بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی و شبیه سازی نانو حسگر تنظیم پذیر مبتنی بر ساختار جاذب شدید پلازمونیکی

عباس حموله علیپور[۱]، علی میر[۱] و علی فرمانی[۱]

[۱]دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه الکترونیک

چکیده – در این مقاله، یک نانو حسگر فلز-دی الکتریک-فلز با حساسیت بالا و تنظیم پذیر ارائه شده است. در واقع هدف، پیشنهاد یک نانو حسگر با استفاده از خصوصیت جذب کنندگی شدید است. حساسیت و تنظیم پذیر بودن حسگرهای تمام نوری از پارامترهای مهم در طراحی آنها هستند که در این طرح با استفاده از حل عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان می‌دهد که حسگر پیشنهادی دارای بیشینه حساسیتی برابر با nm/RIU ۶۹۳/۸ به ازای تغییرات ضریب شکست دی الکتریک n=0/1Δ، و ضریب شایستگی برابر با ۹/۸ است. همچنین نانو حسگر پیشنهادی می‌تواند بعنوان کنترل کننده انتشار نور به صورت نور تند و کند عمل کند. با به کارگیری فلز نقره در ساختار حسگر، ضریب افزایش سرعت نور و کاهش آن، به ترتیب ۲۲۰ و ۷۰ است.

کلید واژه- جاذب شدید، حسگر، ضریب شایستگی، نور تند و کند.

Design and Simulation of a Tunable Nano-Sensor based on Plasmonic Perfect Absorber

Abbas Hamooleh Alipour[1], Ali Mir[1], and Ali Farmani[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

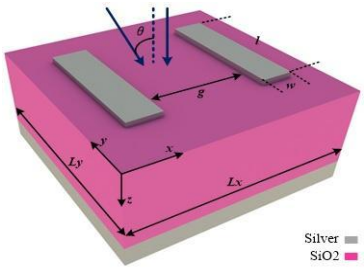
Abstract- In this paper, a highly sensitive and tunable nano-sensor based on metal-dielectric-metal structure is presented. Actually, the goal is to propose a nano-sensor by using perfect absorbing. Sensitivity and tunability of all optical sensors are important parameters in their design, which are investigated by using numerical and analytical methods. Results show that the proposed sensor has Max sensitivity of 693/8 nm/RIU with refractive index change of Δn=0/05, and Figure of Merit (FoM) equal to 9/8. Also, the proposed nano-scale sensor can operate as a light propagation controlling with slow and fast light. By using of silver metal in the sensor structure, the fast and slow light coefficient is obtained of 220 and 70, respectively.
Keywords: perfect absorber, sensor, figure of merit, slow and fast light.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱ -مقدمه

حسگرهای مبتنی بر ساختارهای جاذب پلازمونیکی فلز-دی الکتریک-فلز با توجه به گستردگی عملکرد آنها در سامانه‌های مخابرات نوری پیشرفته مورد توجه بسیاری از محققان علم نانو الکترونیک قرار گرفته اند [۱]. جاذب‌ها به طورکلی در دو دسته پهن باند و باند باریک برای کاربردهای مختلف ارائه شده اند. از جمله جاذب‌های باند باریک می‌توان به خنک سازی تابش حرارتی و کابردهای حسگری همراه با ساخت جاذب مورد نظر اشاره کرد [۲-۳]. حسگرهای پلازمونیکی و فوتونیکی از دیگر تقسیم‌بندی ها محسوب می‌شوند [۴-۵]. ساختارهای پلازمونیکی دارای هزینه کمتر، ساخت آسان‌تر و اندازه کوچکتر نسبت به ساختارهای فوتونیکی هستند. اخیراً، جاذب‌های پلازمونیکی بسیاری براساس ساختار فلز-دی الکتریک-فلز بصورت نظری و عملی با پیکربندی‌های مختلف پیشنهاد شده‌اند. به عنوان مثال، یک جاذب پلاسمونیکی براساس ساختار فلز-دی الکتریک-فلز در ناحیه طول موج مرئی بیان شده است [۶]. همچنین در [۷]، یک جاذب شدید براساس ساختار چند لایه در ناحیه فروسرخ به صورت نظری و آزمایشگاهی معرفی گردید. اغلب کارهای پیشنهادی دارای حساسیت پایین هستند که عملکرد حسگر طراحی شده را محدود می‌کند. همچنین بیشتر جاذب های شدید تک بانده در حوزه فرکانسی تراهرتز (۰/۱ تا ۱۰) شبیه‌سازی شده اند که با محدودیت افزایش ابعاد ساختار مواجه می‌شوند. اگرچه بررسی جاذب‌های پلاسمونیکی در ناحیه فروسرخ مورد مطالعه قرار گرفته اند، اما طراحی یک جاذب شدید از نظر حساسیت بالا و اندازه کوچک کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین در این مقاله یک نانو-حسگر حساس و تنظیم پذیر براساس ساختار جاذب پلازمونیکی در ناحیه طول موجی فروسرخ پیشنهاد شده است.



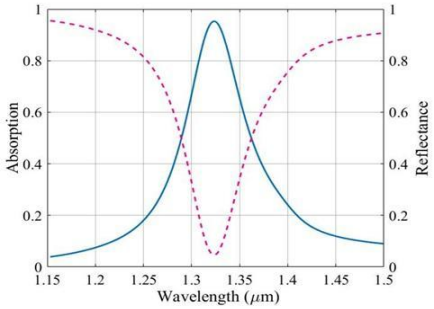
شکل ۱: شمای سه بعدی از پیکربندی سلول واحد نانوحسگر پیشنهادی ($Ly=Lx$ 700 nm)

۲ -ساختار نانو حسگر پیشنهادی

پیکربندی سلول واحد حسگر پیشنهادی بهصورت سه بعدی در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. ساختار حسگر به صورت سه لایه متشکل از نقره، دی الکتریک (SiO_2) و نقره است. لایه نقره زمینه دارای ضخامت ۵۰nm با طول و عرض ۷۰۰×۷۰۰nm است. همچنین از دی اکسید سیلیکون (SiO_2) با ضخامت ۲۵۰nm به عنوان لایه عایق با ثابت دی الکتریک ε=۲/۲۵ استفاده شده است. دو نوار فلزی I شکل با ضخامت 5nm با طول و عرض w=۱۰۰nm و l = ۶۰۰nm که با فاصله g =۴۰۰nm از یکدیگر، بر روی سطح عایق قرار دارند. هر کدام از این دو نوار فلزی عمودی، تشکیل یک دوقطبی می دهند. نـور بـه طـور عمـود بـر صفحه نوارها تابش می‌کند و میدان الکتریکی در راستای محـور x نوسان می‌کند. برای تعیین ضرایب جذب و بازتاب باید معـادلات ماکسـول در ساختار مورد نظر حل شوند. برای این منظور از نـرم افـزار CST استفاده می‌شود. همانطور که گفته شد فلز مورد استفاده در این طرح نقره است، که ضریب گذردهی با استفاده از مدل درود از دو قسمت حقیقی و موهومی به صورت زیر تشکیل شده است:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\mathrm{Re}}(\omega) + i\varepsilon_{\mathrm{Im}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_c)} = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_c^2}\right) + i\left(\frac{\omega_p^2 \gamma_c^2}{\omega\left(\omega_p^2 + \gamma_c^2\right)}\right) \quad (1)$$

که در آن w_p، بسامد پلاسمای الکتریکی و γ_c بسامد برخورد است. با تابیدن نور ورودی با فرکانس ω و زاویه ورودی θ به ساختار حسگر، جفت‌شدگی شدید بین نور ورودی و پلاسمون‌های سطحی ساختار ایجاد شده و یک سری از طول موج‌های تحریک شده بین لایه عایق و نقره جذب می‌شوند.



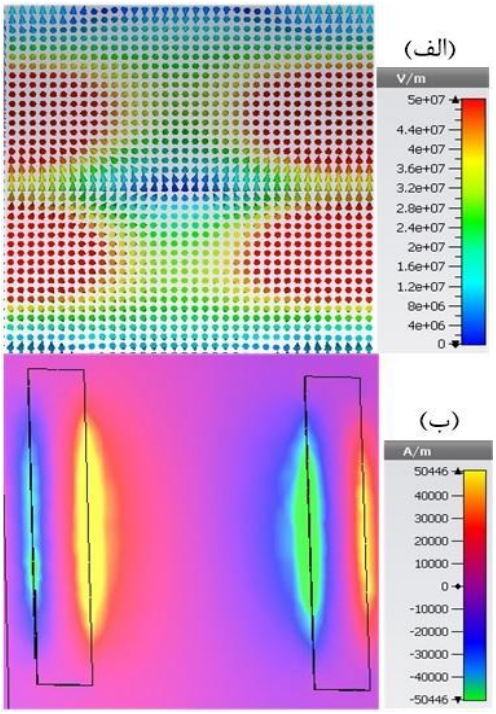
شکل ۲: نمودار طیفی جذب و بازتاب ساختار فلز-دی الکتریک-فلز نانو حسگر پیشنهادی

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۳ نتایج شبیه سازی و محاسبات

شکل شماره ۲ نمودار طیفی جذب و بازتاب را برای ساختار معرفی شده در بازه طول موجی ۱/۱۵ µm تا ۱/۵ µm نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می شود، وقتی نوارهای فلزی افقی در معرض تابش نور فرودی خارجی قرار می‌گیرند تشدید شدیدی در نمودار جذب و بازتاب مشاهده به وجود می‌آید که نشانگر جفت شدگی قوی با نور تابش شده از فضای آزاد است. بنابراین نوارهای فلزی می‌توانند بعنوان مد روشن شناخته شوند. شکل۳ (الف) جریان سطحی برانگیخته در قله جذب ω_0 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود جریان سطحی مدوری در اطراف دو نوار فلزی I شکل ایجاد شده است. همچنین برای نشان دادن پدیده جذب در بسامد تشدید، توزیع میدان مغناطیسی نانو ساختار بیان شده است. شکل شماره ۳ (ب) توزیع میدان مغناطیسی مماسی را نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود برهمکنش نوارهای فلزی افقی با نور تابشی خارجی بسیار قوی است و باعث بوجود آمدن دوقطبی در نوارهای فلزی می‌شود. این ساختار دارای ضریب جذب بالایی برابر ۰/۹۵ در بسامد ۲۲۶/۴ THz و ضریب کیفیت خوب در حدود ۱۹ است.



شـــکل ۳: (الف) توزیع جریان سطحی برانگیخته (ب) توزیع میدان مغناطیسی مماسی (در بسامد تشدید) ساختار فلز-دی الکتریک-فلز

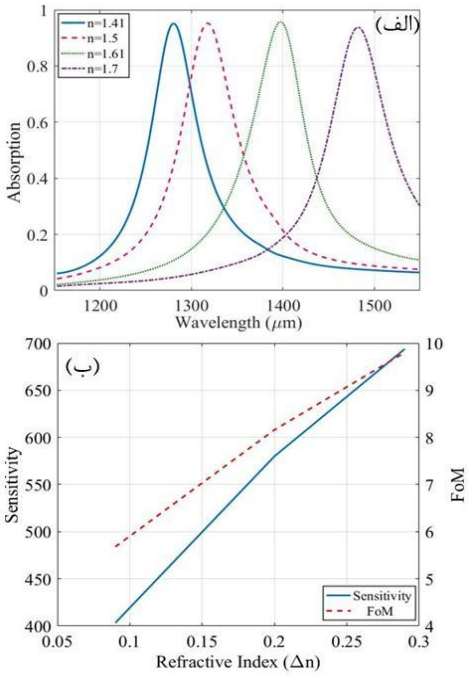
در این بخش از مقاله، عملکرد حسگر پیشنهادی با در نظرگرفتن پارامترهایی از جمله حساسیت، ضریب شایستگی و ضریب کیفیت بررسی شده است. شکل شماره ۴ (الف) نمودار طیفی جذب را به ازای مقادیر مختلف ضریب گذردهی (ضریب شکست) را نشان می‌دهد. همانگونه که از پاسخ طیفی مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار ضریب گذردهی دی الکتریک، جابجایی قرمز و با کاهش ضریب شکست دی الکتریک جابجایی آبی برای بسامد تشدید حاصل می‌شود. براساس تغییرات ضریب شکست دی الکتریک حساسیت حسگر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$SS = \Delta\lambda / \Delta n \qquad (2)$$

که در آن $\Delta\lambda$ و Δn به ترتیب تغییرات طول موج و تغییرات ضریب شکست مؤثر است. پارامتر مهم در طراحی حسگر ضریب شایستگی است که با به کارگیری رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$FoM = \left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta n}\right) \Big/ FWHM\right] = \frac{SS}{FWHM} \qquad (3)$$

که در آن SS حساسیت و $FWHM$ معادل با عرض کامل در نصف مقدار بیشینه است.



شـــکل ۴: (الف) نمودار طیفی جذب به ازای ضرایب مختلف گذردهی، (ب) نمودار حساسیت و ضریب شایستگی به ازای تغییرات ضریب شکست.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

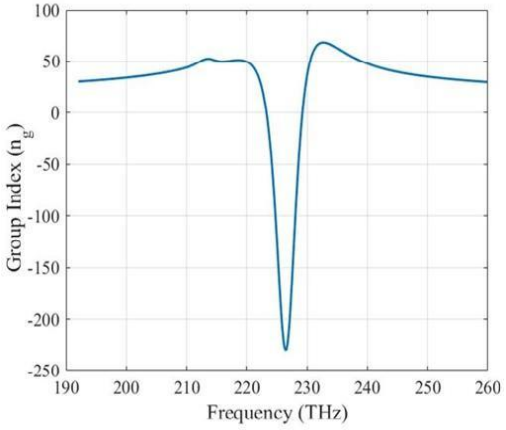
نمودار حساسیت و ضریب شایستگی نانو حسگر طراحی شده براساس تغییرات ضریب شکست در شکل شماره ۴ (ب) نشان داده شده است. یکی دیگر از ویژگی‌های بسیار کاربردی نانو ساختار پیشنهادی دارا بودن قابلیت کنترل انتشار نور است. برای تحقق این امر با استفاده از پیکربندی حسگر به کاهش و افزایش سرعت گروه می‌پردازیم. ابتدا سرعت گروه را با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$v_g = C_0 - L/\tau_g \qquad (4)$$

که در آن c_0 سرعت گروه در خلأ، L ضخامت زیر لایه و τ_g تأخیر گروه است. سپس با استفاده از رابطه زیر، ضریب گروه، n_g را تعیین می‌کنیم:

$$n_g = n + w\frac{dn}{dk} = \left(\frac{dw}{dk}\right)^{-1} = \frac{C_0}{v_g} \qquad (5)$$

در رابطه بالا به ازای مقادیر ضریب گروه بالاتر از یک، انتشار نور کند و به ازای ضریب گروه کمتر از یک، انتشار نور تند حاصل می‌شود. شکل شماره ۵ نمودار ضریب گروه به ازای بسامد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، ساختار پیشنهادی دارای ضریب نور تند و کندی به ترتیب ۲۲۰ و ۷۰ است؛ بدین معنی که سرعت نور را به ۲۲۰ و ۷۰ برابر تندتر و کندتر از سرعت نور در خلأ می‌رساند. این ویژگی مناسب نانو ساختار پیشنهادی، می‌تواند در سوئیچ‌های نوری که توسط نور کند کنترل می‌شوند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: نمودار ضریب گروه (n_g) به ازای تغییرات بسامد

۴ -نتیجه گیری

در این مقاله یک نانو حسگر حساس و تنظیم پذیر در ساختار پلازمونیکی فلز-دی الکتریک-فلز بررسی و شبیه سازی شد. طیف‌های جذب و بازتاب براساس برهمکنش شدید نور فرودی و پلاسمون‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که نانو حسگر پیشنهادی در بسامد ۲۲۶/۴ THz دارای ضریب جذب ۰/۹۵ با ضریب کیفیت ۱۹ است. همچنین با تغییر ضریب شکست دی‌الکتریک نانو حسگر، بیشینه حساسیتی برابر با ۶۹۳/۸ و ضریب شایستگی ۹/۸ بدست آمد. علاوه بر این، جاذب شدید معرفی شده توانایی استفاده در نور کند و تند را با ضرایب ۷۰ و ۲۲۰ داراست.

مراجع

[1] H. Xiong, M-C. Tang, M. Li, D. Li and Y-N. Jiang, “Equivalent Circuit Method Analysis of Graphene-Metamaterial (GM) Absorber,” Plasmonics, vol. 13, no. 3, pp. 857-862, 2018.
[2] L. Meng, D. Zhao, Z. Ruan, Q. Li, Y. Yang and M. Qiu “Optimized grating as an ultra-narrow band absorber or plasmonic sensor,” Optics Letters, vol. 39, no. 5, pp. 1137-1140, 2014.
[3] N. T. Tung, T. Tanaka “Characterizations of an infrared polarization-insensitive metamaterial perfect absorber and its potential in sensing applications,” Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications 28 (2018) 100–105.
[4] D. Wu, C. Liu, Z. Xu, Y. Liu, Z. Yu , L. Yu, L. Chen, R. Li, R. Ma and H. Ye “The design of ultra-broadband selective near-perfect absorber based on photonic structures to achieve near-ideal daytime radiative cooling,” Materials and Design, vol. 139, pp. 104-111, 2018.
[5] L. N. Le, N. M. Thang, L. M Thuy and N. T. Tung, “Hybrid semiconductor–dielectric metamaterial modulation for switchable bi-directional THz absorbers." Optics Communications vol. **383**, pp. 244–249, 2017.
[6] A. Eshaghian Dorche, S. Abdollahramezani, A. Chizari, and A. Khavasi “Broadband, Polarization-insensitive, and Wide-angle Optical Absorber Based on Fractal Plasmonics,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, pp. 2545-2548, 2016.
[7] X. Chen, H. Gong, S. Dai, D. Zhao, Y. Yang, Q. Li, and M. Qiu “Near-infrared broadband absorber with film-coupled multilayer nanorods,” Optics Letters, vol. 38, no. 13, pp. 2247-2249, 2013.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

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