

بررسی و مقایسه پارامترهای اتصالات نوری با اتصالات الکتریکی در مدولاتورها و آشکارسازهای نوری درون تراشه

صمد شکوهی^۱، دکتر رضا سروری^۲، دکتر کامبیز جمشیدی^۳

^۱ دانشجوی فارغ التحصیل کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی شریف، Samadben9125@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، Sarvari@sharif.edu

^۳ استاد گروه قطعات فوتونیک مجتمع، دانشگاه فنی درسدن آلمان Kambiz.Jamshidi@tu-dresden.de

چکیده

در این مقاله دو نوع سیستم اتصالات الکتریکی به صورت خط انتقال نزدیک به سرعت نور و اتصالات نوری درون تراشه را برای پارامترهای مهم تاخیر و توان مصرفی بر حسب طول اتصالات در گره تکنولوژی ۲۲ نانومتر CMOS را مقایسه می‌کنیم و طول بحرانی را برای پارامترهای تاخیر و توان مصرفی بدست می‌آوریم. با این مقایسه می‌توان مشاهده کرد که تاخیر در سیستم اتصالات الکتریکی با روش خط انتقال نزدیک به سرعت نور حتی در طول‌های بزرگ و خارج از تراشه می‌تواند کمتر از اتصالات نوری باشد، اما توان مصرفی در اتصالات نوری درون تراشه در طول‌های بزرگتر از طول بحرانی کمتر از اتصالات الکتریکی حتی در حالت بهینه توان است. همچنین با مقایسه پارامترهای مختلف انواع ساختارهای مدولاتورهای الکتروشکست (تزریق بار و تخلیه بار) و انواع مدولاتورهای الکتروچند و همچنین با مقایسه پارامترهای انواع آشکارسازهای نوری بهترین پیشنهاد برای مدولاتور و آشکارساز نوری برای کار درون تراشه را ارائه می‌دهیم.

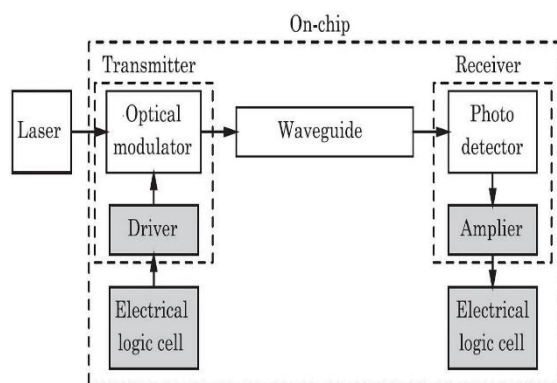
کلید واژه

اتصالات نوری، اتصالات الکتریکی، آشکارساز نوری، توان مصرفی، مدولاتور نوری.

مقدمه

۱- سیستم اتصالات نوری

سیستم OI درون تراشه از منبع نور خارج از تراشه، موجبر نوری، فرستنده و گیرنده نوری مطابق شکل (۱) تشکیل می‌شود.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم اتصالات نوری درون تراشه. [۲]

با پیشرفت تکنولوژی و کاهش گره تکنولوژی درون مدارهای مجتمع و افزایش تعداد ترانزیستورهای درون تراشه بنا به قانون مور [۱]، پیچیدگی‌ها و اتصالات درونی تراشه بیشتر شده و باعث محدودیت فرکانس ساعت می‌شود. پارامترهای توان مصرفی و تاخیر برای اتصالات الکتریکی^۱ (EI) مخصوصاً در لایه اتصالات سراسری^۲ برای ارسال داده به دلیل طول زیاد سیم‌ها مقدار بزرگی دارند که با کاهش گره تکنولوژی و عرض سیم این شرایط بدتر می‌شود. یک راه حل استفاده از سیستم اتصالات نوری^۳ (OI) و راه حل دیگر استفاده از سیستم EI با بافر و با روش خط انتقال نزدیک به سرعت نور^۴ (NSOLT) است. در ادامه ابتدا سیستم OI و اجزای آن را با جدولهایی که از بررسی مقالات مختلف جمع آوری شده برای کار در سیستم OI درون تراشه معرفی می‌کنیم. سپس سیستم EI با روش NSOLT را معرفی می‌کنیم و در نهایت پارامترهای تاخیر و توان مصرفی بر حسب طول سیم را برای دو سیستم مقایسه می‌کنیم.

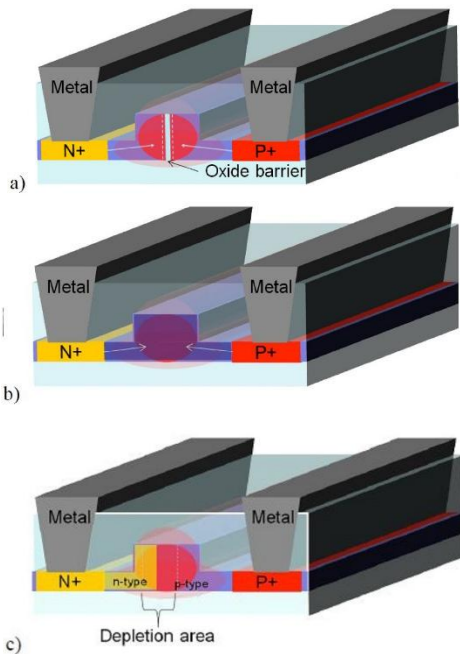
^۱ Electrical Interconnect (EI)

^۲ Global Interconnect

^۳ Optical Interconnect (OI)

^۴ Near Speed of Light Transmission (NSOLT)

مخابرات نوری از ۱۳۱۰ تا ۱۵۵۰ نانومتر اثر پاکلز وجود ندارد و اثر کر بسیار ضعیف است. یک راه حل اثر پاشندگی پلاسمایی حامل آزاد است که در این اثر تغییرات غلظت حامل‌های آزاد (الکترون‌ها و حفره‌ها) موجب تغییرات ضرایب شکست و جذب در سیلیکون کریستالی می‌شود. [۶] در مدولاتورهای ER مطابق شکل (۲) سه ساختار الکتریکی مهم از جمله تجمع بار (با ساختار خازن MOS)، تزریق بار (با ساختار دیود pin با بایاس مستقیم) و تخلیه بار (با ساختار پیوند pn با بایاس معکوس) برای ناحیه اکتیو وجود دارد که از درهم کنش این ناحیه با حالت نوری موجبر نوری مدولاسیون فاز ایجاد می‌شود. [۷]



شکل ۲: سه ساختار الکتریکی ناحیه فعال مدولاتورهای الکتروشکست برای درهم کنش با حالت نوری موجبر سیلیکونی: (a) ساختار تجمع بار که از یک لایه نازک SiO_2 برای جداسازی دو نیمه موجبر سیلیکونی از هم به صورت خازن MOS استفاده می‌شود. (b) ساختار تزریق بار به صورت دیود pin است که نواحی شدید دوپ شده n, p توسط ناحیه ذاتی موجبر از هم جدا می‌شود و با اعمال ولتاژ بایاس مستقیم الکترون‌ها و حفره‌های آزاد به ناحیه ذاتی تزریق می‌شود. (c) ساختار تخلیه بار به صورت پیوند pn که نواحی n, p با غلظت کم درون موجبر نوری ساخته شده و با اعمال بایاس معکوس ناحیه تخلیه پیوند بزرگتر می‌شود. [۷]

مدولاتورهای ER با مدولاسیون فاز در گیرنده نیاز به مدارات آشکارساز پیچیده‌ای دارد، توسط دو ساختار که در ادامه معرفی میشود مدولاسیون فاز به مدولاسیون دامنه تبدیل می‌شود: ۱- ساختار میکروحلقة رزونانسی MRR^{14} از نوع فیلتر تمام گذر برای کاربرد مدولاتور مطابق شکل (۳) از ساختاری با دو

در فرستنده مدار راه انداز^۵ و مدولاتور نوری برای مدوله کردن داده مورد نظر بر روی دامنه یا فاز نور ارسالی بکار می‌رود، سپس توسط موجبر نوری داده از فرستنده به گیرنده منتقل می‌شود و در گیرنده نور ارسالی توسط آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود و داده ارسالی مورد نظر با مدار تقویت کننده و مبدل جریان به ولتاژ بازیابی می‌شود. [۲]

۲- فرستنده نوری و انواع مدولاتورهای نوری

فرستنده سیستم OI باید توان مصرفی و سطح اشغال شده روی تراشه^۶ کمینه، سرعت و عمق مدولاسیون بیشینه و همینطور تحمل حرارتی و عرض طیف نوری عملیاتی قابل قبول و سازگار با تکنولوژی CMOS^۷ داشته باشد. منبع نور (معمولا لیزر) اگر خارج از تراشه قرار گیرد باعث کاهش توان مصرفی ناشی از گرمای منبع نور درون تراشه می‌شود. [۳]

نور ورودی از منبع لیزر خارج از تراشه، توسط موجبر نوری یا فضای آزاد وارد مدولاتور نوری می‌شود و داده بر روی دامنه یا فاز و یا پلاریزاسیون نور کدگذاری می‌شود. در سیستم OI برای انتقال سیگنال دیجیتال از مدولاسیون دامنه بصورت کلیدزنی روشن و خاموش^۸ (OOK) استفاده می‌شود چون مدارات آشکارساز و کدگشایی ساده‌تری در طرف گیرنده دارد. [۴]

تغییرات خصوصیات نوری ماده مدولاتور بر اثر اعمال میدان الکتریکی را اثر الکترواپتیک^۹ می‌نامند و چون ضریب شکست ماده به صورت عدد مختلط $N = n + ik$ است، اگر بر اثر اعمال میدان الکتریکی ضریب شکست حقیقی ماده تغییر کند، آن را مدولاتور الکتروشکست^{۱۰} (ER) و اگر ضریب جذب ماده که متناسب با ضریب موهومی (k) ضریب شکست هست تغییر کند، آن را مدولاتور الکترواجذب^{۱۱} (EA) می‌نامند. همچنین اگر تغییرات ضریب شکست ماده با میدان الکتریکی اعمالی بر آن رابطه خطی داشته باشد آن را اثر پاکلز^{۱۲} و اگر با توان دوم آن رابطه داشته باشد آن را اثر کر^{۱۳} می‌نامند. [۵] در سیستم OI مدولاتور باید سازگار با تکنولوژی CMOS سیلیکونی باشد و بهتر است از جنس سیلیکون انتخاب شود، اما در سیلیکون کریستالی در حالت معمولی برای محدوده طول موج‌های

^۵ Driver Circuit

^۶ Footprint

^۷ Complementary Metal Oxide Circuit (CMOS)

^۸ On-Off Keying

^۹ Electrooptic (EO)

^{۱۰} Electro-Refractive (ER)

^{۱۱} Electro-Absorptive (EA)

^{۱۲} Pockels Effect

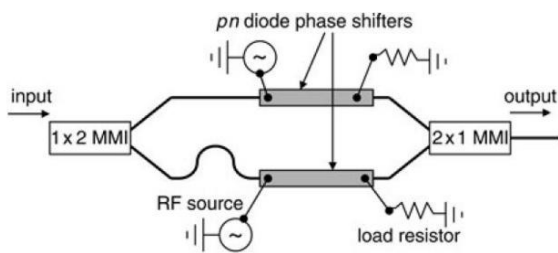
^{۱۳} Kerr Effect

^{۱۴} Micro Ring Resonator(MRR)

می‌شود. که در این رابطه FSR^{16} رنج طیف آزاد است که در مدولاتور MRR توسط فاصله بین دو طول موج رزونانس و در مدولاتور MZI توسط اختلاف طول دو بازو و بین دو تداخل سازنده است با رابطه (۲) بیان می‌شود. در این روابط L طول شیفت دهنده فاز، λ طول موج نور ورودی، n_g ضریب شکست گروه است. [۱۱]، [۱۲]

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta\lambda}{FSR} = \frac{2\pi.L}{\lambda} \Delta n_{eff}, \quad \Delta\lambda = \Delta n_{eff} \cdot \frac{\lambda}{n_g} \quad (1)$$

$$FSR(\Delta\lambda) = \frac{\lambda^2}{n_g.L} \quad (2)$$

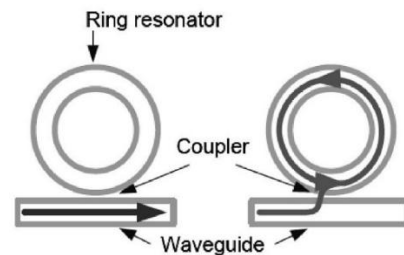


شکل ۴: ساختار مدولاتور MZI سیلیکونی با ناحیه اکتیو نوع تخلیه بار روی بازوهای نامتقارن. [۱۰]

در مدولاتورهای الکترومغناطیسی جذب ماده با اعمال میدان الکتریکی تغییر می‌کند، مهمترین نوع آن مدولاتور EA با اثر FKE^{۱۷} است که در بدنه نیمه هادی رخ می‌دهد. در اثر FKE با اعمال بایاس معکوس مقدار انرژی شکاف (E_g) نیمه هادی کاهش می‌یابد و باعث افزایش لبه جذب نور (λ_g) طبق رابطه (۳) می‌شود، در این رابطه C سرعت نور و h ثابت پلانک است، بطوریکه تا $\lambda < \lambda_g$ نور جذب می‌شود و برای $\lambda > \lambda_g$ ضریب جذب به طور شدیدی کاهش می‌یابد. در حالت روشن بودن با اعمال ولتاژ معکوس کم یا صفر، ماده در طول موج خاصی ضریب جذب کوچکی داشته و نور با اطلاعات مدوله شده روی دامنه خودش ارسال می‌شود اما در حالت خاموش بودن با اعمال ولتاژ معکوس بزرگ مقدار ضریب جذب افزایش یافته و نور مدوله شده نمی‌تواند در طول موج مورد نظر ارسال شود و بدین ترتیب مدولاتور الکترومغناطیسی با اثر FKE بصورت مدولاسیون دامنه کار می‌کند و نیازی به ساختارهای MRR و MZI ندارد. معمولاً مدولاتورهای EA از جنس Ge یا GeSi انتخاب می‌شود چون سیلیکون فقط تا ۱۱۰۰ نانو متر نور را جذب می‌کند. [۱۳]

$$\lambda_g(\mu m) = \frac{h.c}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (3)$$

موجبر نوری حلقه و مستقیم و از یک خروجی تشکیل شده است در این ساختار نور توسط پدیده بازتابش کلی داخلی درون موجبر دی الکتریک محدود می‌شود. [۸] برای کاربرد مدولاتور ناحیه اکتیو که در شکل (۲) انواع آن بیان شد، درون موجبر حلقه قرار می‌گیرد. در حالت خاموش بودن رزونانس، داده نوری ارسالی بدون کوپل شدن در حلقه از موجبر مستقیم عبور می‌کند و در حالت روشن بودن رزونانس، داده نور ارسالی به طور کامل از موجبر باس به موجبر حلقه کوپل می‌شود و ارسال سیگنال نوری در شرایط رزونانس نوری (که محیط حلقه ضریب صحیحی از طول موج نور ورودی است) افت می‌کند و به این ترتیب مدولاتور MRR در طول موج رزونانس همانند کلید روشن و خاموش عمل می‌کند. ایراد اصلی این ساختار کوچک بودن پهنای باند عملیاتی به دلیل مقدار ضریب کیفیت بزرگ موجبر حلقه و مقدار ضریب ترموپتیک بزرگ سیلیکون است، که این باعث وابستگی شدید طول موج رزونانس به تغییرات دما می‌شود پس مدولاتور MRR نیاز به پایداری حرارتی دارد. [۹]



شکل ۳: ساختار مدولاتور MRR و بررسی دو حالت روشن (شکل سمت راست) و خاموش بودن (شکل سمت چپ) رزونانس. [۸]

ساختار MZI^{۱۵} با بازوهای نامتقارن مطابق شکل (۴) است که ناحیه اکتیو روی بازوهای MZI قرار می‌گیرد. اگر در خروجی MZI دو موج نوری با هم تداخل مخرب داشته باشد و دارای اختلاف فاز صفر باشد ($\Delta\Phi=0$) ارسال نوری صفر و اگر با هم تداخل سازنده داشته باشد ($\Delta\Phi=\pi$) ارسال نوری یک می‌شود. اما به دلیل ضریب الکتروپتیک ضعیف سیلیکون دستیابی به ($\Delta\Phi=\pi$) یا نیازمند طول زیاد و یا ولتاژ سوینگ بزرگ است که در هر دو حالت توان مصرفی مدولاتور افزایش می‌یابد. [۱۰] در مدولاتور الکترومغناطیسی با اعمال بایاس به ناحیه اکتیو باعث تغییر غلظت بارها و بنا به اثر پاشندگی پلاسمایی باعث تغییر ضریب شکست سیلیکون می‌شود در نتیجه تغییرات ضریب شکست حالت موجبر (Δn_{eff}) باعث تغییر فاز نور ارسالی ($\Delta\Phi$) و ایجاد مدولاسیون فاز بنا به رابطه (۱)

^{۱۶} Free Spectral Range (FSR)

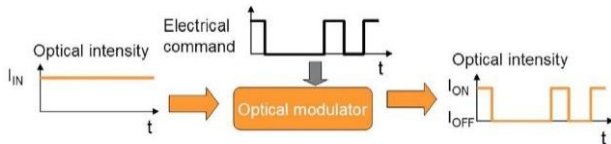
^{۱۷} Franz-Keldysh Effect (FKE)

^{۱۵} Mach-Zehnder Interferometer (MZI)

۱-۲. مقایسه پارامترهای انواع مدولاتورهای نوری

می‌شود. مقدار ER برای کاربردهای OI باید بزرگتر از 4dB باشد تا این مقدار برای مسافت طولانی ارسال باعث کاهش نرخ خطای بیت و بهبود حساسیت در گیرنده شود. همچنین IL یک نوع تلف پسیو هست که شامل تلفات کوپلینگ مد نوری، تلف جذب و بازتابش نور می‌شود. همچنین مقادیر ER و IL دینامیکی از طریق دیگرام چشمی محاسبه می‌شود. [۱۶]

$$ER = 10 \log \frac{I_{ON}}{I_{OFF}}, \quad IL = 10 \log \frac{I_{ON}}{I_{IN}} \quad (5)$$



شکل ۵: اصول عملکرد مدولاتور الکترواپتیک. [16]

۴-راندمان مدولاسیون^{۲۴} (ME) برای مدولاتور فاز بصورت شیفت طول موج رزونانس بر اثر ولتاژ اعمالی ($ME = \frac{\Delta\lambda}{\Delta V}$) محاسبه می‌شود که با توجه به رابطه (۶) با پارامتر $V_{\pi}L_{\pi}$ که در واقع ولتاژ مورد نیاز برای دستیابی به شیفت فاز π در طول یک سانتی متر را بیان می‌کند رابطه عکس دارد که پارامتر L برای MRR طول محیط حلقه و برای MZI طول بازوی شیفت دهنده است.

$$V_{\pi} \cdot L_{\pi} = \frac{L \cdot FSR}{2 \cdot ME} \quad (6)$$

۵-سرعت مدولاسیون توسط مقدار پارامتر (f_{3dB}) الکترواپتیک یا فرکانسی که در آن مدولاسیون به ۵۰ درصد مقدار بیشینه خود رسیده، تعیین می‌شود. مطابق رابطه (۷) f_{3dB-EO} توسط ثابت زمانی $\tau_{RC}=RC$ محدود می‌شود و در مدولاتور MRR علاوه بر f_{RC} توسط طول عمر فوتون در حلقه (τ_{cav}) با f_Q هم محدود می‌شود. مقدار f_Q طبق رابطه (۸) متناسب با تلف نوری (α) در موجبر حلقه است، در این روابط λ طول موج رزونانس، C سرعت نور و Q ضریب کیفیت حلقه می‌باشد. [۱۱]

$$\frac{1}{f_{3dB}^2} = \frac{1}{f_Q^2} + \frac{1}{f_{RC}^2} = (2\pi\tau_{cav} + 2\pi\tau_{RC}) \quad (7)$$

$$f_Q = \frac{1}{2\pi\tau_{cav}} = \frac{c}{\lambda \cdot Q} = \frac{c \cdot \alpha}{\pi \cdot n_g}, \quad \tau_{cav} = \frac{\lambda \cdot Q}{2\pi \cdot c} \quad (8)$$

دیگر پارامترهای جدول (۱) شعاع حلقه برای مدولاتور MRR، طول شیفت دهنده فاز (L_{ps}) برای مدولاتور MZI، مساحت مورد نیاز مدولاتور (Footprint)، پهنای باند نوری، ولتاژ سوپینگ (V_{pp})، ولتاژ بایاس DC، ابعاد موجبر در ناحیه اکتیو و غلظت دوپینگ است. پس از معرفی پارامترهای استفاده شده

پارامترهای مختلف انواع مدولاتورهای ER و EA در ساختارهای مختلف را در جدول (۱) با هم مقایسه کرده تا بهترین ساختار را برای استفاده در سیستم OI درون تراشه پیدا کنیم. ابتدا پارامترهای مورد بررسی در جدول (۱) را معرفی می‌کنیم. ۱-نرخ ارسال بیت^{۱۸} (BR) یا عکس عرض پالس از طریق دیگرام چشمی محاسبه می‌شود و برای سیگنال NRZ^{۱۹} تعریف می‌شود بطوریکه این سیگنال از بیت‌های شبه تصادفی متوالی^{۲۰} (PRBS) با تعداد $N=2K-1$ بیت (K طول سری بیت ها) تشکیل شده است.

۲-توان مصرفی مدولاتور بصورت مجموع توان مصرفی دینامیکی، استاتیکی و توان تنظیم است. که توان دینامیکی حاصل ضرب مقدار انرژی دینامیکی مصرفی هر بیت^{۲۱} (E_{bit}) در مقدار BR است که اگر مدولاتور در مدل فشرده شده همانند خازن بار راه‌اندازی شود، توان مصرفی دینامیکی برای شارژ و دشارژ خازن با ولتاژ سوپینگ اعمالی (V_{pp}) طبق رابطه (۴) بیان می‌شود که ضریب یک چهارم بیانگر انتقال بین بیت‌های یک و صفر با احتمال یک چهارم برای کل بیت‌های PRBS است. [۱۴]

$$\frac{\text{Power consumption}}{\text{bit Rate}} = E_{bit} = \frac{C \cdot V_{pp}^2}{4} \quad (4)$$

مقدار توان استاتیکی از ضرب جریان گذرنده در ولتاژ بایاس اعمالی به مدولاتور بدست می‌آید که در مدولاتور تزریق بار از جریان نفوذ دیود pin در ولتاژ بایاس مستقیم اعمالی و در مدولاتور الکتروجدب از ضرب جریان نوری در ولتاژ بایاس معکوس اعمالی بدست می‌آید، در مدولاتور تخلیه بار با پیوند pn این نوع توان که از ضرب جریان نشستی در بایاس معکوس اعمالی بدست می‌آید مقدار کوچکی داشته و قابل صرفنظر کردن است. همچنین برای مدولاتورهای با ساختار MRR توان تنظیم طول موج رزونانس بر اثر تغییرات دما (P_{tune}) هم در نظر گرفته می‌شود، همچنین بازده تنظیم کننده (η_{tune}) که در واقع توان مورد نیاز برای تنظیم طول موج در FSR است و تغییرات طول موج بر اثر تنظیم کننده ($\Delta\lambda_{tune}$) هم در نظر گرفته می‌شود. [۱۵]

۳- پارامتر ER^{۲۲} و IL^{۲۳} یا توان تلف نوری درونی مدولاتور در حالت روشن بودن مطابق شکل (۵) با رابطه (۵) محاسبه

^{۱۸} BitRate(BR)

^{۱۹} Non-Return Zero(NRZ)

^{۲۰} Pseudo Random Bit Sequence (PRBS)

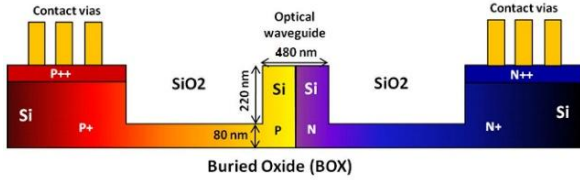
^{۲۱} Energy per bit (E_{bit})

^{۲۲} Extinction Ratio(ER)

^{۲۳} Insertion Loss(IL)

^{۲۴} Modulation Efficiency(ME)

بالای موجبر حلقه قرار می‌گیرد که مقدار راندمان تنظیم در مورد [17] از مدولاتور تخلیه بار با پیوند pn افقی و متقارن در ساختار MRR مطابق شکل (۶) استفاده می‌شود. این مدولاتور به علت شعاع کوچک حلقه موجبر، مقدار خازن پیوند C_j کوچکی داشته و در نتیجه مقدار E_{bit} دینامیکی کوچکی دارد. این ساختار می‌تواند با $BR=40\text{Gb/s}$ و $V_{pp}=2\text{V}$ دارای $ER=7\text{dB}$ باشد و با $V_{bias}=-1\text{V}$ به مقدار $f_{3\text{dB}}=28\text{GHz}$ خوبی دست یابد. برای جبران شعاع کوچک که منجر به افزایش ضریب کیفیت حلقه می‌شود، مقدار دوپینگ پیوند pn زیاد انتخاب می‌شود. همچنین در این ساختار به دلیل پهنای باند نوری نازک، تنظیم کننده حرارتی بصورت مقاومت حرارتی در

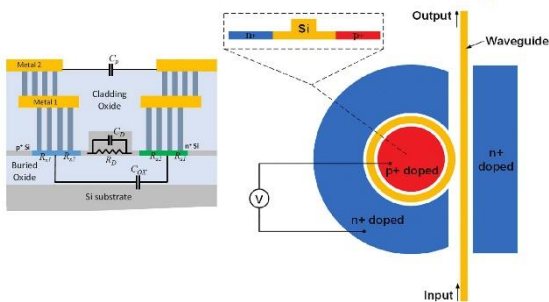


شکل ۶: سطح مقطع موجبر حلقه با پیوند Pn افقی و متقارن [17]

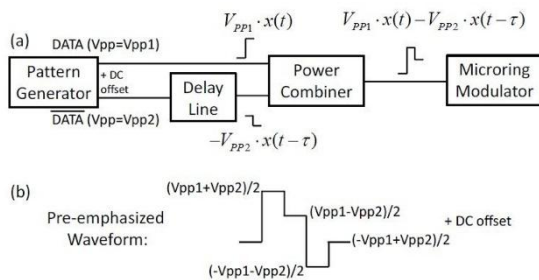
جدول ۱: مقایسه پارامترهای مهم انواع مدولاتورهای EA و ER

Ref & Year	[17] (2012)	[18] (2013)	[19] (2012)	[20] (2015)	[22] (2016)
Structure Modulator	ER-MRR	ER-MZI	ER-MRR	ER-MRR	EA-FKE
Principle modulation	Carrier Depletion	Carrier Depletion	Carrier Depletion	Carrier Injection	Pin-Lateral Evanescent Coupling
λ_{in} (nm)	1536.31	1558	1574.33	1318.8	1610
$E_{bit-dynamic}$ (fJ/bit)	22	3.5×10^3	66	-	12.8
Bitrate (Gb/s)	40	60	25	20	56
$P_{dynamic}$ (mW)	0.88	210	1.65	-	0.716
P_{static} (mW)	-	-	-	1.6	1.2
ER/ IL _(Dynamic) (dB)	7.04/ -	3.6/1.6	4.5/ -	9/ 1.3	3.3/ -
P_{tune} (mW)/ η_{Tune} (nm/mW)	30.1/ 0.12	-	-	-	-
$f_{3\text{dB-EO}}$ (GHz)	28	27.8	11.8	10.9	50
$f_{RC-Electrical}$ (GHz)	90.4	-	41	-	-
τ_{RC} (ps)	1.76	-	3.88	-	1.76
C_j (fF)/ R_s (Ω)	22/ 80	-/-	66/60	-/-	12.8/138
C_D (fF)/ R_D (Ω)	-/-	-/--	-/-	25 / 6.42×10^3	-/-
$f_{Q-optical}$ (GHz)	48.25	-	13.6	19	-
τ_{cav} (ps)/ Q-Ring	3.3/ 4000	-	-/ 14500	8.4/ 12000	-
V_{pp} (V)/ V_{bias} (V)	2 (-2,0)/ -1	6.5/ -5	2 (-2,0)/ -1	1.6/ 0.86	2(-2,0) /-1
ER(dB)/ IL(dB)	7/ 5	- / 1.9	>20/ 10	18/ -	4.6/ 4.9
$V_{\pi-L_{\pi}}$ (V.cm)/ ME (Pm/V)	- /28	2.05/-	1.64/24.3	-/560	-/-
Optical BW(nm)	0.38	28	-	-	23(1607-1630)
Ring Radius(μm)	5	-	30	5	-
L_{ps} (mm)/ Length MD(μm)	-/ 31.4	0.75	-	-	-/ 10
WG_R Width(nm)	480	450	500	450	600
WG_R Height(nm)	300	340	250	250	350
WG_R hslab (nm)	80	80	50	50	-
Doping Concentration (cm^{-3})	4×10^{18} (n,p)	2×10^{17} (n,p)	2×10^{17} (p) 4×10^{17} (n)	3×10^{19} (n ⁺ , P ⁺)	5×10^{17} (i) 10^{19} (n,p)
Active area (μm^2)/ Footprint (μm^2)	-	-	-	-	6/ 35

و C_D مقاومت و خازن دیود pin ، C_p خازن بین الکترودها، C_{ox} خازن لایه Box^{25} و R_S مقاومت سری به دلیل نواحی سیلیکون دوپ شده است. این مورد هر چند مقدار ER ، ME بالایی دارد اما در حالت راهاندازی با مدولاسیون NRZ سرعت خیلی پایینی دارد که برای جبران سرعت آن و جدا کردن زمانهای صعود و افت از هم از نوع راهاندازی پیش تاکید $Pre-emphasis^{26}$ مطابق شکل (۱۰) استفاده می‌شود. که در این نوع راه اندازی دو سیگنال NRZ با اختلاف بایاس DC و ایجاد تاخیر τ بین دو سیگنال در $Power combine$ با هم ترکیب شده و سیگنال پیش تاکید را که همچون یک فیلتر با پاسخ ضربه محدود هست را ایجاد می‌کند، این نوع راهاندازی مقدار توان مصرفی راه انداز را افزایش می‌دهد. ایراد اصلی مدولاتورهای تزریق بار نسبت به تخلیه بار وجود توان استاتیکی بایاس است که در مدولاتورهای تخلیه بار ناچیز بود. همچنین مدولاتورهای تزریق بار به دلیل خازن بزرگ پیوند، مقدار E_{bit} دینامیکی بزرگی دارد.



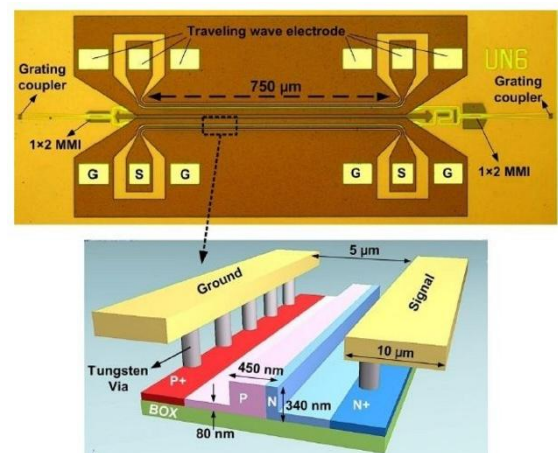
شکل ۹: مدولاتور MRR تزریق بار با مدار معادل سیگنال کوچک آن. [21]



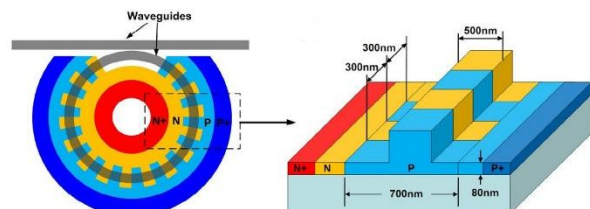
شکل ۱۰: نحوه ساخت سیگنال راهاندازی $Pre-emphasis$. [۲۰]

مدولاتور الکتروجدب با اثر FKE یا دارای ساختار pin افقی 27 ($LPIN$) و یا عمودی 28 ($VPIN$) است و نحوه کوپلینگ نور از موجبر سیلیکونی به مدولاتور EA یا بصورت اتصال لب به لب و یا بصورت اتصال از نوع محو شونده 29 است. که در حالت محوشونده طول کوپلینگ بزرگی دارد و سرعت قطعه به دلیل

در مورد [۱۸] از مدولاتور تخلیه بار با پیوند pn نامتقارن با آفست ۵۰ نانومتر به سمت ناحیه n در ساختار MZI مطابق شکل (۷) استفاده می‌شود. این مدولاتور مقدار BR خیلی بالایی نزدیک 60Gb/s دارد. از پیوند نامتقارن pn به این دلیل که بنا به اثر پاشندگی پلاسمایی حامل آزاد [۶] تغییرات چگالی بار حفره بیشتر از الکترون منجر به تغییرات ضریب شکست سیلیکونی می‌شود استفاده شده و در نتیجه راندمان مدولاسیون بیشتری از حالت پیوند pn متقارن دارد، این ساختار مقدار ER بزرگ و IL کم و $V_{\pi}L_{\pi}$ خوبی دارد، با اینکه این ساختار دارای L_{ps} کوچکی هست اما ولتاژ سوئینگ بالا و مقدار E_{bit} خیلی بزرگی دارد که در مقایسه با ساختار MRR مناسب کار در سیستم OI نیست. در مورد [۱۹] از مدولاتور MRR تخلیه بار با پیوند pn با ساختار بین انگشتی مطابق شکل (۸) استفاده می‌شود. در ساختار بین انگشتی برخلاف نوع افقی که پیوند pn بصورت موازی با موجبر حلقه قرار می‌گیرد، در این حالت موجبر حلقه بر چندین ناحیه متوالی و متناوب pn عمود است و در نتیجه باعث افزایش هم پوشانی بین حالت نوری و ناحیه تخلیه بار شده و مقدار ME بهتری از حالت افقی دارد. اما ایراد اصلی این ساختار افزایش خازن تخلیه بار و در نتیجه افزایش مقدار E_{bit} دینامیکی است.



شکل ۷: ساختار مدولاتور MZI از نوع تخلیه بار. [۱۸]



شکل ۸: ساختار مدولاتور MRR با پیوند pn متناوب از نوع بین

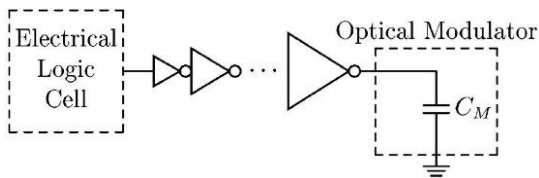
انگشتی. [19]

در مورد [۲۰] از مدولاتور تزریق بار MRR با ساختار الکتریکی دیود pin مطابق شکل (۹) استفاده می‌شود. که در این شکل R_D

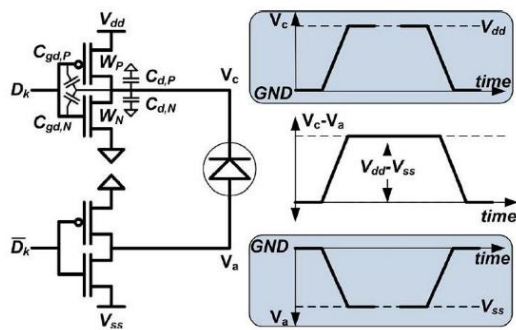
²⁵ Buried Oxide (Box)
²⁶ Pre-emphasis Driver
²⁷ Lateral PIN (LPIN)
²⁸ Vertical PIN (VPIN)
²⁹ Evanescent

هم و دو گیت معکوس کننده یک راه حل برای این مشکل است، بطوریکه با اعمال ولتاژ کوچک در هر معکوس کننده می توان از مجموع دو سطح ولتاژ خروجی، ولتاژ سوینگ بزرگی ایجاد کرد. سائز این راه انداز به مقدار خازن مدولاتور و در نتیجه به توان مصرفی راه انداز بستگی دارد. [۲۳] تاخیر در فرستنده سیستم OI به خازن مدولاتور نوری و مدار راه انداز بستگی دارد که برای مورد شکل (۱۲) با رابطه (۹) محاسبه می شود، که N_{opt} تعداد بهینه بافرها، C_M خازن مدولاتور، C_0 خازن ورودی کمینه سائز بافر، u_{opt} کمینه سائز بافر و تاخیر کمینه سائز بافر است. توان مصرفی کل فرستنده از مجموع توان استاتیکی و دینامیکی و تنظیم مدولاتور و توان مصرفی راه انداز تشکیل می شود. [۲۴]

$$t_{tx} = N_{opt} \cdot u_{opt} \cdot \tau_r, N_{opt} = \frac{\ln \frac{C_M}{C_0}}{\ln 3.6} \quad (9)$$



شکل ۱۲: مدار معادل فرستنده OI متشکل از مدار راه انداز بصورت زنجیره های از گیت های معکوس کننده با سائز نمایی افزایشی و مدولاتور نوری. [۲]

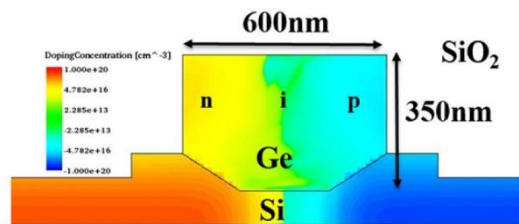


شکل ۱۳: مدار راه انداز معکوس کننده کش واکنشی برای اعمال ولتاژ سوینگ به مدولاتور. [۲۳]

۳- معرفی اجزای گیرنده نوری و آشکارساز نوری

در سیستم OI مدار گیرنده نوری از PD، مدار مبدل جریان نوری به ولتاژ و تقویت کننده ولتاژ تشکیل شده و وظیفه بازیابی داده ارسالی از فرستنده را بر عهده دارد. برای PD در سیستم OI درون تراشه باید بطور همزمان پارامترهای f_{3dB} و پاسخ پذیری (R) بزرگ و جریان تاریک $(I_d)^{22}$ پایینی داشته

ثابت زمانی RC بزرگ محدود می شود اما برای اینکه حالت نوری بطور کامل در مدولاتور کوپل شود باید ساختار LPIN انتخاب شود. در مورد [۲۲] مطابق شکل (۱۱) مدولاتور Ge-EA با اثر FKE دارای ساختار LPIN و کوپلینگ محوشونده موجبر Si به مدولاتور EA است. این ساختار با $V_{pp}=2V$ و $V_b=-1V$ و به دلیل ابعاد کوچک، مقدار خازن کوچکی در حدود $C_j=12.8fF$ و مقدار $E_{bit}=12.8fJ/bit$ دینامیکی خیلی کمی دارد، بطوریکه در $BR=56Gb/s$ مقدار $ER=3.3dB$ و $P_{dynamic}=0.716mW$ دارد، این مدولاتور توان استاتیکی بایاس به مقدار $1.2mW$ دارد که این توان به مقدار جریان روشن خاموش شدن یا همان جریان نوری $(I_{ph})^{20}$ بستگی دارد که I_{ph} بصورت $I_{ph} = R \cdot P_{in}$ تعریف می شود که R پاسخ پذیری^{۲۱} ماده و P_{in} توان ورودی نور می باشد. پس مدولاتورهای EA برخلاف مدولاتورهای ER با ساختار MRR دارای پهنای باند نوری بزرگی هستند و نیازی به تنظیم کننده طول موج و افزوده شدن توان استاتیکی تنظیم ندارند. هر چند برخلاف مدولاتور نوع تخلیه بار، توان استاتیکی بایاس به توان کل این مدولاتور افزوده می شود و ایراد اصلی مدولاتورهای EA مقدار IL بزرگ است، اما به دلیل توان مصرفی پایین و کار در سرعت خیلی بالا یکی از گزینه های پیشنهادی برای سیستم OI درون تراشه است.



شکل ۱۱: سطح مقطع مدولاتور الکترو جذب Ge با ساختار pin افقی به صورت مجتمع با SOI. [۲۲]

۲-۲. انواع مدارات راه انداز

برای اعمال ولتاژ سوینگ به مدولاتور نوری نیاز به مدارات راه انداز است. که مطابق شکل (۱۲) ساده ترین نوع آن زنجیره های از گیت های معکوس کننده با سائز نمایی افزایشی است که برای راه اندازی مدولاتور با خازن کوچک استفاده می شود. [۲] همچنین برای مدولاتورهای EA و ER تخلیه بار که نیاز به V_{pp} بزرگتر دارد، نمی توان از معکوس کننده ساده برای دستیابی به ER قابل قبول استفاده کرد، چون با پیشرفت تکنولوژی برای سازگاری قطعه با CMOS ولتاژ V_{dd} ترانزیستورها کوچک و در حدود 1V است. مدار راه انداز معکوسی کش واکنشی^{۲۲} مطابق شکل (۱۳) با دو ورودی مکمل

^{۲۰} Photocurrent (I_{ph})

^{۲۱} Responsivity (R)

^{۲۲} Push-pull Inverter

^{۲۳} Dark Current (I_d)

۲- پارامتر پاسخ پذیری (R) طبق رابطه (۱۲) بیان میشود که پارامتر η_{ext} نسبت تعداد حامل‌های جمع شده توسط الکترودها بر کل تعداد فوتون‌های ورودی را بیان می‌کند، h ثابت پلانک، c سرعت نور، e الکترون، λ طول موج نور ورودی، P_{in} توان نور ورودی و I_{ph} جریان نوری تولید شده از حامل‌های تولید شده به دلیل جذب فوتون است. همچنین مقدار R در طول موجهای خیلی بالا به دلیل کاهش ضریب جذب (α) و افزایش عمق نفوذ فوتون ($\delta = \frac{1}{\alpha}$) و عبور فوتون از ناحیه تخلیه و همچنین در طول موجهای خیلی پایین به دلیل افزایش ضریب جذب و کاهش عمق نفوذ فوتون و عدم رسیدن فوتون به ناحیه تخلیه، مقدار خیلی کمی دارد. [۵]

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in}}, \quad R = \eta_{ext} \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (12)$$

۳- پارامتر جریان تاریک (I_d) مقدار جریانی را که وقتی نوری به PD نتابد و از قطعه بگذرد را نشان می‌دهد. این پارامتر تابعی از ولتاژ بایاس معکوس اعمالی، دما، نقص‌های خطی و سطحی در هنگام رشد Ge روی Si و مساحت PD است و با افزایش ولتاژ معکوس (منفی‌تر شدن)، I_d افزایش می‌یابد. [۵]

۴- توان مصرفی در PD فقط شامل توان استاتیکی بایاس است که طبق رابطه (۱۳) بیان می‌شود که در آن V_b مقدار ولتاژ بایاس اعمالی است و این رابطه نشان می‌دهد که اگر I_d در PD مقدار بزرگی داشته باشد باعث افزایش توان استاتیکی می‌شود.

$$P_{detector} = \frac{V_b(I_{ph} + I_{dark})}{2} \quad (13)$$

نحوه کوپل شدن نور از موجبر نوری به PD به دو صورت انجام می‌گیرد یا بصورت تابش معمولی است و در این حالت به دلیل اینکه مسیر جذب نور هم راستا با مسیر تخلیه حامل‌ها است نمی‌توان همزمان به مقادیر f_{3dB} و R بزرگی دست یافت، چون هر چه عرض ناحیه تخلیه بزرگتر باشد شانس بیشتری برای جذب فوتون و افزایش R دارد اما این موجب طولانی شدن زمان انتقال و کاهش سرعت قطعه می‌شود و بالعکس اگر عرض ناحیه تخلیه برای افزایش سرعت کوچک انتخاب شود مقدار R و در نتیجه I_{ph} کاهش می‌یابد. یک راه حل مهم استفاده از موجبرهای مجتمع با PD یا WGPD^{۲۷} هست، در این ساختار مسیر جذب فوتون بر مسیر جمع آوری حامل‌ها عمود می‌شود و همزمان می‌توان به PD با سرعت و R بالایی دست یافت. برای ساختار WGPD مطابق شکل (۱۵) دو نوع ساختار کوپلینگ محوشونده از زیر^{۲۸} و کوپلینگ لب به لب^{۲۹} بیشتر بکار می‌رود. [۲۸], [۲۹]

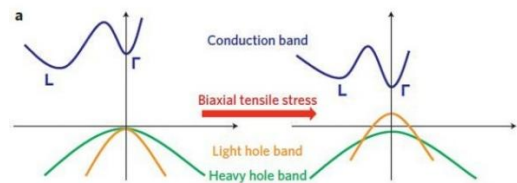
باشد. سیلیکون ماده مناسبی برای استفاده در PD در طول موجهای مخابرات نوری نیست، پس از Ge با انرژی شکاف غیر مستقیم ($E_g=0.66eV$) در ساخت PD استفاده می‌شود. مطابق شکل (۱۴) با استفاده از اثر فشار کششی^{۳۴} میتوان Ge را از یک ماده با انرژی شکاف غیرمستقیم در دره L به ماده با انرژی شکاف مستقیم ($E_g=0.8eV$) در دره Γ تبدیل کرد که موجب می‌شود PD بتواند نور تا طول موجهای بالای 1600nm را جذب کند. [۲۵]

۳-۱. مقایسه پارامترهای انواع آشکارسازهای نوری

۱- پارامتر f_{3dB} در PD طبق رابطه (۱۰) با زمان RC و زمان انتقال حامل‌ها تعیین می‌شود، که زمان انتقال زمانی است که حامل‌های تولید شده از جذب فوتون (زوج الکترون و حفره^{۳۵} (EHP)) توسط اعمال میدان الکتریکی با اعمال ولتاژ بایاس معکوس و پدیده رانش از ناحیه تخلیه خارج شده و به سمت الکترودها می‌رود. در رابطه (۱۰) پارامتر V_{sat} سرعت اشباع حامل و W_{Ge} عرض لایه ذاتی PD در PIN افقی (LPIN) و یا ضخامت لایه ذاتی PD در PIN عمودی (VPIN) و در PD از نوع MSM^{۳۶} فاصله بین دو الکترودها است. پاسخ زمانی (T_r) و تاخیر زمانی (T_D) در PD که با رابطه (۱۱) بیان می‌شود. [۲۶], [۲۷]

$$\frac{1}{f_{3dB}^2} = \frac{1}{f_{RC}^2} + \frac{1}{f_{transit}^2} = \frac{1}{2\pi RC} + \frac{0.44 V_{sat}}{W_{Ge}} \quad (10)$$

$$T_r = \sqrt{T_{tr}^2 + T_{RC}^2}, T_D = 0.315 T_r, f_{3dB} = \frac{0.35}{T_r} \quad (11)$$

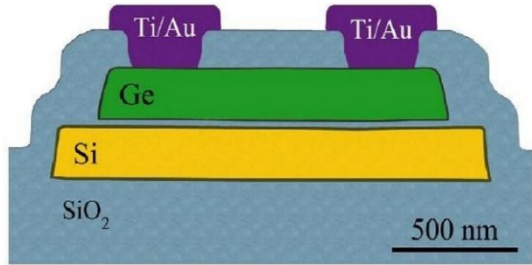


شکل ۱۴: اثر فشار کششی روی انرژی شکاف مستقیم و غیرمستقیم نیمه هادی ژرمانیوم. [25]

^{۲۷} Waveguide Photodetector(WGPD)
^{۲۸} Bottom Evanescent Coupling

^{۳۴} Tensile Strain
^{۳۵} Electron-Hole Pair (EHP)
^{۳۶} Metal-Semiconductor-Metal(MSM)

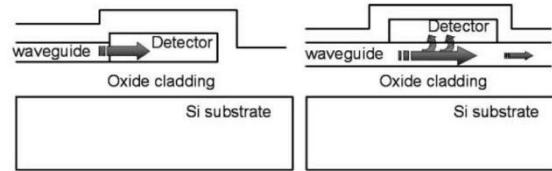
زمان انتقال حامل‌های تولید شده از نور را کم و موجب افزایش f_{3dB} می‌شود، در این ساختار عرض الکترودها $W=350nm$ و فاصله بین الکترودها $t=600nm$ است و اشکال اصلی این ساختار مقدار I_d بزرگی است.



شکل ۱۷: ساختار MSM PD از جنس ژرمانیوم بصورت مجتمع با موجبر سیلیکونی. [۳۱]

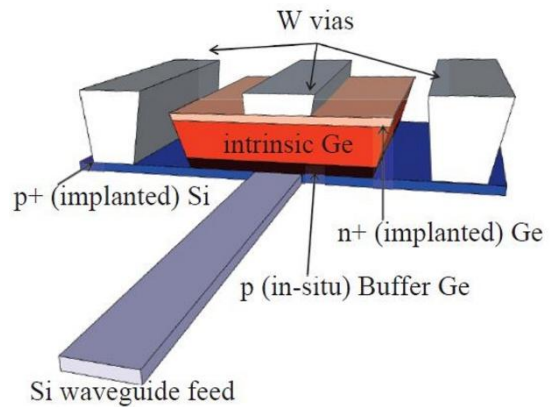
در مورد [۳۲] از نوع APD^{*} بصورت مجتمع با موجبر Si و با اتصالات بین انگشتی MSM مطابق شکل (۱۸) استفاده می‌شود، که توسط نوار نازک SiON، لایه نازک Ge که عمل آشکارسازی نور را انجام داده و میدان الکتریکی بزرگی دارد را از موجبر Si جدا می‌کند تا از نفوذ ناخواسته و آهسته حامل‌های تولید شده از فوتون در نواحی دورتر از ناحیه میدان قوی جلوگیری کند، بنابراین سرعت قطعه افزایش یافته و نویز کاهش می‌یابد. دلیل استفاده از اتصالات MSM توزیع غیریکنواخت میدان الکتریکی است، بطوریکه در نزدیکی نواحی اتصالات یک ناحیه با حجم کوچک در حدود 30nm از لبه اتصالات، دارای میدان بسیار قوی با یونیزاسیون شدید برای تقویت‌کنندگی بهمینی استفاده می‌شود و جذب نور و تولید EHP در ناحیه بین اتصالات رخ می‌دهد. با فاصله کم اتصالات در حدود $t=200nm$ و با ولتاژ کم $V_b=-1.5V$ ، به مقدار $f_{3dB}=35GHz$ و ضریب بهمینی $M=9.3$ بزرگی می‌رسد و در $\lambda=1550nm$ مقدار $R=0.15A/w$ برای ناحیه تقویت‌کنندگی و برای ناحیه بهمینی مقدار $M.R=9.3*0.15A/W$ دارد، این ساختار دارای خازن کوچک اما مقدار I_d بزرگی است. در مورد [۳۳] مطابق شکل (۱۹) از Ge-PD با ساختار Si-LPIN استفاده می‌شود که اتصالات فلزی از جنس Si هستند و نور موجبر Si توسط مخروط پلی سیلیکونی که در بالای موجبر قرار دارد به GePD روی SOI کوپل می‌شود، این ساختار به دلیل ضخامت نازک ناحیه Ge خازن کوچک و سرعت بالایی در حدود $f_{3dB}=67GHz$ برای $V_b=-1V$ و $\lambda=1550nm$ دارد، همچنین چشم دیگرام این قطعه برای $BR=56Gb/s$ در محدوده طول موج مخابرات نوری باز می‌ماند.

* Avalanche Photodetector (APD)



شکل ۱۵: دو نوع روش کوپلینگ موجبر نوری به آشکارساز نوری: شکل سمت راست (Bottom Coupling) و سمت چپ (Butt Coupling). [۲۹]

با کمک جدول (۲) پارامترهای مختلف انواع آشکارسازهای نوری را بررسی کرده و بهترین گزینه‌ها را برای سیستم OI درون تراشه پیشنهاد می‌دهیم. در مورد [۳۰] مطابق شکل (۱۶) موجبر Si با روش کوپلینگ محوشونده Bottom با GePD با ساختار VPIN مجتمع می‌شود. این ساختار با ضخامت لایه ذاتی $t_{i-GePD}=0.6nm$ و $\lambda=1550nm$ و در $V_b=-1V$ بر اساس تغییرات عرض و طول PD در چهار حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد، که با توجه به نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود اگر سطح مقطع PD کاهش یابد، خازن و I_d کاهش و f_{3dB} افزایش می‌یابد. همچنین افزایش طول قطعه PD باعث افزایش طول جذب قطعه و مقدار پارامتر R شده اما همچنین باعث افزایش نویز و مقدار I_d و افزایش P_{static} می‌شود.



شکل ۱۶: ساختار Ge nip-PD که با روش کوپلینگ Bottom بطور مجتمع با موجبر سیلیکونی. [۳۰]

در مورد [۳۱] مطابق شکل (۱۷) GePD نوع MSM با روش کوپلینگ Bottom با موجبر سیلیکونی مجتمع شده، بررسی می‌شود. در این ساختار لایه Ge کریستالی با لایه نازک اکسید سیلیکون از موجبر سیلیکونی جدا می‌شود تا از نفوذ حامل‌های تولید شده در Ge به موجبر سیلیکونی جلوگیری کند، همچنین به دلیل میدان قوی درون ناحیه تخلیه در فاصله بین دو الکترودها و هم‌پوشانی آن با موجبر نوری مقدار R بزرگی داشته و

* Butt-Coupling

جدول ۲: مقایسه پارامترهای مختلف آشکارسازهای MSM، PIN، APD و PDهای مجتمع با موجبر

Ref & Year	[30] (2011)				[31] (2008)	[32] (2010)	[33] (2016)	[34] (2011)	
Type of GePD	WG Pin				WG MSM	WG MSM APD	WG Si-LPIN	WG Pin	
Type of pin junction	Vertical				-	-	Lateral	Vertical	
Type of coupling	Bottom				Bottom	Bottom	Bottom	Bottom	
λ_{in} (nm)	1550				-	1550	1550	1550	
R(A/W)	0.8	0.86	0.97	1.04	1	0.14*9	0.74	1.05	0.95
$P_{detector}$ (mW)	0.15	-	-	-	-	-	0.074	0.031	0.028
Bitrate (Gb/s)	40	-	-	-	40@-5V	40	56	-	40
f_{3dB} (GHz)	45	32	33	14	50	35	67	20	36
$C_{detector}$ (fF)	1.2	19.2	5	80	2.4	10	6.8	32	8.5
T_r (ps)	7.5	10.9	10.6	25	8.8	10	5.2	17.5	8.75
Delay (ps)	2.36	3.43	3.33	7.8	2.7	3.15	2.6	5.51	2.75
V_b (V)	-1				-5	-1.5	-1	-1	
I_{ph} (μ A)	300	-	-	-	-	-	148	63	57
I_{dark} (nA)	3	70	165	1510	4000@-5V	$1*10^5$	2.5	11	2.6
Width PD(μ m)	1.3	1.3	5.3	5.3	1.6	0.75	0.5	6	1.6
Thickness i-Ge PD(μ m)	0.6				0.26	0.14	0.16	0.9	0.5
Length PD(μ m)	4	64	4	64	30	10	14.2	10	
Active Area PD(μ m ²)	4.2	83.2	21.2	339.2	48	1.4	7.1	60	16
Electrode spacing MS (nm)	-	-	-	-	600	200	-	-	
Width Electrode(μ m)	-	-	-	-	0.35	-	-	-	

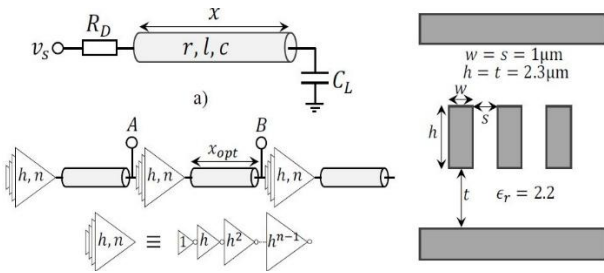
در مدار گیرنده مطابق شکل (۲۱) پس از PD احتیاج به تبدیل جریان نوری به ولتاژ و تقویت کننده ولتاژ برای دستیابی به داده ارسالی از سمت فرستنده دارد که متداولترین نوع مدار گیرنده، مدار TIA^{41} با فیدبک موازی است. تاخیر در کل مدار گیرنده با رابطه (۱۴) بیان می شود که مجموع تاخیر PD طبق رابطه (۱۰) و تاخیر TIA است. تاخیر TIA به پهنای باند مدار و در نتیجه به مجموع خازن PD و خازن ورودی TIA وابسته است، که با کاهش خازن PD و افزایش P_{in} کاهش می یابد. توان مصرفی در مدار گیرنده مجموع توان مصرفی دینامیکی و استاتیکی مدار گیرنده و توان استاتیکی بایاس PD است. [۲۴]، [۲]

$$t_{rx} = T_D + T_{TIA} = 0.315T_r + \frac{0.693}{2\pi\Delta f} \quad (14)$$

در مورد [۳۴] مطابق شکل (۲۰) موجبر Si بصورت کوپلینگ از نوع Bottom به GePD با ساختار VPIN کوپل می شود. در این مورد با دو روش افزایش ضخامت PD و افزایش تعداد اتصالات فلزی و کاهش عرض اتصالات در بالای لایه n-Ge می توان مقدار R و جذب نور را در طول ثابت و بدون کاهش چشمگیر f_{3dB} افزایش داد. چون افزایش ضخامت لایه ذاتی t_{i-Ge} باعث کاهش هم پوشانی مد نوری با اتصال فلزی شده و در نتیجه جذب نور توسط فلز کاهش یافته و بیشتر نور توسط لایه ذاتی Ge جذب می شود، پس علاوه بر دو برابر شدن تعداد اتصالات فلزی عرض این اتصالات کاهش می یابد. در جدول (۲) در حالت اول برای عرض PD کم در حدود $1.6\mu m$ فقط یک اتصال فلزی با عرض $1\mu m$ در بالای GePD قرار داشته و دارای $t_{i-Ge} = 0.5\mu m$ است و در حالت دوم عرض و ضخامت PD به ترتیب به مقادیر $6\mu m$ و $0.9\mu m$ افزایش یافته و دو اتصال فلزی هر کدام با عرض $0.6\mu m$ در بالای GePD قرار دارد. که برای حالت دوم مقدار R افزایش یافته اما به دلیل افزایش ابعاد مقادیر I_d و خازن افزایش یافته و در نتیجه مقدار f_{3dB} کاهش می یابد.

⁴¹ Transimpedance Amplifier(TIA)

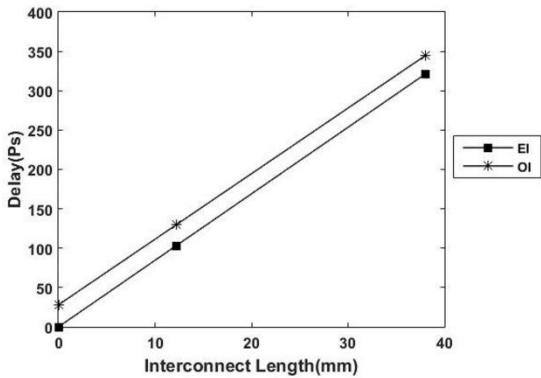
بافرهای مخروطی با سایز نمایی افزایشی برای بهینه کردن مقدار تاخیر استفاده می‌شود. در این سیستم x طول کل سیم، x_{opt} فاصله بهینه بین بافرها، n تعداد و h سایز بافرهای مخروطی هست. با شرط اینکه مقدار مقاومت ورودی مدار راهانداز (R_D) از سه برابر امپدانس مشخصه خط انتقال ($Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$) کوچکتر باشد، مقدار x_{opt} را برای کاهش تاخیر انتخاب می‌کنیم، بطوریکه با این روش تاخیر کل سیم ضریب کوچکی از زمان پرواز T_F^{42} می‌شود. این نوع سیستم EI را NSOLT می‌نامند. [۳۵]



شکل ۲۲: (a) خط انتقال RLC با خازن بار. (b) ساختار بافرهای مخروطی با سایز نمایی افزایشی. (c) سطح مقطع سیم‌های لایه سراسری [۳۵]

۵- مقایسه پارامتر تاخیر بین EI و OI

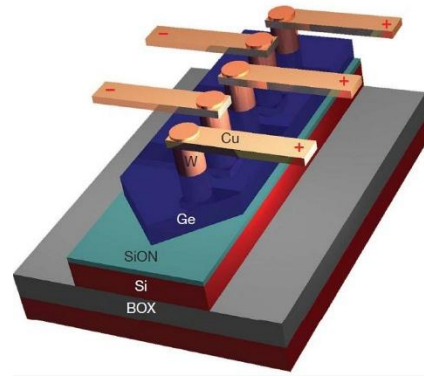
در شکل (۲۳) تاخیر دو سیستم EI و OI بر حسب طول سیم اتصالات و در نود تکنولوژی 22nm-CMOS مقایسه می‌شود.



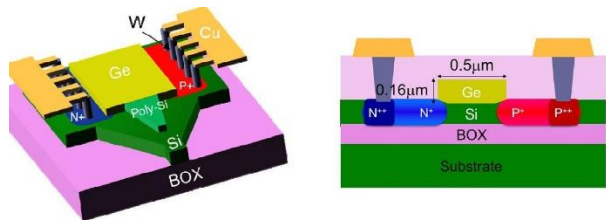
شکل ۲۳: مقایسه تاخیر سیستم OI با موجبر سیلیکونی و EI به روش NSOLT در نود تکنولوژی 22nm CMOS بر حسب طول اتصالات. [۲۷]

برای سیستم EI با روش NSOLT و با $h=3$ و $n=6$ و $x_{opt}=12.2\text{mm}$ می‌توان به $\tau_{AB}=1.71T_F$ دست یافت که با $T_F=x\sqrt{LC}=60.31\text{ps}$ مقدار تاخیر سیم در طول x_{opt} برابر $\tau_{AB}=103.13\text{ps}$ و مقدار تاخیر کل سیم برابر T_{total}

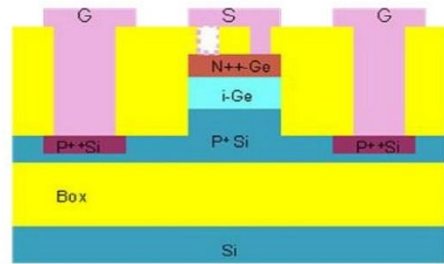
Time of Flight (T_F)⁴²



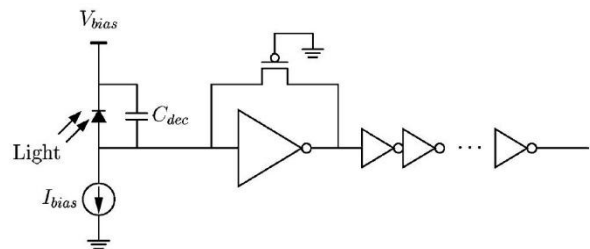
شکل ۱۸: ساختار Ge-APD مجتمع با موجبر Si با اتصالات بین انگشتی MSM. [۳۲]



شکل ۱۹: نمای سه بعدی و سطح مقطع Ge-PD با ساختار Si-LPIN که اتصالات فلزی از جنس سیلیکونی هستند. [۳۳]



شکل ۲۰: ساختار VPIN-PD که به صورت Bottom coupling با موجبر SOI مجتمع شده و برای دو حالت با یک و دو اتصال فلزی بررسی می‌شود. [۳۴]

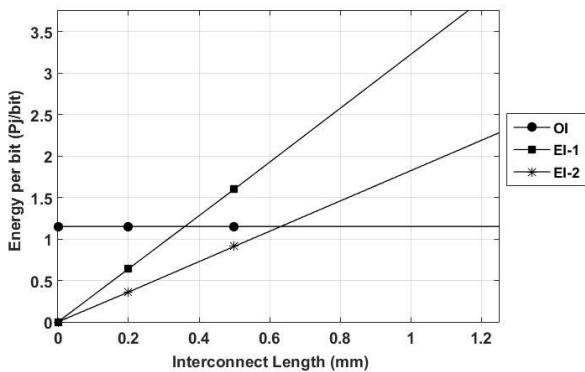
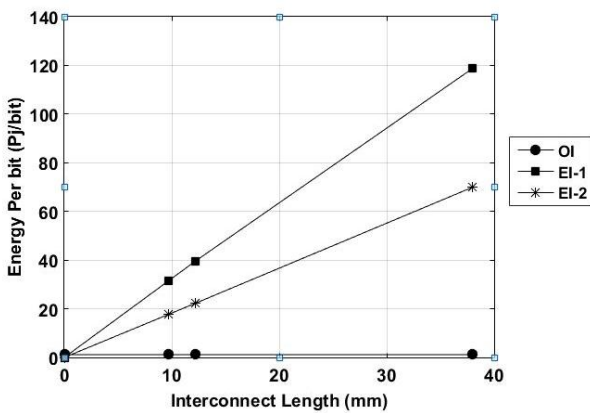


شکل ۲۱: مدار گیرنده OI که از PD، TIA و چند طبقه تقویت کننده تشکیل شده است. [۲]

۴- سیستم اتصالات الکتریکی با روش NSOLT

برای سیستم EI از سیم مسی که بصورت RLC مدل می‌شود و با در نظر گرفتن اندوکتانس سیم به دلیل کاهش خازن بار (C_L) همانند خط انتقال استفاده می‌کنیم. مطابق شکل (۲۲) از

OI کمتر از سیستم EI است. در قسمت پایین شکل (۲۴) می‌توان مشاهده کرد که طول بحرانی برای پارامتر E_{bit} در حالت تاخیر بهینه (EI_1) زیر طول 0.4mm و برای حالت توان بهینه (EI_2) زیر طول 0.7mm هست و نتیجه می‌شود که در سیستم‌های لایه سراسری سیستم OI توان مصرفی کمتری از سیستم EI دارد. از طرفی با افزایش میزان BR مقدار E_{bit} در سیستم OI زیاد می‌شود. که با پیشرفت تکنولوژی و کاهش نود تکنولوژی و در نتیجه کاهش ابعاد و خازن‌های درونی ترانزیستورها در مدارات الکتریکی فرستنده و گیرنده و همچنین انتخاب بهینه مدولاتور و PD با خازن‌های کوچک می‌توان به E_{bit} کوچکی در BR های بزرگ دست یافت. [۲۷]، [۳۵]



شکل ۲۴: شکل بالا پارامتر توان مصرفی هر بیت (E_{bit}) برای سیستم EI در حالت بهینه تاخیر (EI-1) در خط شیب دار بالایی و در حالت بهینه توان (EI-2) در خط شیب دار پایینی با سیستم OI بصورت خط ثابت را بر حسب طول اتصالات در نود تکنولوژی 22nmCMOS مقایسه می‌کند و شکل پایین طول بحرانی پارامتر E_{bit} بزرگنمایی شکل بالایی در محدود 0 تا 1.2mm را نشان می‌دهد. [27]

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با مقایسه دو سیستم OI و EI برای اتصالات سراسری درون تراشه مشاهده کردیم، تاخیر در سیستم EI با روش NSOLT می‌تواند کمتر از OI باشد، اما توان مصرفی در

می‌شود. از طرفی تاخیر در سیستم OI از تاخیر موجبر نوری با رابطه $t_{wg} = n_{eff} \frac{L}{c}$ که وابسته به طول سیم است و تاخیر برای فرستنده و گیرنده که مستقل از طول سیم است، بدست می‌آید. برای موجبر SOI^{43} با ضریب شکست موثر حالت در محیط موجبر $n_{eff}=2.5$ و طول موجبر نوری $L=38mm$ ، مقدار تاخیر برابر $T_{wg}=316.66ps$ دارد. در شکل (۲۳) برای سیستم OI از پارامترهای مقاله [۲۷] و بنا به پیش‌بینی ITRS2003 استفاده می‌کنیم، که مجموع تاخیر اولیه فرستنده و گیرنده 28ps و مستقل از طول سیم است. همچنین از این مقایسه نتیجه می‌شود که EI تاخیر کمتری از OI دارد و با توجه به شیب نمودارها حتی در طول‌های بزرگ و خارج از تراشه همچنان تاخیر EI بهتر از تاخیر OI است. برای سیستم OI در طول سیم 38mm و تاخیر اولیه $T_0=28ps$ در صورتیکه n_{eff} ماده موجبر کمتر از 2.3 باشد، سیستم OI تاخیر کمتری از سیستم EI خواهد داشت. [۳۵]

۶- مقایسه پارامتر توان مصرفی بین OI و EI

برای دو سیستم EI و OI در نود تکنولوژی 22nm پارامتر E_{bit} بر حسب طول سیم را مطابق شکل (۲۴) مقایسه می‌کنیم. برای سیستم OI از نتایج مقاله G.Chen [27] و با توجه به پیش‌بینی ITRS2003 استفاده می‌کنیم که با مقدار $BR=10Gb/s$ دارای $E_{bit}=1.15PJ/bit$ هست و چون در سیستم OI توان مصرفی مستقل از طول سیم (موجبر) است و فقط به توان مصرفی فرستنده و گیرنده نوری مرتبط هست، پس به صورت خط افقی رسم می‌شود. برای سیستم EI به روش NSOLT از دو پارامتر E_{bit} یکی برای بهینه تاخیر (EI-1) و دیگری برای بهینه انرژی مصرفی (EI-2) استفاده می‌کنیم. در حالت بهینه تاخیر (EI_1) که در بخش ۵ برای مقایسه تاخیر استفاده شد توان مصرفی بزرگتری از حالت بهینه انرژی دارد، بطوریکه در $L=38mm$ مقدار $E_{bit-EI_1}=118.77pJ/bit$ دارد که با $BR=10Gb/s$ دارای توان مصرفی $P_{EI_1}=1.118W$ می‌شود و برای $x_{opt}=12.2mm$ دارای $E_{bit}=39.59PJ/bit$ است. در حالت بهینه توان (EI_2) که در شرایط $h=5$ و $n=4$ و در فاصله بین بافرها برای NSOLT رخ می‌دهد، برای کل طول سیم دارای $E_{bit-EI_2}=69.65PJ/bit$ هست که نسبت به حالت بهینه تاخیر مقدار کمتری داشته و تغییرات E_{bit} نسبت به طول سیم، شیب کمتری دارد. طول بحرانی برای پارامتر E_{bit} در واقع طولی هست که در آن مقدار E_{bit} برای سیستم EI با سیستم OI برابر می‌شود و در طول‌های کوچکتر از آن EI مقدار E_{bit} کمتری از OI دارد و در طول‌های بیشتر از طول بحرانی، E_{bit} در سیستم

⁴³ Silicon on Insulator(SOI)

- IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2006 Nov; 12(6):1699-705.
- [3] Miller DA. Device requirements for optical interconnects to silicon chips. Proceedings of the IEEE. 2009 Jun 10; 97(7):1166-85.
- [4] Baklanov, Mikhail, Paul S. Ho, and Ehrenfried Zschech, eds. Advanced interconnects for ULSI technology. John Wiley & Sons. 2012 Feb 24:503-542.
- [5] Safa, Kasap. Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices. Pearson Education India, 2009.
- [6] Soref RI, Bennett BR. Electrooptical effects in silicon. IEEE journal of quantum electronics. 1987 Jan; 23(1):123-9.
- [7] Reed GT, Mashanovich G, Gardes FY, Thomson DJ. Silicon optical modulators. Nature photonics. 2010 Aug; 4(8):518.
- [8] Beausoleil RG. Large-scale integrated photonics for high-performance interconnects. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC). 2011 Jul 1; 7(2):1-54.
- [9] Padmaraju K, Bergman K. Resolving the thermal challenges for silicon microring resonator devices. Nanophotonics. 2014 Aug 1; 3(4-5):269-81.
- [10] Liao L, Liu A, Rubin D, Basak JA, Chetrit YA, Nguyen HA, Cohen RA, Izhaky NA, Paniccia MA. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications. Electronics letters. 2007 Oct 25; 43(22):1196-7.
- [11] Li G, Krishnamoorthy AV, Shubin I, Yao J, Luo Y, Thacker H, Zheng X, Raj K, Cunningham JE. Ring resonator modulators in silicon for interchip photonic links. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2013 Sep 30; 19(6):95-113.
- [12] Liu A, Liao L, Rubin D, Nguyen H, Ciftcioglu B, Chetrit Y, Izhaky N, Paniccia M. High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide. Optics Express. 2007 Jan 22; 15(2):660-8.
- [13] Liu J, Beals M, Pomerene A, Bernardis S, Sun R, Cheng J, Kimerling LC, Michel J. Waveguide-integrated, ultralow-energy GeSi electro-absorption modulators. Nature Photonics. 2008 Jul; 2(7):433-7.
- [14] Reed GT, Mashanovich GZ, Gardes FY, Nedeljkovic M, Hu Y, Thomson DJ, Li K, Wilson PR, Chen SW, Hsu SS. Recent breakthroughs in carrier depletion based silicon optical modulators. Nanophotonics. 2014 Aug 1; 3(4-5):229-45.
- [15] Krishnamoorthy AV, Ho R, Zheng X, Schwetman H, Lexau J, Koka P, Li G, Shubin I, Cunningham JE. Computer systems based on silicon photonic interconnects.

OI بهتر از EI حتی در حالت بهینه توان با روش NSOLT است. چون توان در سیستم OI مستقل از طول سیم هست و همچنین با کاهش توان فرستنده و گیرنده نوری در OI تا حد ممکن باعث می‌شود تا سیستم در BR های بزرگتری کار کند. با هدف بهبود تاخیر اولیه OI در شکل (۲۳) و توان مصرفی ثابت در فرستنده و گیرنده سیستم OI در شکل (۲۴) گزینه‌هایی برای مدولاتور و آشکارساز نوری توسط دو جدول (۱) و (۲) بیان کردیم، که از نتایج این جدولها می‌توان نتیجه گرفت در فرستنده نوری باید از مدولاتورها با BR بزرگ و ER قابل قبول استفاده شود. مدولاتورهای الکتروشکست تخلیه بار مقدار BR بزرگی دارد و برای دستیابی به ER بزرگ باید V_{pp} بزرگی داشته باشند که از مدار راه‌انداز Push-Pull استفاده می‌شود، در مقابل مدولاتورهای تزریق بار مقدار ER بزرگی دارد اما برای داشتن BR بزرگ باید از مدار راه‌انداز Pre-emphasis استفاده شود که منجر به افزایش توان مصرفی می‌شود، در مدولاتورهای الکتروشکست برای تبدیل مدولاسیون فاز به دامنه ساختار MZI به دلیل ابعاد بزرگ و توان مصرفی زیاد مناسب استفاده در سیستم OI درون تراشه نیست و باید از MRR استفاده شود اما این ساختار به دلیل ضریب ترموآپتیک بالایی که در سیلیکون دارد نیاز به تنظیم کننده طول موج در مقابل تغییرات حرارتی دارد و توان مصرفی استاتیکی تنظیم کننده به کل توان مصرفی OI اضافه می‌شود. راه حل جایگزین مدولاتورهای فاز استفاده از مدولاتورهای الکترو جذب است که بصورت مدولاسیون دامنه کار می‌کنند و نیازی به ساختارهای MRR و تنظیم کننده حرارتی ندارند هر چند در این مدولاتورها برای داشتن مقدار ER بزرگ مقدار IL مدولاتور هم افزایش می‌یابد اما مقدار E_{bit} کوچکی دارند، همچنین با کاهش خازن مدولاتور می‌توان تعداد طبقات مورد نیاز برای راه‌اندازی مدولاتور را کاهش داد و در نتیجه مقدار توان مصرفی فرستنده کم شود. در مدارات گیرنده با استفاده از PD مجتمع با موجبر همزمان به مقادیر BR و R بزرگی می‌توان دست یافت و با طراحی آشکارساز نوری با مقدار خازن خیلی کوچک (زیر 1fF) می‌توان بدون مدار گیرنده داده مورد نظر را بازیابی کرد و در نتیجه توان مصرفی گیرنده کاهش یابد.

مراجع

- [1] Moore, Gordon E. "Cramming more components onto integrated circuits." (1965): 114-117.
- [2] Haurylau M, Chen G, Chen H, Zhang J, Nelson NA, Albonesi DH, Friedman EG, Fauchet PM. On-chip optical interconnect roadmap: Challenges and critical directions.

- [27] Chen G, Chen H, Haurylau M, Nelson NA, Albonesei DH, Fauchet PM, Friedman EG. Predictions of CMOS compatible on-chip optical interconnect. *Integration*. 2007 Jul 1; 40(4):434-46.
- [28] Wang J, Lee S. Ge-photodetectors for Si-based optoelectronic integration. *Sensors*. 2011 Jan; 11(1):696-718.
- [29] Kimerling L, Dal Negro L, Saini S, Yi Y, Ahn D, Akiyama S, Cannon D, Liu J, Sandland JG, Sparacin D, Michel J. Monolithic silicon microphotonics. In *Silicon Photonics 2004 Jan 1* (pp. 89-120). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [30] DeRose CT, Trotter DC, Zortman WA, Starbuck AL, Fisher M, Watts MR, Davids PS. Ultra compact 45 GHz CMOS compatible Germanium waveguide photodiode with low dark current. *Optics express*. 2011 Dec 5; 19(25):24897-904.
- [31] Chen L, Lipson M. Ultra-low capacitance and high speed germanium photodetectors on silicon. *Optics Express*. 2009 May 11; 17(10):7901-6.
- [32] Assefa S, Xia F, Vlasov YA. Reinventing germanium avalanche photodetector for Nanophotonics on-chip optical interconnects. *Nature*. 2010 Mar; 464(7285):80-4.
- [33] Chen H, Verheyen P, De Heyn P, Lepage G, De Coster J, Balakrishnan S, Absil P, Yao W, Shen L, Roelkens G, Van Campenhout J. - 1 V bias 67 GHz bandwidth Si-contacted germanium waveguide pin photodetector for optical links at 56 Gbps and beyond. *Optics Express*. 2016 Mar 7; 24(5):4622-31.
- [34] Liao S, Feng NN, Feng D, Dong P, Shafiiha R, Kung CC, Liang H, Qian W, Liu Y, Fong J, Cunningham JE. 36 GHz submicron silicon waveguide germanium photodetector. *Optics express*. 2011 May 23; 19(11):10967-72.
- [35] صمد شکوهی، "مقایسه پارامترهای تاخیر، توان مصرفی و نرخ ارسال بیت برای خطوط الکتریکی و نوری درون تراشه در اتصالات GSI"، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۴۴ صفحه، شهریور ۱۳۹۶.
- Proceedings of the IEEE. 2009 Jun 10; 97(7):1337-61.
- [16] Marris-Morini D, Vivien L, Rasigade G, Fedeli JM, Cassan E, Le Roux X, Crozat P, Maine S, Lupu A, Lyan P, Rivallin P. Recent progress in high-speed silicon-based optical modulators. *Proceedings of the IEEE*. 2009 Jun 16; 97(7):1199-215.
- [17] Li G, Zheng X, Thacker H, Yao J, Luo Y, Shubin I, Raj K, Cunningham JE, Krishnamoorthy AV. 40 Gb/s thermally tunable CMOS ring modulator. In *The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP) 2012 Aug 29* (pp. 1-3).
- [18] Xiao X, Xu H, Li X, Li Z, Chu T, Yu Y, Yu J. High-speed, low-loss silicon Mach-Zehnder modulators with doping optimization. *Optics express*. 2013 Feb 25; 21(4):4116-25.
- [19] Xiao X, Xu H, Li X, Hu Y, Xiong K, Li Z, Chu T, Yu Y, Yu J. 25 Gbit/s silicon microring modulator based on misalignment-tolerant interleaved PN junctions. *Optics express*. 2012 Jan 30; 20(3):2507-15.
- [20] Wu R, Chen CH, Huang TC, Cheng KT, Beausoleil R. 20 Gb/s carrier-injection silicon microring modulator with SPICE-compatible dynamic model. In *2015 International Conference on Photonics in Switching (PS) 2015 Sep 22* (pp. 31-33). IEEE.
- [21] Wu R, Chen CH, Fedeli JM, Fournier M, Cheng KT, Beausoleil RG. Compact models for carrier-injection silicon microring modulators. *Optics Express*. 2015 Jun 15; 23(12):15545-54.
- [22] Srinivasan SA, Pantouvaki M, Gupta S, Chen HT, Verheyen P, Lepage G, Roelkens G, Saraswat K, Van Thourhout D, Absil P, Van Campenhout J. 56 Gb/s germanium waveguide electro-absorption modulator. *Journal of Lightwave Technology*. 2015 Sep 14; 34(2):419-24.
- [23] Buckwalter JF, Zheng X, Li G, Raj K, Krishnamoorthy AV. A monolithic 25-Gb/s transceiver with photonic ring modulators and Ge detectors in a 130-nm CMOS SOI process. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2012 Apr 12; 47(6):1309-22.
- [24] Rakheja S, Kumar V. Comparison of electrical, optical and Plasmonic on-chip interconnects based on delay and energy considerations. In *Thirteenth International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED) 2012 Mar 19* (pp. 732-739). IEEE.
- [25] Michel J, Liu J, Kimerling LC. High-performance Ge-on-Si photodetectors. *Nature photonics*. 2010 Aug; 4(8):527.
- [26] Säcker E. Broadband circuits for optical fiber communication. John Wiley & Sons; 2005 May 27. 25-43.