بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

طراحی موجبر فیبری بلور فوتونی با هسته متخلخل هیبریدی و پاشندگی مسطح پایین برای انتشار امواج تراهرتز

حبیبی، میلاد؛ جهانگیری، فاضل

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده - در این مقاله به طراحی یک فیبر کریستال فوتونی با هسته هیبریدی و متخلخل برای انتشار بهینه امواج تراهرتز می‌پردازیم و خواص انتشاری موجبر حاصل را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طراحی ارائه شده می‌تواند به کاهش قابل ملاحظه پاشندگی و تلفات منجر شود. با تنظیم کسر پرشدگی هوا داخل هسته، پاشندگی موجبر بدست آمده به صورت مسطح-شده و نزدیک به صفر به دست می‌آید. ویژگی های به دست آمده در طراحی پیشنهاد شده، یک ساختار موجبری دارای انتقال انعطاف پذیر و کارآمد برای امواج تراهرتز را فراهم می‌کند.

کلید واژه- تراهرتز، فیبر بلور فوتونی، پاشندگی، موجبر

Designing a porous hybrid core photonic crystal fiber with flattened dispersion for terahertz waves propagation

Habibi, Milad; Jahangiri, Fazel

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- In this paper we design a photonic crystal fiber with hybrid porous core for optimal propagation of **THz waves, then** we investigate the propagation properties of the porous waveguide. Simulation results reveal that the presented design leads to pronounced decrease of dispersion and loss. By controlling the air filling fraction inside the core, the disperstion of the waveguide is flattened and reaches to zero. The obtained propagation in proposed design provides a waveguide structure with tunable transmission and efficiency for THz waves.

Keywords: terahertz, photonic crystal fiber, dispersion , waveguide.

مقدمه

انتشار امواج تراهرتز در فضای آزاد به دلیل تلفات ناشی از جذب بخار آب موجود در هوا با چالش فراوانی رو به رو است و یکی از این راه‌حل‌های ارائه شده برای این مشکل استفاده از موجبرها است. هرچند تاکنون ساختارهای موجبری فلزی و دی‌الکتریک متنوعی برای این منظور مورد بررسی تئوری و تجربی قرار گرفته است اما ارائه

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

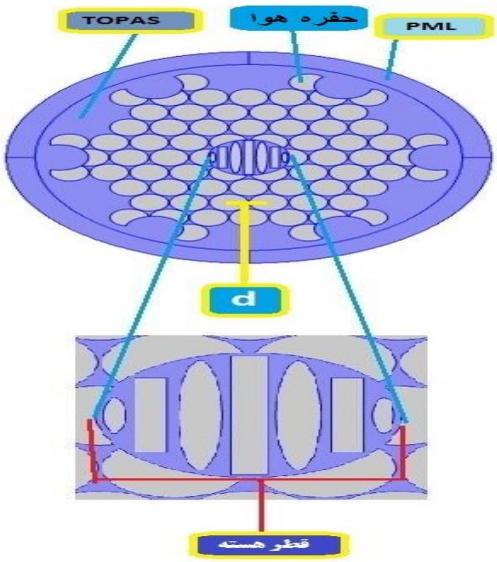
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

طراحی‌های جدید به منظور کاهش پاشندگی و تلفات موجبر همچنان مورد توجه محققین این حوزه است. طراحی و ساخت موجبرهای دارای پاشندگی مسطح-شده و همچنین تلفات موثر ماده (EML) کم در بازه تراهرتز به منظور استفاده برای انتشار بهینه این امواج، در چند سال گذشته مورد توجه زیادی قرار گرفته است و به توسعه کاربردهای این امواج در طیف‌سنجی[۱]، حسگری [۲]، ارتباطات [۳]، تصویربرداری پزشکی [۲] منجر شده است. از سوی دیگر، اخیرا استفاده از موجبر فیبر بلور فوتونی (PCF) نیز برای طراحی موجبرهای تراهرتز مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای استفاده از PCF می‌توان به عملکرد تک مود، مساحت بزرگ مد موثر، غیر خطی بودن بالا، دوشکستی بالا، پاشندگی رنگی قابل کنترل [۶-۴] اشاره کرد. مشاهده شده است که استفاده از موجبرهای متخلخل می‌تواند در کاهش تلفات انتشاری موثر باشد. مکانیزم هدایت داخل این موجبرها، که در آنها تعداد معینی حفره خالی جایگزین ماده جامد داخل هسته می-شود، مبتنی بر بازتاب داخلی یا اثر باند گپ فوتونی است.

در این مقاله، به طراحی یک موجبر فیبر بلور فوتونی (PCF) با هسته متخلخل هیبریدی شامل حفره‌های مستطیل شکل و بیضی شکل می‌پردازیم. در ابتدا ساختار فیبر پیشنهادی را مورد بررسی قرار داده و سپس ویژگی‌های دوشکستی و پاشندگی را ارائه می دهیم. نتایج ما نشان می‌دهد که ساختار فوق می‌تواند منجر به کاهش پاشندگی مسطح-شده، کاهش تلفات EML و بدست آوردن مد های نجوایی در نواحی خاص موجبر شود.

اصول طراحی PCF هسته متخلخل

سطح مقطع موجبر پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده شده است. در این موجبر پیشنهادی از حفره های بیضی و مستطیل داخل هسته استفاده کرده‌ایم. هسته دارای شعاع ۴۲۰ میکرومتر است و در ناحیه پوسته فاصله حفره ها از یکدیگر برابر با d نشان داده شده است. افزایش کسر جریان هوا (AFF) داخل هسته منجر به محدودیت بیشتر موج داخل هسته و کاهش EML و پاشندگی مسطح می‌شود. این نکته قابل ذکر است که هر چند افزایش AFF می‌تواند مطلوب باشد، ولی افزایش بیشتر آن منجر به ایجاد همپوشی حفره‌های هوا شده و ساخت آن را از نظر تکنیکی با چالش مواجه می‌کند.



شکل ۱: سطح مقطع موجبر پیشنهادی با نسخه بزرگ شده هسته

برای ماده پس زمینه موجبر از TOPAS استفاده کردیم که دارای تلفات جذبی پایین، ضریب شکست ثابت در ناحیه ۰٫۱تا ۱٫۵ تراهرتز، پاشندگی ناچیز و همچنین عدم حساسیت به رطوبت است. در بخش بیرونی PCF به منظور انطباق شرایط مرزی از یک لایه کاملا تطبیق یافته (PML) با شعاع ۱۰ درصد از فیبر استفاده شده تا اثر محیط اطراف را تا حد ممکن کاهش دهد.

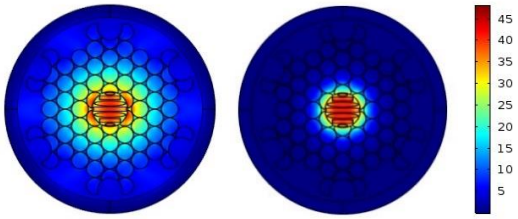
شبیه سازی

در این بررسی برای طراحی موجبر و به دست آوردن مد ها از نرم افزار کامسول استفاده کردیم که با استفاده از روش المان محدود مدها را به دست می‌آورد. در شکل۲

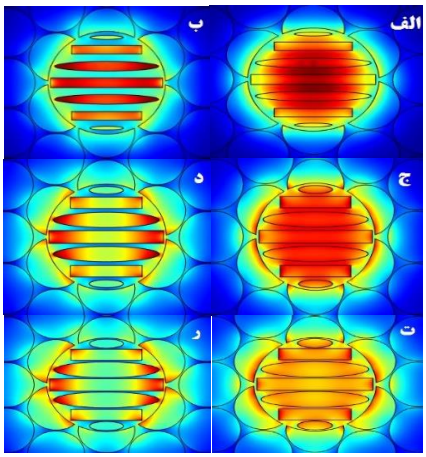
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

مد قطبش y را با افزایش فرکانس به صورت دوبعدی نشان می‌دهیم.



شکل ۲: توزیع شدت برای فرکانس های مختلف (شکل سمت راست فرکانس۰٫۸تراهرتز و شکل سمت چپ۰٫۲ تراهرتز)



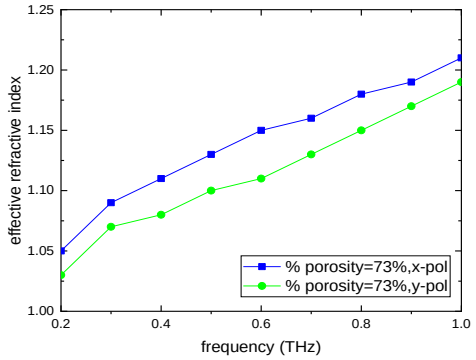
شکل۳: توزیع شدت در ، الف)تخلخل۶۳٪قطبش x ، ب)تخلخل۶۳٪ قطبش y ، ج)تخلخل۷۳٪قطبش x ، د) تخلخل۷۳٪ قطبش y ت)تخلخل۸۳٪ قطبش x ، ر)تخلخل۸۳٪ قطبش y (فرکانس کاری ۰٫۸ تراهرتز)

شکل۲ نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، محدوده فضای امواج به داخل هسته محدودتر می‌شود. در شکل۳ نیز توزیع شدت در تخلخل های مختلف برای دو مد قطبش x ,y شبیه‌سازی شده و مقادیر بهینه خواص موجبر به ازای تغییر تخلخل بدست آمده است. معیار اندازه‌گیری تخلخل را می‌توان نسبت مساحت حفره‌های داخل هسته به کل مساحت هسته در نظر گرفت. با در نظر گرفتن شرایط ساخت و تلفات پایین، در طول فرایند شبیه سازی تخلخل را برابر با ۷۳ درصد و مد قطبش x را به عنوان شرایط بهینه موجبر استفاده کرده‌ایم.

نتایج و بحث

شکل۴ ضریب شکست موثر به دست آمده بر حسب فرکانس را برای شرایط بهینه موجبر نشان می‌دهد. با استفاده از این نمودار می‌توان میزان دوشکستی موجبر در فرکانس های مختلف را بدست آورد.

از طرف دیگر، پاشندگی یکی از عواملی است که میزان پهن شدن پالس در طی انتشار داخل موجبر را تعیین می‌کند. پاشندگی کم باعث افزایش کیفیت انتقال سیگنال می‌شود. برای موجبرهای تک مد، پاشندگی برای مواد یا برای ساختار فیزیکی موجبر مطرح است.



شکل ۴ : ضریب شکست موثر بر حسب فرکانس در شرایط طراحی بهینه

یکی از دیگر از خواص مدنظر برای طراحی مناسب موجبر تراهرتز تلفات EML آن است. این تلفات که از خواص ذاتی مواد موثر ناشی می‌شود را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۵]:

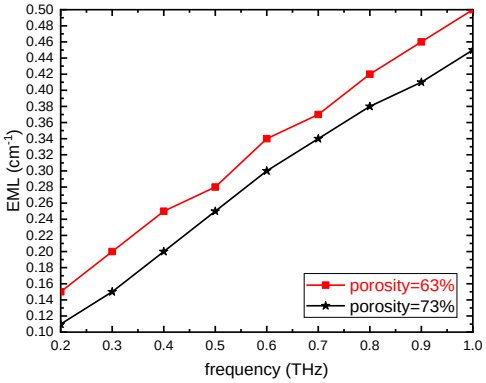
$$\alpha_{eff} = \sqrt{\frac{\epsilon_\circ}{\mu_\circ}}\left(\frac{\int_{mat} n_{mat}|E^2|\alpha_{mat}dA}{\left|\int_{all} s_z dA\right|}\right) \quad (۱)$$

در این رابطه $\epsilon_\circ$ و $\mu_\circ$ به ترتیب ضریب گذردهی نسبی و تراوایی نسبی در فضای آزاد هستند. همچنین n_{mat} همان

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

ضریب شکست ماده پس زمینه Zeonex و α_{mat} تلفات جذبی ماده خالص است. s_z نیز مولفه z بردار پویتینگ به صورت $s_z = \frac{1}{2}(E \times H^*)_z$ است که در آن E و H میدان-های الکتریکی و مغناطیسی موج انتشاری هستند. تلفات موثر محاسبه شده بر حسب فرکانس در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس، EML نیز افزایش می‌یابد.



شکل۵ : تلفات EML بر حسب فرکانس در دو تخلخل متفاوت

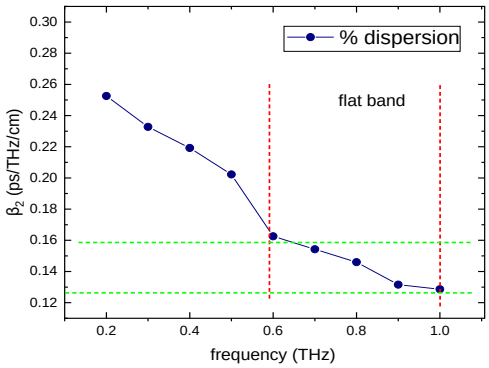
از آنجا که در این ساختار ماده‌ای استفاده کردیم که پاشندگی ناچیزی دارد، لذا فقط پاشندگی موجبر را برای طرح پیشنهادی بررسی می‌کنیم. برای محاسبه پاشندگی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم[۷]:

$$\beta_2 = \frac{2}{c}\frac{dneff}{d\omega} + \frac{\omega}{c}\frac{d^2neff}{d\omega^2} \quad (ps/THz/cm) \qquad (۲)$$

که β_2 پاشندگی موجبر را نشان می‌دهد، c سرعت نور و ω نشان دهنده فرکانس زاویه‌ای است. از شکل۶ مشاهده می‌شود که در موجبر پیشنهادی پاشندگی در محدوده $0.6 - 1\ THz$ تقریبا مسطح است و میزان تغییرات پاشندگی در این محدوده $(ps/THz/cm)$ 0.14 ± 0.01 است.

نتیجه گیری

در این مقاله یک فیبر بلور فوتونی با هسته هیبریدی و متخلخل طراحی کردیم که در فرکانس‌های پایین دارای پاشندگی مسطح-شده برابر با 0.14 ± 0.01 $(ps/THz/cm)$ در محدوده فرکانسی $0.6 - 1\ THz$ است و در این محدوده فرکانسی تلفات EML کمی دارد.



شکل۶ : پاشندگی بر حسب فرکانس در تخلخل ٪۷۳

مرجع‌ها

[1] Zhang, J., & Grischkowsky, D.Waveguide terahertz time-domain spectroscopy of nanometer water layers. *Optics Letters*, *Vol. 29*, No. 14, pp. 1617-1619, 2004.

[2] Abbott, Derek, and Xicheng Zhang. "Scanning the issue: T-ray imaging, sensing, and retection.", 2007.

[3] Pinto, Domenico, and S. S. A. Obayya. "Improved complex-envelope alternating-direction-implicit finite-difference-time-domain method for photonic-bandgap cavities." Journal of Lightwave Technology Vol. 25,No.1, pp. 440-447, 2007.

[4] Lu, S., et al. "Analysis of birefringent and dispersive properties of photonic crystal fibers." Applied optics, Vol. 50,No. 30, pp. 5798-5802, 2011.

[5] Sultana, Jakeya, et al. "Highly birefringent elliptical core photonic crystal fiber for terahertz application." *Optics Communications*, Vol. 407, pp. 92-96, 2018.

[6] Ademgil, Huseyin, Shyqyri Haxha, and Fathi AbdelMalek. "Highly nonlinear bending-insensitive birefringent photonic crystal fibres." Engineering, Vol. 2, No.08, p. 608, 2010.

[7] Islam, Md Saiful, et al. "Low loss and low dispersion hybrid core photonic crystal fiber for terahertz propagation." Photonic Network Communications, Vol. 35, No. 3, pp. 364-37, 2018.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]