



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



نقش سیال نوری در کنترل تکانه‌ی زاویه‌ای مداری نور در تارهای بلور فوتونی دایروی

وحید شریف، حسن پاکارزاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده- استفاده از تکانه‌ی زاویه‌ای مداری نور (OAM) در سیستم‌های ارتباطات نوری، منجر به افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات شده است. تارهای بلور فوتونی دایروی (C-PCFs) با یک مغزی هوای مرکزی، نمونه‌ی خوبی برای هدایت OAM نور هستند. در این مقاله، یک طراحی خاص از C-PCFها در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی می‌شود و در حالی که پارامترهای هندسی آن ثابت نگه داشته شده است، کنترل مدهای OAM بر مبنای تزریق سیال نوری پیشنهاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تزریق سیال نوری درون C-PCFها می‌توان مدهای OAM را در محدوده‌ی طول موجی ۱/۲۵-۲ میکرومتر به خوبی کنترل کرد.

کلیدواژه- تارهای بلور فوتونی دایروی، تکانه‌ی زاویه‌ای مداری، سیال نوری، ویژه مدهای برداری.

Role of Optical Fluid in Control of Orbital Angular Momentum of Light in Circular Photonic Crystal Fibers

Vahid Sharif¹, Hassan Pakarzadeh²

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz

1 e-mail: v.sharif@sutech.ac.ir, 2 e-mail: pakarzadeh@sutech.ac.ir

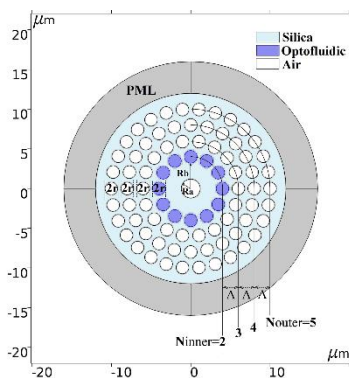
Abstract- The use of orbital angular momentum (OAM) of light in optical communication systems has led to an increase in data transmission capacity. Circular photonic crystal fibers (C-PCFs) with an air-core in the center are good candidates for guiding OAM of light. In this paper, a special design of C-PCFs is simulated in Comsol software and the controlling of OAM modes is proposed based on optofluidic infiltrated C-PCF while keeping the geometrical parameters fixed. The results show the OAM modes can be well controlled in optofluidic-infiltrated C-PCFs over the wavelength range of 1.25-2.0 μm .

Keywords: circular photonic crystal fibers, orbital angular momentum, optical fluid, vector eigenmodes.

$n_F = 1.35$ و $n_F = 1.4$ در اولین حلقه از حفره‌های هوای یک طراحی خاص از C-PCF ها استفاده می‌شود.

مبانی نظری و روش شبیه‌سازی

یک طراحی خاص از خانواده‌ی C-PCF ها، در شکل ۱ نشان داده شده است [۴ و ۵]. حفره‌های هوا با شعاع $r = 0.8 \mu\text{m}$ بر روی حلقه‌های متحدالمرکز قرار گرفته‌اند. مکان هر حفره‌ی هوا در دستگاه مختصات قطبی (R, φ) به صورت $R = N \Lambda$ و $\varphi = 2n\pi / 6N$ است که N و Λ به ترتیب تعداد و فاصله‌ی بین حلقه‌های متحدالمرکز را نشان می‌دهد و n مقادیر صحیح ۱ تا $6N$ را دربر می‌گیرد. یک حفره‌ی هوا با شعاع $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ در مرکز قرار می‌گیرد و با حذف اولین حلقه از حفره‌های هوا ($N = 1$)، ناحیه‌ی حلقوی درون مغزی با شعاع بیرونی $R_b = (\Lambda \times N_{inner}) - r = 3.2 \mu\text{m}$ تشکیل می‌شود.

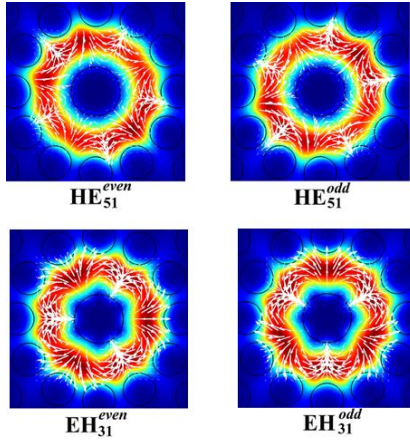


شکل ۱: سطح مقطع C-PCF طراحی شده در نرم‌افزار کامسول با $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ و $R_b = 3.2 \mu\text{m}$ ، $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ ، $r = 0.8 \mu\text{m}$ حفره‌های هوا در ناحیه‌ی غلاف (حفره‌های آبی رنگ) می‌تواند توسط سیال‌های نوری با ضرایب شکست $n_F = 1.3$ ، $n_F = 1.35$ و $n_F = 1.4$ پر شوند. PML: لایه‌ی کاملاً منطبق شده‌ی دایروی.

ماده‌ی زمینه‌ی تار سیلیکا (ضریب شکست $1/444$ در $1/55$ میکرومتر) توسط رابطه‌ی سلمیر تعریف شده است [۷]. تمامی حفره‌های هوا (مرکزی و غلاف) با ضریب شکست $n_{air} = 1$ در نظر گرفته شده‌اند و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، حلقه‌ی اول از آرایه‌ی حفره‌های هوا در غلاف ($N_{inner} = 2$) توسط سیال‌های نوری با ضرایب

تکانه‌ی زاویه‌ای مداری نور (OAM) برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ با پرتوهای لاگر-گوس (LG) به رسمیت شناخته شد [۱]. این پرتوها حاوی یک جبهه‌ی فاز مارپیچی به صورت $\exp(il\varphi)$ هستند که l مرتبه‌ی بار هندسی مدهای OAM و φ زاویه‌ی سمتی را نشان می‌دهد. نور قطبیده‌ی دایروی معرف تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینری (SAM) است که به طور کامل از OAM مجزاست [۲]. اخیراً پرتوهای حامل OAM نقش مهمی را در زمینه ارتباطات نوری فضای آزاد و سیستم‌های تار نوری ایفا کرده‌اند. روش تسهیم فضایی (SDM) در مخابرات نوری می‌تواند علاوه بر روش‌های تسهیم طول موجی (WDM) و تسهیم قطبش (PDM) برای افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که مدهای OAM با مقادیر مختلف l بصورت فضایی متعامد هستند، می‌توانند نماینده‌ی بالقوه برای کانال‌های فضایی در سیستم‌های SDM باشند [۳]. نیاز به انتقال مدهای OAM در تارهای نوری منجر به طراحی و تولید نسل جدیدی از تارهای نوری شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به تارهای بلور فوتونی دایروی (C-PCFs) با یک مغزی حلقوی اشاره کرد [۴]. پارامترهای زیادی برای طراحی C-PCF ها مانند قطر حفره‌های هوا در ناحیه‌ی غلاف و ضخامت ناحیه‌ی حلقوی وجود دارد بدین معنی که برای کنترل مرتبه‌ی l نیاز به تغییر پارامترهای هندسی C-PCF ها است [۵]. در این پژوهش، یک پیشنهاد مبتنی بر نفوذ سیال نوری درون C-PCF ها، ارائه می‌دهیم که قادر به کنترل مرتبه‌ی l از مدهای OAM است. در حالی که پارامترهای هندسی تار بدون تغییر در نظر گرفته می‌شود. روش‌های تجربی برای تزریق سیال‌های نوری در حفره‌های تارهای بلور فوتونی (PCFs) در [۶] گزارش شده است. طراحی و شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار کامسول انجام می‌گیرد و از سه سیال نوری با ضرایب شکست $n_F = 1.3$ ،

الکتریکی هر مد بر روی سطح مقطع تار توسط بردارهای سفید رنگ بیانگر اختلاف فاز $\pi/2$ بین هر جفت مد زوج و فرد می‌باشد.



شکل ۲: شدت محدود شده‌ی مدهای زوج و فرد $HE_{5,1}$ و $EH_{3,1}$ در ناحیه‌ی حلقوی C-PCF طراحی شده؛ بردارهای سفید رنگ نشان دهنده‌ی توزیع میدان الکتریکی هستند.

به منظور حمایت تار نوری از مدهای OAM، تبهگنی بین مدهای مراتب بالاتر باید حذف شود به این معنی که اختلاف ضریب شکست موثر بین دو مد برداری $HE_{l+1,m}$ و $EH_{l-1,m}$ باید بزرگتر از 10^{-4} باشد [۵]:

$$\Delta n_{eff} = \left| n_{eff_{HE_{l+1,m}}} - n_{eff_{EH_{l-1,m}}} \right| 10^{-4} \quad (3)$$

در غیر این صورت ثابت انتشار (β) دو مد برابر و از این رو با یکدیگر ترکیب و به مدهای قطبیده‌ی خطی (LP) تبدیل می‌شوند. در شکل ۳، Δn_{eff} برای مدهای تحت پوشش C-PCF طراحی شده بر طبق رابطه‌ی (۳) در بازه‌ی طول موجی ۱/۲۵-۲ میکرومتر نشان داده شده است. خط قرمز رنگ، مرز تبهگنی مدها یعنی $\Delta n_{eff} = 10^{-4}$ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ (الف) مشخص است، برای C-PCF بدون پر شدگی با سیال نوری، مدهای OAM با مراتب بار هندسی $l=1,2,3,4$ انتشار می‌یابد. از سوی دیگر، در شکل ۳ (ب)، (ج)، (د) که به ترتیب تزریق سیال نوری با ضرایب شکست $n_F=1.3$ ، $n_F=1.35$ و $n_F=1.4$ را نشان می‌دهد، Δn_{eff} بین مدهای $HE_{3,1}$

شکست $n_F=1.3$ ، $n_F=1.35$ و $n_F=1.4$ پر می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) در نرم‌افزار کامسول انجام می‌گیرد و یک لایه‌ی کاملاً منطبق شده‌ی دایروی (PML در شکل ۱) به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود.

این امر به خوبی شناخته شده است که ترکیب خطی دو ویژه مد برداری با یک اختلاف فاز $\pi/2$ بین آنها منجر به تولید مدهای OAM می‌شود، به طوری که [۵]:

$$\begin{cases} OAM_{\pm l,m}^{\pm} = HE_{l+1,m}^{even} \pm jHE_{l+1,m}^{odd} \\ OAM_{\pm l,m}^{\mp} = EH_{l-1,m}^{even} \pm jEH_{l-1,m}^{odd} \end{cases} (l>1) \quad (1)$$

$$\begin{cases} OAM_{\pm 1,m}^{\pm} = HE_{2,m}^{even} \pm jHE_{2,m}^{odd} \\ OAM_{\pm 1,m}^{\mp} = TM_{0,m} \pm jTE_{0,m} \end{cases} (l=1) \quad (2)$$

که EH و HE ویژه مدهای برداری و odd و $even$ بالانویس، نشان دهنده‌ی اختلاف فاز $\pi/2$ بین آنهاست که در معادلات با $z = \sqrt{-1}$ وارد شده است. همچنین m بیانگر مرتبه‌ی شعاعی شدت مدها و l بار هندسی مدهای OAM است. علامت \pm در زیرنویس و بالانویس به ترتیب جهت چرخش مدهای OAM و جهت چرخش قطبش دایروی را نشان می‌دهد. از آنجایی که مدهای قطبیده‌ی سمتی و شعاعی ($TE_{0,1}$ و $TM_{0,1}$) دارای ثابت‌های انتشار متفاوت هستند، در رابطه‌ی (۲) قادر به ترکیب با یکدیگر نیستند و تنها دو مد OAM برای مرتبه‌ی ۱ از بار هندسی وجود دارد ($l = \pm 1$ برای ترکیب $HE_{2,1}$).

نتایج شبیه‌سازی و بحث‌های مربوطه

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تار طراحی شده قادر به پشتیبانی از مدهای $EH_{1,1}$ ، $EH_{2,1}$ ، $HE_{4,1}$ ، $EH_{3,1}$ ، $HE_{5,1}$ ، $EH_{3,1}$ ، $HE_{0,1}$ ، $TM_{0,1}$ ، $HE_{2,1}$ ، $TE_{0,1}$ و $HE_{1,1}$ است. در شکل ۲ توزیع شدت مدهای $HE_{5,1}^{even}$ ، $HE_{5,1}^{odd}$ و $EH_{3,1}^{even}$ نشان داده شده است. همچنین توزیع میدان

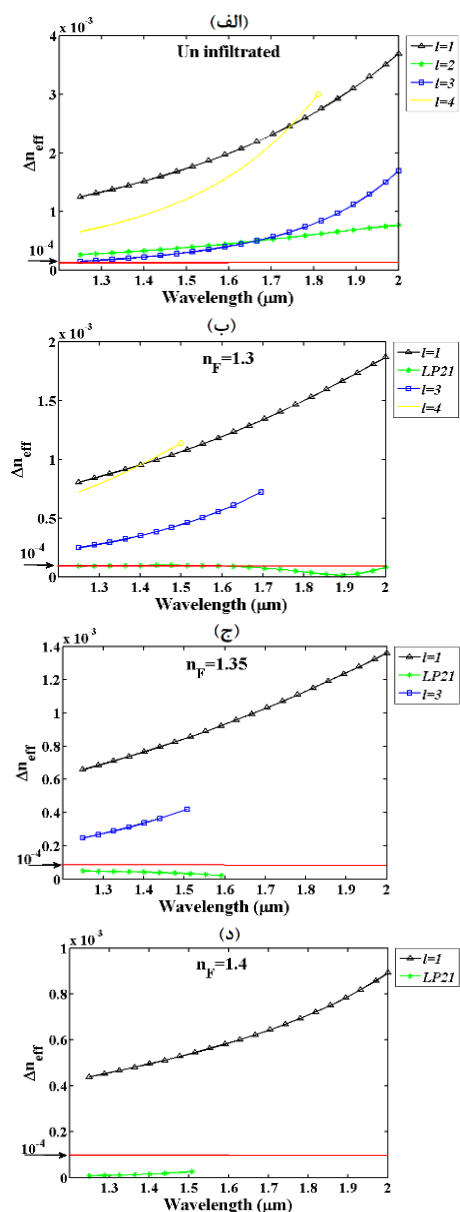
نتیجه گیری

در این مقاله، نقش تزریق سیال نوری در کنترل مدهای OAM با مراتب مختلف بار هندسی l ، درون یک طراحی خاص از C-PCF بدون تغییر پارامترهای هندسی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که با استفاده از تزریق سیال های نوری با ضرایب شکست مختلف می توان بار هندسی l را درون تار طراحی شده به خوبی کنترل کرد. این کنترل از مدهای OAM می تواند در تکنیک تسهیم فضایی SDM در مخابرات نوری بسیار حائز اهمیت باشد.

مرجع ها

- [1] L. Allen, M. Beijersbergen, R. Spreeuw and J. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes", *Physical Review A*, Vol. 45, No. 11, pp. 8185-8189, 1992.
- [2] A. Yao and M. Padgett, "Orbital angular momentum: origins, behavior and applications", *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 3, No. 2, pp. 161-204, 2011.
- [3] A. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. Molisch, N. Ashrafi and S. Ashrafi, "Optical communications using orbital angular momentum beams", *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 7, No. 1, pp. 66-106, 2015.
- [4] H. Zhang, W. Zhang, L. Xi, X. Tang, X. Zhang and X. Zhang, "A New Type Circular Photonic Crystal Fiber for Orbital Angular Momentum Mode Transmission", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 28, No. 13, pp. 1426-1429, 2016.
- [5] H. Li, H. Zhang, X. Zhang, Z. Zhang, L. Xi, X. Tang, W. Zhang and X. Zhang, "Design tool for circular photonic crystal fibers supporting orbital angular momentum modes", *Applied Optics*, Vol. 57, No. 10, pp. 2474-2481, 2018.
- [6] K. Nielsen, D. Noordegraaf, T. Sørensen, A. Bjarklev and T. Hansen, "Selective filling of photonic crystal fibres", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 7, No. 8, pp. L13-L20, 2005.
- [7] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides*, Burlington, MA: Academic Press, 2006.

$EH_{1,1}$ کمتر از 10^{-4} خواهد بود و مد قطبیده ی خطی LP_{21} را در تار نوری بوجود می آورد. با تزریق $n_F = 1.3$ و $n_F = 1.35$ در شکل های ۳ (ب) و (ج) به ترتیب مراتب $l = 1, 3, 4$ و $l = 1, 3, 4$ از مدهای OAM و با تزریق $n_F = 1.4$ در شکل ۳ (د) تنها $l = 1$ درون تار انتشار می یابد. بنابراین با تزریق سیال نوری می توان مدهای OAM را در هر طول موج دلخواهی در محدوده ی ۲-۱/۲۵ میکرومتر بدون تغییر هندسه ی C-PCF کنترل و تنظیم کرد.



شکل ۳: اختلاف ضریب شکست موثر بین گروه مدهای OAM به عنوان تابعی از طول موج؛ (الف) C-PCF بدون تزریق سیال نوری؛ (ب) تزریق سیال نوری با ضریب شکست $n_F = 1.3$ ؛ (ج) $n_F = 1.35$ ؛ (د) $n_F = 1.4$.