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[۲]

[۱]اداره آموزش و پرورش ناحیه ۵ تبریز، تبریز

[۲]دانشکده 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 می توان 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 Dezaji[1], Samad Roshan Entezar[2], and Arezou Rashidi[2]

[1]Department of education, Area 5 of Tabriz, Tabriz

[2]Department 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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

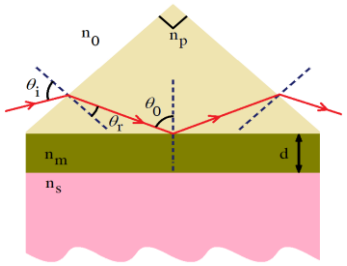
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

حسگر نوری ابزاری است که پرتوهای نوری را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. از ویژگی‌های حسگر نوری توانایی آن برای اندازه‌گیری تغییرات ناشی از شدت نور یا فاز آن می‌باشند. از جمله مزایای حسگرهای نوری می‌توان به حساسیت بیشتر، انفعال الکتریکی، عدم تداخل الکترومغناطیسی، محدوده‌ی دینامیک گسترده، قابلیت‌های چندگانه و بهره‌گیری 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 کوچک‌ترین مقدار تغییر در کمیت مورد اندازه‌گیری است که توسط حسگر قابل آشکارسازی می‌باشد. ساینو و همکارانش یک حسگر نوری را بر پایه تداخل سنج طراحی کردند تا اندرکنش پرتوها را در موردی که پرتوها دستخوش بازتاب داخلی کلی از یک سطح مرزی با ضریب شکست نسبی متغیر می‌شدند مورد مطالعه قرار دهند [۲]. در سال ۱۹۹۹، آزام روشی دقیق برای اندازه‌گیری جذب کوچک مبتنی بر بیضی‌سنجی بازتاب داخلی تضعیف‌شده بین زاویه‌ی بروستر و حد پیشنهاد کرد[۳]. در سال ۲۰۰۳ پوکسینسکی و آروین، بیضی‌سنجی بازتاب داخلی کلی را به‌کار گرفتند [۴]. در سال ۲۰۰۴ آروین و همکارانش ایده‌ی دیگری برای تکنیک اندازه‌گیری مبتنی بر بیضی-سنجی بازتاب داخلی کلی ارائه دادند و با اثر تشدید پلاسمون‌های سطحی تلفیق کردند [۵]. در جولای ۲۰۰۶ جیان و همکارانش، روشی برای اندازه‌گیری توزیع دوبعدی ضریب شکست توسط بازتاب داخلی کلی نور قطبیده‌ی p و تداخل‌سنجی 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 خواهییم ببینیم با اندودن قاعده منشور توسط یک لایه فلزی نازک با ضخامت مناسب آیا امکان دارد حساسیت سنجش ضریب شکست در روشهای 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 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 محیا کرد. شکل (۱) به صورت شماتیک سیستم تحت بررسی را نشان می دهدکه 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 $\theta_0 > \sin^{-1}\frac{n_s}{n_p}$. می توان نشان داد که دامنه بازتاب اشعه فرودی به قاعده منشور توسط عبارت زیر داده می شود:

$$r_u = \frac{\left(1-\frac{q_u^s}{q_u^p}\right)\cos\beta - i\left(\frac{q_u^s}{q_u^m}-\frac{q_u^m}{q_u^p}\right)\sin\beta}{\left(1+\frac{q_u^s}{q_u^p}\right)\cos\beta - i\left(\frac{q_u^s}{q_u^m}+\frac{q_u^m}{q_u^p}\right)\sin\beta} = |r_u|e^{\phi_u} \quad (۱)$$

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

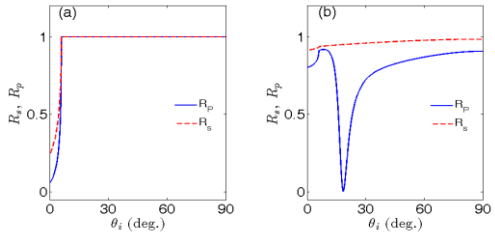
$$،q_s^j = n_j\sqrt{1-\frac{n_p^j}{n_j^2}\sin\theta_0}, \qquad (j=m,p,s) \quad ،u=s,p$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$\theta_0 = \frac{\pi}{4} + \sin^{-1}\frac{\sin(\theta_i)}{n_p}$، λ طول موج اشعه بکار رفته است و ϕ_u فاز دامنه بازتاب است. رابطه (۱) با $d = 0$ دامنه بازتاب را برای حالت منشور بدون اندود فلزی بدست می دهد.

۳- بحث و بررسی

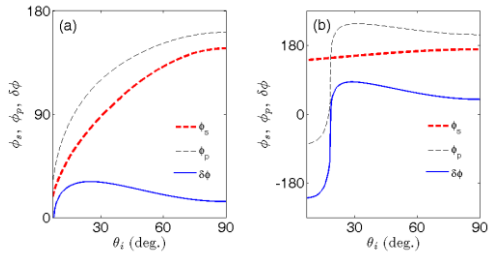


شکل ۲: بازتابندگی های R_s, R_p بر حسب زاویه تابش θ_i a) برای منشور بدون اندود و b) برای منشور با اندود فلزی با مشخصه های $n_p = 1.7786$، $n_s = 1.33$، $n_m = 0.16 + i3.215$، $d = 50nm$ و $\lambda = 632.8nm$.

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

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{n_s^2\,\mathrm{Re}(n_m^2)} - \sqrt{n_s^2 n_p^2 + (n_p^2 - n_s^2)\mathrm{Re}(n_m^2)}}{\sqrt{2}\sqrt{n_s^2 + \mathrm{Re}(n_m^2)}}\right) \quad (۱)$$

با قرار دادن مقادیر عددی در این رابطه، زاویه تحریک پلاسمونهای سطحی در سیستم بکار رفته عبارت می شود از $\theta_i = 18.43^\circ$. ملاحظه می شود که این زاویه با مقدار بدست آمده از شکل ۲ تطابق خیلی خوبی دارد. لذا افت شدید بازتابندگی نور قطبیده p که در شکل۲b دیده می شود به دلیل تحریک پلاسمونهای سطحی در مرز فلز-دی الکتریک است. تحت این شرایط انتظار داریم فاز نور بازتابیده قطبیده p نسبت به فاز نور بازتابیده قطبیده s 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 بی اندود فلزی برحسب زاویه تابش در شکل ۳ رسم می کنیم. با توجه به شکل ۳a ملاحظه می شود که در منشور بدون اندود 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 می رسد و سپس به صورت ملایمی کاهش می یابد.

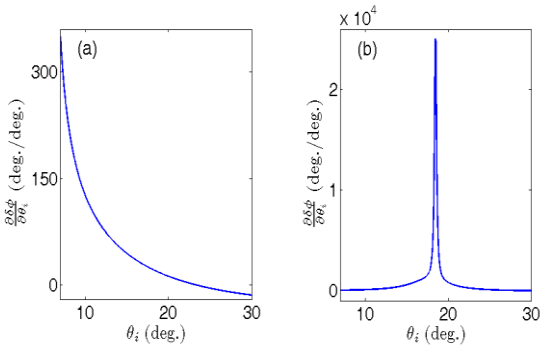


شکل۳: زاویه فاز ϕ_s (منحنی های خط چین نازک)، زاویه فاز ϕ_p (منحنی های خط چین ضخیم) و اختلاف فاز $\delta\phi = \phi_s - \phi_p$ (منحنی های پر) بر حسب زاویه تابش θ_i، a) برای منشور بدون اندود و b) برای منشور با اندود فلزی با مشخصه های به کار رفته در شکل ۲.

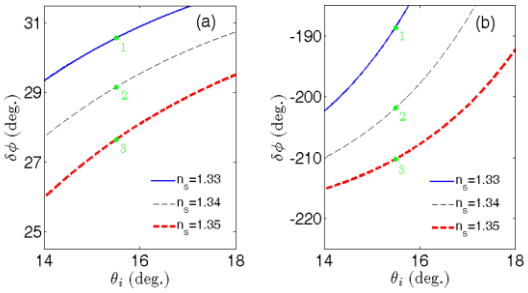
با این حال در منشور با اندود فلزی (شکل ۳b) ملاحظه می شود که زاویه فاز ϕ_s تقریباً با تغییرات زاویه تابش بی تغییر می ماند ولی زوایه فاز ϕ_p تغییرات بسیار تندی را مخصوصاً حول زاویه تابش $\theta_i = 18.49^\circ$ نشان می دهد (

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

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



شکل۴: منحنی تغییرات $\frac{\partial\delta\phi}{\partial\theta_i}$ بر حسب زاویه تابش θ_i، a) برای منشور بدون اندود و b) برای منشور با اندود فلزی با مشخصه های به کار رفته در شکل ۲.



شکل۵: منحنی تغییرات اختلاف فاز $\delta\phi = \phi_s - \phi_p$ بر حسب زاویه تابش θ_i، a) برای منشور بدون اندود و b) برای منشور با اندود فلزی برای سه مقدار مختلف ضریب شکست n_s محیط دی الکتریک. در اینجا سایر مشخصه های به کار رفته مانند شکل ۲ است.

در نتیجه اختلاف فاز باریکه‌های قطبیده s و p منعکسه از قاعده منشور با اندود فلزی نیز حول این زاویه تابش دارای تغییرات سریع می باشد. برای نشان دادن این تغییرات سریع در شکل ۳-۱۱ منحنی تغییرات شیب اختلاف فاز ($\frac{\partial\delta\phi}{\partial\theta_i}$) بر حسب زاویه تابش در هر دو حالت منشور بدون و با اندود فلزی رسم شده است. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می شود در حالت منشور با اندود 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 شکست ماده آزمون (n_s) در شکل ۵ رسم شده است. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که به ازای تغییرات 0.02 در ضریب شکست ماده آزمون، در زاویه تابش $\theta_i = 15.5^\circ$ اختلاف فاز $\delta\phi$ در حالت منشور بدون اندود فلزی حداکثر ۳ درجه و در حالت منشور با اندود فلزی به دلیل تحریک پلاسمونهای سطحی حدود ۲۷ درجه تغییر می کند. لذا سنجش اختلاف فاز در روش هایی مانند تداخل سنج شیفت فازی با استفاده از منشور هایی با اندود فلزی می تواند تغییرات ضریب شکست کوچکتری را معین کند. از این رو حساسیت سنجش ضریب شکست در این حالت نسبت به منشور فاقد اندود 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 قبیده 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 اندود 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. Oot. 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., Hsieh H.C., 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]