

بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۱۳۹۷ 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 – اســتفاده از تکانهی زاویهای مداری نور (OAM) در سـیســتمهای ارتباطات نوری، منجر به افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات شده ا ست. تارهای بلور فوتونی دایروی (C-PCFs) با یک مغزی هوای مرکزی، نمونهی خوبی برای هدایت OAM نور ه ستند. در این مقاله، یک طراحی خاص از PCF-کها در نرمافزار کامسول شبیهسازی می شود و در حالی که پارامترهای هندسی آن ثابت نگه داشته شده است، کنترل مدهای OAM بر مبنای تزریق سیال نوری پیشنهاد می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با تزریق سیال نوری درون PCF-کها می توان مدهای OAM را در محدودهی طول موجی ۱/۲۵–۲ میکرومتر به خوبی کنترل کرد.

کلید واژه- 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 Sharif<sup>1</sup>, Hassan Pakarzadeh<sup>2</sup>

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- $2.0 \mu m$ .

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

مقدمه

تکانهی زاویهای مداری نور (OAM) برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ با پرتوهای لاگر-گاوس (LG) به رسمیت شناخته شد [1]. این پرتوها حاوی یک جبههی فاز مارپیچی به صورت  $\exp(il\,\varphi)$  هستند که l مرتبهی بار هندسی مدهای و  $\varphi$  زاویه یسمتی را نشان می دهد. نور قطبیده OAM و OAM و  $\varphi$ دایروی معرف تکانه یزاویه ای اسپسنی (SAM) است که به طور كامل از OAM مجزاست [۲]. اخیرا 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 می تواند علاوه بر روشهای تسهيم طول موجى (WDM) و تسهيم قطبش (PDM) برای افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات مورد استفاده قرار l گیرد. از آنجایی که مدهای OAM با مقادیر مختلف lبصورت فضايى متعامد هستند، مى توانند نمايندهى 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، درحالی که پارامترهای هندسی تار بدون تغییر در نظر گرفته می شود. روش های تجربی برای تزریق سیال های نوری در حفرههای تارهای بلور فوتونی (PCFs) در [۶] گزارش شده است. طراحی و شبیهسازیها در نرمافزار کامسول انجام  $n_F = 1.3$  می گیرد و از سه سیال نوری با ضرایب شکست  $n_F = 1.3$ 

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

### مبانی نظری و روش شبیهسازی

یک طراحی خاص از خانواده ی C-PCF ها، در شکل ۱ نشان داده شده است [۴ و ۵]. حفره های هوا با شعاع  $R = 0.8 \mu m$  داده شده است [۴ و ۵]. حفره های هوا با شعاع  $r = 0.8 \mu m$  بر روی حلقه های متحدالمرکز قرار گرفته اند. مکان هر حفره ی هوا در دستگاه مختصات قطبی ( $\varphi, \varphi$ ) به صورت حفره ی هوا در دستگاه مختصات قطبی ( $\varphi, \varphi$ ) به صورت  $\Lambda = N \Lambda$  و N = N r e است که  $N e \Lambda$  به ترتیب تعداد و فاصله ی بین حلقه های متحدالمرکز را نشان می دهد و n مقادیر صحیح ۲ تا ۶ N را دربر می گیرد. یک حفره ی هوا و n مقادیر صحیح ۲ تا ۶ N را دربر می گیرد. یک حفره ی هوا با شعاع m z در مرکز تار قرار می گیرد و با حذف والین حلقه از حفره های هوا (1 = N)، ناحیه ی حلقوی درون مغزی با شعاع بیرونی درون مغزی با شعاع بیرونی درون د



شکل ۱: سطح مقطع C-PCF طراحی شده در نرمافزار کامسول با R<sub>b</sub>=3.2µm «R<sub>a</sub>=1.2µm «P=0.8µm و ۸=0.8µm «P=0.8µm «P=0.8µm «P=0.8µm «P=0.8µm «P=0.8µm «P=0.8µm «P=0.8µm «P=0.35 «P=1.35 «P=1.3

۱/۵۵ زمینهی تار سیلیکا (ضریب شکست ۱/۴۴۴ در ۱/۵۵ 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

شکست  $n_F = 1.3$  و  $n_F = 1.4$  و  $n_F = 1.35$  پر می شوند. شبیه سازی ها با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) در نرمافزار کامسول انجام می گیرد و یک لایه ی کاملا منطبق شده ی دایروی (PML در شکل ۱) به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می شود.

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 می شود، به طوری که [۵]:

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

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

که HE و HE ویژه مدهای برداری و even و God در بالانویس، نشان دهندهی اختلاف فاز  $2/\pi$  بین آنهاست که در معادلات با  $1-\sqrt{j} = i$  وارد شده است. همچنین m بیانگر مرتبهی شعاعی شدت مدها و l بار هندسی مدهای OAM است. علامت ± 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 (10 = 10 m) دارای ثابتهای انتشار متفاوت هستن، در رابطهی (۲) قادر به ترکیب با یکدیگر نیستند و تنها دو مد OAM برای مرتبهی ۱ از بار هندسی وجود دارد ( $1\pm = 1$  برای ترکیب ای ا

#### نتایج شبیهسازی و بحثهای مربوطه

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که تار طراحی شده قادر به  $EH_{1,1}$ ,  $EH_{2,1}$ ,  $HE_{4,1}$ ,  $EH_{3,1}$ ,  $HE_{5,1}$ ,  $eH_{1,1}$ ,  $EH_{2,1}$ ,  $HE_{4,1}$ ,  $EH_{3,1}$ ,  $HE_{2,1}$ ,  $TM_{0,1}$ ,  $HE_{3,1}$   $FE_{1,1}$ ,  $HE_{1,1}$ ,  $TE_{1,1}$ ,  $HE_{2,1}$ ,  $TM_{0,1}$ ,  $HE_{3,1}$   $EH_{3,1}^{even}$ ,  $HE_{5,1}^{odd}$ ,  $HE_{5,1}^{even}$ ,  $HE_{3,1}^{odd}$  $EH_{3,1}^{odd}$  نشان داده شده است. همچنین توزیع میدان

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



شکل ۲: شدت محدود شدهی مدهای زوج و فرد HE<sub>5.1</sub> و EH<sub>3.1</sub> و HE<sub>5.1</sub> 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  $HE_{1+1,m}$  و  $HE_{1-1,m}$  باید بزرگتر از  $10^{-4}$  باشد [۵]:

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

در غیر این صورت ثابت انتشار ( $\beta$ ) دو مد برابر و از این رو با یکدیگر ترکیب و به مدهای قطبیدهی خطی (LP) تبدیل میشوند. در شکل ۳،  $\Delta n_{eff}$  برای مدهای تحت پوشش -C میشوند. در شکل ۳، مراجع رابطهی (۳) در بازهی طول موجی ۲-۱/۲۵ میکرومتر نشان داده شده است. خط قرمز رنگ، مرز تبهگنی مدها یعنی  $^{4-0}n_{eff} = 10^{-4}$  را نشان میدهد. همانطور که در شکل ۳ (الف) مشخص است، برای مراتب بار هندسی ۹.۵, Le) النشار مییابد. از سوی مراتب بار هندسی ۹.(L) در که به ترتیب تزریق سیال مراتب با ضرایب شکست 1.3  $n_F = 1.3$  و نیری با ضرایب شکست 1.3  $n_F = 1.3$  و نوری با ضرایب شکست 1.3  $n_F = 1.3$ 

#### نتيجهگيرى

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

#### مرجعها

- [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  $^{-4}$  خواهد بود و مد قطبیدهی خطی  $n_F = 1.3$  کمتر از  $n_F = 1.3$  و  $IP_{21}$  را در تار نوری بوجود میآورد. با تزریق 1.3  $IP_{21}$  و  $n_F = 1.35$   $n_F = 1.35$  م $r_F = 1.35$  و (ج) به ترتیب مراتب  $n_F = 1.35$  را در شکل ۵ (د) تنها I = 1 از مدهای OAM و با تزریق 1.4 با تزریق سیال نوری میتوان مدهای OAM را در هر طول با تزریق سیال نوری میتوان مدهای OAM را در هر طول موج دلخواهی در محدودهی ۲/۱۵–۲ میکرومتر بدون تغییر هندسه 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=1.3 ؛ (ج) n=1.3 و (د) n=1.4