

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

محمود حسینی فرزاد^۱، سید محمد علی مناقب^۱ و مژده جان فدا^۲

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^۱ 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 farzad¹, Seyed Mohammad Ali Managheb¹, and Mozhddeh Janfada²

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.

¹ Localized Surface Plasmon (LSP)

۱- مقدمه

قرنهایست که نانوذرات فلزی^۲ (MNPs) برای ایجاد نقش و نگارهای رنگی در شیشه ها مورد استفاده قرار گرفته اند. مشهورترین مثال در این مورد، جام باستانی لیکورگوس می باشد [۱]. نور بازتابی از این جام به رنگ سبز درآمده درحالیکه نور عبوری از آن، قرمز دیده می شود. اثر فیلتر رنگی که در اینجا صورت می گیرد، 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 می باشد. این تحریک تشدیدي جفت شدهی الکترون- فوتون، پلاسمون سطحی جایگزیده^۳ (LSP) نامیده می شود.

قابلیت در طراحی ساختارهای فلزی برای پاسخ فرکانسی بخصوص [۳و۲] اخیراً جهت نمایش فیلتر رنگی موثر نور بر مبنای تحریک LSP در نانوساختارهای فلزی مختلف به کار گرفته شده اند [۴-۷].

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

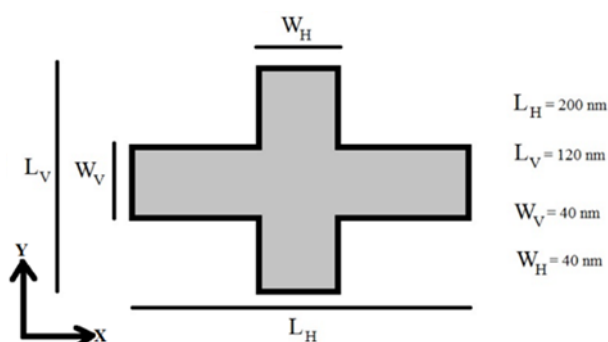
۲- نانوانتین های اپتیکی

با پیشرفت های اخیر در حوزه نانوتکنولوژی، می توان شکل و اندازه نانوذره فلزی و دیگر نانوساختارهای 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 فرکانس های خاصی و متمرکز ساختن آن در میدان نزدیک یا گسیل انرژی الکترومغناطیسی میدان نزدیک به میدان دور، تحت عنوان نانوانتین های اپتیکی^۴

(ONATs) ملاحظه می شوند [۴].

۳- طرح فیلتر پلاسمونی رنگی

فیلتر پیشنهادی متشکل از آرایه ای دو بعدی از نانوساختار پلاسمونیکی 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، می پردازیم. شکل (۱) شمایی از سلول واحد تشکیل دهنده ساختار دو بعدی این فیلتر را نشان می دهد.



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

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

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

که در رابطه فوق L طول بازوی نانوانتین می باشد.

۴- شبیه سازی فیلتر پلاسمونی رنگی

شبیه سازی در محیط نرم افزاری اوبیتی اف دی تی دی^۵ صورت گرفته است. راستای تابش نورفرودی در جهت محور Z و راستای دو بازوی نانوانتین در راستای X (بازوی بزرگتر) و Y (بازوی کوچکتر) می باشد. بازه طول موجی را از ۳۰۰ نانومتر تا ۸۰۰ نانومتر گرفته ایم تا سرتاسر طیف مرئی را پوشش دهد.

² Metal Nanoparticles

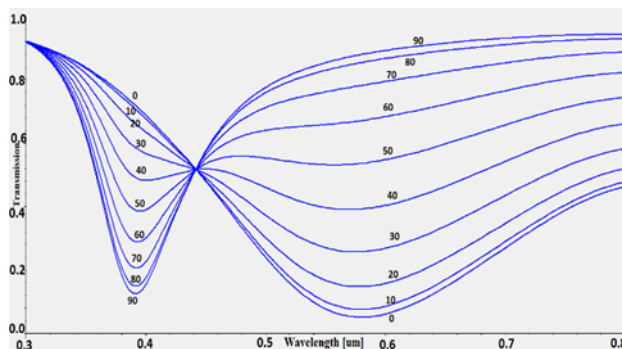
³ Localized Surface Plasmon (LSP)

⁴ Optical NanoAntennas

⁵ 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.

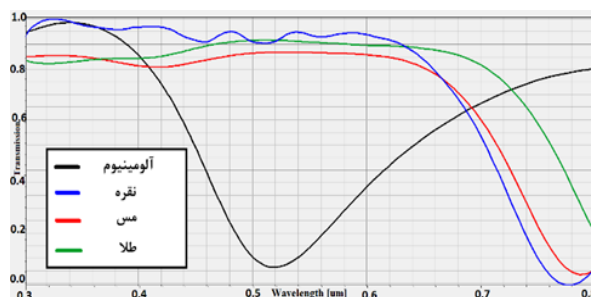


شکل ۲: طیف عبور شبیه سازی شده نور قطبیده از $\phi = 0$ تا $\phi = 90$ با گامهای ۱۰ درجه ای.

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

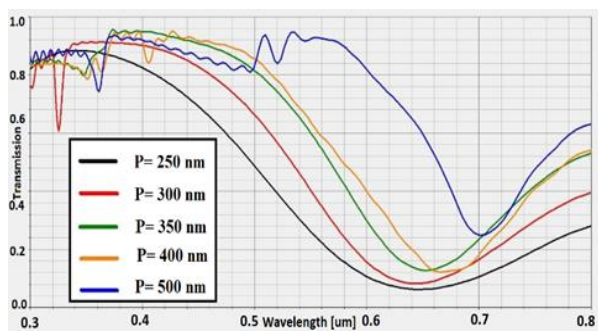
نشان می دهد که مربوط به مقدار بزرگ فرکانس پلاسمای (ω_p) آلومینیوم نسبت به دیگر فلزات مورد بررسی می باشد. زیرا با افزایش فرکانس پلاسمای حجمی، فرکانس پلاسمای سطحی نیز افزایش می یابد [۸]:

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

که ϵ_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

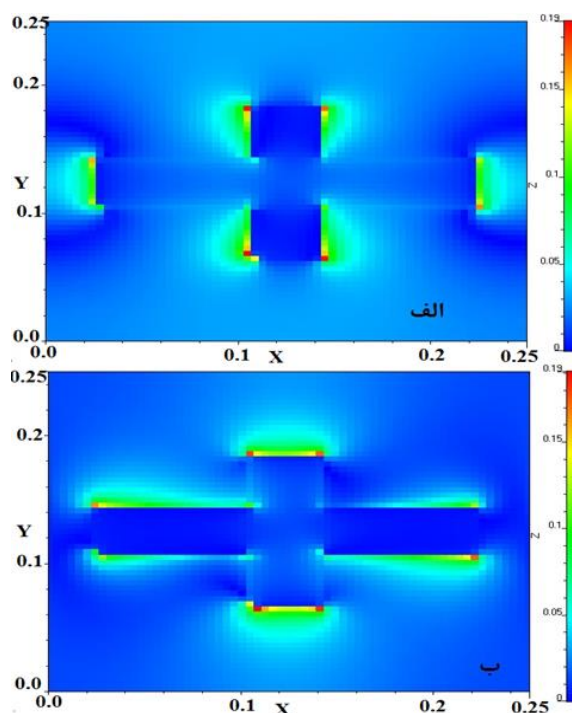
- [1] I. Freeston, N. Meeks, M. Sax and C. Higgitt, *The Lycurgus Cup-A Roman Nanotechnology*. Gold Bulletin, 40, pp. 270-277, 2007.
- [2] Y. Chu, E. Schonbrun, T. Yung, and K. B. Crozier, "Experimental observation of narrow surface plasmon resonances in gold nanoparticle arrays" *Appl. Phys. Lett.*, 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. پریود این آرایه می‌بایست زیر حد و اندازه طول موج