بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

فیلتر پلاسمونی طول‌موج چهار کاناله، شامل موجبر و کاواک هلالی شکل

وحید نجاری[۱]، سعید میرزانژاد[۲و*]، امین قادی[۳]

گروه اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

V.najjari@stu.umz.ac.ir[۱], saeed@umz.ac.ir[۲و*], a.ghadi@umz.ac.ir[۳]

چکیده - یک فیلتر پلاسمونی شامل یک موجبر فلز- دی الکتریک- فلز(MIM)[۱] با کاواک هلالی شکل پیشنهاد شده است. میزان انتقال نور ورودی و پهنای کامل در نصف بیشینه (FWHM)[۲] قله‌های تشدید با استفاده از روش تفاضل محدود دامنه زمانی(FDTD)[۳] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده تولید تشدیدهای چهارگانه فانو[۴] بعد از بهینه‌سازی ساختار بوده که طول‌موج و شکل خط تشدید، توسط تغییر هندسه دستگاه قابل تنظیم می‌باشند. بدین ترتیب می‌توان از این دستگاه به عنوان فیلتر میان‌گذر[۵] استفاده نمود. همچنین بررسی‌های ما برای ساختار جدید بیان‌گر این بوده که میزان طیف عبور در طول‌موج‌های بزرگ‌تر از 1200nm تقریباً صفر است که برای فیلترهای حذفی مورد توجه می‌باشد.

کلید واژه- فیلتر طول‌موج پلاسمونی، موجبر فلز- دی الکتریک- فلز، ساختارهای پلاسمونی، روش تفاضل محدود دامنه زمانی، پلاسمون- پلاریتون‌های سطحی

Four channels wavelength plasmonic filter, including waveguide and crescent-shape cavity

Vahid Najjari[1], Saeed Mirzanejad[2, *], Amin Ghadi[3]

Department of Atomic and molecular physics, Faculty of Sciences, Mazandaran University

V.najjari@stu.umz.ac.ir[1], saeed@umz.ac.ir[2, *], a.ghadi@umz.ac.ir[3]

Abstract- A plasmonic filter consisting of a Metal-Insulator-Metal waveguide (MIM) with a crescent-shaped cavity is proposed. The transmittance and Full Width at Half Maximum (FWHM) of the resonant peaks have been analyzed by the Finite Difference Time Domain method. The results show the production of four Fano resonances after optimizing the structure that the wavelength and the resonance line-shape can be adjusted by changing the geometry of the device. Thus, this device can be used as band-pass filter. Our studies for the new structure also show that the transmittance at wavelengths greater than 1200nm is almost zero, which is important for the cut-off filters.

Keywords: Plasmon wavelength filter, Metal-Insulator-Metal (MIM) waveguide, plasmonic structures, Finite Difference Time Domain method (FDTD), Surface plasmon-polaritons

[1] Metal-Insulator-Metal waveguide
[2] Full Width at Half Maximum
[3] Finite Difference Time Domain method
[4] Fano Resonances
[5] Band-Pass filter

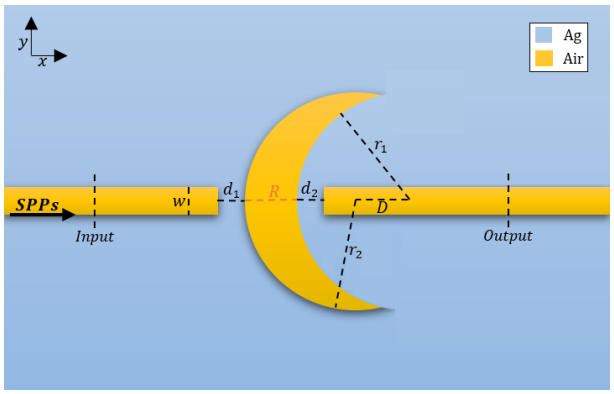
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

تشدید فانو نوعی پدیده پراکندگی تشدید است که در هنگام جفت‌شدگی یک حالت کوانتومی گسسته با یک حالت پیوسته اتفاق می افتد[۱]. این پدیده در مقایسه با تشدید لورنتزی، دارای طیف انتقال نامتقارن و فوق العاده تیز بوده که به تغییر پارامترهای ساختار و محیط های اطراف خیلی حساس می‌باشد[۲]. پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی[۱] (SPPs)، امواج الکترومغناطیسی هستند که در سطح یک فلز و دی‌الکتریک انتشار یافته و باعث محدود شدن پلاسمون‌های سطحی در سطح فلز می‌شوند [۳]. ساختارهای پلاسمونی با استفاده از پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی این قابلیت را دارند که سیگنال‌های نوری و الکتریکی را حمل و منتشر کرده و همچنین نور را در محدوده زیر حد پراش، محدود و هدایت کنند[۴]. این ویژگی‌ها باعث شده تا ساختارهای پلاسمونی به طور گسترده برای استفاده در مدارهای فوتونی یکپارچه[۲] (PICs) مورد تحقیق قرار گیرند[۵]. از جمله می‌توان به بررسی‌های انجام شده در ساختارهای مبتنی بر پلاسمون مانند فیلترها، حسگرها[۳]، تعویض‌کننده‌ها[۴]، جفت‌کننده‌ها[۵] و تقسیم‌گرهای طول‌موج[۶] اشاره نمود. فیلترها در ساختارهای نانوفوتونی برای انتقال نور بسیار مهم بوده و می‌توانند طول‌موج‌های مختلف نور را به صورت انتخابی عبور دهند، در حالی که از عبور سایر طول‌موج‌ها ممانعت به عمل آورند[۶]. با توجه به این که اکثر فیلترهای پلاسمونی بررسی شده، عمدتاً بر اساس پیکربندی‌هایشان، کارآیی محدود دارند، مثلاً فقط به عنوان فیلتر حذفی یا فقط فیلتر میان‌گذر عمل می‌کنند، فیلتر طول موج پلاسمونی بر مبنای ساختار جدید و پیشنهادی ما با توجه به چند منظوره بودن، شامل فیلتر قطع طول‌موج طولانی و فیلتر میان‌گذر چند نواری، کاندیدای مناسبی برای مدارهای نوری یکپارچه است و آزادی بیشتری به عنوان فیلتر طول‌موجی داشته و می‌تواند نقش مهمی در توسعه نسل بعدی PIC ها ایفا کند [۷]. همچنین از ساختار معرفی شده می‌توان به عنوان دستگاهی برای فیلتر کردن چندین طول‌موج متفاوت استفاده نمود که به طرز قابل توجهی هزینه‌های ساخت را کاهش می‌دهد.

مواد و روش ها

در این مقاله طیف انتقال[۷] و توزیع میدان مغناطیسی $|H_z|$ با استفاده از روش FDTD دو بعدی و با شرایط مرزی جذب‌کننده[۸] PML بررسی و شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱. ساختار جدید پیشنهاد شده به عنوان فیلتر پلاسمونی شامل موجبر و کاواک هلالی شکل

ساختار پیشنهادی شامل موجبر با عرض w و یک کاواک هلالی شکل با ضخامت بیشینه R بوده که از دو دایره به شعاع‌های r_1 و r_2 از یک ماده دی الکتریک (هوا) در بستر فلز نقره تشکیل شده است. دلیل استفاده از نقره این است که این فلز تلفات کمتری نسبت به سایر فلزات نجیب از جمله طلا و حتی گرافن از خود نشان می‌دهد[۸]. فاصله بین موجبرها و کاواک مساوی d_1 و d_2 فرض شده است. با هدف انتشار طیف تک‌مد در موجبر، مقدار w برابر 50nm می‌باشد. در ابتدا مقدار r_1 برابر 160nm و r_2 برابر 170nm در نظر گرفته شده و طول D (فاصله مراکز دو دایره تشکیل

[1] Surface Plasmon-Polaritons
[2] Photonic Integrated Circuits
[3] Sensors
[4] Switches
[5] Couplers
[6] Wavelength Division Multiplexers
[7] Transmittance
[8] Perfect Match Layers

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

دهنده هلال) مساوی 40nm و R (بیشترین ضخامت هلال) نیز 50nm فرض شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده بیان‌گر این واقعیت است که بهترین عملکرد دستگاه وقتی است که فواصل بین موجبر و کاواک با یکدیگر برابر باشند. بدین دلیل مقادیر d_1 و d_2 به صورت مساوی و به اندازه 10nm در نظر گرفته شده‌اند. در بررسی‌های انجام شده در این مقاله، گذردهی نقره از قالب درود[1] تبعیت می‌کند[۹]:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \qquad (۱)$$

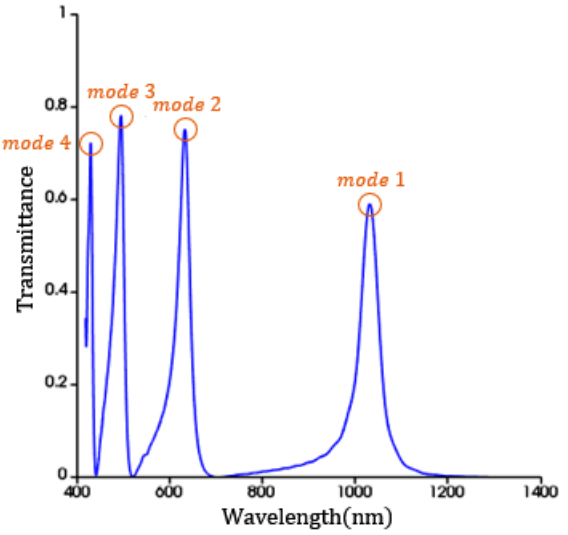
که $\varepsilon_\infty = 3.7, \omega_p = 9.1eV, \gamma = 0.018eV$ می‌باشند. طول‌موج تشدید را می‌توان مطابق زیر توصیف نمود[۱۰]:

$$\lambda_{res} = \frac{2 l_{eff} \, Re(n_{eff})}{m - \frac{\theta}{\pi}} (m = 1,2,3,...) \qquad (۲)$$

که در این رابطه، λ_{res} طول‌موج تشدید، l_{eff} طول مؤثر کاواک و n_{eff} ضریب شکست مؤثر می‌باشد. همچنین m مرتبه مد و θ نیز میزان تغییر فاز پرتو از یک انتهای کاواک است. با توجه به رابطه (۲)، طول موج تشدید را می‌توان با تغییر طول مؤثر کاواک و ضریب شکست مؤثر تنظیم نمود.

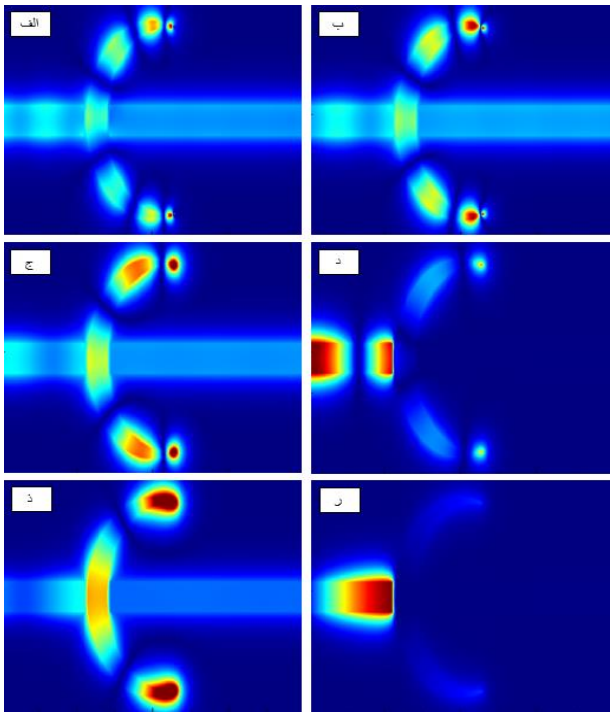
نتایج شبیه سازی و بحث

برای بررسی بیشتر، طیف عبور از ساختار با ابعاد پیشنهادی را محاسبه کرده که در شکل (۲) نشان داده شده است. برای محاسبه طیف عبور، میزان توان وارد و خارج شده از دستگاه را مطابق شکل (۱) در دو نقطه ورودی و خروجی محاسبه و از رابطه $T = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ استفاده می‌کنیم. همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است، پس از شبیه‌سازی با روش FDTD،



شکل۲. طیف عبور ساختار پیشنهادی و نمایش مدهای مختلف تشدید در طول موج های 1030nm، 632nm، 494nm و 429nm

این ساختار دارای چهار نقطه تشدید در طول‌موج‌های 1030nm برای مد تشدید۱، 632nm برای مد تشدید۲،

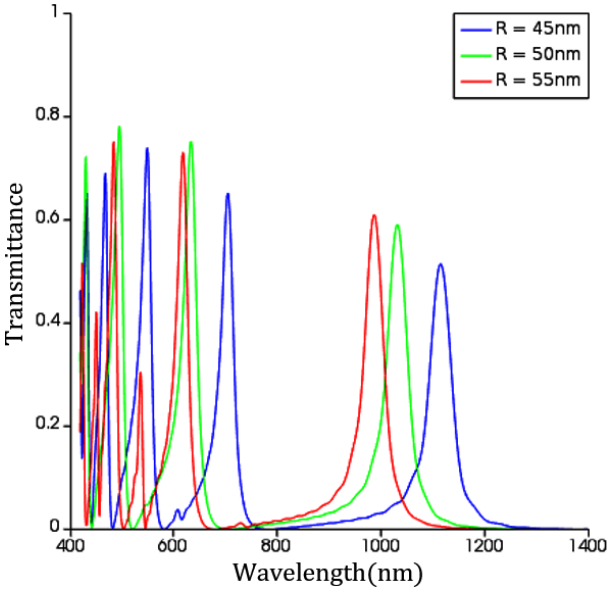


شکل۳. نمایش توزیع میدان |Hz| نرمالیزه شده در طول‌موج‌های الف) 429nm، ب)494nm، ج)632nm، د)703nm، ذ)1030nm و ر)1500nm

[1] Drude model

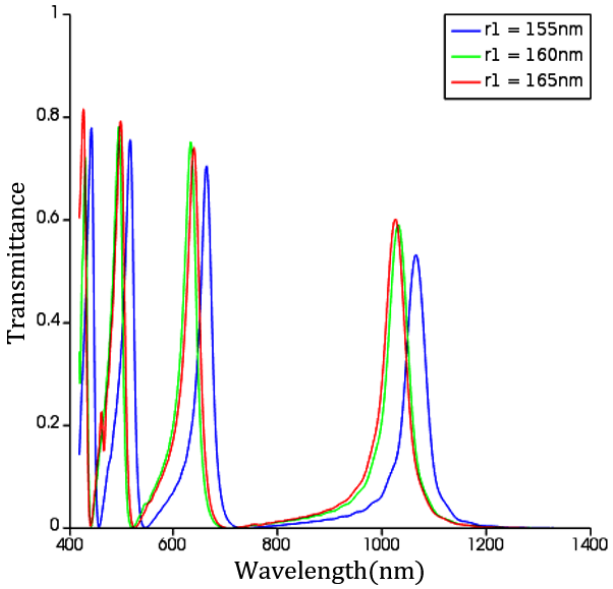
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

494nm برای مد تشدید۳ و 429nm برای مد تشدید۴ می‌باشد. برای درک بهتر مکانیسم داخلی طیف عبوری از این فیلتر پلاسمونی، توزیع میدان $|H_z|$ را در نقاط تشدید و چند نقطه غیرتشدیدی، بررسی می‌کنیم که نتایج در شکل (۳الف- د) نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل (۳) دیده می‌شود، در مدهای تشدید، میدان در کاواک هلالی شکل برانگیخته شده و مقدار عبور طیف بیشینه است ولی در حالت‌های غیرتشدیدی، میزان عبور طیف کاهش شدید را نشان می دهد. برای مدهای اول تا چهارم مقدار FWHM به ترتیب 46nm، 30nm، 24nm و 12nm بوده که مقادیر مناسبی برای عملکرد فیلتر می‌باشد. اکنون با هدف بررسی نحوه عملکرد دستگاه با تغییر ابعاد ساختار، به بررسی میزان طیف عبور ناشی از تغییر در مقدار پهنای بیشینه هلال (R) می‌پردازیم. از شکل (۴) در می‌یابیم که با افزایش مقدار R، طول‌موج تشدید به سمت مقادیر کوچک‌تر انتقال می‌یابد(blue-shift) که میزان این تغییر با کاهش طول‌موج، کمتر می شود. با افزایش R، هر چند تا حدودی مقدار عبور در طول موج‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد، ولی با بزرگ‌تر شدن مقدار R از 50nm، مقدار طیف عبور برای مد چهارم تشدید تقریباً به نصف کاهش می‌یابد.



شکل۴. نمایش طیف عبور فیلتر در صورتی که R از 45nm تا 55nm با گام های 5nm افزایش یافته و w=50nm، r_1=160nm، r_2=170nm، D=40nm باشند.

بنابراین 50nm بهینه‌ترین مقدار R برای داشتن حداکثر تعداد نقاط تشدید طول‌موج با بیشترین درصد طیف عبور قابل استفاده در فیلتر میان‌گذر می باشد. اکنون R را مساوی 50nm و با ثابت فرض کردن سایر پارامترهای ساختار، تأثیر



شکل۵. نمایش طیف عبور فیلتر در صورتی که r_1 از 155nm تا 165nm با گام های 5nm افزایش یافته و w=50nm، R=50nm، r_2=170nm، D=40nm باشند.

تغییر r_1 بر عملکرد دستگاه را بررسی می‌کنیم. مطابق شکل (۵)، با افزایش مقدار r_1 طول‌موج تشدید کاهش می‌یابد. با توجه به حساسیت کمتر و میزان خطای مورد پذیرش برای ساخت دستگاه پیشنهادی در طول‌موج‌های پایین‌تر، استفاده از این ساختار به عنوان فیلتر پلاسمونی در مدهای بالاتر مناسب می باشد. همان طور که از شکل (۲) نیز مشخص است، در طول‌موج های بزرگتر از 1200nm، مقدار طیف عبور بسیار به صفر نزدیک می‌شود. پس می‌توان علاوه بر فیلتر میان‌گذر، از این دستگاه به عنوان فیلتر حذفی نیز برای طول‌موج‌های بزرگ‌تر از 1200nm استفاده نمود.

نتیجه گیری

به طور خلاصه، ساختاری شامل MIM به همراه کاواک هلالی شکل پیشنهاد و توسط روش عددی FDTD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این ساختار، طیف عبوری از

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

چهار طول‌موج تشدید تشکیل شده که با توجه به FWHM بسیار باریک مدهای تشدید و میزان طیف عبور مناسب، دستگاه می تواند به عنوان فیلتر میان‌گذر در بازه وسیع طول‌موجی به خصوص در مدهای بالاتر استفاده شود. همچنین بررسی‌ها حاکی از آن است که میزان طیف عبور در طول‌موج‌های بزرگ‌تر از 1200nm نزدیک به صفر بوده و بدین ترتیب استفاده از این دستگاه به عنوان فیلتر حذفی نیز پیشنهاد می‌گردد.

مرجع‌ها

[1] A. Bianconi (2002), "Ugo Fano and shape resonances", AIP Conference Proceedings, 19th Int. Conference Roma June 24-28.

[2] Jianfeng Chen, Jina Li, Xing Liu, Siti Rohimah, He Tian, Dawei Qi (2021), "Progress in Electromagnetics Research", Vol.96,147-156.

[3] L. Shi, J. He, C. Tan, Y. Liu, J. Hu, X. Wuc, M. Chen, X. Zhang, Sh. Zhan (2019), "Plasmonic filter with highly selective wavelength in a fixed dimension based on the loaded rectangular ring cavity", Optics Communication, 439 (2019) 125-128.

[4] A. Hocini, H. B. salah, D. Khedrouche, N. Melouki (2020), "A high-sensitive sensor and band-stop filter based on intersected double ring resonators in metal–insulator–metal structure, Optical and Quantum Electronics", 52 (2020) 336.

[5] S. M. Ebadi, J. Örtegren, M. S. Bayati, S. B. Ram (2020), "A Multipurpose and Highly-Compact Plasmonic Filter Based on Metal-Insulator-Metal Waveguides", IEEE Photonics Journal, 12 (2020) 3.

[6] R. Negahdari, E. Rafiee, F. Emami (2018), "Design and simulation of a novel nano-plasmonic split-ring resonator filter", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 32 (2018) 15, https://doi.org/10.1080/09205071.2018.1482240.

[7] S. M. Ebadi, J. Örtegren, M. S. Bayati, S. Bonyadi Ram, "A Multipurpose and Highly-Compact Plasmonic Filter Base on Metal-Insulator-Metal Waveguides", IEEE Photonics Journal, Vol. 12, No. 3, 2020.

[8] M. Mishra, M. Sharma, P. Gupta (2021), "Compact MIM plasmonic ring resonator for nano-interconnect applications", Physica E, 130 (2021) 114711.

[9] R. Negahdari, E. Rafiee, F. Emami (2019), "Realization of all-optical plasmonic MIM split square ring resonator switch", Optical and Quantum Electronics, 51 (2019) 235, https://doi.org/10.1007/s11082-019-1924-7.

[10] Y. F. Chou Chau, C. T. C. Chao, H. J. Huang and et.al, "Ultrawide Bandgap and High Sensitivity of a Plasmonic Metal-Insulator-Metal Waveguide Filter with Cavity and Baffles", nanomaterials, Vol. 10, No. 10, 2020.

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