



تلفیق کننده پلاسمونی جذب کننده با ساختار فلز-دی الکتریک-فلز با به کارگیری بلور دوشکستی باریوم تیتانات

پوریا اسحاقی، محمدآقا بلوری زاده

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

چکیده - تلفیق کننده های اپتیکی به دلیل محدودیت پراش قابلیت فشردگی محدودی دارند. از آنجا امروزه تلفیق کننده های پلاسمونی به دلیل اندازه فوق فشرده و کارکرد زیر حد پراش و پهنای باند بالا و مصرف انرژی پایین مورد توجه قرار گرفته اند. در این تحقیق یک تلفیق کننده پلاسمونی جذب کننده بر پایه اثر پاکلز با ساختار طلا-سیلیکون نیتريد-باريوم تیتانات-طلا با بستری شیشه ای و اثر ضخامت لایه ها بر عملکرد تلفیق کننده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ضخامت بهینه برای لایه های دی الکتریک تشکیل دهنده این تلفیق کننده به دست آمده است.

کلید واژه- پلاسمونی، اثر پاکلز، تلفیق کننده

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 layers' 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

۱- مقدمه

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 مجدداً حل می‌شود [۱۲]. در این شبیه‌سازی ضریب شکست الکتروفلزی 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 جذب‌کننده. تلفیق‌کننده مورد بررسی شامل دو لایه طلا، یک لایه باریوم تیتانات، یک لایه از ماده غیرفعال سیلیکون نیتريد و یک لایه نیمه‌متناهی از هوا و و بستری نیمه‌متناهی از سیلیکا گذاشته شده می‌شود.

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

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \epsilon - \beta^2) H_y = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \epsilon_x - \beta^2 \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}) H_y = 0 \quad (2)$$

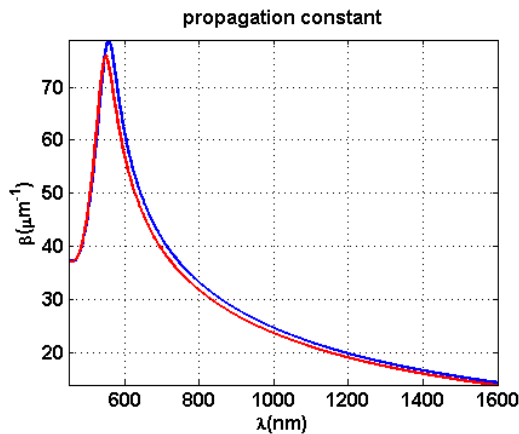
بوده [۱۷] ϵ ضریب دی‌الکتریک نسبی برای لایه‌های ۱ تا ۶ بجز ۴ و ϵ_x و ϵ_z به ترتیب ضریب دی‌الکتریک نسبی باریوم تیتانات (لایه ۴) در راستای x و z ، β ثابت انتشار و k_0 عدد موج هستند. رابطه ضریب دی‌الکتریک نسبی برای مواد مورد استفاده برابر مجذور ضریب شکست بوده که در مرجع [۱۶] آمده است. با اعمال شرایط مرزی 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 کمیته مختلط حاصل

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. تلفیق‌کننده‌های 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 مخبرات 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 تلفیق‌کننده‌های 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 آبرکاری 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- شبیه‌سازی

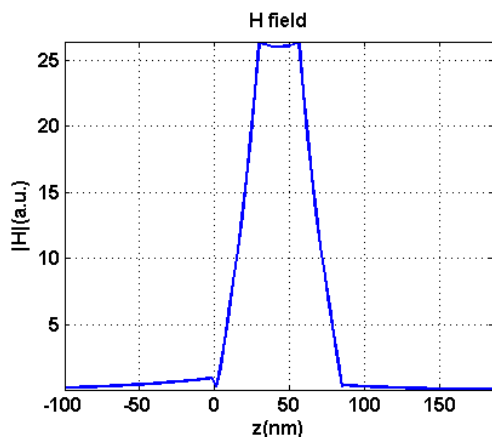
ساختار مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو لایه از Si_3N_4 و $BaTiO_3$ می‌باشد که بین دو لایه نازک از طلا ساندویچ شده و روی بستری از SiO_2 مطابق با شکل (۱) قرار می‌گیرند. برای بررسی تلفیق‌کننده جذب‌کننده ساختار دو بعدی صفحه‌ای بررسی می‌شود و اثرات لبه ناچیز در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش از نرم افزار 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

مقایسه با ساختار طلا-باریم تیتانات-طلا [۱۹] تغییر ضریب جذب تلفیق کننده به میزان زیادی افزایش می یابد.



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 نیتريد.

توزیع میدان مغناطیسی مد پلاسمونی به ازای طول موج ۱.۵۵ میکرومتر برای ساختار شامل لایه طلا به ضخامت ۳۰ نانومتر و لایه باریم تیتانات به ضخامت ۶ نانومتر و لایه سیلیکون نیتريد 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 نیتريد در طول موج ۱.۵۵ میکرومتر.

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

می شود. در این مقاله برای حل معادله از روش نلدرد-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:

$$\alpha = 2 \operatorname{Im}[\beta] \quad (3)$$

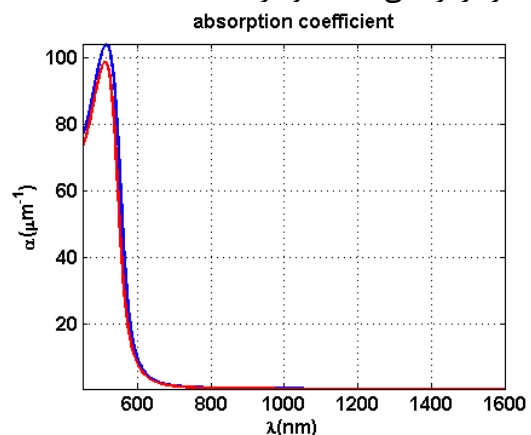
تعریف می شود. پارامتر معیار شایستگی (FoM) برای تلفیق کننده های جذب کننده به صورت رابطه:

$$\text{FoM} = 4.34 \frac{|\alpha_{\text{off}} - \alpha_{\text{on}}|}{\alpha_{\text{on}}} \quad (4)$$

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

۳- نتایج و بحث

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

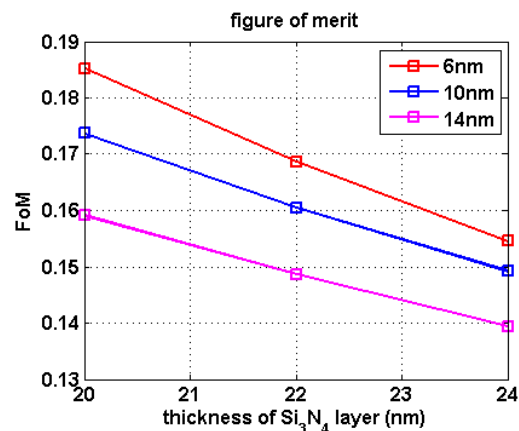


شکل ۲- ضریب جذب بدون اعمال ولتاژ (آبی) و ضریب جذب با اعمال ولتاژ (قرمز) برای ساختار شامل ۶ نانومتر باریم تیتانات و ۲۰ نانومتر سیلیکون نیتريد.

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 نیتريد را نمایش می دهد. با اعمال اختلاف پتانسیل به لایه های فلزی ساختار تلفیق کننده، ضریب جذب در طول موج مخابرات نوری ۱.۵۵ میکرومتر از $0.7459 \mu\text{m}^{-1}$ در حالت خاموش به $0.7153 \mu\text{m}^{-1}$ در حالت روشن کاهش پیدا می کند. که در

- [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.

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



شکل ۵- 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 نیتريد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله برانگیخته شدن پلاسمون پلاریتون سطحی به وسیله مد TM به ازای ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک بررسی شده است. در مقایسه با تلفیق‌کننده‌های مبتنی بر اثر پاشندگی حامل‌های 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 نیتريد باعث افزایش تغییر ضریب جذب ساختار تحت ولتاژ اعمالی در مقایسه با ساختار طلا-باریم تیتانات-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 $0.7459 \mu\text{m}^{-1}$ در حالت خاموش به $0.7153 \mu\text{m}^{-1}$ 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.