

پاسخ پلاسمونیک تنظیم‌پذیر دیسک‌های دوتایی متصل به هم بر پایه ایندیوم آنتی‌موناید در بازه تراهرتز

مریم مریدسادات*، سعید گل محمدی هریس

دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

دریافت: 1396/04/30 ویرایش نهایی: 1397/03/19 پذیرش: 1397/04/11

چکیده

در این مقاله به صورت عددی خواص نوری ساختار پلاسمونیک متشکل از آرایه متناوب دیسک‌های دوتایی متصل به هم مبتنی بر نیمه‌هادی ایندیوم آنتی‌موناید (InSb) به کمک روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) در بازه تراهرتز بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده پدیدار شدن دو مد پلاسمونی تراهرتز است که به ترتیب مد پلاسمونی انتقال بار و مد پلاسمونی دو قطبی پیوندی می‌باشد. مد پلاسمونی انتقال بار ناشی از مسیر ارتباطی رسانای بین دو دیسک و مد پلاسمونی دو قطبی پیوندی ناشی از جفت‌شدگی پلاسمون‌ها است. نشان داده شده است که با تغییر پارامترهای هندسی راه ارتباطی رسانای بین دو دیسک خواص نوری ساختار قابلیت تنظیم‌پذیری بالایی دارد. کاهش طول پل ارتباطی بین دو دیسک باعث افزایش شدت میدان الکتریکی حبث شده در فاصله بین دو دیسک، و افزایش عرض مسیر ارتباطی به ترتیب باعث کاهش و افزایش دامنه مد پلاسمونی انتقال بار و مد پلاسمونی دو قطبی پیوندی می‌شود. ساختار پیشنهادی در بازه 0/1 تا 2/2 تراهرتز حساس به زاویه پولاریزاسیون نور تابشی است که قابلیت ساختار برای عمل به عنوان سوئیچ حساس به پولاریزاسیون در بازه تراهرتز را نشان می‌دهد. این ساختار پلاسمونیک می‌تواند کاربردهای قابل توجهی در زمینه امنیت، عکسبرداری و طیف‌سنجی در بازه تراهرتز داشته باشد.

کلیدواژه‌گان: ایندیوم آنتی‌موناید، پلاسمونیک، تراهرتز، انتقال بار در مد پلاسمونی

مقدمه

منابع تراهرتز موجود دارای توان کمی هستند، لذا استفاده از ساختارهای پلاسمونیک زیرطول‌موج با توجه به حبس شدید میدان و افزایش آن، امکان کاربردهای جدید از تابش تراهرتز را فراهم می‌سازد [4].

هنگامی که نور تابشی در یک بسامد خاص به ذره یا ذرات پلاسمونیک زیرطول‌موج تابیده می‌شود، باعث نوسان دسته جمعی و همزمان الکترون‌ها و کوپل شدن با میدان الکترومغناطیسی تابشی در مرز بین فلز و دی‌الکتریک می‌شود که این امر منجر به تشدید

در طول دو دهه اخیر تحقیق در زمینه فناوری تراهرتز با توجه به کاربردهای مختلف آن در زمینه‌های علوم زیستی و دارویی، عکسبرداری پزشکی، ارزیابی غیر مخرب، علوم فضایی و زمین، اطلاعات و ارتباطات، امنیت و طیف‌سنجی توجه بسیاری را به خودش جلب کرده است [1-3]. به طور معمول بازه تراهرتز بسامدهای 0/1 تا 10 تراهرتز متناظر با طول‌موج‌های 30 تا 3000 میکرومتر را شامل می‌شود. از آنجایی که

* نویسنده مسئول: maryam.mdst94@ms.tabrizu.ac.ir

¹ Finit Difference Time Domain

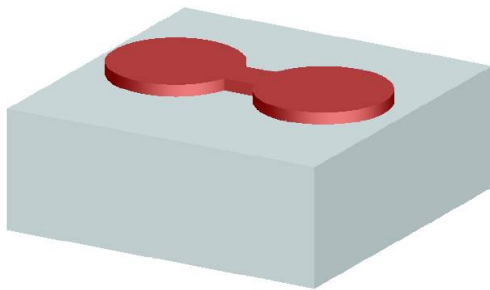
باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

طول موجی 495 تا 1239 نانومتر) را مورد بررسی قرار دادند [16].

در این مقاله به بررسی خواص پلاسمونیک ساختار دیسک‌های دوتایی⁵ متصل به هم InSb در بازه تراهرتز می‌پردازیم و دو مد پلاسمونی انتقال بار و دوقطبی پیوندی ایجاد شده در بازه بسامدی 0/1 تا 2/2 تراهرتز را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین به بررسی تأثیر زاویه پلاریزاسیون و ابعاد هندسی مسیر ارتباطی بین دو دیسک بر روی خواص نوری ساختار پلاسمونیک پیشنهادی می‌پردازیم.

ساختار و ماده

شکل 1 نمای یک سلول واحد از ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. شعاع دیسک‌ها 10 میکرومتر، ضخامت دیسک‌ها 2 میکرومتر، عرض (W) و طول (L) پل ارتباطی بین دو دیسک 6 میکرومتر، ضخامت بستر SiO₂ 200 میکرومتر و طول دوره تناوب ساختار 50 میکرومتر است. در طول این مقاله با تغییر عرض و طول مسیر ارتباطی بین دو دیسک و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها پاسخ پلاسمونیک ساختار در دمای 300 درجه کلوین مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل 1. نمای سه بعدی یک سلول واحد از ساختار پیشنهادی. شعاع دیسک‌ها، ضخامت دیسک‌ها، عرض پل ارتباطی، طول پل ارتباطی، تناوب ساختار و ضخامت بستر به ترتیب برابر است با: 10 میکرومتر، 2 میکرومتر، 6 میکرومتر، 200 میکرومتر و 50 میکرومتر.

پلاسمون‌های سطحی محلی¹ می‌شود [5]. تشدید پلاسمون‌های سطحی محلی بسیار وابسته به هندسه، ابعاد، جنس و محیط اطراف ساختار است [6]. تا کنون خواص نوری ساختارهای پلاسمونیک بسیاری بر پایه فلزات همانند نانوحلقه‌های دوتایی طلا [7]، نانوذرات دوتایی و سه تایی فلزی [8]، نانوکره‌های سه تایی و چهارتایی [9]، ساختارهای خوشه‌ای هفت تایی [10] و سوپرهفت تایی [11] در بازه مرئی، فرابنفش و مادون قرمز نزدیک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شده است. از آنجایی که بسامد پلاسمای فلزات در بازه مرئی و فرابنفش است، لذا تحریک پلاسمون‌های سطحی در بازه تراهرتز امکان‌پذیر نیست، در نتیجه باید به دنبال یک ماده جایگزین مناسب به جای فلزات در بازه تراهرتز باشیم. نیمه‌هادی‌های آلانئیده شده به دلیل چگالی غلظت حامل‌های پایین‌تر دارای بسامد پلاسمای در حدود تراهرتز خواهند بود. به علاوه استفاده از نیمه‌هادی‌ها به جای فلزات به ترتیب امکان تنظیم‌پذیری غیرفعال و فعال خواص نوری ساختار پلاسمونیک از طریق آرایش شیمیایی و تحریک نوری، تحریک گرمایی و تزریق حامل از طریق اعمال میدان الکتریکی را فراهم می‌سازد. این ویژگی در ساخت افزاره‌های فعال بسیار مورد توجه و علاقه واقع شده است [12-14]. همچنین استفاده از نیمه‌هادی‌ها به عنوان مواد پلاسمونیک در بازه تراهرتز، امکان ساخت در ابعاد میکرو را فراهم می‌سازد. در بین نیمه‌هادی‌ها، نیمه‌هادی ایندیوم آنتی‌مونیاید² به دلیل غلظت بالای حامل‌ها، قابلیت تحرک حامل بسیار زیاد، شکاف بانندی³ کوچک، جایگزین بسیار خوبی به عنوان ماده پلاسمونیک در بازه تراهرتز است [13-15]. فانگ فنگ ون⁴ و همکاران مد انتقال بار در ساختار دیسک‌های متصل دوتایی طلا در بازه مرئی و مادون قرمز (2/5-1 الکترون ولت معادل بازه

⁴ Fangfang Wen

⁵ Dimer

¹ Localized surface plasmon resonance

² Indium antimonide (InSb)

³ Band gap

اختیار قرار می‌دهد و روش کار آن بر اساس شبکه‌بندی ساختار است. ابعاد هر سلول در کار حاضر $(dx=dy=dz)$ 0,01 میکرومتر است و معادلات ماکسول با استفاده از تقریب‌های تفاضلات مرکزی، به مشتقات جزئی زمانی و مکانی گسسته می‌شوند. هر سلول 6 وجه دارد و با 6 سلول مشابه دیگر همسایه خواهد بود. ابعاد هر مکعب (dx, dy, dz) نحوه گسسته‌سازی مشتقات فضایی را معین می‌کند. شرایط مرزی در راستای Z شرایط مرزی لایه کاملاً جاذب (PML)¹ به تعداد 12 عدد و در راستای X و Y شرایط مرزی پریودیک انتخاب شده است. منبع انتخابی یک موج تخت ساده² است که در راستای Z به ساختار تابیده شده است. ضریب شکست محیط اطراف برابر با یک در نظر گرفته شده است. زمان شبیه‌سازی برابر با 20000 فمتو ثانیه است.

نتایج و بحث

یک ساختار دوتایی دارای مسیر ارتباطی فیما بین حد واسط بین یک ساختار دوتایی بدون اتصال و یک ساختار میله‌ای شکل (ساختار دیسک‌های دوتایی با اتصال کامل) است [16]. شکل 3، سه حالت ساختار دیسک‌های دوتایی بدون اتصال، با اتصال و اتصال کامل را نشان می‌دهد.

برای هر سه ساختار نشان داده شده در شکل 3، نمودار جذب سطح مقطع ساختار در حالت تابش نور با زاویه پولاریزاسیون 0 درجه رسم شده است (شکل 4). همان‌طور که از شکل 4 مشخص است، در ساختار نشان داده شده در شکل 3-الف، تنها یک قله تشدید در بسامد 1/34 تراهرتز مشاهده می‌شود. این قله تشدید متناظر با مد پلاسمونی دوقطبی پیوندی³ است که به دلیل جفت‌شدگی پلاسمون‌ها در دیسک‌های دوتایی به وجود می‌آید و توسط تئوری هیبریدیزاسیون پلاسمون‌ها⁴ قابل

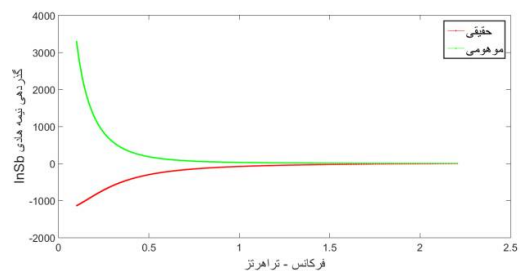
گذردهی نیمه‌هادی InSb در بازه تراهرتز با استفاده از مدل درود به دست می‌آید [4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon(\infty) - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad 1$$

که در این مقاله $\varepsilon(\infty)=15,68$ گذردهی بسامد بالا، ω بسامد زاویه‌ای، $\gamma = 1.79 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ ثابت میرایی و ω_p بسامد پلاسما است که طبق رابطه 2 وابسته به غلظت چگالی حامل‌هاست.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N \times e^2}{\varepsilon_0 \times m^*}} \quad 2$$

N چگالی حامل‌های ذاتی، e بار الکترون، ε_0 گذردهی خلأ و m^* جرم مؤثر الکترون است. چگالی حامل‌های ذاتی برای InSb در دمای اتاق (300 درجه کلوین) برابر با $N = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ است. با توجه به روابط 1 و 2 و مقادیر مربوطه، بخش حقیقی و موهومی گذردهی نیمه‌هادی InSb در دمای اتاق در بازه بسامدی 0/1 تا 2/2 تراهرتز مطابق شکل 2 به دست آمده است.



شکل 2. بخش حقیقی و موهومی گذردهی نیمه‌هادی InSb در بازه بسامدی 0/1 تا 2/2 تراهرتز در دمای 300 درجه کلوین.

روش کار

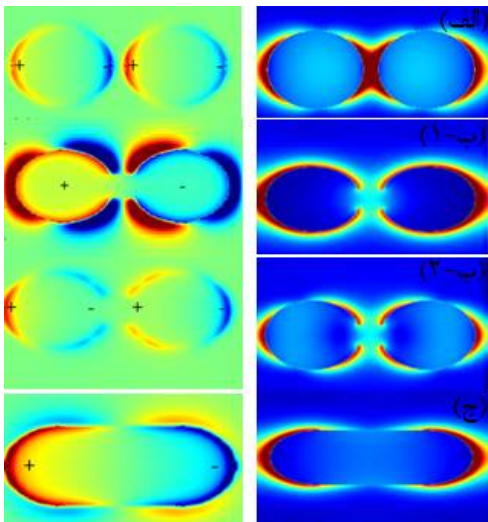
خواص نوری ساختارهای پیشنهادی در طول این مقاله با استفاده از روش عددی حوزه زمان تفاضل محدود بررسی می‌شود. این روش روشی کاملاً برداری است که اطلاعات حوزه‌های زمان و فرکانس را در

³ Bonding Dipole Plasmon (BDP)

⁴ Plasmon Hybridization (PH)

¹ Perfectly Matched Layer

² Plane Wave



شکل 5. الف: مد پلاسمونی دوقطبی پیوندی در بسامد 0/63 تراهرتز. ب-1: مد پلاسمونی انتقال بار در بسامد 1/34 تراهرتز. ب-2: مد پلاسمونی دوقطبی پیوندی در بسامد 1/49 تراهرتز. ج: مد پلاسمونی دوقطبی در بسامد 0/91 تراهرتز.

در ادامه خواص نوری ساختار پلاسمونیک نشان داده شده در شکل 1 را تحت تأثیر عرض و طول مسیر ارتباطی بین دو دیسک مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در شکل 6 تأثیر عرض پل ارتباطی بین دو دیسک بر روی طیف جذبی ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که به‌وضوح پیداست، افزایش عرض پل ارتباطی باعث افزایش دامنه قله تشدید متناظر با مد پلاسمونی انتقال بار و کاهش مد پلاسمونی دوقطبی پیوندی می‌شود. دلیل این اتفاق افزایش میزان رسانایی با افزایش عرض پل ارتباطی است. همچنین افزایش عرض باعث کاهش جفت شدگی پلاسمون‌ها و در نتیجه کاهش دامنه قله تشدید متناظر با مد پلاسمونی دوقطبی پیوندی می‌شود. نتایج به‌دست آمده در شکل 6 نیز، کاملاً با نتایج به‌دست آمده در مرجع [16] در بازه مرئی و مادون قرمز تأیید می‌شود.

شکل 7 تأثیر طول پل ارتباطی بین دو دیسک را بر روی خواص نوری ساختار پلاسمونیک نشان داده شده در

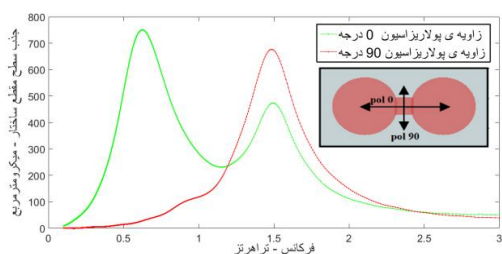
توجیه است [17]. در حالتی که دو دیسک به هم متصل می‌شوند (شکل 3-ب)، یک قله تشدید جدید در بسامد 0/63 تراهرتز متناظر با مد پلاسمونی انتقال بار¹ به دلیل انتقال الکترون‌ها از طریق اتصال رسانای بین دو دیسک ظاهر می‌شود و قله تشدید متناظر با مد پلاسمونی دوقطبی پیوندی به بسامد 1/49 تراهرتز انتقال پیدا می‌کند. در ساختار نشان داده شده در شکل 3-ج یک قله تشدید باندپهن متناظر با مد پلاسمونی دوقطبی² در بسامد 0/91 تراهرتز مشاهده می‌شود.

شکل 5 چگونگی توزیع بار و اندازه میدان الکتریکی در بسامد متناظر با قله تشدید هر یک از مدهای پلاسمونی ساختارهای شکل 3 را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از جذب سطح مقطع سه ساختار نشان داده شده در شکل 3 (شکل 4)، و بررسی توزیع بار در هر یک از مدهای تشدید در تأیید کامل با نتایج به‌دست آمده در مقاله تجربی مرجع [16] است که مد انتقال بار در ساختار دیسک‌های دوتایی متصل به هم طلا در بازه مرئی و مادون قرمز (1-2/5 الکترون ولت معادل بازه طول موجی 495 تا 1239 نانومتر) بررسی شده است. با توجه به اهمیت بازه تراهرتز در سال‌های اخیر و ضرورت بررسی مد انتقال بار در کاربردهای حسگرهای پلاسمونیک همانند حسگرهای زیستی و شیمیایی تراهرتز، ضرورت بررسی‌ها و مطالعات انجام شده در این مقاله به‌وضوح مشخص است [18,19]. همچنین به دلیل بررسی جزئی‌تر، توزیع شدت میدان الکتریکی که یک پارامتر اساسی در ساختارهای پلاسمونیک است، نیز بررسی شده است.

¹ Charge Transfer Plasmon (CTP)

² Dipole Plasmon (DP)

به پولاریزاسیون نور تابشی است. نتایج حاصل شده از تأثیر زاویه پولاریزاسیون نور تابشی بر روی پاسخ پلاسمونیک ساختار پیشنهادی، کاملاً در تأیید نتایج تجربی به دست آمده در مرجع [12] است. با توجه به مجزا بودن بیشتر دو پیک رزونانسی از هم نسبت به ساختار ارائه شده در مرجع [12]، از این ساختار می‌توان در افزارهای حساس به پولاریزاسیون به‌عنوان مثال سوئیچ‌ها و فیلترها استفاده کرد.

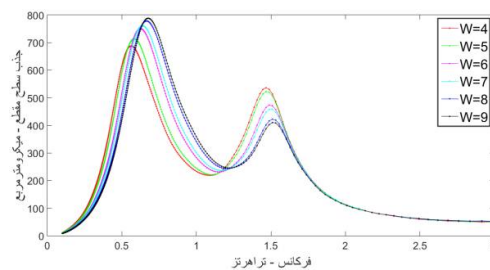


شکل 8. جذب سطح مقطع ساختار تحت تأثیر زاویه پولاریزاسیون نور تابشی 0 و 90 درجه در دمای 300 درجه کلوین.

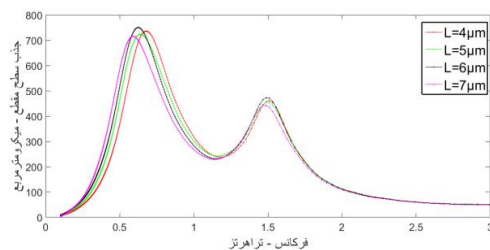
نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص نوری ساختار زیر طول‌موج متشکل از آرایه‌ای متناوب از دیسک‌های دوتایی InSb متصل به هم با یک پل ارتباطی در بازه تراهرتز به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت و چگونگی ایجاد دو مد پلاسمونی انتقال بار و دوقطبی پیوندی مطالعه شد. مشاهده شد خواص پلاسمونیک این ساختار به‌خصوص مد پلاسمونی انتقال بار، بسیار حساس به ابعاد هندسی پل ارتباطی بین دو دیسک و زاویه پولاریزاسیون نور تابشی است. افزایش عرض پل ارتباطی بین دو دیسک، به دلیل افزایش میزان رسانایی و کاهش جفت‌شدگی پلاسمون‌های دو دیسک، به ترتیب باعث افزایش دامنه مد CTP و کاهش مد BDP شد. تغییر طول پل ارتباطی بین دو دیسک به دلیل

شکل 1 تحت تابش نور با زاویه پولاریزاسیون صفر درجه نشان می‌دهد. تغییرات طول L به دلیل شرایط شبه استاتیکی¹ تأثیر چندانی بر روی بسامد تشدید متناظر با قله‌های جذب ندارد اما کاهش طول پل ارتباطی به دلیل افزایش جفت‌شدگی بین پلاسمون‌ها، باعث افزایش میدان الکتریکی حبس شده در بین دو دیسک می‌شود [12].



شکل 6. جذب سطح مقطع ساختار تحت تأثیر تغییر عرض پل ارتباطی بین دو دیسک تحت تابش نور با زاویه پولاریزاسیون 0 درجه.



شکل 7. جذب سطح مقطع ساختار به‌ازای طول‌های مختلف مسیر ارتباطی بین دو دیسک در ساختار معرفی شده در شکل 1 تحت تابش نور با زاویه پولاریزاسیون 0 درجه.

در پایان به بررسی تأثیر زاویه پولاریزاسیون نور تابشی بر روی پاسخ پلاسمونیک این جاذب تراهرتز با ابعاد داده شده در شکل 1 می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل 8 پیداست، تحت زاویه پولاریزاسیون 0 درجه (موازی با محور دیسک‌های دوتایی) دو قله تشدید متناظر با مدهای CTP و BDP مشاهده می‌شود. در حالتی که زاویه پولاریزاسیون برابر 90 است (عمود بر محور دیسک‌های دوتایی)، قله تشدید متناظر با مد CTP حذف می‌شود. دلیل این اتفاق قطبیدگی دیسک‌ها در راستای y تحت پولاریزاسیون 90 درجه نور تابشی است. در نتیجه پاسخ پلاسمونیک این ساختار وابسته

¹ Quasi-static

- [7] C.Y. Tsai, J.W. Lin, C.Y. Wu, P.T. Lin, T.W. Lu, P.T. Lee, Plasmonic Coupling in Gold Nanoring Dimers: Observation of Coupled Bonding Mode, *Nano letters* **12** (2012) 1648-1654.
- [8] N. Zohar, L. Chuntonov, G. Haran, The Simplest Plasmonic Molecules: Metal Nanoparticle Dimers and Trimers, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* **21** (2014) 26-39.
- [9] D.W. Brandl, N.A. Mirin, P. Nordlander, Plasmon Modes of Nanosphere Trimers and Quadrumers, *The Journal of Physical Chemistry B* **110** (2006) 12302-12310.
- [10] S.D. Liu, Z. Yang, R.P. Liu, X.Y. Li, Multiple Fano Resonances in Plasmonic Heptamer Clusters Composed of Split Nanorings, *Acs Nano* **6** (2012) 6260-6271.
- [11] A. Ahmadvand, S. Golmohammadi, Fano Resonances in Complex Plasmonic Super-Nanoclusters: The Effect of Environmental Modifications on the Lspr Sensitivity, *Frontiers of Physics* **10** (2015) 222-230.
- [12] S. Hanham, A. Fernández-Domínguez, J.H. Teng, S. Ang, K. Lim, S.F. Yoon, *et al.*, Broadband Terahertz Plasmonic Response of Touching Insb Disks, *Advanced Materials* **24** (2012).
- [13] H. Liu, G. Ren, Y. Gao, B. Zhu, B. Wu, H. Li, *et al.*, Tunable Terahertz Plasmonic Perfect Absorber Based on T-Shaped Insb Array, *Plasmonics* **11** (2016) 411-417.
- [14] J.G. Rivas, C. Janke, P.H. Bolivar, H. Kurz, "Transmission of Thz Radiation through Insb Gratings of Subwavelength Apertures", *Optics Express* **13** (2005) 847-859.
- [15] W. Li, D. Kuang, F. Fan, S. Chang, L. Lin, Subwavelength B-Shaped Metallic Hole Array Terahertz Filter with Insb Bar as Thermally Tunable Structure, *Applied optics* **51** (2012) 7098-7102.
- [16] F. Wen, Y. Zhang, S. Gottheim, N.S. King, Y. Zhang, P. Nordlander, *et al.*, Charge Transfer Plasmons: Optical Frequency Conductances and Tunable Infrared Resonances, *ACS Nano* **9** (2015) 6428-6435.
- [17] M.A. Mahmoud, Plasmon Resonance Hybridization of Gold Nanospheres and Palladium Nanoshells Combined in a Rattle
- اثر شبه‌استاتیک تأثیر چندانی بر بسامد و دامنه‌ مدهای تشدید نداشت اما باعث افزایش حبس‌شدگی میدان شد. همچنین مشاهده شد که ساختار پیشنهادی حساس به‌زاویه پولاریزاسیون نور تابشی است به‌طوری‌که با تغییر زاویه پولاریزاسیون از 0 به 90، قله تشدید متناظر با مد پلاسمونی انتقال بار به‌طور کامل حذف می‌شود. از این ویژگی می‌توان در ساخت سوئیچ‌ها¹ و فیلترهای² فیلترهای² حساس به‌پلاریزاسیون استفاده کرد. به‌علاوه این ساختار را می‌توان به‌عنوان یک جاذب تره‌رتز در ساخت افزاره‌هایی چون مدولاتور، آشکارساز نوری و برای کاربردهایی چون طیف‌سنجی، امنیت و عکسبرداری در بازه تره‌رتز به‌کار برد.
- مرجع‌ها
- [1] M. Tonouchi, Cutting-Edge Terahertz Technology, *Nature photonics* **1** (2007) 97-105.
- [2] C. Jansen, S. Wietzke, O. Peters, M. Scheller, N. Vieweg, M. Salhi, *et al.*, Terahertz Imaging: Applications and Perspectives, *Applied optics* **49** (2010) E48-E57.
- [3] J.F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, *et al.*, THz Imaging and Sensing for Security Applications—Explosives, Weapons and Drugs, *Semiconductor Science and Technology* **20** (2005) S266.
- [4] V. Giannini, A. Berrier, S.A. Maier, J.A. Sánchez-Gil, J.G. Rivas, Scattering Efficiency and near Field Enhancement of Active Semiconductor Plasmonic Antennas at Terahertz Frequencies, *Optics express* **18** (2010) 2797-2807.
- [5] J. Grant, X. Shi, J. Alton, D. Cumming, Terahertz Localized Surface Plasmon Resonance of Periodic Silicon Microring Arrays, *Journal of Applied Physics* **109** (2011) 054903.
- [6] S.D. Liu, Z. Yang, R.P. Liu, X.Y. Li, Multiple Fano Resonances in Plasmonic Heptamer Clusters Composed of Split Nanorings, *ACS Nano* **6** (2012) 6260-6271.

² Polarization filters¹ Polarization switches

Structure, *The journal of physical chemistry letters* **5** (2014) 2594-2600.

[18] A.N. Koya, J. Lin, Charge transfer plasmons: Recent theoretical and experimental developments, *Applied Physics Reviews* **4** (2017) 021104.

[19] A. Ahmadivand, B. Gerislioglu, R. Sinha, P.K. Vabbina, M. Karabiyik, N. Pala, Excitation of terahertz charge transfer plasmons in metallic fractal structures, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **38** (2017) 992-1003.