بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تلفیق‌کننده پلاسمونی جذب کننده با ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز با به کارگیری بلور دوشکستی باریم تیتانات

پوریا اسحاقی، محمدآقا بلوری زاده

بخش فیزیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ماهان، کرمان، ایران

چکیده – تلفیق‌کننده‌های اپتیکی به دلیل محدودیت پراش قابلیت فشردگی محدودی دارند. از آنجا امروزه تلفیق‌کننده‌های پلاسمونی به دلیل اندازه فوق فشرده و کارکرد زیر حد پراش و پهنای باند بالا و مصرف انرژی پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق یک تلفیق‌کننده پلاسمونی جذب‌کننده بر پایه اثر پاکلز با ساختار طلا- سیلیکون نیترید-باریوم تیتانات-طلا با بستری شیشه‌ای و اثر ضخامت لایه‌ها بر عملکرد تلفیق‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ضخامت بهینه برای لایه‌های دی‌الکتریک تشکیل‌دهنده این تلفیق‌کننده به دست آمده است.

کلید واژه- پلاسمونی، اثر پاکلز ، تلفیق‌کننده

An absorber Plasmonic modulator with metal-dielectric-metal structure employing birefringence crystal of barium titanate

Purya Es'haghi, M.A Bolorizadeh

Physics and Photonics Department, Graduate University of Advanced Technology, Mahan, Kerman, Iran.

Abstract- Due to diffraction limit, optical modulators have a limited capability compression. Nowadays, plasmonic modulators owing to ultra compact size, operation under diffraction limit, high bandwidth , and low energy consumption have been attracted more consideration. In this research, an absorber plasmonic modulator based on Pockels effect with a configuration of gold-silicon nitride-barium titanate-gold and a glass substrate the effect of layerss' thickness on modulator performance has been investigated. In addition, the optimized thickness has been obtained for dielectric layers of modulator.

Key Words**:** Plasmonics, Pockels effect, Modulator

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

۱- مقدمه

به طور کلی واژه تلفیق‌کننده به دستگاهی اطلاق می‌شود که اطلاعات را بر موج حامل سوار می‌کند[۱]. تلفیق‌کننده‌های اپتیکی به دلیل محدودیت پراش بیشتر از حد معینی قابلیت فشرده‌تر نمودن را ندارند. تلفیق کننده‌های پلاسمونی دسته‌ای از تلفیق‌کننده‌های الکترواپتیکی سرعت بالا هستند که در چارچوب پلاسمون پلاریتون سطحی کارکردی زیر حد پراش پیدا می‌کنند[۲] و برای استفاده در اپتیک مجتمع بسیار مناسب‌اند. عمل تلفیق در مخابرات نوری بر روی فاز، دامنه، فرکانس، قطبش و شدت انجام می‌گیرد. ساختارهای پلاسمونی فعال نیازمند تکنولوژی موجبر پلاسمونی مناسب برای هدایت اپتیکی و همچنین کنترل منطقه فعال هستند. عمده ساختار موجبر مناسب برای تلفیق کننده‌های پلاسمونی شامل سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک[۳] و ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز[۴-۶] می‌شوند. تلفیق‌کننده‌های پلاسمونی به طور معمول برای تلفیق از پنج اثر پلاسمونی حرارتی[۷]، اثر پاشندگی حامل‌های آزاد[۸]، اثر پاکلز[۹]، اثر تغییر فاز[۱۰] و اثر آبکاری الکتروشیمیایی[۱۱] استفاده می‌کنند. در این مقاله تلفیق‌کننده پلاسمونی بر پایه اثر پاکلز با ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز معرفی می‌شود که ساختار آن در قسمت دی‌الکتریک از دو لایه، شامل لایه دی‌الکتریک غیر فعال Si_3N_4 و یک لایه دی‌الکتریک فعال $BaTiO_3$ است. لایه‌های فلزی از جنس طلا هستند و کل ساختار بر روی بستری از SiO_2 قرار دارد. با تغییر ضخامت لایه‌ها حالت بهینه را برای این ساختار پیدا می‌شود.

۲- شبیه سازی

ساختار مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو لایه از Si_3N_4 و $BaTiO_3$ می‌باشد که بین دولایه نازک از طلا ساندویچ شده و روی بستری از SiO_2 مطابق با شکل (۱) قرار می‌گیرند. برای بررسی تلفیق‌کننده جذب کننده ساختار دو بعدی صفحه‌ای بررسی می‌شود و اثرات لبه ناچیز در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش از نرم افزار MATLAB برای شبیه‌سازی استفاده شده است. برای این مهم در ابتدا کمیت‌های ضریب جذب و پارامتر شایستگی معرفی می‌شوند. ابتدا معادله پاشندگی را برای ساختار مورد نظر بدست آورده و حل می‌شود سپس با اعمال یک اختلاف پتانسیل الکتریکی ضریب شکست $BaTiO_3$ به وسیله اثر پاکلز تغییر می‌کند. برای به دست آوردن میدان اعمال شده به ماده فعال معادله لاپلاس را حل کرده و با جایگذاری ضریب شکست جدید تحت تاثیر میدان الکتریکی اعمالی معادله پاشندگی مجددا حل می‌شود [۱۲]. در این شبیه‌سازی ضریب شکست الکترود فلزی با مدل درود و ضریب شکست دی‌الکتریک‌ها با فرمول سلمایر بیان شده است [۱۳-۱۶]. با توجه به این که تحریک پلاسمون پلاریتون سطحی در این ساختار توسط مد TM امکان‌پذیر است، فرض می‌شود موج الکترومغناطیسی ورودی به ساختار موج تخت و قطبیده TM است، همچنین قسمت وابسته به زمان $e^{-i\omega t}$ و قسمت وابسته به طول x، $e^{i\beta x}$ در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۱- ساختار تلفیق‌کننده پلاسمونی جذب کننده. تلفیق‌کننده مورد بررسی شامل دو لایه طلا یک لایه باریم تیتانات، یک لایه از ماده غیرفعال سیلیکون نیترید و یک لایه نیمه متناهی از هوا و و بستری نیمه متناهی از سیلیکای گداخته شده می‌شود.

معادله موج برای لایه‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۵ و ۶ به صورت

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) H_y = 0 \qquad (۱)$$

و برای لایه چهارم با توجه به این که باریوم تیتانات دو شکستی است به صورت

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon_x - \beta^2 \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}) H_y = 0 \qquad (۲)$$

بوده [۱۷] ε ضریب دی الکتریک نسبی برای لایه‌های ۱ تا ۶ بجز ۴ و ε_x و ε_z به ترتیب ضریب دی‌الکتریک نسبی باریوم تیتانات (لایه ۴) در راستای x و z ، β ثابت انتشار و k_0 عدد موج هستند. رابطه ضریب دی‌الکتریک نسبی برای مواد مورد استفاده برابر مجذور ضریب شکست بوده که در مرجع [۱۶] آمده است. با اعمال شرایط مرزی برای جواب‌های موج تخت مولفه‌های H_y که در معادلات (۱) و (۲) و E_x متناظرشان در سطح‌های مشترک، معادله پاشندگی به دست می‌آید. از حل این معادله ثابت انتشار به صورت کمیتی مختلط حاصل

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

می‌شود. در این مقاله برای حل معادله از روش نلدر-مید استفاده شده است[۱۸]. ثابت انتشار β دارای دو قسمت حقیقی و موهومی است که قسمت موهومی آن نمایانگر اتلاف است. به این ترتیب ضریب جذب ساختار به صورت:

$$\alpha = 2\,\mathrm{Im}[\beta] \qquad (۳)$$

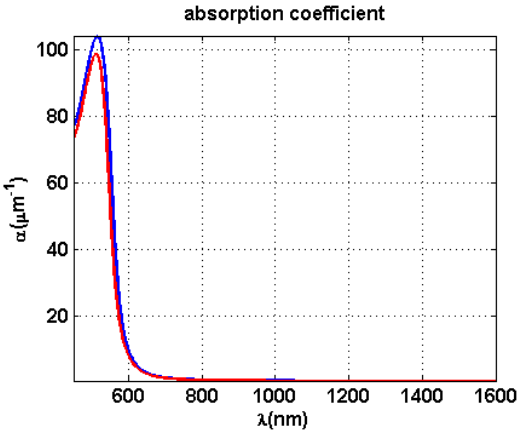
تعریف می‌شود. پارامتر معیار شایستگی (FoM) برای تلفیق‌کننده‌های جذب‌کننده به صورت رابطه:

$$\mathrm{FoM} = 4.34\frac{|\alpha_{off} - \alpha_{on}|}{\alpha_{on}} \qquad (۴)$$

است[۱۲]. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد تلفیق‌کننده عملکرد بهتری دارد.

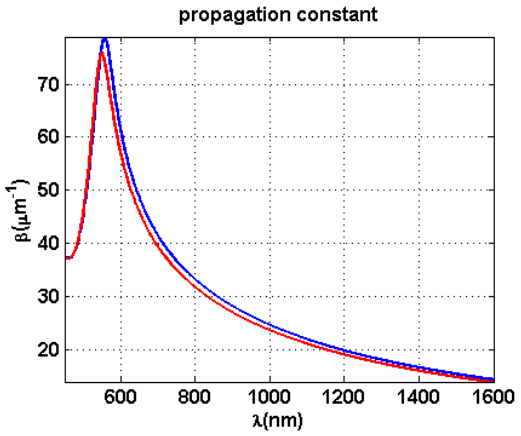
۳- نتایج و بحث

نمودار پاشندگی برای ساختار معرفی شده با لایه طلا به ضخامت ۳۰نانومتر و لایه باریم تیتانات به ضخامت ۶ نانومتر و لایه سیلیکون نیترید به ضخامت ۲۰ نانومتر در شکل(۲) و شکل(۳) نشان داده شده است. بیشترین جذب برای این ساختار در نزدیکی ۵۱۰ نانومتر است.



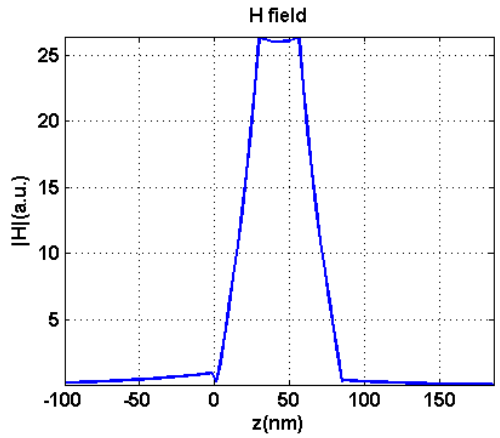
شکل ۲- ضریب جذب بدون اعمال ولتاژ(آبی) و ضریب جذب با اعمال ولتاژ(قرمز) برای ساختار شامل ۶ نانومتر باریم تیتانات و ۲۰ نانومتر سیلیکون نیترید.

شکل(۲) و شکل(۳) به ترتیب ضریب جذب و قسمت حقیقی ثابت انتشار ساختار ذکر شده را به ازای طول موجهای مختلف با (بدون) اعمال ولتاژ ۱۰۰V را برای ساختار شامل ۶ نانومتر باریم تیتانات و ۲۰ نانومتر سیلیکون نیترید را نمایش می‌دهد. با اعمال اختلاف پتانسیل به لایه‌های فلزی ساختار تلفیق‌کننده، ضریب جذب در طول موج مخابرات نوری ۱.۵۵ میکرومتر از $۰.۷۴۵۹\mu m^{-1}$ در حالت خاموش به $۰.۷۱۵۳\mu m^{-1}$ در حالت روشن کاهش پیدا می‌کند. که در مقایسه با ساختار طلا-باریم تیتانات-طلا[۱۹] تغییر ضریب جذب تلفیق‌کننده به میزان زیادی افزایش می‌یابد.



شکل ۳- ثابت انتشار بدون اعمال ولتاژ(آبی) و ضریب جذب با اعمال ولتاژ(قرمز) برای ساختار شامل ۶ نانومتر باریم تیتانات و ۲۰ نانومتر سیلیکون نیترید.

توزیع میدان مغناطیسی مد پلاسمونی به ازای طول موج ۱.۵۵ میکرومتر برای ساختار شامل لایه طلا به ضخامت ۳۰نانومتر و لایه باریم تیتانات به ضخامت ۶ نانومتر و لایه سیلیکون نیترید به ضخامت ۲۰ نانومتر در شکل(۴) نشان داده شده است.



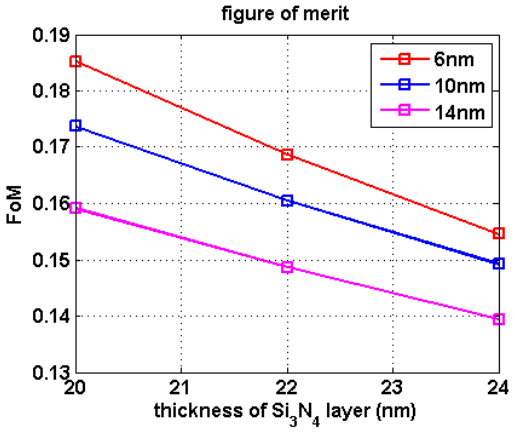
شکل ۴- توزیع میدان مغناطیسی مد پلاسمونی برای ساختار شامل ۶ نانومتر باریم تیتانات و ۲۰ نانومتر سیلیکون نیترید در طول موج ۱.۵۵ میکرومتر.

برای ضخامت‌های مختلف سیلیکون نیترید و باریم تیتانات و به ازای اعمال ولتاژ ۱۰۰ ولت مقدار FoM (Figure Of Merit) متفاوتی به دست می‌آید. بیشترین مقدار آن برای ساختار شامل لایه طلا به ضخامت ۳۰نانومتر و لایه باریم تیتانات به ضخامت ۶ نانومتر و لایه سیلیکون نیترید به

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

ضخامت ۲۰ نانومتر برابر ۰.۱۸۵۲ است. شکل(۵) نمودار FoM را برای ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل۵- پارامتر شایستگی برای ساختار شامل ۶ نانومتر(قرمز)، ۱۰ نانومتر(آبی)، ۱۴ نانومتر(صورتی) باریم تیتانات و ضخامت‌های ۲۰ نانومتر، ۲۲ نانومتر و ۲۴ نانومتر سیلیکون نیترید.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله برانگیخته شدن پلاسمون پلاریتون سطحی به‌وسیله مد TM به ازای ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک بررسی شده است. در مقایسه با تلفیق‌کننده‌های مبتنی بر اثر پاشندگی‌حامل‌های آزاد سرعت بیشتری دارند و همچنین ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده ساختار در مقیاس نانو قرار می‌گیرند که با روش‌های ساخت لایه نازک قابل ساخت هستند. لایه غیر فعال سیلیکون نیترید باعث افزایش تغییر ضریب جذب ساختار تحت ولتاژ اعمالی در مقایسه با ساختار طلا-باریم‌تیتانات-طلا و در نتیجه افزایش پارامتر شایستگی تلفیق‌کننده می‌شود. افزایش میزان تغییرات ضریب جذب نشان می‌دهد که این تلفیق‌کننده صلاحیت لازم برای استفاده به عنوان تلفیق‌کننده اپتیکی شدت را دارد. این تلفیق‌کننده در بهینه‌ترین حالت مقدار پارامتر شایستگی (FoM) ۰.۱۸۵۲، را در شبیه سازی می‌دهد. مقدار ضریب جذب در این حالت از $۰.۷۴۵۹\mu m^{-۱}$ در حالت خاموش به $۰.۷۱۵۳\mu m^{-۱}$ در حالت روشن کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] Carlson, A. B., and Crilly, P. B. "Communication Systems" fifth edition", pp.6-7, McGraw-Hill, 2010.

[2] Gramotnev, D. K., and Bozhevolnyi, S. I., "Plasmonics beyond the diffraction limit", Nature Photonics, Vol. 4, pp 83-91, 2010.

[3] Briggs, R. M., et. al, "Efficient coupling between dielectric-loaded plasmonic and silicon photonic waveguides", Nano Letters, Vol. 10, pp. 4851-4857, 2010.

[4] Delacour, C., et. al., "A. Efficient directional coupling between silicon and copper plasmonic nanoslot waveguides: toward metal–oxide–silicon nanophotonics", Nano Letters, Vol. 10, pp. 2922-2926, 2010.

[5] Maier, S. A. Plasmonics: fundamentals and applications. (Springer US, 2007).

[6] Mohsen Janipour, Mohammad Azim Karami, Rahman Sofiani, Farrokh Hodjat Kashani, "A Novel Adjustable Plasmonic Filter Realization by Split Mode Ring Resonators" Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, vol. 5, pp. 405-414, 2013.

[7] Gagnon, G., et. al., "Thermally activated variable attenuation of long-range surface plasmon-polariton waves", J. Lightwave Tech., Vol. 24, pp. 4391-4402, 2006.

[8] Zhu, S., Lo, G. Q., and Kwong, D. L., "Electro-absorption modulation in horizontal metal-insulator-silicon-insulator-metal nanoplasmonic slot waveguides", Appl. Phys. Lett., Vol. 99, pp. 151114, 2011.

[9] Randhawa, S., et. al., "Performance of electro-optical plasmonic ring resonators at telecom wavelengths", Optics Express, Vol. 20, pp. 2354-2362, 2012.

[10] Joushaghani, A., et. al., "Sub-volt broadband hybrid plasmonic-vanadium dioxide switches", Applied Physics Letters, Vol. 102, pp. 061101, 2013.

[11] Emboras, A., et. al., "Nanoscale plasmonic memristor with optical readout functionality", Nano Letters, Vol. 13, pp. 6151-6155, 2013.

[12] Melikyan, A., et. al., "Surface plasmon polariton absorption modulator. Optics Express, Vol. 19, pp. 8855-8869, 2011.

[13] Etchegoin, P. G., et. al., "An analytic model for the optical properties of gold", J. Chem. Phys., Vol. 125, pp. 164705, 2006.

[14] Luke, K., et. al., Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si_3N_4 microresonator. Optics letters, Vol. 40, pp. 4823-4826, 2015.

[15] Malitson, I. H., "Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica", J. Opt. Soc. Am., Vol. 55, pp. 1205-1209, 1965.

[16] Nikogosyan, D. N., "Nonlinear optical crystals: a complete survey", pp. 198, Springer Science & Business Media, 2006.

[17] Kumar, A., Yu, S. F., and Li, X., "Design and analysis of a surface plasmon polariton modulator using the electro-optic effect", Applied Optics, vol. 48, pp. 6600-6605, 2009.

[18] Nelder, J. A., and Mead, R., "A simplex method for function minimization", Comp. J., Vol. 7, pp. 308-313, 1965.

[19] Babicheva, V., and Lavrinenko, A. "A plasmonic modulator based on metal-insulator-metal waveguide with barium titanate core." Photonics Lett. Poland, Vol. 5, pp. 57-59, 2013.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]