



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 : ۲-۱۴۱۵-۱۰-A

حسگر پلاسمونیکی تنظیم پذیر با حساسیت پذیری بالا

فریبا لطفی^۱، نفیسه سنگ نورپور^۲ و رضا خردمند^{۱*}

^۱ گروه فوتونیک و فناوری پلاسما، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانشکده مکانیک، دانشگاه آلبرتا، ادمنتون، کانادا

چکیده - یک حسگر تنظیم پذیر جدید، دقیق و real-time که متشکل از یک موجبر پلاسمونیکی و مبتنی بر تداخل سنج ماخ-زندر است، ارائه می شود. ساختار حسگر پلاسمونیکی متشکل از یک موجبر تخت است که در پوسته آن، مواد پاشنده اتلافی با گذردهی الکتریکی منفی و تراوایی مغناطیسی مثبت نظیر فلز و گرافن استفاده می شود و هسته موجبر از دی الکتریک است. در ساختار حسگر ارائه شده، نمونه در نزدیکی شاخه بالای تداخل سنج قرار دارد. زمانی که از گرافن در مرز مشترک پوسته و هسته موجبر استفاده می شود، با اعمال ولتاژ گیت، حسگر تنظیم پذیر می شود و حساسیت پذیری ۱۸۰ THz/RIU حاصل می شود.

کلید واژه- پلاسمون-پلاریتون های سطحی، تنظیم پذیر، حسگر پلاسمونیکی، گرافن

Tunable Plasmonic Sensor With High Sensitivity

Fariba Lotfi¹, Nafiseh Sang-Nourpour² and Reza Kheradmand^{1,*}

¹Photonic and Plasma Technology group, Physics Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada

r_kheradmand@tabrizu.ac.ir, Sangnour@ualberta.ca, f.lotfi@tabrizu.ac.ir,

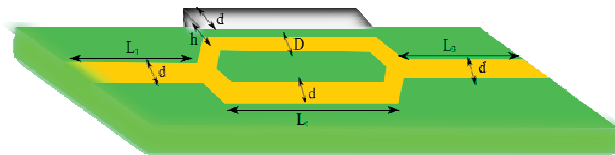
Abstract- We design a novel, real-time and accurate plasmonic sensor made of Mach-Zehnder Interferometer. Our plasmonic sensor structure composed of slab waveguides with lossy dispersive media with negative permittivity and positive permeability such as metal and graphene in the cladding of waveguide and the core of waveguides is dielectric media. In the proposed sensor structure, the sample is located near the upper branch of the interferometer. When the graphene is used at the interface between the core-cladding of the waveguide, the sensor is tuned by applying a gate voltage, with a sensitivity of 180 THz / RIU is achieved.

Keywords: Surface-plasmon polaritons, Plasmonic sensor, Tunable, Graphene

ساختار حسگر مورد مطالعه برای نمونه های متفاوت مایع، گاز/آبوسول با ضرایب شکست متفاوت کاربرد دارد. به منظور بررسی و تایید کاربرد حسگر، ضریب شکست نمونه را از ۱.۳۳ تا ۱.۳۷ تغییر می دهیم. ساختار حسگر ارائه شده در زمینه سنجش شیمیایی، آبوسول [۱۰] و نظارت بر محیط زیست [۱۱] کاربرد دارد.

مدل

ساختار حسگر پلاسمونیک مورد مطالعه شامل یک تداخل سنج ماخ-زندر نامتقارن است که از یک موجبر تخت ساخته شده است. پوسته موجبر از مواد پاشنده رسانا که شامل فلز (نقره) و گرافن است و هسته موجبر هوا است. در این ساختار، محیط های شامل مواد پاشنده و دی الکتریک خطی، همگن و همسانگرد مورد استفاده قرار می گیرند. تداخل سنج ماخ-زندر از یک موجبر تخت رسانا-دی الکتریک-رسانا ساخته شده است که نمونه در نزدیکی شاخه بالای تداخل سنج ماخ-زندر قرار می گیرد.



شکل ۱: شماتیک ساختار حسگر که متشکل از یک تداخل سنج ماخ-زندر است. نواحی سبز و زرد رنگ به ترتیب بیانگر محیط پاشنده و دی الکتریک است. ناحیه نمونه در فاصله $h=10\text{nm}$ از شاخه بالای تداخل سنج ماخ-زندر قرار دارد. پارامترهای هندسی ساختار حسگر $L_3=L_1=350\text{nm}$ و $L_2=400\text{nm}$ پهنای شاخ بالا $D=35\text{nm}$ و پهنای هسته موجبر $d=50\text{nm}$ است.

برای توصیف گذردهی الکتریکی فلز از مدل درود استفاده می کنیم

$$\frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} = \varepsilon_b + \frac{F_e \omega_e^2}{\omega_e^2 - \omega^2 + i\Gamma_e \omega} \quad (1)$$

F_e قدرت نوسانگر الکتریکی، Γ_e ثابت میرایی، ω_e فرکانس رزونانس الکتریکی و ω_e فرکانس پلاسما است. ω فرکانس نور فرودی است و تراوایی مغناطیسی فلز ثابت است [۱۲].

از گرافن در مرز مشترک پوسته و هسته استفاده می شود. ویژگی های الکترومغناطیسی گرافن به وسیله رسانندگی

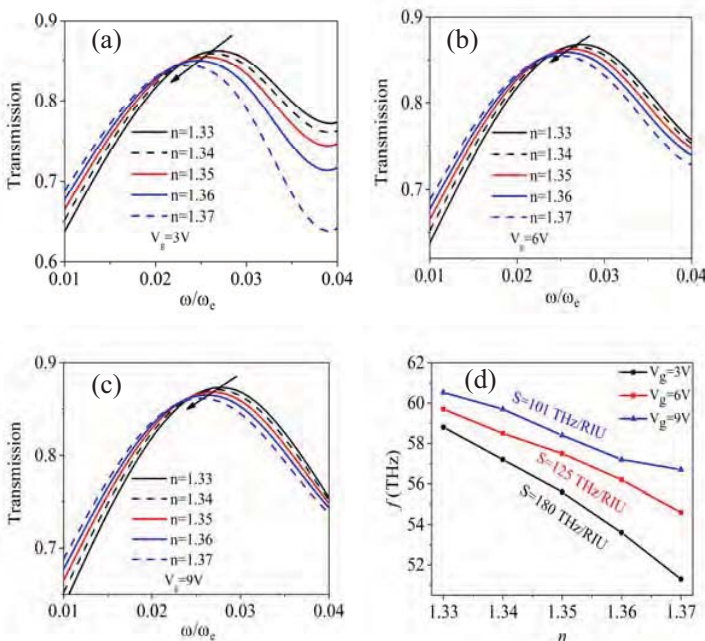
مقدمه

حسگرهای پلاسمونیک به صورت گسترده در آشکارسازی نمونه های شیمیایی و زیستی، امنیت و نظارت بر محیط زیست [۱] مورد استفاده قرار می گیرند. انواع متفاوتی از حسگرهای پلاسمونیک وجود دارند که به حسگرهای گازی، فازی، دمایی و ضریب شکست [۲] تقسیم بندی می شوند. از میان این حسگرها، به دلیل حساسیت پذیری ذاتی پلاسمون پلاریتون های سطحی نسبت به ضریب شکست محیط اطراف، حسگرهای ضریب شکست مورد توجه قرار می گیرند [۳]. پلاسمون پلاریتون های سطحی در مرز مشترک ساختارهای پلاسمونیک تمرکز بالایی از انرژی را دارند که منجر به کاربرد آن ها در حسگرهای با مقیاس زیر طول موجی می شود [۴]. انواع متفاوتی از حسگرها در ساختارهای گوناگون پلاسمونیک از جمله تداخل سنج ماخ-زندر ساخته شده اند [۵]. تداخل سنج ماخ-زندر به دلیل تکنولوژی آسان آن و مقرون به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی مورد توجه قرار می گیرد [۶]. تداخل سنج ماخ-زندر امکان ایجاد موجبر با مرز مشترک محیط پاشنده با دی الکتریک را فراهم می کند که باعث تمرکز بالای انرژی و طول انتشار زیاد برای پلاسمون پلاریتون های سطحی می شود [۷].

در ساختار حسگر مورد مطالعه، موجبر از مرز مشترک فلز (Ag) با دی الکتریک ساخته شده است که در مرز مشترک هسته و پوسته، گرافن تعبیه می شود. دلیل استفاده از گرافن در موجبر، ترکیب پاسخ های پلاسمونیک گرافن و فلز به منظور افزایش اندرکنش نور با ماده است. اگر تنها از گرافن در ساختار پلاسمونیک استفاده شود، گرافن اندرکنش ضعیفی با نور خواهد داشت، به همین دلیل گرافن را با فلزات نجیب ترکیب می کنند تا پاسخ اپتیکی گرافن افزایش یابد [۸].

یکی از ویژگی های مورد توجه گرافن، تنظیم پذیر بودن آن با اعمال ولتاژ گیت است. بنابراین، با اعمال ولتاژ گیت به گرافن، قادر به تغییر رسانندگی سطحی آن هستیم [۹] که مستقیماً روی طیف آشکارسازی شده از حسگر موثر است و باعث جابه جایی حساسیت پذیری می شود. در این مقاله، نمونه در ساختار حسگر مورد مطالعه، در نزدیکی شاخه بالای تداخل سنج ماخ-زندر قرار می گیرد.

نتایج و بحث



شکل ۲: طیف عبور حسگر برای ضرایب شکست نمونه از ۱.۳۳ تا ۱.۳۷، زمانی که گرافن در مرز پوسته و هسته موجبر استفاده می شود. ولتاژ گیت به ترتیب (a) ۳V، (b) ۶V و (c) ۹V به گرافن اعمال می شود. با افزایش ضریب شکست نمونه از ۱.۳۳ تا ۱.۳۷، جابه جایی به سمت فرکانس های کمتر است؛ همانطور که در شکل با فلش نشان داده شده است. (d) حساسیت پذیری حسگر برای طیف های عبور (a)-(c).

با توجه به مثبت بودن تراوایی مغناطیسی و منفی بودن گذردهی الکتریکی برای فلز، تنها مدهای پلاسمون پلاریتون سطحی از نوع TM قادر به انتشار هستند. در ساختار حسگر ارائه شده، پلاسمون پلاریتون های سطحی نوع TM تنها قادر به انتشار در محدوده $0.01\omega_e$ تا $0.05\omega_e$ هستند [۱۴]. بنابراین به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد حسگر، روی این محدوده فرکانسی متمرکز می شویم.

شکل (a)-(c) ۲ طیف عبور برای ضریب شکست نمونه ۱.۳۳ تا ۱.۳۷ به ازای اعمال ولتاژ گیت های ۳، ۶ و ۹V به گرافن را نشان می دهد. همان طور که از طیف های عبور مشخص است، با افزایش ضریب شکست نمونه، جابه جایی فرکانسی به سمت فرکانس های پایین تر است. نمودار شکل (d) ۲ بیانگر میزان جابه جایی فرکانسی به ازای تغییر ضریب شکست نمونه برای طیف های عبور شکل (a)-(c) ۲ را نشان می دهد. میزان جابه جایی فرکانسی نسبت به تغییر ضریب شکست نمونه، رفتاری

سطحی آن توصیف می شود. رسانندگی سطحی گرافن کمیتی مختلط است و شامل دو بخش مربوط به گذارهای داخل باندهی و بین باندهی است که رسانندگی سطحی آن از طریق فرمول بندی کوبو توصیف می شود [۱۳]

$$\sigma_{intra}(\omega) = \frac{2ik_B T e^2}{\pi \hbar^2 (\omega + i/\tau)} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{E_f}{2k_B T} \right) \right],$$

$$\sigma_{inter}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega - 2E_f}{2k_B T} - \right.$$

$$\left. \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar\omega + 2E_f)^2}{(\hbar\omega - 2E_f)^2 + (2k_B T)^2} \right] \quad (2)$$

پارامترهای $T=300K$ (دمای محیط)، e بار الکتریکی، \hbar ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن، E_f پتانسیل شیمیایی و τ زمان واهلش است. رابطه میان ولتاژ گیت و پتانسیل شیمیایی به صورت

$$E_f = \hbar v_f \sqrt{\pi \alpha_0 V_{gate}} \quad (3)$$

است و $\alpha_0 = 9 \times 10^{16} m^{-2} V^{-1}$

یک میدان الکتریکی فرودی به ورودی تداخل سنج ماخ-زندر اعمال می کنیم. زمانی که سیگنال با پلاریزاسیون TM با میدان $E = 50 V/m$ به حسگر اعمال می شود، تابش الکترومغناطیسی فرودی به الکترون های نوسان کننده در سطح مشترک هسته-پوسته موجبر کوپل می شوند و پلاسمون پلاریتون های سطحی در طول موجبر منتشر می شوند. دلیل طراحی ساختار نامتقارن حسگر این است که تداخل سازنده یا ویرانگر میان پلاسمون پلاریتون های سطحی که از شاخه های بالا و پایین تداخل سنج ماخ-زندر می آیند در خروجی اتفاق بیفتد. تغییرات در تداخل سازنده یا ویرانگر روی طیف عبور از حسگر که ضریب شکست نمونه را از روی آن آشکارسازی می کنیم، موثر است.

از روش المان محدود برای حل معادلات پاشندگی پلاسمون پلاریتون های سطحی نوع TM در این ساختار حسگر، استفاده می شود. طیف عبور از حسگر به ازای تغییر ضریب شکست نمونه محاسبه می شود. از روی داده های طیف عبور حسگر، قادر به محاسبه حساسیت پذیری خواهیم بود. حساسیت پذیری پارامتر مهم و کلیدی است که بیانگر توانایی و عملکرد حسگر تحت شرایط مختلف است.

- based on a plasmonic channel waveguide,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2584, 2017.
- [6] J. Wo and et al., “Refractive index sensor using microfiber-based mach-zehnder interferometer,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 1, pp. 67-69, 2012.
- [7] Y. Qi and et al., “A theoretical study of optically enhanced transmission characteristics of subwavelength metal y-shaped arrays and its application on refractive index sensor,” *Results Phys.*, vol. 15, p. 102495, 2019.
- [8] A. Grigorenko and et al., “Graphene plasmonics,” *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 11, p. 749, 2012.
- [9] B. Wan and et al., “Optical coupling of surface plasmons between graphene sheets,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 13, p. 131111, 2012.
- [10] N. Sang-Nourpour and J. S. Olfert, “Calibration of optical particle counters with an aerodynamic aerosol classifier,” *J. Aerosol Sci.*, vol. 138, p. 105452, 2019.
- [11] H. R. Anderson, “Air pollution and mortality: A history,” *Atmos. Environ.*, vol. 43, no. 1, pp. 142-152, 2009.
- [12] N. Sang-Nourpour and et al., “Characterization of surface-plasmon polaritons at lossy interfaces,” *J. Opt.*, vol. 19, no.12, p.125004, 2017.
- [13] C. Xu and et al., “Characteristics of electro-refractive modulating based on graphene-oxidesilicon waveguide,” *Opt. express*, vol.20, no.20, pp.22398–22405, 2012.
- [14] F. Lotfi and et al., “Plasmonic all-optical switching based on metamaterial/metal waveguides with local nonlinearity,” *Nanotechnology*, vol. 31, no.1, p. 015201, 2019.

خطی دارد که از روی شیب نمودار می توان حساسیت پذیری را محاسبه کرد. بیشترین میزان حساسیت پذیری ۱۸۰ THz/RIU به ازای ولتاژ گیت ۳V است.

نتیجه گیری

در این مقاله، یک حسگر پلاسمونیک بر پایه تداخل سنج ماخ-زندر ارائه شد. ساختار حسگر از مرز مشترک فلز با هوا ساخته شده است. گرافن در مرز مشترک فلز-هوا از ساختار حسگر، تعبیه می شود. در این حسگر نمونه در نزدیکی شاخه بالای تداخل سنج ماخ-زندر تزریق می شود. با اعمال ولتاژ گیت به گرافن، می توان حسگر را تنظیم پذیر کرد. با توجه به نتایج، اعمال ولتاژ گیت های متفاوت به گرافن منجر به جابه جایی فرکانسی در طیف عبور می شود که روی حساسیت پذیری موثر است. بیشترین میزان حساسیت پذیری ۱۸۰ THz/RIU است. ساختار حسگر مورد مطالعه در زمینه سنجش شیمیایی و نظارت بر محیط زیست می تواند کاربرد داشته باشد.

مرجع ها

- [1] I. Choi and Y. Choi, “ Polarized light scattering spectroscopy for quantitative measurement of epithelial cellular structures in situ, ” *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, vol.18, pp.1110-1121, 2011.
- [2] Z. Zhang and et al., “Plasmonic refractive index sensor with high figure of merit based on concentric-rings resonator,” *Sensors*, vol.18, p.116, 2018.
- [3] L. Wu and et al., “Ultrasensitive biosensors based on long-range surface plasmon polariton and dielectric waveguide modes,” *Photonics Res.*, vol.4, pp.262–266, 2016.
- [4] D. E. Lee and et al., “Mach-Zehnder Interferometer Refractive Index Sensor Based on a Plasmonic Channel Waveguide,” *Sensors*, vol.17, p.2584, 2017.
- [5] D. E. Lee and *et al.*, “Mach-zehnder interferometer refractive index sensor