

بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۱۳۹۷ بهمن ۱۳۹۷



طراحی مدولاتور الکترو اپتیکی پلاسمونیکی جذبی بر پایه دو لایه فعال باریم تیتانات و ایندیوم تین اکسید

پوریا اسحاقی، ابوالفضل صفایی بزگ آبادی و محمدآقا بلوریزاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران (<u>mabolori@uk.ac.ir</u>)

چکیده – در این مقاله یک مدولاتور الکترو اپتیکی پلاسمونیکی جذبی چند لایه با دو محیط فعال ایندیوم تین اکسید و باریم تیتانات معرفی شده است. در لایه ایندیوم تین اکسید اثر پاشندگی حاملهای آزاد و در لایه باریم تیتانات که دوشکستی بوده اثر پاکلز در نظر گرفته شده است. در اینجا اثر ضخامت لایههای فعال بر روی عملکرد مدولاتور مورد بررسی قرار می گیرد. با اعمال ولتاژ به مدولاتور میدان الکتریکی در دو لایه فعال ایجاد می گردد و ضرائب شکست لایههای فعال تغییر مییابند. برای شبیهسازی این مدولاتور، معادله پاشندگی به دست آمده برای ساختار چند لایه پیشنهادی با روش نلدر-مید در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر حل شده است. نتایج بهدست آمده نشان می دهند که ساختار ارائه شده قابلیت استفاده بهعنوان مدولاتور الکترو اپتیکی جذبی را دارا میباشد.

کلید واژه- پلاسمونیک، مدولاتور، اثر پاکلز، اثر پاشندگی حاملهای آزاد.

Design of a Plasmonic Electro-Optical Absorption Modulator Based on Two Active Layers of Barium Titanate and Indium Tin Oxide

P. Es'haghi, A. Safaei Bezgabadi, and M. A. Bolorizadeh

Physics Department, Yazd University, Iran (mabolori@uk.ac.ir)

Abstract- In this paper, a multilayer plasmonic electro-optical absorption modulator is introduced based on two active layers of barium titanate (BaTiO₃) and Indium tin oxide (ITO). It is assumed that the BaTiO₃ layer is a birefringent crystal and the Pockels effect occurs in this layer while the free carrier dispersion effect takes place in the ITO layer. Here, we study the effects of the thicknesses of the active layers on the modulator performance. By applying voltage to the silver layers, therefore, an electrical field is formed in the two active layers and the refractive indices of the layers are changed. In order to simulate this modulator, the Nelder-Mead method is implemented to solve the obtained dispersion equation for the proposed multilayer structure at the wavelength of 1.55 μ m. Our simulation results indicate that the proposed structure can be used as a plasmonic electro-optical modulator.

Keywords: Plasmonic, Modulator, Pockels effect, free carrier dispersion effect.

مدولاتور لایه ایندیومتین اکسید به ده قسمت تقسیم شده است. برای حل معادله پاشندگی از روش نلدر – مید و برای حل معادله پواسون از روش تفاضلات محدود استفاده و معادله لاپلاس به صورت تحلیلی حل شده است. فرض را بر این میگیریم که موج ورودی به مدولاتور موج تخت و قطبش آن TM باشد و جهت انتشار را در راستای x درنظر میگیریم. وابستگی زمانی و وابستگی مکانی x موج تخت به صورت وابستگی زمانی و وابستگی مکانی x موج تخت به مورت میباشد. با فرض این شرایط، مولفه وابسته به مکان میدان الکتریکی و مغناطیسی این موج در روابط:

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + \left(k_0^2 \varepsilon_x - \beta^2 \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}\right) H_y = 0 \tag{1}$$

$$E_x = \frac{-i}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_x} \frac{\partial H_y}{\partial z} \tag{(7)}$$

$$E_z = \frac{-\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_z} H_y \tag{(7)}$$

صدق می کند [۵]. در روابط (۱) تا (۳)، \mathcal{E}_{z} و \mathcal{E}_{z} گذردهی الکتریکی نسبی به ترتیب در راستای x و z هستند. همچنین \mathcal{E}_{0} ضریب گذردهی الکتریکی خلاء و k_{0} عدد موج می باشند. مولفه وابسته به مکان z میدان مغناطیسی این موج در لایه های مختلف به شکل

$$H_{y} = \begin{cases} A_{1}e^{ik_{1}(z-z_{1})} & -\infty < z < z_{1} \\ A_{2}e^{ik_{2}(z-z_{2})} + A_{3}e^{-ik_{2}(z-z_{2})} & z_{1} < z < z_{2} \\ M & (\mathbf{f}) \\ A_{24}e^{ik_{13}(z-z_{13})} + A_{25}e^{-ik_{13}(z-z_{13})} & z_{13} < z < z_{14} \\ A_{26}e^{-ik_{14}(z-z_{14})} & z_{14} < z < \infty \end{cases}$$

است. در رابطه (۴) k_1 k_2 k_1 k_2 k_1 ثابت انتشار عرضی در لایههای مختلف و z_1 z_2 \dots z_1 مختصات سطح مشترک مرجع هستند. با جایگذاری رابطه (۴) در روابط (۱) تا (۳) مولفه وابسته به مکان میدان الکتریکی در راستای x و z نیز بدست میآید. با درنظر گرفتن شرایط مرزی برای مولفههای مماسی میدان الکتریکی و مغناطیسی که از روابط (۱) تا (۳)

 $\mathbf{M}_{26\times26}(\lambda,\beta)\cdot\mathbf{A}_{26\times1} = 0$ (۵) حاصل میشود. در معادله (۵)، $\mathbf{A}_{26\times1}$ ماتریس ستونی ضرایب پشت عبارتهای نمایی در رابطه (۴) هستند. با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس ($\mathbf{A}, \mathbf{A}_{26\times26}(\lambda, \beta)$ معادله پاشندگی به شکل

۱- معرفی

قطعات فوتونيكي بهدليل محدوديت پراش قابليت مجتمع شدن با قطعات الكترونيكي را ندارند، از اينرو دانشمندان براي رفع این مشکل رو به قطعات مبتنی بر موجبرهای پلاسمونیکی آوردهاند [۱]. در مدولاتورهای الکترواپتیک پلاسمونیکی از اثرهای ترمواپتیک، پاشندگی حاملهای آزاد، پاکلز، تغییر فاز و اثر آبكارى الكتروشيميايى استفاده مى شود [٢]. بهعلاوه مدولاتورهای الکترواپتیک پلاسمونیکی برای آن که کارایی مناسبی داشته باشند می بایست برهمکنش قوی ای بین نور و ناحیه فعال داشته باشند. برای نیل به این هدف موجبرهای متفاوتى از جمله كانال پلاسمون پلاريتون، موجبر پلاسمونيک شكافي، فلز-عايق-فلز، عايق-فلز-عايق، پلاسمون پلاريتون سطحی دیالکتریک بار شده و پلاسمون پلاریتون ترکیبی طراحى شدهاند [٣]. در اين مقاله مدولاتور جذبى الكترواپتيك پلاسمونیکی بر پایه دو محیط فعال باریم تیتانات (BaTiO₃) و اينديوم تين اكسيد (ITO) معرفي شده است كه شامل ساختار چندلایه سیلیکای گداخته شده / نقره / ایندیوم تین اکسید / باریم تیتانات / نقره/ هوا می شود. ساختار مورد نظر در شکل (۱) نمایش داده شده است.

۲-تئوری

در این مقاله دو اثر الکترواپتیک پاکلز و پاشندگی حاملهای آزاد همزمان مورد مطالعه قرار گرفته است. در ساختار مورد مطالعه، ایندیوم تین اکسید و باریم تیتانات بین دو لایه نقره محصور شده که بر روی بستری از سیلیکای گداخته شده قرار گرفته است. لایه باریم تیتانات دوشکستی است و اثر پاکلز در این لایه اتفاق میافتد و در لایه ایندیوم تین اکسید اثر پاشندگی حاملهای آزاد به وقوع می پیوندد. پیکربندی پیشنهادی موجبر تختی است که در راستای x و y تا بینهایت پاشندگی ماملهای آزاد به وقوع می پیوندد و پر تا بینهایت معادله لاپلاس برای بورسی به دست آورده شده و سپس معادله لاپلاس برای به دست آوردن میدان الکتریکی در لایه باریم تیتانات و معادله پواسون برای به دست آوردن میدان معادله پواسون از تئوری استار توماس-فرمی[۴] استفاده شده

$$|\mathbf{M}_{_{26\times 26}}(\lambda,\beta)| = 0$$
 (۶)
ه دست میآید. معادله لاپلاس در لایه باریم تیتانات بهصورت



 $abla \cdot \mathbf{e}_s \cdot \nabla \phi = 0$ (۷) بوده که \mathbf{e}_s تانسور ضریب دیالکتریک نسبی استاتیک باریم تیتانات است. معادله پواسون در لایه ایندیم تیناکسید به شکل:

$$\nabla^2 \varphi = e \left(N_i - N_0 \right) / \varepsilon_0 \varepsilon_{s, TO} \tag{A}$$

نوشته می شود که $\mathcal{E}_{s,TTO}$ ضریب دی الکتریک استاتیک نسبی ایندیوم تین اکسید است. همچنین p بار الکتریکی الکترون و N_i و N_i و N_i به ترتیب چگالی بار القاء شده و چگالی توده ای بار آزاد هستند. با توجه به تقارن پتانسیل معادلات (۲) و (۸) صرفا در راستای z حل می شود. رابطه پتانسیل الکتریکی و چگالی بار القاء شده به صورت

$$N_{i}(z) = \frac{1}{3\pi^{2}} \left(\frac{8\pi^{2}m^{*}}{h^{2}}\right) (E_{f} + e\,\phi(z)) \tag{9}$$

است که $E_f * m^* e^* h$ و h به ترتیب انرژی فرمی، جرم موثر الکترون و ثابت پلانک هستند. با اعمال ولتاژ به دو لایه نقره، میدان الکتریکی در لایه باریم تیتانات و لایه ایندیوم تین اکسید ایجاد می شود و برای به دست آوردن این میدان شرایط مرزی

$$\varphi(z) = 0 \quad for \quad z \to +h_{Ag} \tag{(1.)}$$

$$\varphi(z) = U \text{ for } z = h_{Ag} + h_{ITO} + h_{BaTiO_3}(11)$$

$$\frac{U}{h_{BaTiO_3}} = \left[\varepsilon_{s,z} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right]_{z \to +(h_{Ag} + h_{ITO})} = \left[\varepsilon_{s,ITO} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right]_{z \to -(h_{Ag} + h_{ITO})}$$
(17)

اعمال میشود. در روابط (۱۰) تا (۱۲)، h_{Ag} h_{ITO} h_{Ag} و h_{ITO} h_{Ag} به ترتیب ضخامت لایههای نقره، ایندیوم تیناکسید و باریم تیتانات را نشان میدهند و $S_{S,Z}$ و U نیز بهترتیب بیانگر ثابت دی الکتریک استاتیک نسبی باریم تیتانات در راستای z و اندازه ولتاژ اعمال شده برابر با ۵۷ بوده و به ساختار اعمال می شود.

برای بررسی اثر اعمال ولتاژ بر ساختار پیشنهادی، ابتدا معادله پاشندگی را برای حالتی که ولتاژ اعمال نشده (حالت خاموش) حل و سپس این معادله برای حالتی را که ولتاژ اعمال شده (حالت روشن) حل می گردد. با اعمال ولتاژ، ضریب شکست لایه باریم تیتانات زیاد می شود و چگالی بار در لایه ایندیوم تین-اکسید افزایش می یابد. افزایش چگالی بار در این لایه باعث تغییر در فرکانس پلاسما و تغییر در قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست ایندیوم تین اکسید می شود. با حل معادله پاشندگی برای حالت روشن و خاموش ثابت انتشار (β) برای ساختار به دست می آید. قسمت موهومی ثابت انتشار میزان اتلاف مد را نمایش می دهد، به این ترتیب دو برابر قسمت موهومی ثابت انتشار، به عنوان ضریب جذب مدولاتور (α) تعریف می شود [ϑ]. با داشتن ضریب جذب برای حالت روشن و خاموش پارامتر شایستگی (*FoM*) به شکل:

$$FoM = \left(\log_{10} e\right) \frac{\left|\alpha_{off} - \alpha_{on}\right|}{\alpha_{on}} \tag{17}$$

تعریف میشود. هرچه پارامتر شایستگی بیشتر باشد کارایی مدولاتور بالاتر میرود.

۳-نتايج و بحث

با بهدست آوردن ضریب جذب برای ضخامتهای مختلف باریم تیتانات و ایندیوم تین اکسید در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر، پارامتر شایستگی محاسبه شده برای ضخامتهای مختلف در شکل (۲) رسم شده است. در اینجا ضخامت دو لایه نقره برابر با ۱۰۰ نانومتر فرض شده است.

با توجه به شکل (۲) بیشترین میزان پارامتر شایستگی در ساختار چندلایه، سیلیکای گداخته شده/ نقره(۱۰۰۰m) / ایندیوم تیناکسید(۶nm)/ باریم تیتانات (۳۰nm)/ نقره(۱۰۰۱۳) / هوا، حاصل میشود و مقدار آن برابر با ۶/۹۸ میباشد (ساختاری که بالاترین مقدار پارامتر شایستگی را داشته باشد، ساختار بهینه گوئیم). با اعمال ولتاژ به دو لایه نقره، بار الکتریکی در لایه ایندیوم تیناکسید القاء میشود. شکل (۳) چگالی بار الکتریکی القاء شده برحسب مکان را در لایه ایندیوم تیناکسید برای ساختار بهینه نشان میدهد. شکل (۴) توزیع قدر مطلق بردار پوئینتینگ را نشان میدهد. این نمودار تحدید توان در مدولاتور را بیان میکند.

۴–نتیجهگیری

در این مقاله مدولاتور الکترواپتیکی پلاسمونیکی جذبی بر پایه دو محیط فعال ایندیوم تیناکسید و باریم تیتانات معرفی شده است. ضریب شکست بالای باریم تیتانات باعث میشود تحدید توان در لایه باریم تیتانات افزایش یابد همچنین با اعمال ولتاژ ضریب شکست باریم تیتانات افزایش مییابد و بر تحدید توان در خودش و لایه ایندیوم تیناکسید افزوده میشود. در ساختار بهینه ضریب جذب مدولاتور از ⁽⁻πμ۲/۷۸μ به ⁽⁻πب۹۰ تغییر میکند و پارامتر شایستگی برابر با ۶/۹۸ ایجاد میکند. این مقدار از پارامتر شایستگی از تحقیقات پیشین در این زمینه از جمله [۶۰۶] بیشتر است که صلاحیت این ساختار را برای استفاده به عنوان مدولاتور الکترواپتیکی جذبی نشان میدهد.

مرجعها

- D. K. Gramotnev, S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit", Nat. Photonics, Vol. 4, pp. 83-91, 2010.
- [2] A. Emboras, C. Hoessbacher, C. Haffner, W. Heni, U. Koch, P. Ma, Y. Fedoryshyn, J. Niegemann, C. Hafner and J. Leuthold, "Electrically controlled plasmonic switches and modulators", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 21, pp. 276-283, 2015.
- [3] K. Liu, C.R. Ye, S. Khan and V.J. Sorger, "Review and perspective on ultrafast wavelength-size electro-optic modulators", Laser Photonics Rev., Vol. 9, pp. 172-194, 2015.
- [4] A. Melikyan, N. Lindenmann, S. Walheim, P.M. Leufke, S. Ulrich, J. Ye, P. Vincze, H. Hahn, T. Schimmel, C. Koos and W. Freude, "Surface plasmon polariton absorption modulator", Opt. Express, Vol. 19, pp. 8855-8869, 2011.
- [5] A. Kumar, S. F. Yu, X. Li, "Design and analysis of a surface plasmon polariton modulator using the electro-optic effect", Appl. Opt., Vol. 48, pp. 6600-6605, 2009.
- [6] A. V. Krasavin, A. V. Zayats, A. "Photonic signal processing on electronic scales: electro-optical field-effect nanoplasmonic modulator", Phys. Rev. Lett., Vol. 109, pp. 053901-1-4, 2012.



با توجه به شکل (۴) میتوان فهمید که نفوذ توان در لایه ایندیوم تیناکسید نسبت به لایه باریم تیتانات بیشتر است و باعث میشود که مدولاتور نسبت به تغییر ضریب شکست لایه ایندیوم تیناکسید نسبت به لایه باریم تیتانات حساسیت بیشتری داشته باشد. دلیل نفوذ بالای توان به لایه ایندیوم تین اکسید ضریب شکست بالای باریم تیتانات است. لایه دوشکستی باریم تیتانات به دلیل داشتن خاصیت الکترواپتیک پاکلز و ضرائب الکترواپتیک خطی بزرگ با تغییر کوچکی در میدان الکتریکی ضریب شکست این لایه افزایش مییابد که باعث نفوذ بیشتر توان به لایه ایندیوم تین اکسید و افزایش پارامتر شایستگی مدولاتور میشود.

