



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 پلاسمونیک مبتنی بر تشدیدکننده‌های نانو دیسک و نانو حلقه آرمان امیری فغانی، 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 پلاسمونیک فلز-عایق-فلز (MIM) پیشنهاد شده است. 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  $1 \times N$  توسعه داد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که در ساختار طراحی شده، FWHM حدوداً ۱۸ نانومتر بدست می‌آید که می‌تواند در نانو-حسگرها، مدارات مجتمع نوری و ادوات دی‌مالتی پلکسر فوق‌فشرده مورد استفاده قرار گیرد. روش عددی بکاررفته در این مقاله، روش حوزه‌ی زمان تفاضل محدود (FDTD) دو بعدی است.

کلیدواژه- 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  $1 \times N$  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

## مقدمه

پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPP) نقش بسیار مهمی در افزایش نوری، جذب و دستکاری نور در نانو ساختارهای فلزی دارند [۲۰،۱]. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در توسعه نانو ساختارهای پلاسمونیک مانند طیف بینی رامان تقویت یافته‌ی سطحی، حسگرهای زیستی / شیمیایی، موجبرهای نوری، لیزرها، بازتابنده‌ها و ادوات منطقی صورت گرفته است [۳]. در بین ساختارهای پلاسمونیک، ساختار فلز-عایق-فلزی (MIM) دارای بیشترین توانایی برای محدود کردن نور 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 پلاسمونیک شده است. این پدیده از برهمکنش تزویج بین یک مد پیوسته و یک مد گسسته ایجاد می‌شود. تشدید فانو که توسط ساختارهای پلاسمونیک ایجاد می‌شود، شدیداً به فرم و ابعاد و مواد محیط آن بستگی دارد [۳].

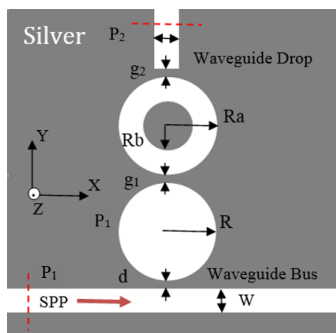
در این مقاله، یک WDM پلاسمونیک  $1 \times 3$  طراحی و به صورت عددی با استفاده از روش FDTD مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختار پیشنهادی مبتنی بر تشدید کننده‌های نانو دیسک و نانو حلقه است که به صورت آبشاری قرار گرفته اند که سبب ایجاد اثر تشدید فانو در ساختار می‌شود. تشدید کننده‌های ساختار پیشنهادی به یک موجبر باس در ورودی و سه موجبر دراپ در خروجی تزویج شده‌اند. از ساختار WDM پیشنهادی در مدارات مجتمع نوری، نانوحسگرها و دی‌مالتی پلکسرها ی 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

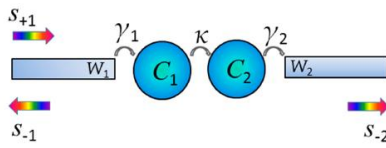
عملکرد ساختار دی‌مالتی پلکسر پیشنهادی متشکل از فیلترهای پلاسمونیک است. شکل ۱ نشان دهنده فیلتر پلاسمونیک متشکل از یک موجبر باس و یک موجبر دراپ است که به صورت افقی و عمودی قرار گرفته‌اند. یک کاواک دیسکی و یک کاواک حلقه‌ای به صورت عمودی (آبشاری) در یک موجبر MIM تعبیه شده‌اند. عرض موجبرهای باس و دراپ ( $W$ )، شعاع نانو دیسک ( $R$ )، شعاع‌های داخلی ( $R_b$ ) و خارجی ( $R_a$ ) نانو حلقه به ترتیب برابر  $240, 305, 50$  و  $305$  نانومتر می‌باشند. دیگر پارامترهای هندسی ساختار،  $d$  برابر  $8$  نانومتر و  $g_1 = g_2$  برابر  $10$  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 پلاسمونیک ذکر شده با مدل مشهور درود (Drude) مشخص شده است [۳].

$$\varepsilon_m(m) = \varepsilon_\infty - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\gamma) \quad (1)$$

در معادله (۱)  $\varepsilon_\infty$  که ثابت دی‌الکتریک در فرکانس بینهایت است برابر  $3,7$ ،  $\omega_p$  فرکانس پلازما کپه‌ای برابر  $1,38 \times 10^{16}$  هرتز و فرکانس برخورد الکترونی یا فرکانس اتلاف نوسان‌ها برابر  $10^{13} \times 2,73$  هرتز می‌باشد،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای موج فرودی است. این مقادیر در بیشتر مراجع صادق است [۳،۲].



شکل ۱: طرحواره فیلتر پلاسمونیک 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 شده است،



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

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

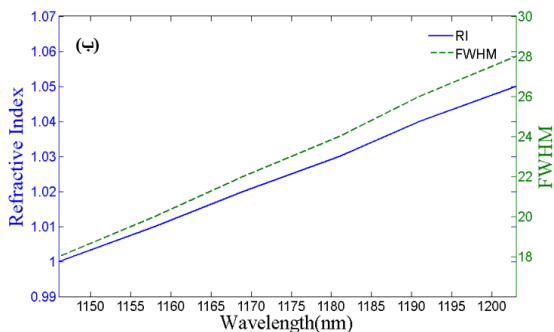
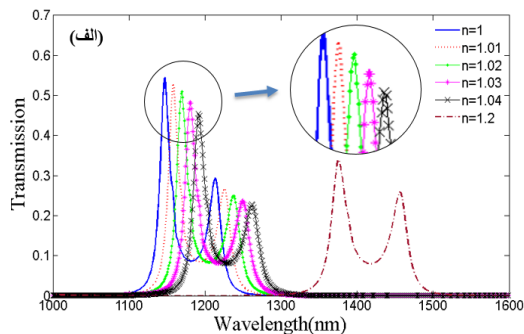
$$T = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 \quad (۵)$$

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

در معادله (۵) میدان ورودی و  $S_{+1}$  میدان خروجی  $S_{-2}$  است. ضریب تزویج بین دو کاواک  $C_1$  و  $C_2$  می‌باشد.  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  ضریب تزویج بین دو کاواک  $C_1$  و  $C_2$  با بازوهای  $W_1$  و  $W_2$  را نشان می‌دهد.

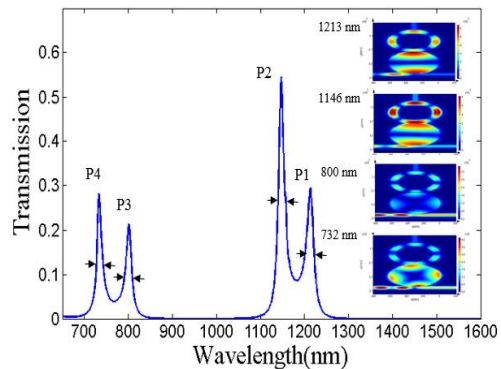
### ویژگی‌های انتقال با پارامترهای مختلف

شکل ۳ (الف) تغییرات طیف‌های انتقال را نسبت به تغییرات ضریب شکست (RI) نشان می‌دهد.



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

که بترتیب P1, P2, P3 و P4 با طول موج‌های ۱۱۴۶، ۱۲۱۳، ۸۰۰ و ۷۳۲ نانومتر نشان داده شده‌است. پروفایل توزیع میدان  $|Hz|$  در شکل ۲ نشان می‌دهد که هرچه تزویج بین موجبر باس و کاواک‌های آبخاری قوی‌تر، دامنه طیف انتقالی 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.

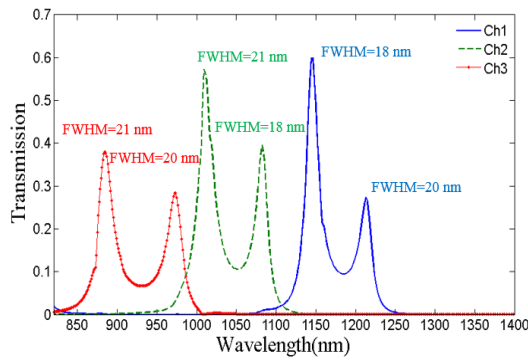
به منظور درک درست از تئوری ساختار آبخاری، تئوری مد تزویج زمانی برای تشدید کننده فانو استفاده می‌شود. شکل ۳ دو کاواک آبخاری با بازوهای موجبر تزویج شده بصورت  $C_i$  و  $W_i$  ( $i=1,2,..$ ) نشان می‌دهد. وابستگی زمانی هارمونیک  $(e^{-j\omega t})$  در آن تعداد موهومی، شدت میدان در کاواک  $C_i$  با استفاده از  $a_i$  ( $i=1,2,..$ ) توصیف می‌شود [۳].

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

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

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

و  $s_{\pm i}$  ( $i=1,2,..$ ) ورودی و خروجی بازوی موجبر  $W_i$  و  $\omega_i$  فرکانس تشدید کاواک  $C_i$  است. ضریب تزویج بین کاواک  $C_i$  و بازوی موجبر  $W_i$  می‌باشد.  $k$  ضریب تزویج دوطرفه بین دو کاواک  $C_i$  است.



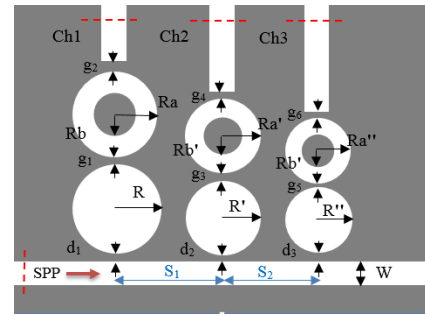
شکل ۵: طیف‌های انتقالی ساختار WDM پیشنهاد شده

### 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.



شکل ۴: طرحواره ساختار WDM با سه کانال خروجی

### طراحی و شبیه‌سازی دی‌مالتی پلکسر پلاسمونیک سه کاناله

شکل ۴ طرحواره ساختار موجبر WDM  $1 \times 3$  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 موج‌های 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 <sub>1</sub>	۸
Ra'	۲۶۰	d <sub>2</sub>	۸
Ra''	۲۲۰	d <sub>3</sub>	۸
Rb	۲۴۰	g <sub>1</sub>	۱۰
Rb'	۳۰۵	g <sub>2</sub>	۱۰
Rb''	۱۷۵	g <sub>3</sub>	۱۰
R	۳۰۵	g <sub>4</sub>	۱۰
R'	۲۶۰	g <sub>5</sub>	۱۰
R''	۲۲۰	g <sub>6</sub>	۱۰
S <sub>1</sub>	۹۸۵	S <sub>2</sub>	۸۹۰