بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۵۵۹-۱۰-A

طراحی شبکه شکل‌دهی پرتو فوتونیکی با استفاده از تشدیدکننده‌های حلقوی

مهدی پیری[۱]، بیژن عباسی آرند[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس(mahdipiri@modares.ac.ir) [۲]عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس(abbasi@modares.ac.ir)

چکیده -**در این مقاله یک ساختار شکل‌دهی پرتو با استفاده از مدارات مجتمع سیلیکون فوتونیک طراحی و شبیه سازی شده است. چرخش پیوسته بیم و داشتن قابلیت تنظیم از ویژگی‌های مهم ساختار پیشنهادی است. برای طراحی شبکه شکل‌دهی پرتو از تشدیدکننده‌های‌حلقوی به عنوان المان پایه طراحی استفاده کرده‌ایم. همچنین به منظور ایجاد قابلیت تنظیم ساختار، از گرماسازهای فلزی، بالای موجبرها استفاده شده‌است. فرکانس RF ساختار ۴۰GHz و طول موج لیزر برای مدولاسیون سیگنال الکتریکی به نوری،۱۵۵۰nm است. نتایج بدست آمده امکان دستیابی به حداکثر پهنای باند ۱۷.۳۱۵GHzو حداکثر دامنه تاخیرگروه ۲۸۴psرا نشان می‌دهد.**

کلید واژه- شکل‌دهی پرتو، سیلیکون فوتونیک، تشدیدکننده‌حلقوی، اثر ترمواپتیک.

Design of Photonic Beamforming Network using Ring-resonators

MahdiPiri[1], BijanAbbasiArand[2]

[1]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University,Iran(mahdipiri@modares.ac.ir)
[2]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University,Iran(abbasi@modares.ac.ir)

Abstract- **In this paper, a beamforming structure is designed and simulated using silicon photonic integrated circuits. Continuous beamsteering and tunability are important features of the proposed structure. To design the beamforming network, we have used ring-resonators as the base element. Also, in order to make the structure tunable, metallic heaters have been used on top of the waveguides. The RF frequency of the structure is 40 GHz and the laser wavelength for the modulation of the electrical signal to optical is 1550 nm. The results show the possibility of achieving a maximum bandwidth of 17.315 GHz and a maximum Group delay of 284 ps.**

Keywords: Beamforming, Silicon Photonic, Ring-resonator, Thermo-optic effect.

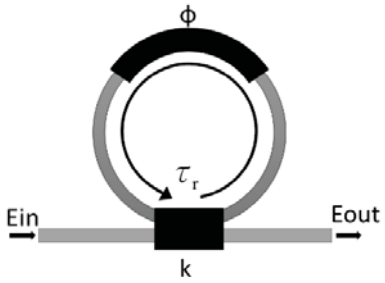
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

با رشد ارتباطات بی‌سیم،استفاده از امواج موج میلیمتری به دلیل داشتن پهنای باند زیاد و اندازه آنتن کوچک،به خصوص در نسل پنجم شبکه‌های موبایل مورد توجه قرار گرفته است. یکی از تکنولوژی‌هایی که در نسل پنجم شبکه‌های موبایل مطرح است، استفاده از شکل‌دهی پرتو و آنتن‌های آرایه فازی، به منظور کاهش تداخل بین کاربرها و افزایش کیفیت خدمت‌رسانی است[۲,۱]. برای پیاده-سازی شکل‌دهی پرتو رویکردهای الکترونیکی با محدویت-هایی مثل پهنای باند کم، تلف زیاد، ابعاد و وزن بزرگ روبرو هستند، برای مقابله با چنین محدویت‌هایی استفاده از ساختارهای مایکروویو فوتونیک پیشنهاد شده است. که از جمله ویژگی های چنین ساختارهایی می‌توان به پهنای باند بسیار بزرگ، تلف کم، ایمنی دربرابر تداخلات الکترو مغناطیسی، قابلیت تنظیم سریع و ... اشاره کرد که موجب علاقه‌مندی به استفاده از چنین ساختارهایی در بین محققان شده است[۳] .

پیاده‌سازی شبکه شکل‌دهی پرتو با استفاده از شیفت دهنده‌های فاز به دلیل وابسته بودن این ساختارها به فرکانس کاری موجب ایجاد پدیده انحراف پرتو(Beamsquint) و به تبع آن ایجاد محدودیت در پهنای باند می‌شود، همچنین با افزایش تعداد المان‌های آرایه این اثر نمود بیشتری پیدا می‌کند، برای جلوگیری از این پدیده در ساختارهای پهن باند و با تعداد المان زیاد از ساختارهای تاخیر زمانی حقیقی(True Time Delay) استفاده می‌شود[۴].

پیاده‌سازی شبکه شکل‌دهی پرتو فوتونیکی به دو صورت فیبرپایه و مدار مجتمعی قابل انجام است که در حالت فیبرپایه ساختارهایی مانند استفاده از فیبرهای با پاشندگی مختلف و لیزر با قابلیت تنظیم طول موج[۵]، استفاده از توری براگ فیبری(FBG)[۶] و ... پیشنهاد شده و در حالت مدار مجتمعی نیز از ساختارهایی مانند ماتریس‌های تاخیر با قابلیت سوییچ[۷]، توری براگ مجتمع[۸] و .... استفاده می‌شود.



شکل ۱: تشدید کننده حلقوی

در این مقاله از تشدیدکننده‌های‌حلقوی به عنوان المان ایجاد کننده تاخیر زمانی به دلیل عدم نیاز به لیزر با طول موج قابل تغییر و امکان چرخش پیوسته بیم استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی پهنای باند تا حدود ۱۷GHz با ریپل ناحیه عبور ۳.۵ps را به منظور ایجاد تاخیر زمانی مورد نیاز برای چرخش پرتو از ۸۰- درجه تا ۸۰+ را نشان می‌دهد.

تحلیل تشدیدکننده‌حلقوی

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود تشدیدکننده-حلقوی در واقع یک تزویج‌کننده جهتی است که ابتدا و انتهای یکی از موجبرهایش به هم وصل شده‌اند. این نکته، نقطه شروع تحلیل روابط حاکم بر تشدیدکننده‌های‌حلقوی است. پس از انجام محاسباتی می‌توان اثبات کرد تاخیرگروه یک تشدیدکننده‌حلقوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

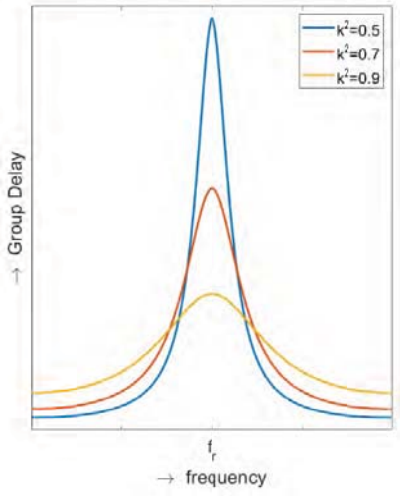
$$\tau_g = \frac{k^2\tau_r}{2-k^2-2\sqrt{1-k^2}\cos(\omega\tau_r+\phi)} \quad (۱)$$

k ضریب تزویج میدان، τ_rمدت زمان طی مسیر حلقه(Round-trip time) و ϕ اختلاف فاز اعمالی توسط گرماساز حلقه است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می-شود با کنترل ضریب تزویج امکان کنترل دامنه تاخیرگروه و با کنترل فاز اعمالی توسط حلقه امکان کنترل فرکانس رزونانس تشدیدکننده‌حلقوی وجود دارد.

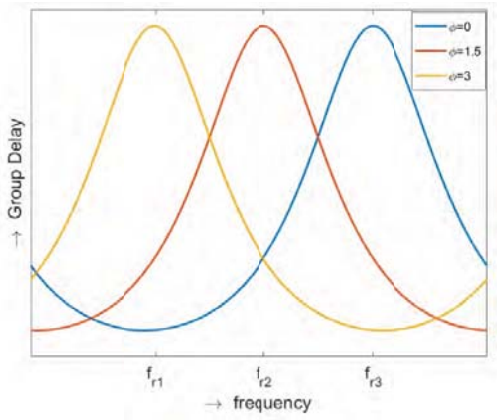
به منظور کنترل ϕ یک گرماساز در قسمت حلقه و برای کنترل ضریب تزویج بین موجبر مستقیم و حلقه(k) از یک ماخ‌زندر که در یکی از شاخه هایش یک گرماساز قرار داده

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

ایم استفاده شده است. ساختار حلقه-ماخزندر در شکل۳ مشاهده می‌شود.

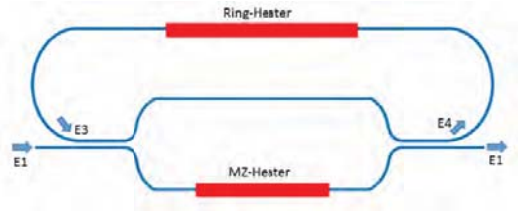


(الف)



(ب)

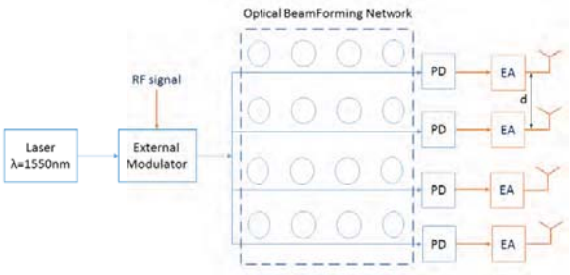
شکل۲: تغییرات نمودار تاخیرگروه تشدیدکننده‌حلقوی به ازای تغییر(الف)ضریب تزویج میدان (ب)اختلاف فاز اعمالی توسط حلقه



شکل ۳: ساختار حلقه-ماخزندر

معرفی و تحلیل نتایج ساختار پیشنهادی

ساختار پیشنهادی برای کنترل تاخیر زمانی اعمالی به المان‌های آرایه در شکل ۴ نشان داده شده است. هدف ما در این مقاله صرفاً طراحی قسمت OBFN است. در ساختارپیشنهادی فرض ما این است که سیگنال RF قبل از ورود به ساختار شکل‌دهی پرتو به صورت تک‌باند بدون-حامل



شکل ۴: شمای کلی ساختار پیشنهادی

مدوله شده است و با توجه به این فرض پهنای باند موردنیاز هر مسیر خط تاخیر برابر است با پهنای باند سیگنال RF. همچنین فرکانس مرکزی سیگنال RF، ۴۰ GHz ، تعداد المان‌ها ۴ و زاویه اسکن موردنظر برای طراحی از ۸۰-درجه تا ۸۰+است. ساختار موجبری استفاده شده ساختار موجبر نواری سیلیکون فوتونیک با ابعاد ۲۲۰ nm*۵۰۰ nmاست، و گرماسازها در بالای موجبر قرار گرفته‌اند، با اعمال توان به گرماساز دمای ساختار تغییر کرده و با توجه به اثر ترمواپتیک، اعمال توان موجب تغییر ضریب شکست ساختار و به تبع آن تغییر میزان تاخیر اعمالی می‌شود.

به منظور افزایش پهنای باند ناحیه رزونانس نمودار تاخیرگروه، از cascade کردن ۴ تشدیدکننده‌حلقوی استفاده شده است. لازم به ذکر است فاصله بین تشدیدکننده‌های‌حلقویcascade شده با توجه به شبیه-سازی‌های صورت گرفته باید حداقل برابر۷۰۰ nm باشد تا تزویجی بین تشدیدکننده‌های‌حلقوی ایجاد نشود.

اختلاف تاخیر زمانی بین دو المان مجاور به منظور انتقال بیم از صفر درجه به زاویه θ از رابطه$\Delta\tau = \frac{d\ sin\theta}{c}$ قابل محاسبه است.برای جلوگیری از ایجاد گریتینگ لوب فاصله بین المان‌ها را برابر نصف طول‌موج انتخاب می‌کنیم. بنابراین برای انتقال پرتو از زاویه ۸۰- درجه به ۸۰+ درجه به اختلاف تاخیرگروه بین دو المان مجاور به اندازه ۲۵psنیاز داریم که حداکثر تاخیرگروه مورد نیاز برای جاروب زوایای بیان شده است.

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

$\Delta\tau_{max} = 2$

ابعادالمان‌های پایه مانند طول حلقه و طول تداخل‌سنج ماخ‌زندر، ابعاد گرماسازها و همچنینتوان‌های اعمالی به گرماسازها طوری تعیین می‌شوند که قابلیت دستیابی به این مقدار تاخیر زمانی بین مسیرهای موازی شبکه شکل-دهی پرتو را در یک پهنای باند مناسب فراهم کنند.

در شکل ۵چند نمونه از نمودارهایتاخیرگروه شبکه شکل-دهی پرتو نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می-شود یک دادوستدی بین دامنه تاخیرگروه و پهنای باند آن وجود دارد که با افزایش دامنه تاخیرگروه پهنای باند کاهش پیدا می‌کند. حداکثر پهنای باندی که به آن دست یافتیم پهنای باند ۱۷.۳۱۵GHz بوده که دامنه تاخیرگروه متناظر آن برابر ۶۶.۹۴ps بوده است و بیشینه تاخیرگروه به دست آمده برابر ۲۸۴ps در پهنای باند حدود ۳GHz است. با تنظیم مناسب توانهای اعمالی به گرماسازهای حلقه و ماخ زندر هرکدام از تشدیدکننده‌های‌حلقوی cascade شده، امکان دستیابی به هر مقدار تاخیرگروه وجود دارد، که به معنای امکان جاروب پیوسته زوایای بیان شده است.

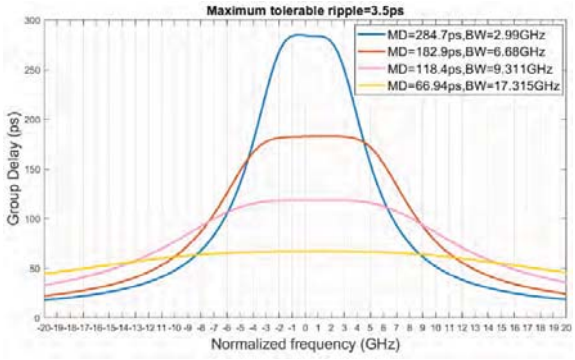
نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار شکل‌دهی پرتو به منظور ایجاد قابلیت چرخش پیوسته پرتو آرایه پیشنهاد شده است، که طبق نتایج ارائه شده قابلیت چرخش بیم از زاویه ۸۰- درجه تا ۸۰+ درجه را دارد و پهنای باندی که در آن چنین امکانی را فراهم کرده در حدود ۱۷GHzبا میزان ریپل ناحیه رزونانس ۳.۵ps است. هم چنین برای ایجاد قابلیت تنظیم از گرماسازهایی در بالای موجبرها استفاده شده است که با تغییر توان اعمالی به آن‌ها قابلیت تنظیم پذیری به ساختار نهایی افزوده شده است.

مرجع‌ها

[1] D. Lin *et al.*, “A Tunable Optical Delay Line Based on Cascaded Silicon Nitride Microrings for Ka-Band Beamforming,” *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–10, 2019.

[2] M. Morant, A. Trinidad, E. Tangdiongga, T. Koonen and R. Llorente, "Experimental Demonstration of mm-Wave 5G NR Photonic Beamforming Based on ORRs and Multicore Fiber," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 2928-2935, July 2019.



شکل ۴: نمودار تاخیرگروه چهار تشدیدکننده‌حلقوی cascade شده با حداکثر تاخیرگروه مختلف و پهنای‌باندهای مختلف

[3] A. Meijerink *et al.*, “Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas - Part I: Design and performance analysis,” *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 3–18, 2010.

[4] G. Serafino *et al.*, “Photonics-assisted beamforming for 5G communications,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 30, no. 21, pp. 1826–1829, 2018.

[5] R. D. Esman *et al.*, “Fiber-optic prism true time-delay antenna feed,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1347–1349, 1993.

[6] H. Zmuda, R. A. Soref, P. Payson, S. Johns, and E. N. Toughlian, “Photonic beamformer for phased array antennas using a fiber grating prism,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 241–243, 1997.

[7] M. A. Piqueras *et al.*, "Optically beamformed beam-switched adaptive antennas for fixed and mobile broad-band wireless access networks," in *IEEE Transactions on Microwave Theory andTechniques*, vol. 54, no. 2, pp. 887-899, Feb. 2006.

[8] Y. Han, S. Shi, R. Jin, Y. Wang, and Q. Qiu, “Integrated waveguide true time delay beamforming system based on an SOI platform for 28 GHz millimeter-wave communication,” *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 26, pp. 7770–7778, 2020.

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