



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



## تحلیل و شبیه‌سازی یک مدولاتور ماخ - زندر سیلیکونی در طول موج 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 طول موج مخابراتی ۱۳۱۰nm شبیه سازی شده است. بازده مدولاسیون ۱/۵۵V.cm و اتلاف شیفتهنده 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 ۲/۳Vpp، ۵/۶۲dB به دست آمده‌اند. این نتایج به دست آمده، با مدولاتورهای بررسی شده در طول موج 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.

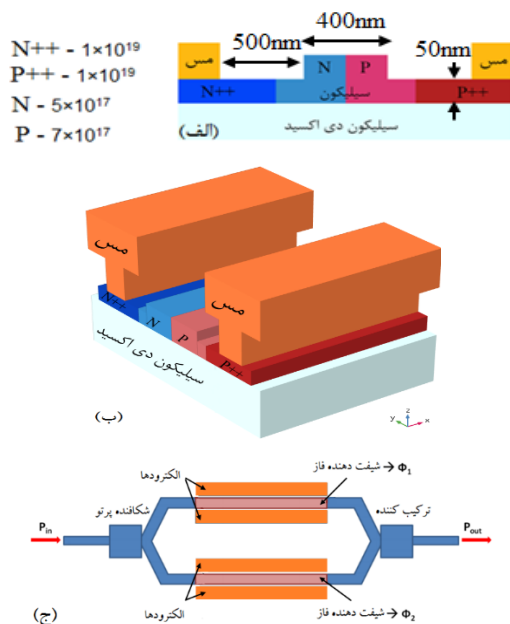
## مقدمه

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، به دلیل تحمل حرارتی بالا و پهنای باند وسیع، پرکاربرد هستند [۱]. اخیراً کارهای زیادی برای توسعه مدولاتورهای ماخ - زندر تخلیه حامل در طول موج ۱۵۵۵nm انجام شده است [۲-۴]. به هر جهت، طول موج ۱۳۱۰nm به دلیل نقطه پاشندگی بسیار پایین، در سیستم‌های مخابراتی و به ویژه ارتباطات فیبر نوری قابل توجه است. نتایج کمی از این که سیلیکون در این پهنای طول موجی، مدولاسیون با سرعت بالا را نشان دهد، وجود دارد [۵-۶]. در این مقاله، مدولاتور سیلیکونی مبتنی بر تداخل سنج ماخ - زندر که در طول موج ۱۳۱۰nm عمل می‌کند، با استفاده از نرم افزار Lumerical شبیه سازی شده است. همچنین پارامترهای کلیدی مدولاتور، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه سازی حاصل شده در توافق خوبی با نتایج تجربی [۵] است، به طوری که شبیه سازی و طراحی انجام شده در اینجا را معتبر می‌سازد.

## طراحی و روش شبیه سازی

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 تیغه ای است که دارای طول ۳/۵mm با ضخامت سیلیکون بالایی فعال ۲۵۰nm و ۲μm ضخامت دی اکسید سیلیکون (SiO<sub>2</sub>)، می‌باشد. شیفت دهنده فاز دارای پهنای موجبر تیغه ای ۴۰۰nm و ارتفاع ۱۷۰nm و ضخامت ورقه ۵۰nm است. اینجا، جهت دستیابی به بهترین ابعاد شیفت دهنده فاز، از روش صحیح - خطا استفاده شده است. با توجه به شکل ۱ (ب)، نواحی P++ و N++ به شدت آلایده متصل شده به الکترودهای مس، برای اطمینان از اتصال اهمی انتخاب شده‌اند. این

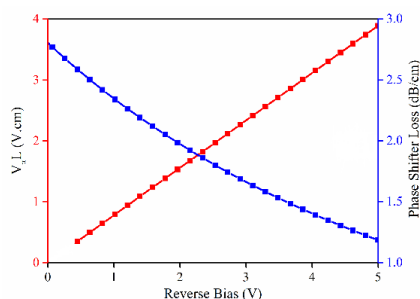
نواحی، ۵۰۰nm دور از پیوند PN برای به حداقل رساندن اتلاف جذبی، قرار گرفته‌اند. از طریق ساختار تداخل سنج ماخ - زندر، مدولاسیون فاز به مدولاسیون شدت تبدیل می‌شود. اینجا، شیفت دهنده های فاز در هر دو بازوی تداخل سنج ماخ - زندر واقع شده‌اند (شکل ۱ ج).



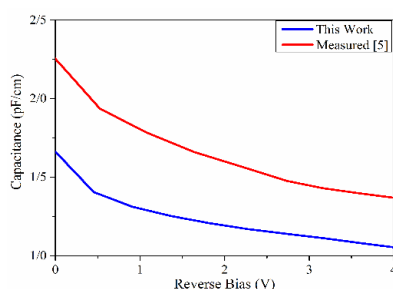
شکل ۱: (الف) شماتیک سطح مقطع شیفت دهنده فاز، (ب) نمای سه بعدی ساختار شیفت دهنده فاز، (ج) طرح فیزیکی تداخل سنج ماخ - زندر. اینجا، از موجبرهای شاخه ای Y به عنوان شکافنده پرتو و ترکیب گر استفاده شده است.

شبیه سازی شیفت دهنده فاز سیلیکونی، نیازمند شبیه سازی دستگاه نیمه هادی و نوری است. از شبیه ساز Lumerical DEVICE، برای شبیه سازی الکتریکی دستگاه استفاده شده است. این شبیه ساز معادله پواسون و معادلات پیوستگی را برای الکترون ها و حفره ها حل می‌کند. در نتیجه، توزیع الکترون ها و حفره ها را در سطوح غلظت ناخالصی مختلف تحت ولتاژ بایاس متفاوت محاسبه می‌کند. اثر پاشندگی پلاسما، تغییر در ضریب شکست و ضریب جذب نوری توسط حامل های آزاد را در یک نیمه هادی 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

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 به علت 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 به عنوان تابعی از ولتاژ بایاس معکوس.



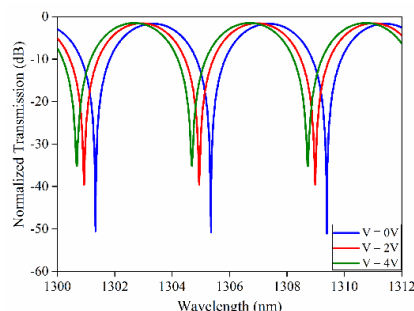
شکل ۴: تغییرات ظرفیت پیوند PN شیفت‌دهنده فاز تحت ولتاژ-های بایاس معکوس

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 این جا عمدتاً به دلیل استفاده از مقادیر غلظت آلاییدگی پایین در ناحیه پیوند و همچنین کاهش ضخامت موجبر تیغه‌ای به ۴۰۰nm است. پهنای باند

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  $100\mu m$ ) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: طیف انتقال نوری مدولاتور به عنوان تابعی از طول موج به ازای 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 عمدتاً 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  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta\lambda/FSR$  به دست می‌آید که  $\Delta\lambda$  تغییر طول موج 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

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.

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

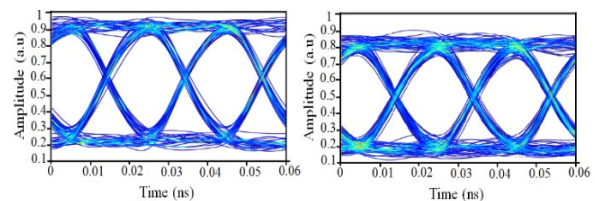
### نتیجه گیری

در این مقاله، به بهینه‌سازی عملکرد مدولاتور ماخ - زندر سیلیکونی با طراحی پیوند  $PN$  جانبی در طول موج  $1310\text{ nm}$  پرداخته شد. علیرغم اثر پاشندگی پلاسما ضعیف‌تر در این طول‌موج، این نتایج با نتایج به‌دست آمده در طول موج  $1555\text{ nm}$  قابل مقایسه است. نسبت خاموشی بالایی ( $1/55\text{ V.cm}$ ) 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.

$3\text{ dB}$  ذاتی حاصل شده توسط  $f_{3\text{dB}} = 1/(2\pi RC)$  در ولتاژهای بایاس معکوس ۲ و ۴V، برابر  $56\text{ GHz}$  ( $R = 69\Omega$ ) و  $64\text{ GHz}$  ( $R = 69\Omega$  و  $C = 0.41\text{ pF}$ ) و  $64\text{ GHz}$  ( $R = 69\Omega$  و  $C = 0.36\text{ pF}$ ) 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  $1\text{ W}$  قابل تنظیم  $1310\text{ nm}$ ، با استفاده از یک شکافنده پرتو وارد مدولاتور فاز می‌شود. هم‌چنین سیگنال توالی شبه تصادفی  $50\text{ Gb/s}$  ( $PRBS$ ) از مولد الگوی پالسی  $NRZ$  با دامنه پیک تا پیک  $2/3\text{ V}_{pp}$  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  $50\text{ Gb/s}$  در دامنه و بایاس معکوس مختلف در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. نسبت خاموشی ( $ER$ ) برای این نمودارهای چشمی، به‌ترتیب  $5/62$  و  $5/29\text{ dB}$  به دست آمد.



شکل ۵: نمودارهای چشمی  $50\text{ Gb/s}$ . (الف) دامنه  $2/3\text{ Vpp}$  و بایاس معکوس  $0.7\text{ V}$ . (ب) دامنه  $0.7\text{ Vpp}$  و بایاس معکوس  $2\text{ V}$ .

مصرف توان، عاملی مهم برای مدولاتورهای نوری سیلیکونی است. روش معمول برای ارزیابی مصرف توان از طریق عبارت  $E_{\text{bit}} = 1/2CV_{pp}^2$  [۶] است که اینجا  $C$  ظرفیت پیوند است. بنابراین مصرف توان مدولاتور به ازای ظرفیت ( $C$ )  $0.41\text{ pF}$  در  $2/3\text{ Vpp}$  برابر  $1/0.8\text{ pJ/bit}$  است. جدول ۱،