

حسگر ضریب شکست با نانوساختار تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر نوری نوع D

امین شفیعی^۱، مجید ابن علی^۲، علی اکبر ابن علی^۳

۱ کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه شهرکرد

۲ گروه برق الکترونیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۳ گروه فیزیک، دانشگاه فرهنگیان

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۳۱

چکیده:

در این مقاله، طرحی پیشنهادی برای حسگری ضریب شکست با استفاده از نانوساختار تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر نوری با سطح مقطع D-شکل ارائه شده است. در این حسگر تشدید پلاسمون سطحی به ضریب شکست محیط اطراف حساس است. با آشکار سازی طیف نور نشتی از هسته فیبر به ناحیه غلاف و محیط روی آن می توان حساسیت حسگر را ارزیابی کرد. در این حسگر، حساسیت حسگر به تغییر ضریب شکست محیط اطراف در حدود 1025 nm/RIU محاسبه شده است. علاوه بر حساسیت بالا، این حسگر دارای چند ویژگی مهم از جمله: سادگی، استحکام و کوچکی ساختار است مهمتر این که در این ساختار برانگیختگی تشدید پلاسمون سطحی به سهولت انجام می شود. این ساختار حسگر، قابل استفاده در شناسایی مواد شیمیایی و زیست مولکول ها است.

کلیدواژه:

حسگر ضریب شکست، فیبر نوری، تشدید پلاسمون سطحی، حساسیت

مقدمه

گرفته است. تشدید پلاسمون سطحی، یک مد الکترو مغناطیسی است که میدان الکتریکی نوری با قطبش TM در مرز بین یک ماده دی الکتریک و سطح فلزی با نوسان الکترون ها جفت شده و تشدید دو موج رخ می دهد، این نوع تداخل دو موج که به صورت سازنده رخ می دهد، باعث افزایش شدت میدان الکتریکی شده و می تواند در بهبود عملکرد حسگری یک حسگر نوری نقش داشته باشد [۷]. در طول موج های نوری، از فلزاتی مانند طلا و نقره برای تشدید پلاسمون سطحی استفاده می شود که البته دلیل این انتخاب، میزان تلفات کمتر در این دو فلز نسبت به فلزات دیگر است. بسیاری از فلزات در فرکانس های نوری دارای ثابت دی الکتریک منفی هستند که سبب بازتابندگی سطحی زیاد در آن ها می شود. در پژوهش های اخیر، از فیبر نوری تک مد با سطح مقطع D شکل برای حسگری ضریب شکست استفاده شده است [۸-۹]. در فیبر نوری D شکل، بخشی از غلاف فیبر در صفحه طولی جدا می شود و سطح مقطع فیبر به شکل D در می آید. بخشی از نور در غلاف فیبر به صورت میدان محوشونده به محیط اطراف در سطح غلاف برش داده شده، کوپل می شود و به بیرون نشت می کند. با استفاده از این موج محوشونده، حسگری تغییر در ضریب شکست سیال محیط خارجی که به درون شیارهای ایجاد

امروزه به دلیل تقاضا و نیاز به حسگرهای نوری به ویژه برای کاربردهای پزشکی و همچنین پیاده سازی حسگرها درون مدارات مجتمع، کوچک سازی و افزایش حساسیت حسگرها در ابعاد کوچک اهمیت بسیاری یافته است [۱-۲].

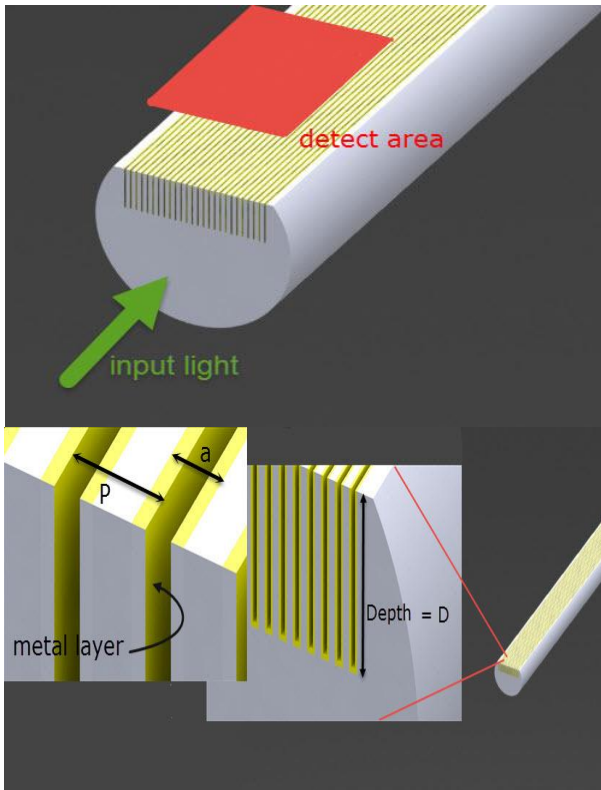
یکی از سازوکارهای حسگری در شناسایی مواد شیمیایی و زیست مولکولی و همچنین مایع ها، حسگری بر مبنای ضریب شکست (RI) است [۲]. در این راستا، حسگرهای ضریب شکست مبتنی بر فیبرهای نوری با روش هایی از قبیل تداخل سنجی و فیبر توری (گریتینگ) براگ برای پایش آلاینده های آب، شناسایی مواد شیمیایی و غیره، طراحی و ساخته شده اند [۳-۴]. همچنین در دو دهه اخیر، از تشدید پلاسمون سطحی (SPR) در توسعه حسگری نوری بدون برچسب^۴ با حساسیت زیاد، استفاده شده است [۵-۶]. تاکنون پژوهش های گسترده ای پیرامون کاربرد حسگرهای نوری مبتنی بر SPR با استفاده از ساختارها و روش های گوناگون انجام

1 Refractive Index

2 Grating

3 Surface Plasmon Resonance

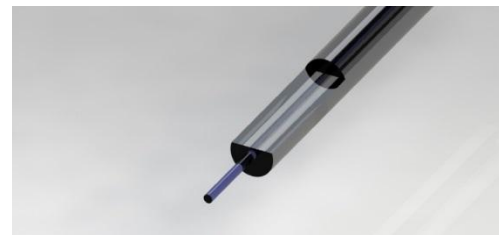
4 label-free sensing



شکل (۲): نمای سه بعدی حسگر نانو ساختار پیشنهادی.

اندازه پارامترهای هندسی ساختار انتخاب شده در شبیه‌سازی‌های مختلف بر این اساس که بیشترین افزایش شدت میدان الکتریکی را در ایجاد پلاسمون سطحی از خود نشان می‌دهند، به دست آمده- است. قطر هسته فیبر نوری $1 \mu\text{m}$ و قطر غلاف $100 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است [۷]. ضریب شکست هسته فیبر $1/447$ و ضریب شکست غلاف فیبر برابر $1/44$ در نظر گرفته شده است. شیارهای ایجاد شده در حدود 10 nm به درون هسته فیبر نفوذ می‌کنند. این روش موجب می‌شود که نشت نور عبوری به صورت میدان محو شونده از هسته فیبر به ناحیه غلاف و سطح آن، بیشتر شود، بنابراین برهم‌کنش نور با ماده مورد بررسی در سطح غلاف افزایش می‌یابد. برای بهره‌مندی از مزیت‌های SPR، دیواره‌های شیارها را با لایه‌ای از نقره به ضخامت 5 nm می‌پوشانیم تا باعث تقویت شدت میدان الکتریکی شده و افزایش حساسیت حسگر شود. پس از طراحی ساختار حسگر، به منظور بررسی حساسیت حسگر در اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست، فرض می‌کنیم سیالی با ضریب شکست مشخص درون شیارها را پر کرده است. سپس نور به درون فیبر کوپل می‌شود با آشکارسازی طیف نور نشتی محوشونده از قسمت برش خورده فیبر به محیط بیرون، حساسیت حسگر را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با تغییر ضریب شکست ماده تزریق شده در شیارها، شرایط جفت‌شدگی فازی تشدید پلاسمون سطحی تغییر می‌کند و منجر به جابجایی طول موج در طیف

شده نفوذ می‌کند انجام می‌شود. حال اگر در سطح غلاف برش داده شده لایه‌ای مانند نقره یا طلا پوشش داده شود شرایط برانگیختگی تشدید پلاسمون سطحی در مرز دی‌الکتریک و فلز پوشش داده شده فراهم می‌شود. اگر تغییری در ضریب شکست محیط پیرامون لایه فلزی رخ دهد، سبب تغییر در شرایط جفت‌شدگی فازی می‌شود. از تغییر شرایط جفت‌شدگی که باعث جابجایی طیف فرکانس می‌شود، می‌توان تغییرات ضریب شکست را آشکارسازی کرد. در شکل (۱)، طرح‌واره‌ای از فیبر نوری تک مد با سطح مقطع D شکل، نشان داده شده است. در این مقاله، از ویژگی‌های نانوساختار پلاسمونی ایجاد شده روی غلاف برش داده شده در فیبر نوری نوع D برای حسگری تغییر ضریب شکست استفاده می‌شود. ابتدا در بخش ۱، ساختار حسگر پیشنهادی اولیه ارائه خواهد شد و سپس به اجمال به بیان روش شبیه‌سازی و تئوری مسئله می‌پردازیم. سپس در بخش ۲ نتایج شبیه‌سازی‌ها و ساختار بهبود یافته، ارائه خواهد شد. در انتها نیز، نتیجه گیری بیان می‌شود.



شکل (۱): طرح‌واره‌ای از فیبر نوری تک مد با سطح مقطع D شکل.

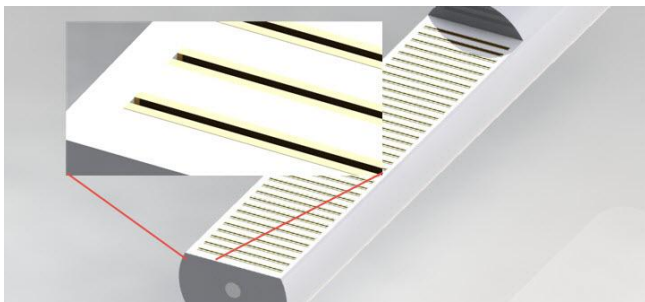
۱- ساختار حسگر پیشنهادی

نمایی سه بعدی از ساختار حسگر پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. این ساختار مبتنی بر فیبر نوری تک مد با سطح مقطع به شکل D است، با این تفاوت که به جای آن که فقط بخشی از سطح غلاف برش داده شود، روی سطح غلاف برش داده شده، شیارهایی به موازات محور فیبر ایجاد شده است. عمق شیارها (D) در حدود $1 \mu\text{m}$ و عرض آن‌ها (a)، 10 nm ، دوره شیارها (فاصله بین دو شیار متوالی، p) و نسبت دوره شیار به عرض شیار (p/a) در نظر گرفته شده است.

، بر حسب RIU به دست می آید. حساسیت ساختار حسگر، در گستره طول موج ۱۴۳۰ الی ۱۴۵۰ نانومتر به ازای تغییر ضریب شکست 1/4 الی 1/44 برابر ۳۰۰ nm/RIU محاسبه شده است. حساسیت حسگر پیشنهادی در این مقاله با وجود سادگی ساختار در مقایسه با برخی از حسگرهای نوری ضریب شکست، از جمله حسگرهای نوری مبتنی بر فیبر نوری به ویژه ساختارهای فیبر نوری نوع D، و همچنین حسگرهای نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی که دارای فرآیند ساخت پیچیده تری هستند، دارای حساسیت قابل قبولی است [۱۴-۱۲]. به عنوان نمونه، ساختار حسگر ارائه شده در مرجع [۸] که ساختاری مبتنی بر فیبر نوری نوع D است، در مقایسه با ساختار حسگر پیشنهادی در این مقاله با وجود حساسیت بیشتر، دارای پیچیدگی بسیار بیشتری است. در بخش بعد، نشان داده شده است که با اعمال تغییراتی در ساختار حسگر پیشنهادی، حساسیت حسگر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

۲-۱- بهبود ساختار حسگر

در این بخش با اعمال تغییراتی در ساختار حسگری پیشنهادی حساسیت حسگر را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهیم داد. بدین منظور تغییر ساده‌ای در ایجاد شیارها روی قسمت برش داده شده اعمال می‌کنیم، و آن این که به جای ایجاد شیارها در راستای محور فیبر، شیارها را با همان ابعاد و همان دوره در راستای عمود بر راستای محور فیبر ایجاد می‌کنیم و نتایج را بررسی می‌کنیم. نمایی از طرح جدید حسگر در شکل (۴)، نشان داده شده است. در طراحی جدید، ساختار دوره‌ای شیارها همانند توری عمل می‌کنند و موجب می‌شوند که نور نشتی از هسته فیبر به درون غلاف و شیارها پراکنده شوند. مولفه سطحی نور پراکنده شده، تکانه لازم را از ساختار دوره‌ای توری دریافت می‌کند و سبب برانگیختگی پلاسمون سطحی در سطح فلز می‌شود. از آنجا که، ابعاد توری در مقیاس نانومتر هستند، ویژگی‌های نور در این سطح از اپتیک، متفاوت از نظریه اپتیک کلاسیک است. در این حوزه جدید از تحقیقات، نور توسط ابعاد نانو ساختارها، قابل کنترل است [۶].



شکل (۴): نمایی کلی از طرح بهینه شده حسگر با شیارهای عمود بر راستای محور فیبر.

آشکار شده، می‌شود. با بررسی میزان جابجایی، می‌توان ماده مورد بررسی را شناسایی کرد.

پلاسمون‌ها فقط در مرز یک دی‌الکتریک و یک فلز برانگیخته می‌شوند که به نوع پاسخ فلز برهم کنش کننده با تابش الکترومغناطیسی بستگی دارد. در فلزات واقعی برای لحاظ کردن گذارهای بین نواری و پاسخ واقعی فلز به تابش الکترومغناطیسی، مقدار تابع دی‌الکتریک از داده‌های تجربی به دست می‌آید. به طور معمول، ضریب شکست مختلط فلز و تابع دی‌الکتریک با روابط زیر به هم مربوط می‌شوند.

$$n(\omega) = n + ik \quad (1)$$

$$\epsilon_d(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = n^2 \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، n بخش حقیقی ضریب شکست و k ثابت جذب فلز هستند. کمیت‌های اندازه‌گیری شده n و k توسط رابطه‌های زیر به بخش‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک مربوط می‌شوند.

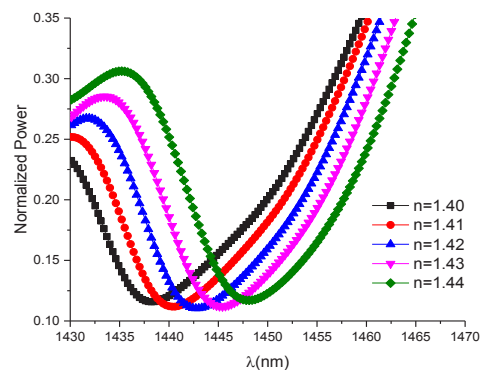
$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (3)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (4)$$

در این مقاله، از داده‌های تجربی مدل جانسون برای فلز نقره با استفاده از روش FDTD در شبیه‌سازی‌ها برای بررسی اثر پلاسمونی، استفاده شده است [۱۱-۱۰]. در بخش بعد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است.

۱-۱- نتایج شبیه‌سازی‌ها

طیف توان نشتی بر حسب طول موج به ازای تغییر ضریب شکست مختلف در گستره 1/40 الی 1/44 برای سیال‌های تزریق شده درون شیارها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): طیف‌های توان نشتی حسگر به ازای تغییر ضریب شکست در گستره ضریب شکست ۱،۴۰ الی ۱،۴۴. برای سیال تزریق شده در شیارها.

با توجه به نمودار طیف توان نشتی در در شکل (۳)، با محاسبه جابجایی طول موج به ازای تغییرات ضریب شکست سیال تزریق شده می‌توان حساسیت حسگر را به دست آورد. حساسیت حسگر با محاسبه نسبت تغییرات ضریب شکست به تغییرات طول موج، $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$

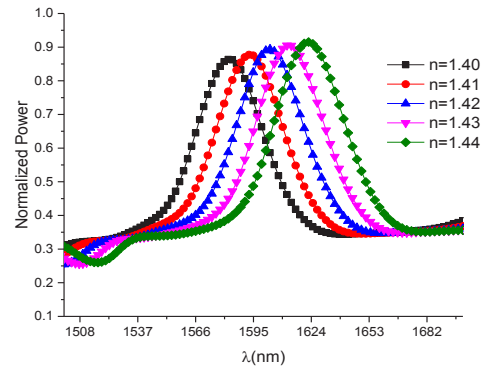
۲- نتیجه گیری

در این پژوهش یک ساختار فیبر نوری با سطح مقطع به شکل D با استفاده از ویژگی‌های پلاسمون سطحی برای حسگری ضریب شکست با حساسیت زیاد پیشنهاد شده است. دو ویژگی مهم برای این ساختار می‌توان در نظر گرفت، یکی این که روند ساخت این ساختار نسبت به نمونه حسگرهای فیبرنوری ارائه شده قبلی بسیار ساده است، ویژگی دیگر این است که اندازه و ابعاد طرح نیز خیلی کوچکتر از نمونه‌های قبلی است. نوآوری طرح حسگر در این است که برانگیختگی موج پلاسمون سطحی توسط نانو ساختارهای پلاسمونی که موجب افزایش حساسیت حسگر شده است، در مقایسه با برخی ساختارهای پلاسمونی به سهولت انجام می‌شود. به طور مثال در برخی از نمونه‌های قبلی از پیکربندی کرشتمن با استفاده از منشور برای جفت‌شدگی فوتون‌ها با پلاسمون سطحی در مرز دی‌الکتریک-فلز ایجاد می‌شود که حجیم است کمتر قابلیت فشرده‌سازی دارد. ساختار حسگر ارائه شده در این مقاله قابلیت استفاده در شناسایی مواد شیمیایی و زیست‌مولکول‌ها را دارد. همچنین کوچک بودن ابعاد حسگر باعث می‌شود که بتوانیم چندین حسگر را در یک تراشه در کنار یکدیگر مجتمع‌سازی کنیم و به طور هم‌زمان چندین ماده را مورد شناسایی قرار دهیم. در ضمن، ایده ارائه شده، به دلیل نو بودن طرح، می‌تواند الگویی برای کارهای بعدی باشد.

مرجع‌ها

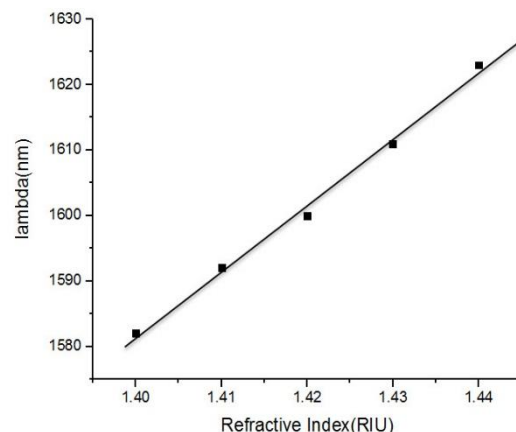
- [1] A. Mendez, "Optical Fiber Sensors for Bio-Medical Applications," in *Advanced Photonics*, OSA, (2013), doi:10.1364/SENSORS.2013.SM2D.1
- [2] X. D. Fan, I. M. White, S. I. Shopoua, H. Y. Zhu, J. D. Suter, and Y. Z. Sun, "Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review," *Analytica Chimica Acta*, 620, 8-26 (2008).
- [3] T. Allsop, R. Reeves, D. J., Webb, I. Bennion, and R. Neal, "A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach-Zehnder interferometer," *Review of Scientific Instruments* (73), 1702-1705 (2002).
- [4] H. J., Patrick, A. D. Kersey, and F., Bucholtz, "Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction," *Journal of lightwave technology* 16(9), 1606-1612 (1998).
- [5] H. H. Nguyen, J. Park, S. Kang, M. Kim., "Surface Plasmon resonance: a versatile technique for biosensor applications," *Sensors*, 15, 10481-10510 (2015).
- [6] M. Kanso, S. Cuenot, and G. Louarn, "Sensitivity of optical fiber sensor based on surface plasmon resonance: modelling and experiments," *Plasmonics*, 3(2-3), 49-57 (2008).
- [7] W. L., Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface Plasmon subwavelength optics," *Nature* 424, 824-830 (2003).

ایجاد تغییر در ساختار حسگر موجب می‌شود که نتایج متفاوتی در مقایسه با ساختار قبلی بدست آید. طیف توان نشتی برحسب طول موج به ازای تغییر ضریب شکست مختلف در گستره 1/4 الی 1/44 برای سیال‌های تزریق شده درون شیارها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): طیف‌های توان نشتی حسگر به ازای تغییر ضریب شکست در گستره ۱,۴ الی ۱,۴۴ برای سیال تزریق شده در شیارها.

مشاهده می‌شود که جابجایی طیفی به ازای تغییر ضریب شکست در طراحی جدید در مقایسه با ساختار قبلی بیشتر است. حساسیت ساختار حسگر جدید نسبت به تغییر ضریب شکست، در گستره ضریب شکست 1/4 الی 1/44 به 1025 nm/RIU افزایش یافته است که این نشان دهنده اثر تقویت بر هم کنش نور با ماده در نانو ساختارهای پلاسمونی است. با ترسیم نمودار بیشینه طول موج هر سیال برحسب ضریب شکست سیال تزریق شده در شیارها، یک نمودار خطی بین جابجایی طول موج بیشینه در طیف توان نشتی و ضریب شکست سیال ایجاد می‌شود (شکل (۶)).



شکل (۶): وابستگی خطی بیشینه طول موج به ضریب شکست سیال‌های تزریق شده در شیارها.

Near-infrared SPR Sensor at 1550 nm, "Plasmonics 8(2), 619-624 (2013).

[12] F. Hosseinibalam, S. Hassanzadeh, A. Ebnali-Heidari, and C. Karnutsch, "Design of an optofluidic biosensor using the slow-light effect in photonic crystal structures," *Appl. Opt.*, 5, 568-576, (2012).

[13] E. Chow, A. Grot, L. W. Mirkarimi, M. Sigalas, and G. Girolami, "Ultrapact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity," *Optics Letters*, 29, 10, 1093-1095, (2004).

[14] C. A. Barrios, K. B. Gylfason, B. Sánchez, A. Griol, H. Sohlström, M. Holgado and R. Casquel, "Slot-waveguide biochemical sensor," *Optics Letters*, 32, 21, 3080-3082, 2007.

[8] M.K. Pradhan, "D-Type optical fiber & its applications," *international journal of scientific & engineering research*, 952-955 (2014).

[9] G. An, S. Li, W. Qin, W. Zhang, W. Fan, Y. Bao., "High-sensitivity refractive index sensor based on D-shaped photonic crystal fiber with rectangular lattice and nanoscale gold film," *Plasmonics*, 9(6), 1355-1360 (2014).

[10] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical constants of the noble metals," *Phys. Rev. B*, 6, 4370-4379 (1972).

[11] J. Hottin, E. Wijaya, L. Hay, S. Maricot, M. Bouazaoui, and J. Vilcot, "Comparison of Gold and Silver/Gold Bimetallic Surface for Highly Sensitive

