

تولید پالس‌های اپتیکی تک چرخه‌ای و دوگانه باند فرایهن با استفاده از پالس‌های الکتریکی مربعی و گوسی

عبدالکریم افروزه

گروه مهندسی برق، دانشکده علوم مهندسی، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار

پست الکترونیکی: afroozeh@lar.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹)

چکیده

در این مقاله روشی برای تولید پالس‌های باند فرایهن (UWB) که اساس کار آن، یک تداخل سنج ماخ‌زندر است با یک تشدیدگر حلقه‌ای کوچک سیلیکونی که با قابلیت تغییر پیکربندی جفت شده، گزارش شده است. سیگنال‌های باند فرایهن تک‌چرخه‌ای و دوتایی با پهنای زمانی پالس پیکوثانیه تولید می‌شوند که تشدیدگر کوچک حلقه‌ای به ترتیب با پالس‌های الکتریکی مربعی و گوسی مدوله می‌شود. سیستم‌های فوتونیک ریزموج که با اجزای بزرگ نوری کار می‌کنند از بزرگی حجم، استفاده زیاد از انرژی، هزینه بالا و آسیب‌پذیری در برابر اختلالات محیط‌زیستی رنج می‌برند. بنابراین، بسیار مطلوب است که سیستم فوتونیک ریزموج را بر روی یک تراشه جمع کنیم تا فشرده‌تر، ارزان‌تر و کم‌مصرف‌تر شود. سیگنال‌های باند فرایهن خواص ذاتی از جمله مصنوعیت در برابر محو شدن در حرکت چند مسیره، پهنای باند گسترده و چگالی توان طیفی پایین دارند. یکی از کاربردهای آن در مخابرات بی‌سیم کوتاه‌برد و توان بالا برای انتقال بدون تأخیر و بی‌سیم داده‌های چندرسانه‌ای حجیم قرار دارد. همچنین می‌تواند در حالت سرعت و توان کم برای کاربردهای اینترنت اشیا مانند موقعیت‌یابی دقیق داخلی استفاده شود. برخلاف تخمین مسافت وای‌فای یا بلوتوثی که بر اساس شدت سیگنال کار می‌کنند، سیگنال باند فرایهن پهنای پالس بسیار باریکی دارد، شبیه پالس رادار، که آن را قادر می‌سازد تا با استفاده از زمان پیشروی پالس و با دقت ۱۰ سانتی‌متر، موقعیت را تخمین بزند. با مدولاتور تشدید که بر اساس فوتونیک سیلیکون است، می‌توان به تولید سیگنال ریزموج قابل تنظیم روی تراشه، بسیار امیدوار بود.

واژه‌های کلیدی: پالس‌های باند فرایهن، تشدید، مدوله کردن، مدولاتور یکپارچه سیلیکونی

۱. مقدمه

رادییوی و شکل‌دهی به پرتو با آرایه فازی نوری می‌توان اشاره کرد [۱-۷]. کمیسیون مخابرات فدرال در سال ۲۰۰۲ استفاده از سیگنال فرایهن‌باند را به صورت قانونی تصویب کرد و کمپانی اپل فناوری باند فرایهن را در محصولات خود مانند آی‌پاد و آی‌واچ، استفاده کرد. بسیاری از کمپانی‌های دیگر مانند NXP

ریز موج‌های فوتونیک در طی سالیان اخیر بسیار رشد کرده است. عملکردهای زیادی از جمله تولید سیگنال باند فرایهن، فیلتر بسامد رادیویی با وضوح بالا و دارای قابلیت تغییر پیکربندی، تغییر فاز بسامد رادیویی، تبدیل بالای بسامدی

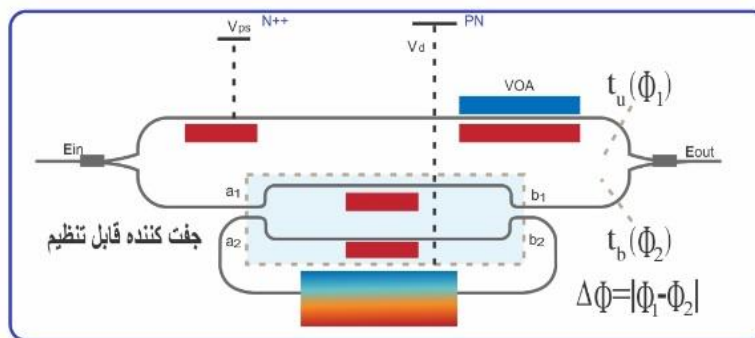
است. تأثیر پراکندگی و جذب حامل‌های آزاد موجود در سیلیکون بر سیگنال‌های باند فرایهن تولید شده هم بررسی شد. پالس‌های تک چرخه‌ای روی یک تراشه فوتونیک از جنس سیلیکون تولید می‌شدند. این روش‌ها یا برای سیستم‌های حجیم هستند که ناپایدار و غیر عملی هستند یا تنها زمانی یکنواخت هستند که شکل موج‌های محدود تولید می‌شوند [۲۴-۲۸].

در اینجا، ما روشی ساده برای تولید پالس‌های فرایهن باند پیشنهاد می‌کنیم که از یک تداخل سنج ماخزندر که با یک تشدیدگر حلقه‌ای کوچک، دارای قابلیت تغییر پیکربندی جفت شده است، استفاده شود. زمانی که اختلاف فاز بین دو بازوی تداخل سنج ماخزندر تغییر می‌کند، طیف تداخل سنج ماخزندر که با یک تشدیدگر حلقه‌ای کوچک ترکیب شده است، طیف خط‌های مختلفی را از خود نشان می‌دهد. زمانی که قطعه در تشدید با شکل خط تشدید نامتقارن کار می‌کند، مدولاسیون بر روی تشدیدگر حلقه‌ای کوچک اعمال می‌شود. پالس‌های تک چرخه‌ای و دوگانه باند فرایهن به ترتیب با استفاده از پالس‌های الکتریکی مربعی و گوسی تولید می‌شوند. زمانی که دامنه سیگنال محرک باز هم بالا رود، مراتب بالاتری از پالس باند فرایهن می‌تواند تولید شود.

۲. طرحواره و ساختار دستگاه

شکل ۱ ساختار طرحواره‌ای یک تداخل سنج ماخزندر با یک تشدیدگر حلقه‌ای را نشان می‌دهد. جفت‌شدگی بین تشدیدگر حلقه‌ای و تداخل سنج ماخزندر با کمک دو گرمکن خیلی کوچک که برای تنظیم جفت‌شدگی، یکپارچه شده‌اند (با کادر نقطه‌چین نشان داده شده)، امکان‌پذیر می‌شود. یک اتصال PN در مسیر حرکت تشدیدگر حلقه‌ای برای مدولاسیون سریع یکپارچه شده است. بازوی دیگر تداخل سنج ماخزندر با یک تغییر دهنده فاز ترموپتیک و یک تضعیف کننده نوری متغیر بر پایه دیود PIN یکپارچه شده است تا به ترتیب فاز و دامنه نوری که در این در این مسیر حرکت می‌کند را تنظیم کنند. شایان ذکر است که این قطعه کاملاً قابلیت تغییر شکل دارد و طیف تشدید می‌تواند به راحتی مناسب‌سازی شود.

سامسونگ، بوش، سونی و بقیه در یک سازمان با عنوان کنسرسیوم FiRa با هم متحد شدند تا کاربردهای باند فرایهن را برای استفاده فوق‌العاده یک کاربر در شرایطی مثل کنترل دسترسی بدون تماس و سرویس‌های مبتنی بر مکان و سرویس‌های دستگاه به دستگاه بهبود بخشند [۸-۱۱]. تولید سنتی پالس باند فرایهن با مدار الکتریکی جهت تبدیل انرژی الکتریکی به نوری نیاز دارد تا بتوان سیگنال الکتریکی را روی فیبر نوری توزیع کرد. تولید مستقیم سیگنال‌های باند فرایهن به صورت نوری به کمک فوتونیک مجتمع، شایستگی‌های زیادی مانند: وزن کم، اندازه کوچک، قابلیت تنظیم بالا و مصونیت در برابر تداخل الکتریکی [۳] دارد. روش‌های اپتیکی بسیاری برای تولید پالس‌های باند فرایهن گزارش شده است. معمول‌ترین آنها عبارتند از مدوله کردن فاز توسط قطعات پاشنده [۱۲] یا تفکیک کننده بسامدی [۱۳] مانند فیلتر عبود دهنده یک نوار بسامدی [۱۴] یا توری براگ فیبری (FBG) [۳ و ۱۵]. بعضی از پالس‌های باند فرایهن دیگر را در مراتب مختلف از مشتقات پالس گوسی به دست می‌آورند و عوامل مربوط به بازدهی توان سنجیده می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. علاوه بر این، بسیاری از محققان بر روی جمع کردن هم‌دوس یا ناهم‌دوس سیگنال‌های فرایهن باند با مرتبه پایین‌تر برای به دست آوردن پالس باند فرایهن با مرتبه بالاتر تمرکز می‌کنند؛ اگرچه همه این رویکردها به سیستم‌های پیچیده و حجیم برای تولید سیگنال‌های پایدار نیاز دارند. جمع خطی از پالس‌های دوتایی اصلاح شده می‌تواند برای تولید باند فرایهن با بازدهی توانی بالا به کار رود [۱۸-۲۰]. همچنین رویکردهای دیگری برای تولید سیگنال فرایهن باند پیشنهاد شده‌اند که به کمک آینه‌های حلقه‌ای در حوزه اپتیک غیر خطی یا جذب دوفوتونی در یک موجبر سیلیکونی انجام می‌شوند [۲۱-۲۳]. ونگ و همکاران، مانند روش یکپارچه کردن، برای تولید سیگنال‌های دوتایی فرایهن باند با استفاده از مدولاتور الکترواپتیکی هم یک روش ساده ارائه کرده‌اند. همچنین تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی توانایی استفاده شدن برای تولید فرایهن باند‌های تک‌چرخه‌ای و دوتایی را دارند اما طول عمر حامل‌های آهسته، آنها را محدود کرده



شکل ۱. ساختار طرحواره تداخل سنج ماخزندر جفت شده باتشدیدگر حلقه‌ای کوچک.

میدان‌های a_r و b_r به تشدیدگر حلقه‌ای مسیر حرکت مربوط می‌شوند پس خواهیم داشت.

$$a_r = b_r \cdot a_{Ring} \cdot e^{i\varphi_{Ring}}, \quad (2)$$

که a_{Ring} و φ_{Ring} به ترتیب عامل اتلاف و فاز جمع شده هنگام عبور نور از موجبر حلقه‌ای بازخوردی هستند. از معادلات (۱) و (۲)، عبور میدان اپتیکی از بازوی تشدیدی تداخل سنج ماخزندر به شکل معادله ۳ نوشته می‌شود.

$$t_b = \frac{b_1}{a_1} = t_{11} + \frac{k_{1r} \cdot k_{r1} \cdot a_{Ring} \cdot e^{i\varphi_{Ring}}}{1 - t_{rr} \cdot a_{Ring} \cdot e^{i\varphi_{Ring}}}, \quad (3)$$

میدان اپتیکی عبوری از بازوی اصلی تداخل سنج ماخزندر به صورت معادله ۴ محاسبه می‌شود.

$$t_u = a_{VOA} \cdot a_{wg} \cdot e^{i(\varphi_{PS} + \varphi_{VOA} + \varphi_{wg})}, \quad (4)$$

که a_{wg} و a_{VOA} به ترتیب نشان دهنده عامل اتلاف مربوط به کاهش دهنده نوری و موجبر هستند. φ_{PS} و φ_{VOA} و φ_{wg} هم به ترتیب فازهای تغییر دهنده فاز، کاهش دهنده نوری و موجبر هستند. در نهایت تابع انتقال میدان اپتیکی به صورت معادله ۵ خواهد شد.

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{1}{r} (t_u + t_b), \quad (5)$$

۴. تشدید و مدولاسیون

بنا به اختلاف فاز بین دو بازوی تداخل سنج ماخزندر، قطعه می‌تواند شکل خط‌های متفاوتی را نمایش دهد. به طور خاص اگر φ_1 و φ_2 فاز بازوهای تداخل سنج ماخزندر باشند،

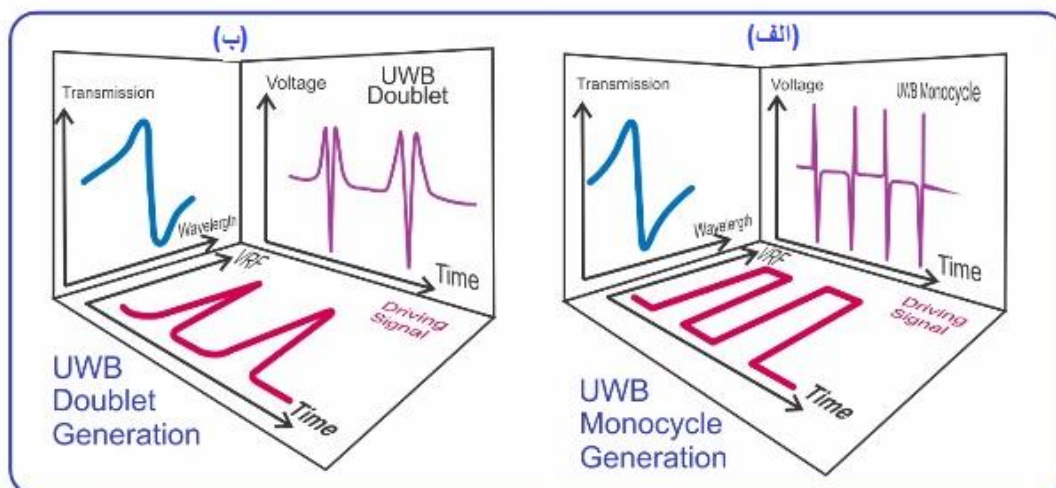
تغییر دهنده فاز به وسیله یک گرمکن سیلیکونی مقاوم کوچک، که یک ورقه سیلیکونی است که N^{++} در آن آلییده شده، فعال می‌شود؛ همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. بعد از عبور جریان، دمای موجبر سیلیکونی همسایه بالا می‌رود که به افزایش ضریب شکست موثر و در نتیجه آن به فاز پرتو نوری منجر می‌شود. اختلاف فاز بین بازوهای تداخل سنج ماخزندر، شکل خط تشدید را در یک طول موج خاص تعیین می‌کند [۲۹] و [۳۰]. برای به دست آوردن یک بازده مدولاسیون بالا، پیوند PN سطح مقطع L شکل دارد تا برهم‌نهی بین مد نوری و ناحیه تخلیه پیوند PN بیشینه شود [۳۱].

۳. مدل‌سازی و فرمولبندی

ما از روش ماتریس انتقال برای مدل‌سازی این طرحواره استفاده می‌کنیم. عبور میدان نوری از میان جفت کننده تداخل سنج ماخزندر به صورت معادله ۱ توصیف می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_r \end{bmatrix} &= M_{DC} \cdot M_{MZI} \cdot M_{DC} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} t & i\kappa \\ i\kappa & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t & i\kappa \\ i\kappa & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} t_{11} & k_{1r} \\ k_{r1} & t_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_r \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن a_i و b_i ($i=1,2$) به ترتیب نشان دهنده میدان نور در درگاه ورودی و خروجی هستند، κ و t ضریب جفت‌شدگی و ضریب عبور جدا کننده ورودی و پیونددهنده خروجی تداخل سنج ماخزندر هستند. $\kappa^2 + t^2 = 1$ برای جفت‌شدگی بدون اتلاف و φ_i فاز بازوی تداخل سنج ماخزندر است.



شکل ۲. نمایش اصول کار برای تولید (الف) پالس‌های تک‌چرخه‌ای باند فرایهن و (ب) پالس‌های دوتایی باند فرایهن.

بازوهای تداخل‌سنج ماخ‌زندر، شکل خط تشدید با توجه به طول موج تغییر می‌کند و یک چرخه تکامل تشدید را بین طول‌موج‌های ۱۵۵۱ نانومتر و ۱۵۶۳ نانومتر پوشش می‌دهد. محدوده طیف آزاد تشدید، ۰/۴۸۶ نانومتر است. شکل خط‌های تشدید متقارن و همچنین نامتقارن را می‌توان در طیف مشاهده کرد. در تشدید نامتقارن، تغییرات ضریب خاموشی قله تا دره به اندازه بیشتر از ۲۰ دسی‌بل است.

۶. تولید پالس‌های باند فرایهن

ما یک سیستم تجربی برای تولید پالس‌های باند فرایهن مبتنی بر اصول عملکردی که در بالا توضیح داده شد، طراحی و اجرا کردیم که در شکل ۴ نشان داده شده است. نور از یک لیزر پیوسته قابل تنظیم (EXFO T100S-HP) (دارای توان خروجی بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌وات و طول موج ۱۲۴۰ تا ۱۶۸۰ نانومتر) عبور کرده و پیش از این که با قطعه جفت شود، وارد یک کنترل‌کننده قطبش می‌شود. پالس‌های مربعی یا گوسی با طول موج رادیویی توسط یک مولد شکل‌موج اختیاری (AWG, SHF ۱۹۱۲۰ B) تولید و به کمک یک تقویت‌کننده بسامدهای رادیویی (Broadband Amplifier, SHF ۸۱۰) تقویت و سپس از طریق یک سوئیچ تی با ولتاژ سوئیچ‌دهنده مستقیم ترکیب می‌شوند پیش از این با یک کاوشگر ریزموج ۴۰ گیگا هرتزی برای مدوله سازی الکترواپتیکی به الکترونود موجبر قطعه اعمال

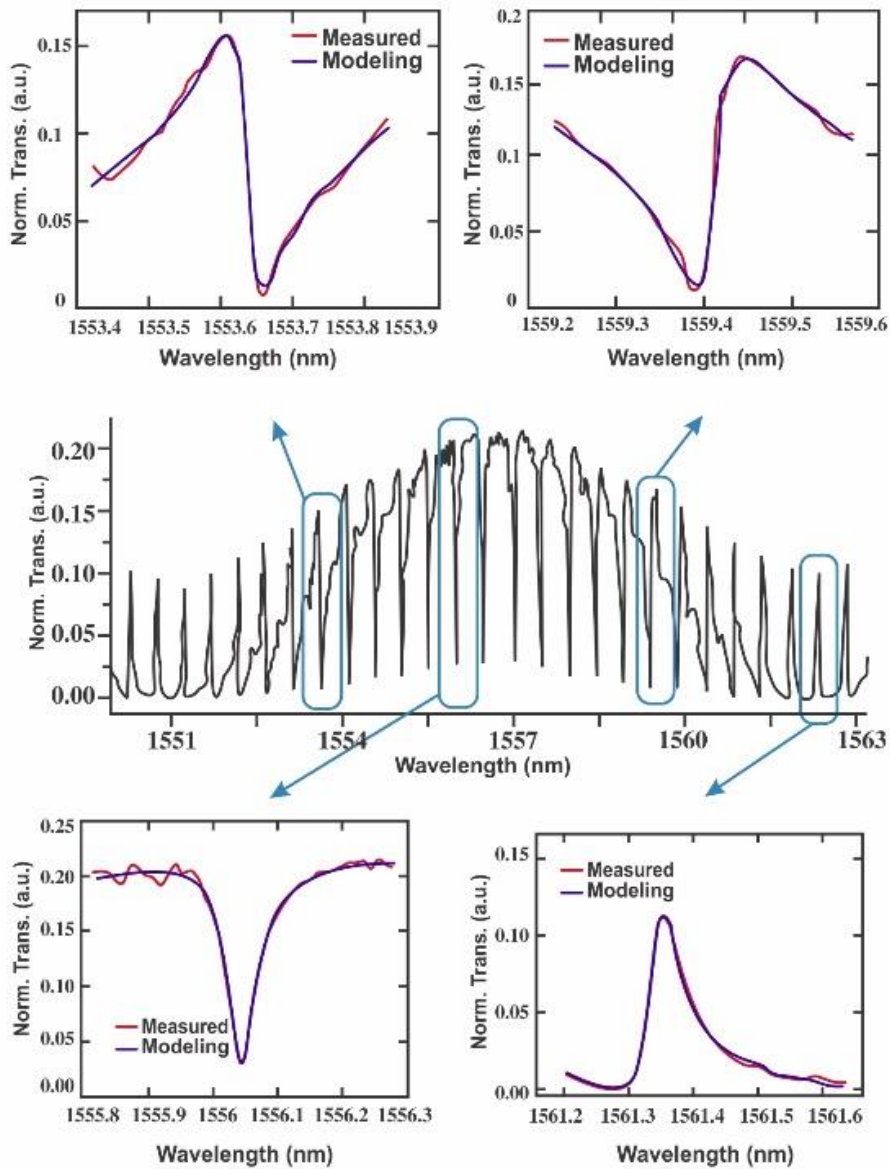
تشدیدهای زمانی تولید می‌شوند که فاز مسیر تشدید با فاز بازوی دیگر که مرجع است به اندازه $\pi/2$ یا $3\pi/2$ اختلاف دارد؛ یعنی

$$|\phi_1 - \phi_2| = \pi/2 \quad \text{یا} \quad 3\pi/2$$

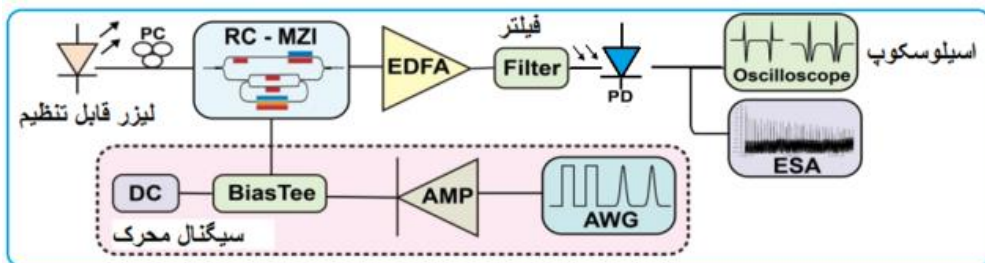
در تشدیدها، طیف خروجی شکل خط‌های نامتقارن تشدید را نشان می‌دهد [۲۹ و ۳۰]. بعد از اعمال یک سیگنال محرک رادیویی بر پیوند PN، پالس‌های باند فرایهن با مدوله‌کردن در تشدید به وجود می‌آیند. همانطور که در شکل ۲ الف ترسیم شده است، طیف تشدید در پاسخ به سیگنال محرک الکترونیکی به عقب و جلو حرکت می‌کند. نقطه عملکرد در طیف به طور مؤثر در لبه بالا یا پایین رفتن سیگنال محرک مربعی حرکت می‌کند. در نتیجه با دنبال کردن شکل خط تشدید، توان اپتیکی خروجی هم متعاقباً تغییر کرده و یک جفت پالس باند فرایهن تک‌چرخه‌ای در قطب‌های مخالف در حوزه زمان تولید می‌کند. زمانی که سیگنال محرک رادیویی یک پالس گوسی باشد، قطعه یک سیگنال دوتایی باند فرایهن را مانند شکل ۲ ب تولید می‌کند.

۵. اندازه‌گیری و نتایج

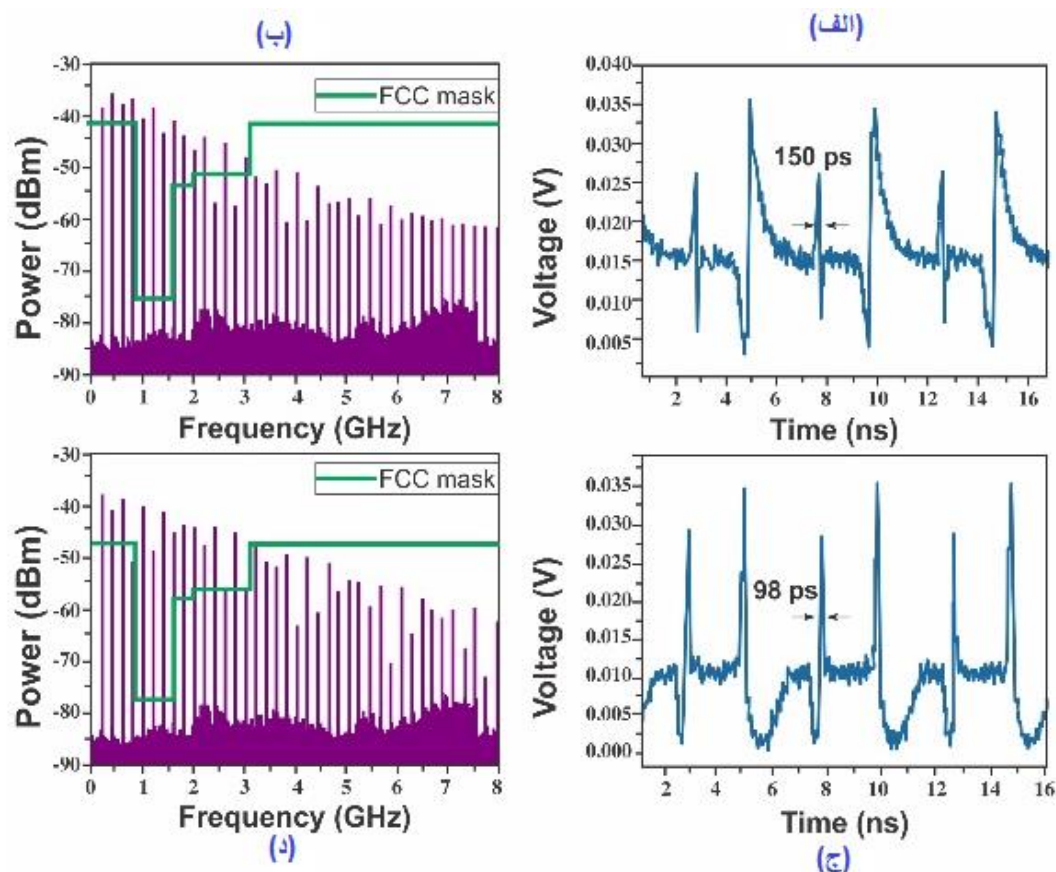
ما در ابتدا طیف عبور دستگاه را همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اندازه‌گیری کردیم. به دلیل اختلاف طول



شکل ۳. عبور اندازه‌گیری شده طیف تداخل سنج ماخ‌زندر با یک تشدیدگر حلقه‌ای کوچک در یک چرخه تکامل تشدید. الحاقیات، طیف تشدید بزرگنمایی شده در طول موج‌های مختلف را نشان می‌دهند. طیف مدل‌سازی شده هم نشان داده شده است.



شکل ۴. چیدمان تجربی برای تولید و مشخصه‌یابی سیگنال‌های باند فراپهن.

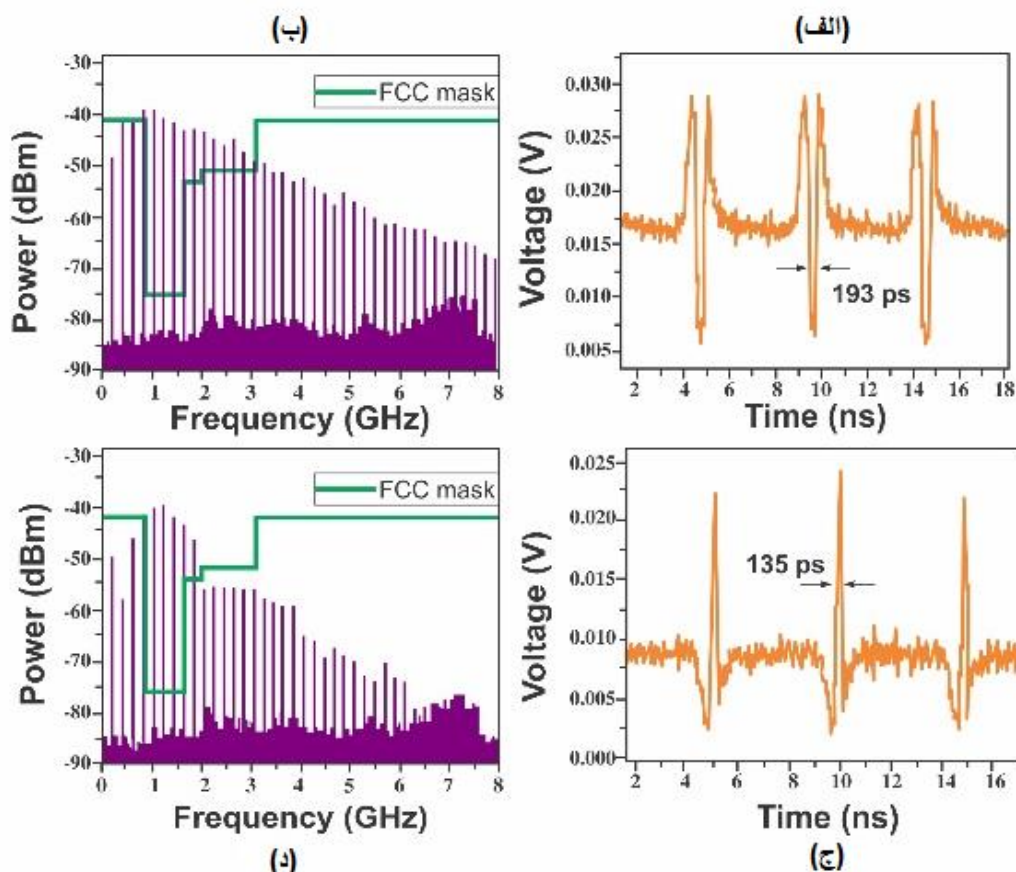


شکل ۵. تولید پالس‌های تک‌چرخه‌ای باند فرایهن. (الف) پالس‌های تک‌چرخه‌ای در طول موج تشدید که برابر $1548/93$ نانومتر است، (ب) طیف الکتریکی آن. (ج) پالس‌های تک‌چرخه‌ای در طول موج تشدید که برابر $1553/74$ نانومتر است و (د) طیف الکتریکی آن.

کار می‌کند تا از بازدهی مدولاسیون بالای آن بهره برده شود. سیگنال تک‌چرخه‌ای باند فرایهن، طول پالسی به اندازه تقریبی 150 پیکوثانیه در لبه صعودی سیگنال رادیویی دارد. از آنجایی که به دلیل اختلال در شکل موج از مولد موجبر دلخواه، لبه نزولی سیگنال محرک از لبه صعودی آن آهسته‌تر است، یک پالس تک‌چرخه‌ای باند فرایهن پهن‌تر در قطب مخالف تولید می‌کند. شکل ۵. ج پالس‌های تک‌چرخه‌ای باند فرایهن حاصل شده را در زمانی که قطعه روی طول موج $1553/74$ نانومتر مدوله شده است، نشان می‌دهد. طول پالس تقریباً 98 پیکوثانیه است. شکل‌های ۵. ب و ۵. د طیف‌های بسامد رادیویی از شکل موج‌های باند فرایهن را نشان می‌دهند. خطوط جدا شده بسامدی به فاصله 200 مگاهرتز هم قرار دارند که برابر نرخ تکرار پالس‌های تک‌چرخه‌ای است. زمانی که سیگنال محرک رادیویی به پالس‌های گوسی تغییر پیدا کند، می‌توان پالس‌های

شوند. انتهای دیگر الکتروود موجبر با یک مقاومت 50 اهمی به منظور تطبیق مقاومتی بسته می‌شود. سپس خروجی سیگنال نوری مدوله شده از قطعه به کمک یک تقویت کننده فیبری که در آن اریوم آلائیده شده است، تقویت می‌شود تا اتلاف درون قطعه را جبران کند و در ادامه یک فیلتر با پهنای باند 3 نانومتر قرار داده می‌شود تا اختلال گذار خودبه‌خودی تقویت شده را از بین ببرد. دست آخر، سیگنال نوری توسط یک آشکارساز نوری دریافت می‌شود و با کمک اسپلوسکوپ و یک تحلیل‌گر طیف الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود.

شکل ۵. الف تک‌چرخه‌ای‌های باند فرایهن را که در طول موج $1548/93$ نانومتر تولید شده‌اند، نشان می‌دهد. سیگنال محرک مربعی بسامد برابر 200 مگاهرتز و در حوزه رادیویی و چرخه عملکرد 35 درصدی دارد. نوسان ولتاژ از $0/94$ - ولت تا $2/76$ ولت است. پیوند PN معمولاً در ناحیه سوئیده مستقیم



شکل ۶. تولید پالس‌های دوتایی باند فرابنفش. (الف) پالس‌های دوتایی در طول موج تشدید که برابر $1548/93$ نانومتر است، (ب) طیف الکتریکی آن، (ج) پالس‌های دوتایی در طول موج تشدید که برابر $1553/74$ نانومتر است و (د) طیف الکتریکی آن.

تداخل بین سیگنال‌های باند فرابنفش و سیگنال‌های بی‌سیم دیگر کاهش پیدا می‌کند [۱۸].

۷. نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک قطعه تداخل‌سنج ماخ‌زندر با یک تشدیدگر حلقه‌ای کوچک، با قابلیت تغییر پیکربندی بر روی بستر فوتونیک سیلیکون، استفاده شده است. این قطعه توانایی ایجاد تشدیدهایی و با شکل خط‌های نامتقارن را به وسیله تنظیم اختلاف فاز مناسب بین دو بازوی تداخل‌سنج ماخ‌زندر دارد. تشدید به وسیله یک سیگنال رادیویی مدوله می‌شود که پیوند PN را در تشدیدگر کوچک حلقه‌ای تحریک می‌کند و منجر به تولید سیگنال‌های نوری تک‌چرخه‌ای و سیگنال نوری دوتایی باند فرابنفش می‌شود. برای به دست آوردن سیگنال‌های باند

دوتایی باند فرابنفش تولید کرد. بسامد پالس‌های گوسی برابر 200 مگاهرتز و چرخه عملکرد آنها 15 درصد است. همچنین نوسان ولتاژ آنها از -1 تا $3/7$ ولت است. شکل ۶ سیگنال‌های دوتایی باند فرابنفش و طیف رادیویی مربوط به آنها را نشان می‌دهد. شکل ۶ الف سیگنال دوتایی باند فرابنفش را که در طول موج $1548/93$ نانومتر تولید شده‌اند، نشان می‌دهد و شکل ۶ ج پالس‌های دوتایی باند فرابنفش حاصل شده را در زمانی که قطعه روی طول موج $1553/74$ نانومتر مدوله شده است، نشان می‌دهد. شکل‌های ۶ ب و ۶ د طیف‌های بسامد رادیویی از شکل موج‌های باند فرابنفش را نشان می‌دهند. خطوط جدا شده بسامدی به فاصله 200 مگاهرتزی هم قرار دارند که برابر نرخ تکرار پالس‌های تک‌چرخه‌ای است. مراتب بالاتر پالس باند فرابنفش پتانسیل بهتری برای کاربردهای مخابراتی دارند زیرا

فناوری امیدوار کننده در عصر اینترنت اشیا ۵ گیگی است که کاربردهای آن شامل اتوماسیون صنعتی، شبکه حسگری، اتوماسیون منازل/ محیط کار و موقعیت یابی دقیق داخلی می شود.

فراپهن در قطب مخالف، می توان در تشدید نامتقارن دیگر آنها را مدوله کرد. حتی پالس های باند فراپهن مراتب بالاتر هم قابل تولید است؛ اگر سیگنال محرک را با نوسان ولتاژ بیشتری زیاد کنیم. فناوری باند فراپهن از لحاظ دقت، مصرف توان، توانایی در اتصال بی سیم و امنیت عملکرد بسیار خوبی دارد. این یک

مراجع

18. H Feng et al., *IEEE Photonics Journal*, **6**, 2 (2014) 1.
19. M Hongqian, W Muguang, and J Shuisheng, 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), (2016).
20. L Tsung-Yang et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **19**, 2 (2013) 8200312.
21. S T Abraha, C M Okonkwo, E Tangdionga, and A M Koonen, *Optics letters*, **36**, 12 (2011) 2363.
22. B Luo, J Dong, Y Yu, and X Zhang, *IEEE Photonics Technology Letters* **24**, 18 (2012) 1646.
23. Y Yue et al., *Optics Letters*, **37**, 4, 551. Y Yue, H Huang, L Zhang, J Wang, J-Yuan Yang, O F Yilmaz, J S Levy, M Lipson, and A E Willner, *Optics Letters* **37**, 4 (2012) 551.
24. Q Wang and J Yao, *Electronics Letters* **42**, 22 (2006) 1304.
25. V Moreno, M Rius, J Mora, M A Muriel, and J Capmany, *IEEE Photonics Technology Letters* **26**, 7 (2014) 690.
26. M Rius, V Moreno, J Mora, M A Muriel, and J Capmany, 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2013,
27. H Shao, W Chen, Y Zhao, H Chi, J Yang, and X Jiang, *Optics Express* **20**, 7 (2012) 7398.
28. K Xu et al., *IEEE Photonics Technology Letters* **28**, 3 (2016) 248.
29. L Zhou and A W Poon, *Optics Letters*, **32**, 7 (2007) 781.
30. M F Limonov, M V Rybin, A N Poddubny, and Y S. Kivshar, *Nature Photonic* **11** (2017) 543.
31. G. Zhou, L. Zhou, Y. Zhou, Y. Zhong, S. Liu, Y. Guo, L. Liu, J. Chen, "Silicon Mach-Zehnder modulator using a highly-efficient L-Shape PN junction" Tenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2018).
1. D Marpaung, J Yao, and, J Capmany, *Nature Photonics* **13**, 2 (2019) 80.
2. W Zhang and J Yao, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **52**, 1 (2016) 1.
3. J Yao, F Zeng, and Q Wang, *Journal of Lightwave Technology* **25**, 11 (2007) 3219.
4. Q Sun, L Zhou, L Lu, G Zhou, and J.Chen, *IEEE Photonics Journal* **10**, 6 (2018) 6602612.
5. R Yang, L Zhou, M Wang, H Zhu, and J Chen, *Frontier of optoelectronics* **9**, 3 (2016) 483.
6. Y Zhong et al., *Photonics Research* **5**, 6 (2017) 689.
7. L Zhuang, C G H Roeloffzen, A Meijerink, M Burla, and W C V Etten, *Journal of Lightwave Technology* **28**, 1 (2009) 19.
8. J Yao, *IEEE Microwave Magazine*, **10**, 4 (2009) 82.
9. F Li, , Chips on indoor positioning and navigation, the key technology of intellectual devices of next generation. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/Vs wdBtAifrp69t7xG-ppw> (2019).
10. Fed. Commun. Commission, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, Apr. 2002. Tech. Rep., ET-Docket 98-153, FCC02-48.
11. FIRA. What UWB Does. Available: <https://www.firaconsortium.org/discover/what-uwb-does>.
12. J Li et al., *Optics Letters* **33**, 3 (2008) 288.
13. E Zhou, X Xu, K Lui, and K K. Wong, *IEEE Photonics Technology Letters* **22**, 14 (2010) 1063.
14. L Pengxiao, C Hongwei, C Minghua, and X Shizhong, *IEEE Photonics Journal* **4**, 3 (2012) 805.
15. , F Zeng and Y Jianping, *IEEE photonics technology letters* **18**, 19 (2006): 2062-2064.
16. Q Wang and J Yao, *Optics Express* **15**, 22 (2007) 14667.
17. M Shehata, H Mostafa, and Y Ismail, *Journal of Lightwave Technology* **36**, 10 (2018) 2017.