بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

سوئیچ‌های الکترواپتیک کوپلر هم‌راستا با موجبرهای هیبریدی پلاسمونی بر مبنای باریم تیتانات

میلاد زرعی، هادی صوفی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، ایران zmilad3210@gmail.com،
h.soofi@tabrizu.ac.ir

چکیده – در این مقاله، سوئیچ کوپلرهم‌راستا الکترواپتیک با موجبر هیبریدی پلاسمونی بر مبنای باریم تیتانات طراحی و مدل‌سازی شده است . باورمان بر این است که با استفاده از باریم تیتانات به جای لیتیوم نیوبات به ولتاژ سو دهی کامل کمتر و با گذر از ساختار پلاسمونی به هیبریدی پلاسمونی به تلفات انتشاری کمتر دستیابی ممکن است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی های الکتریکی ایستا با کامسول و نوری با FDTD lumerical نشان می‌دهند که تلفات انتشاری برابر ۰،۰۸۴ dB/μm و طول کوپلینگ ۷،۱ μm با درصد کوپلینگ % ۷۵ است.

کلید واژه- اثر پاکلز، باریم تیتانات، سوئیچ‌های کوپلر هم‌راستا، موجبر هیبریدی پلاسمونیک.

Electro-optic Directional coupler Switches with Hybrid Plasmonic Waveguides Based on Barium Titanate

Milad Zarei, Hadi Soofi

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, 5166616471, Iran zmilad3210@gmail.com, h.soofi@tabrizu.ac.ir

Abstract- Electro-optical directional coupler switch with hybrid plasmonic waveguides based on barium titanate is designed and simulated. we believe with use of barium titanate instead of lithium niobate and hybrid plasmonic instead of plasmonic structure achieving to smaller complete switch voltage and low transmission loses are possible. Results from electro-static and optical simulations from COMSOL and FDTD LUMERICAL shows that loss id 0.084 dB/μm and coupling length is 7.1 μm with coupling factor of 75%.

Keywords: Pockels Effect, Barium Titanate, Directional coupler Switches, Hybrid Waveguides.Plasmonic

[Downloaded from opsi.ir on 2025-06-04]

مقدمه

امروزه تلاش زیادی به منظور طراحی ادوات الکترواپتیک پهن باند، با مصرف انرژی کم، سازگار با فناوری CMOS و با ابعاد فشرده در حال انجام است. در این بین سوئیچ کوپلرهای هم راستا که یکی از ادوات پایه برای ساخت مدولاتورها، مالتی پلکسرها و ...هستند، از اهمیت زیادی برخوردارند. با این که در دهه‌های گذشته بسترهای متعددی پیشنهاد شده‌اند اما هیچ کدام جواب گوی نیازهای روزافزون سیستم های مخابراتی مدرن نیستند.

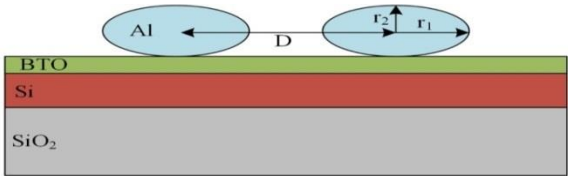
سیلیکون به دلیل موجود بودن برش‌های تجاری در ابعاد مختلف، ساخت آسان و کم هزینه و سازگاری با فناوری CMOS یکی از مواد مورد استفاده در ساخت سو دهنده‌ها است. این ماده به دلیل داشتن ساختار متقارن مرکزی نمی‌تواند اثر پاکلز مناسبی از خود نشان دهد. در واقع عمل پیمانه‌بندی ضریب شکست در سیلیکون ناخالص‌شده با اثر پلاسما به دلیل تغییر تجمع حامل‌های آزاد است. به همین دلیل سرعت مدولاسیون محدود است [۱].

ادوات الکتریکی-نوری رابط بین فوتونیک و الکترونیک هستند. سازگاری این ادوات با CMOS و قابلیت مجتمع سازی با آن از اهمیت زیادی برخوردار است. سیلیکون با این که این قابلیت را دارد اما در کنار آن به ماده‌ای نیاز است تا عمل مدولاسیون توسط ضریب پاکلز آن انجام شود. در دهه گذشته بصورت عمده در ساختارهای الکترواپتیک، لیتیوم نیوبات مورد استفاده قرار گرفته است. لیتیوم نیوبات به دلیل مزیت‌های متعددی همانند ضریب پاکلز زیاد، حبس مد قوی، شفافیت نوری زیاد و پایداری مکانیکی و شیمیایی عالی [۲] به یکی از پرکاربردترین ماده مورد استفاده در ادوات الکتریکی-نوری تبدیل شده است. اما معایبی همانند طول بر هم کنش زیاد، محدودیت در پهنای باند مدولاسیون و ناسازگاری لیتیوم نیوبات با CMOS [۳] باعث شده تا تحقیقات برای جایگزین کردن ماده‌ای دیگر ادامه یابد.

پلاسمونی با جایگزین کردن انرژی الکترومغناطیسی با نور که کوچکتر از طول موج نور است، ساخت ادوات نوری خیلی سریع با ابعاد فشرده و حبس مد قوی را فراهم می کند[۴]. پهنای باند زیاد در پلاسمونی ناشی از ثابت زمانی کم به لطف الکترودهای فلزی است. اما به دلیل تلفات زیاد ناشی از فلزات کاربرد پلاسمونی محدود شده است. با این حال می توان از ترکیب هیبریدی پلاسمونی برای بهره‌مندی از مزیت های عالی آن استفاده کرد.

طراحی و مدل‌سازی ساختار

ساختار سو دهنده نوری مدل سازی شده شامل دو موجبر نانو وایر استوانه‌ای بیضی‌وار به ترتیب با شعاع های بزرگ و کوچک ۱۵۰ nm و ۱۲۰ nm است که با فاصله ۴۸۰nm = D (از مرکز یک موجبر تا مرکز دیگری) از یکدیگر جدا شده اند. موجبر روی لایه نازک باریم تیتانات به ضخامت ۵۰ nm قرار گرفته است. همچنین لایه باریم تیتانات نیز بر روی لایه سیلیکون به ضخامت ۱۵۰ nm قرار گرفته است. شکل ۱ ساختار سطح متقاطع کوپلر هم راستا را نشان می دهد.



شکل۱. ساختار سطح متقاطع کوپلر هم‌راستا.

در مدولاتور، نور با طول موج ۱۵۵۰ nm بصورت مساوی به دو موجبر اعمال می‌شود همچنین با اعمال ولتاژهای مختلف و در نتیجه تغییر ضریب شکست لایه زیر موجبرها می توان نسبت تفکیک نور ورودی به دو موجبر را کنترل کرد. برای مدل‌سازی حالت الکتریکی ایستا از نرم‌افزار

[Downloaded from opsi.ir on 2025-06-04]

کامسول استفاده شده است و ولتاژهای V , GND به دو موجبر اعمال شده است. با توجه به رابطه (۱) که بیانگر اندازه تغییرات ضریب شکست ناشی از اعمال میدان الکتریکی است، مشخص می‌شود دو پارامتر میدان الکتریکی (E) و ضریب پاکلز (r) تاثیر زیادی روی میزان تغییر ضریب شکست (Δn) دارند. در حالت اول، اگر بخواهیم تغییرات ضریب شکست را با میدان الکتریکی افزایش دهیم با دو چالش اساسی افزایش ولتاژ اعمالی و تلفات مواجه خواهیم شد. کاهش بیشتر فاصله بین دو موجبر، نه تنها باعث افزایش تلفات می شود بلکه در فاصله‌های کم، پروفایل مدهای مولفه y میدان الکتریکی نوری دو موجبر با هم تداخل می کنند که در نتیجه این اتفاق شرط کوپلینگ ضعیف نقض می‌شود. علاوه بر این، فاصله‌های زیاد بین موجبرها باعث افزایش طول کوپلینگ می‌شود. بنابراین باید حدوسطی برای این فاصله تعیین شود. در حالت دوم، می‌توان با ثابت نگه داشتن ولتاژ بایاس و فاصله بین موجبرها، با انتخاب ماده‌ای با ضریب پاکلز زیاد تغییرات ضریب شکست را بیشینه کرد. باریم تیتانات با r_{42} = ۱۳۰۰ pm/v برای حالت بدون فشار و با r_{42} = ۷۰۰ pm/v برای حالت با فشار شبکه، دارای بیشترین ضریب پاکلز بین موادی است که تاکنون کشف شده‌اند. همچنین به علت امکان رشد همبافته (اپیتکسیال) باریم تیتانات روی سیلیکون و مجتمع‌سازی آن بصورت یکپارچه با مدارات الکترونیکی کاربرد این ماده فروالکتریک در ادوات الکترواپتیک روز به روز در حال افزایش است. علی‌رغم این که در عمل دستیابی به این ضرایب در لایه نازک باریم تیتانات رشد داده شده روی بستر سیلیکون بر روی عایق به علت پارامترهایی همانند نقص شبکه، فشار شبکه و اندازه ذرات و وابستگی کیفیت لایه به فرآیند رشد ممکن نیست [۱] اما با چرخاندن موجبر روی باریم تیتانات به نحوی که با محور نوری بلور زاویه φ داشته باشد، می‌توان مشخصات الکترواپتیک آن را بهبود داد.

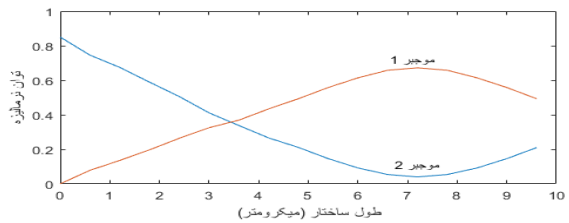
همانند رابطه (۲) که در مقاله [۱] محاسبه شده است، می توان با انتخاب زاویه $\varphi = 45^{\circ}$ ضریب پاکلز موثر را بصورت جمع عبارت های r_{42} , r_{33} , r_{13} برابر با ۹۶۰ pm/v بدست آورد که ۳۰ برابر بزرگتر از ضریب پاکلز لیتیوم نیوبات است. البته در این مدل سازی از مقدار ۳۶۰pm/v استفاده شده است که بصورت تجربی برای لایه نازک باریم تیتانات بدست آمده است. [۱]

$$\Delta n = 0.5\, r n_0^3 E \qquad (۱)$$

$$r_{eff} = \frac{1}{2\sqrt{2}}(r_{13} + r_{33} + r_{42}) \qquad (۲)$$

نتایج

به منظور بررسی نحوه کوپلینگ و بدست‌آوردن طول کوپلینگ در نرم‌افزار لومریکال FDTD، در حالت بدون اعمال ولتاژ، منبع فقط به یک موجبر اعمال شده است و ثبت کننده‌های توان بصورت پشت‌سرهم در هر موجبر بصورت موازی با موجبر دیگر جایگذاری شده اند. شکل ۲ نمودار انتقال توان بهنجار (نرمالیزه) شده را از موجبری به موجبر دیگر نشان می دهد.

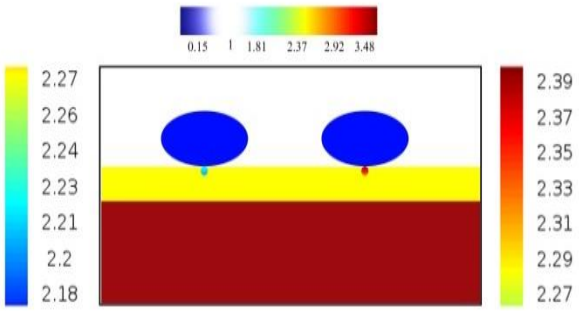


شکل ۲. نمودار انتقال توان نرمالیزه شده بر حسب طول ساختار.

از نمودار شکل ۲ مشخص می شود که طول کوپلینگ برابر با ۷٫۱ µm است و ۷۵٪ توان اولیه به موجبر دوم منتقل شده است . همچنین با بررسی مقدار توان منتقل شده از یک موجبر در FDTD lumerical، مقدار تلفات انتشاری برابر با ۰٫۰۸۴ dB/µm بدست آمده است. با اعمال منبع به صورت مساوی به دو موجبر و همچنین اعمال ولتاژ به موجبرها شاهد تغییر ضریب شکست لایه‌ی زیر موجبرها هستیم. در شکل ۳ میزان تغییر ضریب شکست لایه باریم

[Downloaded from opsi.ir on 2025-06-04]

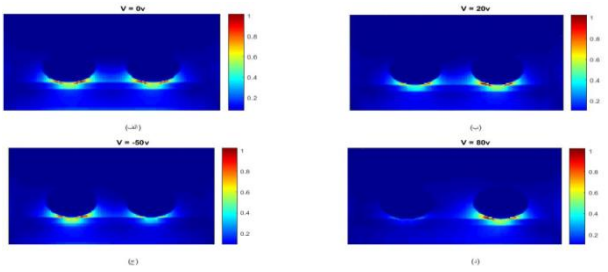
تیتانات برای ولتاژ ۱۰ ولت نشان داده شده است. با در نظر گرفتن محور z باریم تیتانات به عنوان محور نوری کریستال، n_0 برابر با ۲,۲۷ به عنوان ضریب شکست اولیه باریم تیتانات در نظر گرفته شده است. همان طوری که در شکل ۳ مشخص است اندازه تغییرات ضریب شکست با توجه به ضریب پاکلز خیلی زیاد باریم تیتانات، به میزان زیادی تغییر کرده است. البته بیشترین تغییر ضریب شکست در نزدیکی سطح مشترک بین موجبر و باریم تیتانات مشاهده می شود و در فاصله‌های دورتر از این سطح، ضریب شکست به مقدار اولیه نزدیک تر می شود.



شکل ۱شکل ۳. تغییرات ضریب شکست باریم تیتانات با اعمال ولتاژ ۱۰ ولت.

به منظور بررسی مشخصات الکترواپتیک ساختار، ولتاژهای متفاوت به موجبرها اعمال شده اند. شکل ۴ (الف تا د) پروفایل میدان الکتریکی نوری در راستای z را با اعمال ولتاژهای متفاوت نشان می دهد. با اعمال ولتاژ زیاد ۵۰ v دستیابی به عمق مدولاسیون ۸۳٪ امکان پذیر است.

از شکل ۴ می توان گفت برای تفکیک بیشتر توان به ولتاژ بیشتری نیاز است و همچنین از شکل ۴) ج مشخص است، با تغییر قطب الکتریکی ولتاژ اعمالی، توان در موجبر دیگر حبس می شود.



شکل۴. پروفایل z میدان الکتریکی نوری بااعمال ولتاژهای متفاوت

نتیجه‌گیری و بحث

ما کوپلر هم‌راستایی را مدل‌سازی کردیم که می توان از آن برای سو دهی الکترواپتیک با تلفات ۰,۰۸۴ dB/μm که خیلی کمتر از ساختار پیشنهاد شده در مقاله [۵] است، استفاده کرد. علی رغم ضریب پاکلز زیاد باریم تیتانات به دلیل تماس کم آن با الکترودها، ضریب شکست فقط در آن ناحیه تماس تغییر می کند. با این حال می‌توان از موجبر ریج به جای نانووایر استفاده کرد و با ولتاژهای به مراتب کمتر نیز سو دهی کامل را انجام داد اما در این مقاله به دلیل برقراری تعادل خوب بین تلفات و طول کوپلینگ از موجبر نانووایر استفاده شده است.

مرجع‌ها

[1] Andeas Messner, Stefsn Abel, " Plasmonic Ferroelectric Modulators ", journal of Lightwave Technology,Vol. 37,NO. 2, January 2019.

[2] Weis, R. Gaylord, " Lithium niobate:summery of physical properties and crystal structure ". Appl. Phys. A37, 191-203 (1985).

[3] E. L. Wooten, "A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communication systems ", IEEE J. sel. Topics Quantum Electron, vol.6, no.1, pp.69-82, 2000.

[4] Viktoria E.Babicheva, Nathaniel Kinsey, " Toward CMOS-compatible nanophotonics: Ultra compact modulators using alternative plasmonic materials ", optics express, 2013.

[5] Martin Thomaschewski, Vladimir A.zenin," Plasmonic monolithic lithium niobate directional coupler switch ", Nature comminiucation, 2020.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-06-04]