بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

مهندسی مشخصات طیفی میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی با استفاده از گریتینگ براگ

فائزه بهرامی چناقلو، امیر حبیب‌زاده شریف* و افشین احمدپور

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

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

چکیده - امروزه، مدارهای مجتمع نوری فوق فشرده با پهنای باند وسیع، نقش مهمی در پردازش سیگنال‌های فوق سریع نوری ایفا می‌کنند. در این مقاله طراحی، تحلیل و مهندسی مشخصات طیفی میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی مبتنی‌بر گریتینگ براگ ارائه شده است. نتایج بدست آمده از روش FDTD سه‌بعدی در حوزه فرکانس نشان می‌دهند که با تغییر پارامترهای هندسی گریتینگ براگ، پهنای باند سه‌دسیبل میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ در طول موج رزونانس نزدیک به ۱۵۵۰ نانومتر در مقایسه با میکرورزوناتور حلقوی مرسوم به اندازه ۲۹ درصد افزایش یافته است.

کلید واژه - پردازش سیگنال، فوتونیک سیلیکونی، گریتینگ براگ، میکرورزوناتور حلقوی.

Engineering the Spectral Characteristics of Silicon All-Pass Microring Resonator Using Bragg Grating

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

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

Abstract- Nowadays, ultra-compact optical integrated circuits with wide bandwidth play an essential role in ultra-fast optical signals processing. In this paper, design, analysis, and engineering of the spectral characteristics for a silicon all-pass microring resonator based-on Bragg grating have been presented. The obtained results from the three-dimensional FDTD method in the frequency domain show that by changing the geometrical parameters of the Bragg grating, the ۳ dB bandwidth of the microring resonator based-on Bragg grating has been increased by ۲۹٪ □□□□□□□□□ □□ □□□ □□□□□□□□□□□□□ □□□□□□□□□□ □□□□□□□□□□ □□ □□□ □□□□□□□□□□ □□□□□□□□□□□ □□□□□□ □□ ۱۵۵۰ □□.

Keywords: Signal processing, Silicon photonics, Bragg grating, Microring resonator.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

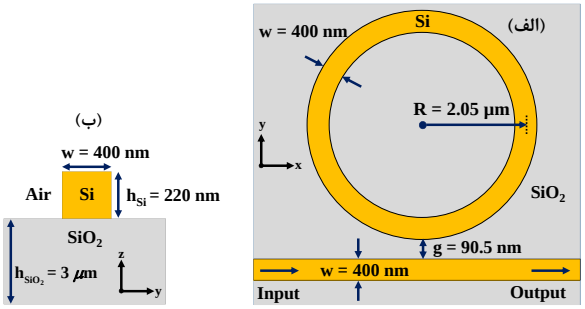
مقدمه

میکرورزوناتور حلقوی به دلیل فشرده بودن، تکامل در ساخت و قابلیت یکپارچه‌سازی با فناوری CMOS از جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای مدارهای مجتمع نوری مثل فیلترها، سوئیچ‌ها، مدولاتورها، حافظه‌ها، پردازشگرها و حسگرهای نوری برخوردار است [۱-۳]. از طرفی، پردازش سیگنال‌های فوق سریع نوری مستلزم طراحی پردازشگرهای تمام-نوری با پهنای باند وسیع است [۲]. تاکنون، طرح‌های متعددی برای پردازش سیگنال‌های فوق سریع نوری مبتنی‌بر میکرورزوناتور حلقوی ارائه شده‌اند [۱-۳]. بر اساس مدل‌سازی شبه‌تحلیلی نشان داده شده است که با استفاده از گریتینگ براگ بر روی حلقه میکرورزوناتور حلقوی می‌توان مشخصات طیفی میکرورزوناتور را کنترل کرد [۴، ۵]. در کار قبلی ما [۶] برای اولین بار، یک پردازشگر مبتنی‌بر میکرورزوناتور حلقوی پلاسمونی با استفاده از گریتینگ براگ در دیواره داخلی حلقه طراحی شده و نشان داده شده است که ایجاد گریتینگ براگ در دیواره داخلی حلقه می‌تواند منجر به افزایش پهنای باند سه‌دسیبل میکرورزوناتور حلقوی پلاسمونی شود. در این مقاله برای اولین بار بر اساس دانسته‌های ما، طراحی، تحلیل و مهندسی مشخصات طیفی یک میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی فوق فشرده با شعاع ۲ میکرومتر مبتنی‌بر گریتینگ براگ در دیواره داخلی حلقه ارائه شده است. با تغییر پارامترهای هندسی گریتینگ براگ می‌توان پهنای باند سه‌دسیبل و طول موج کاری میکرورزوناتور حلقوی را مهندسی نمود. نتایج شبیه‌سازی‌های روش FDTD سه‌بعدی در حوزه فرکانس نشان می‌دهند که در طول موج کاری نزدیک به ۱۵۵۰ نانومتر و ناحیه کوپلینگ بحرانی، پهنای باند میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ در مقایسه با میکرورزوناتور حلقوی متداول (بدون گریتینگ براگ) افزایش یافته است.

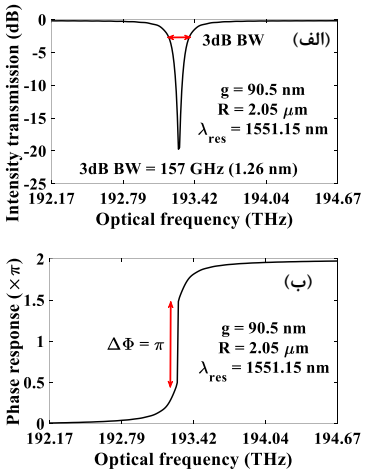
طراحی و تحلیل میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی

میکرورزوناتور حلقوی، یک رزوناتور موج متحرک است که معمولاً دایروی بوده و با خم شدن موجبر نوری ساخته می‌شود [۳]. در شکل ۱ ساختار میکرورزوناتور حلقوی سیلیکونی فوق فشرده متداول و سطح مقطع عرضی حلقه و موجبر مستقیم نشان داده شده‌اند. مواد به کار رفته در هسته، زیرلایه و پوسته به ترتیب از جنس سیلیکون، سیلیکون اکساید و هوا هستند. به منظور تحقق عملکرد میکرورزوناتور حلقوی در حوالی باند طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر، شعاع میانگین حلقه برابر با ۲/۰۵ میکرومتر طراحی شده است. همچنین، به منظور عملکرد این ساختار در ناحیه کوپلینگ بحرانی، لازم است شکاف هوایی (g) بین موجبر مستقیم و حلقه به گونه‌ای تنظیم شود که پرش فاز میکرورزوناتور حلقوی در طول موج رزونانس، مساوی π باشد. شکل ۲ نمودارهای انتقال شدت و پاسخ فاز میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر را به ازای g = ۹۰٫۵ nm نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲ (الف)، عمق شکاف و پهنای باند سه‌دسیبل میکرورزوناتور حلقوی در طول موج رزونانس ۱۵۵۱/۱۵ نانومتر به ترتیب برابر با ۱۹/۷۴- دسیبل و ۱/۲۶ نانومتر هستند. علاوه بر این، مطابق شکل ۲ (ب)، پرش فاز میکرورزوناتور حلقوی در طول موج رزونانس، مساوی π است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی قرار گرفته است. از طرفی، شکل ۳ پروفایل میدان الکتریکی مود اول هدایتی شبه TE موجبر طراحی شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، این مود در طول موج ۱۵۵۱/۱۵ نانومتر (فرکانس ۱۹۳/۲۷۱ تراهرتز) دارای ضریب شکست مؤثر ۲/۱۱۰۴ بوده و میدان الکتریکی آن از حبس‌شدگی مودی خوبی در ناحیه هسته برخوردار است.

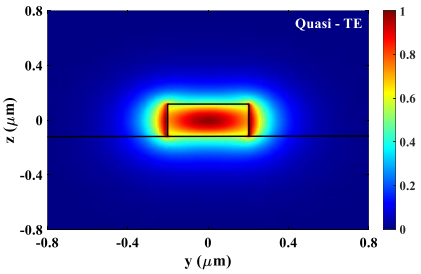
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۱: (الف) میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی متداول، (ب) سطح مقطع عرضی موجبر مستقیم و حلقه.



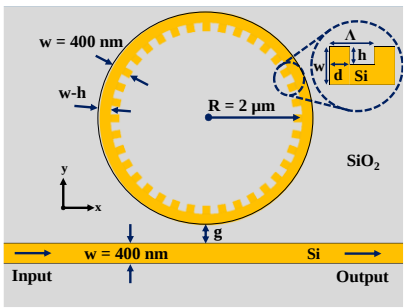
شکل ۲: منحنی‌های (الف) انتقال شدت، (ب) پاسخ فاز میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی.



شکل ۳: پروفایل میدان الکتریکی مود اول هدایتی موجبر.

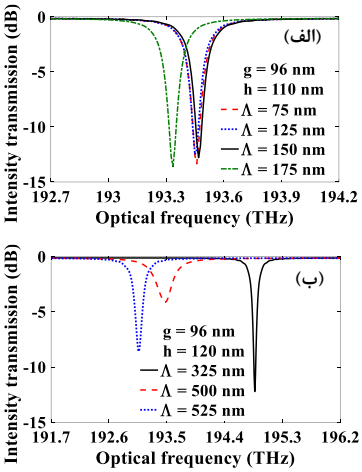
مهندسی مشخصات طیفی میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر مبتنی‌بر گریتینگ براگ

در شکل ۴ ساختار طراحی شده میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ با دوره تناوب Λ نشان داده شده است. ارتفاع و عرض گریتینگ به ترتیب، h و $d = \Lambda/۲$ هستند. به منظور مقایسه عملکرد میکرورزوناتورهای حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ و متداول، می‌بایست هر دو ساختار دارای طول موج رزونانس تقریباً یکسان و ناحیه کوپلینگ یکسان باشند. مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۵، به ازای $h = ۱۱۰$ nm و $\Lambda = ۱۷۵$ nm و نیز $h = ۱۲۰$ nm و $\Lambda = ۵۲۵$ nm، طرح پیشنهادی (شکل ۴) دارای طول موج رزونانس نزدیک به ۱۵۵۰ نانومتر (یکسان با طول موج رزونانس میکرورزوناتور حلقوی متداول) است. از طرفی، مطابق شکل ۶، با توجه به لزوم یکسان بودن رژیم کاری میکرورزوناتورهای حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ و متداول، می‌بایست مقدار g برای دو حالت مذکور ($h = ۱۱۰$ nm و $\Lambda = ۱۷۵$ nm و $h = ۱۲۰$ nm و $\Lambda = ۵۲۵$ nm) به ترتیب برابر با ۹۰ و ۸۸ نانومتر طراحی شود. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۶ (الف و ج) نشان می‌دهند که در طول موج کاری نزدیک به ۱۵۵۰ نانومتر، پهنای باند سه‌دسیبل میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ در مقایسه با پهنای باند سه‌دسیبل میکرورزوناتور حلقوی متداول (شکل ۲ (الف)) افزایش یافته است. این امر می‌تواند منجر به افزایش سرعت پردازشگرهای تمام-نوری مبتنی‌بر میکرورزوناتور حلقوی شود. همچنین، در شکل‌های ۶ (ب و د)، پرش فاز مساوی π در طول موج رزونانس نشان می‌دهد که میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ مشابه میکرورزوناتور حلقوی متداول، در ناحیه کوپلینگ بحرانی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ساختار طراحی شده میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ در مقایسه با میکرورزوناتور حلقوی متداول دارای شعاع کوچک‌تری بوده و در نتیجه، از ابعاد فشرده‌تری برخوردار است.

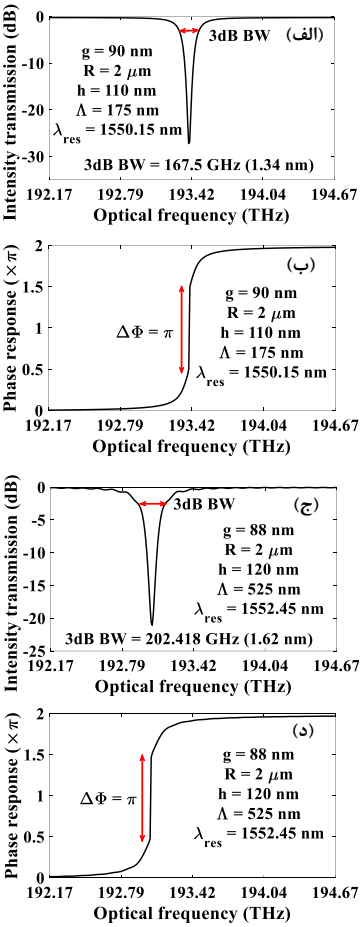


شکل ۴: میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی مبتنی‌بر گریتینگ براگ در دیواره داخلی حلقه.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۵: منحنی‌های انتقال شدت به ازای (الف) h = ۱۱۰ nm، (ب) h = ۱۲۰ nm



شکل ۶: منحنی‌های (الف و ج) انتقال شدت، (ب و د) پاسخ فاز میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ.

نتیجه‌گیری

طراحی، تحلیل و مهندسی مشخصات طیفی میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر سیلیکونی مبتنی‌بر گریتینگ براگ ارائه شد. پهنای باندهای سه‌دسیبل ۱۶۷/۵ گیگاهرتز و ۲۰۲/۴۱۸ گیگاهرتز برای میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ به ازای h = ۱۱۰ nm و Λ = ۱۷۵ nm و نیز h = ۱۲۰ nm و Λ = ۵۲۵ nm حاصل شدند. این مقادیر در مقایسه با پهنای باند سه‌دسیبل میکرورزوناتور حلقوی متداول (۱۵۷ گیگاهرتز) افزایش قابل‌توجهی داشته‌اند. لذا، پردازشگر تمام-نوری مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی با گریتینگ براگ در مقایسه با پردازشگر تمام-نوری مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی متداول از سرعت بیشتری برخوردار خواهد بود. همچنین، ساختار طراحی شده میکرورزوناتور حلقوی مبتنی‌بر گریتینگ براگ در مقایسه با میکرورزوناتور حلقوی متداول دارای شعاع کوچک‌تری بوده و در نتیجه، از ابعاد فشرده‌تری برخوردار است.

مرجع‌ها

[۱] Liu F, Wang T, Qiang L, et al. “Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator,” Opt Express, Vol. ۱۶, No. ۲۰, pp.۱۵۸۸۰–۱۵۸۸۶, ۲۰۰۸.

[۲] A. Ahmadpour, A. Habibzadeh-Sharif, and F. Bahrami-Chenaghlou, “Electrically Tuned Fractional-Order Temporal Differentiator in Silicon Photonics,” Photo. Nan. – Funda. App., Vol. ۴۷, pp. ۱۰۰۹۶۹, ۲۰۲۱.

[۳] F. Bahrami-Chenaghlou, A. Habibzadeh-Sharif, and A. Ahmadpour, “Full-wave analysis and design of optical fractional-order temporal differentiators based on ultra-compact microring resonator,” J. Modern Opt., Vol. ۶۷, No. ۱۰, pp. ۸۸۰–۸۸۹, ۲۰۲۰.

[۴] Y. M. Kang, A. Arbabi, and L. L. Goddard, “A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector,” Opt. Quant. Electron., Vol. ۴۱, No. ۹, pp. ۶۸۹–۶۹۷, ۲۰۰۹.

[۵] Y. M. Kang, A. Arbabi, and L. L. Goddard, “Engineering the spectral reflectance of microring resonators with integrated reflective elements,” Opt. Express, Vol. ۱۸, No. ۱۶, pp. ۱۶۸۱۳–۱۶۸۲۵, ۲۰۱۰.

[۶] A. Ahmadpour, A. Habibzadeh-Sharif, and F. Bahrami-Chenaghlou, “Design and comprehensive analysis of an ultra-fast fractional-order temporal differentiator based on a plasmonic Bragg grating

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

microring resonator," Opt. Express, Vol. ۲۹, No. ۲۲, pp. ۳۶۲۵۷, ۲۰۲۱.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]