بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

طراحی و مدل‌سازی مدولاتور نوری مجتمع مبتنی بر اثر الکترواپتیک خطی در تیتانات باریوم

فهیمه شکرانه ، هادی صوفی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

چکیده - تیتانات باریوم ماده‌ای فروالکتریک دارای اثر پاکلز بزرگ است و لذا استفاده از این ماده در ساختار مدولاتورهای نوری بسیار نویدبخش است. در این مقاله یک مدولاتور نوری مجتمع بر پایه‌ی تکنولوژی سیلیکون بر روی عایق طراحی و مدل‌سازی شده است. این مدولاتور از موجبرهای شیاری هیبرید پلاسمونی با ریل‌های نقره و سیلیکون و مبدل‌های مد نوری به هیبریدی در ورودی و خروجی ساختار تشکیل شده است. مدولاتور طراحی‌شده "ولتاژ نیم موج×طول" Vmm ۰/۰۲ از خود نشان می‌دهد که در مقایسه با مدولاتورهای ماخ-زندر دیگر(سیلیکونی یا پلا سمونیکی) عدد بسیار پایینی است. همچنین، علاوه بر این پارامتر مهم، طراحی ارائه‌شده در این مقاله اتلاف الحاقی پایینی در حد ۳dB در بازه‌ی طول‌موجی ۱/۶۵μm – ۱/۴۵ ارائه می‌دهد.

کلید واژه-اثر پاکلز،پلاسمونیک،تیتانات باریوم، مدولاتور نوری، موجبر هیبریدی.

Design and modeling of integrated optical modulator based on linear electro-optic effect in Barium Titanate

Fahime Shokrane, Hadi Soofi

Faculty of Electrical & computer Engineering- University of Tabriz- Tabriz- Iran

Abstract- Barium Titanate is a ferroelectric material with a large Pockels coefficient and hence utilizing this material for optical modulators is very promising. In this article, an optical modulator based on silicon on insulator platform is designed and simulated. This modulator employs hybrid plasmonic slot waveguides with Ag and Silicon rails and optical to hybrid mode converters at the inpu and output of the structure. Designed modulator exhibits a half wave voltage, length product of 0.02 Vmm which is extremely low compared to other Mach-Zehnder modulators. Moreover, the design presented in this article, has an insertion loss of approximately 3dB in the wavelength range of 1.45 to 1.65μm.

Keywords: Barium Titanate, Plasmonics, Pockels effect, Hybrid waveguide, Optical modulator

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

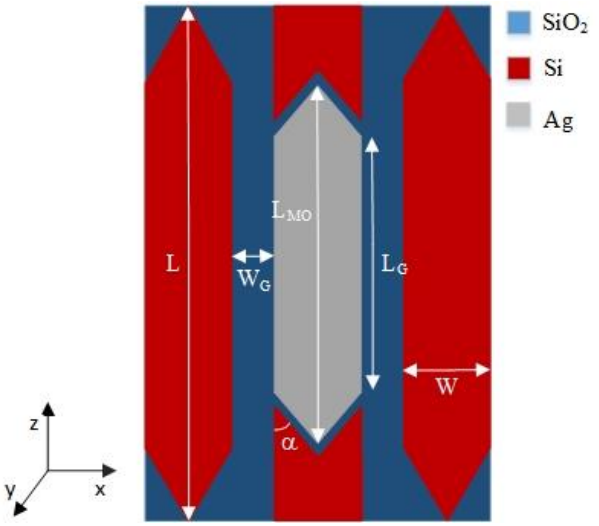
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

از میان مدولاتورهای نوری، مدولاتورهای الکترواپتیکی استفاده گسترده‌تری در سیستم‌های مخابراتی دارند. ساختار ماخ-زندری مدولاتورهای الکترواپتیکی سرعت‌های بالاتر و محدودیت پهنای باند کمتری دارند [۱]. در این مقاله هدایت نور در موجبرهای شیاری هیبریدی انجام می‌شود که حبس نور بسیار بالا و تلفات پایینی دارند. تغییر ویژگی‌های ساختاری مانند تغییر اندازه شیارها و فواصل کوپلرها، جنس ماده‌ی استفاده‌شده در موجبر شیاری، جنس موجبرها امکان کنترل بهتر خصوصیاتی مانند حبس نور،تلفات، تحمل حرارتی، ولتاژ نیم موج، عمق مدولاسیون پهنای باندی را فراهم می‌آورد. برای ترکیب عملکرد مدولاسیونی بالای مواد فروالکتریک با مقیاس‌پذیری سیلیکون فوتونیک‌ها از سیستم‌های هیبریدی سیلیکون/ماده‌ی فروالکتریک استفاده می‌شود . یک راهکار مناسب برای کاهش ولتاژ نیم موج استفاده از ماده فروالکتریک با ضریب پاکلز بالاتر است. BTO به علت ضریب پاکلز بسیار قوی [۲]، پایداری حرارتی و شیمیایی خوب، امکان رشد در روی بسترهای سیلیکونی با کیفیت بلوری عالی، امیدوارکننده‌ترین ماده فروالکتریک برای کاربردهای الکترواپتیکی به شمار می‌رود. ویژگی خاص ماده BTO ناهمسانگرد بودن است که در جهات انتشاری مختلفِ نور خصوصیات ماکروسکوپیک متفاوتی از خود نشان می‌دهد. ازاین‌رو پاسخ الکترواپتیکی غیرخطی ماده وابسته به ساختار کریستالی BTO است. لذا در این مقاله یک مدولاتور هیبریدی بر مبنای سیلیکون فوتونیک طرح شده است که با به‌کارگیری موجبرهای پلاسمونیکی هیبریدی جدید تلفات پایینی برای شیارهایی به باریکی ۷۰nm پرشده از ماده‌ی BTO از خود نشان می‌دهد. همچنین کوپلرهای ورودی و خروجی بهینه‌شده برای تبدیل مد فوتونیکی به مد هیبریدی در ورودی و خروجی ساختار مورداستفاده قرارگرفته‌اند.

ساختار مدولاتور پیشنهادی

مدولاتور ارائه‌شده از نوع ماخ-زندر می‌باشد که شامل دو موجبر هیبریدی پلاسمونیک-فوتونیک با قابلیت تغییر عرض شکاف W_G و کوپلرهای نوری هیبریدی در ابتدا و انتهای ساختار می‌باشد. فاصله‌ی بین مبدل‌های مدی و ریل نقره‌ی داخلی تأثیر زیادی روی تلفات کوپلینگ خواهد داشت ریل نقره‌ی میانی به سیگنال الکتریکی و ریل‌های سیلیکونی اطراف به زمین وصل می‌شوند و بدین ترتیب سیگنال الکتریکی، انتشار نور در شیارها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. . ضریب شکست نقره در طول موج1.55µm برابر 0.47+13.52i است. در اینجا یک لایه BTO به ارتفاع h_{EO} روی ساختار، که شیارها (W_G) را پر می‌کند، رسوب نشانی شده است. شکل دوبعدی ساختار در شکل۱ دیده می‌شود.



شکل ۱: ساختار مدولاتور هیبریدی پلاسمونیک- فوتونیک- BTO

با توجه به غیر همسانگرد بودن ماده‌ی BTO، ضریب شکست نوری محیط به جهت انتشار نور وابسته است. در اثر اعمال اثر پاکلز، تنسور Impermiability ماده‌ی غیر همسانگرد تحت تأثیر قرارگرفته و هرکدام از مؤلفه‌های تنسور با ضرایب پاکلز متفاوت به مؤلفه‌های میدان الکتریکی

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

وابسته می‌شوند. مقادیر مؤلفه‌های تنسور پاکلز گزارش‌شده به‌صورت جدول۱ است [۳] .

جدول ۱: اجزای تنسور پاکلز مادهی BTO

مؤلفه‌ی تنسور	مقدار مؤلفه
$r_{13} = r_{23}$	۸ ± ۲ pm/V
r_{33}	۴۰/۶ ± ۲/۵ pm/V
$r_{42} = r_{51}$	۷۳۰ ± ۱۰۰pm/v

جهت انتشار نور بر ضریب شکست نوری محیط در مواد فروالکتریک تأثیر گذاشته و بنابراین ساختار کریستالی BTO، پاسخ الکترواپتیکی غیرخطی ماده را تعیین می‌کند. بسته به جهت رشد کریستالی ماده، یک ضریب شکست و ضریب پاکلز کلی را می‌توان جایگزین کرد.

کریستال BTO یک کریستال تک‌محوری می‌باشد که اگر محورهای اصلی آن را a و b و c در نظر بگیریم ضریب شکست عادی آن برای نور پلاریزه شده در راستای محور a یا b، $n_o = 2.30$ و ضریب شکست غیرعادی برای نور پلاریزه شده در راستای محور c ، $n_e = 2.2$ خواهد بود. حال اگر محورهای اصلی کریستال را در راستای x و y و z در نظر بگیریم و موجبر ساخته‌شده در صفحه‌ی xzنسبت به محور z چرخش Φ داشته باشد، محورهای جدید x' و z' را خواهیم داشت که نور پلاریزه شده در جهت محور(x': عرض موجبر) چنین ضریب شکست و ضریب پاکلزی خواهد دید [۴]:

$$n_{x'x'}(\phi) = \left(\frac{\cos^2\phi}{n_0^2} + \frac{\sin^2\phi}{n_e^2}\right)$$

$$r_{x'x'x'}(\phi) = -\cos^2\phi\sin\phi(r_{13} + 2r_{42}) - r_{33}\sin^3\phi \qquad (۱)$$

برای لایه‌های نازک BTO شرایط کمی فرق می‌کند و بیشترین ضریب پاکلز برای زاویه‌ی $\Phi=45°$ به دست می‌آید که r_{eff} گزارش‌شده به این صورت است [۴] :

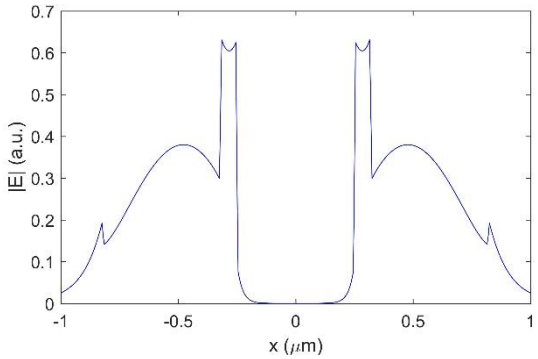
$$r_{eff} = \frac{1}{2\sqrt{2}}(r_{13} + r_{33} + 2r_{42}) \qquad (۲)$$

نتایج و بحث‌ها

پروفایل توزیع مدی حاصل از موجبر ذکرشده با استفاده از مادهی BTO پرشده در شیارها، در عرض شکاف ۷۰نانومتر استخراج شده است. این پروفایل نمودار مد هیبریدی پلاسمونیک-فوتونیکی نامیده می‌شود که از حل رابطه ۳ به صورت عددی حاصل می شود. در این رابطه، b ثابت انتشار و E(x,y) توزیع عرضی میدان الکتریکی است. شکل ۲، برشی از E(x,y) در داخل موجبر بر حسب x و در یک y ثابت است.

$$\partial^2E(x,y)/\partial X^2 + \partial^2E(x,y)/\partial y^2 + [k^2n^2(x,y) - \beta^2]E(x,y) = 0 \qquad (۳)$$

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در شیارها شاهد حبس مدی خوبی هستیم، در داخل سیلیکون نیز حبس قابل‌توجهی مشاهده می‌شود ولی در نقره هیچ نفوذ نوری نخواهیم داشت.



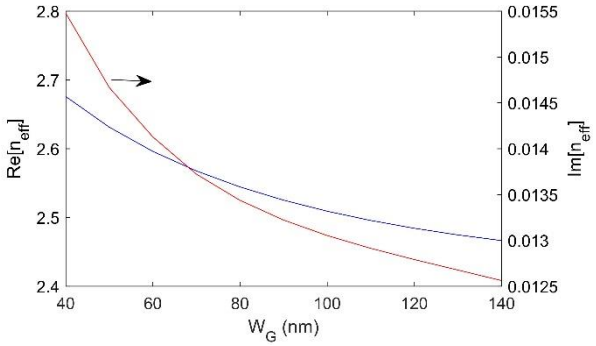
شکل ۲: پروفایل توزیع مدی

منحنی ضریب شکست مؤثر برحسب عرض موجبر را در شکل ۳ مشاهده می‌کنیم که با افزایش عرض موجبر مقدار

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

حقیقی ضریب شکست کاهش و هرچقدر حبس مد پلاسمونیکی شدیدتر باشد تلفات بیشتر می‌شود و به همین دلیل با افزایش عرض موجبر شاهد کاهش مقدار موهومی ضریب شکست هستیم .



شکل ۳: منحنی قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست مؤثر برحسب عرض موجبر

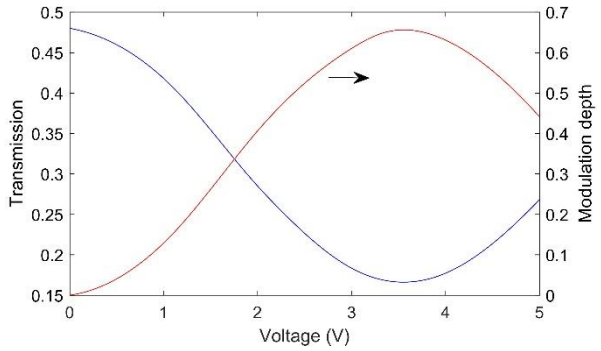
متناسب با ولتاژ اعمالی به شیارها یک میدان الکتریکی در عرض شیار بر اساس معادله‌ی $E=\frac{V}{m}$ به وجود می‌آید. این میدان الکتریکی باعث تغییر ضریب شکست به‌صورت push/pull در بازوها می‌شود :

$$n = n_0 \pm \frac{1}{2} r n_0^3 E \qquad (۴)$$

با اعمال ضریب شکست‌های متفاوت به بازوها در هر ولتاژ اعمالی، تغییر در میزان گذردهی را شاهد خواهیم بود.

شکل ۴ میزان عبور و همچنین مقدار عمق مدولاسیون را به‌طور همزمان در یک نمودار برای ساختار مدولاتور طراحی‌شده نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست میزان عبور این مدولاتور در حالت خاموش برابر با ۰/۴۸ ولت می‌باشد که این رقم تلفات الحاقی کم مدولاتور در حد ۳/۲ دسی‌بل را منجر می‌شود.

در ولتاژ ۳/۳ ولت شاهد عمق مدولاسیون خوب ٪۶۴ هستیم. همچنین همان‌طور که از شکل مشخص است میزان ولتاژ نیم موج ۳/۳ ولت است و با توجه به طول بازوی مدولاسیونی ۸ میکرومتر مقدار $U\pi \times L$ در حدود Vmm ۰/۰۲ خواهیم داشت که مقدار بسیار مطلوبی است.



شکل ۴: منحنی میزان گذردهی و عمق مدولاسیون ساختار مدولاتور هیبریدی برحسب ولتاژ اعمالی

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدولاتور هیبریدی با استفاده از ماده‌ی فروالکتریک BTO با ضریب پاکلز بالا طراحی کرده‌ایم. در نتیجه حبس مدی بالا در موجبرهای شیاری، مشخصات مطلوبی برای مدولاتور حاصل شده است که از این قرارند: طول ولتاژ نیم موج × طول ۰/۰۲Vmm، حداکثر عمق مدولاسیون در طول موج ۱/۵۵μm، ٪۶۴ و تلفات الحاقی ۳/۲dB.

مرجع‌ها

[1] Thomson, David J., et al. "50-Gb/s silicon optical modulator." IEEE Photonics Technology Letters 24.4 (2011): 234-236.

[2] Abel, Stefan, and Jean Fompeyrine. "Electro-optically active oxides on silicon for photonics." Thin Films on Silicon (Materials and Energy). Vol. 8. World Scientific, 2016. 455-501.M. Lundstrom, Fundamentals of Carrier Transport, p. 44, Cambridge University Press, 2000.

[3] Zgonik, Marko, et al. "Dielectric, elastic, piezoelectric, electro-optic, and elasto-optic tensors of BaTiO 3 crystals." Physical review B 50.9 (1994): 5941.

[4] Messner, Andreas, et al. "Plasmonic ferroelectric modulators." Journal of Lightwave Technology 37.2(2018):281-290.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

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