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 فلز-عایق-فلز

**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 فلز-عایق-فلز ارایه شده است. ساختار این مدولاتور از موجبر ترکیبی فلز-عایق-فلز و ماده فعال اکسید قلع آلاییده با ایندیم تشکیل شده است که سبب 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 باشد که نشان 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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19 ]



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

# 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[1] 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) [2]، 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)[3] به سبب ویژگی‌های رسانایی الکتریکی خاص آنها و قابلیت تنظیم پذیری گذردهی[4] 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[5] به سبب کمترین میزان مقاومت الکتریکی، نزدیک صفر بودن گذردهی(ENZ) [6] در محدوده فروسرخ و تلفات کمتر نسبت به فلزات، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است[2].

در سال ۲۰۱۸، شا[7] 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[8] و کومار[9] موجبر ترکیبی فلز-عایق-فلز(HMIM)[10] 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 $\varepsilon_\infty$ ضریب گذردهی فرکانس بالای ITO بوده و برابر 3.9 می‌باشد. $\omega_p$ فرکانس پلاسما، $\omega$ 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، $\varepsilon_0$ ضریب گذردهی فضای ازاد، $e$ بار الکترون و $m^*$ جرم موثر الکترون می‌باشد.

---

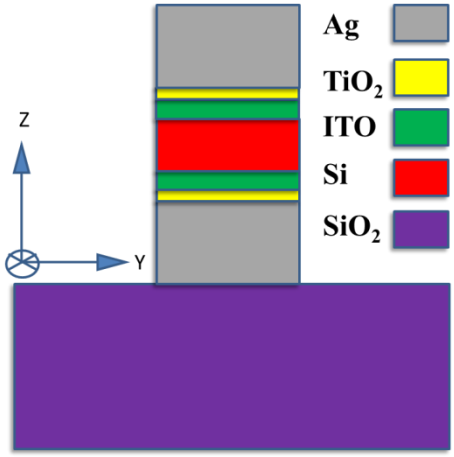
[1] Extinction Ratio
[2] Effective Mode Index
[3] Transparent Conductive Oxides
[4] Epsilon
[5] Indium Tin Oxide
[6] Epsilon Near Zero
[7] M. K. Shah
[8] P. Sharma
[9] V.D. Kumar
[10] Hybrid Metal Insulator Metal



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-19 ]

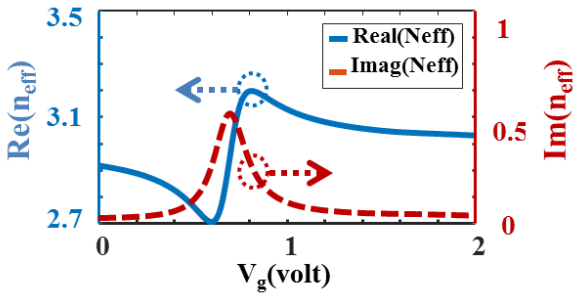
## ۳. طراحی و شبیه سازی

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

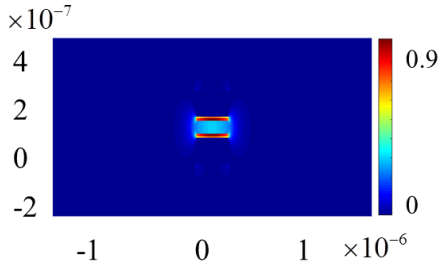
شبیه‌سازی، به روش المان محدود[1] انجام شده است. لایه سیلیکون به زمین متصل شده و به لایه های Ag ولتاژ یکسان داده می شود. با تغییر ولتاژ اعمالی، تغییرات ضریب شکست موثر مد مطابق شکل ۲ بدست می‌آید.




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.

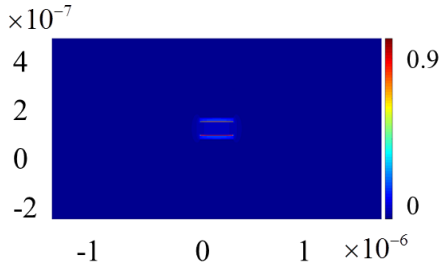
در حالتی که ولتاژ اعمالی صفر باشد، نور در کل ناحیه ITO و اکسید مجاور محدود شده و تلفات کمی خواهد داشت. پروفایل میدان در این حالت در شکل ۳ نشان داده شده‌است.




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 2025-12-19 ]

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 2025-12-19 ]