بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

انتشار کم اتلاف امواج تراهرتز در موجبر بلور فوتونی هسته متخلخل با پاشندگی مسطح شده و دوشکستی بسیار بالا

هانیه کاوه، فاضل جهانگیری

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما
Hanie.kaveh.h@gmail.com, F_jahangiri@sbu.ac.ir

چکیده - در این مقاله به ارائه‌ی ساختاری از فیبر کریستال فوتونی با هسته ی بیضوی معلق و متخلخل برای هدایت امواج تراهرتز می‌پردازیم که به افزایش چشمگیر مقدار دوشکستی و همچنین کاهش میزان تلفات انتشاری منجر می‌شود. با توجه به نتایج، مقدار دو شکستی بد ست آمده برابر با ۰٫۱۲ بر سانتی‌متر همراه با تلفات موثر مواد ۰٫۲ و ۰٫۰۸ بر سانتی‌متر و تلفات تحدید $۱۰^{-۵}$ و $۱۰^{-۳}$ بر سانتی‌متر به ترتیب برای قطبش X و Y در فرکانس ۰٫۸ تراهرتز می‌باشد. همچنین پا شندگی این موجبر در بازه‌ی ۱٫۲ تا ۱٫۴ تراهرتز مسطح-شده و تغییرات آن برای قطبش X و Y به ترتیب ۰٫۱±۰٫۱ و ۰٫۱۵±۰٫۱۵ است. این نتایج، فیبر مورد بررسی را به عنوان گزینه‌ی مناسبی برای هدایت با اتلاف پایین امواج تراهرتز و استفاده در کاربرد های ملزم به حفظ قطبش مطرح می‌نماید.

کلید واژه- تراهرتز، تلفات تحدید، تلفات موثر مواد، دوشکستی، فیبر بلور فوتونی

Low Loss Terahertz Wave Propagation in Porous Core Photonic Crystal Fiber with flattened Dispersion and extremely high-birefringence

Hanie Kaveh, Fazel Jahangiri

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran
Hanie.kaveh.h@gmail.com, F_jahangiri@sbu.ac.ir

Abstract- In this paper, a photonic crystal fiber with a suspended elliptic core with slotted air holes is designed for the efficient propagation of Terahertz waves. The proposed configuration leads to a high birefringence, a low loss, and a flat dispersion. The simulation results show that this PCF exhibits an ultrahigh birefringence value of 0.12, a low effective material loss of 0.2cm^{-1} and 0.08cm^{-1} and very negligible confinement loss of 10^{-5} cm^{-1} and 10^{-3} cm^{-1} at 0.8 THz for the X-polarized and Y-polarized modes, respectively. Moreover, the suggested structure provides a very flat dispersion of 0.1±0.1 ps/THz/cm and 0.15±0.15 ps/THz/cm over the frequency range of 1.2 to 1.4 THz for two x and y polarized states, respectively. We believe that our proposed PCF will bring about a promising improvement in polarization-maintaining applications at THz frequencies.

Keywords: Birefringence, confinement loss (CL), effective material loss (EML), photonic crystal fiber (PCF), terahertz.

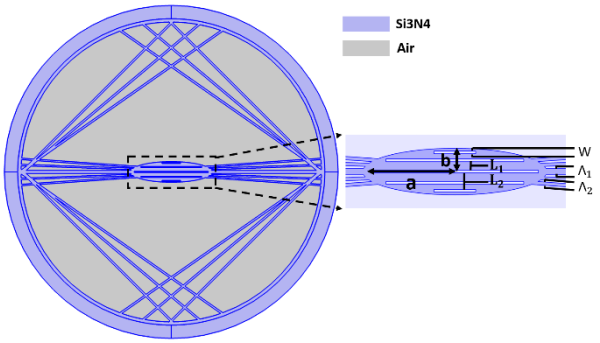
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-26]

مقدمه

به علت جذب بالای امواج تراهرتز توسط بخار آب موجود در هوا، انتقال این امواج در فضای آزاد با محدودیت روبرو می‌باشد. از این رو، استفاده از ساختارهای موجبری فیبری در کاربردهایی چون طیف سنجی [۱]، تصویربرداری غیرتهاجمی [۲]، ارتباطات [۳] و حسگری [۴] مورد بررسی بسیاری از محققان قرار گرفته است. در میان انواع فیبرهای پیشنهادی، فیبرهای بلور فوتونی (PCF) با توجه به ویژگی هایی چون ساختار منعطف و اتلاف پایین، عملکرد تک مود، دوشکستی بالا و پاشندگی رنگی قابل کنترل [۱۰-۵] مورد توجه فراوان قرار دارند. همچنین استفاده از موجبرهای متخلخل، که در آنها حفره های هوا جایگزین ماده جامد داخل هسته می‌شود، می‌تواند در کاهش تلفات انتشاری موثر باشد. مکانیزم هدایت داخل این موجبرها مبتنی بر بازتاب داخلی یا اثر باند گپ فوتونی است. ویژگی مورد نیاز فیبر در کاربردهای مبتنی بر حفظ قطبش، از جمله حسگری [۶]، ارتباطات همدوس [۷]، و تداخل سنجی [۸]، بالا بودن میزان دوشکستی است که با ایجاد اختلال در تداوم ضریب شکست یک محور نسبت به محور دیگر از طریق شکستن تقارن در ناحیه‌ی هسته یا روکش حاصل می‌شود. تاکنون ماده‌ی شفافی برای مدیریت تلفات جذبی در بازه تراهرتز مشخص نشده است. ماده‌ی مورد استفاده در غالب مطالعات ارائه شده، ماده‌ی توپاس با ضریب شکست ثابت ۱٫۵۳ در ۰٫۱تا ۱٫۶ تراهرتز می‌باشد. در یکی از بهترین نتایج بدست آمده با استفاده از این ماده مقدار دوشکستی برابر با ۰٫۰۹ و تلفات کل برابر با ۰٫۰۵۶ بر سانتی‌متر محاسبه شده است [۹]. همچنین در ساختار پیشنهادی دیگری، مقدار دوشکستی برابر ۰٫۰۸۲ و تلفات مواد و تحدید به ترتیب برابر با ۰٫۰۵ بر سانتی‌متر و $۱۰^{-۵}$ بر سانتی‌متر گزارش شده است [۱۰]. علاوه بر این، پاشندگی مسطح پایین برای انتشار امواج تراهرتز با کمک یک طراحی هسته متخلخل هیبریدی در موجبر فیبری بلور فوتونی به دست آمده است [۵]. در این مقاله، به معرفی ساختار جدیدی می‌پردازیم که علاوه بر پاشندگی مسطح-شده، دارای دوشکستی بسیار بالا و در عین حال برخودار از اتلاف پایینی است. موجبر پیشنهادی می‌تواند به عنوان گزینه ای مناسب در کاربرد های ملزم به حفظ قطبش نیز مورد توجه قرار گیرد. در ادامه، ابتدا به جزئیات طراحی ساختار پیشنهادی را ارائه می‌کنیم و سپس به شبیه سازی ویژگی‌های دوشکستی، تلفات و پاشندگی آن می‌پردازیم.

اصول طراحی و شبیه سازی

برای طراحی ساختار و شبیه سازی مدهای انتشاری از نرم افزار کامسول و روش المان محدود استفاده شده است. سطح مقطع ساختار با شعاع ۱۱۷۰ میکرومتر و هسته ای با قطر اصلی و فرعی برابر با a و b شامل پنج شکاف مستطیلی هوا با ضخامت w، در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱: سطح مقطع موجبر پیشنهادی و نمای بزرگ شده هسته

۵ لایه‌ی نازک توپاس در قسمت میانی شامل لایه ای افقی به ضخامت $\Lambda_1 = ۴d$ و ۴ لایه به ضخامت $\Lambda_۲ = ۲d$ با زاویه چند درجه ای از هسته‌ی بیضوی پشتیبانی می‌کنند ($d = ۰٫۰۴p$). ۱۲ لایه‌ی نازک مورب به ضخامت $\Lambda_۲$ به منظور شکستن تقارن ساختاری در چهار طرف هسته غلاف را تشکیل داده‌اند. این مقادیر برحسب ثابت p مقیاس بندی و برای توپاس مقدار بهینه آن ۱۳۰ میکرومتر انتخاب شده است. لایه‌ی کاملا تطبیق یافته (PML) به منظور کاهش

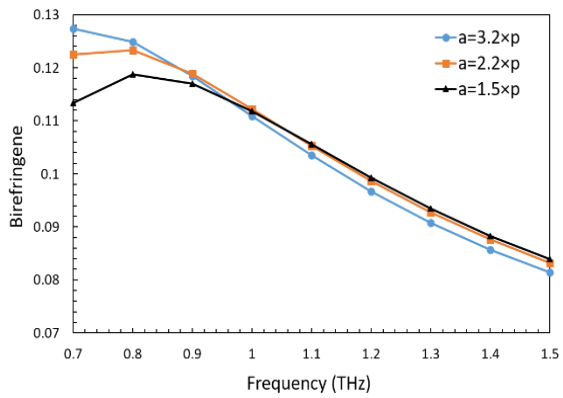
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-26]

اثر محیط خارجی با شعاع ۱۰ درصد از شعاع فیبر استفاده شده است.

بحث و بررسی

دوشکستی به عنوان تفاوت ضریب شکست موثر مدهای قطبشی X و Y (به ترتیب $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{x}}$ و $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{y}}$) طبق رابطه (۱) تعریف شده و با B نشان داده می‌شود [۹]. وارد کردن یک دوشکستی عمدی در ساختار فیبر، برای تحقق بخشیدن به فیبری با ظرفیت حفظ حالت قطبش استفاده می‌شود. در شکل۲ دوشکستی برحسب افزایش فرکانس، در سه مقدار از قطر اصلی هسته را نشان می‌دهد.

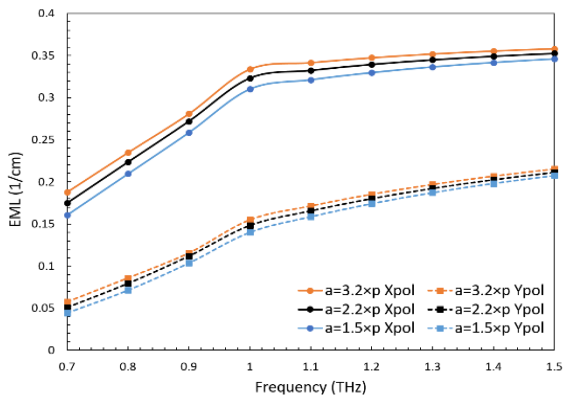
$$B = \left| n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{y}} - n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{x}} \right| \qquad (۱)$$



شکل ۲: دوشکستی برحسب فرکانس برای قطر های اصلی متفاوت از هسته با قطر فرعی ثابت b = ۰٫۵۵ × p

با توجه به شکل۲ در $a = ۳٫۲ \times \mathrm{p}$ دوشکستی بسیار بالای ۰٫۱۲ در فرکانس ۰٫۷ تا ۰٫۹ تراهرتز حاصل شده و در فرکانس‌های بالاتر، دوشکستی کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات دوشکستی با کاهش قطر اصلی کاهشی است. در رابطه (۲) محاسبه مقدار تلفات موثر مواد (EML) نشان داده شده است [۹] که در آن $\varepsilon_{\cdot}$ و $\mu_{\cdot}$ به ترتیب ضریب گذردهی نسبی و تراوایی نسبی در فضای آزاد و n_{mat} و α_{mat} ضریب شکست ماده‌ی زمینه و ضریب جذب آن می‌باشند. S_{z} نیز مولفه z بردار پویتینگ است. در شکل۳ می‌توان افزایش تلفات موثر با افزایش فرکانس در سه مقدار از قطر اصلی هسته را مشاهده کرد. این امر به دلیل افزایش اندرکنش ماده و موج در فرکانس بالاتر رخ می‌دهد. در قطرهای کوچکتر با کمتر شدن ماده زمینه تلفات کمتر خواهد بود. EML فیبر پیشنهادی در بازه‌ی بررسی شده برای قطبش X از ۰٫۱ تا ۰٫۳ بر سانتی‌متر و برای قطبش Y از ۰٫۰۵ تا ۰٫۱ بر سانتی‌متر می‌باشد.

$$\alpha_{\mathrm{eff}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\cdot}}{\mu_{\cdot}}} \left(\frac{\int_{\mathrm{mat}} n_{\mathrm{mat}} \alpha_{\mathrm{mat}} |E|^{۲} dA}{\left| \int_{\mathrm{All}} S_{\mathrm{z}} dA \right|} \right) \qquad (۲)$$



شکل ۳: EML برحسب فرکانس برای مدهای قطبشی X و Y در قطر های اصلی متفاوت از هسته

تلفات تحدید که در بازدهی کلی فیبر تاثیرگذار است با رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۰] که در آن f فرکانس و $\mathrm{Im}(n_{eff})$ بخش موهومی ضریب شکست موثر می‌باشد.

$$L_{\mathrm{c}} = ۸٫۶۸۶ \left(\frac{۲\pi f}{c} \right) \mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}}) \qquad (۳)$$

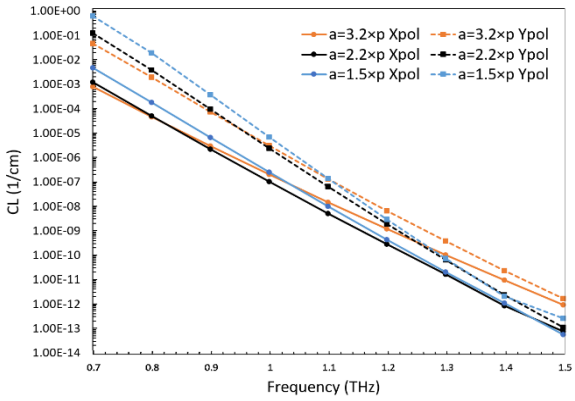
با توجه به شکل۴ با افزایش فرکانس تلفات تحدید کاهش می‌یابد و در بازه‌ی مورد بررسی از مرتبه‌ی $۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۱۳}$ بر سانتی‌متر برای قطبش X بوده است.

از آنجا که ماده‌ی استفاده شده در این ساختار پاشندگی ناچیزی دارد، لذا فقط پاشندگی موجبر با استفاده از رابطه

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-26]

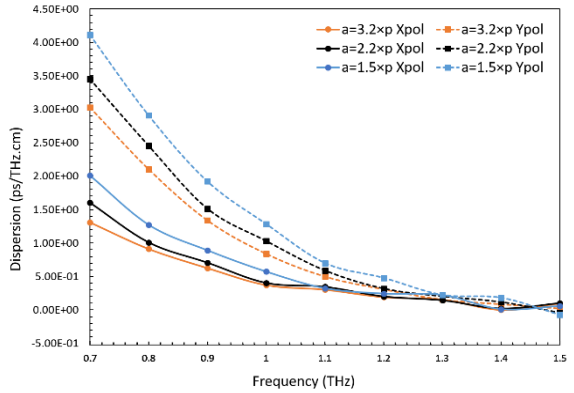
(۴) محاسبه شده که در آن β_2 پاشندگی موجبر، c سرعت نور و ω فرکانس زاویه‌ای را نشان می‌دهد [۱۰]:

$$\beta_2 = \frac{1}{c}\left(2\frac{dn_{eff}}{d\omega} + \omega\frac{d^2 n_{eff}}{d\omega^2}\right) \quad (۴)$$



شکل ۴: تلفات تحدید برحسب فرکانس برای مدهای قطبشی X و Y در قطر های اصلی متفاوت از هسته

با توجه به شکل ۵ پاشندگی این موجبر برای قطبش X و Y به ترتیب در بازه‌ی ۱ تا ۱,۵ تراهرتز و ۱,۲ تا ۱,۵ تراهرتز تقریبا مسطح-شده و میزان تغییرات آن برابر با ۰,۱۵±۰,۱۵ ps/THz/cm است.



شکل ۵: پاشندگی برحسب فرکانس برای مدهای قطبشی X و Y در قطر های اصلی متفاوت از هسته

نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه ساختاری از فیبر بلور فوتونی متخلخل، جهت انتشار امواج تراهرتز پرداختیم. نتایج محاسبات مقدار دوشکستی ۰,۱۲ در فرکانس ۰,۸ تراهرتز با تلفات موثر مواد ۰,۲ و ۰,۰۸ بر سانتی‌متر و تلفات تحدید 10^{-5} و 10^{-3} بر سانتی‌متر به ترتیب برای قطبش X و Y را نشان می‌دهد. پاشندگی این موجبر در بازه‌ی ۱,۲ تا ۱,۵ تراهرتز مسطح-شده و تغییرات آن برای قطبش X و Y به ترتیب ۰,۱±۰,۱ و ۰,۱۵±۰,۱۵ است.

مرجع‌ها

[1] J. Zhang and D. Grischkowsky, “Waveguide terahertz time-domain spectroscopy of nanometer water layers,” Opt.letters 29, 1617 (2004)

[2] F. Cunin, T. A. Schmedake, et al “Biomolecular screening with encoded porous-silicon photonic crystals,” Nat. materials 1, 39 (2002).

[3] T. Nagatsuma, G. Ducournau, et al, “Advances in terahertz communications accelerated by photonics,” Nat. Photonics 10, 371 (2016).

[4] W. Yuan, L. Khan, D. J. Webb, et al, “Humidity insensitive TOPAS polymer fiber Bragg grating sensor,” Opt. Express 19, 19731 (2011).

[۵] م. حبیبی، ف. جهانگیری، "طراحی موجبر فیبری بلور فوتونی با هسته متخلخل هیبریدی و پاشندگی مسطح پایین برای انتشار امواج تراهرتز"، بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ۱۳۹۸.

[6] H. Fu, H. Y. Tam, et al, “Pressure sensor realized with polarization-maintaining PCF-based sagnac interferometer,” Appl. optics 47, 2835 (2008).

[7] K. Wang, D. M. Mittleman, “Metal wires for terahertz wave guiding,” Nature 432, 376 (2004).

[8] D.-H. Kim and J. U. Kang, “Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity,” Opt. Express 12, 4490 (2004).

[9] M. S. Islam, M. Faisal, et al, “Dispersion flattened extremely high-birefringent kagome lattice elliptic core photonic crystal fiber in thz regime,” Opt. Quantum Electron. 51, 35 (2019).

[10] M. R. Hasan, M. S. Anower, et al, "Polarization-maintaining low-loss porous-core spiral photonic crystal fiber for terahertz wave guidance," Appl. Opt. 55, 4145 (2016).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-26]