فیبر کریستال فوتونی دایروی ۲۶ حالته

مهران کریمیان ریزی[۱]، مریم فریور[۲]، وحید رنجبر عین الدین[۳]

[۱] دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز،ایران، mehrankarimian97@ms.tabriz.ac.ir
[۲] مربی سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور، شاهین شهر، ایران، farivar.maryam@yahoo.com
[۳]دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز،ایران، v.ranjbar98@ms.tabriz.ac.ir

چکیده: در این مقاله، طراحی جدیدی از فیبر کریستال فوتونی دایروی، که می‌تواند ۲۶OAM حالته را پشتیبانی کند، پیشنهاد شده است. تجزیه و تحلیل عددی نشان می‌دهد که فیبر پیشنهادی دارای مقادیر بسیار خوبی از پارامتر های فیبر، مانند تلفات محدودسازی[۱] پایین است که در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر، دارای مقدار کمتر از ۰/۰۰۳dB /m می‌باشد، ویژگی پراکندگی رنگی تخت که تغییرات پراکندگی آن برای حالت OAM با تعداد مرتبه $|l| \leq 4$ در محدوده طولی $39.84ps/nm/km$ در طول پهنای باند ۷۵۰ nmاز۱/۲۵ به ۲ میکرومتر می رسد و دارای ویژگی ضریب غیرخطی کوچک است و دارای مقدار کمتر از $2.08W^{-1}/Km$ برای همه حالت ها در ۱/۵۵ میکرومتر است. علاوه بر این، تأثیر تغییر شکل هندسی بر دو برابر شدن مودال فیبر پیشنهاد شده نیز مورد بحث قرار گرفته است. ثابت شده است که دو بعدی شدن مودال ناشی از تغییر شکل هندسی برای حالت های مختلف برداری، متفاوت است و در حالتی که میزان بیضویت آن کمتر از ۱/۰۸ باشد، بیشتر حالت های مرتبه بالاتر، دارای دو برابر شدن مودال دوگانه کمتری نسبت به مودهای مرتبه پایین تر می باشند.

کلیدواژه‌ها: *فیبر کریستال فوتونیک، pcf، فیبر، کریستال فوتونی*

مقدمه

ممان زاویه‌ای مداری (OAM) می‌تواند بیانگر بعد دیگری برای مالتی پلکس[۶] کردن باشد. تعامد بین هر دو حالت OAM و حالت های نظری بی نهایت آن (شار توپولوژی آن می‌تواند هر عدد صحیح مثبت و منفی به جز صفر باشد)، سبب می‌شود که مالتی پلکس کردن OAM به عنوان یکی از کاندیداهای امیدوار کننده مالتی پلکس کردن بخش فضایی در نظر گرفته شود [۱-۵]. متاسفانه، فیبر چند حالته stepindex متداول، نمی‌تواند به خوبی از انتقال حالت OAM ثابت پشتیبانی کند. بنابراین، طراحی فیبرهای نوری خاصی که بتوانند از انتقال حالت OAM پشتیبانی کنند، به امری مهم بدل شده است.

تاکنون، بسیاری از انواع فیبرهای ویژه ای که می‌توانند از انتقال حالت های OAM پشتیبانی کنند، پیشنهاد شده است، مانند فیبر بسط یافته [۶]، فیبر حلقه ای [۷-۱۰]، فیبر هسته هوایی[۱۱]، فیبر هوایی پیچ خورده [۱۲]، فیبرهای پروفیل درجه بندی معکوس سهموی [۱۳]، فیبر حلقه‌ای کمکی گودالی[۷] [۱۴] و فیبرهای چند حالته چند هسته‌ای- ممان – زاویه‌ای- مداری چندگانه (MOMCSF) [۱۵] وغیره.

فیبرهایی که در آن‌ها، حالت های OAM می‌توانند انتشار یابند، باید ضریب پراکندگی نسبتاً مسطح، مساحت موثر بزرگ و به ویژه کنتراست[۸] شاخص انکسار بالا، بین منطقه انتقال حالت[۹] و پوشش[۱۰] را داشته باشند تا ضریب پراکندگی نسبتاً تختی را داشته باشند تا بدین وسیله، تضمین شود که انتقال حالت های OAM دارای تزویج با حالت‌های LP نخواهد بود [۱۰].

[1] Multiplexing
[2] trench-assisted ring fiber
[3] Contrast
[4] Mode Transmission Region
[5] Cladding

فیبرهای OAM که در منابع ذکر شده در بالا ارائه شده‌اند، دارای پارامترهای کافی قابل تنظیم برای اطمینان از برخورداری از ویژگی‌های خوب برای حالت های OAM ذکر شده در بالا نمی‌باشند و اکثر آن‌ها باید با دقت مورد استفاده قرار گیرند [۱۰،۱۱،۱۶،۱۷]. در سال ۲۰۱۲، یانگیو و همکاران در ابتدا پیشنهاد نمودند که می‌توان از فیبر کریستال فوتونی برای پشتیبانی از انتقال حالت های OAMاستفاده کرد [۱۸]. حلقه PCF طراحی شده ازAs2S3 و سوراخ‌های هوایی، برای تحقق کنتراست شاخص مواد بزرگ استفاده می‌نماید، اما می‌تواند تنها ۲ حالت از OAM $(l = \pm 1)$ را پشتیبانی کند و دارای پراکندگی بیشتری است. علاوه بر این، انواع دیگر PCF وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای پشتیبانی از حالت OAM مانند فیبر کریستال فوتونی چند هسته‌ای [۱۹] و فیبر کریستال فوتونی پیچیده [۲۰] استفاده نمود. در این مقاله، ما یک فیبر کریستال دایروی جدید (C-PCF) ارائه می‌دهیم که دارای یک سوراخ هوایی مرکزی و چند حلقه سوراخ هوایی بیرونی به همراه یک منطقه حلقوی برای نگهداری ۲۶ حالت OAM می‌باشد که در محدوده طول موج از ۱/۲۵ تا ۱/۹ میکرومتر (۶۵۰ نانومتر) کار می‌کند. فیبر C-PCF جدید نیاز به بهبود عملکرد ندارد و دارای پارامترهای قابل تنظیم است.

در [۲۱] گایژو و همکاران به طور مستقل یک فیبر حلقه ای دارای ریزساختار[11] را ارائه داده‌اند، که در نگاه اول به نظر می‌رسد ساختار آن مشابه ساختار پیشنهاد شده در این مقاله است، اما در واقع کار آن‌ها کاملاً متفاوت است. ساختار فیبر در [۲۱] به نظر می رسد بیش از حد دارای تقارن دایروی است. برای ساختار فیبری که در [۲۱] پیشنهاد شده است، اندازه سوراخ‌های هوایی در ساختار حلقه ای ناحیه روکش متفاوت است، تا بدین وسیله، بتوان همان تعداد برابری از سوراخ‌های هوایی در حلقه‌های مختلف داشت. بنابراین، سوراخ های هوایی در حلقه داخلی، دارای ابعاد بسیار کوچکتری از حلقه بیرونی می باشند. ساخت چنین ساختاری با اندازه سوراخ های مختلف، نسبت به ساختار پیشنهادی ما، دارای دشواری هایی در ساخت می‌باشد و کارایی بهتر از آنچه که در این مقاله ارائه شده نشان نمی‌دهد. ما دریافتیم که C-PCF پیشنهاد شده در این مقاله دارای تقارن کافی دایروی برای اطمینان از انتقال پایدار حالت‌های OAM است. فیبرهای تمام- سیلیکا براگ[12] که در [۲۲] با موفقیت ساخته شده، ثابت کرد که تولید جدید C-PCFما امکان‌پذیر است.

در بخش ۲، ساختار پیشنهاد شده C-PCF توصیف خواهد شد. در بخش ۳، ویژگی‌های حالت مانند توزیع حالت، شکست انعطاف پذیر، پراکندگی کروماتیک[13]، تلفات محدودسازی، منطقه حالت موثر، ضریب غیرخطی و دو طرفه شدن معادله بحث خواهد شد.

طراحی فیبر کریستالی فوتونی دایروی پیشنهادی

ایده این موضوع که C-PCF می‌تواند به عنوان یک فیبر انتقال حالت OAM انتخاب گردد، به صورت زیر است. پایه اصلی PCF در شکل ۱(a) نشان داده شده است. با این ایده که حالت OAM می‌تواند در یک منطقه حلقه انتشار یابد، هسته و اولین سوراخ حلقه هوایی را به یک سوراخ بزرگ هوایی تعبیه شده در مرکز تغییر می دهیم و حلقه هوایی سوراخ دوم را به عنوان منطقه انتقال حالت OAM حذف می کنیم، بقیه حلقه های سوراخ هوایی به عنوان بخشی از روکش در نظر گرفته می‌شود. فیبر C-PCF طراحی شده نهایی، در شکل ۱(b) نشان داده شده است. مواد پس زمینه فیبر طراحی شده، سیلیس با شاخص شکست ۱/۴۴۴ است. پارامترهای قابل تنظیم این ساختار عبارتند از: شعاع سوراخ هوایی مرکزی r، شعاع داخلی پوشش R، قطر سوراخ های هوایی خارجی $(n = 3.4.5 \ldots .)$ d_n، فاصله بین دو حلقه دایروی متوالی Λ و تعداد حلقه های سوراخ هوایی خارجی N. در این مقاله، مقادیر به این صورت در نظر گرفته شده‌اند که:

$$N = 4 \quad \frac{d_n}{\Lambda} = 0.8 \quad r = 6\mu m \quad R = 4.4\mu m$$

$$d_3 = d_4 = d_5 = d_6 = 1.76\mu m$$

حالت‌های پشتیبانی شده OAM و ویژگی‌های آن‌ها

حالت‌های پشتیبانی شده OAM

حالت های OAM با استفاده از ترکیب مقادیر تکین برداری متداول فیبر ها تشکیل می‌شوند که دارای روابط زیر می باشند [10]:

$$\begin{cases} OAM_{\pm}^{\pm} = HE_{l+1.m}^{even} \pm jHE_{l+1.m}^{odd} \\ OAM_{\pm}^{\mp} = HE_{l-1.m}^{even} \pm jHE_{l-1.m}^{odd} \end{cases}$$

[6] Micro Structure
[7] Bragg Fibers
[8] Chromatic Dispersion

در این مقاله، خواص حالت C-PCF پیشنهادی، با استفاده از شبیه‌سازی عددی (COMSOL) مورد بررسی قرار گرفته است. و فیبر، توانایی پشتیبانی از OAM ۲۶ حالته را در پهنای باند ۶۵۰ نانومتری از بازه ۱/۲۵ میکرومتر تا ۱/۹ میکرومتر دارد که شامل این موارد می‌شود:

$$OAM^{\pm}_{\pm 1.1}\{HE_{21}\}$$

$$OAM^{\pm}_{\pm 2.1}\{HE_{31}.HE_{11}\}.OAM^{\pm}_{\pm 3.1}\{HE_{41}.HE_{21}\}$$
$$OAM^{\pm}_{\pm 4.1}\{HE_{51}.HE_{31}\}.OAM^{\pm}_{\pm 5.1}\{HE_{61}.HE_{41}\}$$
$$OAM^{\pm}_{\pm 6.1}\{HE_{71}.HE_{51}\}.OAM^{\pm}_{\pm 7.1}\{HE_{81}.HE_{61}\}$$

شکل ۲، توزیع شدت حالت های یکه[14] برداری که توسط C-PCF پیشنهادی پشتیبانی می‌شود را، نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که تمام حالت‌ها به خوبی در منطقه حلقوی محدود می‌شوند.

شاخص ریزش موثر[15]

شاخص مؤثر هر حالت بردار به عنوان تابعی از طول موج با شبیه‌سازی عددی در شکل ۳ (a) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فرکانس های قطع حالت‌های HE_{91} و EH_{71}حدود ۱/۵ میکرومتر (نشان داده شده توسط علامت دایره باز) است، بنابراین ما این دو حالت را نادیده می‌گیریم. برای پشتیبانی از حالت های OAM، جداسازی شاخص موثر بین حالت‌های بردار باید بیشتر از 1×10^{-4}باشد، در غیر این صورت آن‌ها به حالت LP متصل می‌شوند. شکل ۳ (b) مقدار مطلق اختلاف شاخص موثر بین حالت های HE و EH در C-PCF طراحی شده را نشان می‌دهد. در عین حال، ما خط مرجع 1×10^{-4}را در همان شکل ایجاد می‌کنیم. از شکل ۳ (b) می‌توان مشاهده کرد که اختلاف شاخص‌های موثر در همه گروه‌های حالت HE و EH بزرگتر از 1×10^{-4}است. بنابراین، تمام این حالت‌ها می‌تواند در C-PCF به شکل پایدار وجود داشته باشد.

ویژگی‌های پراکندگی

پراکندگی کروماتیک را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۲۳]:

$$D=-\frac{\lambda}{C}\frac{d^2Re[n_{eff}]}{d\lambda^2} \qquad (2)$$

در این مقاله، پراکندگی ماده نیز در نظر گرفته شده است. شکل ۴ پراکندگی را به عنوان تابعی از طول موج برای حالت‌های مختلف در طراحی C-PCF نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که تغییرات پراکندگی برای حالت‌های OAM با $|l|\leq 4$ (l نشان‌دهنده مرتبه حالت OAM می‌باشد) در بازه طولی 39.84ps/nm/km در پهنای باند ۷۵۰ nm از ۱/۲۵ تا ۲ میکرومتر اتفاق افتاده است که خیلی بیشتر از نتایج نشان داده شده در [۱۸] می‌باشد. و نیز مشاهده می‌شود که تغییرات پراکندگی حالت‌های EH، کمتر از حالت‌های HE است. تغییرات پراکندگی EH_{41} و EH_{51} و EH_{61} برابرند با:

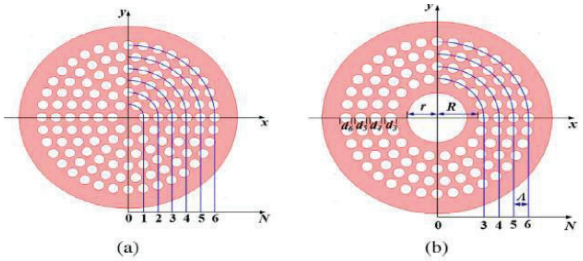
46.1ps/nm/km و 43.53ps/nm/km،6.68ps/nm/km

همچنین این مقادیر، کمتر از نتایج نشان داده شده در [۱۸] می باشند.

تلفات محدودسازی

تلفات محدودسازی برای ساختار های فیبر پیشنهادی به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۳]:

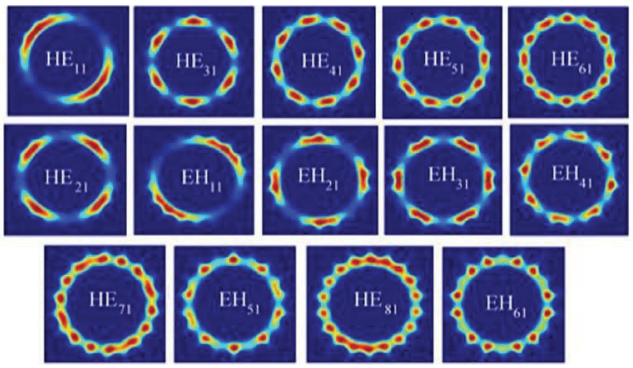
$$L=\frac{2\pi}{\lambda}\frac{20}{In(10)}10^6Im(n_{eff})(^{dB}/_{m}) \qquad (3)$$



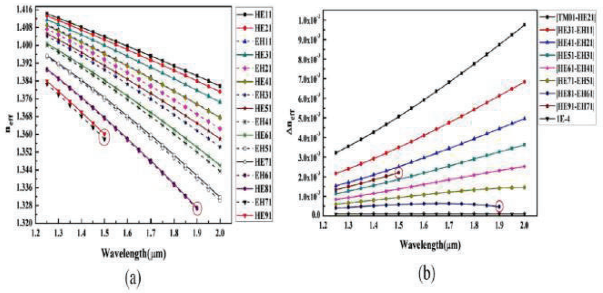
شکل ۱ : (الف) سطح مقطع پایه اصلی PCF و (ب) C-PCF جدید طراحی شده

[9] Eigen modes

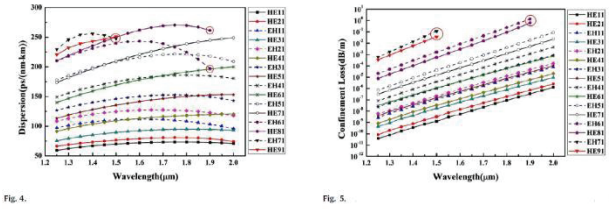
[10] Effective Refractive Index



شکل ۲ : توزیع شدت eigenmodes بردار پشتیبانی شده توسط پیشنهاد شده است.



شکل ۳ : (الف) ضریب شکست موثر به عنوان اثر طول موج برای حالتهای مختلف و (ب) مقدار مطلق اختلاف شاخص موثر بین حالتهای HE و EH به عنوان تابعی از طول موج در C-PCF طراحی شده



شکل(۴) : پراکندگی به عنوان تابعی از طول موج برای حالت های مختلف در C-PCF طراحی شده.

شکل (۵) : از دست دادن تصفیه به عنوان تابعی از طول موج برای حالت های مختلف در C-PCF طراحی شده.

تلفات محدودسازی تمامی حالت‌ها در C-PCF طراحی شده در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که میزان تلفات محدودسازی، با افزایش مرتبه حالت OAM، افزایش می‌یابد که دلیل این امر، احتمال بیشتر نشتی[16] آن از طریق پوشش برای طول موج بزرگتر است. برای حالت HE_{21}، تلفات محدودسازی درحدود $2.54 \times 10^{6}\ dB/m$ در ۲ میکرومتر می‌باشد که این میزان، در حدود ۴ برابر از نتایج موجود در [۱۸] کوچکتر می‌باشد. شکل همچنان نشان می‌دهد که تلفات محدودسازی مربوط به حالت های EH، دارای مقدار بزرگتری از این میزان تلفات در حالت های HE می‌باشد. در ۱/۵۵ میکرومتر، بیشترین میزان تلفات محدودسازی، متعلق به حالت EH_{61} بوده که دارای مقدار حدودی 0.003 dB/m می‌باشد.

ناحیه حالت موثر و ضریب غیر خطی

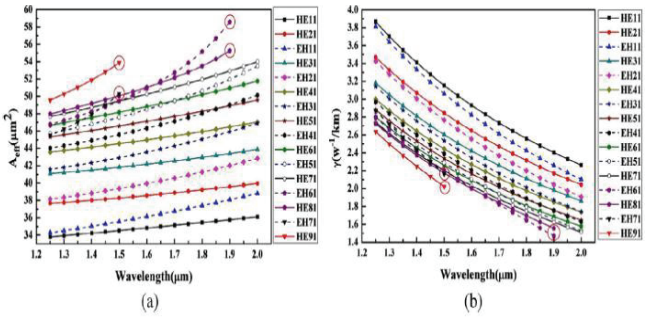
ناحیه حالت موثر A_{eff} با استفاده از تعریف استاندارد [۲۴] محاسبه می‌گردد:

$$A_{eff} = \frac{(\iint |E(x.y)|^2 dxdy)^2}{\iint |E(x.y)|^4 dxdy} \qquad (4)$$

که در آن، E(x,y) بیانگر توزیع میدان الکتریکی مربوط به میدان عرضی (متقاطع)[17] می‌باشد. ضریب غیر خطی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۲۴]:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \qquad (5)$$

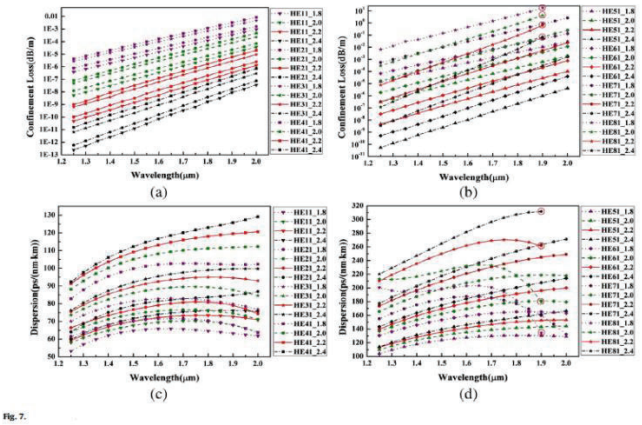
که در آن، $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} m^2 W^{-1}$ بوده و بیانگر شاخص غیرخطی برای سیلیس مخلوط شده است.



شکل(۶) : (a) منطقه حالت موثر و (b) پارامتر غیر خطی به عنوان تابعی از طول موج برای حالت های مختلف در C-PCF طراحی شده

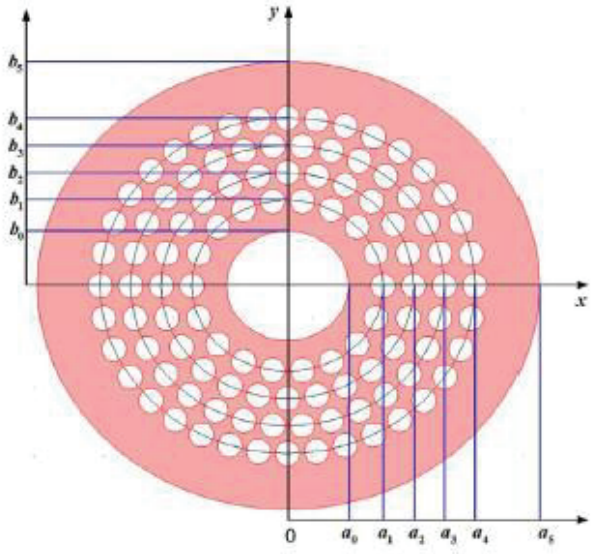
[16] Leakage

[17] Transverse



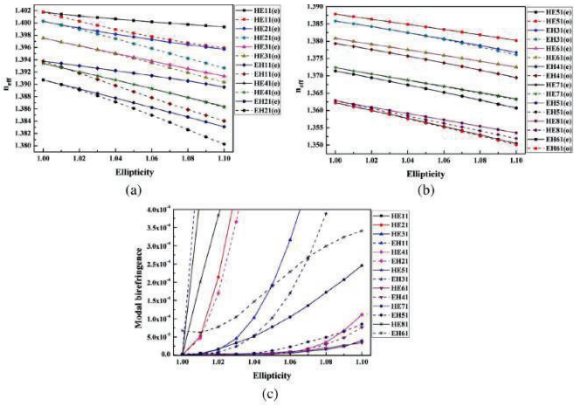
شکل (۷) : (a,b)از دست دادن حبس و(c,d) پراکندگی تمام حالت های HE که در C-PCF طراحی شده برای متفاوت Λ با $r = 4.4\ \mu m$، R $= 6\ \mu m$ فرض شده است. حالت های مشابه با یک نماد مشخص شده اند، و رنگ ها و سبک های مختلف مقادیر مختلف Λ

منطقه حالت موثر C-PCF طراحی شده توسط حل کننده[18] حالت اجزای محدود[19] تمام برداری، محاسبه شده و شکل ۶ (a) نتایج را نشان می‌دهد. در شکل ۶ (a)، منطقه حالت موثر با افزایش طول موج و مرتبه حالت افزایش می‌یابد. و ضریب غیرخطی که در شکل ۶ (b) نشان داده شده است، دارای تغییرات مخالف نسبت به منطقه حالت موثر می‌باشد. در ۱۵۵ میکرومتر، بیشینه ناحیه حالت موثر برابر با ۵۰/۵۴ میکرومتر HE_{81} می‌باشد و میزان ضریب غیرخطی آن به صورت کمینه برابر با$(2.08\frac{W^{-1}}{km})$ است.



[18] Solver

شکل (۸) : سطح مقطع تغییر شکل یافته C-PCF



شکل (۹) : (الف، ب) شاخصهای شکست انعطاف پذیر از همه حالتهای زوج و فرد برای حالتهای برداری که در C-PCF فرض شده اند و (ج) تجزیه مجدد دو حالته بردارها به عنوان تابعی از بیضایی در $1/55\mu m$

تأثیرات پارامتر های فیبر بر روی تلفات محدودسازی و پراکندگی

برای فیبر پیشنهاد شده، می‌توانیم r را از ۳/۸ به ۴/۷ میکرومتر با پارامتر های ثابت دیگر، تنظیم کنیم. هنگامی که مقدار r کوچکتر از ۳/۸ میکرومتر است، حالت های رادیال نامطلوب مرتبه دوم ظاهر می‌شوند. برعکس، هنگامی که r مقداری بزرگتر از ۴/۷ میکرومتر داشته باشد، فیبر از بسیاری جهات پشتیبانی نمی‌کند. در این کار، ما مقدار $r = 4.4\mu m$ را در نظر گرفته‌ایم.

همچنین تلفات محدودسازی و پراکندگی را به ترتیب برای تمام حالت‌های HE در $\Lambda = 1.8\mu m\ ,\ 2.2\mu m\ .\ 2.4\mu m$ محاسبه شده است. شکل ۷ بیانگر نتایج مربوطه می‌باشد. از رنگ‌های مختلف و

[19] Finite Element

سبک‌های خط[20] برای نشان دادن نتایج مختلف برای Λ مختلف استفاده شده است و حالت‌های یکسان، با همان نماد مشخص شده‌اند. از شکل ۷ (a) و (b) می‌توانیم دریابیم که تلفات محدودسازی، با افزایش Λ برای همه حالت‌ها، کاهش می‌یابد. و برای همین حالت، تلفات محدودسازی، به ازای دامنه‌های مختلف، تغییر می‌کند. شکل ۷ (c) و (d) نشان‌دهنده روند افزایش پراکندگی و تغییر آن با افزایش Λمی‌باشند. ولی میزان دگرگونی تغییرات پراکندگی تحت تأثیر Λ، دارای مقدار بسیار بزرگی نیست. مقایسه‌ی تلفات محدودسازی با میزان پراکندگی، نشان می‌دهد که تغییر Λ تأثیر بیشتری در میزان تلفات محدودسازی نسبت به پراکندگی دارد. به نظر می‌رسد ویژگی‌های انتشار[21] ساختار، که در آن $\Lambda = 2.4\mu m$ می‌باشد، بهتر است. ولی هنگامی که $\Lambda = 2.4\mu m$ است، در این صورت فاصله بین دو سوراخ هوایی مجاور در اولین حلقه پوشش بیش از حد برای تولید نزدیک می‌شود. بنابراین، در این کار، برای رعایت مصالحه، مقدار Λرا برابر با $\Lambda = 2.2\mu m$تنظیم می نماییم.

دو شکستی بودن مودال[22]

دوشکستی شدن مودال نیز یک پارامتر برای نشان دادن عملکرد فیبر پشتیبانی حالت OAM است. دو شکستی شدن مودال به صورت زیر تعریف می‌شود [17]:

$$B_n = \left|n_{eff}^{even} - n_{eff}^{odd}\right| \qquad (6)$$

که در آن، n_{eff}^{odd} و n_{eff}^{even} بیانگر شاخص های شکست موثر دارای مقادیر تکین زوج و فرد می‌باشد که حالت های OAM را تشکیل می‌دهند.

در اینجا بحث ما، در میزان تولرانس ساخت برای فیبر C-PCF طراحی شده، می‌باشد. به عبارت دیگر، تغییر شکل هندسی در اینجا، محدود به ایجاد یک ساخت ناقص[23] است. برای سادگی، فرض کنیم هنگامی که فیبر دچار تغییر شکل می‌شود، سوراخ مرکزی هوایی و تمام حلقه های بیرونی، میزان بیضویت e خود را حفظ می‌نمایند، در حالی که همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، همه سوراخ های هوایی خارجی هنوز دایروی هستند، به دلیل اینکه برای سوراخ های کوچک در حلقه بیرونی، کشش سطحی وجود دارد که این کشش، تمایل دارد حفره های کوچک را در اشکال اصلی خود حفظ کند. مقادیر محوری کوچک که فاصله بین سوراخ هوایی مرکزی و تمام حلقه های بیرونی را اندازه گیری می‌کنند، می‌توان با $b_n = \frac{a_n}{\varepsilon}(n = 0.1.2 \dots .5)$شمارش کرد.

شکل ۹ (a) و (b) نشانگرهای ریزش موثر همه حالت های زوج و فرد برای حالت های برداری پشتیبانی شده در C-PCF به عنوان تابعی از میزان بیضویت در ۱/۵۵ میکرومتر است. این موضوع، نشان می‌دهد که تفاوت شاخص‌های انشعابی موثر بین حالت های زوج و فرد برای یک حالت HE یاEH، با افزایش میزان بیضویت، افزایش می‌یابد. با مقایسه مقادیر شکل‌های ۹ (a) و (b) می‌توان دریافت که بیشتر حالت‌های مرتبه بالاتر، اختلاف کمی نسبت به حالت های مرتبه پایین‌تر دارند. شکل ۹ (c)، دوشکستی بودن مودال حالت های برداری را به عنوان تابعی از بیضویت در ۱/۵۵ میکرومتر نشان می‌دهد و این نتیجه را تأیید می‌کند. از شکل ۹ (c)، می‌توانیم متوجه شویم که دو برابر شدن مودال دو شکستی، وقتی که میزان بیضویت بزرگتر از ۱ باشد، برای حالت‌های EH11،HE11،HE81،HE21 و EH21 وجود خواهد داشت. درحالی که دو شکستی بودن مودال HE41،HE51،HE61،EH41 و EH51، دارای مقادیر نسبتاً کوچک است و حتی مقدار بیضویت آن تا ۱/۰۸ است. بنابراین، تا زمانی که بیضویت کمتر از ۱/۰۸ باشد، این حالت‌ها می‌توانند عملکرد خوب خود را حفظ کنند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ما یک فیبر کریستال دایروی جدیدی را پیشنهاد کرده ایم که می‌تواند به طور مداوم از ۲۶ OAM حالته از ۱/۲۵ تا ۱/۹ میکرومتر (۶۵۰ نانومتر) با جداسازی شاخص به اندازه کافی بزرگ پشتیبانی کند. تجزیه و تحلیل عددی نشان می‌دهد که فیبر پیشنهاد شده دارای ویژگی‌های بسیار خوبی از فیبرها، مانند کمینه تلفات محدودسازی است که دارای مقدار کمتر از ۰/۰۰۳ dB / m در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر می‌باشد، همچنین پراکندگی رنگ کروماتیک که تغییرات پراکندگی برای حالت OAMبا $|l| \leq 4$ در 39.84ps/nm/km بیش از پهنای باند ۷۵۰ nm از ۱/۲۵ تا ۲ میکرومتر می‌باشد و نیز، ضریب غیرخطی کوچک که کمتر از $(2.08\frac{W^{-1}}{km})$ برای همه حالت‌ها در ۱/۵۵ میکرومتر است. علاوه بر این، تأثیر تغییر شکل هندسی در دو شکستی مودال فیبر پیشنهاد شده نیز مورد بحث قرار گرفته است. ثابت شده است که دو شکستی شدن مودال ناشی از تغییر شکل هندسی برای حالت‌های مختلف بردار، متفاوت است و وقتی که وضعیت تغییر شکل، بسیار شدید

[20] Font Style
[21] Propagation
[22] Modal birefringence
[23] Imperfect Fabrication

نباشد، بیشتر حالت‌های مرتبه بالاتر دارای دو شکستی مودال کمتر از حالت‌های مرتبه پایین‌تر می باشند. بر اساس انعطاف پذیری ساختار، ما می‌توانیم با تنظیم پارامترها، یک C-PCF جدید با مجموعه ای از ویژگی‌های خوب به دست آوریم. به طور خلاصه، این نوع از ساختار فیبر، یک نوع امیدوارکننده برای مالتی پلکس کردن حالت مبتنی بر OAM در سیستم‌های انتقال فیبر خواهد بود.موجب کاهش اندک شدت پمپاژ در نزدیکترین حفره نسبت به حفره پر شده با VLP می‌شود. با ارائه تعاریف دقیق تر می‌توان به مقایسه طیف لیزر برای این سناریوها پرداخت که طیف آنها فاقد VLP است. مقایسات ارائه شده در شکل ۶ (g) نشان می‌دهد که تفاوت اندکی در طیف لیزر وجود دارد.

مراجع

[1] L. Allen et al., Orbital angular momentum of ligh and transformation of Laguerre Gaussian Laser modes, Phys. Rev. A 45 (11) (1992) 8185–8189.
[2] J. Wang et al., Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing, Nat. Photonics 6 (7) (2012) 488–496.
[3] B. Nenad et al., Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers, Science 340 (6140) (2013) 1545–1548.
[4] H. Hao et al., 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength, Opt. Lett. 39 (2) (2014) 197–200.
[5] W. Jian et al., Ultra-high 435-bit/s/Hz spectral efficiency using N-dimensional multiplexing and modulation link with pol-muxed 52 orbital angular momentum (OAM) modes carrying Nyquist 32-QAM signals, in: European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015, 2015.
[6] H.I. Sztul et al., Cylindrical vector beam generation from spun fiber, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 7227 (5) (2009) 561–564.
[7] N. Bozinovic, P. Kristensen, S. Ramachandran, Long-range fiber-transmission of photons with orbital angular momentum, in: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011, 2011.
[8] N. Bozinovic, P. Kristensen, S. Ramachandran, Are orbital angular momentum (OAM/Vortex) States of light long-lived in fibers?, Frontiers in Optics 2011/ Laser Science XXVII, Optical Society of America, San Jose, California, 2011
[9] Y. Yue et al., Mode properties and propagation effects of optical Orbital Angular Momentum (OAM) modes in a ring fiber, IEEE Photonics J. 4 (2) (2012) 535–543.
[10] C. Brunet et al., Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states, Opt. Express 22 (22) (2014) 26117–26127.
[11] P. Gregg et al., Stable transmission of 12 OAM states in air-core fiber, in: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2013, 2013.
[12] J. Ye et al., Excitation and separation of vortex modes in twisted air-core fiber, Opt. Express 24 (8) (2016) 8310–8316.
[13] B. Ung et al., Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes, Opt. Express 22 (15) (2014) 18044–18055.
[14] S. Li, J. Wang, A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings 22 modes), Sci. Rep. 4 (2014) (3853-3853).
[15] L. Shuhui, W. Jian, Supermode fiber for orbital angular momentum (OAM) transmission, Opt. Express 23 (14) (2015) 18736–18745.
[16] B.U. Charles Brunet, Bélanger Pierre-André, Messaddeq Younès, L.A.R. Sophie LaRochelle, Vector mode analysis of ring-core fibers: design tools for spatial division multiplexing, J. Lightwave Technol. 32 (23) (2014).
[17] M. Zhu et al., A new designed dual-guided ring-core fiber for OAM mode transmission, Opt. Fiber Technol. 25 (2015) 58–63.
[18] Y. Yue et al., Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in a As2S3 ring photonic crystal fiber, in: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2012, 2012.
[19] C. Zhao et al., Design of multicore photonic crystal fibers to generate cylindrical vector beams, J. Lightwave Technol. 34 (4) (2016) 1206–1211.
[20] X.M. Xi et al., Orbital-angular-momentum-preserving helical Bloch modes in twisted photonic crystal fiber, Optica 1 (3) (2014) 165–169.
[21] G. Zhou et al., Design and analysis of a microstructure ring fiber for orbital angular momentum transmission, IEEE Photonics J. 8 (2) (2016) 1–12.
[22] G. Vienne et al., Ultra-large bandwidth hollow-core guiding in all-silica Bragg fibers

with nano-supports, Opt. Express 12 (15) (2004) 3500–3508.
[23] P.S. Maji, P.R. Chaudhuri, Circular photonic crystal fibers: numerical analysis of chromatic dispersion and losses, ISRN Opt. 2013 (2013) 1–9.
[24] H. Xu et al., Ultra-flattened chromatic dispersion control for circular photonic crystal fibers, J. Opt. 13 (5) (2011) 994–1001.