بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

بررسی مُدهای پلاسمونی در نانو روزنه‌های عمودی

پویا علی‌بیگلو[۱]، مصطفی قربان‌زاده[۲]، محمد کاظم مروج فرشی[۱]

[۱]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، هسته پژوهشی نانو پلاسموفتونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
[۲]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

چکیده – در این پژوهش، به بررسی مُدهای پلاسمونی تحریک شده توسط نانو روزنه‌های فلزی می‌پردازیم. برای اینکار نانو روزنه-هایی با پروفایل عمودی مختلف را طراحی کرده‌ایم که دارای پروفایل بیشینه شدت میدان پلاسمونی در طول موج‌های مختلف انـد. پس از بررسی اثر جنس بستر، قطر نانو روزنه، و ضخامت بر مُدهای پلاسمونی تحریک شده در نانو روزنـه‌هـا، تحقـق جمـع آثـار و جابجایی شدت میدان بیشینه در راستای عمودی روزنه‌ی استوانه‌ای تو در تو بررسی شده است. شبیه سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک سیستم کنترل کننده پلاسمونی، با تغییر طول موج لیزر ورودی، برای جابجایی نانوذرات در راستای عمق نانو روزنه مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه- مُدهای پلاسمونی، نانو روزنه

Investigation of the Plasmonic Modes in Vertical Nano-holes

Pooya Alibeigloo[1], Mostafa Ghorbanzadeh[2], Mohammad Kazem Morravej-Farshi[1]

[1]Faculty of ECE, Nano Plasmo-Photonic Research Group, Tarbiat Modares University, Tehran
(alibeigloo.pooya@gmail.com), (moravvej@modares.ac.ir)
[2] School of Electrical & Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar
(m.ghorbanzadeh@hsu.ac.ir)

Abstract- We investigate the behavior of the plasmonic modes excited by the nanoholes structures. For this purpose, we have designed a vertical nanohole structure that realizes the different plasmonic fields maxima when excited with different incident wavelengths. After examining the effect of the substrate material and nanohole dimensions on the excited plasmonic modes, we have shown the realization of the superposition effect and displacement of the maximum field intensity along the depth of the double-step cylindrical holes. Simulations show that the proposed structure can be used as a plasmonic manipulation system, by well adjusting the incident laser beam, to move nanoparticles along the depth of the proposed nanoholes.

Keywords: Plasmonic Modes, Nanohole

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]

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

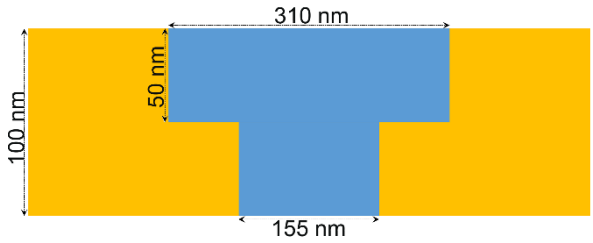
مقدمه

توانایی لیزر در تله‌اندازی میکروذرات ابتدا توسط اشکین [۱] نشان داده شد. پس از آن، نیروهای نوری به طور گسترده برای دستکاری میکرو و نانوذرات به کار گرفته شدند. یک روش معمول برای این کار استفاده از انبرک نوری است. در انبرک نوری متداول، (میدان دور) برای تله‌اندازی و کنترل ذرات با نور، از پرتو لیزر متمرکز شده در یک نقطه استفاده می‌شود. انبرک‌های نوری متداول به شدت بالای نور تابشی و همچنین تمرکز مکانی شدید پرتو لیزر در نقطه کانونی، برای تله‌اندازی نوری نیاز دارند. در نتیجه باریکه لیزر متمرکز شده می‌تواند با ایجاد گرمای شدید در نقطه کانونی، باعث آسیب رسیدن به نمونه مخصوصا در مطالعات زیستی شود. بنابراین در سال‌های اخیر انبرک پلاسمونی نیز مورد توجه قرار گرفته است. از دیگر مزیت‌های این روش قابلیت مجتمع‌سازی انبرک و ایجاد آزمایشگاه روی تراشه است[۲]. در سال‌های اخیر کارهای زیادی در زمینه‌ی تله‌اندازی و آشکارسازی ذرات بیولوژیکی در یک زوج نانو روزنه یا آرایه‌ای از آن‌ها انجام شده است [۳-۵].

با توجه به ویژگی های پلاسمونی لایه های طلا و آلومینیوم که دارای مدهای روزنانس در گستره‌ی طول موج ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر اند، برای مطالعه خواص پلاسمون‌های موضعی در سطح نانو روزنه‌های ایجاد شده در این فلزات برای هدف تله اندازی نانو درات استفاده می کنیم.

نتایج شبیه‌سازی

در این گزارش، نانو روزنه‌های تک استوانه‌ای و دو استوانه‌ی تو در تو ابعاد مشخص (شکل ۱) در یک ورقه‌ی طلا به ضخامت ۱۰۰nmدر نظر گرفته و در معرض تابش از منبع نوری با طول موج در گستره‌ی ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر قرار می‌دهیم. آنگاه موقعیت بیشینه‌ی شدت میدان



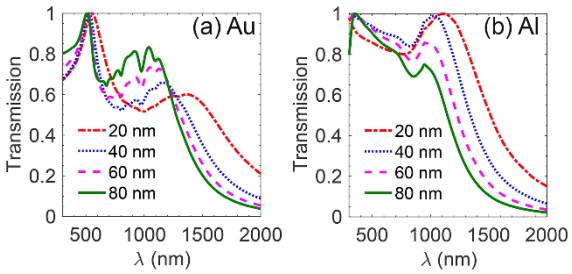
شکل ۱: شمای ساده‌ای از ساختار یک لایه‌ی طلا حاوی دو روزنه-ی استوانه‌ای تو در تو با شعاع‌های ۷۷٫۵ و ۱۵۵نانومتر

پلاسمون‌های موضعی در داخل نانو روزنه تعیین می‌شود. به منظور بررسی تاثیر جنس و ضخامت ورقه فلز،ابتدا، یک ورقه‌ی طلا و یک ورقه‌ی آلومینیوم را که درون هر یک نانو روزنه‌ای استوانه‌ای به شعاع ۱۵۵نانومتر قرار دارد در نظر می‌گیریم. با تغییر ضخامت ورقه‌ها و با استفاده از روش عددی تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان ، ضریب عبور برحسب طول موج منبع ورودی محاسبه می کنیم (شکل ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت نوار طلا و آلومینیوم، یک جابه‌جایی آبی در طیف های عبور پدیدار می‌شود. همچنین برای لایه طلا، بر خلاف آلومینیوم، علاوه بر قله‌ی اصلی هر طیف حوالی ۵۰۰ نانومتر، قله‌ی دیگری در یک طول موج بلندتر ظاهر می-شود. اندازه‌ی این قله با افزایش ضخامت طلا به مرور افزایش می‌یابد.

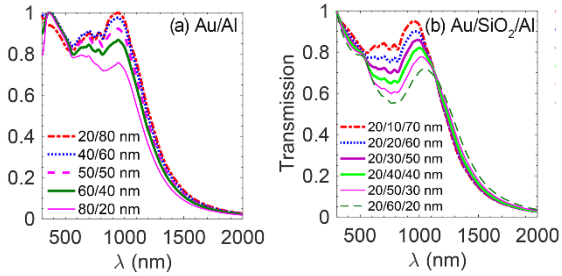
سپس اثر جنس لایه‌های تشکیل دهنده‌ی نانو روزنه‌ی تک استوانه‌ای روی ضریب عبور را بررسی میکنیم. برای اینکار دو نانو لایه‌ی طلا و آلومینیوم با ضخامت های متفاوت را روی هم قرار داده درون این دولایه روزنه‌ای استوانه‌ای به شعاع ۱۵۵ نانومتر در نظر می‌گیریم. سپس با در نظر گرفتن ضخامت کل ۱۰۰ نانومتر برای دو لایه شبیه سازی قبلی را تکرار می‌کنیم. نتایج به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، در طیف این ساختار دولایه نیز قله های دوم ناشی از طلا نیز پدیدار می‌شود. اما با افزایش ضخامت لایه آلومینیوم (کاهش ضخامت لایه طلا) شدت این قله به

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]



شکل ۲: ضریب عبور برحسب طول موج برای یک نانو روزنه به شعاع ۱۵۵ نانومتر به ترتیب درون (الف) لایه طلا و (ب) لایه آلومینیوم به ضخامت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ نانومتر



شکل ۳: ضریب عبور برحسب طول موج برای نانو روزنه به شعاع ۱۵۵ نانومتر، (الف) لایه‌های طلا و آلومینیوم و (ب) لایه‌های طلا، آلومینیوم و حائل SiO_2

آرامی کاهش پیدا می‌کند، درحالی که طول موج متناظر آن تغییری نمی‌کند. به عبارت دیگر، در حالی‌که ضخامت کل ثابت باشد، در حضور لایه‌ی آلو مینیوم تغییر همزمان ضخامت لایه‌ها بر طول موج قله طیف عبور تاثیری ندارد.

در گام بعدی میان دو لایه‌ی طلا ۸۰ نانومتری و آلومینیوم ۲۰ نانومتری یک لایه‌ی جداساز از جنس SiO_2 به ضخامت ۱۰ تا ۶۰ نانومتر قرار داده اثر حضور و ضخامت آن را بر طیف ضریب عبور محاسبه می‌کنیم. نتایج حاصل در شکل ۳ نمایش داده شده است. از این نتایج در می‌یابیم، با افزایش ضخامت لایه جداساز، نه تنها اندازه‌ی قله‌ی طیف عبور کاهش می‌یابد بلکه یک جابه‌جایی قرمز نیز در در طیف ضریب عبور ایجاد می‌شود.

در ادامه، تحقق جمع آثار در ساختارهای چند لایه‌ی مطرح شده در بالا را بررسی می‌کنیم. برای این کار طول موج‌های متناظر با بیشینه‌های شدت میدان در جدول ۱ ارائه می‌کنیم. با بررسی این جدول می‌توان نتیجه گرفت که در ساختار چند لایه، خواه لایه‌ی جداساز SiO_2 حضور داشته و خواه حضور نداشته باشد، جمع آثار رخ نمی‌دهد.

درواقع طول موج‌های متناظر با میدان بیشینه در حالتی که لایه‌های طلا و آلومینیوم روی هم قرار دارند، برابر مجموع طول موج‌های لایه طلا و لایه آلومینیوم به طور جداگانه نیست. بنابراین حالت دیگری یعنی یک لایه طلا و دو روزنه‌ی تو در تو (مطابق شکل ۱) به قطرهای مختلف روی هم را شبیه‌سازی می‌کنیم و تحقق جمع آثار را در آن بررسی می‌نماییم. یک نوار طلا به ضخامت ۱۰۰ نانومتر ثابت، دو روزنه‌ای که به صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند، ضخامت هرکدام ۵۰ نانومتر و شعاع‌هایشان ۷۷٫۵ و ۱۵۵ نانومتر است، در نظر می‌گیریم. شبیه‌سازی را یک بار بدون قرار دادن لایه جداساز و یک بار با قرار دادن آن به ضخامت ۲۰ نانومتر انجام می‌دهیم. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که طول موج های میدان بیشینه در حالتی که دو روزنه‌ی تو در تو به قطرهای متفاوت درون یک نوار طلا داریم، مجموعه‌ای از طول موج‌های دو روزنه‌ی تک استوانه‌ای به طور جداگانه است. البته باید خاطر نشان کرد که بهترین حالت، زمانی است که یک لایه جداساز SiO_2 به ضخامت ۲۰ nm در وسط لایه طلا قرار می‌دهیم،

جدول ۱: مقایسه طول موج‌های متناظر با بیشینه میدان در ساختار های تک، دو و سه لایه

جنس لایه	Al		Au	Al/Au		Al/SiO2/Au	
ضخامت (nm)	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰/۶۰		۲۰/۲۰/۶۰	
موقعیت میدان بیشینه (z: nm)	۲۰	۴۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰
طول موج های متناظر با میدان بیشینه (λ:nm)	۴۹۸	۵۱۵	۵۵۷	۵۷۱	۵۵۳	۵۵۷	۱۰۸۸
	۱۲۳۰	۱۱۲۲	۹۶۸	۶۶۲	۱۳۹	۹۶۸	–
	–	–	۱۰۶۳	۷۱۳	–	۱۰۶۳	–
	–	–	۱۱۵۳	۷۴۷	–	۱۱۵۳	–
	–	–	–	۹۴۸	–	–	–

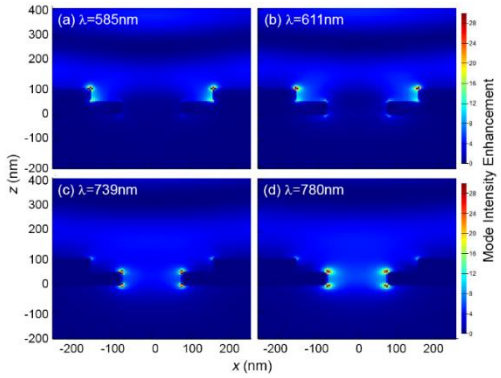
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]

جدول ۲: مقادیر طول موج‌های متناظر با میدان بیشینه در ساختار نانو روزنه‌ی دو پله درون یک لایه طلا به ضخامت ۱۰۰ نانومتر

نوع نانو روزنه	تکی		تو در تو بدون جداساز		تو در تو با جداساز	
شعاع نانو روزنه (nm)	۷۷٫۵	۱۵۵	۱۵۵/۷۷٫۵		۱۵۵/۷۷٫۵	
موقعیت میدان بیشینه (z: nm)	۰	۵۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰
طول موج های متناظر با میدان بیشینه (λ:nm)	۶۶۶	۵۴۷	۵۴۹	۵۷۱	۶۶۹	۵۵۳
	۷۲۸	۱۱۱۴	۶۶۲	۶۷۸	۷۲۸	۸۷۲
	۷۶۷	۱۲۸۷	۷۲۴	۷۳۵	۷۶۷	۱۰۶۹
	۸۲۶	–	۷۶۷	۸۷۷	۸۳۱	–
	–	–	۸۲۱	۱۱۰۵	–	–

که باعث تفکیک‌پذیری مُدهای پلاسمونی تحریک شده می‌شود. به عبارتی دیگر در نانوساختار روزنه‌ی تو در تو، شدت میدان در روزنه‌ی پایینی (قطر کوچک) هنگامی بیشینه می‌شود که نانوساختار را در معرض طول موج‌های تحریک مخصوص همان روزنه‌ی استوانه‌ای کوچک قرار دهیم، و بالعکس شدت میدان در روزنه‌ی بالایی (قطر بزرگ) زمانی بیشینه می‌شود که نانوساختار را در معرض طول موج‌های تحریک مخصوص روزنه‌ی استوانه‌ای بزرگ قرار دهیم. بنابراین تحقق جمع آثار را در این ساختار پیشنهادی می‌توان نتیجه گرفت. در شکل ۴ پروفایل‌های دو بعدی اندازه شدت میدان نور ($|E|^2$) برای روزنه‌ی استوانه‌ای تو در توی مطرح شده آورده شده‌اند. طول موج منبع ورودی از ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر است. مطابق این شکل‌ها شدت میدان از بالا تا پایین نانو روزنه‌ها جابجا می شود.



شکل ۴: توزیع شدت میدان نور ($|E|^2$) در صفحه x-z (y=0) درون دو نانو روزنه‌ی تو در تو برای طول موج‌های (الف)۵۸۵ نانومتر(ب)۶۱۱ نانومتر، (ج) ۷۳۹ نانومتر و (د) ۷۸۰ نانومتر

نتیجه‌گیری

اثر ضخامت، جنس بستر و تحقق جمع آثار در نانو روزنه‌های استوانه‌ای مطالعه شد و نتیجه‌گیری شد که در روزنه‌ی استوانه‌ای تو در تو درون یک لایه طلا جمع آثار رخ می‌دهد و جابجایی میدان از بالا تا پایین این نانوساختار مشاهده شد. با استفاده از نتایج به دست آمده میتوان هندسه‌ی نانوروزنه‌های تو در تو را بهینه و یک پمپ پلاسمونی با طول موج کنترل-پذیر مناسب برای به دام اندازی نانوذرات طراحی کرد.

مرجع‌ها

[1] Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," Physical review letters, vol. 24, p. 156, 1970.

[2] M. Ghorbanzadeh, S. Jones, M. K. Moravvej-Farshi, and R. Gordon, "Improvement of Sensing and Trapping Efficiency of Double Nanohole Apertures via Enhancing the Wedge Plasmon Polariton Modes with Tapered Cusps," ACS Photonics, vol. 4, pp. 1108-1113, 2017.

[3] Tellez, Gabriela Andrea Cervantes, Aftab Ahmed, and Reuven Gordon. "Optimizing the resolution of nanohole arrays in metal films for refractive-index sensing." Applied Physics A 109, no. 4 (2012): 775-780.

[4] Eftekhari, Fatemeh, Carlos Escobedo, Jacqueline Ferreira, Xiaobo Duan, Emerson M. Girotto, Alexandre G. Brolo, Reuven Gordon, "Nanoholes as nanochannels: flow-through plasmonic sensing." Analytical chemistry 81, no. 11 (2009): 4308-4311.

[5] Yoo, Daehan, Gurunatha Kargal laxminarayana, Han-Kyu Choi, Daniel A. Mohr, Christopher T. Ertsgaard, Reuven Gordon, "Low-Power Optical Trapping of Nanoparticles and Proteins with Resonant Coaxial Nanoaperture using 10 nm gap." Nano letters (2018).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]

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