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 نانوآنتن های متقاطع

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

۱دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

۲دانشگاه 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 نانوآنتن های متقاطع فلزی می پردازیم. این آرایه‌ی نانوآنتن ها شبیه یک فیلتر رنگی دینامیکی عمل می‌کند که بر اساس تشدید پلاسمون‌های سطحی جایگزیده [۱] می‌توان 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 نانوآنتن ها بر روی عملکرد فیلتر و همچنین توزیع میدان الکتریکی بر روی نانوآنتن در طول موج مینیمم طیف عبور به منظور تایید نقش *LSP* ها در این ساختار مورد بررسی قرار می‌گیرند.

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

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

Mahmood Hosseini farzad[1], Seyed Mohammad Ali Managheb[1], and Mozhdeh Janfada[2]

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)

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

قرنهاست 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 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 الکترونهای آزاد سطح نانوذره در ناحیه طیف مرئی می‌باشد. این تحریک تشدیدی جفت شده‌ی الکترون- فوتون، پلاسمون سطحی جایگزیده[۳] (LSP) نامیده می شود.

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

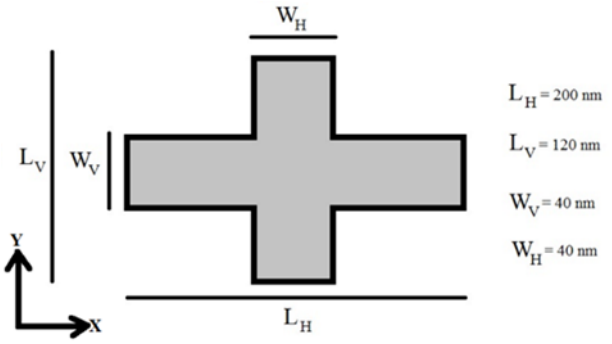
در این مقاله به طراحی و بررسی این فیلتر رنگی پلاسمونی می‌پردازیم. شبیه سازی سه بعدی عبور نور از آرایه دو بعدی ساختار که متشکل از میله های متقاطع یا صلیبی شکل می‌باشد در طراحی و شناخت خواص این فیلتر نقش مهمی ایفا می‌کند. بررسی های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که تاثیرپذیری میزان عبور با زاویه قطبش 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- نانوآنتن‌های اپتیکی

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانوتکنولوژی، می‌توان 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 فرکانس‌های خاصی و متمرکز ساختن آن در میدان نزدیک یا گسیل انرژی الکترومغناطیسی میدان نزدیک به میدان دور، تحت عنوان نانوآنتن‌های اپتیکی[۴] (ONATs) ملاحظه می‌شوند [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، 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]:

$$\lambda_0 = 2.86 \times L + 175 \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق L طول بازوی نانوآنتن می‌باشد.

۴- شبیه سازی فیلتر پلاسمونی رنگی

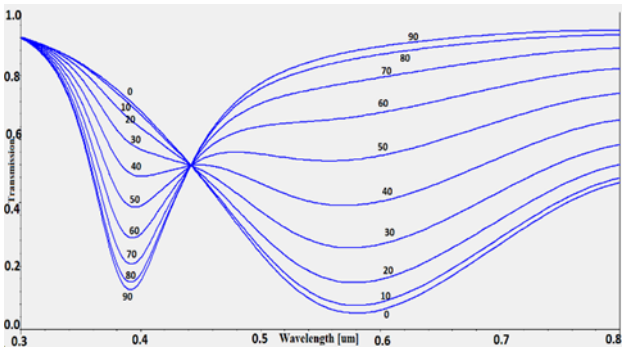
شبیه سازی در محیط نرم افزاری اوپتی اف دی تی دی[۵] صورت گرفته است. راستای تابش نورفرودی در جهت محور Z و راستای دو بازوی نانوآنتن در راستای X (بازوی بزرگتر) و Y (بازوی کوچکتر) می‌باشد. بازه طول موجی را از ۳۰۰ نانومتر تا ۸۰۰ نانومتر گرفته‌ایم تا سرتاسر طیف مرئی را پوشش دهد.

[2] Metal Nanoparticles
[3] Localized Surface Plasmon (LSP)
[4] Optical NanoAntennas
[5] OptiFDTD

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

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 می‌باشد.

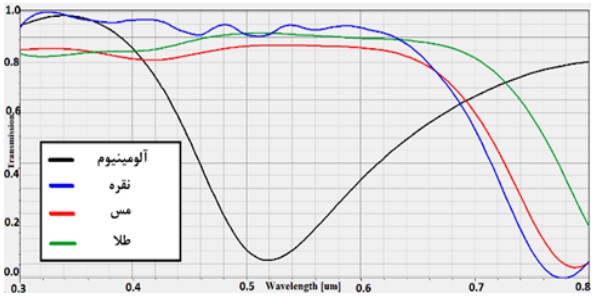


شکل ۲: طیف عبور شبیه‌سازی شده نور قطبیده از $\varphi = 0$ تا $\varphi = 90$ با گامهای ۱۰ درجه ای.

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

۴-۲- تاثیر جنس فلز نانوساختار

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).

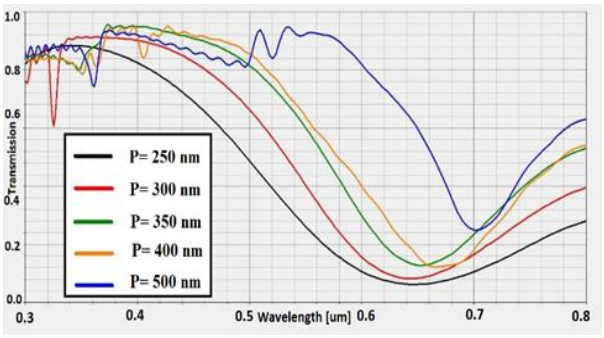
کمترین مقدار طیف عبوری از ساختارهای طلا، نقره و مس در طول موج هایی بیشتر از ۷۷۰ نانومتر واقع شده اند که خارج از محدوده طیف مرئی است و بنابراین مناسب جهت کاربرد فیلتری درطیف مرئی نیستند. اما فلز آلومینیوم طیف عبوری مناسبی را در این محدوده از خود نشان می‌دهد که مربوط به مقدار بزرگ فرکانس پلاسمای(ω_p) آلومینیوم نسبت به دیگر فلزات مورد بررسی می‌باشد. زیرا با افزایش فرکانس پلاسمای حجمی، فرکانس پلاسمای سطحی نیز افزایش می‌یابد[۸] :

$$\omega_{sp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\varepsilon_d}} \qquad (۲)$$

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) می‌باشد. 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.

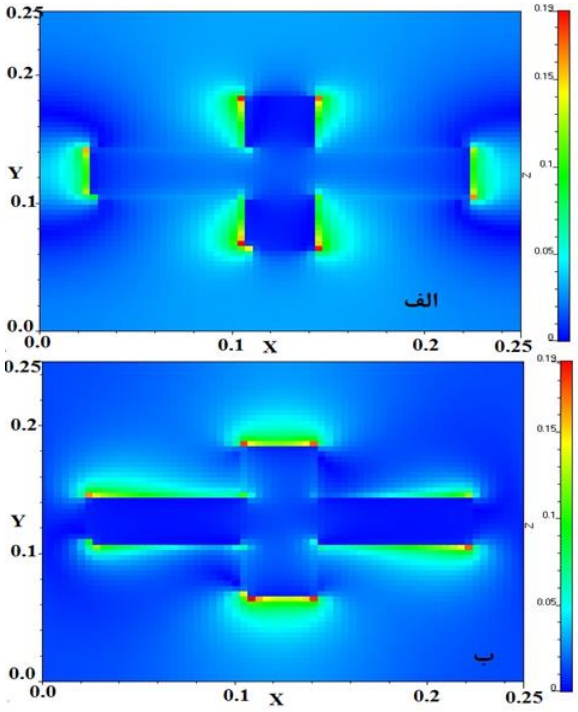
همانطور که از شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش طول تناوب، مکان تشدید پلاسمونهای سطحی به سمت طول موجهای بزرگتر جابجا می‌شود. بعلاوه نمودار طیف عبوری برای تناوب‌های بزرگ نسبت به تناوب‌های کوچکتر دارای فرورفتگی های با عمق کمتری است و بنابراین خصوصیت فیلتری این ساختارها رفته رفته در تناوب‌های بزرگ از بین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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

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 نانوآنتن

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 نانوآنتن 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 شبیه سازی 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 تابشی باشد تا تشعشع حاصل از تحریک و تشدید پلاسمون‌های سطحی قادر به ایجاد فیلتر رنگی باشند. برای ساخت این نانوآنتن‌ها 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*" *Otics E*xpress, 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]