

طراحی و تحلیل تمام-موج یک مدار مجتمع تمام-نوری فشرده دومنظوره برای پردازش سیگنال فوق سریع

فائزه بهرامی چناقلو^۱ امیر حبیبزاده شریف^۲ افشین احمدپور^۳

۱- دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز - ایران

fa_bahrami@sut.ac.ir

۲- دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز - ایران

sharif@sut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز - ایران

af_ahmadpour@sut.ac.ir

چکیده: معادلات دیفرانسیل معمولی نقش مهمی را در توصیف رفتار دینامیکی سیستم‌های مختلف مهندسی ایفا می‌کنند. از طرفی، محاسبات با سرعت بالا و پردازش سیگنال با پهنای باند وسیع با استفاده از مدارهای مجتمع فوتونی فشرده با توان مصرفی کم قابل تحقق هستند. لذا، در این مقاله، یک مدار مجتمع تمام-نوری فشرده دومنظوره متشکل از میکرورزوناتور حلقوی، کوپلر جهتی، تقسیم‌کننده و تفریق‌کننده برای پردازش سیگنال‌های فوق سریع طراحی و تحلیل شده است. از این مدار تمام-نوری می‌توان به طور همزمان به عنوان حل‌کننده معادله دیفرانسیل مرتبه اول و مشتق‌گیر مرتبه اول استفاده کرد. تحلیل تمام-موج قطعات تشکیل‌دهنده این مدار مجتمع از طریق شبیه‌سازی حوزه فرکانس انجام شده و عملکرد آنها به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تحلیل عملکرد مدار طراحی شده با در نظر گرفتن پالس ورودی گوسی، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود حوزه زمان سه‌بعدی (3D-FDTD) انجام شده است. این مدار از ویژگی‌های منحصر به فردی مثل سرعت عملکرد بالا، فشرده بودن و قابلیت یکپارچه‌سازی با فناوری CMOS برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پردازش سیگنال تمام-نوری، معادله دیفرانسیل معمولی، مشتق‌گیر نوری، میکرورزوناتور حلقوی سیلیکونی، تحلیل تمام-موج.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.3.59

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

نام نویسنده مسئول: دکتر امیر حبیبزاده شریف

نشانی نویسنده مسئول: ایران، تبریز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

FDTD سه‌بعدی برای تحلیل عملکرد آن در حوزه‌های فرکانس و زمان استفاده شده است.

در این مقاله، برای اولین بار بر اساس دانسته‌های ما، طراحی و تحلیل یک مدار مجتمع فشرده دومنظوره متشکل از میکرورزوناتور حلقوی با شعاع ۴ میکرومتر، کوپلر جهتی، تقسیم‌کننده و تفریق‌کننده نوری برای پردازش سیگنال‌های نوری فوق‌سریع طراحی شده و از روش عددی FDTD سه‌بعدی برای تحلیل تمام-موج آن استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های بدست آمده با استفاده از روش سه‌بعدی FDTD، شبیه‌سازی‌های ریاضی و تحلیل فرمولاسیون حل‌کننده ODE و مشتق‌گیر انجام شده‌اند. نشان داده شده است که نتایج بدست آمده مبتنی بر روش‌های ذکر شده، از توافق خوبی با یکدیگر برخوردار بوده و این توافق، طراحی مدار دومنظوره پیشنهادی را تأیید می‌کند.

همچنین برخلاف کار قبلی [۱]، در این مدار، از شاخه بدون استفاده کوپلر جهتی به عنوان مشتق‌گیر مرتبه اول استفاده شده است که امکان تحقق دو عملیات محاسباتی را به طور همزمان به منظور حل معادله دیفرانسیل و مشتق‌گیری فراهم می‌کند. در ابتدا، عملکرد هر یک از بخش‌های مدار در حوزه فرکانس تحلیل شده و پاسخ‌های فاز و انتقال میکرورزوناتور حلقوی به عنوان مشتق‌گیر با نتایج مدل ریاضی آن مقایسه شده‌اند. سپس، با اعمال پالس زمانی فوق‌سریع گوسی با عرض پالس ۵/۸ پیکوثانیه، خروجی‌های مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل و مشتق‌گیر نوری مرتبه اول در حوزه زمان بدست آمده‌اند. مساحت اشغال شده توسط این مدار $25 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ است که نسبت به مدار ارائه شده در [۱] کاهش چشمگیری داشته است.

۲- طراحی مدار و استنتاج فرمولاسیون

مشتق زمانی مرتبه اول تابع $x(t)$ به صورت dx/dt تعریف می‌شود. تابع انتقال مشتق‌گیر ریاضی مرتبه اول، همانند یک فیلتر نوری است که می‌توان آن را به صورت معادله (۱) تعریف کرد [۱۰]:

$$H_1(f) = i2\pi f = \begin{cases} |2\pi f| \exp(+i\pi/2) & f > 0 \\ |2\pi f| \exp(-i\pi/2) & f < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$f = (\omega - \omega_0)/2\pi$ فرکانس باند پایه بوده و ω و ω_0 به ترتیب فرکانس‌های نور ورودی و رزونانس هستند. بنابراین، مشتق زمانی مرتبه اول دارای پاسخ دامنه $|\omega - \omega_0|$ و پاسخ فاز $\pm\pi/2$ است.

از طرفی، معادله دیفرانسیل مرتبه اول با ضرایب ثابت، مطابق معادله (۲) در نظر گرفته می‌شود [۱]:

$$y(t) + \frac{1}{2} \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

که $x(t)$ و $y(t)$ به عنوان توابعی از زمان به ترتیب بیانگر ورودی و خروجی مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل هستند. بر اساس نظریه اساسی سیگنال‌ها و سیستم‌ها، این مدار توسط بلوک‌های مشتق‌گیر،

در سال‌های اخیر با رشد سریع مدارهای مجتمع تمام-نوری، پیاده‌سازی بلوک‌های پردازش سیگنال نوری پیشرفت چشمگیری کرده است. در واقع، مدارهای مجتمع نوری از محدودیت سرعت و یا پهنای باند مدارهای مجتمع الکترونیکی برخوردار نیستند؛ بنابراین، معادل تمام-نوری بسیاری از مدارهای الکترونیکی مثل گیت‌های منطقی، مشتق‌گیرها و انتگرال‌گیرها در حال طراحی و ساخت هستند. از این رو، با کمک این بلوک‌ها می‌توان قطعات و مدارهای پردازش سیگنال نوری پیچیده‌تری را تحقق بخشید [۱-۶]. یکی از کاربردهای مهم مشتق‌گیرها، توصیف رفتار دینامیکی سیستم‌های فشرده در مقیاس میکرو و نانو است. به همین دلیل در سال‌های اخیر، مشتق‌گیر مرتبه اول توجه زیادی را در کاربردهای مهم مهندسی همانند پردازش سیگنال و پردازش تصویر به خود جلب کرده است [۲-۴].

در فوتونیک، مشتق‌گیر زمانی، یک بلوک پردازشی اساسی است که مشتق زمانی پوش مختلط پالس ورودی را فراهم می‌کند. ساختارهای مختلفی برای تحقق مشتق‌گیر زمانی تمام-نوری ارائه شده‌اند که برخی از آنها مبتنی بر کوپلر جهتی، فیبر گریتنینگ براگ و تداخل‌سنج ماخ زندر هستند [۲، ۴-۸]. میکرورزوناتور حلقوی نوری به دلیل فشرده بودن نسبت به سایر ساختارها، تکامل در ساخت و امکان یکپارچه‌سازی با اپتوالکترونیک در فناوری CMOS، یکی از ساختارهای پایه‌ای مهم محسوب می‌شود [۹]. یک مدار مشتق‌گیر مرتبه اول را می‌توان از طریق طراحی میکرورزوناتور حلقوی نوری در ناحیه کوپلینگ بحرانی تحقق داد [۲، ۴، ۱۰-۱۲].

از طرفی، با استفاده از مشتق‌گیرهای نوری می‌توان حل‌کننده‌های معادلات دیفرانسیل معمولی (ODEs) را تحقق بخشید. این مدارها دارای قابلیت توصیف تغییرات دینامیکی در طیف گسترده‌ای از سیستم‌ها مانند کنترل، مکانیک، برق، هواشناسی و محیط زیست هستند [۱، ۱۳، ۱۴]. لذا، طراحی یک مدار تمام-نوری فوق‌سریع به عنوان حل‌کننده معادله دیفرانسیل با مصرف انرژی پایین و با ابعاد هندسی کوچک از اهمیت خاصی برخوردار است.

در مقاله [۱] طراحی یک مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی نوری با شعاع ۱۰ میکرومتر ارائه شده و عملکرد آن با استفاده از روش عددی FDTD دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در آن مقاله، تحلیل‌های حوزه فرکانس قطعات مدار، همانند میکرورزوناتور حلقوی، تقسیم‌کننده نوری و حلقه فیدبک ارائه نشده‌اند. همچنین، میکرورزوناتور حلقوی طراحی شده در آن از شعاع بزرگی برخوردار بوده و مساحت اشغال شده توسط مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل، $35 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ است. در ضمن، یکی از خروجی‌های کوپلر جهتی در طراحی حلقه فیدبک، بدون استفاده باقی مانده است. در کار قبلی ما [۱۵]، یک مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل مبتنی بر یک میکرورزوناتور حلقوی فشرده طراحی شده و از روش عددی

همچنین، طول حلقه فیدبک با در نظر گرفتن شرط تغییر فاز $(2n+1)\pi$ طراحی شده است؛ بنابراین، رابطه بین E_3 و E_4 را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_3 = e^{-i(2n+1)\pi} E_4 = -E_4 \quad (4)$$

۲-۲- تقسیم‌کننده

مدار تقسیم‌کننده 3 dB، مطابق شکل (۳) با استفاده از خمش‌های موجبری طراحی شده است. مقدار شعاع خمش‌ها مشابه مدار تفریق‌کننده در نظر گرفته شده است. معادله (۵) رابطه بین ورودی و خروجی‌های تقسیم‌کننده نوری 3 dB را بیان می‌کند:

$$E_6 = E_7 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_5 \quad (5)$$

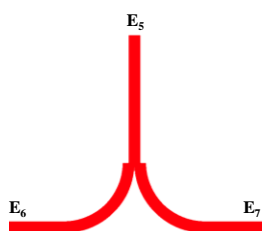
در شکل (۴)، ترکیب مدارهای تفریق‌کننده و تقسیم‌کننده 3 dB نشان داده شده است. با اضافه کردن مدار تقسیم‌کننده نوری به حلقه فیدبک، رابطه بین E_3 و E_4 به صورت معادله (۶) بدست می‌آید:

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(2n+1)\pi} E_4 = -\frac{1}{\sqrt{2}} E_4 \quad (6)$$

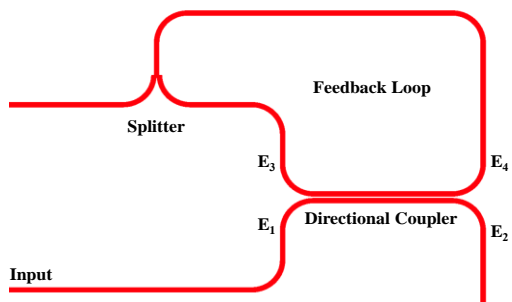
۳-۲- میکرورزوناتور حلقوی

در شکل (۵)، ساختار میکرورزوناتور حلقوی نوری نشان داده شده است. میکرورزوناتور حلقوی نوری جزء رزوناتورهای موج متحرک است که به شکل دایره یا بیضی ساخته می‌شود. تابع انتقال میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر را می‌توان مطابق معادله (۷) بیان کرد [۱۰، ۱۸-۲۰]:

$$H(\omega) = \frac{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_i} - \frac{1}{\tau_c}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_c}}, \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_c} \quad (7)$$



شکل (۳): مدار تقسیم‌کننده 3 dB



شکل (۴): ترکیب مدارهای تفریق‌کننده و تقسیم‌کننده 3 dB

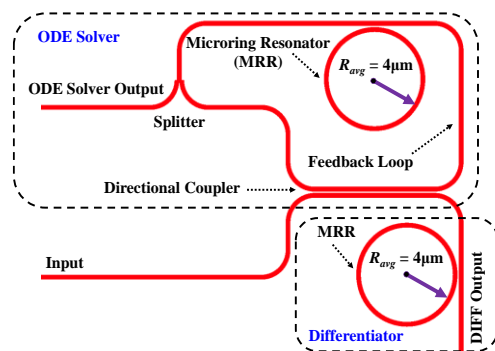
تفریق‌کننده، تقسیم‌کننده و حلقه فیدبک قابل طراحی است [۱۶، ۱۷].

بنابراین، مدار تمام-نوری دومنظوره حل‌کننده ODE و مشتق‌گیر مرتبه اول مطابق شکل (۱) طراحی می‌شود. به منظور تحقق عملگر مشتق، از میکرورزوناتور حلقوی تمام-گذر استفاده شده است. این قطعه، مهمترین و حساس‌ترین نقش را در مدار ایفا می‌نماید. به منظور تحقق عملگر فیدبک منفی، طول حلقه فیدبک می‌بایست طوری طراحی شود که تأخیر فاز آن، ضریب فردی از π باشد.

۱-۲- تفریق‌کننده

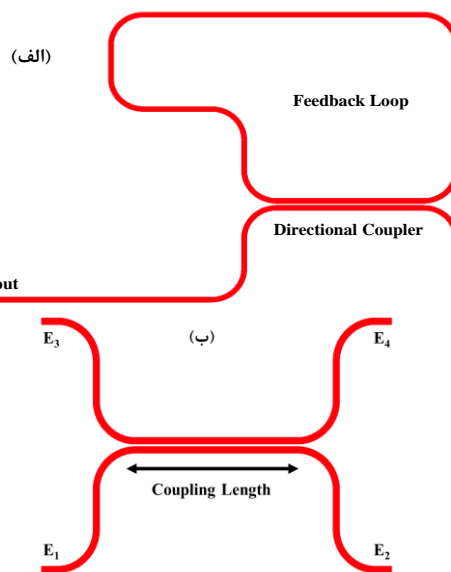
مدار تفریق‌کننده مطابق شکل (۲) الف) با استفاده از یک کوپلر جهتی 3 dB و یک حلقه فیدبک طراحی شده است. کوپلر جهتی مطابق شکل (۲) ب) با شکاف هوایی حدود 100 نانومتر و طول 9 میکرومتر طراحی شده است. با توجه به ضرورت کاهش تلفات خمش، شعاع خمش‌ها حدود 2/2 میکرومتر در نظر گرفته شده است. معادله (۳) رابطه بین خروجی‌ها و ورودی‌های کوپلر جهتی را بیان می‌کند.

$$\begin{bmatrix} E_4 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل (۱): مدار تمام-نوری فوق فشرده حل‌کننده ODE و مشتق‌گیر

مرتبه اول



شکل (۲): الف) مدار تفریق‌کننده، ب) کوپلر جهتی 3 dB

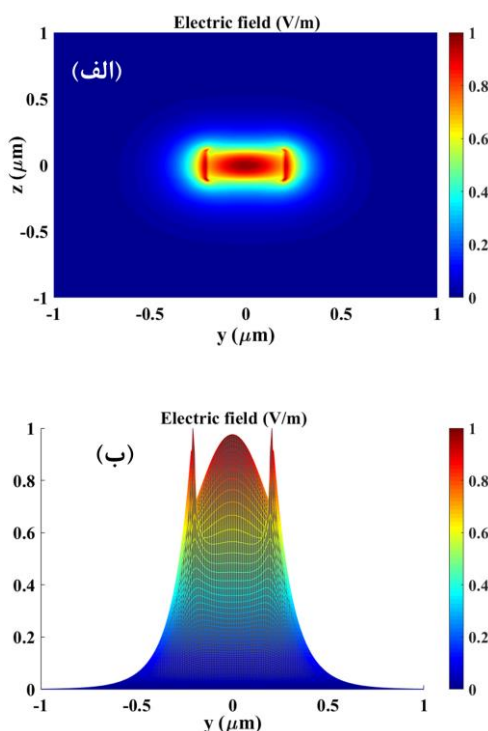
۳-۱- تحلیل در حوزه فرکانس

۳-۱-۱- موجبر

به منظور تحلیل دقیق مودی موجبر و تحلیل تمام-موج مدار متشکل از حل کننده ODE و مشتق گیر در حوزه‌های فرکانس و زمان، از روش FDTD سه بعدی به عنوان یک تکنیک عددی توانمند استفاده شده است. شکل (۷) پروفایل میدان الکتریکی مود هدایتی شبه TE را در موجبر طراحی شده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، مود اول این موجبر در فرکانس ۱۹۴/۹۹۸ تراهرتز (طول موج ۱/۵۳۷۴۱ میکرومتر) دارای ضریب شکست مؤثر ۲/۱۳۴۴ بوده و میدان الکتریکی آن مطابق شکل (۷) از حبس شدگی مودی خوبی در ناحیه هسته برخوردار است. بنابراین، در ادامه با در نظر گرفتن مقادیر سطح مقطع عرضی هسته موجبر و پارامترهای تعریف شده در بخش ۲، عملکرد هر یک از بخش‌های مدار در حوزه فرکانس تحلیل شده‌اند.

۳-۱-۲- کوپلر جهتی

شکل (۸) پروفایل میدان الکتریکی کوپلر جهتی 3 dB را نشان می‌دهد. به خوبی مشخص است که دامنه میدان الکتریکی پورت‌های خروجی E_2 و E_4 مساوی $1/\sqrt{2}$ برابر دامنه میدان الکتریکی پورت E_1 هستند.



شکل (۷): (الف) و (ب) پروفایل میدان الکتریکی مود اول موجبر

۳-۱-۳- تقسیم کننده توان

پروفایل میدان الکتریکی تقسیم کننده نوری 3 dB در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به طراحی انجام شده، دامنه میدان الکتریکی

$1/\tau$ نرخ کل اتلاف توان در میکرورزوناتور حلقوی، $1/\tau_i$ نرخ اتلاف توان ناشی از تلفات ذاتی و $1/\tau_c$ نرخ اتلاف توان ناشی از کوپلینگ توان موجبر است.

میکرورزوناتور حلقوی دارای سه ناحیه کوپلینگ زیر بحرانی ($\tau_i < \tau_c$)، بحرانی ($\tau_i = \tau_c$) و فوق بحرانی ($\tau_i > \tau_c$) است که در فرکانس رزونانس به ترتیب دارای پهنای کمتر از π ، مساوی π و بیشتر از π هستند. اگر اختلاف فرکانس ورودی با فرکانس رزونانس کوچکتر از پهنای باند سه دسیبل میکرورزوناتور حلقوی باشد، می‌توان معادله (۷) را به صورت معادله (۸) بازنویسی کرد:

$$H(\omega) = j\tau(\omega - \omega_0) + \frac{\frac{1}{\tau_i} - \frac{1}{\tau_c}}{\frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_c}} \quad (8)$$

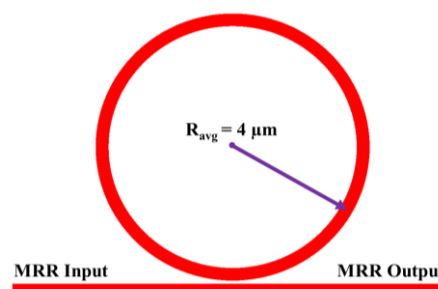
با اعمال شرط ناحیه کوپلینگ بحرانی ($\tau_i = \tau_c$) در معادله (۸)، خواهیم داشت:

$$H(\omega) = j\tau(\omega - \omega_0) \quad (9)$$

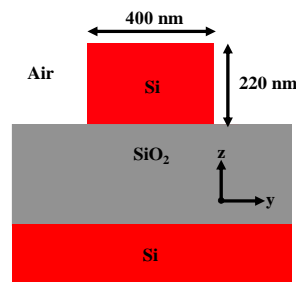
τ بیانگر طول عمر فوتون است [۲۱، ۲]. با مقایسه روابط (۱) و (۹)، می‌توان استنباط کرد که میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی می‌تواند به عنوان یک مشتق گیر مرتبه اول مدل شده و نقش مشتق گیر زمانی را در مدار حل کننده ODE ایفا کند. به منظور تحقق ناحیه کوپلینگ بحرانی، شکاف هوایی بین حلقه و موجبر مستقیم به اندازه تقریبی ۱۰۰ نانومتر طراحی شده است.

۳- نتایج شبیه سازی

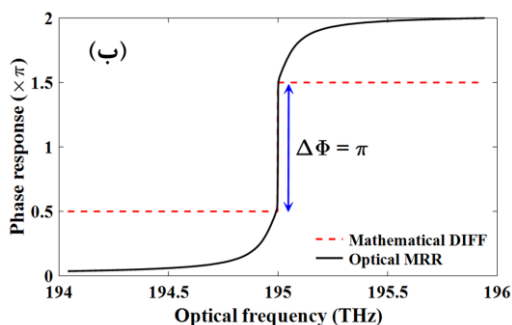
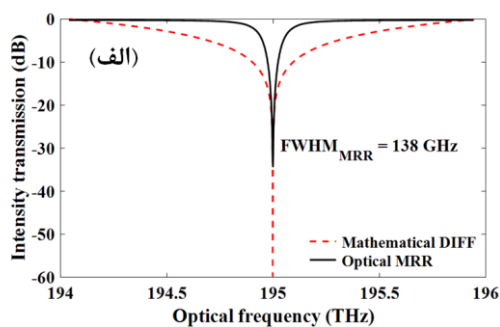
به منظور تحلیل دقیق مدار طراحی شده، اجزای سازنده آن و کل مدار به ترتیب در حوزه‌های فرکانس و زمان شبیه سازی شده‌اند. سطح مقطع عرضی موجبر در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): میکرورزوناتور حلقوی نوری کوپل شده به موجبر مستقیم



شکل (۶): سطح مقطع عرضی موجبر



شکل (۱۰): نمودار (الف) انتقال شدت و (ب) پاسخ فاز مشتق گیر ریاضی مرتبه اول (خط چین قرمز) و میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی (خط ممتد مشکی)

شکل (۱۱) پروفایل میدان الکتریکی میکرورزوناتور حلقوی را در ناحیه کوپلینگ بحرانی در فرکانس رزونانس نشان می‌دهد. با توجه به ورودی ثابت و خروجی صفر موجبر مستقیم، بدیهی است که میکرورزوناتور حلقوی به عنوان مشتق گیر مرتبه اول عمل کرده است.

۳-۱-۵- تفریق کننده

در شکل (۱۲) پروفایل میدان الکتریکی تفریق کننده به همراه تقسیم کننده نوری نشان داده شده است. مطابق این شکل، دامنه میدان الکتریکی پورت E_4 مساوی $1/\sqrt{2}$ برابر دامنه میدان الکتریکی پورت E_1 بوده و با در نظر گرفتن حلقه فیدبک طراحی شده در مدار، میدان الکتریکی به اندازه $1/\sqrt{2}$ برابر دامنه میدان الکتریکی پورت E_1 به پورت E_3 برگردانده شده است.

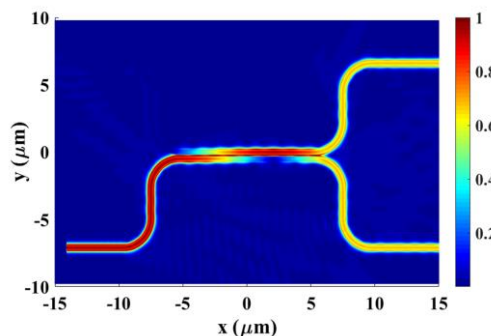
۳-۱-۶- مدار حل کننده ODE و مشتق گیر مرتبه اول

شکل (۱۳) پروفایل میدان الکتریکی مدار مشکل از حل کننده ODE و مشتق گیر مرتبه اول را در فرکانس ۱۹۴/۹۹۸ تراهرتز نشان می‌دهد. به خوبی مشخص است که در این فرکانس، میکرورزوناتورهای حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی قرار گرفته‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی میکرورزوناتورهای حلقوی به منظور تحقق مشتق پالس ورودی در حوزه زمان به درستی انجام شده است.

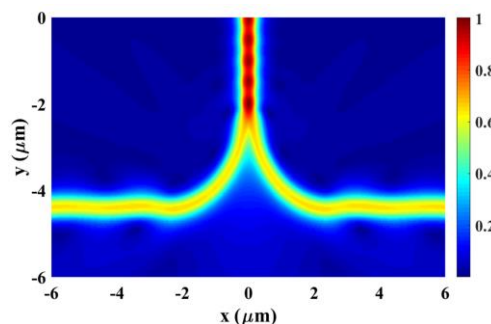
پورت‌های خروجی E_6 و E_7 مساوی $1/\sqrt{2}$ برابر دامنه میدان الکتریکی پورت E_5 هستند.

۳-۱-۴- میکرورزوناتور حلقوی

شکل (۱۰) نمودارهای انتقال شدت و پاسخ فاز مشتق گیر ریاضی مرتبه اول و میکرورزوناتور حلقوی را در ناحیه کوپلینگ بحرانی به ازای فرکانس رزونانس ۱۹۴/۹۹۸ تراهرتز نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۰) (الف)، عمق شکاف منحنی انتقال شدت میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی مساوی ۳۵ dB است. علاوه بر این، از منحنی پاسخ فاز برای تعیین ناحیه کاری میکرورزوناتور حلقوی و تعیین مرتبه مشتق استفاده می‌شود. مطابق شکل (۱۰) (ب)، تغییرات فاز میکرورزوناتور حلقوی در فرکانس رزونانس، مساوی π است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه بحرانی قرار گرفته است و می‌تواند به عنوان مشتق گیر نوری مرتبه اول عمل کند. همانطور که مشخص است، نتایج شبیه‌سازی FDTD سه‌بعدی میکرورزوناتور حلقوی از توافق خوبی با نتایج مشتق گیر ریاضی بدست آمده از معادله (۱) برخوردار هستند.



شکل (۸): پروفایل میدان الکتریکی کوپلر جهتی 3 dB



شکل (۹): پروفایل میدان الکتریکی تقسیم کننده 3 dB

$$x(t) = \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

که t نشان دهنده متغیر زمانی و $t_0 = 30$ ps است. همچنین، σ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \frac{\text{FWHM}}{2\sqrt{\log 2}} \quad (11)$$

مشتق مرتبه اول ورودی گوسی عبارتست از:

$$\frac{dx}{dt} = \left(-\frac{t-t_0}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

در شکل (۱۴) (ب)، منحنی معادله (۱۲) رسم شده است (خط ممتد قرمز). همچنین، با ضرب تبدیل فوریه پالس گوسی در تابع انتقال مشتق‌گیر ریاضی مرتبه اول (معادله (۱)) و محاسبه عکس تبدیل فوریه از نتیجه حاصل، خروجی مشتق‌گیر ریاضی مرتبه اول به ازای ورودی پالس گوسی در حوزه زمان محاسبه شده و منحنی آن در شکل (۱۴) (ب) رسم شده است (خط چین مشکی). از طرفی، خروجی مدار مشتق‌گیر نوری طراحی شده با استفاده از روش FDTD سه‌بعدی محاسبه شده و منحنی آن در شکل (۱۴) (ب) رسم شده است (نقطه چین آبی). مشخص است که نتایج بدست آمده از هر سه روش توافق خوبی با یکدیگر دارند.

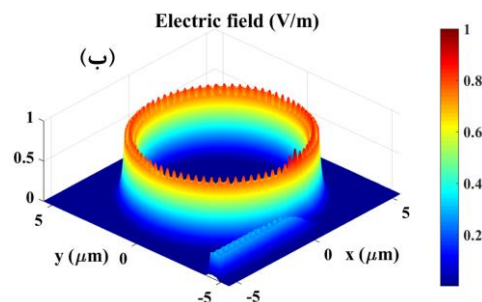
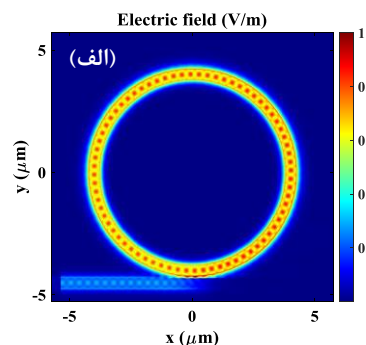
به طور مشابه، برای حل‌کننده ODE، ابتدا معادله (۲) با استفاده از تبدیل فوریه تحلیل شده است. در واقع، تابع تبدیل معادله (۲) عبارتست از:

$$H(\omega) = \frac{\omega^2 + 2j\omega}{4 + \omega^2} \quad (13)$$

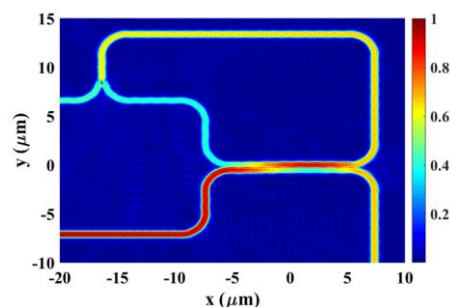
از طرفی، تبدیل فوریه ورودی گوسی تعریف شده در معادله (۱۰) عبارتست از [۱۶]:

$$X(\omega) = \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{\sigma^2 \omega^2 + j2\omega t_0}{2}\right) \quad (14)$$

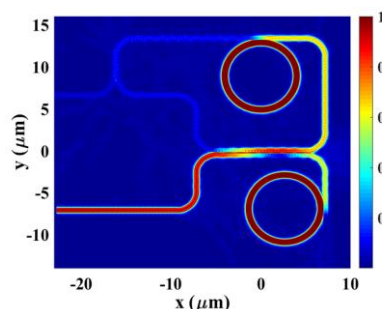
با محاسبه عکس تبدیل فوریه از حاصلضرب معادلات (۱۳) و (۱۴)، پاسخ معادله دیفرانسیل مرتبه اول در حوزه زمان بدست آمده و منحنی آن در شکل (۱۴) (ج) رسم شده است (خط ممتد قرمز). همچنین، با استفاده از دستورات نرم‌افزار متلب، پاسخ معادله دیفرانسیل مرتبه اول در حوزه زمان محاسبه شده و منحنی آن در شکل (۱۴) (ج) رسم شده است (خط چین مشکی). از طرفی، خروجی مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل با استفاده از روش FDTD سه‌بعدی محاسبه شده و منحنی آن در شکل (۱۴) (ج) رسم شده است (نقطه چین آبی). مشخص است که نتایج بدست آمده توافق خوبی با یکدیگر دارند. لذا، بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱۴) (ب) و (ج)، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدار فوق فشرده دومنظوره مشتق‌گیر و حل‌کننده معادله دیفرانسیل با دقت خوبی طراحی شده و از سرعت پردازش بسیار بالا و عملکرد قابل قبولی برخوردار است.



شکل (۱۱): پروفایل (الف) دوبعدی و (ب) سه‌بعدی میدان الکتریکی میکرورزوناتور حلقوی در ناحیه کوپلینگ بحرانی



شکل (۱۲): پروفایل میدان الکتریکی تفریق‌کننده و تقسیم‌کننده



شکل (۱۳): پروفایل میدان الکتریکی مدار تمام-نوری فوق فشرده حل‌کننده ODE و مشتق‌گیر مرتبه اول

۲-۲- تحلیل در حوزه زمان

پالس زمانی فوق سریع گوسی نشان داده شده در شکل (۱۴) (الف) مطابق معادله (۱۰) با عرض پالس $5/8$ پیکوثانیه به عنوان ورودی مدار در نظر گرفته شده است.

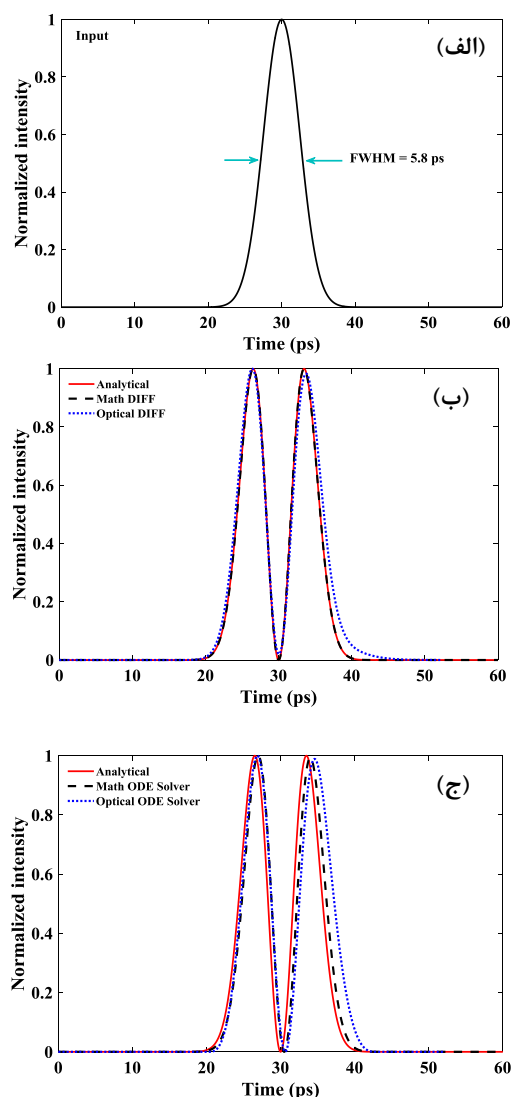
مشتق‌گیر و حل‌کننده ODE با یکدیگر مقایسه شدند. توافق بدست آمده در این نتایج، حاکی از سرعت و دقت بسیار بالای مدار طراحی شده است. این مدار از قابلیت یکپارچه‌سازی با فناوری CMOS برخوردار بوده و از آن می‌توان در پردازش سیگنال‌های تمام-نوری مبتنی بر فوتونیک سیلیکونی استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خویش را از اعضای گروه پژوهشی الکترومغناطیس و فوتونیک دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند به دلیل مشارکت مؤثر در مباحث علمی مرتبط با موضوع مطرح شده در این مقاله اعلام می‌نمایند.

مراجع

- [1] Lu, L., et al., "Compact all-optical differential-equation solver based on silicon microring resonator", *Frontiers of Optoelectronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 99-106, 2012.
- [2] Liu, F., Wang, T., Qiang, L., et al "Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator", *Optics Express*, Vol. 16, No. 20, pp. 15880-15886, 2008.
- [3] Azana, J., et al., "Ultrafast all-optical differentiators based on fiber gratings. in *Transparent Optical Networks, ICTON'07. 9th International Conference on. 2007. IEEE. 2007.*
- [4] Zhou, G., Zhang, L., Li, F., et al, "All-optical temporal differentiation of ultra-high-speed picosecond pulses based on compact silicon microring resonator", *Electronics Letters*, Vol. 47, No. 14, pp. 814-816, 2011.
- [5] Karkhanechi, M., Parandin, F., and Zahedi, A., "Design of an all optical half-adder based on 2D photonic crystals", *Photonic Network Communications*, Vol. 33, No. 2, pp. 159-165, 2017.
- [6] Saghaei, H., Zahedi, A., Karimzadeh, R., Parandin, F., "Line defects on As₂Se₃-Chalcogenide photonic crystals for the design of all-optical power splitters and digital logic gates", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 110, pp. 133-138, 2017.
- [7] Huang, T. L., Zheng, A. L., Dong, J. J., Gao, D. S., and Zhang, X. L. "Terahertz-bandwidth photonic temporal differentiator based on a silicon-on-isolator directional coupler", *Vol. 40, No. 23, pp. 5614-5617, 2015.*
- [8] Liu, X., Shu, X., & Cao, H. "Proposal of a phase-shift fiber Bragg grating as an optical Differentiator and an optical integrator simultaneously", *Vol. 10, No. 3, pp. 1-7, 2018.*
- [9] قاسمی، یآوری، "طراحی و شبیه‌سازی مدولاتور نوری سیلیکونی مبتنی بر ریز مشدد حلقه"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۹، صفحات ۴۷-۵۴، تهران، ۱۴۰۰.
- [10] Bahrami-Chenaghloou, F., Habibzadeh-Sharif, A., and Ahmadpour, A., "Full-wave analysis and design of optical fractional order temporal differentiators based on ultracompact microring resonator", *Journal of Modern Optics*, Vol. 67, No. 10, pp. 880-889, 2020.
- [11] Ahmadpour, A., Habibzadeh-Sharif, A., and Bahrami-Chenaghloou, F., "Electrically Tuned Fractional-Order Temporal Differentiator in Silicon Photonics", *Photonics*



شکل (۱۴): (الف) پالس ورودی گوسی در حوزه زمان، (ب) خروجی مشتق‌گیر مرتبه اول، (ج) خروجی حل‌کننده ODE

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار بر اساس دانسته‌های ما، طراحی و تحلیل تمام-موج حوزه فرکانس و تحلیل تمام-موج حوزه زمان یک مدار فوق فشرده دومنظوره تمام-نوری متشکل از یک حل‌کننده معادله دیفرانسیل معمولی و یک مشتق‌گیر مرتبه اول مبتنی بر میکرورزوناتور حلقوی ارائه شد. مساحت اشغال شده توسط مدار، $25 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ است. از روش FDTD سه‌بعدی به عنوان یک تکنیک عددی توانمند برای تجزیه و تحلیل مدار طراحی شده استفاده شد و عملکرد هر یک از اجزای مدار در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با در نظر گرفتن پالس نوری فوق سریع گوسی با عرض پالس $5/8$ پیکوثانیه به عنوان ورودی مدار، خروجی‌های مدار حل‌کننده معادله دیفرانسیل و مشتق‌گیر مرتبه اول در حوزه زمان بدست آمدند. به منظور تأیید اعتبار نتایج به دست آمده، منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های نوری، ریاضی و تحلیل فرمولاسیون

- and Nanostructures - Fundamentals and Applications, Vol. 47, pp. 100969, 2021.
- [12] Ahmadpour, A., A. Habibzadeh-Sharif, and Bahrami-Chenaghlu, F., "Design and comprehensive analysis of an ultra-fast fractional-order temporal differentiator based on a plasmonic Bragg grating microring resonator", Optics Express, Vol. 29, No. 22, pp. 36257, 2021.
- [13] Yang, T., et al., "All-optical differential equation solver with constant-coefficient tunable based on a single microring resonator", Scientific reports, Vol. 4, pp. 558, 2014.
- [14] Hou, J., Dong, J., and Zhang, X., "Optical solver for a system of ordinary differential equations based on an external feedback assisted microring resonator", Optics letters, Vol. 42, No. 12, pp. 2310-2313, 2017.
- [15] Ahmadpour, A., Habibzadeh-Sharif, A., and Bahrami-Chenaghlu, F., "Design and analysis of an all-optical differential equation solver based on an ultra-compact microring resonator", 27th Iranian Conference on Electric Engineering, Yazd University, 30 April-2 May 2019.
- [16] Oppenheim, A.V., Willsky, A.S. and Nawab, S.H., Signals and systems 2nd ed, New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [۱۷] جلالی، "بررسی موجبر جداکننده توان بهینه بلور فوتونیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، صفحات ۱۰-۱، تهران، ۱۳۹۵.
- [18] Bogaerts, W., et al., "Silicon microring resonators", Laser & Photonics Reviews, Vol. 6, No.1, pp. 47-73, 2012.
- [19] Van, V., Optical Microring Resonators: Theory, Techniques, and Applications, CRC Press, 2016.
- [20] Feng, S., Lei, T., Chen, H., et al., "Silicon photonics: from a micro resonator perspective", Laser Photonics Reviews, Vol.6, No. 2, pp. 145-177, 2012.
- [21] Zhang, Z., et al., "Resonance-splitting and enhanced notch depth in SOI ring resonators with mutual mode coupling", Optics express, Vol. 16, No. 1, pp. 4621-4630, 2008.