بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ 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 (mabolori@uk.ac.ir)

چکیده – در این مقاله یک مدولاتور الکترو اپتیکی پلاسمونیکی جذبی چند لایه با دو محیط فعال ایندیوم تین‌اکسید 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 می‌گیرد. با اعمال ولتاژ به مدولاتور میدان الکتریکی در دو لایه فعال ایجاد می‌گردد و ضرائب شکست لایه‌های فعال تغییر می‌یابند. برای شبیه‌سازی این مدولاتور، معادله پاشندگی به‌دست آمده برای ساختار چند لایه پیشنهادی با روش نلدر-مید در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر حل شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند 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 ($BaTiO_3$) and Indium tin oxide (ITO). It is assumed that the $BaTiO_3$ 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 μm. 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.

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

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

۱- معرفی

قطعات فوتونیکی به‌دلیل محدودیت پراش قابلیت مجتمع شدن با قطعات الکترونیکی را ندارند، از اینرو دانشمندان برای 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 آبکاری الکتروشیمیایی استفاده می‌شود [۲]. به‌علاوه مدولاتورهای الکترواپتیک پلاسمونیکی برای آن که کارایی مناسبی داشته باشند می‌بایست برهمکنش قوی‌ای بین نور و ناحیه فعال داشته باشند. برای نیل به این هدف موجبرهای متفاوتی از جمله کانال پلاسمون پلاریتون، موجبر پلاسمونیک شکافی، فلز-عایق-فلز، عایق-فلز-عایق، پلاسمون پلاریتون سطحی دی‌الکتریک بار شده و پلاسمون پلاریتون ترکیبی طراحی شده‌اند [۳]. در این مقاله مدولاتور جذبی الکترواپتیک پلاسمونیکی بر پایه دو محیط فعال باریم تیتانات ($BaTiO_3$) و ایندیوم تین اکسید (ITO) معرفی شده است که شامل ساختار چندلایه سیلیکای گداخته شده / نقره / ایندیوم تین اکسید / باریم تیتانات / نقره/ هوا می‌شود. 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 می‌پیوندد. پیکربندی پیشنهادی موجبر تختی است که در راستای x و y تا بینهایت ادامه دارد. برای بررسی این دو اثر بر روی مدولاتور، ابتدا معادله پاشندگی ساختار مورد بررسی به‌دست آورده شده و سپس معادله لاپلاس برای به‌دست آوردن میدان الکتریکی در لایه باریم تیتانات و معادله پواسون برای به‌دست آوردن میدان الکتریکی در لایه ایندیوم‌تین‌اکسید حل شده است. برای حل معادله پواسون از تئوری استتار توماس-فرمی[۴] استفاده شده است. برای بررسی دقیقتر اثر پاشندگی حامل‌های آزاد بر 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 به‌صورت $e^{-i(\omega t-\beta x)}$ می‌باشد. با فرض این شرایط، مولفه وابسته به مکان میدان الکتریکی و مغناطیسی این موج در روابط:

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

$$E_x=\frac{-i}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_x}\frac{\partial H_y}{\partial z} \qquad (۲)$$

$$E_z=\frac{-\beta}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_z}H_y \qquad (۳)$$

صدق می‌کند [۵]. در روابط (۱) تا (۳)، ε_x و ε_z گذردهی الکتریکی نسبی به‌ترتیب در راستای x و z هستند. همچنین ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلاء و k_0 عدد موج می‌باشند. مولفه وابسته به مکان z میدان مغناطیسی این موج در لایه‌های مختلف به شکل

$$H_y=\begin{cases}A_1e^{ik_1(z-z_1)} & -\infty<z<z_1\\ A_2e^{ik_2(z-z_2)}+A_3e^{-ik_2(z-z_2)} & z_1<z<z_2\\ \text{M} & \\ A_{24}e^{ik_{13}(z-z_{13})}+A_{25}e^{-ik_{13}(z-z_{13})} & z_{13}<z<z_{14}\\ A_{26}e^{-ik_{14}(z-z_{14})} & z_{14}<z<\infty\end{cases} \qquad (۴)$$

است. در رابطه (۴) k_1، k_2، ...، k_{14} ثابت انتشار عرضی در لایه‌های مختلف و z_1، z_2، ...، z_{14} 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) پیروی می‌کنند، معادله ماتریسی

$$\mathbf{M}_{26\times26}(\lambda,\beta)\cdot\mathbf{A}_{26\times1}=0 \qquad (۵)$$

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 $\mathbf{M}_{26\times26}(\lambda,\beta)$ معادله پاشندگی به شکل

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

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

$$\left|\mathbf{M}_{26\times26}(\lambda,\beta)\right|=0 \qquad (۶)$$

به دست می‌آید. معادله لاپلاس در لایه باریم تیتانات به‌صورت



شکل ۱- پیکربندی مدولاتور پیشنهادی.

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\varepsilon}_s\cdot\nabla\varphi=0 \qquad (۷)$$

بوده که $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ تانسور ضریب دی‌الکتریک نسبی استاتیک باریم تیتانات است. معادله پواسون در لایه ایندیم تین‌اکسید به شکل:

$$\nabla^2\varphi=e\left(N_i-N_0\right)/\varepsilon_0\varepsilon_{s,ITO} \qquad (۸)$$

نوشته می‌شود که $\varepsilon_{s,ITO}$ ضریب دی‌الکتریک استاتیک نسبی ایندیوم تین‌اکسید است. همچنین e بار الکتریکی الکترون و N_i و N_0 به‌ترتیب چگالی بار القاء شده و چگالی توده‌ای بار آزاد هستند. با توجه به تقارن پتانسیل معادلات (۷) و (۸) صرفا در راستای z حل می شود. رابطه پتانسیل الکتریکی و چگالی بار القاء شده به صورت

$$N_i(z)=\frac{1}{3\pi^2}\left(\frac{8\pi^2m^*}{h^2}\right)\left(E_f+e\varphi(z)\right) \qquad (۹)$$

است که E_f ، m^* 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 تین‌اکسید ایجاد می‌شود و برای به‌دست آوردن این میدان شرایط مرزی

$$\varphi(z)=0 \quad for \quad z\to+h_{Ag} \qquad (۱۰)$$

$$\varphi(z)=U \quad for \quad z=h_{Ag}+h_{ITO}+h_{BaTiO_3} \qquad (۱۱)$$

$$\frac{U}{h_{BaTiO_3}}=\left[\varepsilon_{s.z}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right]_{z\to+(h_{Ag}+h_{ITO})}=\left[\varepsilon_{s.ITO}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right]_{z\to-(h_{Ag}+h_{ITO})} \qquad (۱۲)$$

اعمال می‌شود. در روابط (۱۰) تا (۱۲)، h_{Ag}، h_{ITO} و h_{BaTiO3} به ترتیب ضخامت لایه‌های نقره، ایندیوم تین‌اکسید و باریم تیتانات را نشان می‌دهند و $\varepsilon_{s,z}$ و U نیز به‌ترتیب بیانگر ثابت دی‌الکتریک استاتیک نسبی باریم تیتانات در راستای z و اندازه ولتاژ اعمال شده برابر با $5V$ 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 می‌گردد. با اعمال ولتاژ، ضریب شکست لایه باریم تیتانات زیاد می‌شود و چگالی بار در لایه ایندیوم تین-اکسید افزایش می‌یابد. افزایش چگالی بار در این لایه باعث تغییر در فرکانس پلاسما و تغییر در قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست ایندیوم تین‌اکسید می‌شود. با حل معادله پاشندگی برای حالت روشن و خاموش ثابت انتشار (β) برای ساختار به‌دست می‌آید. قسمت موهومی ثابت انتشار میزان اتلاف مد را نمایش می‌دهد، به این ترتیب دو برابر قسمت موهومی ثابت انتشار، به‌عنوان ضریب جذب مدولاتور (α) تعریف می‌شود [۴]. با داشتن ضریب جذب برای حالت روشن و خاموش پارامتر شایستگی (FoM) به شکل:

$$FoM=\left(\log_{10}e\right)\frac{\left|\alpha_{off}-\alpha_{on}\right|}{\alpha_{on}} \qquad (۱۳)$$

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

۳-نتایج و بحث

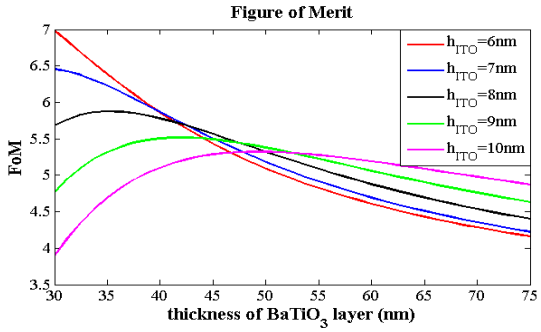
با به‌دست آوردن ضریب جذب برای ضخامت‌های مختلف باریم تیتانات و ایندیوم تین اکسید در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر، پارامتر شایستگی محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف در شکل (۲) رسم شده است. در اینجا ضخامت دو لایه نقره برابر با ۱۰۰ نانومتر فرض شده است.

با توجه به شکل (۲) بیشترین میزان پارامتر شایستگی در ساختار چندلایه، سیلیکای گداخته شده/ نقره(۱۰۰nm) / ایندیوم تین‌اکسید(۶nm)/ باریم تیتانات (۳۰nm)/ نقره(۱۰۰nm) / 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.

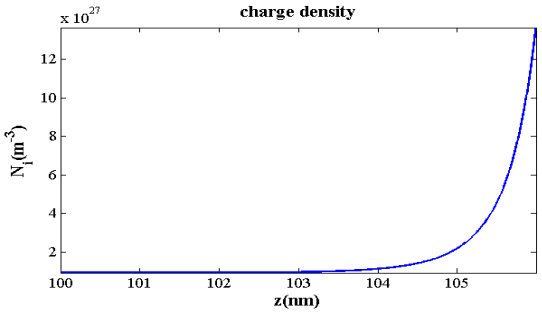
شکل (۳) چگالی بار الکتریکی القاء شده برحسب مکان را در لایه ایندیوم تین‌اکسید برای ساختار بهینه نشان می‌دهد. شکل (۴) توزیع قدر مطلق بردار پوئینتینگ را نشان می‌دهد. این نمودار تحدید توان در مدولاتور را بیان می‌کند.

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

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

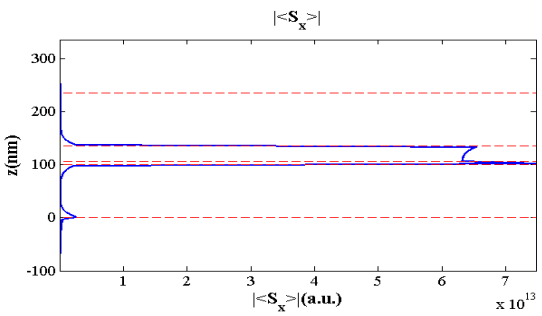


شکل۲- پارامتر شایستگی ساختار پیشنهادی در ضخامت‌های مختلف باریم تیتانات و ایندیوم تین اکسید و طول موج ۱/۵۵ میکرومتر.



شکل ۳- چگالی بار الکتریکی القاء شده در لایه ایندیوم تین‌اکسید برای ساختار بهینه.

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.



شکل ۴- توزیع قدرمطلق بردار پوئینتینگ در مدولاتور بهینه در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر.

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 $۱۲/۷۸\mu m^{-۱}$ به $۴/۹۰\mu m^{-۱}$ تغییر می‌کند و پارامتر شایستگی برابر با ۶/۹۸ ایجاد می‌کند. این مقدار از پارامتر شایستگی از تحقیقات پیشین در این زمینه از جمله [۶،۴] بیشتر است که صلاحیت این ساختار را برای استفاده به عنوان مدولاتور الکترواپتیکی جذبی نشان می‌دهد.

مرجع‌ها

[1] 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.

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

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