بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ پهن‌باند با سرعت بالا مبتنی بر موجبر هایبرید پلاسمونیک

بابک جانجان، عباس ظریفکار و عباس علی قنبری

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده –در این مقاله سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ پهن‌باند با سرعت سوئیچینگ بسیار زیاد بر پایه تزویجگر برای استفاده در اتصالات قابل پیکربندی مجدد در شبکه‌های نوری ارایه می‌شود. موجبرهای استفاده شده در تزویجگر، موجبرهای هایبرید پلاسمونیک هستند که امکان نوینی را برای مجتمع سازی پلیمرهای الکترواپتیک در فناوری سیلیکن فراهم می‌کنند. سرعت سوئیچینگ محاسبه شده در حدود ۴ پیکو ثانیه است. سطح هم‌شنوایی در پهنای باند ۸۷ نانومتری سوئیچ کمتر از *۱۸ dB*- است.

کلید واژه- تزویجگر، سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲، موجبر هایبرید پلاسمونیک

Broadband and high-speed ۲×۲ electro-optic switch based on hybrid plasmonic waveguide

Babak Janjan, Abbas Zarifkar, and Abbas Ali-Ghanbari

School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz

Abstract-in this article, we present a broadband and high-speed ۲×۲ electro-optic switch based on directional coupler for reconfigurable interconnection applications in optical network. The used waveguides are hybrid plasmonic waveguides which provide new possibilities for integrating of polymer electro-optic materials in silicon technology. Switching time is ۴ ps and optical crosstalk levels lower than -۱۸ dB are obtained for an optical bandwidth of ۸۷ nm.

Keywords: ۲×۲ Electro-optic switch, coupler, on-chip optical network

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

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

۱- مقدمه

اتصالات الکتریکی بر پایه فلزات محدودیت‌های بسیاری در زمینه‌هایی مانند نرخ داده، پهنای باند، توان مصرفی و ... در سامانه‌های پردازش موازی با حجم بسیار بالا ایجاد می‌کنند. بنابراین انتظار می‌رودکه با اتصالات نوری پهن باند با توان مصرفی کم جایگزین شوند[۱]. معماری شبکه‌های نوری درون تراشه که مسیرهای ارتباطی قابل پیکربندی مجدد را بین هسته ی پردازشگر و حافظه در درون تراشه فراهم می‌کنند، طی سالهای گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است[۲].

یکی از مشکلات عمده گسترش شبکه‌های نوری، محدودیت حد پراش (محدودیت اندازه‌ی ادوات نوری به وسیله طول موج نور حمل شده توسط شبکه) است که باعث بزرگتر شدن اندازه ادوات نوری در مقایسه با ادوات الکترونیکی می‌شود. حد پراش را می توان با بهره گیری از پلاسمونیک شکست[۳]. موجبرها که المان پایه‌ای برای فوتونیک محسوب می‌شوند، در این حوزه بسیار متنوع هستند ولی موجبرهای هایبرید پلاسمونیک به دلیل فراهم کردن تعادل مناسب بین طول انتشار و سطح موثر مد، توجه بیشتری را بسوی خود معطوف داشته اند[۴, ۵]. در این بین موجبرهای هایبرید پلاسمونیک بر پایه سیلیکن ویژگی‌های منحصر به فردی را ارایه می‌کنند. این موجبرها بخصوص بر پایه فناوری پیشرفته سیلیکن روی عایق (SOI) ساخته می‌شوند و از همه مهمتر می‌توان با تلفات کم، آنها را به موجبرهای دی‌الکتریک SOI متصل کرد[۶]. تاکنون ادوات نوری بسیاری مانند خم[۱][۶]، قطبشگر[۷]، چرخاننده قطبش[۸] تزویجگر[۵, ۹]، حلقه تشدید[۱۰] و سوئیچ[۹] بر پایه موجبر هایبرید پلاسمونیک ارایه شده‌اند.

مشکل دیگر، صفر بودن ضریب پاکلز سیلیکن است. هرچند اثراتی مانند اثر ترمواپتیک[۱۱] و اثر پاشندگی حامل‌های آزاد[۱۲] برای کنترل خواص نوری سیلیکن به صورت پویا بکار گرفته شده‌اند، اما این فناوری‌ها تاثیرات نامطلوبی روی سرعت، تلفات و... دارد. مجتمع‌سازی پلیمرهای الکترواپتیک و $LiNbO_3$ که برای ساخت ادوات پرسرعت نوری بکار می‌روند، با فناوری سیلیکن بسیار مشکل است. موجبرهای پلاسمونیک امکان جدیدی برای مجتمع سازی پلیمرهای الکترواپتیک در فناوری سیلیکن فراهم کرده‌اند[۹].

سوئیچ نوری ۲×۲ پهن‌باند یک قطعه کلیدی برای شبکه-های نوری درون تراشه محسوب می‌شود زیرا المان پایه‌ای برای ماتریس سوئیچینگ هستند که به طور همزمان همه کانال‌های WDM را مسیر دهی می‌کنند. پهنای باند این سوئیچ‌ها بطور مستقیم تعداد و فاصله کانال‌های WDM را مشخص می‌کند[۲]. بطور کلی سرعت سوئیچینگ بالا و اندازه کوچک از ویژگی‌های کلی این سوئیچ‌ها هستند.

در این مقاله سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ پهن‌باند با سرعت بسیار زیاد برپایه تزویجگر و موجبرهای هایبرید پلاسمونیک برای شبکه‌های نوری درون تراشه ارایه می-شود که از پلیمر الکترواپتیک در آن استفاده شده است. در ادامه در بخش ۲، ساختار سوئیچ پیشنهادی، ارایه شده و در بخش ۳ چگونگی طراحی آن تشریح می گردد. دربخش ۴ نتایج شبیه سازی سوئیچ و مشخصات آن ارایه می شود و نهایتا در بخش ۵ جمع‌بندی لازم بیان می‌شود.

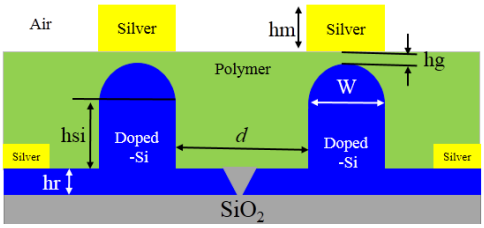
۲- ساختار

در شکل۱ ساختار سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ بر مبنای موجبر هایبرید پلاسمونیک نشان داده شده است. در ساختار تزویجگر از دو موجبر هایبرید پلاسمونیک یکسان استفاده شده است. مرز نیم دایره‌ای نقش کلیدی در ساختار موجبر هایبرید پلاسمونیک ایفا می‌کند زیرا باعث افزایش طول انتشار موجبر می‌شود[۵]. اندازه‌های در نظر گرفته شده در این مقاله عبارتند از: w=۲۵۰ nm، hm=۱۰۰ nm، hr=۵۰ nm، hsi=۴۰۰ nm و hg=۵۰ nm.

مقدار ضریب شکست SiO_2 و Si که مقدار 10^{18} cm^{-3} ناخالصی بور برای ایجاد اتصال الکتریکی به آن اضافه شده درطول موج ۱/۵۵ µm به ترتیب برابر ۱/۴۴۴ و $3{,}476+7{,}4\times10^{-6}i$ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین وابستگی آنها به طول موج در شبیه‌سازی اعمال شده است[۱۳]. ضریب شکست نقره با استفاده از مدل درود-

[۱] bend

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]



شکل۱: ساختار سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲

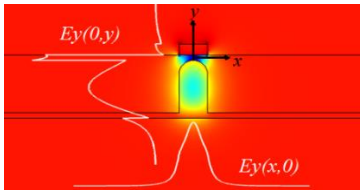
موج ۱/۵۵ µm برابر با n_{Ag}=۰,۱۴۶+۱۱,۳۲۷ است[۱۴]. همچنین ضریب شکست و پاکلز پلیمر به ترتیب برابر ۱/۷ و ۳۰۰ pV/m در نظر گرفته شده‌اند[۱۵].

توزیع میدان الکتریکی غالب E_y برای مد TM-like موجبر هایبرید پلاسمونیک شبیه‌سازی شده به وسیله نرم‌افزار COMSOL در شکل۲ نشان داده شده است. همچنین برای وضوح بیشتر پروفایل میدان‌های $E_y(\cdot,y)$ و $E_y(x,\cdot)$ رسم شده‌اند. با توجه به پرفایل $E_y(\cdot,y)$ مشخص است که بیشتر میدان الکتریکی در داخل لایه پلیمری قرار گرفته شده بین نقره و سیلیکن جای گرفته و مقداری هم در داخل هسته سیلیکنی باقی مانده است. بنابراین با عمال ولتاژ به پلیمر می‌توان سیگنال نوری را مدوله کرد.

۳- طراحی سوئیچ نوری

چنانچه موجبرهای یک تزویجگر یکسان باشند توان بصورت کامل بین دو موجبر معاوضه می شود (حالت cross). طول تزویج برای انتقال کامل توان از یک موجبر به موجبر دیگر برابر با $L_C = \pi/2\kappa$ است که در آن κ ضریب تزویج می باشد. حال برای اینکه در یک طول تزویج در خروجی تزویجگر، معاوضه توان وجود نداشته باشد یا به عبارت دیگر، توان از همان موجبری که وارد شده، خارج شود، باید اختلاف فازی برابر با $\sqrt{3}\pi$ بین دو موجبر تزویجگر ایجاد شود (حالت bar). بنابراین با در نظر گرفتن طول تزویجگر به اندازه یک طول تزویج و اعمال اختلاف فاز $\sqrt{3}\pi$ بین موجبرهای آن می‌توان عمل سوئیچینگ را در خروجی انجام داد یا به عبارت دیگر از تزویجگر به عنوان سوئیچ نوری استفاده کرد[۱۶].

در طراحی این سوئیچ از روش پوش-پول استفاده شده که در آن اختلاف فاز برابر اما مختلف العلامه $\sqrt{3}\pi/2$ به هر یک از دو موجبر اعمال می‌شود[۱۶]. برای طراحی سوئیچ



شکل۲: توزیع میدان غالب E_y مد TM-like به همراه پروفایل میدان-های $E_y(\cdot,y)$ و $E_y(x,\cdot)$ برای وضوح بیشتر

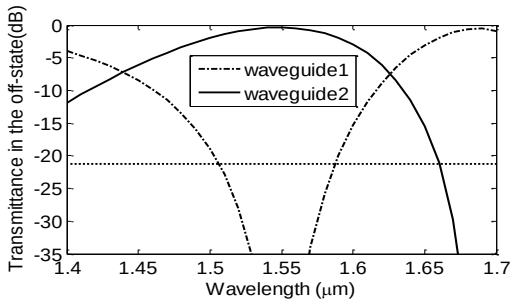
ابتدا با توجه با ولتاژ اعمالی، طول مورد نیاز برای ایجاد اختلاف فاز $\sqrt{3}\pi/2$ در هر یک از موجبرها طبق رابطه $L = \sqrt{3}\pi/4\Delta n_{eff}$ که Δn_{eff} تغییر ضریب شکست موثر موجبر هایبرید پلاسمونیک در اثر اعمال ولتاژ است، محاسبه می‌شود سپس طول محاسبه شده برابر یک طول تزویج تزویجگر در نظر گرفته می‌شود و با توجه به آن فاصله بین موجبرهای تزویجگر محاسبه می‌شود. نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار COMSOL نشان داد که با اعمال ۲+ولت به یکی از موجبرهای هایبرید پلاسمونیک و ۲- ولت به موجبر دیگری، ضریب شکست موثر هر یک از موجبرها به ترتیب ۰/۰۰۲۷۴ و ۰/۰۰۲۶۶ تغییر می‌کند. بنابراین طول تزویج یا به عبارت دیگر طول کلی سوئیچ برابر با ۲۴۹ µm محاسبه می‌شود که در مقایسه با مراجع [۱۶, ۱۷] به ترتیب ۱۲و ۱۷ برابر کاهش پیدا کرده است. همچنین با توجه به طول تزویج فاصله بین دو موجبر برابر با d=۵۹۵,۴ nm می باشد که همچنین این مقدار هم با توجه دو مرجع ذکر شده به بیشتر از ۵ برابر کاهش پیدا کرده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

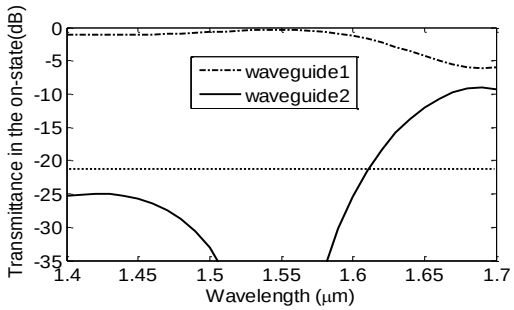
طیف توان انتقالی سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ برای دو موجبر تزویجگر در حالت خاموش در شکل ۳-الف رسم شده است. فرض شده که توان ورودی به موجبر ۱ وارد می‌شود. همانطور که مشخص است در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر، سوئیچ در حالت cross است و با فاصله گرفتن از این طول موج مقدار توان خارج شده از موجبر ۲ در خروجی به دلیل وابستگی κ به طول موج کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن ۲۰ dB- به عنوان مرجع برای پهنای باند که با نقطه چین بر روی شکل نشان داده شده است، مقدار پهنای باند سوئیچ در حالت خاموش برابر با ۸۷

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

نانومتر است. با اعمال ولتاژ به الکترودها، سوئیچ از حالت cross به bar



(الف)



(ب)

شکل۳: طیف توان انتقالی سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ الف) در حالت خاموش ب) در حالت روشن

تغییر حالت می‌دهد. در این حالت طیف توان انتقالی سوئیچ نوری الکترواپتیک ۲×۲ به صورت شکل ۳-ب تغییر می‌کند. با توجه به شکل، پهنای باند سوئیچ در حالت روشن خیلی بیشتر از حالت خاموش است. بنابراین پهنای باند سوئیچ همان پهنای باند آن در حالت خاموش یعنی ۸۷ نانومتر است. مقدار حداکثر تلفات سوئیچ در پهنای باند آن در حدود ۲ dB و هم‌شنوایی آن کمتر از ۱۸ dB- است. سرعت سوئیچ با توجه به سرعت پاسخ‌دهی بالای پلیمر(در حدود فمتو ثانیه) به مقدار RC بستگی دارد[۹]. مقدار خازن و مقاومت به ترتیب برابر با ۲۰ fF و ۲۰۰ Ω محاسبه شده، بنابراین سرعت سوئیچ برابر با ۴ ps حاصل می گردد که در مقایسه با مرجع[۱۷] در حدود شش برابر کاهش نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

موجبرهای هایبرید پلاسمونیک که توانایی شکستن حد پراش را دارند امکان نوینی برای مجتمع سازی پلیمرهای الکترواپتیک در فناوری سیلیکن فراهم کرده‌اند. با استفاده از تزویجگر ساخته شده به وسیله موجبرهای هایبرید پلاسمونیک به عنوان سوئیچ نوری می‌توان به سرعت سوئیچینگ بالا در حدود ۴ پیکو ثانیه با اعمال ولتاژ ۲± ولت به صورت پوش-پول، دست یافت. سوئیچ هم‌شنوایی کمتر از ۱۸ dB- و تلفات ۲ dB در پهنای باند ۸۷ نانومتر با اندازه بسیار کوچکتر در مقایسه با سوئیچ‌های مشابه را نشان می‌دهد.

مراجع

[۱] T. Barwicz, *et al.*, "Silicon photonics for compact, energy-efficient interconnects," *Journal of Optical Networking*, vol. ٦, pp. ٦٣-٧٣, ٢٠٠٧.

[۲] A. Shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, "Photonic Networks-on-Chip for Future Generations of Chip Multiprocessors," *IEEE, Transactions on Computers*, vol. ٥٧, pp. ١٢٤٦-١٢٦٠, ٢٠٠٨.

[۳] D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit," *Nat. Photon*, vol. ٤, pp. ٨٣-٩١, ٢٠١٠.

[٤] D. Dai and S. He, "A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement," *Optics Express*, vol. ١٧, pp. ١٦٦٤٦-١٦٦٥٣, ٢٠٠٩.

[٥] A. Amirhosseini and R. Safian, "A Hybrid Plasmonic Waveguide for the Propagation of Surface Plasmon Polariton at ١,٥٥ μm on SOI Substrate," *Transactions on Nanotechnology*, vol. ١٢, pp. ١٠٣١-١٠٣٦, ٢٠١٣.

[٦] M. Wu, Z. Han, and V. Van, "Conductor-gap-silicon plasmonic waveguides and passive components at subwavelength scale," *Optics Express*, vol. ١٨, pp. ١١٧٢٨-١١٧٣٦, ٢٠١٠.

[٧] M. Z. Alam, J. S. Aitchison, and M. Mojahedi, "Compact and silicon-on-insulator-compatible hybrid plasmonic TE-pass polarizer," *Optics Letters*, vol. ٣٧, pp. ٥٥-٥٧, ٢٠١٢.

[٨] G. Linfei, *et al.*,"Ultra-Compact and Low-Loss Polarization Rotator Based on Asymmetric Hybrid Plasmonic Waveguide," *IEEE, Photonics Technology Letters*, vol. ٢٥, pp. ٢٠٨١-٢٠٨٤, ٢٠١٣.

[٩] E. F. Dudley and P. Wounjhang, "Ultra-Compact High-Speed Electro-Optic Switch Utilizing Hybrid Metal-Silicon Waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. ٣٠, pp. ٣٤٠١-٣٤٠٦, ٢٠١٢.

[١٠] S. Zhu, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, "Submicron-Radius Plasmonic Racetrack Resonators in Metal-Dielectric-Si Hybrid Plasmonic Waveguides," *IEEE, Photonics Technology Letters*, vol. ٢٦, pp. ٨٣٣-٨٣٦, ٢٠١٤.

[١١] M. Harjanne, *et al.*, "Sub-μ switching time in silicon-on-insulator Mach-Zehnder thermooptic switch," *Photonics Technology Letters*, vol. ١٦, pp. ٢٠٣٩-٢٠٤١, ٢٠٠٤.

[١٢] R. A. Soref and B. R. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. ٢٣, pp. ١٢٣-١٢٩, ١٩٨٧.

[١٣] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*: Academic Press, ١٩٩٨.

[١٤] P. B. Johnson and R. W. Christy, *Optical Constants of the Noble Metals*: Dartmouth College., ١٩٧٢.

[١٥] T. D. Kim, *et al.*, "Ultralarge and Thermally Stable Electro-Optic Activities from Supramolecular Self-Assembled Molecular Glasses," *Journal of the American Chemical Society*, vol. ١٢٩, pp. ٤٨٨-٤٨٩, ٢٠٠٧.

[١٦] C. T. Zheng, *et al.*, "Simulation and optimization of a polymer directional coupler electro-optic switch with push–pull electrodes," *Optics Communications*, vol. ٢٨١, pp. ٣٦٩٥-٣٧٠٢, ٢٠٠٨.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

[۱۷] C. T. Zheng, *et al.*, "Analysis of response characteristics for polymer directional coupler electro-optic switches," *Optics Communications*, vol. ۲۸۱, pp. ۵۹۹۸–۶۰۰۵, ۲۰۰۸.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]