

تأثیر پارامترهای ساختاری بر مشخصه‌های مدی تارهای بلور فوتونی در ناحیه مخابراتی

حسن پاکرزاده^{1*}، رضوان درخشانی²

1. استادیار، فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز

2. دانشجوی کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز

تاریخ دریافت: 1395/07/04 تاریخ پذیرش: 1395/09/20

Impacts of Structural Parameters on Mode Characteristics of Photonic Crystal Fibers in the Telecommunication Region

H. Pakarzadeh^{*1}, R. Derakhshan²

1. Assistant Professor, Physics, Shiraz University Of Technology

2. MsC. Student, Physics, Shiraz University Of Technology

Received: 2016/09/25 Accepted: 2016/12/10

Abstract

Photonic crystal fibers (PCFs) are new class of optical fibers which have great potentials and various applications. In this article, we investigate and simulate the impacts of structural parameters on mode characteristics of PCFs in telecommunication region that little attention has been paid to it by using CUDOS MOF software. Here, PCFs are simulated in two different schemes: one with increasing the number of air rings in the cladding area and the other one with increasing the filling fraction; and then the best PCF for the single-mode operation in telecommunication region with the lowest confinement loss is introduced. Also, the wavelength dependence of the loss, effective mode area, and effective mode refractive index is simulated. The results show that with increasing the number of air rings in the cladding as well as the air filling fraction, the PCF losses, effective mode area, and effective mode refractive index are decreased. Moreover, with increasing the wavelength, the effective refractive index is decreased while and the loss and the effective mode area are increased.

Keywords

Photonic Crystal Fibers, Mode, Telecommunication Region, Structural Parameters, CUDOS MOF Software.

چکیده

تارهای بلور فوتونی (PCFs) دسته‌ای از تارهای نوری هستند که دارای قابلیت‌های فوق‌العاده و کاربردهای متنوع هستند. در این مقاله تأثیر پارامترهای ساختاری این تارها بر مشخصه‌های مدی آنها در ناحیه مخابراتی را که تا به امروز کمتر مورد توجه واقع شده است، با استفاده از نرم افزار CUDOS MOF بررسی و شبیه‌سازی می‌کنیم. در این جا تارهای بلور فوتونی در دو طرح مختلف یکی با افزایش تعداد حلقه حفره‌های هوا در ناحیه غلاف و دیگری با افزایش کسر پرشدگی هوا مطالعه می‌شوند و بهترین تار بلور فوتونی را برای حالت تک‌مد در ناحیه مخابراتی با کمترین افت حبس‌شدگی معرفی می‌کنیم. همچنین وابستگی طول موجی افت، سطح مقطع مؤثر و ضریب شکست مؤثر مد را نیز شبیه‌سازی می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد حلقه حفره‌های هوا در غلاف و نیز افزایش کسر پرشدگی هوا، افت و سطح مقطع و نیز ضریب شکست مؤثر مد کاهش می‌یابد. به علاوه، ضریب شکست مؤثر با طول موج کاهش و سطح مقطع مؤثر و افت با طول موج افزایش می‌یابند.

واژگان کلیدی

تارهای بلور فوتونی، مد، ناحیه مخابراتی، پارامترهای ساختاری، نرم‌افزار CUDOS MOF.

مقدمه

تارهای نوری تحول چشم‌گیری را در صنعت مخابرات به ارمغان آورده‌اند و در سال‌های اخیر، تارهای بلور فوتونی (PCFs¹) مورد توجه پژوهشگران اپتیک و فوتونیک قرار گرفته است. تارهای بلور فوتونی دسته‌ای از تارهای نوری نسل جدید هستند که کاربردهای فزاینده‌ای در مخابرات تار نوری، لیزرهای تار نوری، اپتیک غیرخطی، انتقال توان بالا، حسگرهای گازی بسیار حساس، تولید ابرپیوستار، تقویت‌کننده‌ها و دیگر رشته‌ها پیدا کرده‌اند [1-8].

این تارها با یکپارچه‌سازی ابزارهای نوری با فوتون‌ها که حامل‌های اطلاعات هستند، سرعت و پهنای باند سیستم‌های مخابرات نوری را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند [9]. ایده تارهای بلور فوتونی را اولین بار Yeh و همکارانش در سال 1978 ارائه کردند [10] و در سال 1996 فیلیپ راسل آنها را ساخت [11]. در بسیاری از گزارش‌ها، تارهای بلور فوتونی بر پایه شیشه سیلیکا ساخته شده‌اند؛ چرا که این تار مبتنی بر سیلیکا عملکرد بسیار خوبی برای بیشتر برنامه‌های کاربردی با طول موج در محدوده 200-2500nm را فراهم می‌کند [12 و 13]. به علاوه، تارهای بلور فوتونی بازدهی بسیار بالایی دارند و برخلاف تارهای معمولی می‌توانند مساحت مد فوق‌العاده کوچک و یا بزرگ داشته باشند و در عین حال تک‌مد باقی بمانند [14 و 15 و 16]. همچنین تارهای بلور فوتونی می‌توانند توان‌های بسیار بالایی را در حالت تک‌مد عبور دهند و نور را در هوا هدایت کنند که این خود باعث کاهش شدید اثرهای نامطلوب غیرخطی و پاشندگی می‌شود [9 و 17].

تارهای بلور فوتونی دارای قابلیت‌های فراوان هستند به طوری که آزادی عمل در طراحی آنها اجازه می‌دهد تا با تغییر پارامترهای ساختاری مثل: ثابت شبکه، قطر و شکل حفره‌های هوا، ضریب شکست ماده زمینه، نوع شبکه و تعداد حلقه‌های حفره‌های هوا، خواص موجبری آنها را مهندسی کرد [9 و 18 و 19].

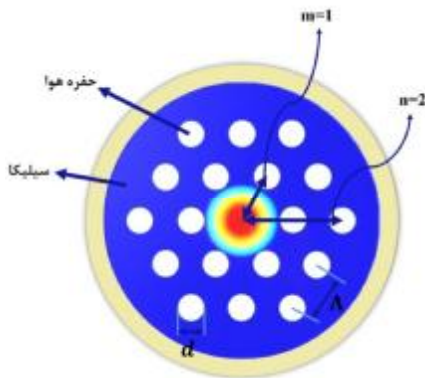
در این مقاله به شبیه‌سازی خواص مدی تارهای بلور فوتونی مانند: سطح مقطع موثر مد A_{eff} ، ضریب شکست مؤثر n_{eff} و افت در ناحیه مخابراتی می‌پردازیم و وابستگی آنها را به تغییرات طول موج و پارامترهای ساختاری مانند

تعداد حلقه‌های غلاف و کسر پرشدگی هوا بررسی می‌کنیم. در نهایت بهترین ساختار برای حالت تک‌مد در ناحیه مخابراتی با کمترین افت پیشنهاد می‌شود.

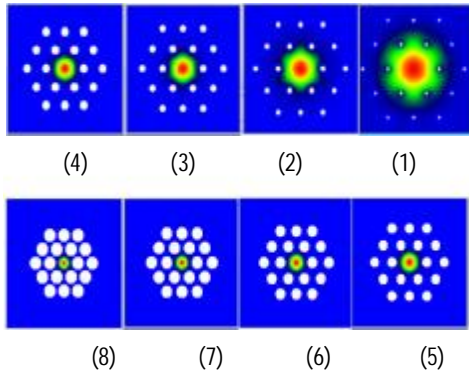
مبانی نظری

تارهای بلور فوتونی دارای غلاف متناوب از حفره‌ها هستند که از هوا پر شده‌اند. نور می‌تواند در راستای محور تار در نقص‌های ساختار بلوری منتشر شود. یک نقص به وسیله برداشتن یک یا تعداد بیشتری از حفره‌های هوای مرکزی به وجود می‌آید [1 و 12]. به طور کلی، تارهای بلور فوتونی دو نوع هستند: مغزی تهی (هوا) و مغزی توپر (سیلیکا). انتشار نور در تارهای مغزی سیلیکا از طریق بازتاب داخلی کلی (مشابه تارهای نوری معمولی) و در تارهای مغزی هوا، از طریق سازوکار گاف باند فوتونی انجام می‌شود [2 و 9 و 20]. در این مقاله تارهای بلور فوتونی مغزی توپر را بررسی می‌کنیم که جنس مغزی از سیلیکا است.

چنانچه در شکل 1 دیده می‌شود، یک تار بلور فوتونی با پارامترهای ساختاری تعریف می‌شود که L ثابت شبکه (فاصله بین مرکز دو حفره‌ی مجاور)، d قطر حفره هوا، m مجموع فاصله از مبدا به مرکز حفره اول (نقص یا تعداد حلقه‌های برداشته شده) و n تعداد حلقه‌های غلاف (مجموع فاصله از مبدا به مرکز آخرین حفره) است.

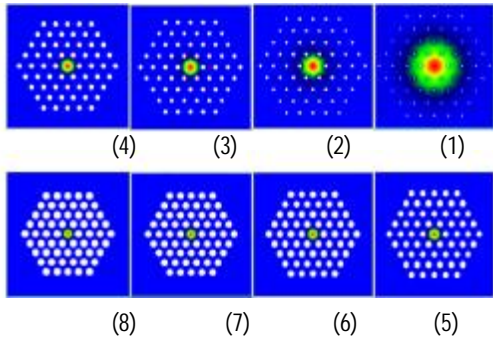


شکل 1. سطح مقطع یک تار بلور فوتونی با شبکه شش وجهی، متشکل از دو حلقه از حفره‌های هوا ($n=2$) و یک حلقه برداشته شده در مرکز ($m=1$) با ثابت شبکه $L=2.3mm$ و قطر حفره‌های هوا $d=1.15mm$.



شکل 2. توزیع شدت در PCFهایی با شبکه شش وجهی با کسر پرشدگی متفاوت و تعداد حلقه‌های ثابت $m=1, n=2$ ، در طول موج ثابت 1.5mm و ثابت شبکه $L = 2.3\text{mm}$

شکل 3 نیز یک تار بلور فوتونی با چهار حلقه غلاف و یک حلقه برداشته شده در مرکز، ثابت شبکه $L = 2.3\text{mm}$ در طول موج 1.5mm با نسبت پرشدگی متغیر ($\frac{d}{L} = 0.1 - 0.65$) را نشان می‌دهد.



شکل 3. توزیع شدت در تارهای بلور فوتونی با شبکه شش وجهی با کسر پرشدگی متفاوت و تعداد حلقه‌های حفره‌های هوای ثابت $m=1$ و $n=4$ در طول موج 1.5mm و ثابت شبکه $L = 2.3\text{mm}$

تار بلور فوتونی را می‌توان طوری طراحی کرد که برای محدوده بزرگی از طیف مرئی و نزدیک مادون قرمز تک‌مد باقی بماند. برای مشخص کردن تعداد مدهای هدایت شده معمولاً از فرکانس بهنجار شده V استفاده می‌گردد که به صورت فرمول $V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}$ تعریف می‌شود و در آن r شعاع مغزی، n_{core} ضریب شکست مغزی و n_{clad} ضریب شکست غلاف است [9]. برای تار تک‌مد $V < 2.405$ است [9].

در اینجا مغزی سیلیکا با ضریب شکست $n_{\text{SiO}_2} = 1.459$ در طول موج مخابراتی 1550 نانومتر در نظر گرفته‌ایم که البته در طول موج‌های مختلف مقدار آن متفاوت است. در بحث‌هایی که در ادامه خواهیم داشت n_{clad} را که همان ضریب شکست مؤثر غلاف است، با n_{eff} نشان خواهیم داد.

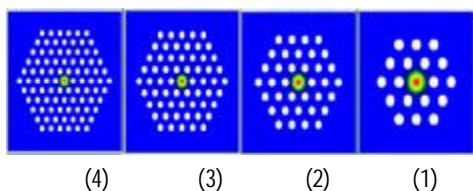
نتایج شبیه‌سازی و بحث‌های مربوط

به طور عادی روش‌هایی برای مدل‌سازی تارهای نوری استفاده می‌شود که این روش‌ها در مدل‌سازی تارهای بلور فوتونی موفقیت‌آمیز نیستند. روش‌های به کار رفته در مدل‌سازی بلور فوتونی و میدان‌های الکترومغناطیسی مناسب با این هدف هستند.

در این مقاله از نرم‌افزار CUDOS MOF^1 استفاده می‌کنیم که برای شبیه‌سازی ساختار ریزتارهای نوری به کار می‌رود. این نرم‌افزار از روش multipole بسط بسط فوریه در محیط ویندوز استفاده می‌کند [21 و 22]. ابتدا تأثیر افزایش کسر پرشدگی هوا را بر مشخصه‌های مدی تارهای بلور فوتونی با تعداد حلقه‌های حفره‌های هوای ثابت ($n=2$ و $n=4$) را بررسی می‌کنیم و برای مقایسه بهتر مشخصه‌های مدی این تارهای بلور فوتونی، نتایج شبیه‌سازی را در جدول‌هایی نمایش می‌دهیم.

شکل 2 تارهای بلور فوتونی با $n=2$ و یک حلقه برداشته شده در مرکز (حلقه‌های برداشته شده همان نقص‌های تار هستند) $m=1$ ، ثابت شبکه $L = 2.3\text{mm}$ در طول موج 1.5mm با نسبت پرشدگی متغیر ($\frac{d}{L} = 0.1 - 0.8$) را نمایش می‌دهد.

و با نسبت پرتشدگی ثابت $d/L = 0.5$ بر مشخصه‌های مدی تارهای بلور فوتونی را بررسی کرده‌ایم.



شکل 4. توزیع شدت در تار بلور فوتونی برای افزایش تعداد حلقه‌های حفره‌های هوا در طول موج ثابت 1.5mm و نسبت پرتشدگی ثابت $d/L = 0.5$.

همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود با افزایش تعداد حلقه‌ها باز هم سطح مقطع مؤثر مد کاهش می‌یابد و حبس‌شدگی مد بیشتر می‌شود. جدول 3 نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

جدول 2. مقایسه مشخصه‌های مدی تارهای بلور

فوتونی شکل 3

شماره PCF	d/L	A_{eff} (mm ²)	n_{eff}	loss (dB/km)
1	0.10	32.17	1.440	16567097
2	0.20	10.58	1.434	4060996
3	0.30	3.37	1.429	238649
4	0.40	1.94	1.425	3309
5	0.50	1.46	1.421	18.3
6	0.55	1.31	1.419	0.75
7	0.60	1.19	1.417	2.7×10^{-2}
8	0.65	1.08	1.414	6.7×10^{-4}

با افزایش حلقه‌ها سطح مقطع مؤثر مد (A_{eff}) کاهش می‌یابد در نتیجه شدت مد افزایش پیدا می‌کند و جای‌گزینی مد بیشتر می‌شود. همان‌طور که از نتایج هم پیداست تلفات حبس‌شدگی کاهش می‌یابد که محبوس‌شدگی بیشتر در مغزی را در پی دارد.

همان‌طور که از هر دو شکل 2 و 3 دیده می‌شود با افزایش d/L سطح مقطع مؤثر مد کاهش می‌یابد (اندازه لکه در مغزی کوچک‌تر می‌شود) و مد بیشتر در مغزی محبوس می‌شود.

جدول 1. مقایسه مشخصه‌های مدی تارهای بلور

فوتونی شکل 2

شماره PCF	d/L	A_{eff} (mm ²)	n_{eff}	loss (dB/km)
1	0.10	14.35	1.439	78715185
2	0.20	6.30	1.433	29661142
3	0.30	3.10	1.429	8169608
4	0.40	1.94	1.425	1398694
5	0.50	1.48	1.421	143780
6	0.60	1.19	1.416	8300
7	0.70	1.00	1.411	226
8	0.80	0.84	1.405	2.2

از طرفی با توجه به اینکه در شکل 3 تعداد حلقه‌ها را افزایش داده‌ایم، مشاهده می‌شود حبس‌شدگی مد نسبت به تار بلور فوتونی دو حلقه‌ای شکل 2 بیشتر شده است [24 و 23].

همان‌طور که از نتایج جدول‌های 1 و 2 مشخص است، با افزایش نسبت پرتشدگی، سطح مقطع مؤثر مد (A_{eff}) و ضریب شکست مؤثر (n_{eff}) کاهش می‌یابد در نتیجه شدت مد در مغزی افزایش پیدا می‌کند و جای‌گزینی مد بیشتر می‌شود.

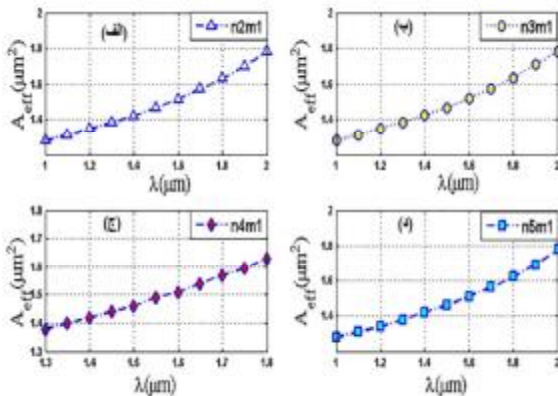
همچنین تلفات حبس‌شدگی (افت) کاهش می‌یابد که این خود حبس‌شدگی بیشتر مد در مغزی را در پی دارد [1 و 24].

به ازای یک d/L ثابت مثلاً 0/6 برای تارهای بلور فوتونی با تعداد حلقه‌های بیشتر (چهار حلقه)، افت حبس‌شدگی به شدت کاهش می‌یابد که این امر تأثیر افزایش حلقه‌های حفره‌های هوا را بر پارامترهای ساختاری تارهای بلور فوتونی را به خوبی نمایش می‌دهد. در این مقاله همچنین تأثیر افزایش منظم تعداد حلقه‌های حفره‌های هوا را در یک طول موج ثابت 1.5mm

مساحت مؤثر مد به صورت زیر تعریف می‌شود
[1 و 8 و 9 و 25]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\int_{\text{cross-section}} |F(x, y)|^2 dx dy}{\int_{\text{cross-section}} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (1)$$

که در آن $F(x, y)$ توزیع عرضی میدان الکتریکی است. تغییرات (A_{eff}) با یک حلقه برداشته شده در مرکز تارهای بلور فوتونی با دو، سه، چهار و پنج حلقه غلاف در شکل پنج آمده است.
چنانچه دیده می‌شود در تمام موارد با افزایش طول موج، سطح مقطع مؤثر مد افزایش می‌یابد.



شکل 5. تغییرات سطح مقطع مؤثر مد با طول موج با یک حلقه برداشته شده در مرکز تارهای بلور فوتونی با: (الف) دو، سه، (ب) چهار و (د) پنج حلقه هوا در غلاف و نسبت پرشدگی ثابت $d/L = 0.5$

لازم به ذکر است با توجه به افت بالای ساختارهای با دو حلقه و سه حلقه از حفره‌های هوا، به طور طبیعی چنین تارهایی در عمل استفاده نمی‌شوند و آوردن این ساختارها در این قسمت فقط به منظور نشان دادن تأثیر تعداد حلقه‌ها در مشخصات مدی تارهای بلور فوتونی بوده است. همچنین استفاده از تارهای بلور فوتونی با بیش از پنج یا شش حلقه از حفره‌های هوا تأثیر زیادی در نتایج ما ندارد.

جدول 3. مقایسه مشخصه‌های مدی تارهای بلور فوتونی
شکل 4

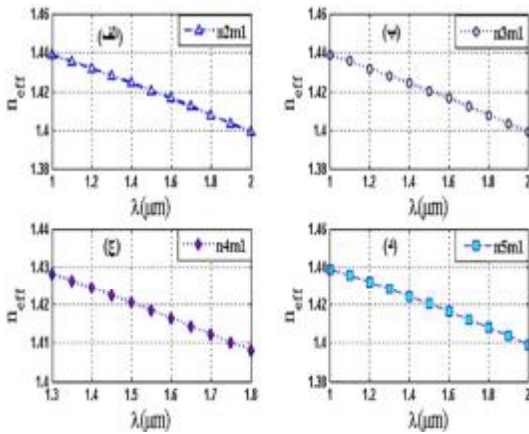
شماره PCF	تعداد حلقه‌ها	A_{eff} (mm^2)	n_{eff}	loss (dB/km)
1	2	1.4676	1.420495	143780
2	3	1.4658	1.420496	1623
3	4	1.4624	1.420497	18.3
4	5	1.4600	1.420498	0.2

با استفاده از نتایجی که از شبیه‌سازی تارهای بلور فوتونی تا اینجا بدست آوردیم مشاهده شد تارهای بلور فوتونی با پنج حلقه از حفره‌های هوا در غلاف با نسبت پرشدگی $d/L = 0.5$ و تارهای بلور فوتونی با چهار حلقه غلاف با $d/L = 0.55$ برای حالت تک‌مد در ناحیه مخابراتی با کمترین افت و سطح مقطع مؤثر مد می‌توانند برای مقاصد عملی استفاده شوند.

یکی از نتایج مهمی که در این جا به دست می‌آید این است که می‌توان برای طراحی یک تار بلور فوتونی ایده‌آل از تعداد حلقه‌های کمتر اما با کسر پرشدگی بزرگ‌تر استفاده کرد.

به عنوان مثال، می‌توان به جای استفاده از تار بلور فوتونی پنج حلقه‌ای با کسر پرشدگی $d/L = 0.5$ از تار بلور فوتونی چهار حلقه‌ای با کسر پرشدگی $d/L = 0.55$ استفاده کرد که نسبت به تار بلور فوتونی پنج حلقه‌ای از افت و سطح مقطع مؤثر مد کمتری بهره‌مند است.

با استفاده از نرم‌افزار متلب¹ نتایج فوق را به ازای طول موج‌های مختلف در ناحیه مخابراتی بررسی کرده‌ایم.



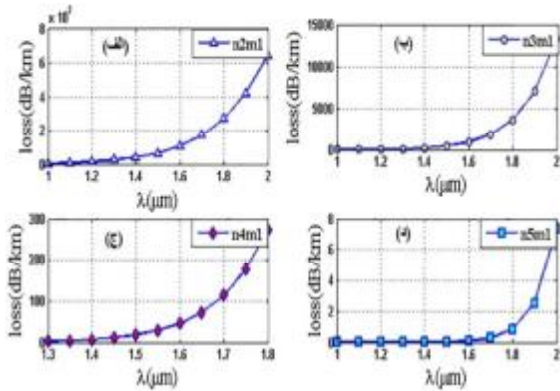
شکل 7. تغییرات اتلاف برحسب طول موج برای یک تارهای بلور فوتونی با یک حلقه برداشته شده با: (الف) دو، (ب) سه، (ج) چهار و (د) پنج حلقه هوا در غلاف و نسبت پرشدگی ثابت $d/L = 0.5$

نتیجه گیری

در این مقاله، خصوصیات مدی یک تار بلور فوتونی در ناحیه مخابراتی در دو طرح مختلف یکی با افزایش تعداد حلقه‌های هوا و دیگری با افزایش کسر پرشدگی شبیه‌سازی شد.

همچنین رفتار افت، مساحت مؤثر مد و ضریب شکست مؤثر مد با تغییر پارامترهای ساختاری تار بلور فوتونی از قبیل تعداد حلقه‌های حفره هوا و نیز کسر پرشدگی بررسی گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان با افزایش تعداد حلقه‌ها برای یک طول موج ثابت $l = 1.5\text{mm}$ و نیز نسبت کسر پرشدگی ثابت $d/L = 0.5$ و یا به طور معادل با ثابت نگه داشتن تعداد حلقه‌ها و افزایش نسبت d/L ، حبس‌شدگی را بیشتر و سطح مقطع مؤثر مد و افت مد را کاهش داد.

به علاوه، مناسب‌ترین تار بلور فوتونی برای کاربردهای مخابراتی با کمترین افت و مساحت مؤثر مد می‌تواند یک تار بلور فوتونی با غلافی متشکل از چهار حلقه حفره هوا با کسر پرشدگی 0.55 و d/L یا یک



شکل 6. تغییرات ضریب شکست مؤثر مد با طول موج با یک حلقه برداشته شده در مرکز تارهای بلور فوتونی با: (الف) دو، (ب) سه، (ج) چهار و (د) پنج حلقه هوا در غلاف و نسبت پرشدگی ثابت $d/L = 0.5$

تغییرات ضریب شکست مؤثر مد با طول موج برای یک حلقه برداشته شده در مرکز تارهای بلور فوتونی با دو، سه، چهار و پنج حلقه غلاف در شکل 6 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل پیداست، با افزایش تعداد حلقه‌ها و طول‌موج، ضریب شکست مؤثر مد کاهش می‌یابد. این به این دلیل است که هرچه تعداد حفره‌های هوا در غلاف بیشتر باشد ضریب شکست مؤثری که مد در ناحیه غلاف به دلیل بیشتر شدن نسبت هوا می‌بیند، کمتر می‌شود.

از طرفی با بیشتر شدن طول موج، گسترش مد به ناحیه غلاف بیشتر می‌گردد و بنابراین ضریب شکست مؤثر به دلیل وجود حفره‌های هوا در غلاف کمتر می‌شود.

در شکل 7 تغییرات تلفات حبس‌شدگی بر حسب طول موج در تارهای بلور فوتونی مختلف بررسی شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش تعداد حلقه‌ها افت حبس‌شدگی به شدت کاهش می‌یابد و در تار بلور فوتونی پنج حلقه‌ای به حداقل مقدار خود می‌رسد.

مشخصات مدی تار بلور فوتونی نیز بررسی و مشاهده شد که به طور کلی برای تمام ساختارها، سطح مقطع مؤثر مد و تلفات حبس‌شدگی با افزایش طول موج افزایش و ضریب شکست مؤثر با افزایش طول موج کاهش می‌یابد.

PCF با پنج حلقه حفره هوا با نسبت کسر پرشدگی $\frac{d}{L} \approx 0.5$ برای حالت تک‌مد باشد.

در نتیجه می‌توان از تعداد حلقه‌های کمتر اما کسر پرشدگی بزرگ‌تر استفاده کرد. تأثیر طول موج بر

منابع

- [1] F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri, Photonic crystal fibers: properties and applications, Springer Science & Business Media, (2007).
- [2] M. Ebnali-Heidari, H. Saghaei, F. Koohi-Kamali, M. Naser Moghadasi, M. K. Moravvej-Farshi, Proposal for supercontinuum generation by optofluidic infiltrated photonic crystal fibers, Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal 20 (2014) 582-589.
- [3] S. A. Cerqueira Jr, Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers, Reports on progress in physics 73 (2010) 024401.
- [4] A. M. Pinto, M. Lopez-Amo, Photonic crystal fibers for sensing applications, Journal of Sensors, (2012).
- [5] A. Khetani, J. Riordon, V. Tiwari, A. Momenpour, M. Godin, H. Anis, Hollow core photonic crystal fiber as a reusable Raman biosensor, Optics express 21 (2013) 12340-12350.
- [6] M. Taghizadeh, M. Hatami, H. Pakarzadeh, and M. K. Tavassoly, Pulsed optical parametric amplification based on photonic crystal fibres, Journal of Modern Optics, (2016).
- [7] J. C. Knight, Photonic crystal fibers and fiber lasers, JOSA B 24 (2007) 1661-1668.
- [8] Md. Faizul Huq Arif and Md. Jaminul Haque Biddut, A new structure of photonic crystal fiber with high sensitivity, high nonlinearity, high birefringence and low confinement loss for liquid analyte sensing applications, Sensing and Bio-Sensing Research 12 (2017) 8-14.
- [9] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, New York: Academic, (2013).
- [10] P. Yeh, A. Yariv, E. Marom, Theory of Bragg fiber, JOSA 68 (1978) 1196-1201.
- [11] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, M. D. Aktin, All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding, Opt. Lett 21 (1996) 1547-1549.
- [12] P. St. J. Russell, Photonic crystal fibers, Science, (2003).
- [13] J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou, A. Bjarklev, Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides, Optical fiber technology 5 (1999) 305.
- [14] T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell, Endlessly single mode photonic crystal fibre, Opt. Lett 22 (1997) 961-963.
- [15] N. A. Mortensen, Effective area of photonic crystal fibers, Optics Express 10 (2002) 341-348.
- [16] M. Liu, J. Yang, T. Zhu, Design of large-mode-area multi-core photonic crystal fibers with low confinement loss and dispersion, JETP Letters 102 (2015) 274-278.
- [17] W. Cai, E. Liu, B. Feng, H. Liu, Z. Wang, W. Xiao, J. Liu, Dispersion properties of a photonic quasi-crystal fiber with double cladding air holes, Optik-International Journal for Light and Electron Optics 127 (2016) 4438-4442.
- [18] L. Shen, W. P. Huang, G. Chen, S. Jian, Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation, IEEE Photon. Technol. Lett 15 (2003) 540-542.
- [19] F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri, A. Bouk, Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers, IEEE Photon. Technol. Lett 16 (2004) 1065-1067.

- [20] H. Saghaei, V. Heidari, M. Ebnali-Heidari, M. R Yazdani, A systematic study of linear and nonlinear properties of photonic crystal fibers, *Optik* 127 (2016) 11938–11947.
- [21] <http://sydney.edu.au/science/physics/cudos/research/mofsoftware.shtml>.
- [22] Y. S. Lee, C. G. Lee, Y. Jung, S. Kim, Diamond unit cell photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss based on circular air holes, *Applied optics* 54 (2015) 6140-6145.
- [23] D. K. Sharma, A. Sharma. On the mode field diameter of microstructured optical fibers, *Optics Communications* 291 (2013) 162-168.
- [24] A. Bjarklev, J. Broeng, A. S. Bjarklev, *Photonic crystal fibres*, Springer Science & Business Media, (2012).
- [25] N. Karasawa, Dispersion properties of liquid crystal core photonic crystal fibers calculated by a multipole method modified for anisotropic inclusions, *Optics Communications* 338 (2015) 123–127.