



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 هم‌پسته می‌باشند اما تمام ماکسیمم‌های طیف جذب با رزونانس پلاسمون سطحی هم‌پسته نمی‌باشند. (۲) تغییر ابعاد حفره منجر به شیفت طول‌موج رزونانس می‌شود. (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

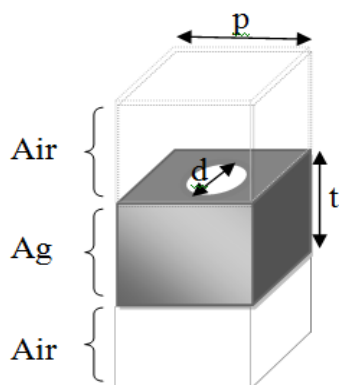
Laser and Plasma Research Institute, University of Shahid Beheshti, Evin, Tehran

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.

۱- مقدمه

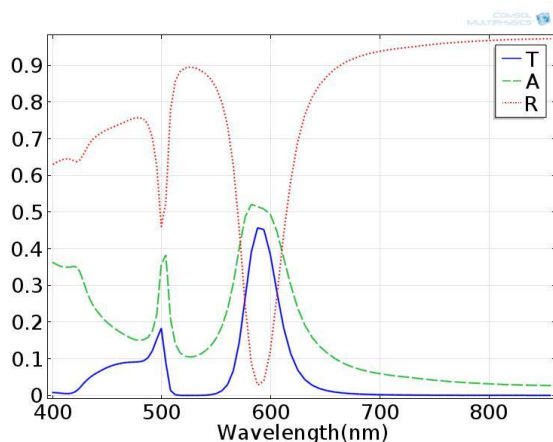
آمده‌اند که این ضرایب برای پارامترهای $p=500\text{ nm}$
 $d=250\text{ nm}$



شکل ۱: سلول واحد تحت شبیه‌سازی

و $t=400\text{ nm}$ 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 420 nm ، ماکسیمم ۲ در 504 nm و ماکسیمم ۳ در 582 nm . 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 ماکسیمم‌های ۱ و ۳، میدان الکتریکی در لبه‌ها متمرکز شده است و نشان‌دهنده ی این است که این ماکسیمم‌ها رزونانس‌های پلاسمون جایگزیده می‌باشند. اما مشاهده می‌شود که در طول موج متناظر با ماکسیمم ۲



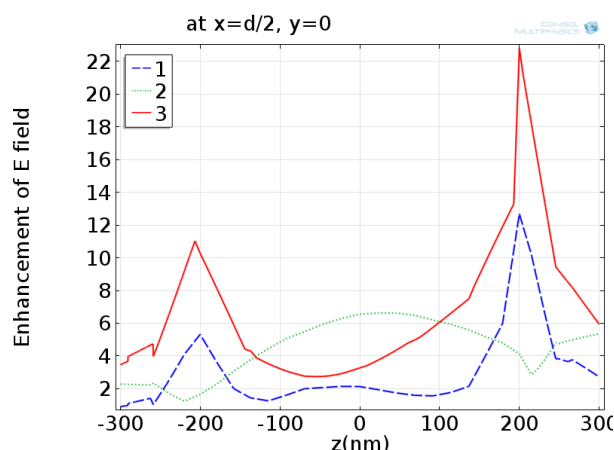
شکل ۲: طیف‌های شبیه‌سازی جذب A، عبور T و بازتاب R برای آرایه‌ای از حفره با گام 500 nm ، قطر 250 nm و ضخامت 400 nm

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-دی الکتریک). 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 به ذکر است که روش به کار گرفته شده در این شبیه‌سازی برای هر ساختار نامتقارن دیگر می‌تواند بکار رود. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام و تابع دی الکتریک 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 ($400-900\text{ nm}$) 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 جهت‌های 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 فلوئی توان محاسبه شده‌اند و ضرایب عبور، بازتاب و جذب از نسبت توانهای محاسبه شده به توان ورودی به دست



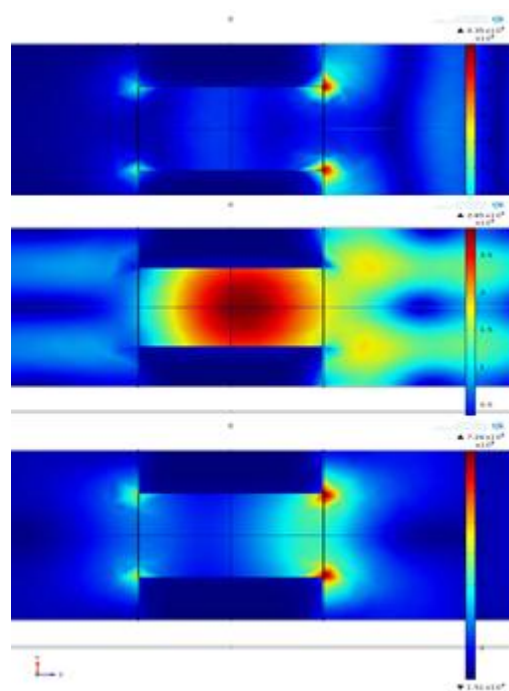
شکل ۴: تقویت میدان الکتریکی در جهت z در لبه‌ی حفره ($x=d/2, y=0$)

۳- تنظیم رزونانس پلاسمون سطحی

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

۳-۱- اثر تغییر گام

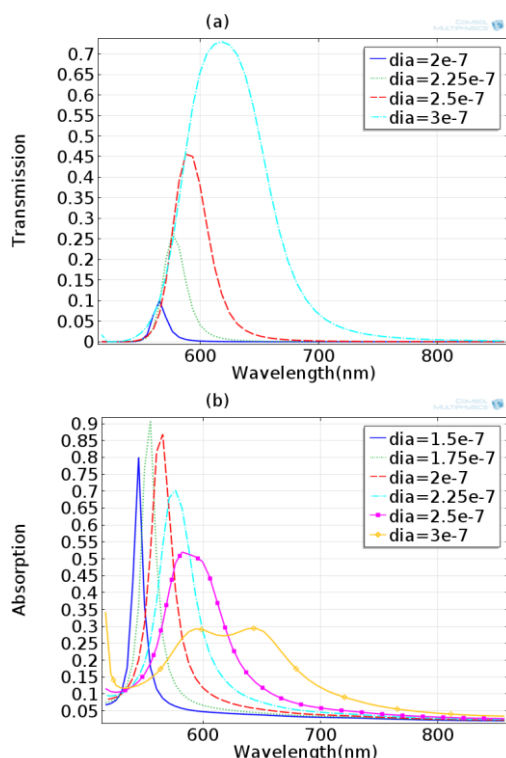
طیف‌های عبور و جذب آرایه‌ی حفره برای گام‌های بین 400 nm و 600 nm با قطر 250 nm و ضخامت 400 nm در شکل ۵-a و ۵-b نشان داده شده است. با توجه به طیف‌ها چند نکته قابل ذکر می‌باشد: (۱) برای هر گام طول موج ماکسیمم در طیف‌های عبوری و جذب بر هم منطبق هستند و نشان می‌دهد که برانگیختگی پلاسمون سطحی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های تقویت توان عبوری می‌باشد. (۲) با افزایش گام، میزان عبور کاهش و میزان جذب افزایش می‌یابد. با افزایش گام نسبت سطح نقره به سطح حفره در هر سلول واحد افزایش می‌یابد و انرژی اپتیکی بیشتری جذب خواهد نشد و به همین دلیل میزان عبور کاهش می‌یابد. (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.



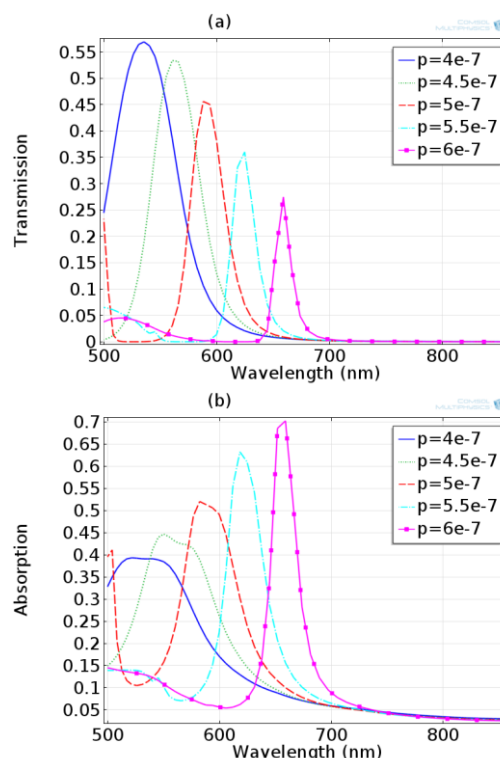
شکل ۳: توزیع میدان الکتریکی برای ماکسیمم‌های به ترتیب از بالا به پایین ۳، ۲، ۱

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 موج‌های متناظر آنها در بالا آورده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. مجدداً مشاهده می‌شود که تقویت میدان برای ماکسیمم‌های ۱ و ۳ روی لبه‌های حفره و برای ماکسیمم ۲ داخل کاواک بیشینه می‌باشد. از فاکتور تقویت بدست آمده 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 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.



شکل ۶: (a) طیف عبور و (b) جذب برای آرایه‌ای از حفره‌ها برای قطرهای متفاوت



شکل ۵: (a) طیف عبور و (b) جذب برای آرایه‌ای از حفره‌ها برای گام‌های متفاوت

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

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 طیف‌ها این روند دیده می‌شود. در طیف جذب مشاهده می‌شود که با کاهش قطر پهنای طیفی کاهش می‌یابد و تشخیص طول موج رزونانس دقیق‌تر خواهد بود. با توجه به میزان شیف 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.