بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

مدولاتور پلاسمونیکی با مصرف انرژی کم مبتنی بر ساختار ترکیبی فـلز-عـایق-فـلز

محمدرضا رستگاری، سهراب محمدی پویان و عباس ظریفکار

شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، بخش مخابرات و الکترونیک

zarifkar@shirazu.ac.ir, sohrab.m.pouyan@gmail.com , mr.rastegari@shirazu.ac.ir

چکیده – در این مقاله، یک مدولاتور پلاسمونیکی با مصرف انرژی کم و مبتنی بر موجبر ترکیبی فـلز-عـایق-فـلز ارایه شده است. ساختار این مدولاتور از موجبر ترکیبی فـلز-عـایق-فـلز و ماده فعال اکسید قلع آلاییده با ایندیم تشکیل شده اسـت کـه سـبب محدودیت نور قابل توجه، ابعاد کوچکتر و مصرف انرژی کمتر می‌شود. مدولاتور طراحی شده دارای مصرف انرژی 1.48 fj/bit**، نسبت تمایز** 17.54 dB/μm**، تلفات الحاقی** 0.77dB/μm **و طول انتشار** 3dB **برابر با** 171 nm **در طول موج** 1550 nm **می باشـد کـه نشـان دهنده کاهش قابل توجه در مصرف انرژی و بهبود نسبت تمایز نسبت به مدولاتورهای مشابه پیشین است.**

کلید واژه- اکسید قلع آلاییده با ایندیم، مدولاتور پلاسمونیکی، موجبر ترکیبی عایق-فلز-عایق

Low Energy Consumption Plasmonic Modulator Based on Hybrid Metal-Insulator-Metal Structure

Mohammad-Reza Rastegari, Sohrab Mohamadi Pouyan, and Abbas Zarifkar

mr.rastegari@shirazu.ac.ir, sohrab.m.pouyan@gmail.com, zarifkar@shirazu.ac.ir

Abstract- In this paper, a plasmonic modulator with low energy consumption based on Hybrid Metal-Insulator-Metal waveguide is proposed. The modulator structure is composed of a Hybrid Metal-Insulator-Metal waveguide and Indium Tin Oxide active material which results in good optical confinement and low energy consumption. Simulation results show an energy consumption of 1.48fj/bit, extinction ratio of 17.54dB/μm, insertion loss of 0.77dB/μm and 3dB propagation length of 171 nm at the wavelength of 1550 nm. Our design demonstrates a considerable reduction in energy consumption and improvement in extinction ratio compared to previous works.

Keywords: Hybrid Metal-Insulator-Metal waveguide, Indium Tin Oxide, Plasmonic Modulator

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱. مقدمه

مدولاتور نوری یکی از اجزای کلیدی شبکه‌های مجتمع نوری می‌باشد که فاز یا دامنه سیگنال نوری را تغییر می‌دهد. یک مدولاتور نوری کارآمد دارای ویژگی‌هایی مانند نسبت تمایز[۱] بالا، مصرف توان کم و پهنای باند زیاد است. بهبود همپوشانی بین مد نوری و لایه‌های فعال و افزایش تغییرات ضریب شکست موثر مد(EMI) [۲]، بر افزایش نسبت تمایز و کاهش ابعاد و توان مصرفی موثر است[1].

تاکنون در ساختار مدولاتورها از مواد فعال گوناگونی استفاد شده است. از بین این مواد فعال نوری، اکسیدهای رسانای شفاف(TCO)[۳] به سبب ویژگی‌های رسانایی الکتریکی خاص آنها و قابلیت تنظیم پذیری گذردهی[۴] به روش‌های الکتریکی، بسیار مورد توجه قرارگرفته اند. با اعمال ولتاژ به اکسیدهای رسانای شفاف، تغییرات شدیدی در چگالی حاملها ایجاد می شود و به همین سبب، مواد مذکور مدولاسیون و تنظیم پذیری بسیار خوبی از خود نشان می دهند. در ساخت مدولاتورها، در بین اکسیدهای رسانای شفاف، ITO[۵] به سبب کمترین میزان مقاومت الکتریکی، نزدیک صفر بودن گذردهی(ENZ) [۶] در محدوده فروسرخ و تلفات کمتر نسبت به فلزات، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است[2].

در سال ۲۰۱۸، شا[۷] و همکاران مدولاتور نوری مبتنی بر ITO با دیواره‌های زاویه‌دار براساس ساختار چند لایه $Si/HfO_2/ITO/Si$ طراحی کردند که در آن، تغییرات ضریب شکست موثر مد (EMI) قابل توجه بوده و تلفات الحاقی کمی نیز داشته است. انرژی مصرفی این مدولاتور 20fj/bit و ولتاژ کاری آن 4.45 ولت گزارش شده است. با این حال، در این طراحی علی‌رغم بهبود محدودیت نور و طول انتشار کم، ولتاژ کاری زیاد بوده و باعث افزایش انرژی مصرفی شده است[3].

در سال ۲۰۱۶، شارما[۸] و کومار[۹] موجبر ترکیبی فلز-عایق-فلز(HMIM)[۱۰] را معرفی کرده اند که در آن، محدودیت نور حدود 80% در لایه اکسید این موجبر حاصل شده است و لذا می تواند برای طراحی مدولاتوری با محدودیت نور قابل توجه، مورد استفاده قرار بگیرد[4].

در این مقاله با استفاده از موجبر HMIM، مبتنی بر ماده فعال ITO، مدولاتوری با مصرف انرژی کاهش یافته نسبت به ساختارهای پیشین ارایه شده است.

۲. تئوری کار

تغییرات ضریب گذردهی ماده ITO با چگالی حامل از رابطه درود-لورنتز بیان می‌شود[5]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty - \frac{{\omega^2}_p}{\omega^2 - i\gamma\omega} \qquad (1)$$

در این رابطه ε_∞ ضریب گذردهی فرکانس بالای ITO بوده و برابر 3.9 می‌باشد. ω_p فرکانس پلاسما، ω فرکانس نور و $\gamma = 1.8\times10^{14}$ نرخ پراکندگی الکترون می‌باشد. فرکانس پلاسما برحسب چگالی الکترون به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m^*}} \qquad (2)$$

در این رابطه، ε_0 ضریب گذردهی فضای ازاد، e بار الکترون و m^* جرم موثر الکترون می‌باشد.

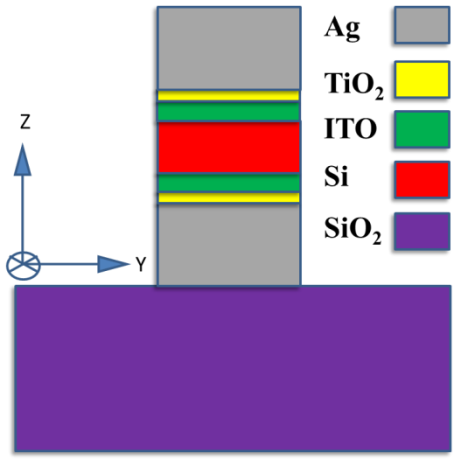
[1] Extinction Ratio
[2] Effective Mode Index
[3] Transparent Conductive Oxides
[4] Epsilon
[5] Indium Tin Oxide
[6] Epsilon Near Zero
[7] M. K. Shah
[8] P. Sharma
[9] V.D. Kumar
[10] Hybrid Metal Insulator Metal

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

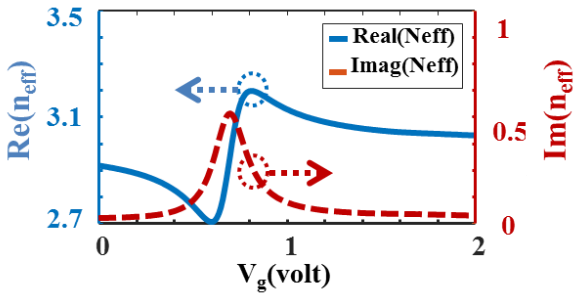
۳. طراحی و شبیه سازی

ساختار موجبر مدولاتور HMIM برپایه ماده فعال ITO در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار به ترتیب از یک بستر از جنس SiO_2 با ضخامت1μm، دولایه Ag در بالا و پایین با ضخامت100nm، دولایه TiO_2 با ضخامت5nm، دولایه ITO به عنوان ماده فعال و تنظیم‌پذیر با ضخامت 10nm و یک لایه سیلیکون در وسط با ضخامت50nm تشکیل شده است. عرض موجبر نیز 250 nm می باشد.



شکل ۱: ساختار موجبر HMIM مبتنی بر ماده فعال ITO

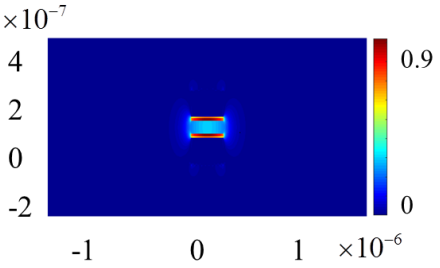
شبیه‌سازی، به روش المان محدود[1] انجام شده است. لایه سیلیکون به زمین متصل شده و به لایه های Ag ولتاژ یکسان داده می شود. با تغییر ولتاژ اعمالی، تغییرات ضریب شکست موثر مد مطابق شکل ۲ بدست می‌آید.



شکل ۲: تغییرات ضریب شکست مد برحسب ولتاژ اعمالی

با توجه به شکل ۲ در ولتاژهای صفر و 0.7 ولت، کمترین و بیشترین تلفات انتشاری(حالت روشن و خاموش مدولاتور) رخ می‌دهد.

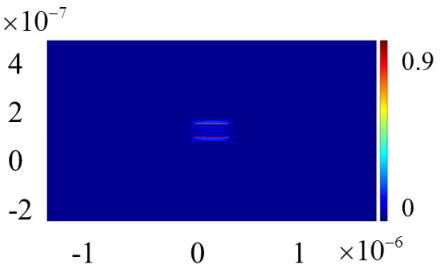
در حالتی که ولتاژ اعمالی صفر باشد، نور در کل ناحیه ITO و اکسید مجاور محدود شده و تلفات کمی خواهد داشت. پروفایل میدان در این حالت در شکل ۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۳: پروفایل میدان الکتریکی بدون اعمال ولتاژ

برای مد نشان داده شده در شکل ۳ ضریب شکست موثر2.92+0.02، تلفات الحاقی 0.77db/μm و محدودیت مد 55% بدست آمده است.

با اعمال ولتاژ، لایه تجمع بار بسیار نازکی در حدود 1nm در مرز لایه ITO و اکسید مجاور تشکیل می‌شود. این تجمع بار سبب تغییراتی در ضریب شکست ITO شده و گذردهی به صفر میل می‌کند و اثری به نام نزدیک صفر بودن گذردهی به وجود می‌آورد. در این حالت ITO، جذب بسیار زیاد و برهم‌کنش بالایی با نور از خود نشان می‌دهد. پروفایل میدان با اعمال ولتاژ 0.7 در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: پروفایل میدان الکتریکی با اعمال ولتاژ 0.7

[1] Finite Element Method

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

نتایج شبیه‌سازی برای نسبت تمایز(اختلاف تلفات انتشاری بین حالت های روشن و خاموش)، تلفات الحاقی[1](تلفات انتشاری در حالت روشن) و انرژی مصرفی در جدول ۱ ارائه و مقایسه شده است.

جدول ۱: مقایسه مدولاتورهای مختلف بر مبنای ITO

studies	ER (dB/μm)	IL (dB/μm)	E (fj/bit)
مرجع[3]	6.81	0.019	20
مرجع[5]	4.83	0.03	14.8
مرجع[6]	4.3	2.6	22.5
مرجع[7]	11.43	1.65	22.7
مرجع[8]	2.62	0.58	10
این مقاله	17.54	0.77	1.48

مولفه‌های فوق براساس مرجع[5] تعریف و محاسبه گردیده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، استفاده از ساختار ترکیبی فلز-عایق-فلز با محدودیت نور بالا، باعث افزایش نسبت تمایز شده است. از سوی دیگر، با انتخاب TiO_2 به عنوان لایه اکسید با ضریب گذردهی80، ولتاژ کاری مدولاتور به 0.7 ولت کاهش یافته و باعث کاهش انرژی مصرفی مدولاتور شده است.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که موجبر ترکیبی فلز-عایق-فلز به سبب محدودیت نور بالا، منجر به افزایش نسبت تمایز و کاهش توان مصرفی در مدولاتور مبتنی بر ITO می شود. مدولاتور طراحی شده دارای مصرف انرژی 1.48fj/bit و نسبت تمایز 17.54dB/μm می‌باشد که بهبود قابل توجهی را نسبت به ساختارهای قبلی نشان می‌دهد.

[1] Insertion Loss

مرجع‌ها

[1] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators," *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 518-522, 2010.

[2] X. Qiu, X. Ruan, Y. Li, and F. Zhang, "Multi-layer MOS capacitor based polarization insensitive electro-optic intensity modulator," *Optics Express*, vol. 26, no. 11, pp. 13902-13914, 2018.

[3] M. K. Shah, R. Lu, and Y. Liu, "Enhanced performance of ITO-assisted electro-absorption optical modulator using sidewall angled silicon waveguide," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 17, no. 3, pp. 412-418, 2018.

[4] P. Sharma and V. D. Kumar, "Investigation of multilayer planar hybrid plasmonic waveguide and bends," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 9, pp. 732-734, 2016.

[5] C. Lin and A. S. Helmy, "Dynamically reconfigurable nanoscale modulators utilizing coupled hybrid plasmonics," *Scientific Reports*, vol. 5, pp. 1231-1241, 2015.

[6] A. Masafumi, N. Yoshiaki, and T. Takuo, "Silicon rib waveguide electro-absorption optical modulator using transparent conductive oxide bilayer," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 4, pp. 422-427, 2016.

[7] M. Y. Abdelatty, M. M. Badr, and M. A. Swillam, "Compact silicon electro-optical modulator using hybrid ITO tri-coupled waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 18, pp. 4198-4204, 2018.

[8] Q. Gao, E. Li, and A. X. Wang, "Ultra-compact and broadband electro-absorption modulator using an epsilon-near-zero conductive oxide," *Photonics Research*, vol. 6, no. 4, pp. 277-281, 2018.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]