

## بررسی و مشخصه یابی تشیددهای اپتیکی در آرایه‌ای از نانو ساختار پلاسمونیک حلقه-دیسک

زهراء وطن‌دوست دیزجی، لیلا مهرور و سید حسن توسلی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده - در این مقاله آرایه‌ای از نانو ساختارهای فلزی، شامل حلقه و دیسک با استفاده از روش تفاضل متناهی حوزه زمان (FDTD) طراحی و بررسی شده است. در آرایه‌ی نانو ساختارهای حلقه-دیسک متقارن، دو مد تشید پلاسمونیکی مشاهده شده است. نتایج نشان می‌دهند که برهم خوردن تقارن ساختار منجر به پیدایش مد تشید فانو می‌شود. همچنین حساسیت تشیددهای اپتیکی مختلف محاسبه و نشان داده شده است که مد فانو دارای بیشترین حساسیت نسبت به ضربه شکست محیط اطراف می‌باشد.

کلید واژه-آرایه‌ی حلقه-دیسک، حساسیت، تشید فانو، نانو ساختارهای پلاسمونیک.

## Characterization and investigation of optical resonances in ring-disk plasmonic nano structure arrays.

Zahra vatandoost dizaji, leila mehrvar, and seyed hassan tavassoli

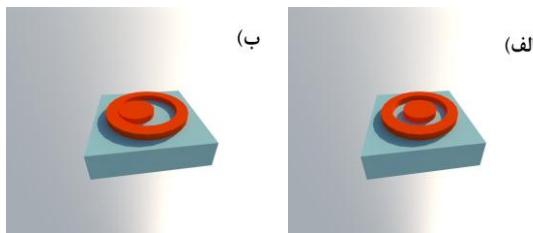
Laser and Plasma research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

**Abstract-** In this article, an array of metal nanostructures including disk and ring is investigated using finite difference time domain (FDTD) method. It is shown that ring-disk nano structures array supports two plasmonic resonance modes. Our results indicate that symmetry breaking in this structure leading to the Fano resonance. Also the LSPR sensitivity of different resonances are calculated and results indicate that the Fano resonance has largest sensitivity.

**Keywords:** Fano resonance, plasmonic nanostructures, ring-disk array, sensitivity.

قابل دسترسی باشد. [www.opsi.ir](http://www.opsi.ir) این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت

به صورت عمود بر ساختار است، به عنوان منبع نور فرودی تابیده می‌شود.



شکل ۱: شماتیک سلول واحد ساختار، (الف)، سلول واحد ساختار حلقه-دیسک هم مرکز و متقارن، (ب) سلول واحد حلقه-دیسک غیر هم مرکز و نامتقارن.

در شکل ۲.الف؛ طیف خاموشی<sup>۲</sup>(مجموع جذب و پراکندگی) مربوط به آرایه‌ای از نانو دیسک، نانو حلقه و ساختار متقارن و هم مرکز حلقه-دیسک با ابعاد ذکر شده نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی تشدید پلاسمون سطحی موضعی مربوط به آرایه نانو دیسک و نانو حلقه به ترتیب حدود  $61\text{ nm}$  و  $1011\text{ nm}$  می‌باشد. با توجه به شکل ۲.الف؛ در هر دو ساختار، تشدیدها به صورت دوقطبی نوسان می‌کنند. شکل ۲.ب و ۲.ج؛ به ترتیب نشان‌دهنده سطح مقطع توزیع میدان نزدیک در طول موج‌های تشدید پلاسمون سطحی موضعی دیسک و حلقه می‌باشند.

با توجه به شکل ۲.الف؛ در ساختار آرایه‌ی حلقه-دیسک هم مرکز، دو بیشینه‌ی تشدید دوقطبی در طول موج‌های  $1150\text{ nm}$  و  $1150\text{ nm}$  مشاهده می‌شود. این تشدیدها ناشی از ادغام و برهمکنش دوقطبی‌های تشدید آرایه‌ی دیسک و حلقه می‌باشند.

در ساختارهای ترکیبی که معمولاً به صورت ترکیبی از دو یا چند ساختار متفاوت می‌باشند، دو مد تشدیدی در دو محدوده انرژی بالا و پایین مشاهده می‌شوند که واپستگی شدیدی به قرارگیری مدهای دوقطبی ساختار دارد. در مد تشدیدی که در انرژی‌های بالاتر(طول موج‌های پایین) برانگیخته می‌شود، دوقطبی‌های ساختار معمولاً به صورت هم‌راستا نوسان می‌کنند و پهنانی طیفی بیشتری دارند. در مد تشدیدی دوم نحوه قرارگیری مدهای دوقطبی مربوط به هر بخش از ساختار به گونه ایست که تشدید در انرژی‌های پایین‌تر(طول موج‌های بالاتر) با پهنانی طیفی

## ۱- مقدمه

در طول یک قرن گذشته، تشدیدهای پلاسمون سطحی موضعی<sup>۱</sup> حاصل از نانو ساختارهای فلزی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۱]. مکان طول موجی این تشدیدها واپستگی شدیدی به پارامترهای هندسی (شکل، ابعاد و تناوب) ساختار و ضریب شکست محیط اطراف دارد. نانو ساختارهای پلاسمونیک کاربردهای فراوانی دارند، یکی از کاربردهای مهم این ساختارها، حسگری مواد زیستی و شیمیایی برای تشخیص بیماری‌ها، سلطان، شناسایی پیوندهای شیمیایی و... می‌باشد. حساسیت بالا از طریق شناسایی تغییرات ضریب شکست، عدم نیاز به نشانه‌گذاری در حسگری به دلیل وجود جابه‌جایی‌های فرکانسی، نیاز به حجم کمی از نمونه مورد آزمایش و قابلیت تکثیر و تجاری شدن و... از جمله مزایای این نانو حسگرها می‌باشند [۲]. از آنجایی که مدهای اپتیکی مختلف حساسیت‌های متفاوتی دارند، محققین تلاش در طراحی نانو ساختارهایی دارند که بیشترین حساسیت (کاهش کمترین حد آشکارسازی) را فراهم آورند. در این مقاله مدهای اپتیکی آرایه‌ای از نانو ساختار پلاسمونیک حلقه-دیسک، مشخصه‌یابی و حساسیت به ضریب شکست آن‌ها بررسی شده‌اند.

## ۲- شبیه‌سازی

ساختار موردنظر در این مقاله، آرایه‌ی ۲ بعدی از نانو دیسک‌های طلا درون حلقه‌هایی با ابعاد مناسب بر روی زیر لایه‌ای از جنس شیشه می‌باشد. در شکل ۱.الف؛ سلول واحد این ساختار که با تناوبی به اندازه  $p=400\text{ nm}$  در راستای محور  $X$  و  $Y$  تکرار می‌شوند، نشان داده شده است. در این آرایه قطر نانو دیسک‌های طلا برابر با  $d=80\text{ nm}$  و قطرهای داخلی و خارجی نانو حلقه‌ها به ترتیب  $nm=100$  و  $200\text{ nm}$  می‌باشند. لازم به ذکر است که ضخامت آن‌ها برابر با  $t=30\text{ nm}$  می‌باشد. در این شبیه‌سازی از مدل درود-لورنتز برای بیان ضریب گذردهی (یا ضریب شکست) طلا استفاده شده است. موج تختی با شدت تابش فرودی  $1\text{ V/m}$  و همچنین پهنانی طول موجی  $700-400\text{ nm}$  با قطبش در راستای محور  $X$  که جهت بردار موج آن

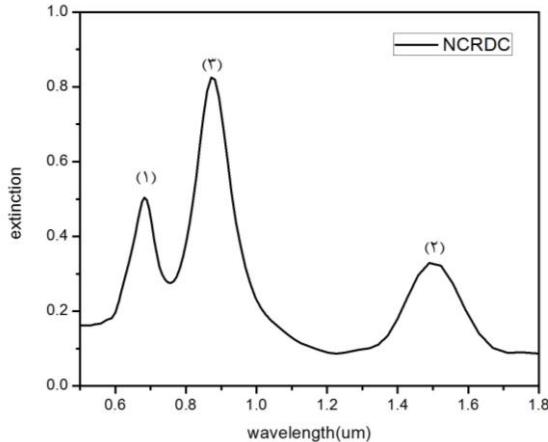
<sup>2</sup> Extinction spectrum

<sup>1</sup> Localized Surface Plasmon Resonance(LSPR)

نزدیک مد تشیدی اول و دوم ساختار ترکیبی حلقة-دیسک می‌باشند.

کمتر مشاهده می‌شود [۳].

(الف)

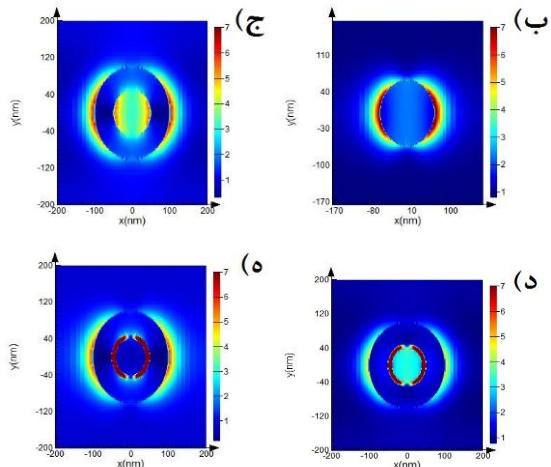
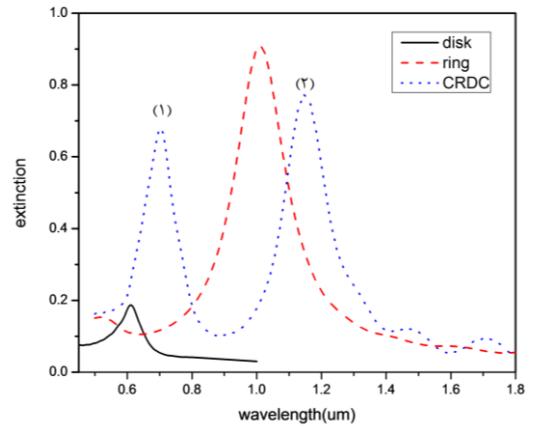


شکل ۳: طیف خاموشی ساختار نامتقارن حلقة-دیسک؛ بیشینه‌ی شماره ۱ مد تشیدی اول، بیشینه‌ی ۲ مد تشیدی دوم، بیشینه‌ی ۳ مد فانو.

## ۱-۲ ساختار نامتقارن و غیر هم مرکز حلقة-دیسک و پیدایش مد فانو<sup>۳</sup>

تشیدی دیگری که در ساختارهای ترکیبی مشاهده می‌شود، تشیدی فانو است. تشیدیدهای فانو، غالباً در اثر برهمکنش مدهای مراتب بالاتر به هنگام برهم خوردن تقارن ساختار مشاهده می‌شوند [۴]. توزیع بار در مدهای مراتب بالاتر به گونه‌ای است که جفت‌شدگی<sup>۴</sup> مستقیم فوتون‌ها ضعیف می‌باشد و غالباً در شرایط خاصی از نوردهی و یا درون ساختاری با ویژگی‌های مناسب برانگیخته می‌شوند. مدهای مراتب بالاتر در هر ساختاری ذاتاً وجود دارند، اما به خاطر جفت‌شدگی ضعیف به راحتی روئیت نشده و به همین دلیل مدهای تاریک نامیده می‌شوند. همپوشانی مد تاریک با یک مد روشن و درنتیجه برهمکنش میان آن‌ها مد تشیدی جدیدی به نام فانو را ایجاد می‌کنند. به دلیل اینکه این مدهای تشیدیدی، حاصل تداخل دو مد تشیدیدی هستند، حساسیت بالاتری نسبت به ضریب شکست محیط اطراف از خود نشان می‌دهند.

در این مقاله، جایه‌جا کردن دیسک از مرکز حلقة در نانو ساختار متقارن حلقة-دیسک منجر به همپوشانی مد تاریک و مد روشن شده و درنتیجه مد تشیدیدی فانو



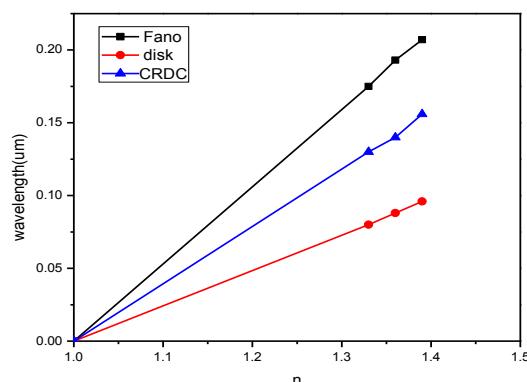
شکل ۲: طیف و سطح مقطع میدان نزدیک ساختارهای دیسک، حلقة-دیسک، حلقة-دیسک، الف) طیف خاموشی مربوط به ساختارهای دیسک، حلقة-دیسک، سطح مقطع میدان نزدیک مربوط به ساختار (ب) دیسک، (ج) حلقة-دیسک در مد تشیدیدی اول، (د) حلقة-دیسک در مد تشیدیدی دوم.

در ساختار موردنظر در این مقاله، با توجه به شکل ۲.الف؛ بیشینه‌ی اول با طول موج ۷۰۰ nm نشان‌دهنده مد تشیدیدی است که در این حالت دوقطبی‌های تشیدید پلاسمونی حلقة و دیسک به صورت موازی نوسان می‌کنند (مد تشیدیدی اول ساختار حلقة-دیسک)، این در حالی است که بیشینه‌ی دوم در طول موج ۱۱۵۰ nm، مد تشیدیدی ساختار ترکیبی را در انرژی‌های پایین‌تر نشان می‌دهد که در این مد اپتیکی، دوقطبی‌های تشیدید پلاسمونی دیسک و حلقة در خلاف جهت هم نوسان می‌کنند (مد تشیدیدی دوم ساختار حلقة-دیسک). شکل ۲.د و ۲.۵ به ترتیب نشان‌دهنده سطح مقطع میدان

<sup>3</sup> Fano

<sup>4</sup> coupling

دو مد دیگر حساس‌تر است.



شکل ۴: نمودار حساسیت برای سه ساختار دیسک، حلقه-دیسک متقارن و حلقه-دیسک نامتقارن

تشدید اپتیکی	مد فانو	مد دیسک	مد اول حلقه-دیسک متقارن
حساسیت	۵۳۲ nm/RIU	۲۴۴ nm/RIU	۳۹۵ nm/RIU

جدول ۱: حساسیت مدهای اپتیکی

بنابراین، با برهم زدن تقارن ساختار می‌توان مد تشدیدی جدیدی ایجاد کرد که از حساسیت بالایی برخوردار است. حساسیت بالا منجر به کاهش کمترین حد آشکارسازی می‌شود که از اهمیت بسیاری برخوردار است.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدهای تشدیدی ساختار متقارن و نامتقارن حلقه-دیسک مشخصه یابی شده‌اند. سپس با برهم زدن تقارن در ساختار هم‌مرکز حلقه-دیسک، مد تشدیدی جدیدی به نام فانو مشاهده شده است. نتایج بیشترین حساسیت ( $532 \text{ nm/RIU}$ ) را برای این مد نشان داده‌اند.

### مراجع

- [1] Sonnefraud Y et all., *Experimental Realization of Subradiant, Superradiant, and Fano Resonances in Ring/Disk Plasmonic Nanocavities*, American Chemical Society, vol. 4, No. 3, 2010.
- [2] Hong Y et all., *Nanobiosensors based on Localized Surface Plasmon Resonance for Biomarker Detection*, *Nanomaterials*, vol. 2012, 2012.
- [3] Feng Hao et all., *Enhanced tunability and linewidth sharpening of plasmon resonances in hybridized metallic ring/disk nanocavities*, American Physical Society, 2007.
- [4] Feng Hao et all., *Symmetry Breaking in Plasmonic Nanocavities: Subradiant LSPR Sensing and a Tunable Fano Resonance*, *NANO LETTERS*, vol. 8, No. 11, 2008.

مشاهده شده است. در شکل ۱.ب، سلول واحد این ساختار نامتقارن نمایش داده شده است. در این ساختار دیسک در راستای محور  $x$  جایه‌جاشده و مماس با جداره داخلی حلقة قرار گرفته است.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با برهم خوردن تقارن این ساختار علاوه بر دو مد تشدیدی ساختار ترکیبی در حالت عادی، مد تشدیدی فانو در طول موج  $875\text{nm}$  نیز مشاهده می‌شود. در این شکل، بیشینه‌ی شماره (۱) مد تشدیدی اول و بیشینه‌ی شماره (۲) مد تشدیدی دوم ساختار حلقه-دیسک و بیشینه‌ی شماره (۳) مد فانو را نمایش می‌دهد. در این ساختار، مد مرتبه‌ی بالاتر مربوط به آرایه‌ی نانو حلقة می‌باشد که یک مد تشدیدی چهار قطبی است. این مد تاریک در محدوده انرژی مد تشدیدی اول بوده و در اثر همپوشانی و برهمکنش این دو مد با یکدیگر، تشدید فانو پدیدار شده است [۴].

### ۲-۲- مقایسه حساسیت مدهای تشدیدی در ساختارهای مختلف

همان‌طور که ذکر شد، نانو ساختارهای پلاسمونی به علت حساس بودن به ضریب شکست محیط اطرافشان، به عنوان حسگر در زمینه‌های مختلفی چون پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حساسیت به ضریب شکست در این ساختارها از طریق جایه‌جاشیده شدید پلاسمون سطحی موضعی به سمت طول موج‌های بالاتر با افزایش ضریب شکست، نمودار می‌شود.

در این مقاله، حساسیت تشدیدهای مختلف محاسبه و مقایسه شده‌اند. بدین منظور ساختار در مجاورت موادی با ضریب شکست‌هایی در محدوده مواد زیستی ( $1.33$  و  $1.36$  و  $1.36$ ) قرار گرفته‌اند. طول موج تشدید پلاسمون سطحی موضعی مربوط به آرایه نانو دیسک و مد تشدید اول ساختار متقارن حلقه-دیسک و همچنین مد فانو در ساختار نامتقارن در محدوده طول موجی مشابهی هستند، به همین دلیل حساسیت این مدها مقایسه شده‌اند.

شکل ۴، نمودار حساسیت برای سه مد تشدیدی ذکرشده را نشان می‌دهد. در این نمودار شبیه خط بیانگر حساسیت مد تشدیدی مربوطه می‌باشد. حساسیت هر ۳ تشدید در جدول ۱ آورده شده است. حساسیت مد فانو  $532 \text{ nm/RIU}$ ، مد دیسک  $244 \text{ nm/RIU}$  همچنین حساسیت مد اول حلقه-دیسک  $395 \text{ nm/RIU}$  می‌باشند. مشاهده می‌شود که مد فانو نسبت به