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

بررسی رزونانس‌های پلاسمون سطحی در آرایه‌ای از نانوحفره‌های نقره

لیلا مهرور ، سید حسن توسلی

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

چکیده- در این مقاله رزونانس‌های پلاسمون سطحی برانگیخته شده در آرایه‌ای از حفره‌های ایجاد شده در فلز با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است. بدین منظور طیف‌های جذب و عبور به همراه توزیع میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با استفاده از نتایج بدست آمده از این طیف‌ها می‌توان دید که ۱) رزونانس پلاسمون سطحی و طول‌موجی که ماکسیمم جذب را دارد هم‌بسته می‌باشند اما تمام ماکسیمم‌های طیف جذب با رزونانس پلاسمون سطحی هم‌بسته نمی‌باشند. ۲) تغییر ابعاد حفره منجر به شیفت طول‌موج رزونانس می شود. ۳)ماکسیمم تقویت میدان الکتریکی در طول‌موجی رخ می‌دهد که بیشترین جذب را دارد.

کلید واژه- رزونانس پلاسمون سطحی ، تقویت میدان الکتریکی، فاکتور تقویت، نانوحفره.

Investigation of surface plasmon resonance of silver nanohole arrays

Leila Mehrvar, Seyed Hassan Tavassoli

Laser and Plasma Research Institute, University of Shahid Beheshti, Evin, Tehran

Abstract- In this article surface plasmon resonance excited at nanohole arrays milled in metal films is studied by Comsol software. For investigation of SP resonance, the absorption spectrum combined with the electric field distribution is employed. Based on our results, it can be found that: 1) In the absorption spectrum, the SP resonance correlates with a resonant peak and all peaks in the spectrum do not correlate with the plasmon resonances; 2) The size variation will shift the resonant wavelength; 3) The maximum enhancement factor occurs at wavelength with the highest absorption peak.

Keywords: Enhancement Factor, Enhancement of Electric Field, Nanohole, Surface Plasmon resonance.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

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

۱- مقدمه

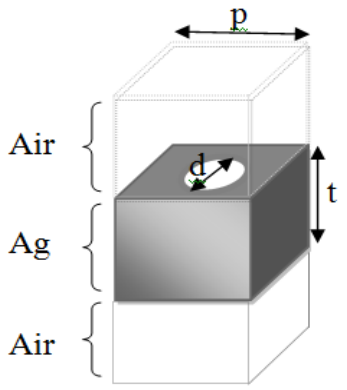
پلاسمون‌های سطحی نوسانات دسته جمعی الکترون‌ها در فصل مشترک هر دو ماده ای هستند که علامت قسمت حقیقی تابع دی الکتریک آنها تغییر کند (فصل مشترک فلز-دی‌الکتریک). برانگیختگی مد پلاسمون سطحی متناظر با تقویت زیاد میدان الکتریکی می‌باشد و این امر منجر به کاربردهای فراوانی از جمله تقویت سیگنال رامان [۱] و تقویت سیگنال فلورسانس [۲] شده است.

از آنجایی‌که تقویت سیگنال در رزونانس‌های مختلف متفاوت می‌باشد نیاز به ساختاری تنظیم‌پذیر می‌باشد. یکی از این ساختارهای تنظیم‌پذیر نانوحفره‌های فلزی هستند. در این مقاله به تنظیم‌پذیری طول موج رزونانس آرایه‌ای از نانو حفره‌های نقره بر اساس تغییر سایز پرداخته شده و بیشترین تقویت میدان مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- شبیه‌سازی

به منظور بررسی ماهیت فیزیکی رزونانس‌های پلاسمون برانگیخته شده روی فصل مشترک فلز و دی الکتریک، آرایه‌ای از نانوحفره‌های نقره معلق در هوا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هدف از انتخاب ساختار متقارن (هوا-نقره-هوا)، تمرکز روی مکانیزم رزونانس پلاسمونیک و بررسی اثرات ابعاد حفره روی آن می‌باشد. لازم به‌ذکر است که روش به‌کارگرفته شده در این شبیه‌سازی برای هر ساختار نامتقارن دیگر می‌تواند بکار رود. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام و تابع دی‌الکتریک نقره از کتاب راهنمای پالیک [۳] گرفته شده است.

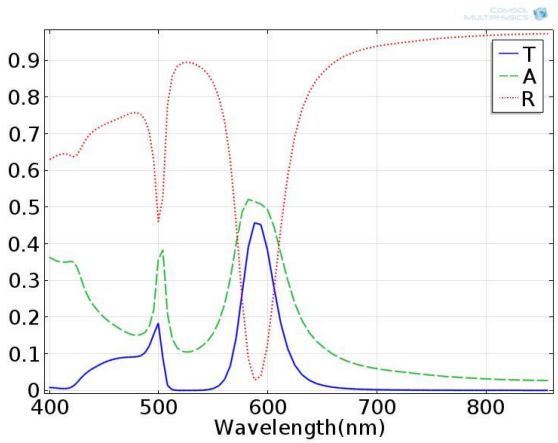
سلول واحد آرایه‌ی نانوحفره در شکل ۱ نشان داده شده است. گام این آرایه p، قطر هر حفره d و ضخامت آن با t مشخص شده است. در این شبیه‌سازی منبع نور پهن (۴۰۰-۹۰۰ nm) بطور عمود به این ساختار تابانده شده است. برای ساده‌سازی یک موج تخت با قطبش خطی در جهت x و جهت انتشار z− فرض شده است. به دلیل تناوبی بودن ساختار از شرایط مرزی تناوبی در جهت های x و y و ناحیه ی جاذب کامل در جهت z استفاده شده است. توان جذبی با انتگرال حجمی گرمایش مقاومتی در فیلم نقره و توان عبوری/بازتابی با انتگرال سطحی فلوی توان محاسبه شده‌اند و ضرایب عبور، بازتاب و جذب از نسبت توانهای محاسبه شده به توان ورودی به دست آمده‌اند که این ضرایب برای پارامترهای p=۵۰۰ nm، d=۲۵۰nm



شکل ۱: سلول واحد تحت شبیه‌سازی

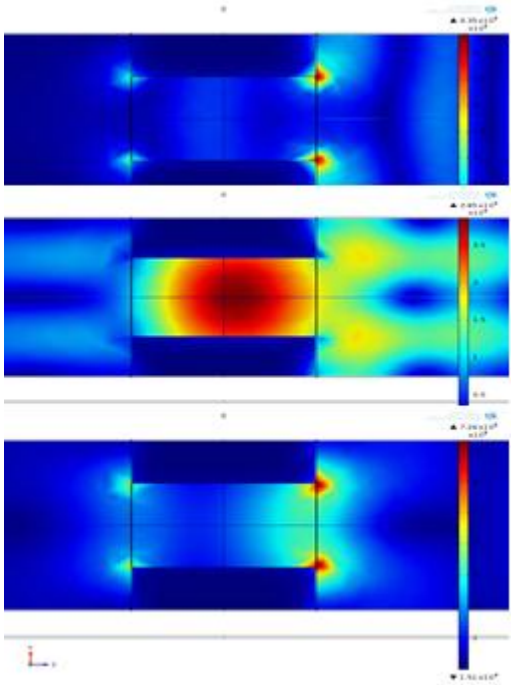
و t=۴۰۰ nm محاسبه شده و در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی، نتایج بدست آمده با طیف‌های تجربی [۴] مقایسه و توافق بسیار خوبی مشاهده شده است. توجه شود که ۳ رزونانس در طیف جذب مشاهده میشود: ماکسیمم ۱ در ۴۲۰nm، ماکسیمم ۲ در ۵۰۴nm و ماکسیمم ۳ در ۵۸۲nm. برای ارزیابی ماهیت فیزیکی هر کدام از این رزونانس‌ها توزیع میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به توزیع میدان دیده می‌شود که در ماکسیمم های ۱ و ۳، میدان الکتریکی در لبه‌ها متمرکز شده است و نشاندهنده‌ی این است که این ماکسیمم‌ها رزونانس‌های پلاسمون جایگزیده می‌باشند. اما مشاهده می‌شود که در طول‌موج متناظر با ماکسیمم ۲



شکل ۲: طیف‌های شبیه‌سازی جذب A، عبور T و بازتاب R برای آرایه‌ای از حفره با گام 500nm، قطر 250nm و ضخامت 400nm

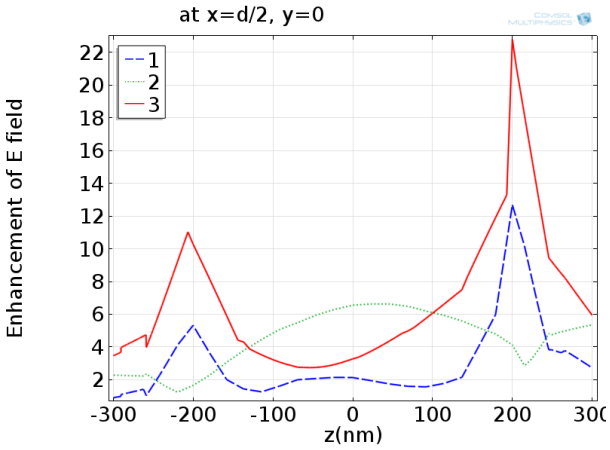
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]



شکل۳: توزیع میدان الکتریکی برای ماکسیمم‌های به ترتیب از بالا به پایین ۳،۲،۱

میدان داخل حفره متمرکز شده است و مشخص می‌کند که این ماکسیمم مربوط به مدهای کاواک فابری پرو می‌باشد.

فاکتور تقویت میدان الکتریکی در هر یک از ۳ رزونانس(ماکسیمم) طیف جذب که طول موج های متناظر آنها در بالا آورده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. مجدداً مشاهده می‌شود که تقویت میدان برای ماکسیمم های ۱ و ۳ روی لبه‌های حفره و برای ماکسیمم ۲ داخل کاواک بیشینه میباشد. از فاکتور تقویت بدست‌آمده فهمیده می‌شود که ماکسیمم ۳ بیشترین تقویت را دارد و با توجه به اینکه ماکسیمم ۳ بیشترین جذب را نیز داراست می‌توان نتیجه گرفت که که ماکسیمم تقویت در طول موجی رخ میدهد که ماکسیمم جذب وجود داشته باشد. به همین دلیل برای بررسی میزان تقویت و برانگیختگی رزونانس پلاسمون سطحی تنها ماکسیمم ۳ با بیشترین فاکتور تقویت در نظر گرفته خواهد شد.



شکل۴: تقویت میدان الکتریکی در جهت z در لبه‌ی حفره (x=d/2, y=0)

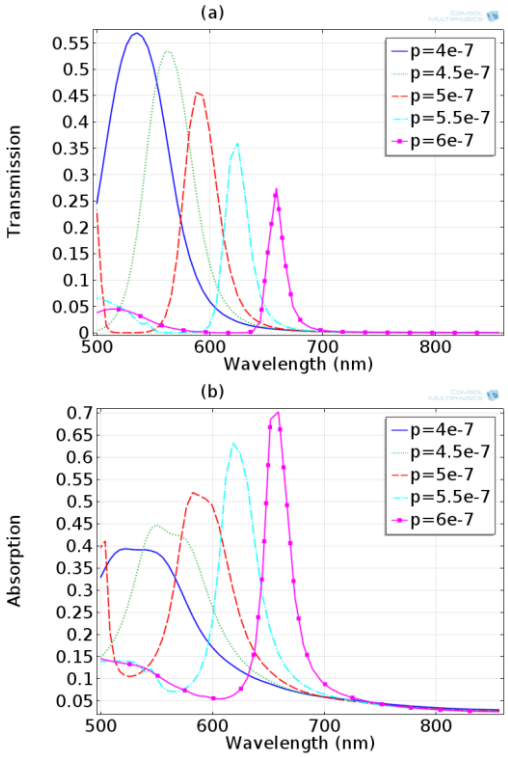
۳- تنظیم رزونانس پلاسمون سطحی

از آنجایی‌که این ساختارهای تناوبی جهت تقویت سیگنال مورد استفاده قرار میگیرند، تنظیم طول موج پلاسمون در محدوده‌ی طول موج لیزر بسیار بااهمیت می‌باشد. به‌همین منظور با تغییر پارامترهای گام و قطر حفره به بررسی تنظیم‌پذیری و میزان تقویت سیگنال خواهیم پرداخت.

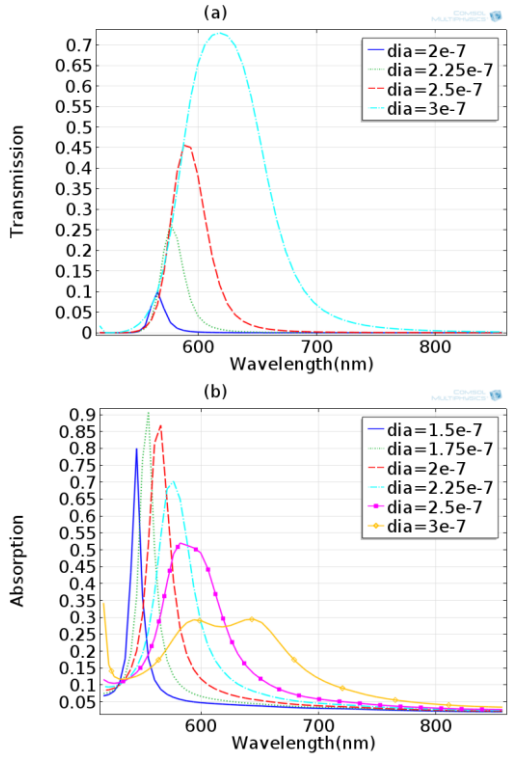
۳-۱- اثر تغییر گام

طیف‌های عبور و جذب آرایه‌ی حفره برای گام‌های بین ۴۰۰nm و ۶۰۰nm با قطر ۲۵۰nm و ضخامت ۴۰۰nm در شکل ۵-a و ۵-b نشان داده شده است. با توجه به طیف‌ها چند نکته قابل ذکر می‌باشد: ۱) برای هر گام طول موج ماکسیمم در طیف‌های عبوری و جذب بر هم منطبق هستند و نشان می‌دهد که برانگیختگی پلاسمون سطحی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های تقویت توان عبوری می‌باشد. ۲) با افزایش گام، میزان عبور کاهش و میزان جذب افزایش میابد. با افزایش گام نسبت سطح نقره به سطح حفره در هر سلول واحد افزایش می یابد و انرژی اپتیکی بیشتری جذب خواهد نشد و به همین دلیل میزان عبور کاهش میابد. ۳) با افزایش گام ماکسیمم به طول موج‌های بلندتر شیفت می‌کند. ۴) افزایش گام منجر به افزایش تقویت میدان می‌شود که دلیل آن افزایش توان جذبی در ساختار می‌باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]



شکل۵: a) طیف عبور و b) جذب برای آرایه‌ای از حفره‌ها برای گام-های متفاوت



شکل۶: a) طیف عبور و b) جذب برای آرایه‌ای از حفره‌ها برای قطرهای متفاوت

۳-۲- اثر تغییر قطر

طیف‌های عبوری و جذب آرایه‌ی حفره با قطرهای بین ۱۲۵nm و ۳۵۰nm ، گام ۵۰۰nm و ضخامت ۴۰۰nm در شکل ۶ نشان داده شده است. در یک سلول واحد با افزایش قطر ناحیه‌ی نقره کاهش یافته و در نتیجه جذب کمتر و عبور بیشتری خواهیم داشت که در طیف ها این روند دیده میشود. در طیف جذب مشاهده می‌شود که با کاهش قطر پهنای طیفی کاهش میابد و تشخیص طول موج رزونانس دقیق‌تر خواهد بود. با توجه به میزان شیفت طول موجی و مقایسه‌ی آن با حالت قبلی می‌توان نتیجه گرفت که اثر تغییر گام بیشتر از تغییر قطر حفره می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش قطر ابتدا میزان جذب افزایش و سپس کاهش یافته است و ماکسیمم جذب در قطر ۱۷۵nm می‌باشد و با توجه به بررسی‌های قبلی می‌توان نتیجه گرفت که ماکسیمم تقویت میدان را در این قطر خواهیم داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای مشخصه‌یابی پلاسمون‌های سطحی ارائه شد. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که طیف جذب حاوی اطلاعات بسیاری است که برای مطالعه‌ی ماهیت فیزیکی رزونانس‌های سطحی و میزان تقویت میدان الکتریکی بسیار مناسب می‌باشد.

مراجع

[1] Billot L., Lamy de la Chapelle M, “Surface enhanced Raman scattering on gold nanowire arrays: Evidence of strong multipolar surface plasmon resonance enhancement”, Chemical Physics Letters, 2006

[2] Liu Y., Blair S, “Fluorescence enhancement from an array of subwavelength metal apertures”, Optics Letters, 2003

[3] Palik E D, “Handbook of Optical Constants of Solids”, Academic, 1998

[4] Degiron A., Ebbesen T W,”The role of localized surface plasmon in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures”, Optics, 2005

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]