



لیگ
پژوهشی
فوتونیک
و مهندسی

بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



اثر لایه فلزی نازک بر حساسیت سنجش ضریب شکست در روش‌های مبتنی بر بازتاب داخلی کلی

هایده خلیلی دیزجی^۱، صمد روشن انتظار^۲ و آرزو رشیدی^۳

^۱اداره آموزش و پرورش ناحیه ۵ تبریز، تبریز

^۲دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده - در این مقاله حساسیت سنجش ضریب شکست توسط منشورهایی با اندود فلزی در حسگرهای نوری حساس به فاز مبتنی بر بازتاب داخلی کلی بررسی شده است. نشان داده شده است که تغییرات اختلاف فاز بین دو موج بازتابیده قطبیده s و p با ضریب شکست ماده آزمون در حالت منشور با اندود فلزی خیلی بیشتر از حالت بدون اندود فلزی است. دلیل این مسئله تحریک پلاسمونهای سطحی در فصل مشترک ماده آزمون و لایه نازک است. با توجه به اینکه با سنجش این اختلاف فاز توسط تداخل سنج شیفت فازی می‌توان ضریب شکست ماده تحت آزمون را سنجید در نتیجه سنجش ضریب شکست توسط منشورهایی با اندود فلزی از حساسیت بالاتری برخوردار خواهد بود.

کلید واژه - پلاسمونهای سطحی، منشور، لایه فلزی نازک، حساسیت سنجش ضریب شکست، بازتاب داخلی کلی

The Effect of a Thin metal Layer on the Sensitivity of Refractive Index Measurement by Methods Based on the Total Internal Reflection

Haydeh Khalili Dezaji¹, Samad Roshan Entezar², and Arezou Rashidi²

¹Department of education, Area 5 of Tabriz, Tabriz

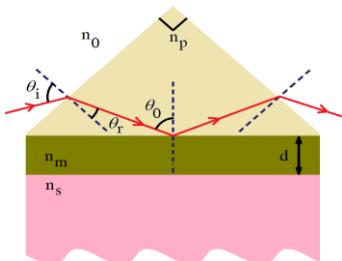
²Department of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper, the sensitivity of refractive index measurement using prisms with the metal coating in the phase sensitive optical sensors which operate based on the total internal reflection, has been investigated. It has been shown that the variations of phase difference between two p-polarized and s-polarized reflected waves with the refractive index of the test material in the case of the prism with a metal coating is higher than that of the non-metallic coating. This is due to the excitation of surface plasmons at the interface between the test material and the thin metal layer. Since, one can obtain the refractive index of a test material by measuring this phase difference with the phase-shifting interferometer, the refractive index measurement using the prisms with metal coating has higher sensitivity.

Keywords: Surface Plasmons, Prism, Thin metal layer, Sensitivity of Refractive Index Measurement, Total Internal Reflection

۱- مقدمه

گیری می کنند. در این سیستم ها با اندودن قاعده منشور به کار رفته در حسگر می توان شرایط تحریک پلاسمون های سطحی را برای مولفه قطبیده مغناطیسی عرضی مسی کرد. شکل (۱) به صورت شماتیک سیستم تحت بررسی را نشان می دهد که شامل یک منشور راست گوشه متساوی الساقین با ضریب شکست n_p است که قاعده آن با یک لایه فلزی نازک با ضریب شکست n_m و ضخامت مناسب d اندود شده است و با محیطی با ضریب شکست n_s (ماده آزمون) در تماس است.



شکل ۱: سیستم تحت ملاحظه که یک منشور راست گوشه متساوی الساقین با ضریب شکست n_p است و قاعده آن با یک لایه فلزی نازک با ضریب شکست n_m و ضخامت مناسب d اندود شده است و با محیطی با ضریب شکست n_s در تماس است.

در اینجا فرض می کنیم که زاویه پرتوی فرودی به منشور (θ_i) چنان است که پرتوی ورودی به منشور با زاویه بزرگتر از زاویه حد به قاعده منشور برخورد می کند یعنی $\frac{n_s}{n_p} \sin^{-1} \theta_0 > \theta_0$. می توان نشان داد که دامنه بازتاب اشعه فرودی به قاعده منشور توسط عبارت زیر داده می شود:

$$r_u = \frac{\left(1 - \frac{q_u^s}{q_u^p}\right) \cos \beta - i \left(\frac{q_u^s}{q_u^m} - \frac{q_u^m}{q_u^p}\right) \sin \beta}{\left(1 + \frac{q_u^s}{q_u^p}\right) \cos \beta - i \left(\frac{q_u^s}{q_u^m} + \frac{q_u^m}{q_u^p}\right) \sin \beta} = |r_u| e^{j\phi_u} \quad (1)$$

که در آن u به ترتیب برای قطبش s و p عبارت است از

$$q_s^j = n_j \sqrt{1 - \frac{n_p^j}{n_j^2} \sin^2 \theta_0}, \quad (j = m, p, s), \quad u = s, p$$

$$\beta = \frac{2\pi d \sqrt{n_m^2 - n_p^2 \sin^2 \theta_0}}{\lambda}, \quad q_p^j = \sqrt{1 - \frac{n_p^j}{n_j^2} \sin^2 \theta_0}$$

حسگر نوری ابزاری است که پرتوهای نوری را به سیگنال های الکتریکی تبدیل می کند. از ویژگی های حسگر نوری توانایی آن برای اندازه گیری تغییرات ناشی از شدت نور یا فاز آن می باشد. از جمله مزایای حسگرهای نوری می توان به حساسیت بیشتر، انفعال الکتریکی، عدم تداخل الکترومغناطیسی، محدوده دینامیک گسترده، قابلیت های چندگانه و بهره گیری از ظرفیت فیبرهای نوری برای ارسال اشاره کرد [۱]. حساسیت حسگر بیانگر میزان تغییرات خروجی با تغییرات کمیت مورد سنجش است و دقت سنجش حسگر بیانگر کوچک ترین مقدار تغییر در کمیت مورد اندازه گیری است که توسط حسگر قابل آشکارسازی می باشد. ساینو و همکارانش یک حسگر نوری را بر پایه تداخل سنج طراحی کردند تا اندر کنیش پرتوها را در موردهای که پرتوها دستخوش بازتاب داخلی کلی از یک سطح مرزی با ضریب شکست نسبی متغیر می شدند مورد مطالعه قرار دهند [۲]. در سال ۱۹۹۹، آزمایش دقیق برای اندازه گیری جذب کوچک مبتنی بر بیضی سنجی بازتاب داخلی تضعیف شده بین زاویه بروستر و حد پیشنهاد کرد [۳]. در سال ۲۰۰۳ پوکسینسکی و آروین، بیضی سنجی بازتاب داخلی کلی را به کار گرفتند [۴]. در سال ۲۰۰۴ آروین و همکارانش ایده دیگری برای تکنیک اندازه گیری مبتنی بر بیضی سنجی بازتاب داخلی کلی ارائه دادند و با اثر تشدید پلاسمون های سطحی تلفیق کردند [۵]. در جولای ۲۰۰۶ جیان و همکارانش، روشی برای اندازه گیری توزیع دو بعدی ضریب شکست توسط بازتاب داخلی کلی نور قطبیده p و تداخل سنجی شیفت فازی ارائه دادند [۶]. در اغلب آرایش های تجربی به کار رفته از یک منشور برای ایجاد شرایط بازتاب داخلی کلی استفاده می شود. در این کار می خواهیم بینیم با اندودن قاعده منشور توسط یک لایه فلزی نازک با ضخامت مناسب آیا امکان دارد حساسیت سنجش ضریب شکست در روش های ذکر شده را بالا برد.

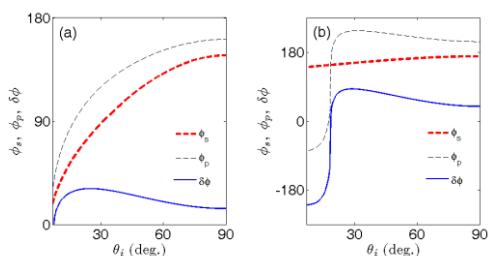
۲- تئوری و روش محاسباتی

برخی از حسگرهای نوری حاوی یک منشور هستند که تحت شرایط بازتاب داخلی عمل کرده و اختلاف فاز بین دو مولفه قطبیده الکتریکی و مغناطیسی عرضی را اندازه

نشان داد که پلاسمونهای سطحی برای نور قطبیده p در زاویه تابش زیر تحریک می‌شود.

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{n_s^2 \operatorname{Re}(n_m^2)} - \sqrt{n_s^2 n_p^2 + (n_p^2 - n_s^2) \operatorname{Re}(n_m^2)}}{\sqrt{2} \sqrt{n_s^2 + \operatorname{Re}(n_m^2)}} \right) \quad (1)$$

با قرار دادن مقادیر عددی در این رابطه، زاویه تحریک پلاسمونهای سطحی در سیستم بکار رفته عبارت می‌شود از $\theta_i = 18.43^\circ$. ملاحظه می‌شود که این زاویه با مقدار بدست آمده از شکل ۲ تطابق خیلی خوبی دارد. لذا افت شدید بازتابندگی نور قطبیده p که در شکل ۲b دیده می‌شود به دلیل تحریک پلاسمونهای سطحی در مرز فلز-دیکتریک است. تحت این شرایط انتظار داریم فاز نور بازتابیده قطبیده s نسبت به فاز نور بازتابیده قطبیده p تغییرات بسیار شدید تری را حول زاویه تابش $\theta_i = 18.49^\circ$ نشان دهد. برای نشان دادن این مطلب تغییرات فاز نور قطبیده s و p را در دو حالت منشور با و بی‌اندود فلزی بر حسب زاویه تابش در شکل ۳ رسم می‌کنیم. با توجه به شکل ۳a ملاحظه می‌شود که در منشور بدون انود فلزی زوایای فاز ϕ_s و ϕ_p دارای تغییرات نسبتاً ملایمی هستند و اختلاف فاز آنها $\delta\phi = \phi_s - \phi_p$ در زاویه تابش $\theta_i = 23.35^\circ$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد و سپس به صورت ملایمی کاهش می‌یابد.



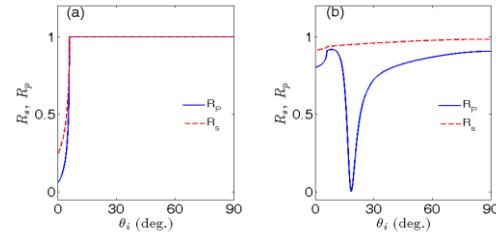
شکل ۳: زاویه فاز ϕ_s (منحنی های خط چین نازک)، زاویه فاز ϕ_p (منحنی های خط چین ضخیم) و اختلاف فاز $\delta\phi = \phi_s - \phi_p$ (منحنی های پر) بر حسب زاویه تابش θ_i ، (a) برای منشور بدون انود و (b) برای منشور با انود فلزی با مشخصه های در شکل ۲.

با این حال در منشور با انود فلزی (شکل ۳b) ملاحظه می‌شود که زاویه فاز ϕ_s تقریباً با تغییرات زاویه تابش بی‌تغییر می‌ماند ولی زاویه فاز ϕ_p تغییرات بسیار تندی را مخصوصاً حول زاویه تابش $\theta_i = 18.49^\circ$ نشان می‌دهد (

$$\lambda = \frac{\pi}{4} + \sin^{-1} \frac{\sin(\theta_i)}{n_p}$$

رفته است و ϕ_u فاز دامنه بازتاب است. رابطه (۱) با $d = 0$ دامنه بازتاب را برای حالت منشور بدون انود فلزی بدست می‌دهد.

۳- بحث و بررسی



شکل ۲: بازتابندگی های R_s, R_p بر حسب زاویه تابش θ_i (a) برای منشور بدون انود و (b) برای منشور با انود فلزی با مشخصه های $n_m = 0.16 + i3.215$ ، $n_s = 1.33$ ، $n_p = 1.7786$ و $\lambda = 632.8 nm$ و $d = 50 nm$

در ادامه ما از رابطه (۱) استفاده کرده و اختلاف فاز دواشه قطبیده s و p بازتابیده از قاعده منشور را در دو حالت با انود و بی‌انود فلزی بدست می‌آوریم. بدین منظور ابتدا در شکل ۲ بازتابندگی های R_s, R_p بر حسب زاویه تابش θ_i (a) برای منشور بدون انود و (b) برای منشور با انود فلزی (از جنس نقره با مشخصه های $n_m = 0.16 + i3.215$ ، $n_s = 1.33$ ، $n_p = 1.7786$ و $\lambda = 632.8 nm$ و $d = 50 nm$) رسم می‌کیم. با توجه به شکل ۲ ملاحظه می‌شود که تحت شرایط بازتاب داخلی کلی ($\theta_0 > 48.39^\circ$ یا $\theta_i > 6.05^\circ$ یا $\theta_i = 18.49^\circ$) بازتابندگی در حالت منشور بدون انود فلزی برای هر دو قطبیس برابر واحد می‌شود (شکل ۲a). در حالیکه در حالت منشور با انود فلزی بازتابندگی قطبیس s دارای مقداری کمتر از واحد است ولی تغییرات آن با زاویه تابش چندان شدید نیست. با این حال بازتابندگی قطبیس p افت بسیار شدیدی را حول زاویه تابش $\theta_i = 18.49^\circ$ نشان می‌دهد و تقریباً به صفر می‌رسد (شکل ۲b). به نظر می‌رسد این افت شدید در بازتابندگی نور قطبیده p به دلیل تحریک شدن پلاسمونهای سطحی در مرز فلز-دیکتریک می‌باشد. برای بررسی این موضوع زاویه تحریک پلاسمونهای سطحی را در سیستم بکار رفته در شکل ۱ محاسبه می‌کنیم. با توجه به مراجع [۸] و [۷] می‌توان

شکست ماده آزمون (n_s) در شکل ۵ رسم شده است. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که به ازای تغییرات ۰.۰۲ در ضریب شکست ماده آزمون، در زاویه تابش $\theta_i = 15.5^\circ$ اختلاف فاز $\delta\phi$ در حالت منشور بدون انود فلزی حداقل ۳ درجه و در حالت منشور با انود فلزی به دلیل تحریک پلاسمونهای سطحی حدود ۲۷ درجه تغییر می‌کند. لذا سنجش اختلاف فاز در روش هایی مانند تداخل سنج شیفت فازی با استفاده از منشور هایی با انود فلزی می‌تواند تغییرات ضریب شکست کوچکتری را معین کند. از این رو حساسیت سنجش ضریب شکست در این حالت نسبت به منشور فاقد انود فلزی بالاتر خواهد بود.

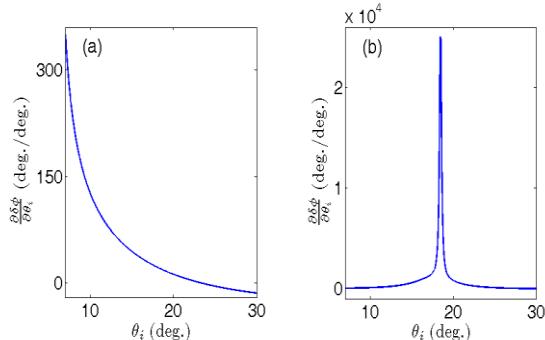
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر یک لایه فلزی بر حساسیت سنجش ضریب شکست در حسگرهای اپتیکی مبتنی بر اندازه گیری اختلاف فاز بین دو مولفه قطبیده s و p منعکسه از یک منشور بررسی شد. نشان داده شد که در اثر تحریک پلاسمونهای سطحی اختلاف فاز بین این دو مولفه در منشور انود شده با یک لایه فلزی با ضخامت مناسب تابع بسیار حساسی از ضریب شکست محیط در تماس با منشور است. لذا از این حساسیت بسیار بالا می‌توان برای اندازه گیری بسیار دقیقتر ضریب شکست استفاده کرد.

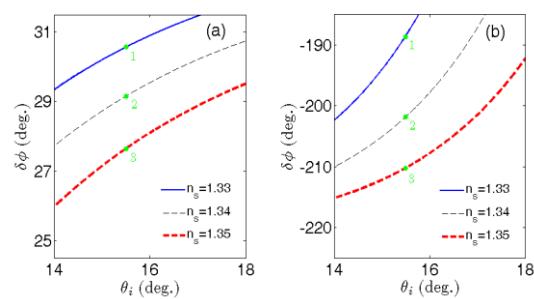
مراجع

- [1] Birlo L., Alberto N., Pinto J.L., Nogueira R., *Optical Sensors Based on Plastic Fibers*, *phys. Rev. Lett.*, 12 (2012) 12184-12207.
- [2] Sainov S., Sainov V., Stoilov G., *Interferometer based on total internal reflection*, *Appl. Opt.*, 34 (1995) 2848.
- [3] Azzam R.M.A., *Differential reflectionphase shift under conditions of attenuated internal reflection*, *J. Opt. Soc. Am. A* 16 (1999) 1700-1702.
- [4] Poksinski M., Arwin H., *In situ monitoring of metal surfaces exposed to milk using total internal reflection ellipsometry*, *Sens. Actuator B* 94 (2003) 247.
- [5] Arwin H., Poksinski M., Johansen K., *Total internal reflection ellipsometry: principles and applications*, *Appl. Opt.* 43 (2004) 3028.
- [6] Jian Z.C., Hsieh P.J., Chen H.W., Su D.C., *A method for measuring two-dimensional refractive index distribution with the total internal reflection of p-polarized light and the phase-shifting interferometry*, *Opt. Commun.* 268 (2006) 23.
- [7] Ruppin R., *Surface polaritons of a left-handed medium*, *Phys. Lett. A* 277 (2000) 61–64.
- [8] Homola J., *Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species*, *Chem. Rev.* 108 (2008) 462-493.

همان‌گونه که پیشتر گفته شد این تغییرات سریع به دلیل تحریک شدن پلاسمونهای سطحی در ساختار است.



شکل ۴: منحنی تغییرات $\frac{\partial \delta\phi}{\partial \theta_i}$ بر حسب زاویه تابش θ_i . (a) برای منشور بدون انود و (b) برای منشور با انود فلزی با مشخصه‌های به کار رفته در شکل ۲.



شکل ۵: منحنی تغییرات اختلاف فاز $\delta\phi = \phi_p - \phi_s$ بر حسب زاویه تابش θ_i . (a) برای منشور بدون انود و (b) برای منشور با انود فلزی برای سه مقدار مختلف ضریب شکست n_s محیط دی الکتریک. در اینجا سایر مشخصه‌های به کار رفته مانند شکل ۲ است.

در نتیجه اختلاف فاز باریکه‌های قطبیده s و p منعکسه از قاعده منشور با انود فلزی نیز حول این زاویه تابش دارای تغییرات سریع می‌باشد. برای نشان دادن این تغییرات سریع در شکل ۱۱-۳ منحنی تغییرات شبیه اختلاف فاز ($\frac{\partial \delta\phi}{\partial \theta_i}$) بر حسب زاویه تابش در هر دو حالت منشور بدون و با انود فلزی رسم شده است. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود در حالت منشور با انود فلزی اختلاف فاز $\delta\phi$ تابع بسیار حساسی از زاویه تابش مخصوصاً حول زاویه تحریک پلاسمونهای سطحی است. لذا از این خاصیت می‌توان برای سنجش بسیار دقیقتر ضریب شکست n_s محیط دی الکتریک استفاده کرد. برای نشان دادن این مطلب منحنی تغییرات $\delta\phi$ به صورت تابعی از زاویه تابش θ_i برای سه مقدار مختلف ضریب