



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 و شبیه سازی یک فیلتر پلاسمونی رنگی متشکل از آرایه دوبعدی از نانوانتن های متقاطع

محمود حسینی فرزاد<sup>۱</sup>، سید محمد علی مناقب<sup>۱</sup> و مزده جان فدا<sup>۲</sup>

۱ دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

۲ دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، بخش فیزیک

چکیده - در این مقاله با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان سه بعدی به بررسی و شبیه سازی عبور نور سفید با قطبش خطی مشخص از آرایه ی دو بعدی متشکل از نانوانتن های متقاطع فلزی می پردازیم. این آرایه ی نانوانتن ها شبیه یک فیلتر رنگی دینامیکی عمل می کند که بر اساس تشدید پلاسمون های سطحی جایگزیده<sup>۱</sup> می توان رنگهای مختلف را با تغییر زاویه قطبش خطی نور سفید فرودی بدست آورد. در این مقاله اثر تغییر پارامترهای مختلف از جمله دوره تناوب آرایه و جنس فلز نانوانتن ها بر روی عملکرد فیلتر و همچنین توزیع میدان الکتریکی بر روی نانوانتن در طول موج مینیمم طیف عبور به منظور تایید نقش  $LSP$  ها در این ساختار مورد بررسی قرار می گیرند.

کلید واژه- پلاسمونهای سطحی، فیلتر پلاسمونی، نانوانتن متقاطع، FDTD.

## Investigation and simulation of a color plasmonic filter contains a two dimensional array of crossed nano-antennas

Mahmood Hosseini farzad<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Ali Managheb<sup>1</sup>, and Mozhdeh Janfada<sup>2</sup>

1 Physics department, college of science, Shiraz university

2 Physics department, college of science, Isfahan university

Abstract- In this paper, by using of 3D finite difference time domain (FDTD) method, we investigate and simulate the transmission of a white light through a 2D dimensional lattice of the crossed metal nano-antennas. This array of nano-antennas operate like a dynamical color filter based on the localized surface plasmon resonance which is generate different colors according to the changing the linear polarization angle of the incident white light. In this paper, the effect of different parameters such as period of the array and material of the nano-antenna on the performance of the filter and also electric field distributions on the nano-antenna at wavelength of the minimum transmission, in order to justify the role of the LSPs in this structure are investigated.

Keywords: Surface Plasmons, plasmonic filter, crossed nano-antenna, FDTD.

<sup>1</sup> Localized Surface Plasmon (LSP)

۱- مقدمه

قرنهاست که نانوذرات فلزی<sup>۲</sup> (MNPs) برای ایجاد نقش و نگارهای رنگی در شیشه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مشهورترین مثال در این مورد، جام باستانی لیکورگوس می‌باشد [۱]. نور بازتابی از این جام به رنگ سبز درآمده درحالیکه نور عبوری از آن، قرمز دیده می‌شود. اثر فیلتر رنگی که در اینجا صورت می‌گیرد، نتیجه جذب و پراکندگی قوی نور به وسیله نانوذرات فلزی بوده که دلیل آن هم تشدید ناشی از برهمکنش نور با الکترونهاي آزاد سطح نانوذره در ناحیه طیف مرئی می‌باشد. این تحریک تشدیدي جفت شده‌ی الکترون- فوتون، پلاسمون سطحی جایگزیده<sup>۳</sup> (LSP) نامیده می‌شود.

قابلیت در طراحی ساختارهای فلزی برای پاسخ فرکانسی بخصوص [۲و۳] اخیراً جهت نمایش فیلتر رنگی موثر نور بر مبنای تحریک LSP در نانو ساختارهای فلزی مختلف به کار گرفته شده‌اند [۴-۷].

در این مقاله به طراحی و بررسی این فیلتر رنگی پلاسمونی می‌پردازیم. شبیه سازی سه بعدی عبور نور از آرایه دو بعدی ساختار که متشکل از میله‌های متقاطع یا صلیبی شکل می‌باشد در طراحی و شناخت خواص این فیلتر نقش مهمی ایفا می‌کند. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که تاثیرپذیری میزان عبور با زاویه قطبش خطی نور فرودی (۰ تا ۹۰ درجه) فقط تحت شرایط تنظیم مناسب پارامترهای طول بازوها، پریود تکرار آنها و جنس بازوها مطلوب عمل می‌کند.

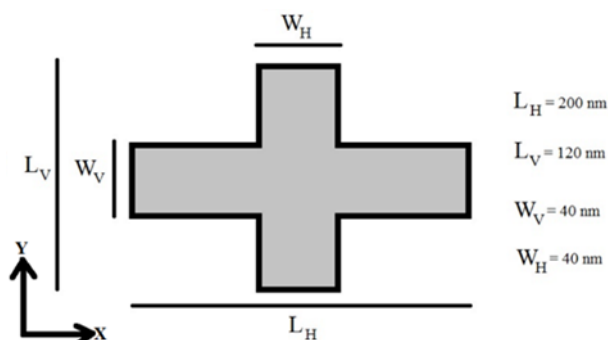
۲- نانوانت‌ن‌های اپتیکی

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانو تکنولوژی، می‌توان شکل و اندازه نانوذره فلزی و دیگر نانو ساختارهای فلزی را در ابعادی کوچکتر از ۱۰ نانومتر کنترل نمود، بطوریکه بتوان دقیقاً محل تشدید LSP را در جای بخصوصی بدست آورد. این نانوذرات فلزی بخاطر قابلیت آن‌ها در دریافت تابش اپتیکی در فرکانس‌های خاصی و متمرکز ساختن آن در میدان نزدیک یا گسیل انرژی الکترومغناطیسی میدان نزدیک به میدان دور، تحت عنوان نانوانت‌ن‌های اپتیکی<sup>۴</sup>

(ONATs) ملاحظه می‌شوند [۴].

۳- طرح فیلتر پلاسمونی رنگی

فیلتر پیشنهادی متشکل از آرایه ای دو بعدی از نانو ساختار پلاسمونیکي است. در این مقاله به بررسی مشخصات طیف عبوری این ساختار بر حسب تغییر زاویه قطبش نور فرودی که دارای پهنای فرکانسی در محدوده طیف مرئی است، می‌پردازیم. شکل (۱) شمایی از سلول واحد تشکیل دهنده ساختار دو بعدی این فیلتر را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایش ابعاد سلول واحد بعلاوه ای شکل ساختار؛ L و W به ترتیب بیانگر طول و پهنای هر کدام از بازوها و اندیس‌های H و V به ترتیب نشانگر بازوی افقی و عمودی می‌باشد. ضخامت این سلول ۴۰ نانومتر است.

طول بازوهای افقی و عمودی این ساختار نسبت به هم متفاوت می‌باشد که برحسب مکان تشدید LSP در فرکانس‌های متفاوت طراحی شده است. مکان طول موج تشدید LSP برای هر بازو از رابطه (۱) بدست می‌آید [۴]:

$$\lambda_0 = 2.86 \times L + 175 \quad (1)$$

که در رابطه فوق L طول بازوی نانوانت‌ن می‌باشد.

۴- شبیه سازی فیلتر پلاسمونی رنگی

شبیه سازی در محیط نرم افزاری اوبتی اف دی تی دی<sup>۵</sup> صورت گرفته است. راستای تابش نور فرودی در جهت محور Z و راستای دو بازوی نانوانت‌ن در راستای X (بازوی بزرگتر) و Y (بازوی کوچکتر) می‌باشد. بازه طول موجی را از ۳۰۰ نانومتر تا ۸۰۰ نانومتر گرفته‌ایم تا سرتاسر طیف مرئی را پوشش دهد.

<sup>2</sup> Metal Nanoparticles

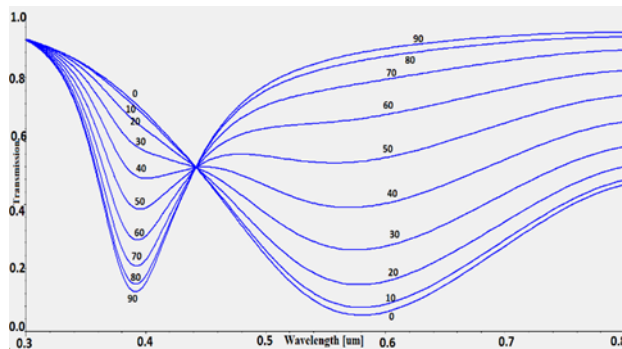
<sup>3</sup> Localized Surface Plasmon (LSP)

<sup>4</sup> Optical NanoAntennas

<sup>5</sup> OptiFDTD

#### ۴-۱- تاثیر زاویه تابش

زاویه قطبش نور فرودی را نسبت به بازوی بزرگتر در نظر گرفته ایم. بنابراین نور با قطبش صفر درجه همراستای بازوی بزرگتر نانوآنتن می باشد.

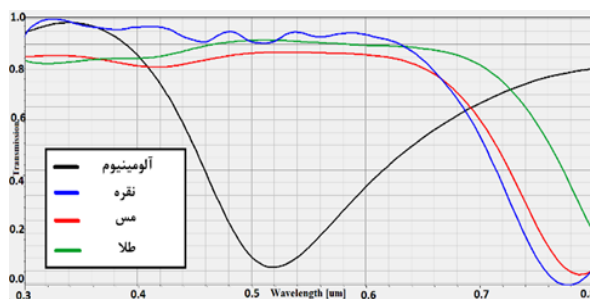


شکل ۲: طیف عبور شبیه سازی شده نور قطبیده از  $\phi = 0$  تا  $\phi = 90$  با گامهای ۱۰ درجه ای.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده میشود، با تغییر زاویه قطبش از صفر تا ۹۰ درجه در گامهای ۱۰ درجه ای، مکان کمینه طیف عبوری (مکان تشدید LSP) در محدوده مرئی جابجا می شود.

#### ۴-۲- تاثیر جنس فلز نانو ساختار

ساختار مربوط به شکل (۱) را برای ۴ فلز طلا، نقره، مس و آلومینیوم بکار بردیم. طیف عبوری از این ساختارها در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳: طیف عبوری از ساختار شکل (۱) برای ۴ فلز مختلف آلومینیوم (منحنی مشکی)، طلا (منحنی سبز)، مس (منحنی قرمز) و نقره (منحنی آبی).

کمترین مقدار طیف عبوری از ساختارهای طلا، نقره و مس در طول موج هایی بیشتر از ۷۷۰ نانومتر واقع شده اند که خارج از محدوده طیف مرئی است و بنابراین مناسب جهت کاربرد فیلتری در طیف مرئی نیستند. اما فلز آلومینیوم طیف عبوری مناسبی را در این محدوده از خود

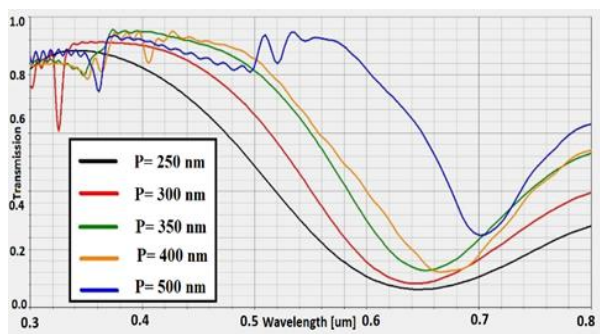
نشان می دهد که مربوط به مقدار بزرگ فرکانس پلاسمای ( $\omega_p$ ) آلومینیوم نسبت به دیگر فلزات مورد بررسی می باشد. زیرا با افزایش فرکانس پلاسمای حجمی، فرکانس پلاسمای سطحی نیز افزایش می یابد [۸]:

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_d}} \quad (2)$$

که  $\epsilon_d$  ضریب شکست محیط دی الکتریکی است که در مجاورت سطح فلز قرار دارد.

#### ۴-۳- تاثیر تناوب آرایه ها

دیگر پارامتر مورد بررسی فاصله بین دو نانوآنتن متوالی (تناوب آرایه) می باشد. پارامترهای ساختار را مطابق شکل (۱) را در نظر گرفته و با تغییر تناوب آرایه ها از ۲۵۰ نانومتر تا ۵۰۰ نانومتر طیف عبوری مختلفی همانند شکل (۴) بدست آمده است:



شکل ۴: طیف عبوری از ساختار فیلتری با مشخصات سلول واحد شکل (۱) که برای دوره ی تناوب های مختلفی در آرایه دو بعدی آن رسم شده است.

همانطور که از شکل (۴) مشاهده می شود با افزایش طول تناوب، مکان تشدید پلاسمونهای سطحی به سمت طول موجهای بزرگتر جابجا می شود. بعلاوه نمودار طیف عبوری برای تناوبهای بزرگ نسبت به تناوبهای کوچکتر دارای فرورفتگی های با عمق کمتری است و بنابراین خصوصیت فیلتری این ساختارها رفته رفته در تناوبهای بزرگ از بین می رود. از طرف دیگر بعد از  $p = 350nm$  در ابتدای طیف و طول موجهای کوچک، نوساناتی در آن مشاهده می شود که این نوسانات برای  $p = 500nm$  به وسط طیف مرئی نیز کشانده می شود که این رفتار مزاحم عملکرد فیلتر رنگی می باشد. می توان گفت در پیوندهای بزرگ، آرایه نانو ذره به سمت خصوصیات یک توری دو

تابشی باشد تا تشعشع حاصل از تحریک و تشدید پلاسمون‌های سطحی قادر به ایجاد فیلتر رنگی باشند. برای ساخت این نانواتن‌ها می‌بایست از فلزاتی مانند آلومینیوم استفاده کرد که فرورفتگی موجود در طیف عبوری در محدوده مرئی با زاویه قطبش جابجا می‌شود. توزیع میدان الکتریکی در طول موج مینیمم عبور و تحریک LSP ها بر روی دو بازوی سلول واحد را تایید می‌کند.

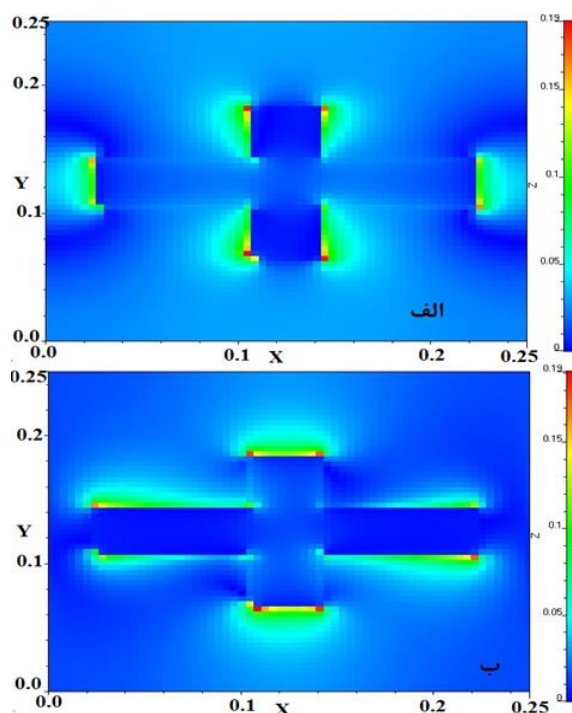
### مراجع

- [1] I. Freeston, N. Meeks, M. Sax and C. Higgitt, *The Lycurgus Cup-A Roman Nanotechnology*. Gold Bulletin, 40, pp. 270-277, 2007.
- [2] Y. Chu, E. Schonbrun, T. Yung, and K. B. Crozier, "Experimental observation of narrow surface plasmon resonances in gold nanoparticle arrays" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 93, pp. 181108, 2008.
- [3] Y. Chu, D. Wang, W. Zhu, and K. B. Crozier, "Double resonance surface enhanced Raman scattering substrates: an intuitive coupled oscillator model" *Optics Express*, Vol. 19, No. 16, pp. 14919-14928, 2011.
- [4] T. Ellenbogen, K. Seo, and K. B. Crozier, "Chromatic Plasmonic Polarizers for Active Visible Color Filtering And Polarimetry" *Nano Let.* V. 12, pp. 1026-1031, 2012.
- [5] T. Xu, Y. Wu, X. Luo, L. J. Guo, "Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging" *Nat. Commun.* 1, Article number 59, 2010.
- [6] H. S. Lee, Y. T. Yoon, S. S. Lee, S. H. Kim, and K. D. Lee "Color filter based on a subwavelength patterned metal grating" *Opt. Exp.*, Vol. 15, No. 23, pp.15457-15463, 2007.
- [7] C. Genet, T. W. Ebbesen, "Light in tiny holes" *Nature*, Vol. 455, pp. 39 – 46, 2007.
- [8] S. A. Maier, *Plasmonics : Fundamentals and Applications*. Springer, pp. 5-28, 2007.

بعدی نزدیک می‌شود و ساختار از حالت فراماده بودنش خارج شده (یک فراماده دوبعدی) و به سمت تولید مرتبه-های بالاتر پراش در توری نزدیک می‌شود.

### ۴-۴- توزیع میدان الکتریکی بر روی سطح یک نانواتن

شکل (۵) توزیع مؤلفه‌های میدان الکتریکی ( $E_x$  و  $E_y$ ) برای قطبش فرودی  $\varphi = 0$  را برای طول موج تشدید یا محل مینیمم طیف عبور نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمایش توزیع میدان بر روی سطح نانواتن صلیبی شکل برای قطبش افقی. الف) نمایش شدت مؤلفه X میدان. ب) نمایش شدت مؤلفه Y میدان.

همانطور که از شکل (۵) مشاهده می‌شود در لبه‌های بازوی افقی شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده‌ی تحریک پلاسمون‌های سطحی بر روی این بازو است. در حالیکه افزایش و تشدید میدان الکتریکی بر روی سطوح بازوی عمودی بسیار ناچیز است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با شبیه‌سازی سه بعدی آرایه ای دوبعدی از نانوساختارهای صلیبی شکل، با دو بازوی عمود بر هم، نشان دادیم که می‌توانند بصورت یک فیلتر رنگی عمل کنند. پیروی این آرایه می‌بایست زیر حد و اندازه طول موج