

اندازه‌گیری جابه‌جایی فاز به‌روش تداخل سنج قطبشی هتروداین در حسگر تشدید پلاسمون سطحی

سید هاشم عارف*، فاطمه مهجور

آزمایشگاه تحقیقاتی فوتونیک، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

دریافت: 1396/10/27 ویرایش نهائی: 1397/04/22 پذیرش: 1397/07/09

چکیده

از میان روش‌های مختلف اندازه‌گیری مبتنی بر پلاسمون سطحی، آشکارسازی فاز موج پلاسمون سطحی یکی از دقیق‌ترین و حساس‌ترین روش‌ها به حساب می‌آید. فاز موج را می‌توان با دقت مناسبی به‌روش‌های مختلف تداخلی اندازه‌گیری نمود. در این پژوهش ابتدا فاز و شدت موج پلاسمون سطحی شبیه‌سازی شده و سپس با پیاده‌سازی چیدمان آزمایشگاهی تداخل سنج قطبشی هتروداین تغییر فاز موج پلاسمون سطحی و پاسخ آن نسبت به‌عامل خارجی (تغییر ضریب شکست محیط پیرامون) به‌دست آمده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، مقدار میانگین حساسیت فاز در آزمون آب-الکل برابر $0/4266 \text{ degree}/\% \text{ gr/ml}$ و برای آزمون آب-گلوکز برابر $1/4765 \text{ degree}/\% \text{ gr/ml}$ و میزان قدرت تفکیک غلظت در آزمون آب-الکل برابر $0/49 \text{ } \% \text{ gr/ml}$ و در آزمون آب-گلوکز برابر $0/14 \text{ } \% \text{ gr/ml}$ به‌دست آمده است.

کلیدواژگان: تشدید پلاسمون سطحی، حسگر ضریب شکست، تداخل سنج قطبشی هتروداین، جابه‌جایی فاز

مقدمه

بهداشتی کاربرد دارند [1 و 2]. در حسگرهای SPR، اطلاعات مربوط به تغییرات محیط از تغییر در مشخصات نور بازتابی از سطح به‌دست می‌آید. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری تغییرات SPR وجود دارد. پارامترهایی که برای بررسی رفتار انتشاری پلاسمون‌های سطحی در امتداد سطح مشترک فلز و دی الکتریک استفاده می‌شود عبارتند از: شدت، فاز، قطبش و طول موج نور. از آن‌جا که حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی کاربردهای آزمایشگاهی، تحقیقاتی و صنعتی بسیار زیادی دارند، تاکنون تلاش‌های بسیاری در زمینه بهینه‌سازی و افزایش حساسیت این حسگرها انجام شده است. عملاً آشکارسازی فاز موج پلاسمون سطحی به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین و حساس‌ترین

پلاسمون‌های سطحی، امواج سطحی ناشی از نوسانات الکترون‌های آزاد فلز در مرز مشترک فلز و دی‌الکتریک هستند. تشدید پلاسمون سطحی¹ (SPR) زمانی رخ می‌دهد که بسامد فوتون‌های فرودی به‌عنوان عامل تحریک با بسامد طبیعی الکترون‌های مقید روی سطح مطابقت کند. ثابت انتشار این امواج به‌شدت به تغییرات محیط دی‌الکتریک مجاور با سطح فلز وابسته است. بر همین اساس حسگرهای SPR، حسگرهای ضریب شکست نیز نامیده می‌شوند و در مواردی چون علوم پزشکی، مطالعات بیومولکولی، صنایع غذایی، پایش محیط زیست و تولید محصولات دارویی و

* نویسنده مسئول: h-aref@qom.ac.ir

¹Surface Plasmon Resonance

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

شبیه‌سازی رفتار حسگر SPR

در این بخش تغییرات فاز و شدت موج بازتابی SPR در محیط برنامه‌نویسی متلب شبیه‌سازی و نتایج حاصل ارائه می‌گردد. با استفاده از معادلات فرنل در محیط سه لایه (مطابق شکل 1)، می‌توان ضرایب بازتاب و تغییرات فاز را محاسبه نمود. روابط فرنل حاکم بر این مسئله عبارتند از:

$$k_{iz} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_i - k_x^2} \quad (3)$$

$$r = |r_{pms}| e^{i\varphi} = \frac{r_{pm} - r_{ms} e^{2ik_{mz}d}}{1 + r_{pm} r_{ms} e^{2ik_{mz}d}} \quad (4)$$

5

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{r_{ms}(1 - r_{pm}^2) \sin(2k_{mz}d)}{r_{pm}(1 + r_{ms}^2) + r_{ms}(1 + r_{pm}^2) \cos(2k_{mz}d)} \right)$$

در صورتی که اندیس‌های i و j بیانگر هر یک از سه محیط منشور (p)، فلز (m) و نمونه (s) فرض شوند آنگاه ضریب r_{ij} در روابط فوق برای هر یک از دو قطبش p و s از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$r_{ij} = \frac{\varepsilon_j k_{iz} - \varepsilon_i k_{jz}}{\varepsilon_j k_{iz} + \varepsilon_i k_{jz}} \quad (\text{برای قطبش } p) \quad (6)$$

$$r_{ij} = \frac{k_{iz} - k_{jz}}{k_{iz} + k_{jz}} \quad (\text{برای قطبش } s) \quad (7)$$

که d ضخامت لایه فلز، λ طول موج نور فرودی و ε_i ثابت دی‌الکتریک هر یک از سه محیط منشور، لایه فلز و نمونه می‌باشد. در این شبیه‌سازی منشور از نوع BK7 با ضریب شکست $1/515$ و لایه فلز از جنس طلا با ضریب شکست $0,1816 + 3,469i$ در طول موج $632,8nm$ در نظر گرفته شده است [7]. در شکل 2 و 3 منحنی‌های بازتابندگی و فاز برحسب زوایای نور فرودی برای لایه‌های فلز با ضخامت‌های 40 تا 55 نانومتر با گام‌های 5 نانومتر در شرایطی که محیط اطراف

روش‌ها گزارش شده است [3 و 4]. در این تحقیق ضمن بررسی اجمالی حسگر SPR و معرفی روش‌های مبتنی بر فاز، ابتدا عملکرد حسگر شبیه‌سازی و سپس روش تداخل سنج قطبشی هتروداین تشریح و نتایج تجربی به دست آمده از پیاده‌سازی آن گزارش می‌شود.

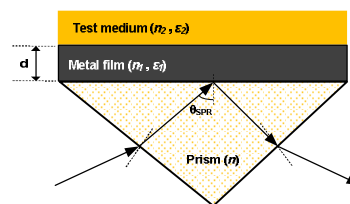
بررسی نظری حسگر SPR

مطابق شکل 1 یک حسگر SPR براساس هندسه کرشمن، متشکل از یک ساختار سه‌لایه شامل منشور، لایه نازکی از جنس فلز و محیط نمونه است. در صورتی که مؤلفه مماسی بردار موج نور فرودی (k_{in}) با بردار موج پلاسمون‌های سطحی (k_{sp}) برابر شود تشدید رخ می‌دهد [5]. بردار موج نور فرودی می‌تواند به اندازه بردار موج پلاسمون‌های سطحی افزایش یابد و در زاویه خاصی موسوم به زاویه تشدید پلاسمون‌های سطحی در فصل مشترک فلز-نمونه برانگیخته شود. زاویه تشدید (θ_{SPR}) به وسیله روابط زیر قابل محاسبه است:

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (1)$$

$$\theta_{SPR} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \right) \quad (2)$$

در رابطه بالا ε_1 و ε_2 به ترتیب ثابت دی‌الکتریک فلز و محیط حسگری و n ضریب شکست منشور است. در شرایط تشدید و انتقال انرژی از فوتون به پلاسمون‌های سطحی، شدت نور بازتابی به طور محسوسی کاهش می‌یابد [6]. به طور کلی مشخصه موج انعکاسی شامل شدت، فاز و قطبش در شرایط تشدید کاملاً به ضریب شکست محیط مجاور وابسته است.



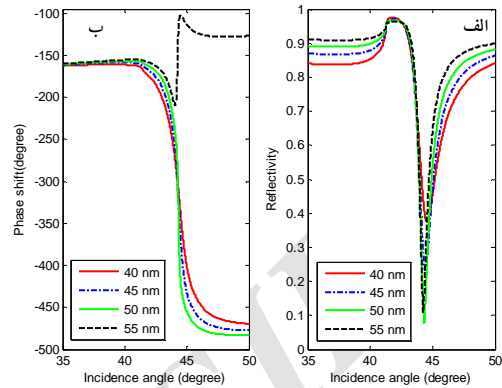
شکل 1. سیستم SPR سه لایه براساس هندسه کرشمن.

اندازه‌گیری فاز موج پلاسمون سطحی

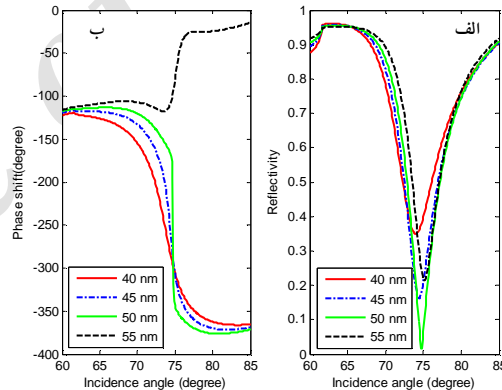
از آن‌جا که نوسانات شدت پرتوهای نوری از مرتبه بسامد نور ($\sim 10^{15} Hz$) است و سریع‌ترین آشکارسازهای نوری موجود قادر به پاسخ در این بسامد نیستند لذا متوسط شدت نور توسط آشکارساز نوری اندازه‌گیری شده و در نتیجه اطلاعات مربوط به فاز به‌طور مستقیم قابل بازیافت نخواهد بود. برای اندازه‌گیری فاز، روش‌های مختلفی از جمله تداخل‌سنجی [8]، بیضی‌سنجی [9] و تصویربرداری از نوارهای تداخلی [10] گزارش شده است. مهم‌ترین و مرسوم‌ترین این روش‌ها روش تداخل‌سنجی SPR است که در این روش، اندازه‌گیری فاز به‌تداخل بین دو پرتو سیگنال و مرجع بستگی دارد و وسیله‌ای مناسب برای اندازه‌گیری تغییرات فاز پرتو بازتابی مربوط به تشدید پلاسمون‌های سطحی است. روش‌های تداخل‌سنجی معمولاً به دو روش هموداین و هترودااین تفکیک می‌شوند. در روش هموداین از یک منبع تک بسامد تولید سیگنال‌های مربعی (دارای اختلاف فاز 90 درجه) شده و فاز موج سیگنال به‌دست می‌آید. در روش هترودااین با استفاده از دو موج نوری با بسامدی نزدیک به هم و برهم‌نهی و ایجاد زنش بین آنها، تغییرات فاز ناشی از SPR اندازه‌گیری می‌شود. در روش هترودااین استفاده از منبع لیزر زیمنان [11]، مدولاتور آکوستو-اپتیکی [12] و مدولاتور الکترو-اپتیکی [7 و 13] گزارش شده است. در این پژوهش با استفاده از مدولاتور الکترواپتیکی تداخل سنج قطبشی هترودااین پیاده‌سازی و فاز موج SPR اندازه‌گیری می‌شود.

در شکل 4 نمایش شماتیک از چیدمان تداخل سنج قطبشی هترودااین ارائه شده است. این نوع تداخل سنج ضمن سادگی، به‌دلیل مسیر مشترک بودن (مسیر مشترک بودن بازوی مرجع و سیگنال) از پایداری بالایی نیز برخوردار است [7 و 13].

هوا (شکل 2) و آب (شکل 3) در نظر گرفته شود، رسم شده است.



شکل 2. الف: منحنی بازتابندگی و ب: منحنی تغییرات فاز SPR برحسب زوایای فرود در محیط هوا برای ضخامت‌های مختلف لایه فلز طلا.



شکل 3. الف: منحنی بازتابندگی و ب: منحنی تغییرات فاز برحسب زوایای فرود در محیط آب برای ضخامت‌های مختلف لایه فلز طلا.

با توجه به نتایج به‌دست آمده ضخامت $50 nm$ کمترین بازتابندی و بیشترین شیب تغییرات فاز را در محیط‌های آب و هوا دارا است. زاویه تشدید SPR که متعلق به کمترین بازتابندگی است برای هر یک از دو محیط هوا و آب به ترتیب 44.3 و 74.8 درجه است. تغییرات فاز نیز در این زاویه دارای بیشترین شیب و دامنه تغییرات است.

$$E_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p e^{i\phi_p} & 0 \\ 0 & r_s e^{i\phi_s} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\omega t/2} \\ e^{-i\omega t/2} \end{bmatrix} \quad 11$$

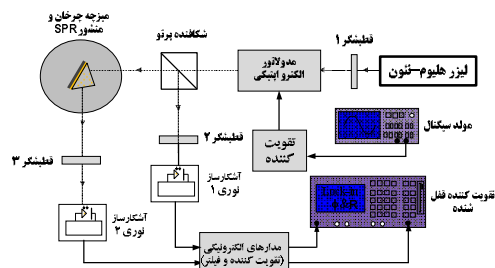
$$I_2 = \frac{I_0}{2} (r_p^2 + r_s^2 + 2r_p r_s \cos(\omega t + \phi)) \quad 12$$

که در آن $\phi = \phi_p - \phi_s$ اختلاف فاز قطبش‌های s و p و I_1 و I_2 شدت‌های متناظر با مسیر مرجع و سیگنال است. ولتاژهای خروجی آشکارساز نوری 1 و 2 مربوط به شدت‌های I_1 و I_2 به‌عنوان سیگنال‌های مرجع و سیگنال حسگر به تقویت‌کننده قفل‌شونده² فرستاده شده و امکان اندازه‌گیری اختلاف فاز بین پرتوهای سیگنال و مرجع با دقت مناسب فراهم می‌گردد.

چیدمان و نتایج تجربی

چیدمان تجربی تداخل سنج قطبشی هتروداین مطابق با شکل 4 پیاده‌سازی شده و تغییرات فاز موج SPR اندازه‌گیری شده است. در این چیدمان، از لیزر هلیوم-نئون پایدار با طول موج 632.8nm و توان 5mw از یک مدولاتور الکترواپتیکی با ولتاژ $V_{\lambda/2}$ (معادل 380 ولت) با بسامد تحریک 5kHz و از تقویت‌کننده قفل‌شونده (Stanford, SR830 DSP Lock-in amplifier) استفاده شده است. برای سیستم SPR از یک منشور BK7 که بر وجه قاعده آن لایه طلا با ضخامت تقریبی 50nm به‌روش کند و پاش لایه‌نشانی شده استفاده شده است. سلول جریان نیز به‌گونه‌ای طراحی شده که منشور در داخل آن قرار گرفته و جریان مایع در تماس کامل با لایه طلا قرار گیرد. منشور SPR روی میز چرخان با دقت 0.1 درجه قرار دارد و با چرخاندن آن با گام‌های مناسب امکان تغییر زاویه فرود و اندازه‌گیری فاز SPR فراهم می‌گردد.

شکل 5 و 6 نمودارهای بازتابندگی و تغییر فاز برحسب زوایای فرود به‌ترتیب برای محیط حسگری هوا و آب خالص را نشان می‌دهد. در این نمودارها بازتابندگی و



شکل 4. شماتیکی از تداخل سنج قطبشی هتروداین.

مطابق شکل 4 نور قطبیده خطی (زاویه 45 درجه نسبت به محور افقی) از مدولاتور الکترو-اپتیکی (که محور تند یا کند آن در راستای محور افقی است) عبور نموده و در شرایط خاصی دو موج با قطبش‌های s و p با اختلاف بسامد مشخص به‌عنوان منبع هتروداین تولید می‌گردد. در صورتی که موج دندان اره‌ای با بسامد ω و با دامنه ولتاژ مناسب ($V_{\lambda/2}$) به مدولاتور اعمال شود در واقع شرایط خاص تولید موج هتروداین محقق می‌گردد. در این شرایط می‌توان با استفاده از روش بردار و ماتریس جونز مؤلفه‌های میدان را محاسبه نمود [7]:

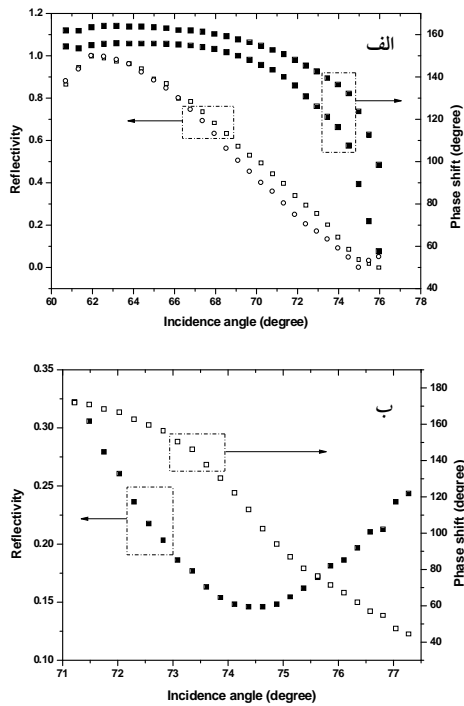
$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\omega t/2} \\ e^{-i\omega t/2} \end{bmatrix} \quad 8$$

مطابق شکل 4 موج هتروداین توسط شکافنده پرتو به دو پرتو تفکیک شده و پرتو مرجع پس از عبور از قطبش‌گر خطی (با زاویه 45 درجه نسبت به افق) به آشکارساز نوری می‌رسد. در مسیر دیگر موج هتروداین پس از انعکاس از منشور SPR و عبور از قطبشگر خطی (با زاویه 45 درجه نسبت به افق) آشکارسازی می‌شود. با استفاده از تحلیل جونز میدان‌ها و شدت خروجی در هر دو مسیر به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد [7]:

$$E_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\omega t/2} \\ e^{-i\omega t/2} \end{bmatrix} \quad 9$$

$$I_1 = I_0 (1 + \cos(\omega t)) \quad 10$$

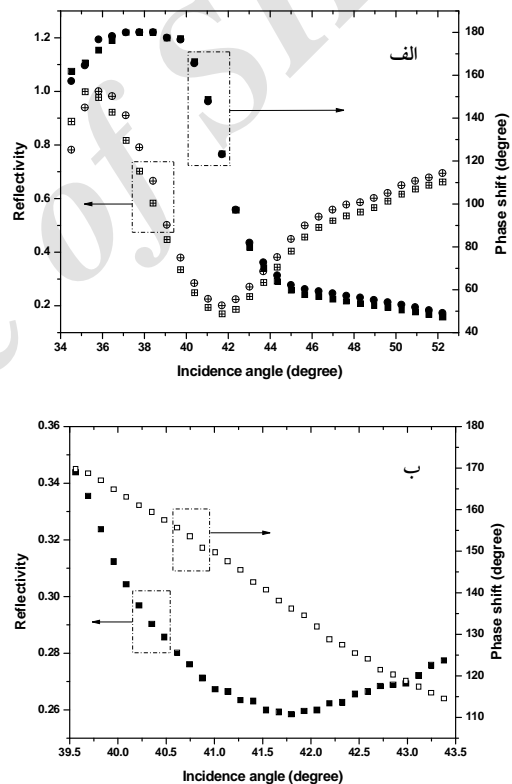
² Lock-in amplifier



شکل 6. منحنی بازتابندگی و تغییر فاز برحسب زاویه فرود در محیط هوا با گام زاویه‌ای الف: 0/5 درجه و ب: 0/1 درجه.

با هدف امکان‌سنجی ساخت حسگر ضریب شکست SPR و ارزیابی پاسخ فاز حسگر به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف، از سلول جریان استفاده شد. محلول آب-الکل و محلول آب-گلوکز با غلظت‌های مختلف به‌علت در دسترس بودن، سعی نمودن و تغییر خطی ضریب شکست آنها با غلظت به‌منظور ایجاد تغییرات ضریب شکست مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور 40 میلی‌لیتر آب خالص با 0، 0/8، 1/6، 2/4، 3/2 و 4 گرم در آزمون اول با الکل و در آزمون دوم با گلوکز به‌صورت محلول با غلظت‌های مختلف به‌ترتیب محلول‌های با درصد وزنی-حجمی 0 تا 10 درصد با گام 2 درصد ساخته و استفاده شد. در این مرحله از آزمایش، ابتدا میز چرخان روی زاویه 73/9 درجه نزدیک زاویه تشدید ثابت نگه داشته می‌شود و سپس محلول‌ها با غلظت‌های مختلف در سلول جریان جاری شده و تغییرات فاز پس از مدت زمان کوتاهی

تغییر فاز برای سه سری آزمایش متوالی (دو سری با گام زاویه‌ای 0/5 درجه و یک سری با گام زاویه‌ای 0/1 درجه) به‌دست آمده است. مطابق شکل 5 با توجه به شرایط مطلوب تکرار پذیری داده‌ها، زاویه تشدید پلاسمون سطحی که در کمینه بازتابندگی و بیشترین شیب تغییر فاز رخ می‌دهد، برابر 41/7 درجه و تغییرات فاز SPR در محدوده یک درجه پیرامون زاویه تشدید نیز حدود 50 درجه اندازه‌گیری شده است.

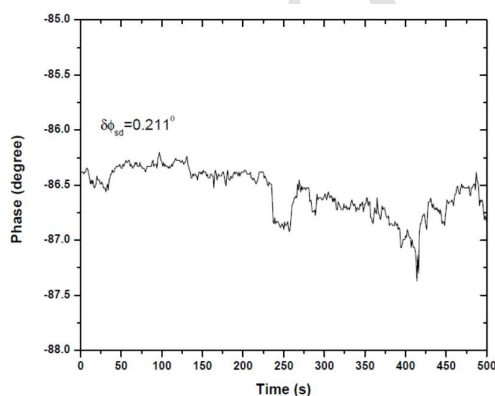


شکل 5. منحنی بازتابندگی و تغییر فاز برحسب زاویه فرود در محیط هوا با گام زاویه‌ای، الف: 0/5 درجه و ب: 0/1 درجه.

زاویه تشدید پلاسمون‌های سطحی مربوط به محیط حسگری آب نیز از نمودار شکل 6 برابر 74/3 درجه و تغییرات فاز SPR در محدوده یک درجه پیرامون زاویه تشدید نیز حدود 53 درجه به‌دست آمده است.

نمی‌باشد، تعریف نمود [14]. با توجه به منحنی شکل 7 جهت برقراری پایداری) اندازه‌گیری می‌شود. منحنی تغییرات فاز برحسب غلظت‌های مختلف آب-الکل در شکل 7الف و منحنی تغییرات فاز برحسب غلظت‌های مختلف آب-گلوکز در شکل 7ب ارائه شده است.

نمی‌باشد، تعریف نمود [14]. با توجه به منحنی شکل 7 انجام فیت خطی بر داده‌ها، از شیب خط فیت می‌توان حساسیت حسگر را در هر آزمون تخمین زد. لذا مقدار میانگین حساسیت فاز در آزمون آب-الکل برابر $0.4266 \text{ deg/ree}/\% \text{ gr/ml}$ و برای آزمون آب-گلوکز برابر $1.4765 \text{ deg/ree}/\% \text{ gr/ml}$ به دست می‌آید. به منظور تخمین قدرت تفکیک غلظت (با ضریب شکست) حسگر، مقدار نوسانات فاز سیستم تداخل سنج قطبشی هتروداین در شرایطی که سیستم SPR در مجاورت آب خالص قرار دارد در بازه زمانی 500 ثانیه ثبت می‌شود. منحنی نوسانات فاز در این آزمون در شکل 8 نشان داده شده است. مقدار انحراف معیار داده‌ها $(\delta\varphi_{sd})$ مطابق نمودار شکل 8 برابر 0.211 درجه است و لذا قدرت تفکیک در آزمون آب-الکل برابر $0.49 \text{ } \%/ \text{ gr/ml}$ و در آزمون آب-گلوکز برابر $0.14 \text{ } \%/ \text{ gr/ml}$ به دست می‌آید. البته در شرایطی که امکان کنترل دما برای سیستم SPR و مدولاتور الکترواپتیکی فراهم گردد و مدارهای الکترونیکی نیز بهبود یابند، پایداری فاز بسیار بهتر و لذا قدرت تفکیک بسیار کمتری به دست خواهد آمد.

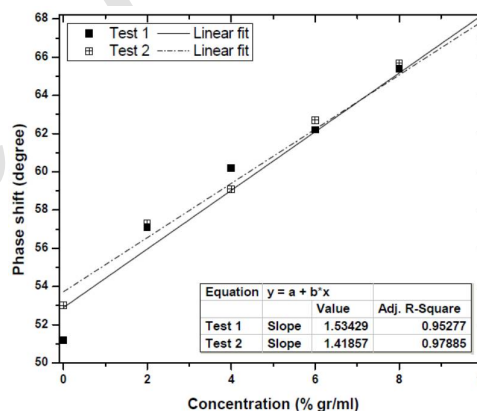
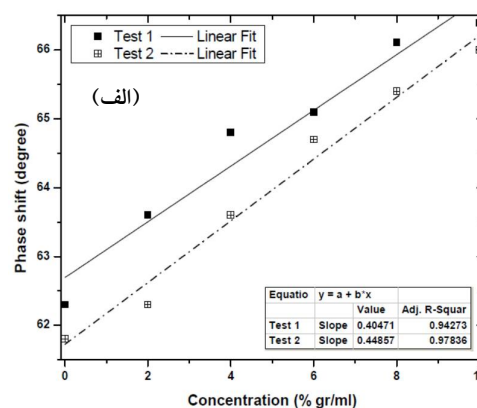


شکل 8. ارزیابی پایداری تداخل سنج قطبشی هتروداین در مدت زمان 500 ثانیه.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا تغییرات شدت و فاز پلاسمون سطحی بررسی و شبیه‌سازی شده و سپس با پیاده‌سازی

جهت برقراری پایداری) اندازه‌گیری می‌شود. منحنی تغییرات فاز برحسب غلظت‌های مختلف آب-الکل در شکل 7الف و منحنی تغییرات فاز برحسب غلظت‌های مختلف آب-گلوکز در شکل 7ب ارائه شده است.



شکل 7. منحنی تغییرات فاز برحسب غلظت‌های مختلف، الف: محلول آب-الکل و ب: محلول آب-گلوکز.

همان‌طور که در شکل 7 ملاحظه می‌شود منحنی فاز برحسب غلظت برای هر دو نوع محلول تا حد مناسبی خطی و با افزایش غلظت محلول، فاز نیز افزایش می‌یابد. حساسیت حسگر ضریب شکست را می‌توان براساس نسبت تغییر فاز به تغییر غلظت یا ضریب شکست تعریف نمود [14]. همچنین قدرت تفکیک ضریب شکست حسگر را می‌توان از نسبت افت و خیز فاز در مدت زمان مناسب به حساسیت حسگر در شرایطی که سیستم تحت تغییرات عامل خارجی

[5] E. Kretschmann, H. Reather, Radiative decay of nonradiative surface plasmon excited by light, *Zeitschrift für Naturforschung A* 23 (1968) 2135–2136.

[6] K. Nagata, H. Handa, Real-Time analysis of bioelectrical interactions, *Journal of Molecular Recognition* 11 (2000).

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

[8] M. Kashif, A. Ashrif, N. Arsad, Development of Phase Detection Schemes Based on Surface Plasmon Resonance Using Interferometry, *Sensors*. 14 (2014) 15914–15938.

[9] I.R. Hooper, J.R. Sambles, Sensing using differential surface plasmon ellipsometry, *Journal of Applied Physics* 96 (2004) 3004–3010.

[10] G.J. Wegner, H.J. Lee, G. Marriott, R.M. Corn, Fabrication of histidine-tagged fusion protein arrays for surface plasmon resonance imaging studies of protein-protein and protein-DNA interactions, *Analytical Chemistry* 75 (2003) 4740–4746.

[11] J.A. Dahlquist, D.G. Peterson, W. Culshaw, Zeeman laser interferometer, *Applied Physics Letters* 9 (1966) 181–183.

[12] M. Kashif, A. Ashrif, N. Arsad, Development of Phase Detection Schemes Based on Surface Plasmon Resonance Using Interferometry, *Sensors*, 14 (2014) 15914–15938.

[13] D.C. Su, M.H. Chiu, C.D. Chen, Simple two-frequency laser, *Precision Engineering* 18 (1996) 161–163.

[14] J.Y. Lee, L.W. Mai, C.C. Hsu, Y.Y. Sung, Enhanced sensitivity to surface plasmon resonance phase in wavelength-modulated heterodyne interferometry, *Optics Communications* 289 (2013) 28–32.

تداخل سنج قطبشی هتروداين مسير مشترك، تغييرات شدت و فاز موج پلاسمون سطحی در هندسه کرشمن اندازه‌گیری شده است. برای دو محیط هوا و آب خالص زاویه تشدید پلاسمون سطحی به ترتیب برابر با $41/7$ و $74/3$ اندازه‌گیری شد. با هدف امکان‌سنجی ساخت حسگر ضریب شکست SPR، غلظت‌های مختلفی از محلول آب و الکل و همچنین آب و گلوکز به‌نمونه حسگر اعمال و ضریب حساسیت و قدرت تفکیک حسگر محاسبه شد. مقدار میانگین حساسیت فاز در آزمون آب-الکل $0/4266 \text{ degree}/\% \text{ gr/ml}$ و برای آزمون آب-گلوکز برابر $1/4765 \text{ degree}/\% \text{ gr/ml}$ به‌دست آمده است. همچنین قدرت تفکیک در آزمون آب-الکل برابر $0/49 \text{ } \% \text{ gr/ml}$ و در آزمون آب-گلوکز برابر $0/14 \text{ } \% \text{ gr/ml}$ اندازه‌گیری شد.

مرجع‌ها

[1] A. Abbas, M.J. Linman, Q. Cheng, New trends in instrumental design for surface plasmon resonance-based biosensors, *Biosensor and Bioelectronics* 26 (2011) 1815–1824.

[2] J. Homola, Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species, *Chemical Reviews* 108 (2008) 462–493.

[3] A.V. Kabashin, S. Patskovsky, A.N. Grigorenko, Phase and amplitude sensitivities in surface plasmon resonance bio and chemical sensing, *Optics Express* 17 (2000) 21191–21204.

[4] Y. Huang, H. Ho, S. Wu, S. Kong, Detecting phase shifts in surface plasmon resonance: A review, *Advances in Optical Technologies*, 471957 (2012) 1–12.