آرایه سنسور فیبر کریستال فوتونیکی

مهران کریمیان ریزی[۱]، مریم فریور[۲]، سیدپرویز موسوی[۳]

۱ دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز،ایران، mehrankarimian97@ms.tabrizu.ac.ir
[۲] مربی سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور، شاهین شهر، ایران، farivar.maryam@yahoo.com
[۳] مربی سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور، همدان، ایران، ip.adrapana2@gmail.com

چکیده: یک روش جایگزین برای ساختن نقطه و آرایه سنسور بر اساس فیبرهای کریستال فوتونیکی (***PCFs***) ارائه می شود. یک طول کوتاه (در محدوده ***mm*** ۱۲-۹) از ***PCF*** با انتخاب درست ضریب شکست، بین فیبرهای تک مد متداول به صورت پخشی بهم متصل می شود. با برانگیختگی و هم پوشانی گزینشی مدهای خاص در ***PCF***، ما طیف های گذار سنسورها را می سازیم تا یک شکاف منفرد و نازک را نمایش دهیم. مکان شکاف با آشفتگی خارجی تغییر می کند که امکان آشکارسازی پارامترهای مختلف را به دست می دهد. شکاف منفرد خوش تعریف، نسبت اطفاء (***extinction***) که بیش از ***dB*** ۳۰ است و نیز اتلاف جایگذاری کلی امکان قرار دادن سنسورها به صورت سری را فراهم می کنند. این پیاده سازی شبکه های سنسوری را ممکن می سازد

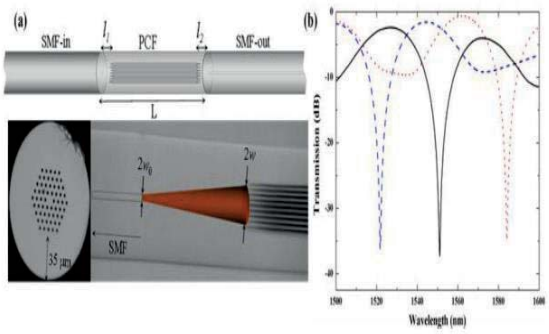
کلید واژه‌ها: *فیبرهای کریستال فوتونیکی، فیبرهای میکروساختار، سنسورهای فیبر نوری، حشگر و سنسورهای اپتیکی، تسهیم*

۱.مقدمه

سنسورهای فیبر نوری یک یا تنها راه حل مطمئن مخابره در موارد خاص هستند (مثلا در محیط هایی با مخاطره الکتریکی یا انفجار احتمالی). به علاوه سنسورهای فیبر نوری یک انتخاب مرجح در مواقعی هستند که چندبرابر کردن ظرفیت، حساسیت بالا و کاهش اندازه لازم هستند. مثلا قابلیت تسهیم سنسورهای فیبری امکان نظارت رفتار فردی چند سنسور واقع در شبکه ای با یک تک واحد تحقیق فراهم می سازد. این طراحی یک شبکه سنسوری را ساده کرده و هزینه آن را به حداقل می رساند.

سنسورهای مبتنی بر فیبرهای نوری سنتی بخوبی بررسی شده اند در حالی که سنسورهای مبتنی بر فیبرهای کریستال فوتونیکی (PCFs) توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده اند. PCFs فیبرهایی با ویژگی های نوری منحصربفرد هستند که میکروساختاری پریودیک در تمام طول فیبر دارند. مشخصات مدی و هدایتی آنها PCFs را برای حسگرهای نوری جذاب ساخته است. تا اینجا تعدادی از سنسورهای PCF ارائه شده اند ولی ما معتقدیم که سنسورهای مبتنی بر توری های براگ، توری های با پریود طولانی و تداخل سنج ها به دلیل قدرتشان نوید بخش ترین سنسورهای برای کاربردهای عملی هستند. اغلب این سنسورها طول های چند سانتی متری دارند و عملکرد قابل توجهی نظیر پایداری زیاد در طول زمان، کار در محدوده طول موجی وسیع یا در دماهای زیاد از خود نشان می دهند. با این همه آنها معمولا به صورت سنسورهای نقطه ای یا تکی عمل می کنند. تسهیم (مخابره همزمان) سنسورهای PCF بر اساس توری ها یا تداخل سنج های پیشنهادی به دلیل سیگنال خروجی خود سنسورها، اتلاف دستگاه های PCFs غیرفعال و اتلاف اتصال سنسورهای PCF ، تا حالا به سادگی آنچه گروه های دیگر ثابت کرده اند نبوده است (۱۰ dB یا بیشتر). تسهیم سنسورهای PCF یک مرحله ضروری برای گسترده ساختن قابلیت های آنهاست. به این صروت سنسورهای PCF می توانند با همتاهای خود بر اساس فیبرهای نوری استاندارد رقابت کنند.

در این کار ما روشی را ارائه می کنیم تا سنسورهای نقطه ای PCF را بسازیم که می توانند به آسانی تسهیم شوند و آرایه ای از سنسورها یا شبکه ها را تشکیل دهند. سنسورها ساده و متشکل از یک تکه همجوشی PCF مبتنی بر ضریب شکست به درستی انتخاب شده است که بین فیبرهای تک مدی متداول (SMF) پیوند زده شده است. دستگاه های ما در دسته ی دستگاه های تک مد – چند مد – تک مدی (SMS) قرار می گیرند که متغیرهای بسیاری از آنها در مقالات ارائه شده اند. در مورد ما، خلاهای PCF روی طول مناسبی در سطح مشترک PCF-SMF مهر شده اند. این یک جابجاسازی طولی را بوجود می آورد که برانگیختگی موثر و همپوشانی مدهای خاصی را در PCF امکان پذیر می سازد. درنتیجه طیف انتقال دستگاه ها یک شکاف باریک و منفرد را در یک طول موج رزونانس نشان می دهند. تغییرات اندکی در ضریب شکست مدی یا در طول فیبر (مثلا ناشی از دما یا کشش) منجر به یک جابجایی قابل شناسایی در موقعیت شکاف خواهد شد. وقتی n سنسور در کاسکاد (اتصال آبشاری) قرار داده می شوند، انتقال سری ها، n افت (شیب) را نشان می دهد. افت ها از یکدیگر مستقل هستند درنتیجه جابجایی (شیفت) در یکی از آنها بقیه را مختل نخواهد ساخت. این امکان پیاده سازی آرایه های سنسوری ساده ی مبتنی بر PCF ولی عملی رافراهم می سازد. دمدولاسیون (demodulation) آرایه ، ساده است چون موقعیت هر شکاف را می توان با تجهیزات تجاری موجود نظیر جستجوگرها یا طیف سنج های نوری مینیاتور کنترل کرد.



شکل۱: نمایش دستگاه در طول سطح مقطع فیبر مورد استفاده در آزمایشات

ما معتقدیم که به دلیل حساسیت، تسهیم ساده، فشردگی و هزینه کم شان، سنسورهای PCF پیشنهادی در اینجا می توانند با دیگر سنسورهای PCF میتنی بر توری با تداخل سنج ها و نیز با ساختارهای SMF ساخته شده با فیبرهای سنتی رقابت کنند.

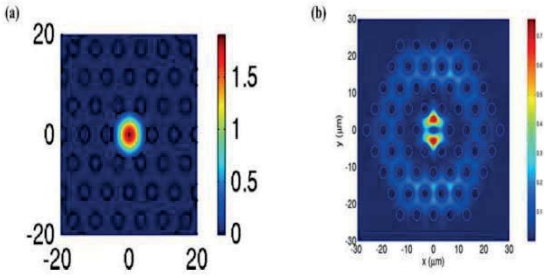
۲. ویژگی های حسگر و اصول کار دستگاه

نمایش دستگاه در طول سطح مقطع فیبر مورد استفاده در آزمایشات در شکل ۱ نشان داده شده است. فیبر یک PCF تجاری موجود است که تقارن شش تایی دارد و بعنوان PCF ناحیه- مد – بزرگ (LMA-10, NKT Photonics) معروف است. قطر هسته فیبر برابر ۱۰ μm و فضای خالی آن قطری برابر ۳,۱ μm دارد (با دوره ۶,۶ μm و قطر خارجی ۱۲۵ μm). برای ساخت دستگاه ها، PCF و فیبر استاندارد (SMF-28) را می توان با هر ماشین همجوشی تجاری به هم متصل نمود. بطور کلی، ماشین های همجوشی دو فیبر را با انجام یک پرفیوژن که در آن فیبرها با گرمادهی کم پاکسازی می شوند، بهم متصل نمود. بعد از پرفیوژن، یک فرآیند فیوژن اصلی صورت می گیرد که در آن برای چند ثانیه دو سر فیبر در معرض یک تخلیه شدید (دمای زیاد) قرار می گیرند. در طی پروسه فیوژن (هم جوشی) اصلی، فیبر فشرده و کشیده می شود تا یک اتصال نیرومند و دائمی را شکل دهد. به دلیل ساختار حفره ای، نقطه نرم شدن PCF ها کلا کمتر از SMF هاست. از این رو اگر یک SMF و یک PCF یا یک برنامه پیش فرض برای پیوند فیبرهای تک مدی بهم متصل شوند، حفره های هوای PCF کلا در طول خاصی از بین می روند. در اغلب ماشین های اتصال، شدت و مدت تخلیه قوسی مربوط به پروسه فیوژن اصلی را می توان تنظیم نمود. درنتیجه می توان طول ناحیه از بین رفته (collapsed) در PCF را کنترل کرد. ما مجموعه ای از نمونه ها را با ماشین اتصال فیوژنی تجاری ساختیم (Ericsson FSU 955). برای کنترل طول ناحیه از بین رفته ما از تکنیک

گزارش شده در مرجع ۲۵ پیروی کردیم. ما دریافتیم که وقتی نواحی از بین رفته طول های متفاوت داشتند (مثلا 10± 200~ µm در سطح مشترک داخل PCF-SMF و 10 ± 110~ µm در سطح مشترک خارج PCF-SMF)، طیف انتقال (گذار) دستگاه یک شکاف منفرد و عمیق را نشان می دهد (شکل ۱). می توان از شکل مشاهده کرد که شکاف ها بسیار باریک هستند و اتلاف اتصالی حول طول موج رزونانس ، کوچک است. توجه کنید که مکان شکاف را می توان با طول PCF کنترل کرد. بعدا ما خواهیم دید که این ویژگی ها تسهیم دستگاه ها را ساده می سازد.

به منظور توضیح رفتار دستگاه ها تحول انتشار پرتو را در حین عبور از داخل SMF (داخل PCF به خارج SMF) در نظر بگیرید. وقتی مد اصلی درون SMF وارد ناحیه از بین رفته ی PCF می شود، بلافاصله ضروع به پراش می کند و درنتیجه مد پخش می شود. اگر w_0 اندازه لکه در سطح مشترک SMF-in-PCF در طول موج λ باشد (شکل ۱)، درنتیجه بعد از انتشار در طول ۱۱ ناحیه از بین رفته، اندازه لکه برابر زیر خواهد بود:

$$w = w_0\sqrt{1 + (\mu l_1/\pi n_f w_0^2)^2}$$



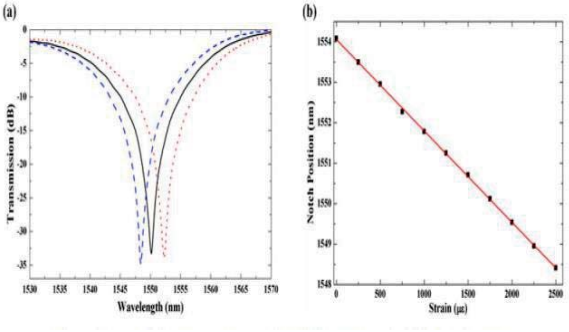
شکل ۲: ما مولفه طولی محاسبه شده ی بردار پیونتینگ در میانگین زمانی

که در آن nf ضریب شکست ناحیه از بین رفته (فیبر سیلیکایی جامد) است. فرض کنید مقادیر واقعی بصورت زیر باشند:

λ = 1550 nm, l1 = ~200 µm, nf = 1.444 (silica), و w0 = 5 µm. تحت این شرایط، PCF با یک پرتو گاوسی برانگیخته خواهد شد که اندازه آن برابر 2w = ~30 µm است یعنی با لکه نوری بزرگتر از اندازه هسته PCF. عدم انطباق میدان مدی با مشخصات مدی PCF امکان برانگیختگی مدهای خاصی در PCF را فراهم می آورد. بعلت تقارن محوری و جابجایی طولی خاص از ناحیه از بین رفته، مدهای برانگیخته مدهایی هستند که تقارن سمتی مشابهی دارند، یعنی مد هسته HE11 و احتمالا مد روکش شبه HE22 (رزونانس مد روکش شبه HE22). برای تقویت این مکانیسم، در شکل ۲ ما مولفه طولی محاسبه شده ی بردار پیونتینگ در میانگین زمانی را برای مد اصلی هسته و مد شبه HE22 روکش نشان می دهیم که هر دو برای یک طول موج λ = 1550nm هستند. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار تجاری (Comsol Multiphysics) انجام شدند. از شکل ۲ می توان ملاحظه نمود که میدان مد شبه HE22 به کل ناحیه مد هسته نفوذ می کند؛ بنابراین قویا با مد اصلی هسته هم پوشانی می کند.

مدهای برانگیخته وقتی پهن می شوند که به دلیل پراش وارد ناحیه از بین رفته در قسمت بیرونی PCF-SMF شوند. نوع مدهای برانگیخته در PCF همراه با پهن شدگی مناسب مدها (یعنی طول مناسب ناحیه از بین رفته در PCF)، یک شکاف تک شیب در گذار دستگاه ایجاد می کند. بطور تجربی مشاهده شد که وقتی طول ناحیه از بین رفته در بخش بیرونی PCF-SMF برابر 10 ± 110 µm~ بود (یعنی کوتاهتر از دیگر ناحیه از بین رفته)، دستگاه ها طیف های گذار مشابه شکل ۱ را به دست دادند. بنابراین ما نتیجه می گیریم که شیب ها در طیف های گذار نتیجه ای از همپوشانی بین مدهای برانگیخته در PCF هستند. باید خاطرنشان کرد که دستگاه های ما با دستگاه های مبتنی بر ساختارهای SMS ای که تاکنون گزارش شده فرق دارند (۹-۱۱، ۱۵-۲۴). آن دستگاه ها نیز با اتصال یک قطعه فیبر با نوع دیگری فیبر ساخته شدند. در این ساختارها دو یا چند مد با فیبر متصل شده در نخستین پیوندگاه جفت می شوند. در دومین پیوندگاه، مدها دوباره ترکیب می شوند. اگر دو مد برانگیخته شوند و بازترکیب شوند، طیف انتقال ساختار SMS یک الگوی سینوسی را نشان خواهد داد. با این حال اگر چند مد برانگیخته و بازترکیب شوند، یک تک پیک یا شکاف

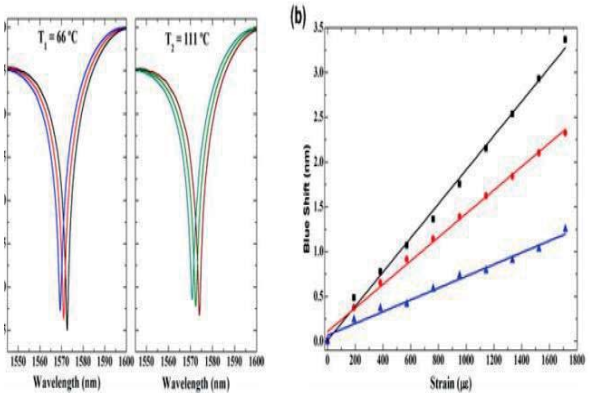
(معمولا پهن) مشاهده می شوند. تفاوت دیگر دستگاه های ما با دیگر ساختارهای SMF تاکنون ارائه شده، طول کلی و فقددان جایگذاری آنهاست. در نمونه ما طول دستگاه های ما حدود ۱ سانتی متر است در حالی که دیگر ساختارهای SMF چند سانتی متر درازا دارند. اتلاف ها در نمونه ما کمتر از dB ۲ است، در مقابل بیش از dB ۱۰ در برخی نداخل سنج های مبتنی بر PCF. ما معتقدیم که همه این تفاوت ها و مزایا به واسطه ویژگی های مدی PCF است.



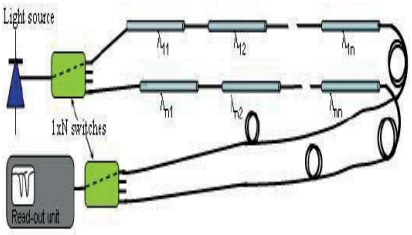
شکل۳: طیف های انتقال یک دستگاه به طول ۱۲ میلی متر

مشخصات حسگری دستگاه های منفرد نخست بررسی شد (بویژه کشش و دما). اصولا این پارامترها تغییرات اندکی را در طول دستگاه یا در ضاخص مدی بوجود می آورند که منجر به تغییرات اندک در شرایط همپوشانی می شود. درنتیجه مکان شکاف ها تغییر می یابد. با ارتباط دادن مکان شکاف به پارامتری که دریافت می شود، یک منحنی کالیبراسیون را می توان به دست آورد. شکل ۳ طیف های انتقال مشاهده شده یک دستگاه به طول ۱۲ میلی متر قرار گرفته در معرض کشش انبساطی محوری را نشان می دهد. شیفت های شکاف به سمت طول موج های کوتاهتر بدون تغییر زیاد در شکل آن دیده می شود. همچنین شکل مکان شکاف را به صورت تابعی از کشش وارد شده نشان می دهد. یک رفتار خطی را می توان ملاحظه نمود و فاکتورهمبستگی برابر $R^2 = 0.9996$ است. حساسیت کشش برابر 2.2 pm/με است که این مقدار حدود ۲۰۰٪ بیشتر از مورد یک FBG معمول است و تقریبا برابر دیگر سنسورهای کششی PCF مبتنی بر توری ها یا تداخل سنج هاست که کلا پیچیده تر یا بسیار طولانی تر هستند. با طیف سنج های مینایتوری موجود یا تحقیق کننده ها (جستجوگرها)ی FBG، یک شیفت ۲۰ پیکومتری را می توان شناسایی نمود. از این رو رزولوشن کشش براوری برای دستگاه ۱۲ میلی متری برابر με ~10 است. با این همه در شرایط عملی، رزولوشن به دستگاه جستجوگر یا به مکانیسم رمزگشایی شیفت آن شکاف بستگی دارد. باید توجه نمود که چند پارامتر فیزیکی نظیر میدان های الکتریکی، فشار، ارتعاش، بار، شیب و غیره را می توان به تغییر کشش تعبیر نمود. دستگاه های ما به اندازه کافی نیرومند هستند که این پارامترها را دریافت کنند. همانند سنسور نقطه ای، آنها می توانند اندازه گیری های رزولوشن بالا و مطلقا طول موج کدگذاری شده را به دست دهند. بنابراین دستگاه ها در این کار می توانند در کاربردهای مختلفی مفید باشند.

بستگی دمایی دستگاه ها نیز تحقیق شده است. دریافته شد که هر چه دما بالاتر باشد، طول موج شکاف بلندتر است. حساسیت دمایی مشاهده شده در محدوده pm/°C ۹-۷ بود که به طول دستگاه بستگی دارد. بنابراین تاثیر بر حساسیت کشش یک دستگاه در دمای متفاوت نیز بررسی شد. شکل ۴ طیف های انتقالی یک دستگاه ۹/۵۲ میلی متری را وقتی در معرض کشش انبساطی محوری قرار گرفته و دمای محیط ۶۶ یا ۱۱۱°C بود، نشان می دهد.



شکل۴: طیف های انتقال یک دستگاه به طول ۹.۵۲ میلی متر

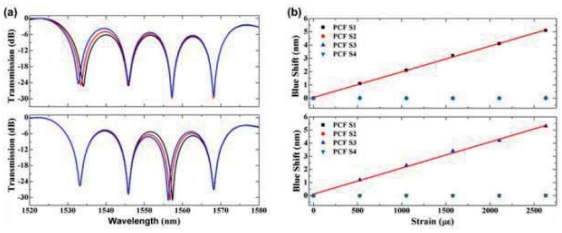


شکل۵: یک طرح پیشنهادی را برای تسهیم سنسورها

رفتار خطی در هر دمایی در محدوده آنالیز شده حفظ می شود درحالی که حساسیت کشش با افزایش دما کاهش می یابد. این قابل انتظار بود چون کشش و دما جابجایی های طول موج شکاف با علامت مخالف را بوجود می آورند.

۳. قابلیت تسهیم

جامعه سنسور متوجه شد که قابلیت تسهیم سنسورهای فیبری یکی از اصلی ترین مزایای آنهاست. این قابلیت امکان کنترل چند نقطه حسگر را با یک تک واحد جستجو (مثلا متشکل از یک تک منبع نور و یک طیف سنج نوری مینیاتوری) فراهم می کند، از این رو هزینه و پیچیدگی یک آرایه سنسور را کاهش می دهد. اغلب سنسورهای مبتنی بر SMS پیشنهادی تا اینجا، طیف های انتقالی یا بازتابشی با یک سری ماکزیمم و مینیمم یا شکاف ها/شیب های پهن را نشان می دهند که تسهیم انها دشوار است. مثلا تداخل سنج های PCF ، الگوهای تداخل سینوسی بروز می دهند در حالی که PCF های با تغییرات پریودیک در ساختارشان معمولا شیب های پهن و غیرمعمول دارند. درنتیجه وقتی چند تا از این سنسورها یکی بعد از دیگری به شکل آبشار می شوند، یک همپوشانی از پیک ها یا شیب ها می توانند رخ دهند که طرح های دمدولاسیون پیچیده یا قیود شدیدی را در ساخت دستگاه ها را تحمیل می کنند. مشابه شکل ۱، دستگاه های ما یک شیب منفرد و باریک را در انتقالشان نشان می دهند. بنابراین تسهیم کاملا سرراست و ساده است (با تنظیم n سنسور در یک فیبر، n شیب قابل پیش بینی است). شکل ۵ یک طرح پیشنهادی را برای تسهیم سنسورها نشان می دهد. در یک فیبر، n سنسور را می توان به صورت سری قرار داد که در همه آنها می توان همزمان جستجو انجام داد. برای افزایش تعداد سنسورها در آرایه، دو سوئیچ را می توان به کار برد. برای اثبات مفهوم بالا، چهار سنسور به صورت سری قرار داده شدند و فاصله بین سنسورهای متوالی حدود ۵۰ سانتی متر بود. برای تایید عملکرد سنسورها به صورت سری، هر سنسور مستقلا در معرض کشش انبساطی محوری قرار داده شد. شکل ۶ (الف) طیف های انتقال شکل یافته ی سری ها را وقتی یک سنسور تحت کشش و بقیه در حالت عادی بودند را نشان می دهد. شیفت تنها در یک شیب مشخص است، بقیه شیب ها کاملا بدون تغییر باقی ماندند. شکل ۶ (ب) شیفت های مشاهده شده را به صورت تابعی از کشش وارد شده در چهار سنسور سری نشان می دهد.



شکل ۶: الف) طیف های انتقال شکل یافته ی سری ها
ب) شیفت های مشاهده شده را به صورت تابعی از کشش وارد شده در چهار سنسور سری

به علت فشردگی دستگاه ها، فاصله بین نمونه های متوالی می تواند به اندازه چند سانتی متر باشد (~4-6 cm) به شرطی که مدهای روکش SMF بین PCF نواربندی شده باشند. با این همه در عمل، بسته بندی می تواند قیودی را در تفکیک بین سنسورهای متوالی تحمیل نماید. تعداد ماکزیمم سنسورهایی که می توان بطور سری قرار داد به عواملی از جمله گستره طول موجی منبع نور، پارامتر دریافتی، محدوده مورد اندازه گیری و اتلاف های کلی بستگی دارد. محدوده اندازه گیری، ماکزیمم شیفت مورد انتظار را تحمیل خواهد کرد در عین این که اتلاف ها بودجه توانی را تعیین می کند. مثلا اگر پارامتر اندازه گیری، کشش باشد و محدوده (برد) مورد نظر ۱۰۰۰ ±με باشد، حداکثر شیفت ۳± nm را باید فرض نمود تا از همپوشانی بین شکاف های متوالی جلوگیری کرد. برای برآورد تعداد واقعی سنسورهایی که می توان به طور سری قرار داد، فرض کنید که اتلاف اتصالی هر دستگاه برابر 3 dB باشد، یک -10dBm

LED با یک پوشش ۱۰۰ nm بعنوان منبع نور و نیز ماکزیمم شیفت مورد انتظار برابر ۵± nm باشد. در این شریاط، تقریبا ۸ سنسور را می توان کاسکاد نمود در صورتی که واحد خوانش یا جستجو قادر به کار با یک توان ورودی حدود ۶۰- dBm باشد. از این رو با دو سوئیچ 1x4، آرایه ای بیش از ۳۰ سنسور PCF را می توان پیاده سازی نمود. چنین آرایه ای می تواند در کاربردهای بسیار سودمند باشد.

۴. نتیجه گیری

ما یک سنسور فیبری همه کاره و ساده را ارائه نموده ایم که شامل تکه ای از فیوژن PCF متصل شده به فیبر تک مدی استاندارد است. دو ناحیه از بین رفته با طول های مختلف در یک PCF با ساختار مناسب امکان برانگیختگی و همپوشانی مدهای خاصی را در فیبر فراهم می کنند. طیف انتقالی حاصل دستگاه ها یک شکاف منفرد، عمیق و باریک را نشان می دهند که تغییرات مکانی آنها با اختلالات بیرونی،امکان دریافت پارامترهای مختلف را فراهم می سازد. مشابه سنسورهای نقطه ای، دستگاه های پیشنهادی جالب هستند چون آنها اطلاعات کدگذاری شد بوسیله طول موج را به دست می دهند، فشرده، بسیار حساس و مقرون به صرفه هستند. در حقیقت آنها را می توان یک جایگزین جدی برای سنسورهای PCF موجود و نیز برخی سنسورهای مبتنی بر فیبر سنتی دانست. ما معتقدیم که نتایج ارائه شده در اینجا مخصوصا قابلیت تسهیم ، بر برخی محدودیت های سنسورهای مبتنی بر PCF که قبلا گزارش شده فائق می آیند.

تسهیم سنسورهای پیشنهادی کاملا ساده است به طوری که وقتی n سنسور بطور سری قرار گیرند، n شیب (افت) در انتقال مشاهده می شود. شیب ها مستقل از یکدیگرند یعنی شیفت یکی از آنها بر موقعیت بقیه تاثیر نمی گذارد. با منابع نوری تجاری موجود، سوئیچ ها و طیف سنج ها، می توان آرایه ای را با ده ها سنسور پیاده سازی نمود. درنتیجه به کارگیری سنسورهای PCF در اینجا در کاربردهای واقعی نوید بخش به نظر می رسد.

۵. مراجع

1. J. M. Lopez-Higuera, ed., *Handbook of Optical Fiber* Sensing Technology, (Wiley, New York, 2002).

2. P. St. J. Russell, "Photonic-crystal fibers," J. Lightwave Technol. 24(12), 4729–4749 (2006).

3. Y. Zhu, P. Shum, H. W. Bay, M. Yan, X. Yu, J. Hu, J. Hao, and C. Lu, "Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber," Opt. Lett. 30(4), 367–369 (2005).

4. C. Martelli, J. Canning, N. Groothoff, and K. Lyytikainen, "Strain and temperature characterization of photonic crystal fiber Bragg gratings," Opt. Lett. **30**(14), 1785–1787 (2005).

5. Y. Wang, H. Bartelt, W. Ecke, R. Willsch, J. Kobelke, M. Kautz, S. Brueckner, and M. Rothhardt, "Sensing properties of fiber Bragg gratings in small-core Ge-doped photonic crystal fibers," Opt. Commun. **282**(6), 1129–1134 (2009).

6. V. M. Churikov, V. I. Kopp, and A. Z. Genack, "Chiral diffraction gratings in twisted microstructured fibers," Opt. Lett. **35**(3), 342–344 (2010).

7. W. J. Bock, J. Chen, P. Mikulic, T. Eftimov, and M. Korwin-Pawlowski, "Pressure sensing using periodically tapered long-period gratings written in photonic crystal fibres," Meas. Sci. Technol. **18**(10), 3098–3102 (2007).

8. L. Rindorf and O. Bang, "Sensitivity of photonic crystal fiber grating sensors: biosensing, refractive index, strain, and temperature sensing," J. Opt. Soc. Am. B **25**(3), 310–324 (2008).

9. J. Villatoro, V. P. Minkovich, V. Pruneri, and G. Badenes, "Simple all-microstructured-optical-fiber interferometer built via fusion splicing," Opt. Express **15**(4), 1491–1496 (2007).

10. J. Villatoro, V. Finazzi, V. P. Minkovich, V. Pruneri, and G. Badenes, "Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing," Appl. Phys. Lett. **91**(9), 091109 (2007).

11. W. Bock, T. Eftimov, P. Mikulic, and J. Chen, "An inline core-cladding intermodal interferometer using a photonic crystal fiber," J. Lightwave Technol. **27**(17), 3933–3939 (2009).

12. Q. Shi, Z. Wang, L. Jin, Y. Li, H. Zhang, F. Lu, G. Kai, and X. Dong, "A hollow-core photonic crystal fiber cavity based multiplexed Fabry-Pérot interferometric strain sensor system," IEEE Photon. Technol. Lett. **20**(15), 1329–1331 (2008).

13. H. Y. Fu, A. C. L. Wong, P. A. Childs, H. Y. Tam, Y. B. Liao, C. Lu, and P. K. A. Wai, "Multiplexing of polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometric sensors," Opt. Express **17**(21), 18501–18512 (2009).

14. D. Barrera, J. Villatoro, V. P. Finazzi, G. A. Cárdenas-Sevilla, V. P. Minkovich, S. Sales, and V. Pruneri, "Low-loss photonic crystal fiber interferometers for sensor networks," J. Lightwave Technol. **28**, 3542–3547 (2010).

15. K. Abe, Y. Lacroix, L. Bonnell, and Z. Jakubczyk, "Modal interference in a short fiber section: fiber length, splice loss, cutoff, and wavelength dependences," J. Lightwave Technol. **10**(4), 401–406 (1992).

16. A. Kumar and R. K. Varshney, "Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures," Opt. Commun. **219**(1-6), 215–219 (2003).

17. Q. Wang, G. Farrell, and W. Yan, "Investigation on single-mode–multimode–single-mode fiber structure," J. Lightwave Technol. **26**(5), 512–519 (2008).

18. S. Silva, J. L. Santos, F. X. Malcata, J. Kobelke, K. Schuster, and O. Frazão, "Optical refractometer based on large-core air-clad photonic crystal fibers," Opt. Lett. **36**(6), 852–854 (2011).

19. Y. Jung, S. Kim, D. Lee, and K. Oh, "Compact three segmented multimode fibre modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement," Meas. Sci. Technol. **17**(5), 1129–1133 (2006).

20. W. S. Mohammed, P. W. E. Smith, and X. Gu, "All-fiber multimode interference bandpass filter," Opt. Lett. **31**(17), 2547–2549 (2006).

21. E. Li, "Temperature compensation of multimode-interference-based fiber devices," Opt. Lett. **32**(14), 2064–2066 (2007).

22. F. Pang, W. Liang, W. Xiang, N. Chen, X. Zeng, Z. Chen, and T. Wang, "Temperature-insensitivity bending sensor based on cladding-mode resonance of special optical fiber," IEEE Photon. Technol. Lett. **21**(2), 76–78 (2009).

23. J. E. Antonio-Lopez, A. Castillo-Guzman, D. A. May-Arrioja, R. Selvas-Aguilar, and P. Likamwa, "Tunable multimode-interference bandpass fiber filter," Opt. Lett. **35**(3), 324–326 (2010).

24. H. Liu, F. Pang, H. Guo, W. Cao, Y. Liu, N. Chen, Z. Chen, and T. Wang, "In-series double cladding fibers for simultaneous refractive index and temperature measurement," Opt. Express **18**(12), 13072–13082 (2010).

25. L. Xiao, M. S. Demokan, W. Jin, Y. Wang, and C. L. Zhao, "Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect," J. Lightwave Technol. **25**(11), 3563–3574 (2007).

26. H. P. Uranus, "Theoretical study on the multimodeness of a commercial endlessly single-mode PCF," Opt. Commun. **283**(23), 4649–4654 (2010).