بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

تحلیل و شبیه‌سازی یک مدولاتور ماخ – زندر سیلیکونی در طول‌موج مخابراتی

محمد صادق میرزایی، محمد حسین زندی، حمید رضا مشایخی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

چکیده – در این مقاله، مدولاتور ماخ – زندر سیلیکونی مبتنی بر تخلیه حامل در یک پیوند PN جانبی، جهت بهینه‌سازی عملکرد آن در طول‌موج مخابراتی ۱۳۱۰nm شبیه سازی شده است. بازده مدولاسیون ۱/۵۵V.cm و اتلاف شیفت‌دهنده فاز ۱/۸۹dB/cm در بایاس ۲V حاصل شده است. در اینجا، مصرف توان مدولاتور ۱/۰۸pJ/bit تخمین زده شده است. هم‌چنین نسبت خاموشی اندازه‌گیری شده، برای نرخ داده ۵۰Gb/s تحت یک ولتاژ پیش‌ران ۲/۳V_{pp}، ۵/۶۲dB به‌دست آمده‌اند. این نتایج به‌دست آمده، با مدولاتورهای بررسی شده در طول‌موج ۱۵۵۵nm قابل مقایسه است.

کلید واژه- مدولاتور ماخ – زندر سیلیکونی، مدولاسیون نوری، اتصالات نوری.

Analysis and Simulation of a silicon Mach-Zehnder modulator at telecommunication wavelength

Mohammad Sadegh Mirzaei, Mohammad Hossein Zandi, and Hamid Reza Mashayekhi

Department of physics, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

Abstract- In this paper, a silicon Mach-Zehnder modulator based on carrier depletion in a lateral PN junction is simulated to optimize its performance at 1310nm telecommunication wavelength. The modulation efficiency 1.55V.cm and phase shifter loss 1.89dB/cm in 2V bias are achieved. Here, the power consumption of the modulator 1.08pJ/bit is estimated. The measured extinction ratio is also obtained for the 50Gb/s data rate under a 2.3Vpp drive voltage. This results are comparable with the demonstrated modulators at 1555nm wavelength.

Keywords: Silicon Mach-Zehnder modulator, Optical modulation, Optical interconnects.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-22]

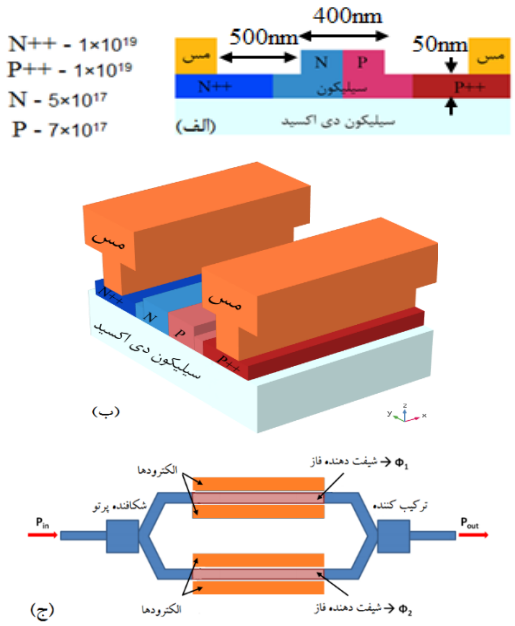
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

مدولاتورهای نوری، که خواص بنیادی یک پرتو نور را با توجه به سیگنال اطلاعات تغییر می‌دهند، برای انتقال داده بسیار مهم هستند. مدولاتورهای ماخ – زندر سیلیکونی، به‌دلیل تحمل حرارتی بالا و پهنای باند وسیع، پرکاربرد هستند [۱]. اخیرا کارهای زیادی برای توسعه مدولاتورهای ماخ – زندر تخلیه حامل در طول موج ۱۵۵۵nm انجام شده است [۴-۲]. به‌هر جهت، طول‌موج ۱۳۱۰nm به‌دلیل نقطه پاشندگی بسیار پایین، در سیستم‌های مخابراتی و به‌ویژه ارتباطات فیبر نوری قابل توجه است. نتایج کمی از این‌که سیلیکون در این پهنای طول‌موجی، مدولاسیون با سرعت بالا را نشان دهد، وجود دارد [۶-۵]. در این مقاله، مدولاتور سیلیکونی مبتنی بر تداخل سنج ماخ – زندر که در طول موج ۱۳۱۰nm عمل می‌کند، با استفاده از نرم افزار Lumerical شبیه‌سازی شده است. هم‌چنین پارامترهای کلیدی مدولاتور، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی حاصل‌شده در توافق خوبی با نتایج تجربی [۵] است، به‌طوری‌که شبیه‌سازی و طراحی انجام شده در اینجا را معتبر می‌سازد.

طراحی و روش شبیه‌سازی

شماتیک سطح مقطع شیفت دهنده فاز در شکل ۱ نشان داده شده است. این شیفت دهنده فاز مبتنی بر یک پیوند PN جانبی قرار گرفته در یک موجبر تیغه‌ای است که دارای طول ۳/۵mm با ضخامت سیلیکون بالایی فعال ۲۵۰nm و ۲μm ضخامت دی اکسید سیلیکون (SiO_2)، می‌باشد. شیفت‌دهنده فاز دارای پهنای موجبر تیغه‌ای ۴۰۰nm و ارتفاع ۱۷۰nm و ضخامت ورقه ۵۰nm است. اینجا، جهت دست‌یابی به بهترین ابعاد شیفت‌دهنده فاز، از روش صحیح – خطا استفاده شده است. با توجه به‌شکل ۱ (ب)، نواحی P++ و N++ به‌شدت آلاییده متصل‌شده به الکترودهای مس، برای اطمینان از اتصال اهمی انتخاب شده‌اند. این نواحی، ۵۰۰nm دور از پیوند PN برای به حداقل رساندن اتلاف جذبی، قرار گرفته‌اند. از طریق ساختار تداخل‌سنج ماخ – زندر، مدولاسیون فاز به مدولاسیون شدت تبدیل می‌شود. اینجا، شیفت دهنده‌های فاز در هر دو بازوی تداخل‌سنج ماخ – زندر واقع شده‌اند (شکل ۱ ج).



شکل ۱: (الف) شماتیک سطح مقطع شیفت‌دهنده فاز، (ب) نمای سه‌بعدی ساختار شیفت‌دهنده فاز، (ج) طرح فیزیکی تداخل سنج ماخ – زندر. اینجا، از موجبرهای شاخه‌ای Y به‌عنوان شکافنده پرتو و ترکیب‌گر استفاده شده است.

شبیه‌سازی شیفت‌دهنده فاز سیلیکونی، نیازمند شبیه‌سازی دستگاه نیمه‌هادی و نوری است. از شبیه‌ساز Lumerical DEVICE، برای شبیه‌سازی الکتریکی دستگاه استفاده شده است. این شبیه‌ساز معادله پواسون و معادلات پیوستگی را برای الکترون‌ها و حفره‌ها حل می‌کند. در نتیجه، توزیع الکترون ها و حفره‌ها را در سطوح غلظت ناخالصی مختلف تحت ولتاژ بایاس متفاوت محاسبه می‌کند. اثر پاشندگی پلاسما، تغییر در ضریب شکست و ضریب جذب نوری توسط حامل‌های آزاد را در یک نیمه‌هادی شرح می‌دهد. بنابراین، تغییر در غلظت حامل، به تغییر در ضریب شکست و جذب، با استفاده از روابط پاشندگی پلاسما که تغییرات ناشی از تزریق یا تخلیه حامل را در طول موج ۱۳۱۰nm ارزیابی

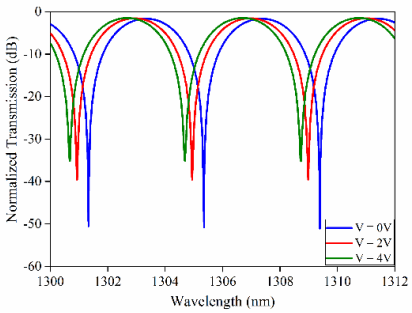
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-22]

می‌کنند[۷]، تبدیل می‌شود. در نهایت یک حل‌کننده مد نوری برای محاسبه تغییرات ضریب شکست مؤثر و تلفات نوری شیفت‌دهنده فاز در ولتاژهای بایاس مختلف استفاده می‌شود (در اینجا، انتشار موج در ساختار به صورت موج تخت فرض می‌شود).

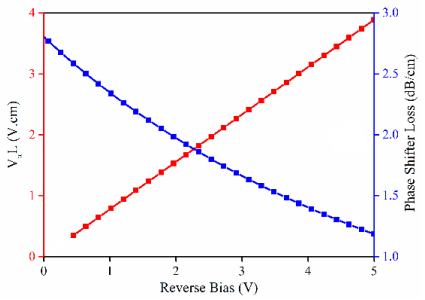
نتایج شبیه سازی و بحث

شکل ۲، طیف انتقال نوری نرمالیزه را که توسط آنالیزور شبکه نوری (ONA) اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهد. در اینجا، به منظور سادگی جهت مشخصه‌یابی نوری، تداخل‌سنج نامتقارن (اختلاف طول بین دو بازو $۱۰۰\mu m$) در نظر گرفته شده است.

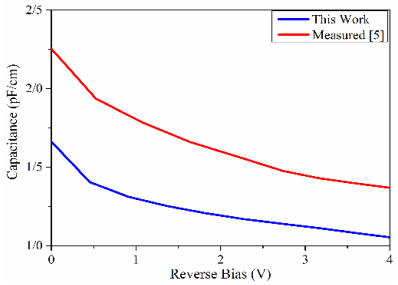


شکل ۲: طیف انتقال نوری مدولاتور به‌عنوان تابعی از طول موج به‌ازای ولتاژهای بایاس مختلف.

بیشینه انتقال نوری، نشان‌دهنده اتلاف الحاقی مدولاتور است که در اینجا، شامل تلفات موجبرهای شاخه‌ای Y (۰/۵dB) و اتلاف شیفت‌دهنده فاز (۰/۷dB) می‌شود. برای شیفت‌دهنده فاز با طول ۳/۵mm، اتلاف الحاقی برابر ۱/۷dB است که این عمدتا ناشی از تلفات جذبی در موجبر پیوند PN آلاییده است. محدوده طیفی آزاد (FSR) تداخل‌سنج ماخ – زندر نامتقارن، ۴/۰۴nm است. تغییر فاز به عنوان تابعی از بایاس معکوس از طریق رابطه‌ی $\Delta\varphi = 2\pi\Delta\lambda/FSR$ به‌دست می‌آید که $\Delta\lambda$ تغییر طول‌موج ناشی از اعمال ولتاژ بایاس معکوس است. بازده مدولاسیون نیز با استفاده از رابطه‌ی $V_\pi L = \pi V_B L_{ph}/\Delta\varphi$ حاصل می‌شود، که در آن V_B ولتاژ بایاس معکوس و L_{ph} طول شیفت‌دهنده فاز است[۲]. طبق شکل ۳، بازده مدولاسیون در ولتاژهای معکوس ۲ و ۴V، ۱/۵۵ و ۳/۱۱V.cm است. با افزایش بایاس معکوس، $V_\pi L$ افزایش می‌یابد. هم‌چنین شکل ۳، اتلاف جذبی شیفت‌دهنده فاز را تحت ولتاژهای بایاس معکوس مختلف نشان می‌دهد. اتلاف نوری مدولاتور با تغییر قسمت موهومی ضریب شکست حاصل می‌شود. با افزایش ولتاژ، غلظت حامل آزاد به‌علت تخلیه حامل، کاهش می‌یابد که باعث کاهش اتلاف جذبی شیفت‌دهنده فاز می‌شود. در بایاس معکوس $۲V$، اتلاف جذبی برابر ۱/۸۹dB/cm است. مطابق با شکل، اتلاف شیفت‌دهنده فاز با افزایش ولتاژ اعمالی، کاهش می‌یابد.



شکل ۳: بازده مدولاسیون $V_\pi L$ و اتلاف جذبی شیفت‌دهنده فاز به‌عنوان تابعی از ولتاژ بایاس معکوس.



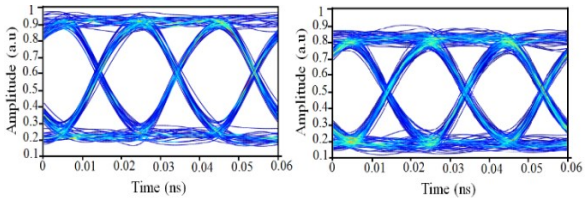
شکل ۴: تغییرات ظرفیت پیوند PN شیفت‌دهنده فاز تحت ولتاژ-های بایاس معکوس

ظرفیت پیوند، وابسته به مقادیر غلظت آلاییدگی، هندسه موجبر نوری و ولتاژ بایاس DC است. با توجه به شکل ۴، ظرفیت پیوند محاسبه شده در مقایسه با [۵]، کاهش قابل توجهی داشته است که این در این‌جا عمدتا به دلیل استفاده از مقادیر غلظت آلاییدگی پایین در ناحیه پیوند و هم‌چنین کاهش ضخامت موجبر تیغه‌ای به $۴۰۰nm$ است. پهنای باند

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-22]

$3dB$ ذاتی حاصل شده توسط $f_{3dB} = 1/(2\pi RC)$ در ولتاژهای بایاس معکوس ۲ و ۴V، برابر ۵۶GHz ($R = 69\Omega$ و $C = 0.41pF$) و ۶۴GHz ($R = 69\Omega$ و $C = 0.36pF$) است. برای تعیین عملکرد سرعت بالای مدولاتور، توانایی انتقال داده نوری آن بررسی می‌شود که این توانایی انتقال داده با محاسبه نمودار چشمی مشخص می‌شود. سیگنال نوری موج پیوسته (CW) توسط لیزر با توان ۱W قابل تنظیم ۱۳۱۰nm، با استفاده از یک شکافنده پرتو وارد مدولاتور فاز می‌شود. هم‌چنین سیگنال توالی شبه تصادفی ($PRBS$) ۵۰Gb/s از مولد الگوی پالسی NRZ با دامنه پیک تا پیک ۲/۳V_{pp} در ولتاژ بایاس معکوس ۲V به مدولاتور فاز اعمال می‌شود. سپس از طریق ترکیب‌گر سیگنال خروجی مدوله‌شده ترکیب شده و پس از تقویت آن توسط تقویت کننده الکتریکی برای آنالیز دستگاه به دیود نوری فرستاده می‌شود. آن‌گاه می‌توان نمودارهای چشمی را در خروجی محاسبه کرد. نمودارهای چشمی محاسبه‌شده (با شبیه‌سازی رفتار مدولاتور ماخ – زندر با سیگنال توالی شبه تصادفی) به‌ازای نرخ داده ۵۰Gb/s در دامنه و بایاس معکوس مختلف در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. نسبت خاموشی (ER) برای این نمودارهای چشمی، به‌ترتیب ۵/۶۲ و ۵/۲۹dB به دست آمد.



شکل ۵: نمودارهای چشمی ۵۰Gb/s. (الف) دامنه ۲/۳Vpp و بایاس معکوس ۲V، (ب) دامنه ۰/۷Vpp و بایاس معکوس ۰V.

مصرف توان، عاملی مهم برای مدولاتورهای نوری سیلیکونی است. روش معمول برای ارزیابی مصرف توان از طریق عبارت $E_{bit} = 1/2CV_{pp}^2$ [۶] است که اینجا C ظرفیت پیوند است. بنابراین مصرف توان مدولاتور به ازای ظرفیت (C) ۰/۴۱pF در ۲/۳V_{pp} برابر ۱/۰۸pJ/bit است. جدول ۱، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل‌شده از این شبیه‌سازی و پژوهش‌های قبل را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست آمده از این پژوهش و برخی از کارهای قبلی.

	طول (mm)	$V\pi L\pi$ (V.cm)	نرخ داده (Gb/s)	پهنای باند (GHz)	ER (dB)
[5]	۳	۲/۴۳	۵۰	–	۳/۴
[6]	۱	۱/۱۵	۲۵	۳۰	۵
این پژوهش	۳/۵	۱/۵۵	۵۰	۵۶	۵/۶۲

نتیجه گیری

در این مقاله، به بهینه‌سازی عملکرد مدولاتور ماخ – زندر سیلیکونی با طراحی پیوند PN جانبی در طول موج ۱۳۱۰nm پرداخته شد. علیرغم اثر پاشندگی پلاسما ضعیف‌تر در این طول‌موج، این نتایج با نتایج به‌دست آمده در طول‌موج ۱۵۵۵nm قابل مقایسه است. نسبت خاموشی بالایی (۱/۵۵V.cm) به‌ازای یک دامنه پیک تا پیک پایین حاصل گردید. هم‌چنین با توجه به بازده مدولاسیون بالا و مصرف توان پایین، این مدولاتور سازگار با فرآیند CMOS خواهد بود. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در تطابق با نتایج تجربی هستند.

مرجع‌ها

[1] P. Dong et al, “Silicon photonic devices and integrated circuits,” Nanophotonics 3, 215–228, 2014.

[2] A. Liu et al, “High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide,” Opt. Express 15 (2), 660-668, 2007.

[3] Félix Rosa et al, "Design of a carrier-depletion Mach-Zehnder modulator in 250 nm silicon-on-insulator technology", 2017.

[4] J. Ding et al, “Ultra-lowpower carrier-depletion Mach-Zehnder silicon optical modulator,” Opt. Express 20(7), 7081–7087, 2012.

[5] M. Streshinsky et al, “Low power 50 gb/s silicon traveling wave mach-zehnder modulator near 1300 nm,” Opt. Express 21, 30350–30357, 2013.

[6] D. Perez-Galacho et al., "Low voltage 25Gbps silicon Mach- Zehnder modulator in the O-band," Optics Express, vol. 25, no. 10, pp. 11217 -11222, 2017.

[7] R. Soref and B. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," *IEEE journal of quantum electronics,* vol. 23, no. 1, pp. 123-129,1987.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-22]