

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. ۱۳۹۸ 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 پلا سمونی با ریلهای نقره و سیلیکون و مبدلهای مد نوری به هیبریدی در ورودی و خروجی ساختار تشکیل شده است. مدولاتور طراحی شده "ولتاژ نیم موج ×طول" ν/۰۲ از خود نشان میدهد که در مقایسه با مدولاتورهای ماخ –زندر دیگر(سیلیکونی یا پلا سمونیکی) عدد بسیار پایینی ا ست. همچنین، علاوه بر این پارامتر مهم، طراحی ارائه شده در این مقاله اتلاف الحاقی پایینی در حد BT در بازهی طول موجی ۱/۶۵μ – ۱/۴۵ ارائه میدهد.

كليد واژه اثر پاكلز، پلاسمونيك، تيتانات باريوم، مدولاتور نورى، موجبر هيبريدى.

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 1.65μ m.

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.

مقدمه

از میان مدولاتورهای نوری، مدولاتورهای الکترواپتیکی استفاده گستردهتری در سیستمهای مخابراتی دارند. ساختار ماخ-زندري مدولاتورهاي الكترواپتيكي سرعتهاي بالاتر و محدودیت یهنای باند کمتری دارند [۱]. در این مقاله هدایت نور در موجبرهای شیاری هیبریدی انجام می شود که حبس نور بسیار بالا و تلفات پایینی دارند. تغییر ویژگیهای ساختاری مانند تغییر اندازه شیارها و فواصل کوپلرها، جنس مادهی استفاده شده در موجبر شیاری، جنس موجبرها امكان كنترل بهتر خصوصياتي مانند حبس نور، تلفات، تحمل حرارتي، ولتاژ نيم موج، عمق مدولاسيون پهنای باندی را فراهم میآورد. برای ترکیب عملکرد مدولاسیونی بالای مواد فروالکتریک با مقیاس پذیری سیلیکون فوتونیکها از سیستمهای هیبریدی سیلیکون/مادهی فروالکتریک استفاده می شود . یک راهکار مناسب برای کاهش ولتاژ نیم موج استفاده از ماده فروالكتريك با ضريب پاكلز بالاتر است. BTO به علت ضریب پاکلز بسیار قوی [۲]، پایداری حرارتی و شیمیایی خوب، امکان رشد در روی بسترهای سیلیکونی با کیفیت بلورى عالى، اميدواركننده ترين ماده فروالكتريك براى کاربردهای الکترواپتیکی به شمار میرود. ویژگی خاص ماده BTO ناهمسانگرد بودن است که در جهات انتشاری مختلف نور خصوصیات ماکروسکوپیک متفاوتی از خود نشان مىدهد. ازاينرو پاسخ الكترواپتيكى غيرخطى ماده وابسته به ساختار كريستالي BTO است. لذا در اين 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 موجBTM به ارتفاع h_{EO} روی ساختار، که شیارها (W_G) را پر میکند، رسوب نشانی شده است. شکل دوبعدی ساختار در شکل ۱ 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

وابسته میشوند. مقادیر مؤلفههای تنسور پاکلز گزارششده بهصورت جدول ۱ است [۳] .

جدول ۱: اجزای تنسور پاکلز مادهی BTO

مقدار مؤلفه	مؤلفەى تنسور
$\lambda \pm \gamma \text{ pm/V}$	$r_{13} = r_{23}$
\mathfrak{r} / $\mathfrak{s} \pm \mathfrak{r}/\mathfrak{d} \text{ pm/V}$	r33
$\vee \psi \cdot \pm \vee pm/v$	$r_{42} = r_{51}$

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 d، 2.30 $= n_0$ و ضریب شکست غیرعادی برای نور پلاریزه شده در راستای محور c ، 2.2 $=_n$ خواهد بود. حال اگر محورهای اصلی کریستال را در راستای x و y و z در نظر بگیریم و موجبر ساخته شده در صفحه ی x تسبت 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]:

$$n_{xx}(\phi) = (\frac{\cos^2 \phi}{n_0^2} + \frac{\sin^2 \phi}{n_e^2})$$

$$r_{xxx}(\phi) = -\cos^2 \phi \sin \phi (r_{13} + 2r_{42})$$

$$-r_{33} \sin^3 \phi$$
(1)

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

$$r_{eff} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(r_{13} + r_{33} + 2r_{42} \right) \tag{(Y)}$$

نتايج 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.

$$\partial^{2} E(x, y) / \partial X^{2} + \partial^{2} E(x, y) / \partial y^{2} +$$
(\vec{v})
$$[k^{2} n^{2}(x, y) - \beta^{2}] E(x, y) = 0$$

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود در شیارها شاهد حبس مدی خوبی هستیم، در داخل سیلیکون نیز حبس قابل توجهی مشاهده می شود ولی در نقره هیچ نفوذ نوری نخواهیم داشت.



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.

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 .



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

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

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 به طور همزمان در یک نمودار برای ساختار مدولاتور طراحی شده نمایش می دهد. همان گونه که از شکل پیداست میزان عبور این مدولاتور در حالت خاموش برابر با ۰/۴۸ ولت می باشد که این رقم تلفات الحاقی کم مدولاتور در حد ۳/۲ دسی بل را منجر می شود.

در ولتاژ ۳/۳ ولت شاهد عمق مدولاسیون خوب ٪۶۴ هستیم. همچنین همان طور که از شکل مشخص است میزان ولتاژ نیم موج ۳/۳ ولت است و با توجه به طول بازوی

مدولاسیونی ۸ میکرومتر مقدار L×Uπ در حدود Vmm ۰/۰۲ خواهیم داشت که مقدار بسیار مطلوبی است.



نتيجهگيري

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 شده است ۷/۰۲ حداکثر عمق مدولاسیون در طول موج Mβ۲(۱، ۹۶٪ 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. "Electrooptically 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.