بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۵۸۶-۱۰-A

حسگر ضریب شکست مبتنی بر فراسطح در ناحیه مادون قرمز نزدیک

عصمت جعفری[۱]، محمدعلی منصوری بیرجندی[۲] و علیرضا طاوسی[۳]

[۱و۲]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
([1]es.jafari@pgs.usb.ac.ir, [2]mansouri@ece.usb.ac.ir)

[۳]دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران (a.tavousi@velayat.ac.ir)

چکیده – در این مقاله با استفاده از شبیه سازی تفاضل محدود حوزه زمان، یک فراسطح پلاسمونیک زیرطول‌موج H شکل با حساسیت بالا برای حسگرهای ضریب شکست در طول‌موج‌های مادون قرمز نزدیک ارائه شده است. این ساختار از یک لایه نقره با آرایه‌ای از حفره‌های H شکل روی یک بستر ضخیم TiN که توسط یک لایه جدا کننده شیشه از هم جدا شده اند، ساخته شده است. لایه TiN مانع عبور نور از تشدیدگر می‌شود و این باعث می‌شود که انتقال در این ساختار تقریبا صفر شود. نتایج شبیه‌سازی مقدار حساسیت بیشتر از ۸۱۴ nm/RIU و معیار شایستگی ۴/۶۶ را ارائه می‌دهد که با حسگرهای فراسطح پیشین قابل مقایسه است و حتی از برخی از آنها عملکرد بهتری نیز دارد.

کلید واژه- پلاسمونیک، حسگر، فراسطح، نانوساختار.

Refractive index sensor based on metasurface at near-infrared region

Esmat Jafari[1], Mohamad Ali Mansouri-Birjandi[2], and Alireza Tavousi[3]

[1,2]Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran ([1]es.jafari@pgs.usb.ac.ir, [2]mansouri@ece.usb.ac.ir)

Faculty of Engineering, University of Velayat, Iranshahr, Iran (a.tavousi@velayat.ac.ir)

Abstract- In this paper using finite difference time domain simulation, a highly sensitive H-shape subwavelength plasmonic metasurface is demonstrated for refractive index sensor at near-infrared wavelengths. The structure is made up of a silver layer with H-shape hole arrays on top of a thick TiN substrate separated from each other with glass dielectric spacers. The TiN film prevents light transmission from the resonator and that makes the transmission almost zero. The simulation results show a high sensitivity up to 814 nm/RIU with a figure of merit of 4.66, which is comparable to previous metasurface sensors and even outperforms some of them.

Keywords: Metasurface, Nanostracture, Plasmonic, Sensor.

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

مقدمه

در فراماد چالش هایی وجود دارد از جمله تلفات زیاد و پاشیدگی شدید مرتبط با واکنش های رزونانس، استفاده از ساختارهای فلزی و همچنین مشکلات ساخت میکرو و نانو ساختارهای مورد نیاز سه بعدی [۱]. با این حال، می‌توان فراماد مسطح را به راحتی با استفاده از تکنولوژی‌های موجود مانند لیتوگرافی و روش‌های نانوچاپ ساخت. این فراماد مسطح، فراسطح (metasurface) نامیده می‌شوند. فراسطح ها با ضخامت زیرطول‌موج تعریف می‌شوند و در محدوده طول‌موج‌هایی از مایکروویو تا مرئی عمل می‌کنند. به طور کلی، فراسطح‌ها می‌توانند بر چالش‌های موجود در فراماد بالک غلبه کنند در حالی که برهمکنش آنها با امواج تابشی می‌تواند هنوز به اندازه کافی قوی باشد تا ویژگی‌های بسیار مفید را بدست آورند.

فراماد یا فراسطح‌ها قادر به بهبود ویژگی برهمکنش ماده-میدان در میدان رزونانس حبس شده قوی و ویژگی‌های طیفی تیز هستند که می‌تواند حساسیت حسگر را برای حسگری تقویت کند [۲-۳]. در نتیجه، کاربردهای امیدبخش زیادی با استفاده از حسگرهای فراسطح با میدان‌های نزدیک بشدت حبس شده در مودهای رزونانس، پدیدار می‌شوند. برای مثال می‌توان از آن برای تصویربرداری پزشکی، حسگرها، تجزیه بیومولکولی، و پیش‌بینی بیماری با اصلاح تغییرات طیفی استفاده کرد. ایده کلیدی پشت این نوع حسگرها، مهندسی الگوهای (معمولا فلزی) با جزییات کوچک (شکاف‌ها یا پچ‌ها) برای تولید یک غلظت میدان قوی در نقاط محلی تحت تابش منبع خارجی است. این تحدید میدان شدید، برهمکنش ماده نوری با آنالیت را افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به تغییر قوی در پاسخ طیفی می‌شود.

انواع مختلفی از ساختارهای فراسطح پلاسمونیک مانند، نانومیله‌ها، نانوکره‌ها، نانوحلقه‌ها [۴-۵] و غیره برای بررسی اثر ساختار در تعیین ضریب شکست محیط ماده مورد بررسی قرار گرفته است. معمولاً برای نتایج قابل تکرار، ساختارهای متناوب نسبت به ساختارهای نامنظم ترجیح داده می‌شوند.

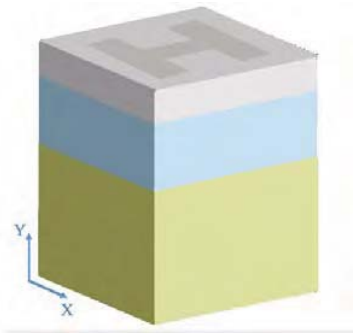
کارهای زیادی تا کنون در این زمینه انجام شده از جمله ساختار حسگر فراسطح تمام دی‌الکتریک مبتنی بر کمان شکافدار که حساسیت ۲۵۰ nm/RIU را ارائه می دهد [۶]. ساختار نانوحلقه‌های سیلیکون شکافدار مبتنی بر رزونانس فانو که حساسیت ۴۵۲ nm/RIU و معیار شایستگی (FOM) ۵۶/۵ را ارائه می‌دهد [۷]. این ساختار از لحاظ عملی قابل اجرا نیست زیرا هیچ بستری برای ساختار در نظر گرفته نشده و در شبیه‌سازی، نانوحلقه‌ها بصورت خودایستاده در فضا فرض شده است. ساختاری دیگر شامل نانودیسک‌ها دارای بیشینه حساسیت ۳۵۰ nm/RIU برای محدوده ضریب شکست ۱/۳۳ تا ۱/۴۱ است [۸]. حسگر مبتنی بر نانوحلقه‌های آلومینیوم بیشینه حساسیت ۴۰۸/۹۶ nm/RIU و معیار شایستگی ۵/۸۸ را ارائه می-دهد [۹]. همچنین حسگر نانوساختار پلاسمونیک، برای نانودیسک‌های طلا حساسیت ۳۸۱/۱۳ nm/RIU و معیار شایستگی ۱۸/۱۲ و برای نانوحفره‌های طلا حساسیت ۲۲۰/۹۱ nm/RIU و معیار شایستگی ۴/۸۱ را ارائه می-دهد [۱۰]. در این مقاله یک حسگر فراسطح H شکل طراحی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد که از حساسیت خوبی برخوردار است و در مقایسه با بسیاری از حسگرهای تاکنون طراحی شده از مقدار حساسیت بهتری برخوردار است.

طراحی و شبیه‌سازی ساختار

طرح کلی سلول واحد حسگر طراحی شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در این حسگر روی یک لایه نازک ۱۰۰ نانومتری نقره، حفره هایی به شکل H ایجاد شده

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

است. پس از آن یک لایه شیشه به ضخامت ۲۰۰ nm و در انتها نیز یک لایه ضخیم نیترید تیتانیوم به عنوان بستر قرار داده شده است. لایه نیترید تیتانیوم از عبور نور جلوگیری می‌کند و نور را دوباره به تشدیدگرهای H شکل برمی گرداند و این باعث ایجاد تشدید قوی‌تر در این ساختار می‌شود. در نتیجه برهمکنش نور و ماده قوی‌تری بدست آمده و به دنبال آن حساسیت حسگر بهبود می یابد.



شکل ۱: سلول واحد حسگر طراحی شده

نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار

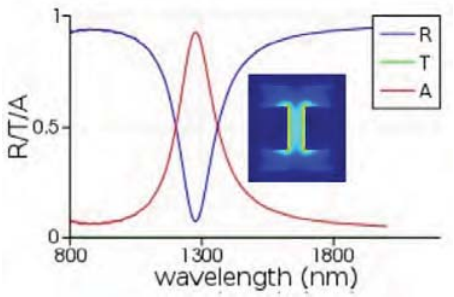
ابتدا پاسخ طیفی این حسگر در حالتی که هنوز آنالیتی روی ساختار قرار داده نشده بدست آمد. همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است به دلیل وجود بستر نیترید تیتانیوم انتقال در این ساختار تقریبا صفر است. توزیع میدان الکتریکی نیز نشان می‌دهد که در طول‌موج تشدید بیشترین تمرکز میدان در کانال میانی قرار دارد. میزان حساسیت یک حسگر را می توان از معادله (۱) بدست آورد.

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}(nm/RIU) \qquad (۱)$$

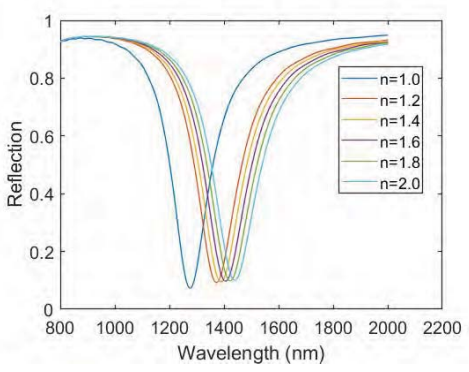
در این معادله Δn تغییر ضریب شکست محیط اطراف تشدیدگر به ازای قرار دادن آنالیت روی ساختار و Δλ تغییر طول موج تشدید بعد از اضافه کردن آنالیت را نشان می دهد. پارامتر دیگری که معمولا برای نشان دادن عملکرد یک حسگر بیان می‌شود و معیاری از میزان باریک بودن طیف است، معیار شایستگی می‌باشد. معیار شایستگی یک حسگر بصورت نسبت حساسیت به عرض کامل در نصف بیشینه (FWHM) تعریف می‌شود.

$$FOM = \frac{S}{FWHM}(RIU^{-1}) \qquad (۲)$$

حال برای بررسی قابلیت حسگری این ساختار، پاسخ طیفی آن به ازای ضریب شکست‌های مختلف محیط محاسبه شد. بیشترین مقدار حساسیت برای این ساختار برابر با ۸۱۴/۸۹ nm/RIU است که نسبت به ساختارهای ذکر شده مقدار حساسیت بهتری دارد. معیار شایستگی این حسگر نیز ۴/۶۶ بدست آمد. همچنین تغییر طول‌موج رزونانس به ازای تغییر ضریب شکست محیط نیز بصورت خطی است.

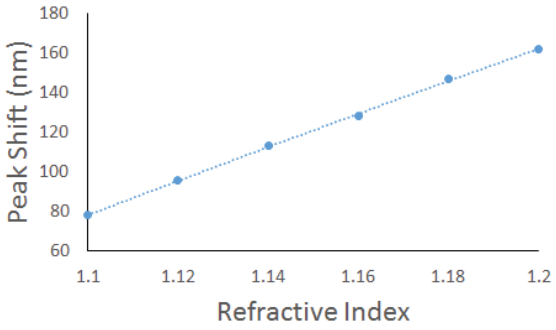


شکل ۲: پاسخ طیفی ساختار و توزیع میدان الکتریکی در طول موج تشدید، R، T و A بترتیب بیانگر موج بازتابی، عبوری و جذب شده در ساختار هستند.



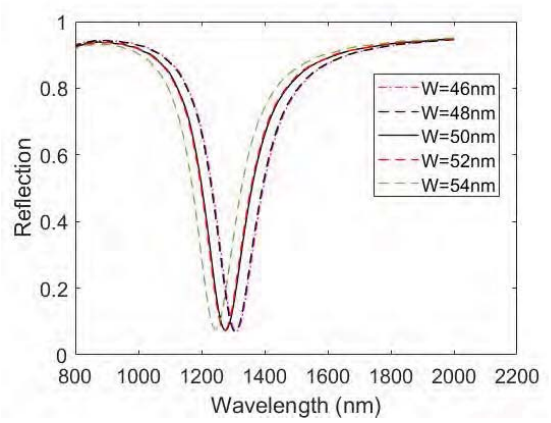
شکل ۳: طیف بازتاب ساختار به ازای ضریب شکست های مختلف.

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



شکل ۴: تغییر طول‌موج رزونانس به ازای تغییر ضریب شکست محیط.

همانطور که در توزیع میدان ساختار دیده شد تمرکز میدان بیشتر در کانال میانی قرار دارد پس مقدار حساسیت ساختار می‌تواند به ابعاد این کانال بیشترین وابستگی را داشته باشد. به همین دلیل تغییرات طیف بازتاب ساختار به ازای تغییر عرض کانال میانی نیز مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵: تغییرات طیف بازتاب ساختار به ازای تغییر عرض کانال میانی.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک حسگر فراسطح H شکل طراحی شد و مورد بررسی قرار گرفت. این حسگر دارای مقدار حساسیت ۸۱۴/۸۹ nm/RIU و معیار شایستگی ۴/۶۶ است که در مقایسه با بسیاری از حسگرهای تاکنون طراحی شده از مقدار حساسیت بهتری برخوردار است.

مرجع‌ها

[1] C. M. Soukoulis, M. Wegener, “Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials”, Nat. Photon, Vol. 5, pp. 523–530, 2011.

[2] C. R. Williams, S. R. Andrews, S. A. Maier, A. I. Fernández-Domínguez, L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, “Highly confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces”, Nat Photon, Vol. 2, No. 3, pp.175-179, 2008.

[3] B. Fischer, M. Hoffmann, H. Helm, G. Modjesch, P. Uhd Jepsen, “Chemical recognition in terahertz time-domain spectroscopy and imaging”, Semicond Sci Technol, Vol.20, No. 7, pp. S246-S253, 2005.

[4] W. He, Y. Feng, ZD. Hu, A. Balmakou et al, “Sensors With Multifold Nanorod Metasurfaces Array Based on Hyperbolic Metamaterials”, IEEE Sensors Journal, Vol. 20, No. 4, pp. 1801 - 1806, 2020.

[5] G. Zhang, C. Lan, H. Bian, R. Gao, J. Zhou, “Flexible, all-dielectric metasurface fabricated via nanosphere lithography and its applications in sensing”, Opt. Exp, Vol. 25 , No. 18, pp. 22038-22045, 2017.

[6] K. S. Modi, J. Kaur, S. P. Singh, U. Tiwari, R. K. Sinha, “Split-arc-based metasurface for refractive index sensing applications”, Proc. SPIE 10928, High Contrast Metastructures 8, 109281V, 4 March 2019.

[7] GD. Liu, X. Zhai, LL. Wang, Q. Lin et al, “A High-Performance Refractive Index Sensor Based on Fano Resonance in Si Split-Ring Metasurface”, Plasmonics, Vol. 13, pp. 15–19, 2018.

[8] A. A. Rifat, M. Rahmani, L .Xu, A. E. Miroshnichenko, “Hybrid Metasurface Based Tunable Near-Perfect Absorber and Plasmonic Sensor”, Materials, Vol. 11, 1091, 2018.

[9] M. Salemizadeh, F. Fouladi Mahani, A .Mokhtari, “Design of aluminum-based nanoring arrays for realizing efficient plasmonic sensors”, Journal of the Optical Society of America B, Vol. 36, No. 3, 2019.

[10] M. M. Tharwat, H. AlSharif, H. Alshabani, E. Qadi, M.Sultan, “Design of an optical sensor based on plasmonic nanostructures”, Proc. SPIE 9883, Metamaterials X, pp. 98830G, 2016.

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