بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

طراحی مشتق‌گیر مرتبه کسری نوری تنظیم‌پذیر مبتنی بر رزوناتور حلقوی

افشین احمدپور، امیر حبیب‌زاده شریف و فائزه بهرامی چناقلو

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

af_ahmadpour@sut.ac.ir, sharif@sut.ac.ir, fa_bahrami@sut.ac.ir

چکیده - امروزه مدارهای مجتمع نوری تنظیم‌پذیر نقش مهمی را در پردازشگرهای تمام-نوری ایفا می‌کنند. در این مقاله، طراحی و تحلیل تمام-موج یک مشتق‌گیر زمانی مرتبه کسری نوری تنظیم‌پذیر مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی ارائه شده است. اعمال ولتاژهای بایاس مستقیم و معکوس به میکرورزوناتور حلقوی مبتنی بر پیوندهای P-I-N و P-N و اثر پاشندگی حامل‌های آزاد منجر به تغییر ضریب شکست مؤثر، ناحیه کاری میکرورزوناتور حلقوی و مرتبه مشتق‌گیری شده و تنظیم‌پذیری مدار تحقق یافته است. عملکرد مطلوب مشتق‌گیر نوری تنظیم‌پذیر طراحی شده با در نظر گرفتن پالس ورودی فوق سریع گوسی با FWHM زمانی ۶/۳ پیکوثانیه تأیید شده است.

کلید واژه – مشتق‌گیر تنظیم‌پذیر، مشتق‌گیر مرتبه کسری، میکرورزوناتور حلقوی، پردازش سیگنال، پاشندگی حامل آزاد.

Design of Tunable Optical Fractional-Order Differentiator based on Ring Resonator

Afshin Ahmadpour, Amir Habibzadeh-Sharif, and Faezeh Bahrami-Chenaghlou

Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
af_ahmadpour@sut.ac.ir, sharif@sut.ac.ir, fa_bahrami@sut.ac.ir

Abstract- Todays, tunable optical integrated circuits play an important role in all-optical processors. In this paper, design and full-wave analysis of a tunable optical fractional-order temporal differentiator based on microring resonator have been presented. Applying forward and reverse bias voltages to the microring resonator based on P-I-N and P-N junctions and free carrier dispersion effect causes to change in the effective refractive-index, operating regime of the microring resonator and the order of differentiation; thus, the tunability of the circuit has been realized. The desired performance of the designed tunable optical differentiator has been confirmed considering an ultra-fast Gaussian input pulse with temporal FWHM of 6.3 ps.

Keywords: Tunable differentiator, Fractional order differentiator, Microring resonator, Signal processing, Free carrier dispersion.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

۱-مقدمه

مشتق‌گیرهای نوری در پردازشگرهای سیگنال تمام-نوری برای غلبه بر محدودیت پهنای باند و سرعت مشتق‌گیرهای الکترونیکی مطرح شده‌اند [۱]. مشتق کسری، تعمیم‌یافته مشتق صحیح است که برای توصیف رفتار سیستم‌های دینامیکی، تولید سیگنال فوق سریع، و پردازش سیگنال استفاده می‌شود [۲]. ساختارهای مختلفی مانند کوپلر جهتی، فیبر گریتینگ براگ، تداخل سنج ماخ‌زندر، کوپلر چند مود و میکرورزوناتور حلقوی به منظور تحقق مشتق‌گیر کسری ارائه شده‌اند [۱, ۳-۶]. میکرورزوناتور حلقوی نوری به دلیل فشرده بودن، تکامل در ساخت، و یکپارچه‌سازی با تکنولوژی CMOS، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۱, ۳]. از طرفی، اثرات الکترواپتیکی، اثر ترمواپتیک و پاشندگی حامل‌های آزاد برای تنظیم فرکانس رزونانس میکرورزوناتور حلقوی بکار می‌روند. اثرات الکترواپتیکی پاکلز و کر برای سیلیکون در طول موج‌های مخابراتی ۱/۳ و ۱/۵۵ میکرومتر ضعیف هستند. همچنین اثر ترمواپتیک در فرکانس‌های بالا کند است. بنابراین، اثر پاشندگی حامل‌های آزاد تنها راه حل برای مدولاسیون ضریب شکست مؤثر (n_{eff}) سیلیکون در طول‌موج‌های ۱/۳ و ۱/۵۵ میکرومتر است [۷, ۸]. تغییر غلظت حامل‌ها در پیوندهای P-I-N و P-N منجر به تغییر n_{eff} می‌شود [۹]. در نتیجه، فرکانس رزونانس میکرورزوناتور حلقوی تغییر کرده و منجر به تغییر مرتبه مشتق‌گیری می‌شود. برای تحقق مشتق‌گیر مرتبه کسری تنظیم‌پذیر مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی، تنها از پیوند P-I-N بایاس مستقیم استفاده شده است [۱]. شعاع در نظر گرفته شده برای میکرورزوناتور حلقوی (۳۰ میکرومتر) نسبتاً بزرگ بوده و FWHM زمانی پالس ورودی نیز ۳۰ پیکوثانیه است. در این مقاله، با استفاده از اثر پاشندگی حامل‌های آزاد، طراحی و تحلیل تمام-موج مشتق‌گیر مرتبه کسری قابل تنظیم مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی نوری فوق فشرده با شعاع ۴ میکرومتر ارائه شده و برای شبیه‌سازی‌ها از روش‌های عددی FDTD و FEM استفاده شده است.

۲-تحلیل تمام-موج مشتق‌گیر در حوزه فرکانس

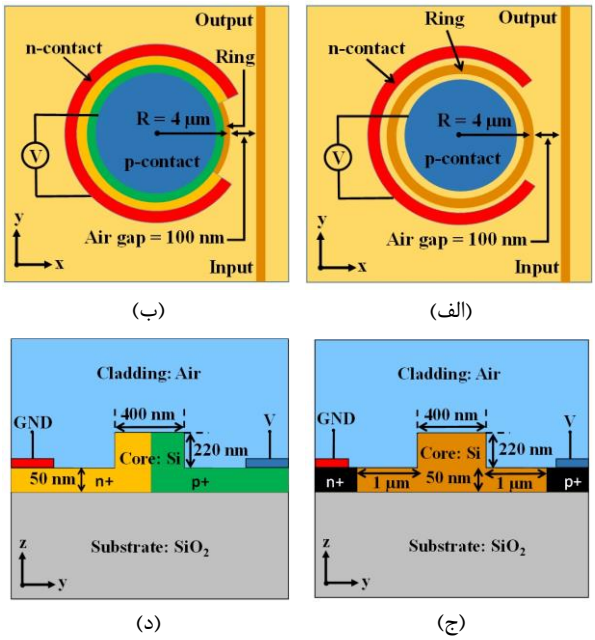
مشتق کسری مرتبه α تابع $f(t)$، که $\alpha\in\mathbb{R}^+$ است، به صورت $D_t^{\alpha}f(t)$ نشان داده شده و تبدیل فوریه آن عبارتست از [۲]:

$$\mathcal{F}\left\{D_t^{\alpha} f(t)\right\} = (i\omega)^{\alpha} F(\omega);\ H_{\alpha}(f) = (i2\pi f)^{\alpha} \quad (۱)$$

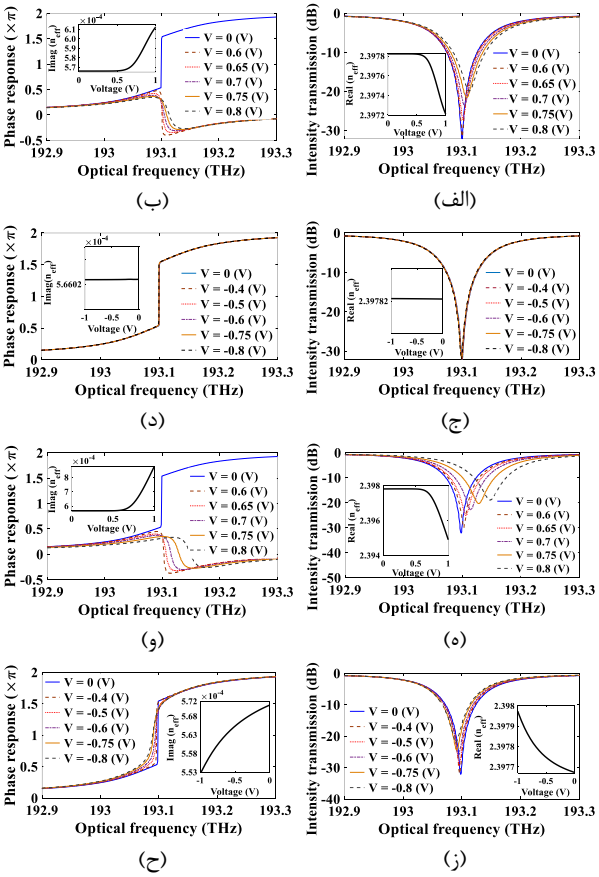
که $f = (\omega - \omega_0)/2\pi$ فرکانس باند پایه بوده و ω_0 فرکانس رزونانس است. پاسخ فاز مشتق‌گیر ریاضی در فرکانس رزونانس دارای پرش فاز $\alpha\pi$ است که α بیانگر مرتبه مشتق است. میکرورزوناتور حلقوی، یک رزوناتور موج متحرک است که معمولاً دایروی بوده و با خم شدن موجبر نوری ساخته می‌شود [۷, ۱۰]. شکل ۱ (الف، ب) ساختار میکرورزوناتور حلقوی سیلیکونی فوق فشرده با پیوندهای P-I-N و P-N را نشان می‌دهد. به منظور عملکرد میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی، شکاف هوایی بین موجبر مستقیم و حلقه ۱۰۰ نانومتر طراحی شده است. شکل ۱ (ج، د) سطح مقطع عرضی میکرورزوناتور حلقوی و موجبر مستقیم مبتنی بر پیوندهای P-I-N و P-N را نشان می‌دهد. موجبر ریب فوتونیک سیلیکونی به دلیل اختلاف ضریب شکست بالای پوسته و هسته، دارای سطح مقطع عرضی کوچک است [۱۱]. ابعاد طراحی شده این موجبر در شکل ۱ (ج، د) مشخص شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، مود اول این موجبر در فرکانس ۱۹۳/۰۹۸ تراهرتز دارای ضریب شکست مؤثر ۲/۳۹۷۹ است. نمودارهای انتقال شدت و پاسخ فاز میکرورزوناتور حلقوی به ازای ولتاژهای مختلف اعمال شده در پیوندهای P-I-N و P-N در شکل ۲ نشان داده شده‌است. نمودارهای الحاقی در شکل‌های ۲ (الف، ب) نشان می‌دهند که بخش‌های حقیقی و موهومی n_{eff} به ترتیب با افزایش ولتاژ بایاس مستقیم P-I-N، کاهش و افزایش یافته‌اند. شکل ۲ (الف) نشان می‌دهد که با جابجایی نمودار انتقال شدت به سمت فرکانس‌های بالاتر، FWHM افزایش یافته است. همچنین در شکل ۲ (ب)، تغییرات پاسخ فاز منجر به تغییر ناحیه کوپلینگ بحرانی به فوق بحرانی شده است. در نتیجه، مشتق‌گیر مرتبه کسری با مرتبه $\alpha > 1$ تحقق یافته است.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]



شکل ۱: میکرورزوناتور حلقوی سیلیکونی فوق فشرده با پیوندهای (الف و ج) P-I-N، (ب و د) P-N.



شکل ۲: انتقال شدت و پاسخ فاز میکرورزوناتور حلقوی به ازای ولتاژهای مختلف؛ (الف و ب) بایاس مستقیم P-I-N، (ج و د) بایاس معکوس P-I-N، (ه و و) بایاس مستقیم P-N، (ز و ح) بایاس معکوس P-N.

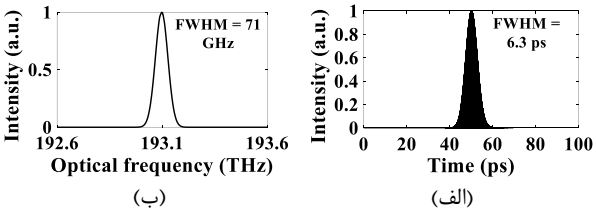
مشابه این پدیده‌ها در شکل‌های ۲ (ه، و) برای میکرورزوناتور با پیوند P-N بایاس مستقیم نشان داده شده‌اند. در این حالت، تغییرات نسبت به پیوند P-I-N شدیدتر است. نمودارهای الحاقی در شکل‌های ۲ (ج، د) نشانگر عدم تغییرات n_{eff} در پیوند P-I-N بایاس معکوس هستند. در نتیجه، تغییر قابل توجهی در منحنی‌های انتقال شدت و پاسخ فاز شکل‌های ۲ (ج، د) وجود نداشته و پیوند P-I-N بایاس معکوس برای طراحی مشتق‌گیر تنظیم‌پذیر مناسب نیست. از طرفی، نمودارهای الحاقی در شکل‌های ۲ (ز، ح) نشان می‌دهند که بخش‌های حقیقی و موهومی n_{eff} به ترتیب با افزایش قدرمطلق ولتاژ بایاس معکوس، افزایش و کاهش یافته‌اند. مطابق شکل ۲ (ز)، با جابجایی نمودار انتقال شدت به سمت فرکانس‌های پایین‌تر، FWHM کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل ۲ (ح)، تغییرات پاسخ فاز منجر به تغییر ناحیه کوپلینگ بحرانی به زیر بحرانی شده و مشتق‌گیر مرتبه کسری با مرتبه $\alpha < 1$ تحقق یافته است.

۳-تحلیل تمام-موج مشتق‌گیر در حوزه زمان

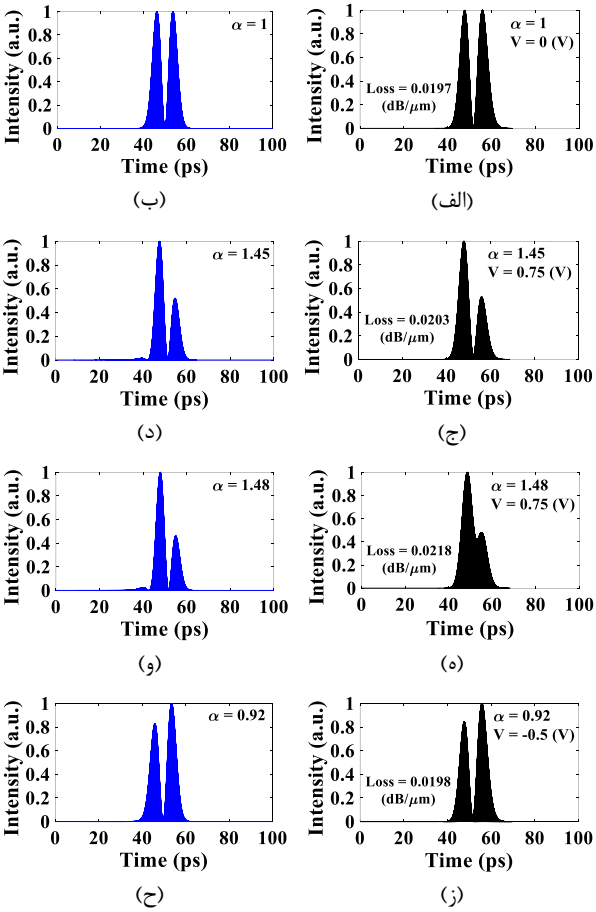
شکل ۳ یک پالس گوسی فوق سریع را نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ۴ (الف، ب)، خروجی مشتق‌گیر نوری در ناحیه کوپلینگ بحرانی توافق خوبی با خروجی مشتق‌گیر مرتبه اول ریاضی دارد. برای تحقق مشتق مرتبه کسری $\alpha > 1$، میکرورزوناتور باید با اعمال ولتاژ بایاس مستقیم پیوندهای P-I-N و P-N در ناحیه کوپلینگ فوق بحرانی قرار گیرد. مطابق شکل‌های ۴ (ج، د)، خروجی‌های مشتق‌گیر نوری توافق خوبی با خروجی‌های مشتق‌گیر مرتبه کسری ریاضی دارند. مطابق شکل ۲ (ه، و)، به دلیل تغییرات بیشتر فرکانس رزونانس میکرورزوناتور مبتنی بر پیوند P-N بایاس مستقیم نسبت به پیوند P-I-N بایاس مستقیم، استفاده از P-N بایاس مستقیم برای ولتاژهای اعمالی بالا از دقت کافی برخوردار نبوده و خروجی آن مطابق شکل‌های ۴ (ه، و)، توافق خوبی با مشتق‌گیر ریاضی ندارد. همچنین مطابق شکل‌های ۴ (ز، ه)، با اعمال بایاس معکوس به پیوند P-N، مشتق مرتبه کسری کوچکتر از یک را می‌توان به خوبی توسط میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه زیر بحرانی تحقق داد.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]



شکل ۳: پالس گوسی در (الف) حوزه زمان، (ب) حوزه فرکانس.



شکل ۴: خروجی‌های میکرورزوناتور حلقوی (الف) بدون ولتاژ بایاس با مرتبه $\alpha = 1$، (ج و ه) به ازای ولتاژ بایاس مستقیم ۰/۷۵ ولت در پیوند P-I-N و P-N به‌ترتیب با مرتبه‌های $\alpha = 1.45$ و $\alpha = 1.48$، (ز) به ازای ولتاژ بایاس معکوس ۰/۵- ولت در پیوند P-N با مرتبه $\alpha = 0.92$، (ب، د، و، ح) خروجی‌های مشتق‌گیر ریاضی با مرتبه‌های $\alpha = 1$، $\alpha = 1.45$، $\alpha = 1.48$ و $\alpha = 0.92$.

۴-نتیجه‌گیری

طراحی و تحلیل تمام-موج یک مشتق‌گیر زمانی مرتبه کسری نوری تنظیم‌پذیر مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی فوق فشرده با استفاده از اثر پاشندگی حامل‌های آزاد ارائه شد. نشان داده شد که پیوند P-I-N بایاس معکوس گزینه مناسبی برای طراحی مشتق‌گیر تنظیم‌پذیر با مرتبه کوچکتر از یک نیست. از طرفی، با اعمال یک پالس گوسی فوق سریع با FWHM زمانی ۶/۳ پیکوثانیه در ورودی مشتق‌گیر زمانی نشان داده شد که نتایج شبیه‌سازی‌های حوزه زمان با نتایج مدل ریاضی از توافق خوبی برخوردارند.

مرجع‌ها

[1] A. Zheng, J. Dong, L. Zhou, X. Xiao, Q. Yang, X. Zhang, J. Chen, "Fractional-order photonic differentiator using an on-chip microring resonator", Opt. Lett., Vol. 39, No. 21, pp. 6355-6358, 2014.

[2] I. Podlubny, *Fractional differential equations*, Elsevier, 1998.

[3] H. Shahoei, D.-X. Xu, J. H. Schmid, J. Yao, "Photonic fractional-order differentiator using an SOI microring resonator with an MMI coupler", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 25, No. 15, pp. 1408-1411, 2013.

[4] M. Li, L.-Y. Shao, J. Albert, J. Yao, "Continuously tunable photonic fractional temporal differentiator based on a tilted fiber Bragg grating", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 23, No. 4, pp. 251-253, 2011.

[5] A. Zheng, T. Yang, X. Xiao, Q. Yang, X. Zhang, J. Dong, "Tunable fractional-order differentiator using an electrically tuned silicon-on-isolator Mach-Zehnder interferometer", Opt. Express, Vol. 22, No. 15, pp. 18232-18237, 2014.

[6] T. L. Huang, A. L. Zheng, J. J. Dong, D. S. Gao, A. X. L. Zhang, "Terahertz-bandwidth photonic temporal differentiator based on a silicon-on-isolator directional coupler", Opt. Lett., Vol. 40, No. 23, pp. 5614-5617, 2015.

[7] V. Van, *Optical Microring Resonators: Theory, Techniques, and Applications*, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2017.

[8] C.A. Barrios, V.R. Almeida, R. Panepucci, M. Lipson, "Electrooptic modulation of silicon-on-insulator submicrometer-size waveguide devices", Lightwave Technol., Vol. 21, No. 10, pp. 2332-2339, 2003.

[9] R. Soref, B. Bennett, "Kramers-Kronig analysis of electro-optical switching in silicon," Integrated Opt. Circuit Engineering, Vol. 704, pp. 32-37, 1987.

[10] M. Sahafi, A. Habibzadeh-Sharif, "All-optical trapping, relocation and manipulation of nanoparticles using SOI ring-resonators", J. Opt. Am. B, Vol. 36, pp. 2178-2183, 2019.

[11] A. Habibzadeh-Sharif, M. Soleimani, "Analysis and design of a rib-like-based slot waveguide for nonlinear silicon nanophotonics", J. Modern Opt., Vol. 60, No. 11, pp. 891-899, 2013.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]