

طراحی و تحلیل ویژگی‌های نوری فیبر شبه بلور فوتونی با تقارن 10 گانه اصلاح شده

محسن فلامرزی، علیرضا بهرامپور و ابوالفضل بهرامپور

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۲/۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۸/۸)

چکیده

در این مقاله، ما فیبر شبه بلور فوتونی با ساختار پرنس با تقارن 10 گانه را بررسی کرده‌ایم. با توجه به اینکه دوشکستی در این فیبر بسیار پایین و در حدود 10^{-7} است، بنابراین ما برای رسیدن به دو شکستی بالا و طول تپش پایین، دو نوع ساختار جدید پیشنهاد داده‌ایم. این ساختارها با تغییراتی در شکل حفره‌های هوای اطراف مغزی و بیضوی کردن حفره‌های هوا در غلاف معرفی شده‌اند. در نتیجه، ما به تلفات حبسی حدود 10^2 dB/Km، دو شکستی بالای 7×10^{-3} و طول تپش کمتر از 2×10^{-3} mm دست یافته‌ایم.

واژه‌های کلیدی: تلفات حبسی، دوشکستی، طول تپش، فیبر شبه بلور فوتونی

۱. مقدمه

همچون اثرات غیرخطی بالا و پاشندگی بالا و قابل کنترل هستند، از این رو می‌توانند امکان تولید ابر پیوستار نوری تک مد با نوار پهن، پاشندگی مسطح، دوشکستی بالا و... را فراهم کنند [۳-۵]. این ویژگی‌ها از اختلاف زیاد ضریب شکست موثر بین مغزی و غلاف و طبیعت دوبعدی ناشی شده از آرایش منظم حفره‌های هوا در ناحیه غلاف نشأت می‌گیرد.

ساختارهای شبه‌دوره‌ای، شبه‌بلورها، ساختارهای منحصر به فردی هستند که با داشتن نظم بلندبرد دوره‌ای، در کوتاه برد دوره‌ای نیستند. محققان دریافته‌اند که ساختارهای شبه‌دوره‌ای می‌توانند منجر به پدیده‌ها و ویژگی‌های غیر معمول شوند که در ساختارهای دوره‌ای مشاهده نشده است [۶ و ۷]. شبه بلورهای فوتونی دارای

فیبرهای نوری پایه اصلی سیستم‌های مخابراتی مدرن هستند. این فیبرها هم چنین در فرستادن پرتو برای پزشکی، شیوه‌های تشخیصی، حسگرها و عکس‌برداری به کار برده می‌شوند. در طول سال‌های اخیر، کارهای مهمی روی طراحی فیبر نوری و عملکرد آنها انجام شده است. یکی از برجسته‌ترین کارها استفاده از آرایش دوره‌ای از حفره‌های هوا در غلاف که در امتداد طول فیبر ادامه پیدا می‌کند، است [۱]. به علت وجود ساختار دوره‌ای در سطح مقطع، این کلاس جدید از فیبرهای نوری تحت عنوان فیبرهای بلور فوتونی شناخته می‌شوند [۲]. فیبرهای بلور فوتونی دارای ویژگی‌های منحصر به فردی

۲.۲. طول تپش

اگر یک مد با قطبش خطی ۴۵ درجه وارد سطح مقطع فیبر شود، به دو مؤلفه عمود برهم، یکی مد آهسته (محور x) و دیگری مد سریع (محور y)، تقسیم خواهد شد. حالت قطبش خروجی به اختلاف فاز بین مؤلفه‌های x و y بستگی دارد. از آنجایی که این مؤلفه دوشکستی، اختلاف فاز بین آنها را تغییر می‌دهد، به وضوح نمایان است که این مؤلفه می‌تواند حالت قطبش را نیز تغییر دهد. موقعی که اختلاف فاز تولید شده به وسیله فیبر $\pi/2$ باشد قطبش دایروی راستگرد به دست می‌آید. حالت خطی ۱۳۵ درجه زمانی به دست می‌آید که $\Delta\phi = \pi$ باشد و در حالتی که اختلاف فاز به 2π می‌رسد، حالت قطبش، مشابه با حالت قطبش ورودی است. این شرایط بعد از یک طول انتشار به نام طول تپش به دست می‌آید و به صورت زیر است [۱۴]:

$$\Delta\beta L_B = 2\pi \Rightarrow L_B = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{\Delta n} \Rightarrow L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (2)$$

که در آن L_B طول تپش و B دوشکستی تعریف شده است.

۳.۲. تلفات حبسی

با انتشار نور در موجبر، قسمتی از انرژی میدان به داخل غلاف نشت می‌کند. این نوع اتلاف که تلفات حبسی مد اصلی نامیده می‌شود، از قسمت موهومی ضریب شکست موثر به دست می‌آید و به صورت زیر با واحد دسی‌بل بر متر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$CL = \frac{40\pi \cdot \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6}{\lambda \cdot \ln(10)} \quad (3)$$

در این رابطه طول موج بر حسب میکرومتر، $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ قسمت موهومی ضریب شکست موثر و CL تلفات حبسی است.

۳. طراحی و شبیه‌سازی

مدل کردن فیبرهای بلور فوتونی به طور دقیقی با روش‌های عددی تمام برداری^۳ انجام می‌گیرد. روش مؤلفه محدود،

تفاوت‌های برجسته‌ای با بلورهای فوتونی از جمله تقارن‌های چرخشی بالاتر و منطقه بریلوئن^۱ همگراتر هستند که در نهایت منجر به گاف‌های نواری فوتونی یکنواخت‌تر در اختلاف دی‌الکتریک پایین‌تر می‌شوند. به عنوان مثال، در یک قطعه دی‌الکتریک، از شبه بلوری از حفره‌های هوا با تقارن ۱۲ گانه با اختلاف ضریب شکست پایین استفاده شده است که گاف‌های نواری فوتونی ایجاد می‌کند در حالی که آرایش دوره‌ای با تقارن مشابه از حفره‌های هوا در قطعه دی‌الکتریک چنین چیزی را به وجود نمی‌آورد [۶]. ساختارهای شبه دوره‌ای دیگری همچون پیکربندی پرنس^۲ و هشت گوشه‌ای برای بهبود عملکرد وسایل نوری مانند موجبرها و لیزرهای کاواکی با ضریب کیفیت بالا و... به کار برده می‌شوند [۸-۱۲].

به کار بردن آرایش شبه‌دوره‌ای در فیبرهای نوری می‌تواند منجر به ویژگی‌های خاصی شود که در فیبرهای بلور فوتونی یافت نمی‌شوند. اما ویژگی‌های این نوع پیکربندی از حفره‌های هوا در فیبرها، فیبرهای شبه بلور فوتونی، به ندرت بررسی شده است. به همین دلیل ما به بررسی نوع خاصی از فیبرهای شبه‌بلور فوتونی با تقارن ۱۰ گانه پرداخته‌ایم.

۲. تحلیل ویژگی‌های ساختاری

۱.۲. دوشکستی

وقتی که باریکه نوری از میان محیطی ناهمسانگرد عبور می‌کند، به دو مؤلفه عمود بر هم در راستای محورهای اپتیکی عادی و غیرعادی تجزیه می‌شود. این مؤلفه‌ها دارای ضریب شکست-های متفاوت هستند و اختلاف بین ضریب شکست مؤثر مدهای اصلی هدایت شده مغزی در جهت محورهای عادی و غیرعادی پارامتر دوشکستی را بیان می‌کند [۱۳]:

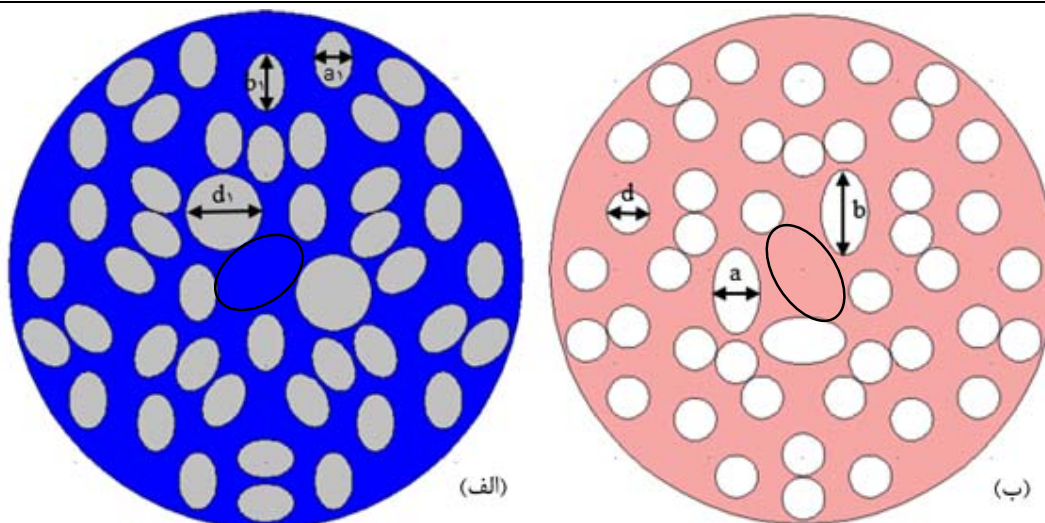
$$B = \frac{\lambda(\beta_x - \beta_y)}{2\pi} = |n_{\text{eff}_x} - n_{\text{eff}_y}| \quad (1)$$

که در آن λ طول موج، β_x و β_y به ترتیب ثابت‌های انتشار در راستای x و y ، n_{eff_x} ضریب شکست موثر در راستای x و n_{eff_y} ضریب شکست موثر در راستای y هستند.

۱. Brillouin zone

۲. Penrose

۳. Full vector numerical method



شکل ۱. (الف) ساختار اول با $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $b_1 = 0.6 \mu\text{m}$, $a_1 = 0.4 \mu\text{m}$ و با دو ثابت شبکه $0.5 \mu\text{m}$ و $2 \mu\text{m}$ (ب) ساختار دوم با $a = 0.5 \mu\text{m}$, $b = 0.45 \mu\text{m}$, $d = 0.9 \mu\text{m}$ و با دو ثابت شبکه $0.5 \mu\text{m}$ و $2 \mu\text{m}$.

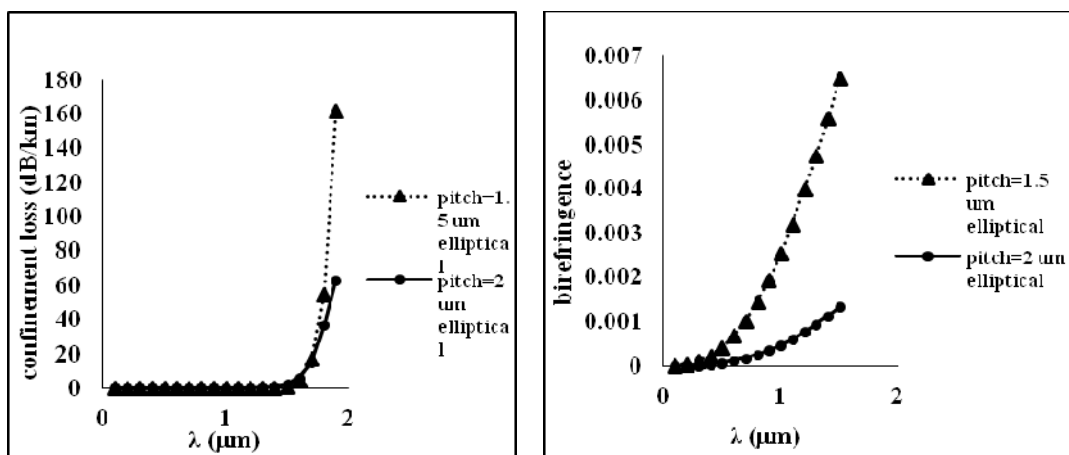
شکل ۱ نشان داده شده‌اند. ساختار اول تشکیل شده از حفره‌های هوای دایروی شکل و با سه حفره هوای بیضی شکل اطراف مغزی و ساختار دوم دارای حفره‌های هوای بیضی شکل در غلاف و دو حفره هوای بزرگ دایروی شکل اطراف مغزی است. همچنین نواحی مغزی تقریبی برای هر دو ساختار به صورت بیضی‌های سیاه رنگ برای مشخص شدن مدهای اصلی مرکزی ترسیم شده‌اند. نکته کلیدی، شکسته شدن تقارن اطراف مغزی است که منجر به اختلاف بین ضریب شکست دو مد عمود برهم می‌شود. برای شبیه‌سازی این دو ساختار از نرم‌افزار کامسول^۱ که بر اساس روش مؤلفه محدود فرمول‌بندی شده است، استفاده کرده‌ایم. به منظور مدل کردن فیبر شبه بلور فوتونی همانند فیبرهای بلور فوتونی استفاده از شرط مرزی لایه‌های تطبیقی به طور کامل^۲ ناهمسانگرد مهم و ضروری است. بنابراین با تعریف کردن ضرایب شکست هوا و سیلیکای خالص و همچنین تمامی ابعاد و اجزای ساختارهای هندسی مورد نظر و به دنبال آن جابجایی هر مد در گستره‌ای از طول موج، به نتایج اولیه دست یافته‌ایم. نهایتاً با به کار بردن فرمول‌های ذکر شده در بخش‌های قبلی و با استفاده از نرم‌افزار

روش بسیار رایجی در تحلیل موجبرهای دی‌الکتریک است. تحلیل و بررسی ساختارهای فیبر بلور فوتونی با آرایش و شکل‌های متفاوت حفره‌های هوا امکان‌پذیر است. هندسه پیچیده این ساختار می‌تواند برای انتشار و نشت مدها در سطح مقطع دو بعدی به کار برده شود.

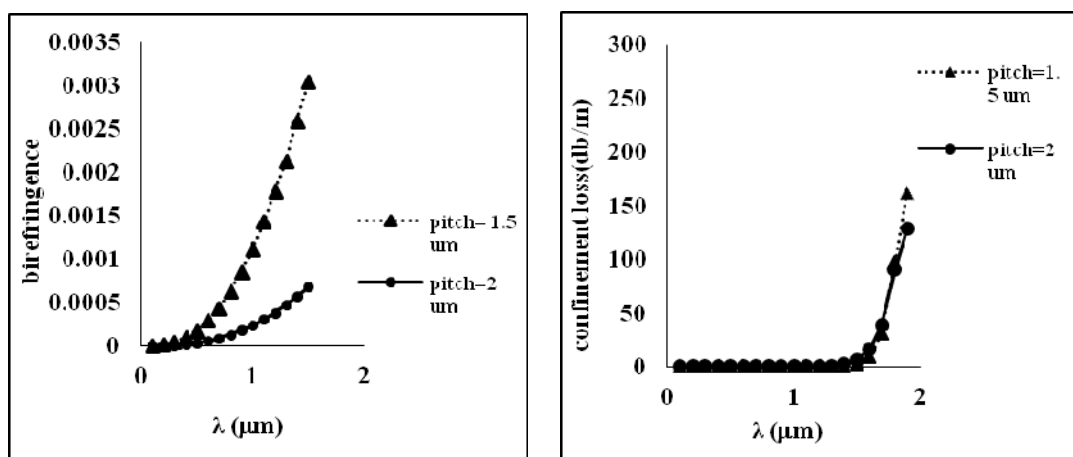
همچنین محیط ساختاری آنها به زیربخش‌هایی مثالی و چهار وجهی تقسیم می‌شوند و می‌توان هر زیر بخش را با ضریب شکست خودش نشان داد. شبه‌بلور فوتونی ۱۰ گانه مجموعه‌ای از حفره‌های هوای دایروی هستند که با زاویه ۳۶ درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. با بریدن قطعه‌ای از این ساختار و حذف حفره مرکزی می‌توان به سطح مقطع مناسبی از فیبر شبه بلور فوتونی ۱۰ گانه که دارای تقارن جالبی از حفره‌های هوا در اطراف مغزی است، دست یافت [۱۶ و ۱۷]. تغییر در آرایش حفره‌ها می‌تواند منجر به دوشکستی بالا و اتلاف تقریباً کم شود. از آنجایی که ساختار شبه‌بلور دارای ثابت‌های شبکه متفاوت هستند، نمی‌توان به این ساختارها، شبه بلورهای فوتونی، حلقه‌های حفره هوا را نسبت داد. ماده استفاده شده برای فیبر مورد نظر، سیلیکای خالص با ضریب شکست 1.444 (در طول موج $1.55 \mu\text{m}$ میکرومتر) است. دو ساختار متفاوت هر کدام با دو ثابت شبکه متفاوت طراحی و مقایسه شده‌اند و در

۱. Comsol

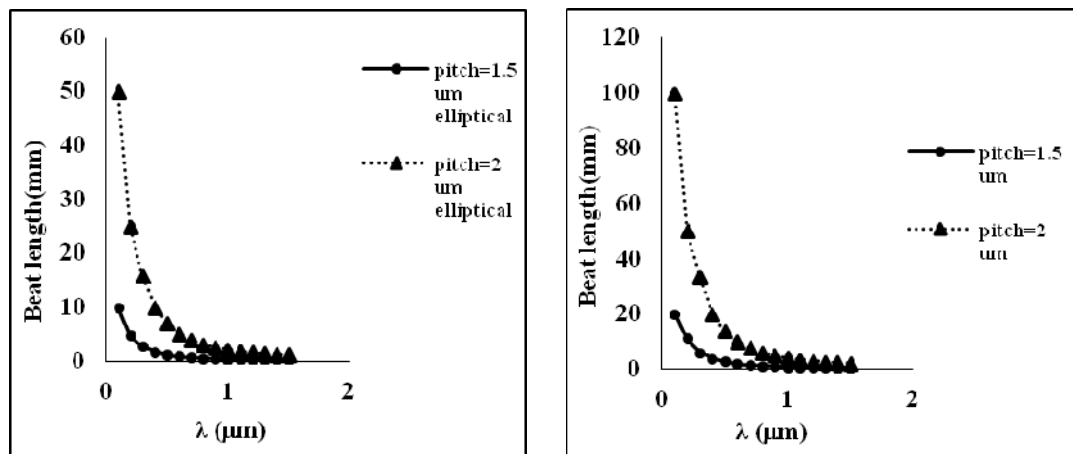
۲. Perfectly matched layer



شکل ۲. دو شکستی و تلفات حبسی برای ساختار نوع اول.



شکل ۳. دو شکستی و تلفات حبسی برای ساختار نوع دوم.



شکل ۴. طول تپش به ترتیب از چپ به راست برای ساختار نوع اول و دوم.

متلب^۱، نمودارهای مورد نظر را به دست آورده‌ایم.

۴. نتایج شبیه‌سازی

با توجه به مدل پیشنهادی مذکور، ویژگی‌های اپتیکی در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. فیبر شبه‌بلور فوتونی ۱۰ گانه بدون تغییر دارای حداکثر دوشکستی حدود 10^{-5} در طول موج $1.5 \mu\text{m}$ است و با توجه به تغییراتی که در حفره‌های هوا ایجاد شده است این پارامتر به حدود 7×10^{-3} رسیده است. شایان ذکر است در ساختار اول به دلیل وجود حفره‌های هوای دایروی شکل بزرگ اطراف مغزی و در پی آن با شکستن تقارن اطراف مغزی، تقریباً تمام پارامترها نسبت به ساختار دوم بهتر بهینه شده‌اند. با توجه به اندازه‌گیری پارامتر دوشکستی، ما طول تپش را نیز بررسی کردیم که به نتایج بسیار بهتری نسبت به فیبرهای بلور فوتونی دست یافتیم. کمترین طول تپش به دست آمده در فیبرهای بلور فوتونی نگهدارنده قطبش نزدیک دو میلی‌متر است [۱۸ و ۱۹]. در این ساختارهای پیشنهادی، طول تپشی در حدود دو میلی‌متر به دست آمده است که مطابقت بسیار بالایی با فیبر بلور فوتونی دارد. بنابراین، این دو ساختار با توجه دوشکستی بالا و طول‌تپش پایین، بسیار مفید برای فیبرهای نگه دارنده قطبش هستند. ویژگی دیگری که مورد

بررسی قرار گرفته است، تلفات حبسی است که با توجه به بزرگی حفره‌های هوای نزدیک مغزی، میدان مد به خوبی درون مغزی محدود شده و ما به اتلاف نسبتاً پایینی دست یافته‌ایم. در نتیجه، تلفات حبسی در هر دو ساختار حدود 10^2 دسی بل بر کیلومتر به دست آمده است.

۵. نتیجه‌گیری

با به وجود آوردن حفره‌های هوای بیضوی شکل و دایروی شکل با ابعاد بزرگ در فیبر شبه بلور فوتونی ۱۰ گانه می‌توان به دوشکستی بالا و اتلاف کم دست یافت. حفره‌های هوای بزرگ اطراف مغزی منجر به شکسته شدن تقارن و به دنبال آن دوشکستی بالا می‌شوند. در این مقاله، با طراحی فیبر شبه‌بلور فوتونی ۱۰ گانه غیرمتقارن، دوشکستی حدود 7×10^{-3} ، طول تپش دو میلی‌متر و تلفات حبسی 10^2 dB/Km در طول موج $1.5 \mu\text{m}$ به دست آمده است. فیبرهای شبه بلور فوتونی با این شرایط جالب در کاربردهای مخابراتی و سیستم‌های ارتباطی و همچنین در کاربردهای حس‌گری نقش بسیار مؤثری را بازی می‌کنند.

مراجع

1. T A Birks, P J Roberts, P St. J Russell, D M Atkin, and T J Shepherd, *Electron. Lett.* **31** (1995) 1943.
2. J D Joannopoulos, R D Meade, and J N Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* Princeton University Press (1995).
3. J C Knight, *Nature* **424** (2003) 851.
4. P Russell, "Appl. Phys.: Photonic Crystal Fibers," *Science* **299** (2003) 362.
5. T A Birks, J C Knight, and P St. J. Russell, *Opt. Lett.* **22** (1997) 963.
6. M E Zoorob, M D B Chariton, G J Parker, J J Baumberg, and M C Netti, *Nature* **404** (2000) 743.
7. B Freedman, G Bartal, M. Segev, R Lifshitz, and D N Christoet, *Nature* **440** (2006) 1166.
8. Y S Chan, C T Chan, and Z Y Liu, *Phys. Rev. Lett.*
9. 80 (1998) 959.
10. C Jin, B Cheng, B Man, Z Li, D Zhang, S Ban, and B Sun, *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 185.
11. K Nozaki and T Baba, *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 4877.
12. S K Kim, J H Lee, S H Kim, I K Hwang, and Y H Lee, *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 031101.
13. P -T Lee, T -Q Lu, F -M. Tsai, T -C. Lu, and H -C Kuo, *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 201104.
14. Kuang-Yu Yang, Yuan-Fong Chau, Yao-Wei Huang, Hsiao-Yu Yeh, and Din Ping Tsai, *Journal of Applied Physics* **109** (2011) 093103.
15. www.fiberoptics4sale.com.
16. R Sharma, V Janyani, and A Sharma, *International Journal of Computer Science & Emerging Technologies* **2**, 2 (2011) 238.
17. R Bhattacharjee, K Senthilnathan, S Sivabalan, and P Ramesh Babu, *Applied Optics* **53** (2014) 13.

^۱. Matlab

-
18. Y Yang, W Duan, and M Ye, *Meas. Sci. Technol.* **24** (2013) 025201.
19. K Suzuki, H Kubota, and S Kawanishi, *Optics Express* **676**, 9 (2001) 13.
17. A Bahrapour, A Iadicicco, E Foomezhi, Sh Momeni, A R Bhrampour, *Analysis of an Endlessly Single-Mode Penrose-Tiling Photonic Quasicrystal Fiber*, IEEE ISSN- 978147994818, 2014 IEEE.