بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

دی‌مالتی پلکسر پلاسمونیکی مبتنی بر تشدیدکننده‌های نانو دیسک و نانو حلقه

آرمان امیری فقانی،کامبیز عابدی و کیان جعفری

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،

a.amirifaghani@.mail.sbu.ac.ir , k_abedi@sbu.ac.ir , k_jafari@sbu.ac.ir

چکیده- در این مقاله، ساختاری برای دی‌مالتی پلکسر طول موج (WDM) چند کاناله مبتنی بر تشدیدکننده‌های نانو دیسک و نانو حلقه در موجبرهای پلاسمونیکی فلز-عایق-فلز (MIM) پیشنهاد شده‌است. ساختار WDM شامل یک موجبر باس و چندین نانو دیسک و نانو حلقه می‌باشد، ساختار پیشنهادی متشکل از چندین فیلتر است که می‌توان آن را به کانال‌های N×۱ توسعه داد. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهند که در ساختار طراحی شده، FWHM حدوداً ۱۸ نانومتر بدست می‌آید که می‌تواند در نانوحسگرها، مدارات مجتمع نوری و ادوات دی‌مالتی پلکسر فوق فشرده مورد استفاده قرار گیرد. روش عددی بکاررفته در این مقاله، روش حوزه‌ی زمان تفاضل محدود (FDTD) دو بعدی است.

کلید واژه- دی‌مالتی پلکسر طول موج، فلز-عایق-فلز،موجبر باس، نانو دیسک، نانو حلقه

Plasmonic Demultiplexer Based on Nanodisk and Nanoring Resonators

Arman Amiri-Faghani, Kambiz Abedi and Kian Jafari

Departemant of Electerical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper, a structure for multi-channel Wavelength demultiplexer (WDM) based on nanodisk and nanoring resonators Metal-Insulator-Metal (MIM) plasmonic waveguides is proposed. WDM structure consists of a bus waveguide and several nano-disks and nanorings. The proposed structure consists of several filters that can be extended to 1 × N channels. The simulation results show in the designed structure, Full-Width Half-Maximum (FWHM) of about 18 nm achieves and can be used in nanosensors, optical integrated circuits, nanoscale WDM systems, and the ultra-compact demultiplexer devices. In this paper, the used numerical method is two dimensional Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method.

Keywords: Wavelength Demultiplexer, Metal-Insulator-Metal, Bus Waveguide, Nanodisk, Nanoring

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

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

مقدمه

پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPP) نقش بسیار مهمی در افزایش نوری، جذب و دستکاری نور در نانوساختارهای فلزی دارند [۲،۱]. در سال‌های اخیر پیشرفتهای چشمگیری در توسعه نانوساختارهای پلاسمونیکی مانند طیف بینی رامان تقویت یافته‌ی سطحی، حسگرهای زیستی / شیمیایی، موجبرهای نوری ، لیزرها ، بازتابنده ها و ادوات منطقی صورت گرفته است [۳]. در بین ساختارهای پلاسمونیکی، ساختار فلز-عایق-فلزی (MIM) دارای بیشترین توانایی برای محدود کردن توان نوری به ناحیه دی‌الکتریک با طول انتشار متوسط دارد [۵،۴]. به غیر از این، ساختار MIM توانایی فائق آمدن به حدپراش را نیز دارند. در سال‌های اخیر توجه زیادی به تشدید کننده‌های فانو پلاسمونیکی شده است. این پدیده از برهمکنش تزویج بین یک مد پیوسته و یک مد گسسته ایجاد می‌شود. تشدید فانو که توسط ساختارهای پلاسمونیکی ایجاد می‌شود، شدیداً به فرم و ابعاد و مواد محیط آن بستگی دارد [۳].

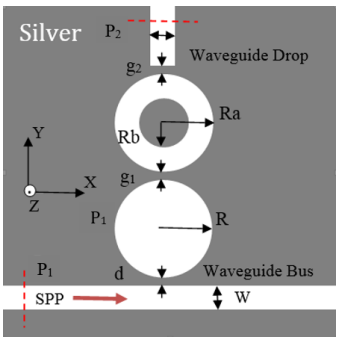
در این مقاله، یک WDM پلاسمونیکی ۳×۱ طراحی و به صورت عددی با استفاده از روش FDTD مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختار پیشنهادی مبتنی بر تشدید کننده‌های نانو دیسک و نانو حلقه است که به صورت آبشاری قرار گرفته اند که سبب ایجاد اثر تشدید فانو در ساختار می‌شود. تشدید کننده‌های ساختار پیشنهادی به یک موجبر باس در ورودی و سه موجبر دراپ در خروجی تزویج شده‌اند. از ساختار WDM پیشنهادی در مدارات مجتمع نوری، نانوحسگرها و دی‌مالتی پلکسرهای فوق فشرده می‌توان استفاده کرد. با استفاده از روش FDTD ویژگی‌های انتقالی مانند دامنه، FWHM و تعداد مدهای انتقالی را محاسبه می‌شود.

ساختار پایه و شبیه سازی‌ها

عملکرد ساختار دی‌مالتی پلکسر پیشنهادی متشکل از فیلترهای پلاسمونیکی است. شکل ۱ نشان دهنده فیلتر پلاسمونیکی متشکل از یک موجبر باس و یک موجبر دراپ است که به صورت افقی و عمودی قرار گرفته‌اند. یک کاواک دیسکی و یک کاواک حلقه‌ای به صورت عمودی (آبشاری) در یک موجبر MIM تعبیه شده‌اند. عرض موجبرهای باس و دراپ (W)، شعاع نانو دیسک (R) ، شعاع‌های داخلی (Rb) و خارجی (Ra) نانو حلقه بترتیب برابر ۲۴۰،۳۰۵،۵۰ و ۳۰۵ نانومتر می‌باشند. دیگر پارامترهای هندسی ساختار، d برابر ۸ نانومتر و $g_1 = g_2$ برابر ۱۰ نانومتر هستند. جنس عایق، هوا فرض شده (نواحی سفید)، و جنس فلز انتخاب شده، نقره است (نواحی خاکستری). ثابت دی‌الکتریک نقره نیز همان طور که در اکثر مراجع پلاسمونیکی ذکر شده با مدل مشهور درود (Drude) مشخص شده‌است [۳].

$$\varepsilon_m(m) = \varepsilon_\infty - \omega_\rho^2/\omega(\omega + i\gamma) \qquad (۱)$$

در معادله (۱) ε_∞ که ثابت دی‌التریک در فرکانس بینهایت است برابر ۳،۷، ω_ρ فرکانس پلاسما کپه‌ای برابر $۱،۳۸\times۱۰^{۱۶}$ هرتز و فرکانس برخورد الکترونی یا فرکانس اتلاف نوسان‌ها برابر $۲،۷۳\times۱۰^{۱۳}$ هرتز می‌باشد، ω فرکانس زاویه‌ای موج فرودی است. این مقادیر در بیشتر مراجع صادق است [۳،۲].



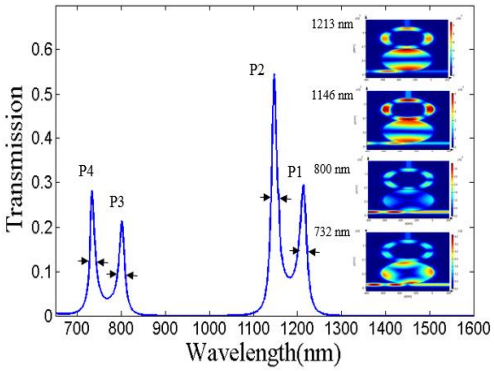
شکل ۱: طرحواره فیلتر پلاسمونیکی پیشنهادی با یک حلقه و یک دیسک

همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، چهار پیک تشدید در خروجی طیف انتقالی فیلتر پلاسمونیک ایجاد شده‌است،

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

که بترتیبP1, P2, P3 و P4 با طول موج‌های ۱۲۱۳،۱۱۴۶، ۸۰۰ و ۷۳۲ نانومتر نشان داده شده‌است. پروفایل توزیع میدان |Hz| در شکل ۲ نشان می‌دهد که هرچه تزویج بین موجبر باس و کاواک های آبشاری قوی‌تر، دامنه طیف انقالی بیشتر خواهد بود برای مثال، در طول موج ۱۱۴۶ نانومتر تزویج قوی‌تری (نواحی رنگی) نسبت به طول موج ۸۰۰ نانومتر وجود دارد.



شکل ۲: طیف انتقال فیلتر پلاسمونیک طراحی شده شکل ۱ به همراه پروفایل توزیع میدان |Hz| در طول موج‌های مختلف.

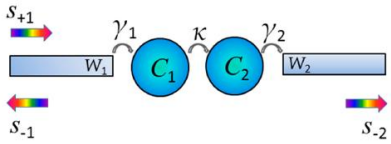
به منظور درک درست از تئوری ساختار آبشاری، تئوری مد تزویج زمانی برای تشدید کننده فانو استفاده می‌شود. شکل ۳ دو کاواک آبشاری با بازوهای موجبر تزویج شده بصورت Ci و Wi(i = 1,2..) نشان می‌دهد. وابستگی زمانی (e^{-jwt}) هارمونیکی در نظر می‌گیریم که در آن j تعداد موهومی، شدت میدان در کاواک Ci با استفاده از ai(i=1,2..) توصیف می‌شود [۳].

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} = (j\omega_1 - \gamma_1)a_1 + j\sqrt{2\gamma_1}s_{+1} - jka_2 \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} = (j\omega_2 - \gamma_2)a_2 + j\sqrt{2\gamma_1}s_{+2} - jka_1 \qquad (۳)$$

$$s_{-i} = -s_{+i} + j\sqrt{2\gamma_i}a_i \qquad i(1,2..) \qquad (۴)$$

s ± i (i = 1, 2…) ورودی و خروجی بازوی موجبر W_i و ω_i فرکانس تشدید کاواک Ci است. γ_i ضریب تزویج بین کاواک Ci و بازوی موجبر W_i می‌باشد. k ضریب تزویج دوطرفه بین دو کاواک Ci است.



شکل ۳: مدل ساده دو کاواک آبشاری تزویج شده با دو موجبر [۳].

انتقال T از درگاه چپ به راست از معادلات (۲) و (۴) محاسبه می‌شود.

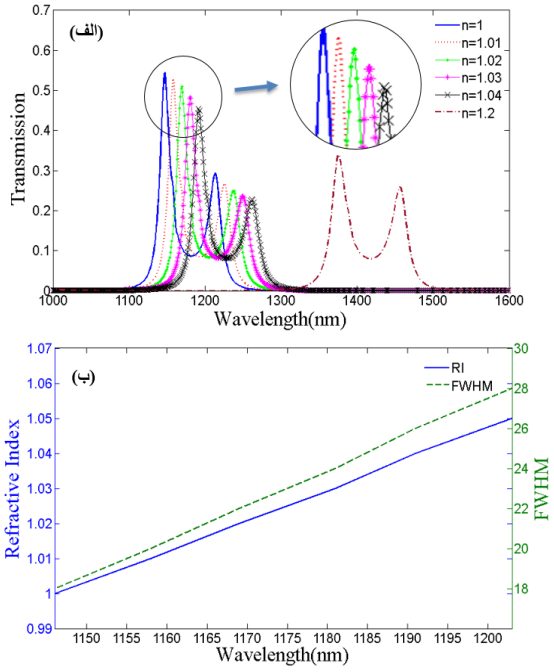
$$T = \left|\frac{s_{-2}}{s_{+1}}\right|^2 \qquad (۵)$$

$$= \left|\frac{2jk\sqrt{\gamma_1\gamma_2}}{(j\omega - j\omega_1 + \gamma_1)(j\omega - j\omega_2 + \gamma_2 + k^2)}\right|^2$$

در معادله (۵) s_{+1} میدان ورودی و s_{-2} میدان خروجی است. k ضریب تزویج بین دو کاواک c_1 و c_2 می‌باشد. γ_1 و γ_2 ضریب تزویج بین کاواک دو کاواک c_1 و c_2 با بازوهای w_1 و w_2 را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های انتقال با پارامترهای مختلف

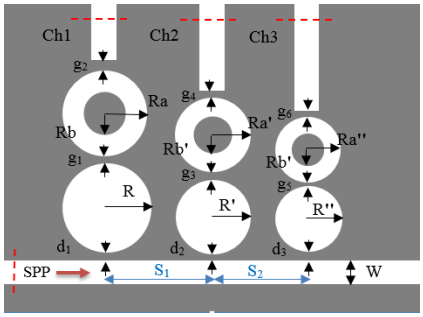
شکل۳ (الف) تغییرات طیف‌های انتقال را نسبت به تغییرات ضریب شکست (RI) نشان می‌دهد.



شکل ۳: (الف) طیف انتقالی فیلتر پلاسونیک طراحی شده با ضرایب شکست مختلف برای دو پیک P1 و P2 . (ب) منحنی ضریب شکست و FWHM به صورت تابعی از طول موج

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل ۴: طرحواره ساختار WDM با سه کانال خروجی

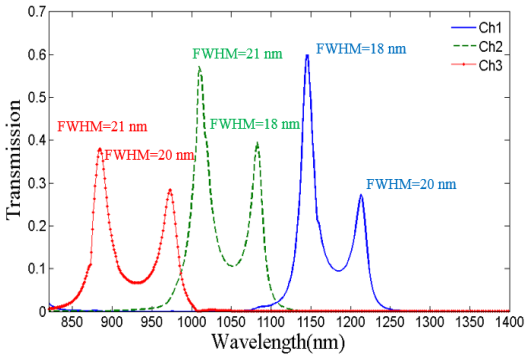
طراحی و شبیه سازی دی‌مالتی پلکسر پلاسمونیک سه کاناله

شکل ۴ طرحواره ساختار موجبر WDM ۳×۱ با قابلیت ایجاد شش مد تشدید را نشان می‌دهد. ساختار WDM پیشنهاد شده متشکل از یک موجبر باس و سه موجبر دراپ است و سه جفت دیسک و حلقه که به صورت آبشاری با ابعاد متفاوت قرار گرفته‌اند.

شکل ۵ طیف‌های انتقالی ساختار پیشنهاد شده برای هر کانال به همراه FWHM را نشان می‌دهد. با توجه به ساختار، در اولین دیسک و حلقه طول موج های بالاتر را پوشش می‌دهد. حداقل FWHM در طیف‌های انتقالی خروجی ۱۸ نانومتر است.

جدول ۱: پارامترهای هندسی ساختار طراحی شده

پارامترهای ساختار	ابعاد (نانومتر)	پارامترهای ساختار	ابعاد (نانومتر)
Ra	۲۴۰	d_1	۸
Ra'	۲۶۰	d_2	۸
Ra"	۲۲۰	d_3	۸
Rb	۲۴۰	g_1	۱۰
Rb'	۳۰۵	g_2	۱۰
Rb"	۱۷۵	g_3	۱۰
R	۳۰۵	g_4	۱۰
R'	۲۶۰	g_5	۱۰
R"	۲۲۰	g_6	۱۰
S_1	۹۸۵	S_2	۸۹۰



شکل ۵: طیف‌های انتقالی ساختار WDM پیشنهاد شده

نتیجه‌گیری

دی‌مالتی پلکسر سه کاناله مبتنی بر تشدید کننده‌های نانو دیسک و نانو حلقه طراحی و به صورت عددی به روش FDTD بررسی شد. ویژگی‌های انتقال ساختار با تغییر پارامترهای هندسی و ضریب شکست قابل تنظیم بود. خروجی هر کانال دارای دو مد تشدید با FWHM مناسب بود. ساختار طراحی شده قابلیت استفاده در نانوحسگرها، مدارات مجتمع نوری و توسعه ادوات دی‌مالتی پلکسرفوق فشرده مورد استفاده قرار گرفته‌است.

مرجع‌ها

[1] D. Xiang and W. Li, "MIM plasmonic waveguide splitter with tooth-shaped structures", *Journal of Modern Optics*, vol. 61, no. 3, pp. 222-226, 2014.

[2] X. YAO, "Wavelength Demultiplexing In Metal–Insulator–Metal Plasmonic Waveguides", *Modern Physics Letters* B, vol. 28, no. 04, p. 1450025, 2014.

[3] X. Zhang, M. Shao and X. Zeng, "High Quality Plasmonic Sensors Based on Fano Resonances Created through Cascading Double Asymmetric Cavities", *Sensors*, vol. 16, no. 10, p. 1730, 2016.

[4] C. Wu, C. Huang and Y. Lee, "Plasmonic wavelength demultiplexer with a ring resonator using high-order resonant modes", *Applied Optics*, vol. 56, no. 14, p. 4039, 2017.

[5] H. Lu, X. Liu, D. Mao, L. Wang and Y. Gong, "Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators", *Optics Express*, vol. 18, no. 17, p. 17922, 2010.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]