

تحلیل مشخصه پاشندگی فیبرهای کریستال فوتونی توسط روش شاخص موثر

امیرحسین طالبی

رئیس گروه انرژی کنترل و تله متری، شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی، تبریز talebi-a@abfaazarbaijan.ir

چکیده

تجزیه و تحلیل خواص پاشندگی فیبرهای کریستال فوتونی، در طراحی و توسعه سیستم‌های ارتباط نوری یکی از نکات کلیدی محسوب می‌شود. در این مقاله، به بررسی و تجزیه و تحلیل پاشندگی ساختارهای مختلف فیبرهای کریستال فوتونی توسط روش‌های شاخص موثر پرداخته شده است. همچنین روش‌های شاخص موثر عددی و شاخص موثر برداری نیز به صورت ریاضی معرفی شده است. در واقع، علل بررسی پاشندگی در فیبرهای کریستال فوتونی عبارتند از: جبران پاشندگی در طول موج‌های مختلف، مسطح نمودن تابع پاشندگی و پاشندگی رنگی منفی برای ساختارهای مختلف فیبرهای کریستال فوتونی. همچنین نقش تغییر قطر و فاصله‌ی حفره‌های هوا در جبران پاشندگی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: پاشندگی منفی، جبران پاشندگی، روش شاخص موثر، طول موج پاشندگی صفر، فیبر کریستال فوتونی.

۱. مقدمه

یکی از مهمترین چالش‌های فیبر نوری، چه در ناحیه‌ی خطی و چه در ناحیه‌ی غیر خطی، کنترل پاشندگی در سیستم‌های مخابراتی است.

روش شاخص موثر یک روش ساده و عددی است که می‌توان توسط این روش با کیفیت و دقت بالاتری، خصوصیات فیبرهای کریستال فوتونی را در مقایسه با سایر روشهای عددی به دست آورد. به همین دلیل، این روش در فیبرهای کریستال فوتونی، جهت مطالعه‌ی خواص پاشندگی، مانند پاشندگی رنگی منفی و پاشندگی مسطح استفاده می‌شود [۱].

۲. روش شاخص موثر عددی

برای شناخت روش عددی شاخص موثر^۱، ابتدا از معادله‌ی عددی موج شروع می‌کنیم:

$$[\nabla_t^2 + (k^2 n^2 - \beta^2)]\psi = 0 \quad (۱)$$

که در این معادله، ∇_t^2 تابع لاپلاسین مورب در مختصات استوانه‌ای $k = 2\pi/\lambda$ ، λ طول موج در خلاء، n شاخص ماده و β ضریب ثابت انتشار است. با اعمال معادلات شرایط مرزی برای داخل حفره هوا و ناحیه سیلیکا به ترتیب معادلات (۲) و (۳) حاصل می‌شود [۲].

$$\psi_1 = AI_0(WR) \quad (۲)$$

$$\psi_2 = BJ_0(UR) + CY_0(UR) \quad (۳)$$

معادله‌ی (۴) برای تعیین شاخص موثر n_{FSM} حاصل می‌شود:

$$BJ_1(u) + CY_1(u) = 0 \quad (۴)$$

اگر B و C ثابت فرض شوند داریم:

$$B = \frac{A}{I_0(U)} \left[I_0(W) - \frac{WI_1(W)J_0(U) - UJ_1(U)I_0(W)}{U[J_1(U)Y_0(U) - J_0(U)Y_1(U)]} \right] \quad (۵)$$

که پارامترهای U ، W و u به ترتیب برابر هستند با معادلات (۶)، (۷) و (۸):

$$U = k_0 a \sqrt{n_s^2 - n_{cl}^2} \quad (۶)$$

$$W = k_0 a \sqrt{n_{cl}^2 - n_a^2} \quad (۷)$$

$$u = k_0 b \sqrt{n_s^2 - n_{cl}^2} \quad (۸)$$

که در توابع فوق، n_s و n_a به ترتیب شاخص انکساری و شاخص سیلیکای خالص فیبر هستند [۳].

۳. روش شاخص موثر

در روش شاخص موثر، خصوصیات پاشندگی فیبرهای کریستال فوتونی مبتنی سیلیکا در ساختارهای مختلف، برای بدست آوردن سه پارامتر عمده زیر تجزیه و تحلیل می‌شود: اول، پاشندگی صفر در هر طول موج، دوم، پاشندگی مسطح تقریباً صفر در بازه‌ی $-۰/۰۵$ تا $۰/۲۵$ پیکو ثانیه بر نانومتر در کیلومتر ($ps.nm^{-1}.km^{-1}$) و سوم، پاشندگی منفی رنگی. طول موج پاشندگی صفر به سادگی می‌تواند با تغییر قطر حفره‌های هوا و یا افزایش فاصله‌ی بین آنها به هر مقداری تغییر کند [۴-۶]. پاشندگی مسطح تقریباً صفر در فیبرهای کریستال فوتونی در محدوده‌ی طول موج‌های $۱/۳$ تا $۱/۷$ میکرومتر به دست می‌آید. علاوه بر آن، با تغییر اندازه‌ی هسته‌ی فیبرهای کریستال فوتونی، پاشندگی منفی نیز تغییر نشان می‌دهد [۹]. بر این اساس، انتظار می‌رود تجزیه و تحلیل خواص پاشندگی فیبرهای کریستال فوتونی، در طراحی و توسعه‌ی سیستم‌های ارتباط نوری مفید واقع شود.

^۱ Scalar Effective Index Method (SEIM)

۴. محاسبه‌ی پاشندگی

پاشندگی فیبرهای کریستال فوتونی با در نظر گرفتن ضریب شکست سیلیکای خالص با استفاده از فرمول سلمیر^۱ به صورت زیر بیان می‌شود [۲]:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_e}{d\lambda^2} \quad (۹)$$

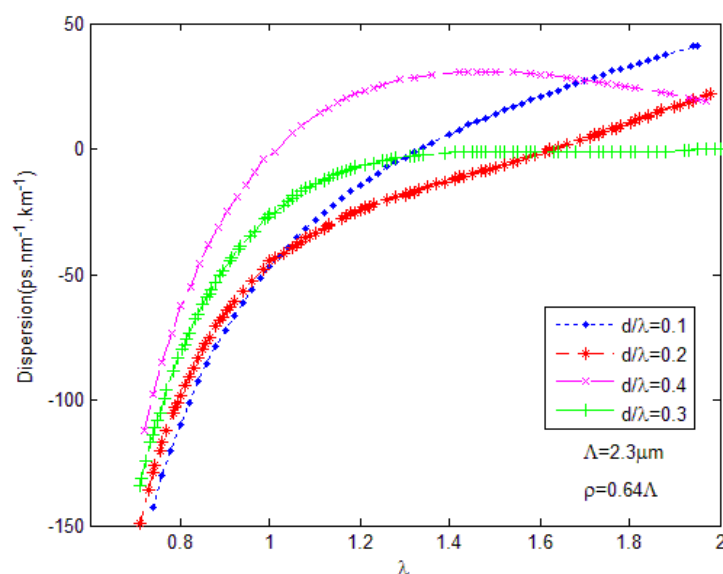
در این تابع D ، پاشندگی و ضریب هوا ثابت فرض شده است، n_e نشان دهنده‌ی شاخص موثر در حالت هدایت [۱-۱۳] و λ (بر حسب میکرومتر) طول موج فضای آزاد است. همچنین شاخص موثر انکساری برابر است با:

$$n_{\text{eff}} = \beta \frac{[\lambda, n_m(\lambda)]}{k_0} \quad (۱۰)$$

در این تابع β ثابت انتشار فرض شده است [۱۲و۲].

۴.۱. طول موج پاشندگی صفر

شکل (۱) نشان می‌دهد تغییر طول موج پاشندگی صفر از منطقه‌ی مادون قرمز طیف به منطقه‌ی ماوراء بنفش آن، در فیبر نوری معمولی ممکن نیست. بنابراین، با تغییر اندازه‌ی حفره‌های هوا و فاصله‌ی بین آنها، Λ و طول موج پاشندگی صفر را می‌توان به مقدار دلخواه تغییر داد.



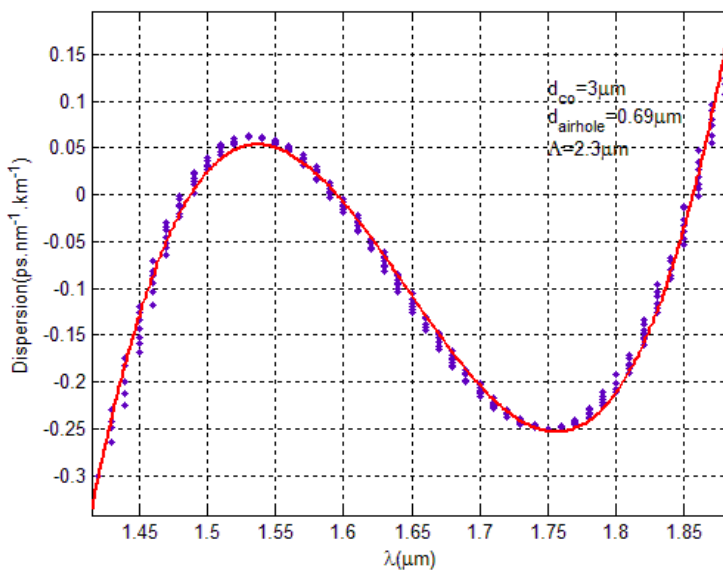
شکل ۱: مقایسه‌ی نسبت طول موج و قطر حفره‌های هوا با پاشندگی

^۱ Sellemier

۴.۲. پاشندگی مسطح تقریباً صفر

شکل (۲) نشان می‌دهد به سادگی می‌توان با تنظیم پارامترهای غلاف، فیبر کریستال فوتونی با پاشندگی مسطح که شامل طیف گسترده‌ای از طول موج‌هاست طراحی نمود [۱۶].

با اعمال پارامترهای زیر می‌توان پاشندگی مسطح تقریباً صفر طراحی نمود: فاصله‌ی حفره‌های هوا $2/3$ میکرومتر، قطر حفره‌ی هوا $0/69$ میکرومتر، قطر هسته (d_{co}) 3 میکرومتر و حفره‌های ریز ساختار هوای جایگزین شده در غلاف فیبر کریستال فوتونی مبتنی بر سیلیکا. شکل (۵) نشان دهنده‌ی تغییرات پاشندگی مسطح تقریباً صفر با اعمال این پارامترها در طراحی فیبر کریستال فوتونی در بازه‌ی $0/05$ تا $0/25$ ps.nm⁻¹.km⁻¹ است. خصوصیت پاشندگی مسطح فیبر کریستال فوتونی را می‌توان در سیستم‌های مخابراتی نوری WDM مورد استفاده قرار داد.

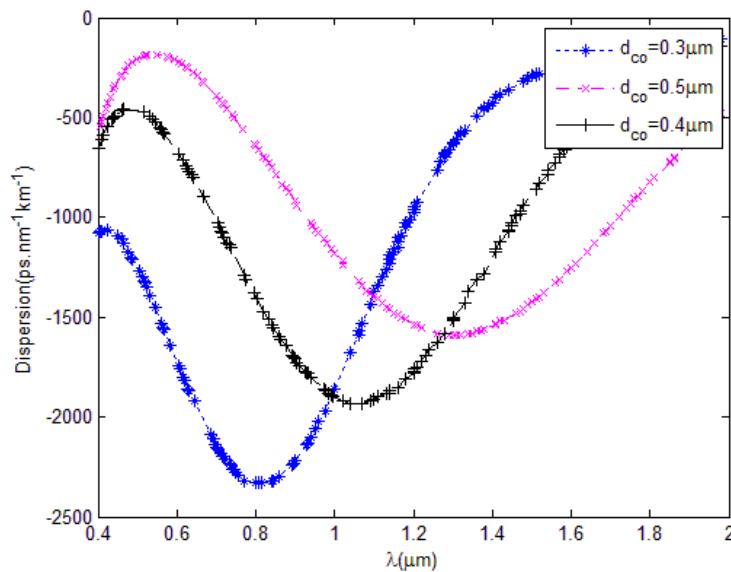


شکل ۲: تغییرات پاشندگی مسطح تقریباً صفر در بازه‌ی طول موج $1/3$ تا $1/7$ میکرومتر

۴.۳. پاشندگی رنگی منفی

پاشندگی رنگی در فیبرهای تک مد موجب گستردگی پالس‌های نوری، محدود شدن سرعت انتقال داده‌ها و همچنین محدود شدن طول فیبر نوری شود. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و جبران آثار پاشندگی، تکنیک‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیبرهای نوری مورد استفاده در لینک‌های مخابراتی، برای طول موج 1300 نانومتر طراحی شده بودند. با این وصف، در حال حاضر پاشندگی (حدوداً 20 ps.nm⁻¹.km⁻¹) در طول موج 1550 نانومتر ترجیح داده می‌شود. این مقدار زیاد پاشندگی را می‌توان با طول کوتاهی از نوع خاصی از فیبر نوری مانند فیبرهای جبران پاشندگی^۱ جبران نمود، این قبیل فیبرها را که پاشندگی منفی بالایی دارند با فیبر اصلی طوری سری می‌کنند که مجموعاً پاشندگی کل آنها برابر صفر شود. فیبرهای کریستال فوتونی به دلیل وجود پاشندگی منفی بالا، پتانسیل بالایی جهت جبران سازی پاشندگی دارند. این اندازه پاشندگی منفی در فیبرهای کریستال فوتونی منحصرأ متعلق به این طول موج نیست، بلکه برای طیف وسیعی از طول موج‌ها این مسئله صادق است. اختلاف زیاد بین شاخص‌های هسته و غلاف، موجب پاشندگی زیادی در محدوده‌ی وسیعی از طول موج می‌شود.

^۱ dispersion compensating fibers (DCFs)



شکل ۶: پاشندگی منفی برای فیبرهای کریستال فوتونی با قطر هسته‌ی متفاوت

در فیبرهای کریستال فوتونی، اختلاف بین شاخص‌ها راحتی به دست می‌آید و وابسته به پارامترهای غلاف یعنی قطر حفره‌ها و فاصله‌ی بین آنهاست. شکل (۶) پاشندگی منفی برای قطر هسته‌های مختلف فیبرهای کریستال فوتونی را نشان می‌دهد. با تغییر قطر هسته فیبر کریستال فوتونی، در طول موج ۴۰۰ نانومتر پاشندگی به میزان $-584/50 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ ، در طول موج ۱۳۰۰ نانومتر پاشندگی $-1600 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ و پاشندگی $-1350 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر ممکن است به دست بیاید. همچنین با توجه به شکل (۶)، معلوم می‌شود که در فیبرهای کریستال فوتونی با قطر هسته‌های $0/3$ ، $0/4$ و $0/5$ میکرومتر حداکثر پاشندگی منفی در $0/8$ میکرومتر $-2332/10 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ ، در $1/06$ میکرومتر $-1586/55 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ و در $1/31$ میکرومتر $-1927/601 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ به دست می‌آید. از این اندازه‌ی بالای پاشندگی منفی می‌توان برای جبران پاشندگی غیرعادی فیبر تک‌مُد استفاده نمود. این بدان معنی است که فیبر کریستال فوتونی می‌تواند جبران‌ساز پاشندگی برای فیبر تک‌مُد استاندارد شود. بنابراین، پاشندگی منفی فیبر کریستال فوتونی، آن را گزینه‌ی مناسبی برای استفاده به عنوان فیبر جبران پاشندگی در لینک‌های مخابرات نوری می‌سازد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق خصوصیات پاشندگی فیبرهای کریستال فوتونی از طریق تجزیه و تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، توسط روش‌های عددی و برداری شاخص موثر، خصوصیات شاخص مُد هدایت این نوع فیبرها محاسبه و معرفی شد. طول موج پاشندگی صفر برای فیبر کریستال فوتونی را می‌توان با تغییر اندازه و مهندسی حفره‌های هوا و فاصله‌ی بین آنها به طور دلخواه مشاهده نمود. پاشندگی مسطح تقریباً صفر فیبرهای کریستال فوتونی موجب توسعه‌ی کاربرد آنها در سیستم‌های مخابراتی WDM شده و منفی بودن پاشندگی رنگی در این نوع فیبر نشان می‌دهد که برای جبران پاشندگی مناسب به نظر می‌رسد.

۶. مراجع

1. Ferrando, E. Silvestre, J.J. Miret, P. Andres and M.V. Andres, Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber, *Opt Letters* 24 , 276–278, 1999.
2. Ferrando, E. Silvestre, J.J. Miret, and P. Andres, Vector description of higher order modes in photonic crystal fibers, *J Opt Soc Am A* 17 , 1333–1340, 2010.
3. S.G. Johnson and J.D. Joannopoulos, Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a plane-wave basis, *Opt Express* 8, 173–190, 2011.
4. D. Mogilevstev, T.A. Birks, and P.St.J. Russell, Localized function method for modeling defect modes in 2-D photonic crystals, *J Light-wave Technology* 17, 2078–2081, 1999.
5. T.M. Monro, D.J. Richardson, N.G.R. Broderick, and P.J. Bennett, Holey Fibers: an efficient modal model, *J Light-wave Technology* 17, 1093–1101, 1999.
6. F. Brechet, J. Marcou, D. Pagnoux, and P. Roy, Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method, *Opt Fiber Technology* 6, 181–191, 2010.
7. M. Qiu, Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite difference time domain method, *Microwave Opt Technology Letters* 30, 327–330, 2001.
8. T.P. White, R.C. McPhedran, C.M. de Sterke, L.C. Botten, and M.J. Steel, Confinement losses in micro structured optical fibers, *Opt Letters* 26, 1660–1662, 2011.
9. Z. Zhu and T.G. Brown, Full-vectorial finite-difference analysis of micro-structured optical fibers, *Opt Express* 10, 853–864, 2002.
10. J. Broeng, D. Mogilevstev, S.E. Barkou, and A. Bjarklev, Photonic Crystal Fibers: A new class of optical waveguide, *Opt Fiber Technology* 5, 305–330, 1999.
11. J.C. Knight, T.A. Birks, R.F. Cregan, and P.St.J. Russell, Photonic crystals as optical fibers- Physics and applications, *Opt Mater* 11, 143–151, 2010
12. R. Ghosh, A. Kumar, J.P. Meunier, and E. Marin, Modal characteristics of few-mode silica-based photonic crystal fibers, *J Opt & Quantum Electron* 32 (2000), 963–970.
13. S.K. Varshney, M.P. Singh, and R.K. Sinha, Propagation characteristics of photonic crystal fibers, *Adv. Studies Theor. Phys.*, 1, 75-85, 2007.
14. H.Talebi, A.andalib, H,Alipour-banaei, Pre-Chirp Method for Dispersion Compensation in Optical Fibers, *ITMC 2nd conf.*, 2012
15. R. K. Sinha and Shailendra K. Varshney, Dispersion properties of photonic crystal fibers, *Microwave and optical technology letters* 37, 129-132, 2012.
16. J.K. Ranka and R.S. Windeler, Nonlinear interactions in air-silica microstructure optical fibers, *Opt & Photon News*, 20–25, 2010.

Analyze of the Dispersion Characteristics of Various Designs Photonic Crystal Fibers by Effective Index Method

Amirhassan Talebi

Director of Energy, Control and Telemetry, Water and Wastewater Co., East
Azarbaijan, Tabriz, Iran, talebi-a@abfaazarbaijan.ir

Abstract

Analysis of dispersion properties of photonic crystal fibers, in the development of optical communication systems is considered as one of the key points.

Systematic knowledge of the special guiding properties of photonic crystal fibers (PCFs) permits the achievement of qualitatively novel dispersion curves. In this paper, by the effective index method, the dispersion characteristics of PCFs for various structures have been analyzed. Further, scalar effective index and full vector effective index methods are represented. In fact, the dispersion properties of these fibers are analyzed for third-order dispersion: zero dispersion at any wavelength, nearly zero ultra-flattened dispersion, and a very high negative chromatic dispersion for various designs of PCFs. Also, the influence of normalized air hole size and separation between them on zero dispersion wavelengths is studied.

Keywords: Dispersion compensating, effective index method, photonic crystal fiber; zero dispersion wavelength