفه قطبش، در خروجی اندازه‌گیری می‌شود [۷].

چیدمان آزمایشگاهی این تحقیق بر اساس طرح چن (شکل ۲-الف) و نیز طرح نشان‌داده شده در شکل ۲-ب)، شامل برخی تغییرات لازم جهت افزایش حساسیت به فاز، صورت گرفته است. در طرح چن، مطابق با شکل، نور لیزر با قطبش ۴۵ درجه پس از عبور از مدولاتور الکترواپتیکی به موج هتروداین با بسامد ω تبدیل می‌گردد. پس از فرود با زاویه θ بر سطح قاعده منشور و تحریک پلاسمون سطحی و عبور از قطبش‌گر در زاویه ۴۵ درجه، موج توسط آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل و سپس، اختلاف فاز آن از طریق دستگاه قفل شونده^۱ فازی ثبت می‌شود.



شکل ۲ طرح‌واره CHPI (الف) استاندارد (ب) اصلاح شده.

^۱Lock-in amplifier



در چیدمان اصلاح شده (شکل ۲ - ب)، نور لیزر با قطبش مناسب پس از دو بار عبور از مدولاتور الکترواپتیکی، به موج هتروداین با بسامد ω تبدیل می شود و پس از عبور از تیغه ربع موج (QWP) در زاویه فرود θ ، پلاسمون سطحی را تحریک می کند. سپس، با جداسازی مؤلفه های قطبشی $\pm 45^\circ$ ، هر دو موج توسط آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل و اختلاف فاز آن ها از طریق دستگاه قفل شونده فازی ثبت می شود. دلیل این که نور دو بار از مدولاتور عبور داده می شود، محدودیت تقویت کننده ولتاژ برای مدولاسیون فاز است. در واقع، در مقایسه با حالتی که نور یک بار عبور می کند، با استفاده از این چیدمان و رعایت ملاحظات مربوط به دقت در تنظیم مسیر پرتو عبوری، ولتاژ لازم برای مدولاسیون عملاً به نصف کاهش می یابد. برپایه تحلیل های نظری و اثبات تجربی، که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد، تأیید می شود که حساسیت فاز در زاویه سمتی خاصی از QWP افزایش محسوسی می یابد. بررسی نظری چیدمان آزمایشگاهی شکل (۲ - ب) براساس تحلیل جونز پیشتر در مرجع [۱۲] انجام شده است. سیگنال های خروجی با روابط زیر بیان می شوند [۱۲]:

$$I_{Sen} \propto r_p^2 + r_s^2 + \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega t + \varphi_{Sen})$$

$$I_{Ref} \propto r_p^2 + r_s^2 + \sqrt{C^2 + D^2} \cos(\omega t + \varphi_{Ref}),$$

که در این روابط ثابت های زیر تعریف می شوند:

$$\varphi_{Sen} = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right), \quad \varphi_{Ref} = \tan^{-1}\left(\frac{D}{C}\right)$$

$$A = 2r_p r_s [\sin^2(2\alpha) \cos(\varphi_{ps}) + \cos(2\alpha) \sin(\varphi_{ps})]$$

$$B = (r_p^2 - r_s^2) + (r_p^2 - r_s^2) \sin(2\alpha) \cos(2\alpha)$$

$$C = -2r_p r_s [\sin^2(2\alpha) \cos(\varphi_{ps}) + \cos(2\alpha) \sin(\varphi_{ps})]$$

$$D = (r_p^2 - r_s^2) - (r_p^2 - r_s^2) \sin(2\alpha) \cos(2\alpha)$$

در این روابط I_p و I_s ، به ترتیب، ضرایب انعکاس مؤلفه های قطبش s و p از لایه فلزی، α زاویه سمتی QWP، و φ_{ps} فاز موج پلاسمون سطحی است. براساس این روابط، شدت های خروجی و اختلاف فاز آن ها تابعی از زاویه سمتی α و فاز SPR (یعنی φ_{ps}) و ضرایب انعکاس هستند. برای ارزیابی حساسیت فاز SPR، پارامتر S_{SPR} ، که شیب نمودار تغییرات فاز بر حسب زاویه فرود نور بر منشور است، به صورت زیر تعریف و در بررسی های نظری و تجربی از آن استفاده خواهد شد:

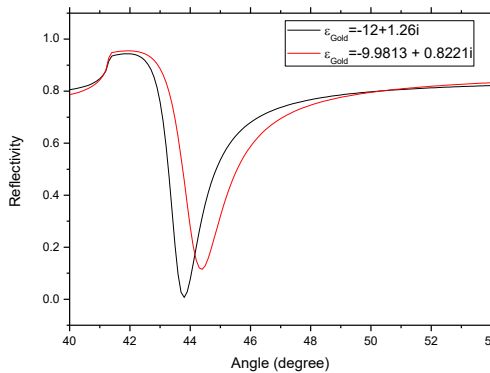
$$S_{SPR} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\theta}$$

که در آن $\Delta\varphi$ و $\Delta\theta$ ، به ترتیب، تغییر فاز SPR و تغییر زاویه فرودی نور به منشور است. با توجه به اینکه زاویه SPR به شدت تابع ضریب شکست محیط پیرامون لایه فلزی است و از طرفی، تغییر

فاز SPR تابعی از زاویه فرود است، هرگونه افزایش حساسیت فاز نسبت به زاویه نور فرودی منجر به افزایش حساسیت اندازه گیری ضریب شکست خواهد شد.

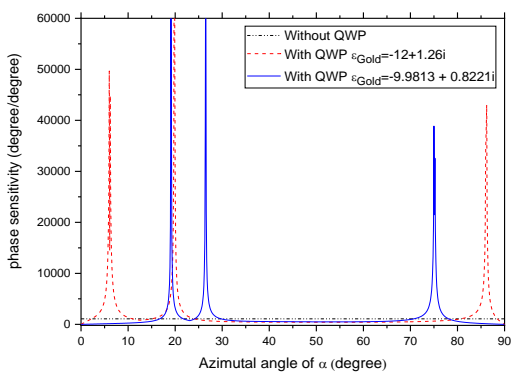
۴. داده‌های شبیه‌سازی و نتایج تجربی

طبق چیدمان شکل (۲-ب) و با استفاده از معادلات بخش قبل، می‌توان حساسیت فاز نسبت به تغییرات زاویه فرودی نور را در محیط هوا و در زوایای سمتی مختلف QWP برآورد نمود. با توجه به اینکه در منابع علمی متفاوت، مقادیر گوناگونی برای ثابت دی‌الکتریک طلای خالص (به صورت لایه نازک در محدوده ضخامت ۳۰ تا ۷۰ نانومتر) ذکر شده است، شبیه‌سازی برای دو مرجع [۱۵] و [۱۶]، به عنوان نمونه، صورت گرفت. مقدار ثابت دی‌الکتریک برای طلای خالص در مرجع [۱۵]، به صورت $\epsilon_{gold} = -9.9813 + 0.8221i$ و در مرجع [۱۶]، به صورت $\epsilon_{gold} = -12 + 1.26i$ آمده است. در شکل (۳)، نتایج شبیه‌سازی ضریب انعکاس و همچنین حساسیت فاز نسبت به زاویه فرود نور بر منشور، برحسب زاویه سمتی QWP، برای طلای خالص با ضخامت ۴۵ نانومتر، به ازای هر دو ثابت دی‌الکتریک، و براساس چیدمان اصلاح‌شده چن (شکل ۲-ب) مشاهده می‌شود. طبق شکل، در زوایای سمتی خاصی که بستگی به خصوصیات ماده فلزی (بخش حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک) دارد، حساسیت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به منظور مقایسه، نمودار حساسیت فاز برای چیدمان فاقد QWP، یعنی شرایط مطابق با شکل (۲-الف)، نیز در این شکل ارائه شده است.



(الف)





(ب)

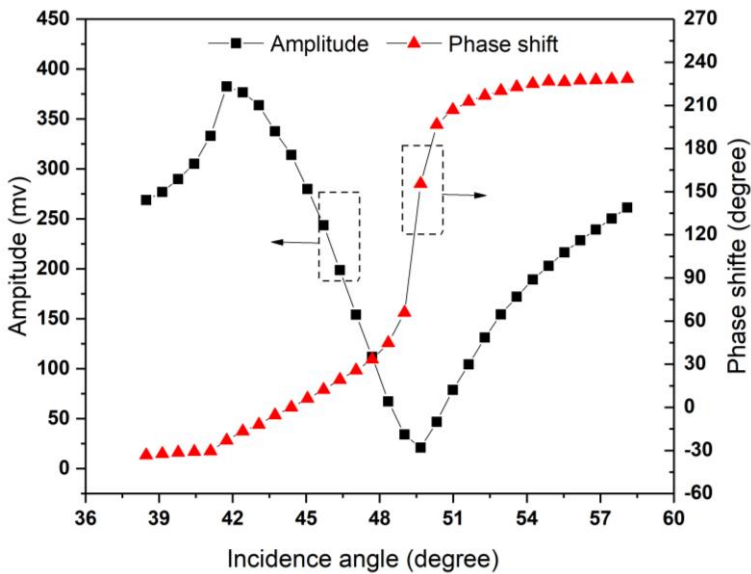
شکل ۳ (الف) نتایج شبیه‌سازی ضربی انعکاس از SPR، و (ب) نمودار تغییرات حساسیت فاز بر حسب زاویه سمتی α .

شکل (۴) تصویر چیدمان تجربی CHPI اصلاح شده، مطابق با طرح‌واره شکل (۲-ب)، را نشان می‌دهد. در این چیدمان، از منبع لیزر He-Ne پایدار و قطبی با توان ۵ mW، مدولاتور الکترواپتیکی، آشکارساز نوری سیلیکونی، تیغه‌های نیم موج و ربع موج، قطبنده، و همچنین دستگاه تقویت کننده قفل فاز (مدل SR830) استفاده شد. روی قاعده منشور BK7، لایه‌نشانی طلا به روش تبخیری انجام شده و سپس روی میز چرخان قرار گرفته است.



شکل ۴ تصویر چیدمان تداخل سنجی هتروداین قطبشی مسیر مشترک اصلاح شده.

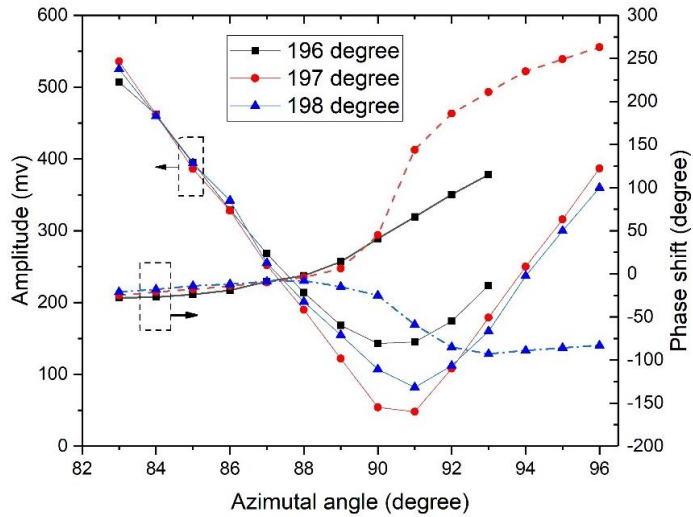
در ابتدا، با استفاده از چیدمان چن و به منظور ارزیابی زاویه تشدید SPR و برآورد میزان حساسیت فاز، تغییرات شدت نور بازتابی و فاز SPR، بر حسب زاویه فرود نور اندازه گیری شد. نتایج در شکل (۵) ارائه شده است. به طور کلی، زاویه تشدید SPR، که در آن انعکاس کمینه رخ می دهد، تابعی از ضریب شکست محیط پیرامون، ضخامت و ویژگی نوری لایه ها، به ویژه لایه نازک طلا است [۱۵] و مطابق با نمودار حاصل از شبیه سازی (شکل ۳- الف)، زاویه SPR برای طلای خالص حدود ۴۴ درجه است. با توجه به در دسترس نبودن طلای خالص و استاندارد جهت ساخت نمونه و استفاده از طلای تجاری ۲۱ عیار، انحراف زاویه تشدید SPR مشاهده شده در آزمون نسبت به نتایج آزمایش با طلای خالص را می توان به وجود ناخالصی ها و آلودگی ها در نمونه لایه و عدم دقت لازم در تعیین ضخامت لایه نسبت داد.



شکل ۵ دامنه و فاز نور بازتابی بر حسب زاویه فرودی نور طبق چیدمان چن.

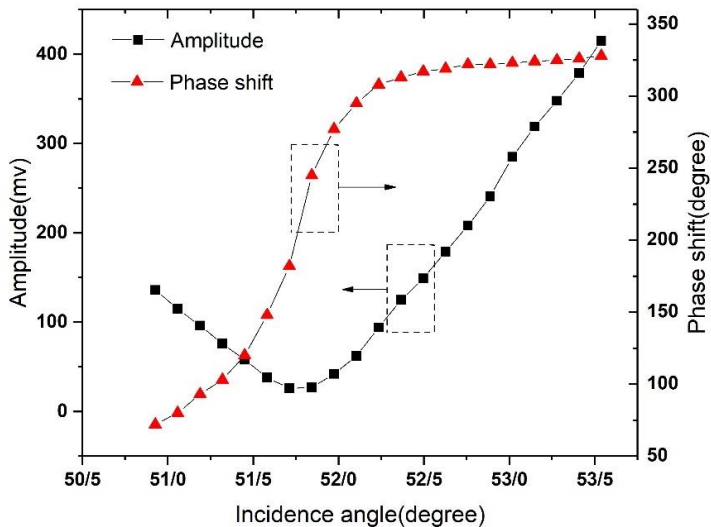
برای ارزیابی افزایش حساسیت فاز در چیدمان اصلاح شده چن (شکل (۴))، زاویه فرود نور بر لایه فلزی را نزدیک به زاویه SPR، و زاویه سمتی QWP را در محدوده مشخصی که احتمال افزایش حساسیت وجود دارد، تنظیم کردیم. سپس، با تغییر زاویه سمتی در محدوده مناسب، وضعیت تغییر فاز و شدت سیگنال ها ثبت شد. شکل (۶) نمودار تغییرات فاز و شدت را به ازای سه زاویه مختلف فرود نور بر منشور (زوایای نسبی میز چرخان: ۱۹۶، ۱۹۷ و ۱۹۸ درجه) بر حسب زوایای سمتی گوناگون QWP نشان می دهد.





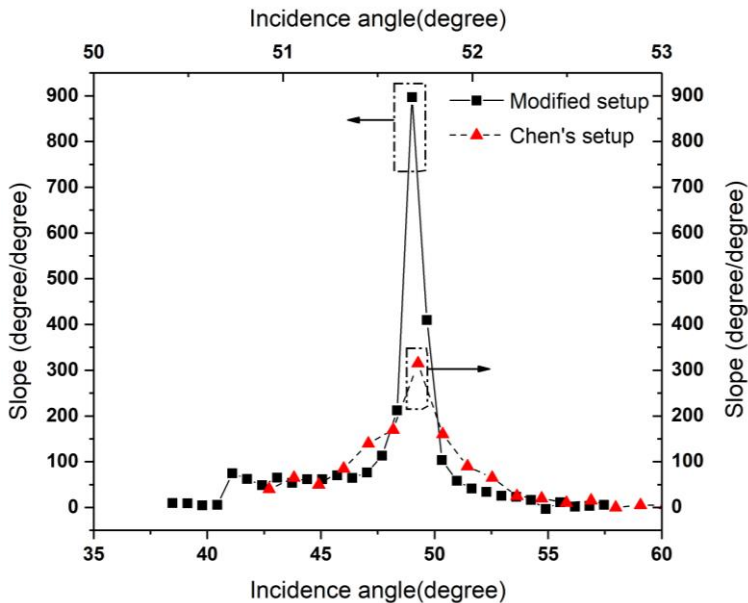
شکل ۶ شدت و فاز بر حسب زاویه سمتی QWP طبق چیدمان اصلاح شده چن.

بر اساس داده‌های شکل (۶)، بیشترین تغییرات فاز در زاویه سمتی ۹۱ درجه رخ داده است. بنابراین، در ادامه، QWP در این زاویه تنظیم و سیستم SPR با قدم‌های زاویه‌ای ۰/۲ درجه در اطراف زاویه تشدید تغییر داده شد. نتایج تغییرات شدت و فاز در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به شکل، بیشترین حساسیت فاز و کمینه شدت در زاویه بین ۵۱/۵ و ۵۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۷ تغییرات شدت و فاز بر حسب زوایای فرود در زاویه سمتی ۹۱ درجه.

شکل (۸) نمودار حساسیت فاز را برحسب زاویه فرود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حساسیت فاز در چیدمان اصلاح‌شده حداقل به میزان $3/5$ برابر نسبت به چیدمان استاندارد چن افزایش یافته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به‌علت تغییر قطبش بیضوی نور، حساسیت فاز SPR تابعی از زاویه سمتی QWP است، که به‌واسطه اعمال جابجایی فاز بین مؤلفه‌های S و P قطبش نور مدوله‌شده در چیدمان اصلاح‌شده رخ می‌دهد. از آنجا که تغییرات ضریب شکست در مجاورت لایه فلزی باعث جابجایی زاویه SPR می‌شود، واضح است که افزایش حساسیت فاز SPR نسبت به زاویه نور فرودی نیز منجر به افزایش حساسیت اندازه‌گیری ضریب شکست، یعنی نسبت تغییر فاز به تغییر ضریب شکست محیط خواهد شد.



شکل ۸ مقایسه حساسیت فاز نسبت به زاویه فرودی نور در چیدمان استاندارد چن و چیدمان اصلاح‌شده.

۵. نتیجه‌گیری

از میان روش‌های مختلف اندازه‌گیری مبتنی بر پلاسمون سطحی (SPR)، روش‌های برپایه اندازه‌گیری فاز دارای دقت و حساسیت بیشتری هستند. چیدمان تداخل سنج هتروداین قطبشی مسیر مشترک (CPHI) به‌دلیل خصوصیات سادگی، دقت بالا و پایداری زیاد برای اندازه‌گیری فاز SPR مورد توجه است. در این تحقیق، چیدمان اصلاح‌شده CPHI برای اندازه‌گیری فاز SPR در هندسه کرشمن از نظر تجربی مورد بررسی و آزمون قرار گرفت. در چیدمان اصلاح‌شده، با



اضافه نمودن تیغه ربع موج (QWP) در مسیر تداخل سنج و تغییر وضعیت قطبش بیضوی نور تداخلی، تغییرات فاز SPR نسبت به تغییرات زاویه سمتی QWP و همچنین نسبت به تغییرات زاویه فرود نور بر منشور از طریق شبیه‌سازی و تجربی بررسی شد. با تحلیل نتایج تجربی، افزایش حساسیت قابل ملاحظه‌ای در فاز، نسبت به چیدمان استاندارد CPHI مشاهده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در چیدمان اصلاح شده می‌توان با استفاده از تیغه ربع موج و کنترل زاویه سمتی آن، حساسیت فاز SPR را به میزان حداقل ۳/۵ برابر افزایش داد.

۶. تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از داوران محترم بدلیل ارائه نظرات ارزشمند و سازنده و همچنین هیات تحریریه محترم مجله فیزیک کاربردی ایران اعلام می‌دارد.

منابع

- [1] Sarid D., Challener W.A., Modern Introduction to Surface Plasmons Theory, Mathematica Modeling, and Applications, 1st ed., Cambridge University Press, New York, 122-125, 2010.
- [2] Kabashin A.V., Patskovsky S., Grigorenko A.N, Phase and amplitude sensitivities in surface plasmon resonance bio and chemical sensing, Optics Express, **17**, 21191-21204, 2009.
- [3] Wu C., Jian Z., Joe S., Chang L., High-sensitivity sensor based on surface plasmon resonance and heterodyne interferometry, Sensors and Actuators B: Chemical, **92**, 133-136, 2003.
- [4] Kabashin A.V., Kochergin V.E., Beloglazov A.A., Nikitin P.I., Phase-polarisation contrast for surface plasmon resonance biosensors, Biosensors and Bioelectronics, **13**, 1263-1269, 1998.
- [5] Naraoka R., Kajikawa K., Phase detection of surface plasmon resonance using rotating analyzer method, Sensors and Actuators B, **107**, 952-956, 2005.
- [6] Su D.C., Chiu M.H., Chen C.D., Simple two-frequency laser, Precision Engineering, **18**, 161-163, 1996.
- [7] Kuo W.K., Chang C.H., Phase detection sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor in a heterodyne interferometer system, Applied Optics, **50**, 1345-1349, 2011.
- [8] Hsieh M., Liao C., Lin J., Optical relative humidity sensor based on a polyvinyl alcohol film and a phase-enhancement total-internal-reflection heterodyne interferometer, Sensors and Actuators A: Physical, **316**, 112412, 2020.
- [9] Wu C.M., Pao M.C., Sensitivity-tunable optical sensors based on surface plasmon resonance and phase detection, Optics Express, **12**, 3509-3514, 2004.
- [10] Lee J.Y., Mai L.W., Hsu C.C., Sung Y.Y., Enhanced sensitivity to surface plasmon resonance phase in wavelength-modulated heterodyne interferometry, Optics Communication, **289**, 28-32, 2013.
- [11] Aref S.H., Mahjor F., Phase shift measurement in surface plasmon resonance sensor by the common-path polarization heterodyne interferometer, J. Res. Many. Sys., **8**,

121-127, 2018. (in Persian)

- [12] Aref S.H., SPR phase sensitivity enhancement in common-path polarization heterodyne interferometer by polarization tuning, *Optik*, **156**, 619-627, 2018.
- [13] Fallah N., Aref S.H., Increasing the phase sensitivity of the surface plasmon resonance in common-path interferometry, 26th Iranian conference on optics and photonics and 12th Iranian conference on engineering photonics, Kharazmi University, Karaj, 4-5 February 2020. (in Persian)
- [14] Peyghambarian, N., Koch, S.W., Mysyrowicz, A., Introduction to Semiconductor Optics (Prentice Hall Series in Solid State Physical Electronics), 1st ed., Pearson College Div., 72-80, 1993.
- [15] Gwon H.R., Lee S.H., Spectral and angular responses of surface plasmon resonance based on the Kretschmann prism configuration, *Materials transactions*, **51**, 1150-1155, 2010.
- [16] 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**, 6702-6707, 2006.

