



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



## طراحی و شبیه سازی دی مالتی پلکسر نوری بر اساس آرایه هپتامر از نانو ذرات حلقوی طلا

مرتضی نقیبی<sup>۱</sup>، سعید گل محمدی<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز- گروه مهندسی برق-الکترونیک
۲. دانشگاه تبریز- دانشکده مهندسی فناوری های نوین

### چکیده

در این مقاله، تنظیمات و جهت گیری های جدیدی از نانو حلقه های هپتامر صورت گرفته است که تزویج و هدایت شدید موثر پلاسمونی مورد بحث قرار می گیرد. بر این اساس، یک (دی) مالتی پلکسر کارآمد ارائه داده شده است که دو طول موج مخابراتی را از هم جدا می کند (  $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$  ) با برخورد سیگنال نوری بر روی مسیر اصلی و هدایت آن به انتهای مسیر اصلی هر یک از طول موج ها از سیگنال نوری جدا شده و به مسیر مشخص شده هدایت می شود. جهت تحقق این کار، از آرایه های نانو حلقه طلا با اندازه های هندسی خاصی به صورت هپتامر در دو بازوی دی مالتی پلکسر استفاده شده است که توسط مواد سیلیکا احاطه شده است. نشان داده شده است که میزان جداسازی طول موج ها در ساختار ارائه شده این مقاله نسبت به نمونه های قبلی بیشتر، اتلاف کمتر و همچنین همشناوبی نیز کمتر است.  
کلید واژه: هپتامر نانو حلقه، پلاسمون های سطحی، (دی) مالتی پلکسر

## Designing and Simulation of Optical Demultiplexer Based on Gold Nanorings

Morteza Naghibi<sup>1</sup>, Saeed Golmohammadi<sup>2</sup>

۱. Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University Tabriz Branch, Tabriz, Iran

۲. School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz ۵۱۶۶۶۱۴۷۶۱, Iran

### Abstract

In this paper, a new configuration based on heptamer of nano-rings is presented which works based on direct coupling of plasmonic resonance. Accordingly, a well-organized demultiplexer structure designed that separates two telecommunication wavelength ( $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$ ,  $\lambda \approx 1310 \text{ nm}$ ). The input two wavelength light signal is directed into two different output ports based on their wavelengths. In order to separate two wavelengths specific geometric arrays of nano-size gold rings in the two arms of heptamer structure are employed which surrounded by silica material. We have demonstrated that in comparison to other given demultiplexers, our given structure efficiently separates 2 input wavelengths with lower loss and crosstalk.

Keywords: Nano ring heptamer, Surface plasmons, Demultiplexer

## ۱-مقدمه:

در حال حاضر مطالعات و کاربردهای مهمی از پلاسمون-های سطحی با استفاده از طراحی و تولید ساختارهای نانو انجام می‌شود [۱]. پلاسمون‌های سطحی در زنجیره‌های نانو ذرات با اشکال مختلف از فلزات نجیب همانند نقره، طلا و مس و حتی آلومینیوم تولید می‌شوند [۲]. یک نمونه از ساختارهای زنجیره‌ای ارائه شده هپتامرها هستند که در این ساختارها رزونانس‌های پلاسمونی با تابش در یک فرکانس مشخص پدید می‌آیند [۳، ۴]، این تشدیدها به عنوان پلاسمون رزونانس سطحی جایگزیده شناخته می‌شوند. در بسیاری از پیکربندی‌های مجتمع و ساختارهای نانوفتونیکی بر اساس تحریک پلاسمون‌های سطحی در داخل نانو ذرات و قطعات عمل می‌کنند [۳]. (دی)مالتی پلکسر قادر به جدا کردن دو یا چند طول موج متفاوت از یکدیگر و انتقال هر یک به پورت خروجی جدا از طریق مسیرهای خاص است. دی مالتی پلکسر ها یکی از قطعات اصلی هستند که می‌توانند بر اساس عناصر پلاسمونیک طراحی و ساخته شوند که این قطعات جزء عناصر با ابعاد زیر طول موج هستند. موجبرهای پلاسمونیک که بر اساس آرایه‌های نانو از ذرات فلزی هستند و می‌توانند توان نوری را زیر حد پراش هدایت کنند [۵، ۶]. شکل و جنس نانو ذرات نقش اساسی در تحریک پلاسمون‌های سطحی در فرکانس مشخص بین نانو ذرات فلزی و دی‌الکتریک بازی می‌کنند. از نانو کره‌ها و نانو میله‌ها می‌توان در قطعات پلاسمونی در بازه طیفی مادون قرمز استفاده کرد، اما تلفات ساختاری آنها قابل توجه است و نمی‌توان عوامل مؤثر در اندازه تلفات را به طور کامل با توجه به ساختار ساده آنها کنترل کرد. به دلیل قابل کنترل بودن ابعاد ساختاری نانو حلقه‌ها، می‌توان تشدید پلاسمونی با شدت بالا در طیف مخابراتی قابل حصول است [۷]. تنظیمات در سه بخش هندسی نانو حلقه ها ( ضخامت، شعاع داخلی و ارتفاع) کمک می‌کند تا قله تشدید پلاسمونی در طیف دلخواه قابل تنظیم باشد. در این مقاله ساختار یک (دی)مالتی پلکسر مبتنی بر ساختار هپتامر متشکل از نانوحلقه‌ها برای جداسازی دو طول موج ارائه شده است. زنجیره هپتامرها به دلیل تولید جریان‌های ضد حلقه فاز در نانو خوشه‌های فلزی، پلاسمون مغناطیسی را پشتیبانی می‌کند. هنگامی که ذرات در کنار هم قرار می‌گیرند، از ترکیب پلاسمون‌ها و

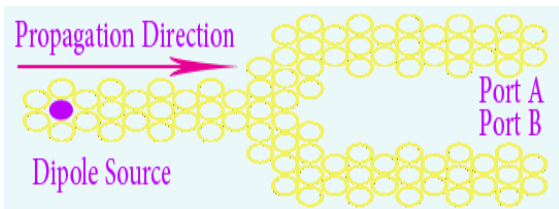
پیوند آنها حالت‌های جدید پلاسمونی بانندی و ضد بانندی پدیدار می‌شوند [۹]. این تعامل شباهت زیادی با تشکیل اوربیتال‌های مولکولی در یک مولکول چند اتمی چند هسته‌ای دارد. با بهره برداری از اثر تزویج تشدید پلاسمون مغناطیسی بین زنجیره هپتامرها، یک موجبر عملی جدید پلاسمونیک برای جداسازی طول‌موج‌ها طراحی شده است. با استفاده از نانو حلقه‌های فلزی با آرایش هپتامر، ساختاری با دو بازوی پلاسمونی که از یک مسیر اصلی جدا می‌شوند برای جدا سازی دو طول موج مخابراتی ( $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$ ,  $\lambda \approx 1310 \text{ nm}$ ) و هدایت آنها به مسیرهای خروجی خاص طراحی شده است. ساختار طراحی شده به شکل Y است که بازوی اصلی طوری طراحی شده است که تشدید پلاسمونی در بازه وسیعی که هر دو طول موج مذکور را شامل می‌شود، انجام می‌گیرد در حالی که در بازوهای خروجی در دو بازوی بالایی و پائینی به ترتیب تشدید برای  $1550 \text{ nm}$  و  $1310 \text{ nm}$  انجام می‌گیرد و سیگنال ورودی شامل دو طول موج از هم تفکیک می‌شوند. با استفاده از روش سعی و خطا تلاش شده است ساختاری با جداسازی بهتر و اتلاف کمتر با نانو حلقه‌های فلزی طراحی شود.

## ۲-طراحی و تحلیل دی مالتی پلکسر

در این بخش، فرایند طراحی (دی)مالتی پلکسر بر اساس نانو حلقه‌های طلا با چینش هپتامر بیان شده است. هپتامر پیشنهاد شده شامل نانوحلقه‌های سازمان یافته هستند که در مجاورت هم با نزدیکی  $2 \text{ nm}$  قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های طلای استفاده شده در این ساختار مبتنی بر ثابت جانسون کریستی می‌باشد. شبیه سازی‌های متعدد نشان داده‌است که طلا با ثابت پالیک در مدلسازی<sup>۱</sup> FDTD در بازه مادون قرمز جوابگو نیست [۵، ۸]. شکل ۱ شمای کلی ساختار (دی)مالتی پلکسر ارائه شده را نشان می‌دهد. هپتامرها توسط ماده دی الکتریک  $\text{SiO}_2$  احاطه و پر شده‌اند. تعداد سلول‌ها برای شبیه سازی ساختار، اندازه های  $dx=dy=dz$  (برای مش بندی ساختار، که جهت بدست آوردن بهترین نمودار اندازه آن باید کمتر شود)، زمان شبیه سازی، تعداد گام‌های زمانی برای شبیه سازی FDTD و تنظیمات آنها در جدول ۱ آمده است.

<sup>۱</sup> Finite Difference Time Domain

نوری را با طول موج  $1550\text{nm}$  با نشتی کمی به مسیر خروجی دیگری انتقال می‌دهد. همچنین شکل ۳ تصویر دیگری از انتقال نور جدا شده از مسیر ورودی را با طول موج  $1310\text{nm}$  در مسیر B نشان می‌دهد.



شکل ۱: طرح کلی از ساختار دی پلکسر برای طول موج های  $1550\text{nm}$  و  $1310\text{nm}$

جدول ۱: توضیحات پارامتری و تعیین مقادیر و وضعیت آنها در شبیه سازی ساختار ارائه شده

وضعیت و مقادیر	توضیحات پارامتری FDTD
تعداد سلول ها	۵۰۰۰۰۰ سلول
۲ نانومتر	فاصله سلول ( $dx=dy=dz$ )
۰,۱ فمتو ثانیه	تعداد پله های زمانی ( $dt$ )
۲۰۰۰ فمتو ثانیه	زمان شبیه سازی
۱	ضریب شکست
لایه ها کاملا همسان	شرایط مرزی
۱۲۸	تعداد لایه های کاملا همسان

جدول ۲: مقادیر ساختار ناو حلقه های طلا برای طول موج ها

مسیر اصلی	$1550\text{nm}$ یا مسیر A	$1310\text{nm}$ یا مسیر B	شناسه	مشخصات
۹۰,۵ nm	۹۰ nm	۸۷,۵ nm	Ri	شعاع داخلی
۴۲ nm	۴۲ nm	۴۰ nm	H	ارتفاع
۳۲ nm	۳۲,۵ nm	۳۵ nm	T	ضخامت

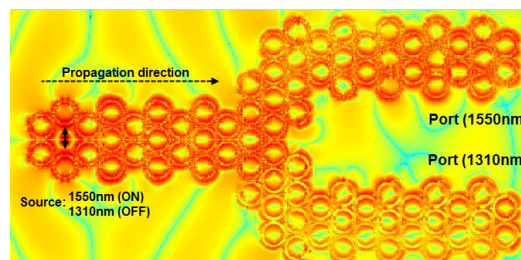
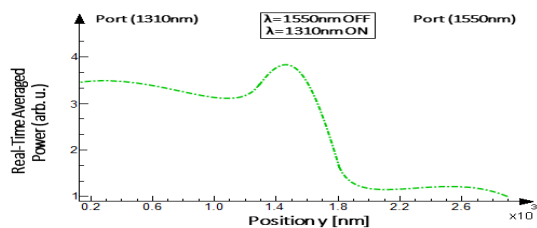
شکل ۴ زمان واقعی تغییرات توان متوسط در طول محور انتشار از طریق هر یک از مسیرها، پس از جدا سازی بخش های هیتامر را نشان می‌دهد. این نمودارها برای تعیین میزان توان انتقال یافته و تعیین مقدار نور تزویج شده در مسیر مخالف از طریق هر مسیر استفاده می‌شود. در منبع [۱۱] ثابت شده است که برای محاسبه نسبت توان انتقال یافته، جنبه پیچیده محاسبات عددی باید اعمال شود. براین اساس، توان انتقالی را از طریق بازوهای هدایتی در ساختار با نمودارهای بدست آمده، تعیین می‌کنیم. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود تلفات و نشت نور هنگام جدا سازی طول موج ها به نسبت توان انتقال یافته خیلی ناچیز صورت می‌گیرد و برای مسیر A

در مسیر اصلی در نانو ساختار هیتامر انتقال سیگنال نوری با دو طول موج  $1310\text{nm}$  و  $1550\text{nm}$  مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال طول موج ها فقط در یک مسیر و هم زمان صورت می‌گیرد و بعد از رسیدن به انتهای مسیر اصلی طول موج ها از هم جدا شده و هر کدام به مسیر خروجی مورد نظر هدایت می‌شوند. جهت انتقال توان نوری از طریق ساختار نانو حلقه نوری برخی از پارامتر های خاص باید در نظر گرفته شده و استفاده شود. ابعاد هندسی مطلوب برای نانو حلقه های هیتامر ارائه شده جهت انتقال نور در  $1550\text{nm}$  و  $1310\text{nm}$  در جدول ۲ آمده است. برای مسیر اصلی و بازوی هدایت برای محدوده طول موج  $1550\text{nm}$  مقادیر ابعاد نانو حلقه ها (ضخامت، شعاع داخلی و ارتفاع) از [۸] استفاده شده است. همچنین برای بازوی هدایتی برای محدوده طول موج  $1310\text{nm}$  مقادیر از سعی و خطا و روش های ارائه شده در [۸،۱۰] اقتباس شده اند. با استفاده از روش های ارائه شده در [۸] و [۱۰] می‌توان با تغییرات مناسب در اندازه هندسی نانو حلقه های بکار رفته در ساختار، طول موج های تشدید پلاسمونی های سطحی جایگزیده را تغییر و در طیف مورد نظر تنظیم کرد. بر این اساس کاهش اندازه شعاع داخلی ( $R_i$ ) و ارتفاع ( $H$ ) و افزایش ضخامت ( $t$ ) به طور مستقیم باعث شیفت تشدید پلاسمونی از  $1550\text{nm}$  به  $1310\text{nm}$  نانو متر می‌شود که از این شیفت تشدید پلاسمونی برای طراحی بازوی  $1310\text{nm}$  استفاده شده است. با استفاده از سعی و خطا، ابعاد نانو حلقه های فلزی طوری انتخاب شده است تا انتقال بیشینه و همشناوبی دو طول موج کمترین مقدار باشد.

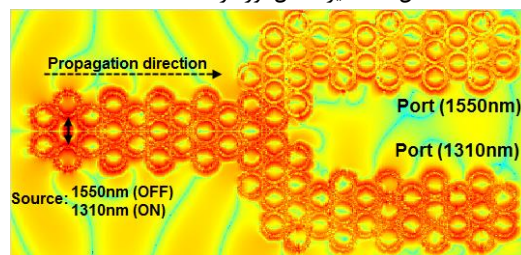
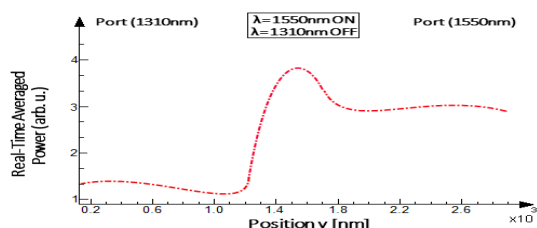
### ۳- نتایج شبیه سازی

ورودی اعمال شده به دی پلکسر طراحی شده شامل دو طول موج به صورت سیگنالی ترکیبی به طور همزمان از طریق مسیر اصلی (ورودی) با استفاده از منبع نور دو قطبی است. تشدید پلاسمونی در این ساختار با تزویج بازه وسیعی از طول موج ها پدید می‌آید و انتقال انرژی با تشدید پلاسمونی امکان پذیر می‌شود. در شکل های ۲ و ۳ تشدیدهای پلاسمونی به منظور بررسی عملکرد (دی) پلکسر، برای هر دو طول موج از طریق مسیر مشترک و مسیرهای جدا ارائه شده است. شکل ۲ تحریک نانو حلقه ها و تزویج حالت پلاسمونی در امتداد مسیر اصلی و مسیر A را نشان می‌دهد. مسیر ذکر شده توان

حدود ۸۱٫۵۷٪ و برای مسیر B ۸۹٫۴۷٪ محاسبه شده است.

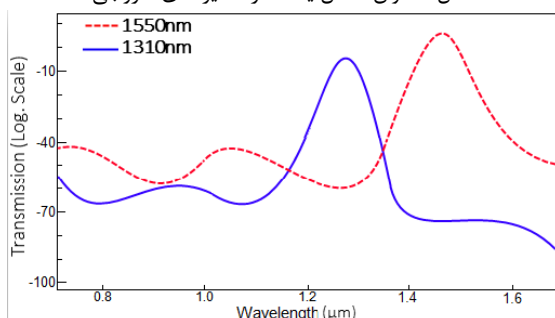


شکل ۲. مسیر انتقال نور در  $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$



شکل ۳. مسیر انتقال نور در  $\lambda \approx 1310 \text{ nm}$

شکل ۴. توان انتقال یافته در مسیر های خروجی



شکل ۵. نمودار انتقال در مقیاس لگاریتمی

به منظور بررسی دقت و صحت طراحی (دی)مالتی پلکسر، انتقال توان نوری برای هر طول موج ورودی در شکل ۵ به صورت مقیاس های لگاریتمی نشان داده شده است. این شکل می تواند در محاسبه همشنوایی استفاده شود. اندازه همشنوایی در این شکل برای  $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$  برابر  $10,1 \text{ dB}$  و برای  $\lambda \approx 1310 \text{ nm}$  برابر با  $12,4 \text{ dB}$  می باشد. این ساختار با توجه به مقادیر بدست آمده برای همشنوایی، ساختار مناسبی برای انتقال توان می باشد. ساختار طراحی شده نسبت به ساختار ارائه شده در مرجع [۷] دارای طیف باریک تر و تلفات کمتری می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله دی مالتی پلکسری با پیکربندی هپتامر تشکیل یافته از نانو حلقه ها احاطه شده با سیلیکا برای جدا کردن دو طول موج مخابراتی  $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$  و  $\lambda \approx 1310 \text{ nm}$  از یکدیگر و هدایت هر کدام به مسیر مجزا طراحی شد. با کنترل در اندازه نانو حلقه ها و تنظیمات اوج تشدید پلاسمونی در طیف های مورد نظر ساختاری طراحی شد که به عنوان یک (دی)مالتی پلکسر عمل کند. نشان داده شد که اندازه تفکیک دو طول موج نسبت به ساختار دی مالتی پلکسر با نانو ذرات ساده بیشتر است. طیف انتقال دی مالتی پلکسر طراحی شده نسبت به ساختارهای ساده تر باریک تر و اتلاف کلی ساختار کمتر است.

#### مراجع

- [۱] Kreibig U., Vollmer M., *Optical Properties of Metal Clusters*, Springer-Verlag, ۱۹۹۵.
- [۲] Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W., Surface plasmon subwavelength optics, *Nature* ۴۲۴ (۲۰۰۳) ۸۲۴.
- [۳] Maier S.A., *Plasmonic: Fundamentals and Applications*, Springer, New York, ۲۰۰۷.
- [۴] Raether H., *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*, Springer-Verlag, ۱۹۸۸.
- [۵] Ahmadvand A., Golmohammadi S., Rostami A., *Broad Comparison Between Au Nanospheres, Nanorods and Nanorings as an S-bend Plasmon Waveguide At optical C-Band Spectrum*, *Opt. Technol.* ۸۰ (۲۰۱۳) ۱۵-۲۳.
- [۶] Maier S.A., Brongersma M.L., Kik P.G., Meltzer S., Requicha A.A.G., Atwater H.A., *Adv. Mater.* ۱۹ (۲۰۰۱) ۱۵۰۱.
- [۷] Golmohammadi S., Khalilou Y., Ahmadvand A., *A route to design an optical demultiplexer based on gold nanorings arrays to operate at near infrared region (NIR)*, *Optics Communications* ۳۲۱ (۲۰۱۴) ۵۶-۶۰.
- [۸] ahmadvand A., Golmohammadi S., *Electromagnetic plasmon propagation and coupling through gold nanoring heptamers: a route to design optimized telecommunication photonic nanostructures*, *APPLIED OPTICS* ۱۵ (۲۰۱۴) ۳۸۳۲-۳۸۴۰.
- [۹] Liu N., Mukherjee S., Bao K., Li Y., Brown L. V., Nordlander P., Halas N. J., *Manipulating Magnetic Plasmon Propagation in Metallic Nanocluster Networks*, *ACS NANO* ۶ (۲۰۱۲) ۵۴۸۲-۵۴۸۸.
- [۱۰] Ahmadvand A., Golmohammadi S., *Compositional arrangement of rod/shell nanoparticles: an approach to provide efficient plasmon waveguide*, *Opto-Electron.* ۸۰ (۲۰۱۴) ۱۰۱-۱۰۸.
- [۱۱] Ahmadvand A., Golmohammadi S., *Comprehensive investigation of noble metal nanoparticles shape, size, and material on the optical response of optimal plasmonic Y-splitter waveguides*, *Optics Communications* ۳۱۰ (۲۰۱۴) ۱-۱۱.