بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

حسگر تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر مدولاسیون فازی با استفاده از روش تصویربرداری تداخلی

راضیه سادات منور[۱]،عزالدین مهاجرانی[۱]،محمد محمدی مسعودی[۲]،حسین مهرزاد[۱]
[۱]آزمایشگاه فوتونیک مواد آلی و پلیمرها، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[۲] آزمایشگاه نانوبیوفوتونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله، یک حسگر تداخل سنج تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر مدولاسیون فازی طراحی شده است. تداخل فازی دو قطبش s و p ، به ترتیب به عنوان قطبش کاوشگر و قطبش مرجع، مبنای چیدمان اپتیکی در این کار است. تغییرات فازی در بازتاب از سطح فلزات در شرایط تشدید پلاسمونیکی مبنای تغییرات ضریب شکست ماده دی الکتریک است. برای ماده دی الکتریک از محلول ترکیب آب و اتانول در غلظت های مختلف، استفاده شده است. از مزایای این روش می‌توان به حساسیت بالا و عدم نیاز به موتورهای جابجاگر مکانیکی و طیف سنج اشاره کرد.

کلید واژه- پلاسمونیک، تداخل‌سنج، تشدید پلاسمون سطحی

Surface plasmon resonance sensor based on phase modulation using interference imaging method

Razieh Sadat Monavar[۱], Ezeddin Mohajerani[۱], Mohammad Mohammadimasoudi[۲], Hossein Mehrzad[۱]
[۱]POMP Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[۲]Nano-bio-photonics Laboratory, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: e-mohajerani@sbu.ac.ir

Abstract- In this paper, a surface plasmon resonance (SPR) interferometer sensor is designed based on phase modulation. Phase interfereometery between s and p polarizations, as a probe and reference, is the basise of this optical set up. This sensor is able to detect interference phase shifts due to refractive index changes. This system is considered as a high sensitivity refractive index sensor, which is cheap and does not require a mechanical rotation stage or spectrometer.

Keywords: Plasmonic, Interferometer, Surface Plasmon Resonance

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

پلاسمونیک، مطالعه برهمکنش بین میدان الکترومغناطیسی و الکترون‌های آزاد در فلزات، به خاطر کاربردهای فراوان حائز اهمیت است. از جمله کاربردهای آن می‌توان حسگری شیمیایی، زیستی، سلول‌های خورشیدی، تصویربرداری با وضوح بالا را نام برد. همچنین خواص اپتیکی شگفت انگیز نانو ساختارهای فلزی از جمله جذب، پراکندگی و افزایش میدان محلی مورد توجه تحقیقات زیادی قرار گرفته است. پلاسمون‌های سطحی که نوسان گروهی الکترون‌های رسانش در مرز بین مواد با گذردهی الکتریکی مثبت و منفی، معمولاً یک دی‌الکتریک و فلز، به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: دسته اول پلاسمون‌های پلاریتون سطحی یا پلاسمون‌های سطحی انتشاری و دسته دوم پلاسمون‌های سطحی جایگزیده، پلاسمون‌های سطحی که اطراف نانوذره و در یک محل نوسان می‌کنند، به عبارتی در ساختار زیر طول موج جایگزیده می‌شوند. تحریک پلاسمون‌های سطحی توسط تابش الکترومغناطیسی با فرکانسی برابر فرکانس پلاسمون‌های سطحی منجر به ایجاد تشدید پلاسمون‌های سطحی (SPR)[۱] و در مورد پلاسمون‌های سطحی جایگزیده منجر به ایجاد تشدید پلاسمون‌های سطحی جایگزیده (LSPR)[۲] می‌شوند [۱].

حسگر نوری یک ابزار جهت شناسایی و آشکارسازی کمیتی از محیط سنجش براساس ایجاد تغییرات در مشخصه‌های نور فرودی است [۲]. حسگرهای SPR اصولاً براساس هندسه بازتاب کلی تضعیف یافته ATR[۳] می‌باشند. در هندسه ATR، یک فیلم فلزی نازک روی یک سطح منشور لایه نشانی می‌شود، که محیط حسگری و منشور را از هم جدا می‌کند. در حسگرهای SPR، پلاسمون های سطحی امواج منتشر شونده در مرز مشترک بین فلز-دی الکتریک است. شرایط برانگیختگی پلاسمونیک بسیار وابسته به ضریب شکست محیط دی الکتریک است و با تغییر ضریب شکست شرایط جفت شدگی نور فرودی و پلاسمون سطحی تغییر خواهد یافت و می‌توان این تغییرات را به عنوان خروجی حسگر، آشکارسازی نمود. بر همین اساس، می‌توان حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی را بر اساس مشخصه ای از نور که با پلاسمون‌های سطحی اندرکنش می‌نماید و آشکارسازی می‌گردد، به حالت‌های زاویه ی نور فرودی، طول موج، شدت، فاز و قطبش طبقه بندی نمود.

در حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی برای بررسی تغییرات ضریب شکست به طور متداول از طیف سنج و یا موتورهای مکانیکی فوق دقیق استفاده می‌شود که البته علاوه بر گران قیمت بودن، دقت محدودی دارند. در این تحقیق، از دوربین CCD[۴] به جای طیف سنج بهره گرفته شده است، که نسبت به طیف سنج‌ها بسیار ارزان‌تر و در دسترس‌تر است. در این پژوهش اساس کار، مدولاسیون فازی ناشی از بازتاب از سطح فلز برای قطبش های s و p است. قطبش s بدون تغییر فاز از سطح فلز بازتاب می‌شود اما قطبش p دچار تغییر فاز بزرگی در شرایط تشدید پلاسمونیکی می‌شود. در تداخل قطبشی بین p و s، قطبش s به عنوان مرجع و قطبش p به عنوان قطبش پایشگر مورد استفاده قرار میگیرد.

---

[۱] - surface plasmon resonance

[۲] - localized surface plasmon resonance

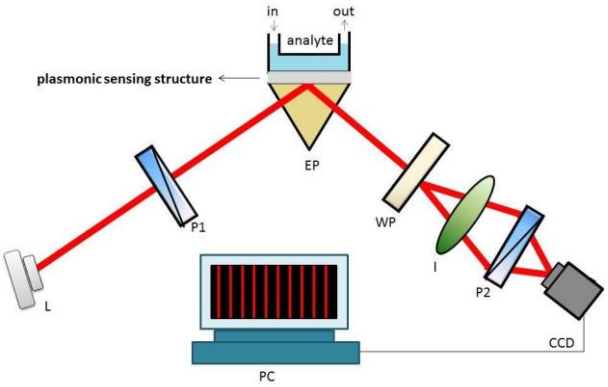
[۳] - attenuated total reflection

[۴] - colour camera detector

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

روش و نتایج آزمایشگاهی

در این تحقیق از روش تصویربرداری تداخلی مبتنی بر مدولاسیون فازی به منظور اندازه‌گیری جا به جایی فازی تشدید پلاسمون‌های سطحی در چیدمان کرشمن استفاده شده است [۳]. ابتدا یک لایه ۴۵ نانومتری از نقره توسط لایه نشانی تبخیری روی یکی از سطوح منشور لایه نشانی شد. سپس از یک کانال به عنوان مخزنی برای بررسی غلظت‌های متفاوت از محلول مورد نظر (اتانول) استفاده شد. این کانال روی سطحی از منشور که لایه نشانی انجام شده، قرار گرفته و دارای دو دهانه‌ی ورودی و خروجی برای محلول مورد نظر می‌باشد.



شکل ۱. چیدمان آزمایش: ساختار تشدید پلاسمون سطحی با بهره‌گیری از پیکربندی کرشمن؛ لیزر (L)، لنز (l)، پلاریزور (P)، منشور متساوی‌الاضلاع (EP)، منشور والستون (WP)، دوربین (CCD)، رایانه (PC)

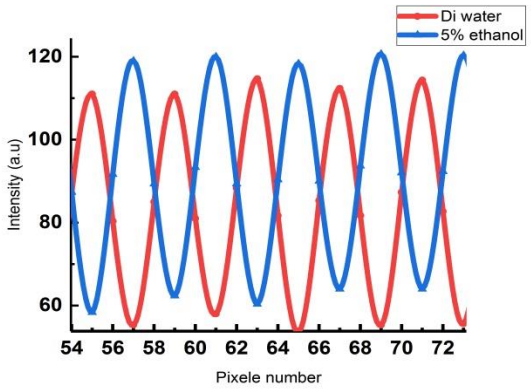


شکل۲. نمونه از فرانژهای تداخلی واقعی

همینطور که در شکل۱ مشاهده می‌شود، تغییر فاز در اثر پلاسمونیک ایجاد شده در نقره لایه نشانی شده روی سطح منشور اتفاق می‌افتد. در این چیدمان، پرتو لیزر هلیوم-نئون از پلاریزور P۱ با زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه فرودی عبور کرده و بدین ترتیب مؤلفه های قطبیده S و P تولید می‌شوند. سپس مؤلفه های قطبیده شده از ساختار تشدید پلاسمون سطحی بازتاب می‌شوند. حال این پرتو بازتاب شده از منشور والستون عبور کرده و سپس تداخل مؤلفه های S و P قطبیده شده توسط یک لنز به دست آمده، و از پلاریزور P۲ با زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه فرودی عبور می‌کند. در انتها این تصویر تداخلی توسط دوربین CCD به دست آمده و روی رایانه ثبت می‌شود. شدت I(x) پرتو تداخلی به عنوان تابعی از مختصات x به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۴]:

$$I(x) = Ip + Is + 2\sqrt{Ip\,Is}\ \cos(2\pi\,\upsilon x\ x + \delta\Delta ps)$$

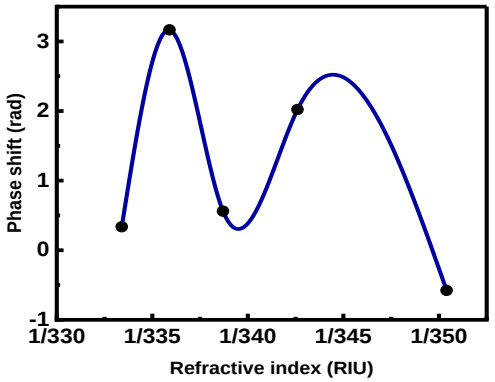
که در این رابطه Ip و Is توزیع شدتی امواج قطبیده شده S و P هستند و $\Delta\delta ps = \delta p - \delta s$ اختلاف فاز بین آن‌هاست [۵].



شکل۳. شدت‌های تداخلی دو محلول: ۵٪ اتانول محلول در آب و آب مقطر

در این آزمایش جابه‌جایی فازی فرانژهای تداخلی برای آب مقطر و پنج درصد اتانول محلول در آب، ده درصد اتانول محلول در آب، بیست درصد اتانول محلول در آب و سی درصد اتانول محلول در آب نسبت به جابه‌جایی فازی فرانژهای تداخلی هوا به عنوان محیط مرجع مورد بررسی قرار گرفت.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



شکل۴. جابه‌جایی فازی فرانژهای تداخلی برحسب تابعی از ضرایب شکست غلظت‌های مختلف اتانول محلول در آب

در شکل۴ جابه‌جایی فازی فرانژهای تداخلی به عنوان تابعی از ضریب شکست غلظت‌های متفاوت محلول اتانول در آب نشان داده شده است. به عبارتی وابستگی محلول به ضریب شکست بررسی شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده می‌باشد، بزرگترین جابه‌جایی فازی مربوط به غلظت سی درصد اتانول محلول در آب می‌باشد. این پاسخ غیرخطی در این شکل بیان**گر** تغییر حساسیت حسگر به ازای غلظت‌های متفاوت از محلول اتانول در آب می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، تصویربرداری تداخلی با بهره‌گیری از مدولاسیون فازی برای اندازه‌گیری شیفت فازی فرانژهای تداخلی مبتنی بر پدیده تشدید پلاسمون سطحی در چیدمان کرشمن انجام شد. این تداخل سنج شامل یک لیزر ۶۳۲/۵ نانومتر، ساختار حسگری تشدید پلاسمون سطحی که مؤلفه‌های S و P قطبیده شده نور لیزر توسط پلاریزور، از سطح آن بازتاب شده و سپس توسط منشور والستون از هم جدا می‌شوند. در ادامه با بکارگیری یک پلاریزور و لنز دو مؤلفه جدا شده با یکدیگر ترکیب شده و تداخل آن‌ها روی دوربین CCD قابل رؤیت می‌باشد. درنتیجه این پژوهش، مشاهده شد تغییرات ضریب شکست محلول حسگری شده با جابه‌جایی فازی فرانژهای تداخلی همراه است. همچنین با بررسی جابه‌جایی فرانژهای فازی تداخلی مشاهده شد، حساسیت این حسگر وابسته به ضریب شکست غلظت‌های متفاوت از اتانول محلول در آب می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد، تداخل سنج تشدید پلاسمون‌های سطحی با تشخیص جابه‌جایی فازی فرانژهای تداخلی به طور ویژه در اندازه‌گیری‌هایی که نیازمند به بررسی تغییرات ضریب شکست با حساسیت بالا می‌باشند، بسیار مفید و کاربردی است. همچنین به علت استفاده از دوربین CCD به جای طیف سنج، این روش حسگری، روشی بسیار ارزان‌تر و دارای حساسیت بالاتری برای حسگری تغییرات ضریب شکست محلول‌های متفاوت می‌باشد.

مرجع‌ها

[۱] حبیبی مقدم، فاطمه، مهرزاد، حسین، شیرکوند، افشان، مهاجرانی، عزالدین، محمدی‌مسعودی، محمد، ابرجاذب پلاسمونیک مرئی برپایه نانوجزیره نقره با قابلیت کاربرد زیست حسگری، لیزر در پزشکی، ۱۳۹۸.

[۲] نیک‌نیازی، آرش، بررسی تجربی حسگرهای زیستی براساس تشدید پلاسمون سطحی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴.

[۳] E. Kretschmann, H. Raether, "Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light", Z. Naturforschung, Vol. ۲۳, No. ۱۲, pp. ۲۱۳۵-۲۱۳۶, ۱۹۶۸.

[٤] Yu. X. Ding, X. Liu, F. Wei, X. Wang, D. "A surface plasmon resonance interferometer based on spatial phase modulation for protein array detection", Meas. Sci. Technol, Vol. ۱۹, No. ۱, pp. ۰۱۵۳۰۱, ۲۰۰۷.

[٥] R. Kaňok, D. Ciprian, P. Hlubina, "Plasmon Resonance-Based Sensing Utilizing Spatial Phase Modulation in an Imaging Interferometer", sensors, Vol. ۲۰, No. ٦, pp. ١٦١٦, ۲۰۲۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]