

Design and simulation of the circular photonic crystal fibers for guiding and controlling of orbital angular momentum of light

Hassan Pakarzadeh, Vahid Sharif, Mahdi Bahadoran*

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Received: 16.10.2017 Final revised: 02.10.2018 Accepted: 07.07.2019

Doi: [10.22055/JRMBS.2020.15563](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15563)

Abstract

In this paper, we designed and simulated the circular photonic crystal fibers (C-PCFs) for guiding and controlling the orbital angular momentum (OAM) of light. The optimum parameters in C-PCFs were archived by considering the conditions that eliminate the spin-orbit coupling for each guided mode. Moreover, for optical communication applications, a flat modal dispersion is required for a wide wavelength range from 1.25 to 2 μm and the OAM modes must have a low confinement loss. For different fractions of air filling (f), the results were simulated and compared to achieve the best values of f . According the simulated results, the proposed design of C-PCF can support a group of OAM modes up to HE_{51} and EH_{31} with topological charge of $l=4$. Furthermore, our C-PCF shows high quality in terms of dispersion and OAM mode losses, which can additionally be used in space-division multiplexing rather than the conventional wavelength-division multiplexing for optical communication systems.

Keywords: Orbital angular momentum, Circular photonic crystal fibers, Dispersion, Confinement loss

* Corresponding Author: bahadoran@sutech.ac.ir

طراحی تارهای بلور فوتونی دایروی برای هدایت و کنترل

تکانه زاویه‌ای مداری نور

حسن پاکارزاده، وحید شریف، مهدی بهادران*

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، فارس، ایران

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴ ویرایش نهائی: ۱۳۹۹/۰۲/۲۰ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵

Doi: [10.22055/JRMBS.2020.15563](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15563)

چکیده

در این مقاله، تارهای بلور فوتونی دایروی برای هدایت و کنترل تکانه زاویه‌ای مداری نور طراحی و شبیه‌سازی می‌شوند. برای تعیین پارامترهای بهینه تار بلور فوتونی دایروی شرایط به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که جفت‌شدگی اسپین-مدار مدهای نور درون تار از بین برود. همچنین برای کاربردهای مخابراتی، پاشندگی مدها باید در یک بازه طول موجی وسیع (۱/۲۵ تا ۲ میکرومتر) مسطح باشد و مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور از تلفات تحدید پایین برخوردار باشند. شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف از کسر پرشدگی هوا f انجام شده و با مقایسه نتایج، بهترین مقدار به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد تار طراحی شده قادر به پشتیبانی از گروه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری تا HE_{51} و EH_{31} با مرتبه بار توپولوژیکی $l = 4$ است. همچنین، تار طراحی شده کیفیت بالایی را از نظر پاشندگی و تلفات مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور از خود نشان می‌دهد، از این رو می‌تواند برای تکنیک تسهیم فضایی^۱ علاوه بر تکنیک‌های مرسوم، نظیر تسهیم طول موجی^۲ در مخابرات نوری، مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: تکانه زاویه‌ای مداری نور، تار بلور فوتونی دایروی، پاشندگی، تلفات تحدید

مقدمه

میکرو پمپ‌ها [۴] و انبرک‌های نوری [۵] استفاده می‌شود. پرتوهای نوری با جبهه فاز مارپیچی به‌صورت $e^{i\varphi}$ را می‌توان معرف تکانه زاویه‌ای مداری نور دانست که l بار توپولوژیکی (هندسی) و φ زاویه سمتی پرتو نور را نشان می‌دهد [۳]. مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور با l های مختلف بر هم عمودند و

تکانه زاویه‌ای مداری نور برای نخستین بار به‌کمک پرتوهای لاگر-گائوس شناسایی شد [۱]. امروزه از تکانه زاویه‌ای مداری نور برای افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات در سیستم‌های مخابرات نوری [۲-۳]، تحقق

* نویسنده مسئول: bahadoran@sutech.ac.ir

^۱ Space-division multiplexing

^۲ Wavelength-division multiplexing



فوتونی دایروی با ماده زمينه سيليك و حفره‌های هوا با قطر يكسان در ناحیه غلاف گزارش شده‌اند که قادر به پشتیبانی مدهای تکانه زاویه‌ای مداری با مراتب بالای l ($l = 4, 7, 11$) در محدوده طول موج مخابراتی هستند [۱۶-۱۴]. همچنین با اضافه کردن اربوم طی انجام فرآیند آلایدگی در ناحیه حلقوی یک تار بلور فوتونی دایروی، افزایش مرتبه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری تحت پوشش تار، گزارش شده است [۱۷].

در طراحی تارهای بلور فوتونی دایروی لازم است پارامترهای مختلفی نظیر قطر حفره‌ها در ناحیه غلاف، ضخامت ناحیه حلقوی در مغزی، هندسه و پیکربندی حفره‌ها نسبت به یکدیگر در نظر گرفته شوند. اخیراً پاکارزاده و همکاران کنترل تکانه زاویه‌ای مداری نور را براساس تزریق سیال نوری در داخل حفره‌های هوا در یک پیکربندی واحد (بدون تغییر در هندسه، و قطر حفره‌های غلاف) را مطرح کردند [۱۸].

در این مقاله، تارهای بلور فوتونی دایروی برای هدایت و کنترل تکانه زاویه‌ای مداری نور براساس تغییر در پارامترهای هندسی، طراحی و شبیه‌سازی می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف از کسر پرشدگی هوا f انجام می‌شود و با مقایسه نتایج، بهترین مقدار به دست می‌آید. همچنین، ویژگی‌های مدهای هدایت شده در تار شامل پاشندگی، تلفات تحدید، ضریب شکست مؤثر، توزیع میدان در یک بازه طول موجی وسیع (۱/۲۵

قادرند کانال‌های ویژه‌ای را برای انتقال اطلاعات در سیستم‌های تسهیم فضایی فراهم کنند [۶]. در سال ۲۰۱۶ با به‌کارگیری سیستمی شامل چهار تکانه زاویه مداری نور، انتقال اطلاعات با ظرفیت 400 Gb/s در فضای آزاد به طول ۱۲۰ متر گزارش شد [۷]. همچنین به کمک دو مد تکانه زاویه مداری نور در تسهیم فضایی، ظرفیت انتقال اطلاعات برابر با $1/6 \text{ Tb/s}$ روی 1 km تار نوری انجام شده است [۸]. تاکنون طرح‌های مختلفی از تارهای نوری با ضریب شکست پله‌ای نظیر تارهای نوری با مغزی حلقوی [۹-۸] و تارهای گردابی^۱ [۱۰] برای پشتیبانی تکانه زاویه مداری نور پیشنهاد شده است. در تارهای نوری با مغزی حلقوی^۲، ناحیه‌ای با ضریب شکست بالا حول مغزی هوا قرار می‌گیرد که مدهای تکانه زاویه‌ای مداری درون آن ناحیه هدایت می‌شوند. برای جلوگیری از تبهگنی مدها لازم است به کمک فرآیند آلایدگی، تمایز بالایی بین ناحیه مغزی و غلاف ایجاد شود که این امر فرآیند ساخت تار را مشکل می‌سازد [۱۱]. همچنین روش‌های جایگزینی مانند استفاده از تارهای بلور فوتونی مارپیچی^۳ [۱۲-۱۳] و تارهای بلور فوتونی دایروی^۴ [۳-۲] برای پشتیبانی تکانه زاویه مداری نور پیشنهاد شده است. تارهای بلور فوتونی دایروی دارای ساختاری شبیه به تارهای نوری با مغزی حلقوی هستند با این تفاوت که ناحیه غلاف آنها به صورت ساختار بلور فوتونی تشکیل شده است. طراحی‌های مختلفی از تارهای بلور

^۲ Helically twisted photonics crystal fiber^۴ Circular photonics crystal fiber- C-PCF^۱ Vortex fiber^۲ Ring-core optical fiber

آنجا که مدهای $TE_{0,1}$ و $TM_{0,1}$ دارای ثابت‌های انتشار متفاوتی هستند این مدها نمی‌توانند با هم ترکیب شوند. در نتیجه تنها دو مد تکانه زاویه‌ای مداری نور برای $l = 1$ وجود دارد (دو مد $l = \pm 1$ برای ترکیب $HE_{2,m}$) [۲۰]. مرتبه بار هندسی بزرگتر از یک (l شامل چهار مد است (دو مد $\pm l$ برای ترکیب $HE_{l+1,m}$ و دو مد $\mp l$ برای ترکیب $EH_{l-1,m}$). در رابطه ۲ مدهای ترکیبی^۱ زوج و فرد HE و EH دارای اختلاف فاز $\pi/2$ هستند. مدهای مراتب بالای شعاعی $1 < m$ ، می‌توانند در طول موج‌های خاصی از یک بازه طول موجی در تار نوری، با مدهای شعاعی از مرتبه $m = 1$ تبهگن شوند. این تبهگنی به معنای یکسان بودن ثابت انتشار برای دو مد است که باعث ترکیب آنها می‌شود. این اتفاق در تارهای نوری را به اصطلاح، تبهگنی تصادفی^۲ می‌نامند. برای اجتناب از تبهگنی تصادفی، تار نوری طراحی شده نباید مدهای تکانه زاویه‌ای مداری با مراتب شعاعی بالاتر از $1 < m$ را پشتیبانی کند. این کار به وسیله تعیین مناسب و تا حد امکان کوچک ضخامت ناحیه حلقوی درون مغزی انجام می‌شود [۱۱]. در طراحی تار بلور فوتونی دایروی که قادر به پشتیبانی مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور می‌باشد، لازم است سه مورد زیر در نظر گرفته شود: ۱- اختلاف ضریب شکست مؤثر (Δn_{eff}) بین گروه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور) باید بزرگتر از 10^{-4} باشد تا از تبدیل مدهای تکانه زاویه‌ای مداری به مدهای قطبیده

تا ۲ میکرومتر) تعیین می‌شود. از آنجایی که تکانه زاویه‌ای مداری نور در سال ۱۹۹۲ شناسایی شده است، تولید و انتشار پرتوهایی با این خاصیت درون تارهای نوری تنها به چند سال اخیر باز می‌گردد [۱]. از این رو تارهای بلور فوتونی دایروی (C-PCF) همچنان در حد یک ایده مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. بنابراین در این مقاله با بررسی پارامترهای هندسی، بهترین پیشنهاد از این پارامترها برای ساخت تارهای C-PCF ارائه می‌شود. از نظر تجربی نیز چنانچه گفته شد، ساخت تارهای پشتیبانی کننده OAM همراه با ارسال اطلاعات مخابراتی نیز عملاً محقق شده است [۱۹-۱۴]

مبانی نظری و روش شبیه‌سازی

در تارهای نوری ترکیب خطی دو ویژه‌مد برداری از یک خانواده که دارای اختلاف فاز $\pi/2$ هستند منجر به تولید مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور به صورت زیر می‌شود [۲۰]:

$$l = 1 \begin{cases} OAM_{\pm l, m}^{\pm} = HE_{2, m}^{even} \pm i HE_{2, m}^{odd} \\ OAM_{\pm l, m}^{\mp} = TM_{0, m} \pm i TE_{0, m} \end{cases} \quad 1$$

$$l > 1 \begin{cases} OAM_{\pm l, m}^{\pm} = HE_{l+1, m}^{even} \pm i HE_{l+1, m}^{odd} \\ OAM_{\pm l, m}^{\mp} = EH_{l-1, m}^{even} \pm i EH_{l-1, m}^{odd} \end{cases} \quad 2$$

که l و m به ترتیب نشان دهنده مرتبه شعاعی و بار هندسی مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور هستند. از

^۲ Accidental degeneracies

^۱ Hybrid modes

خطی در طی فرایند انتقال جلوگیری شود. ۲- تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده باید به گونه‌ای باشد که تعداد مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور (l) مورد نیاز ما را پشتیبانی کند و مدهای بیشتر از یک حلقه شعاعی شدت ($m > 1$) را سرکوب کند. ۳- تارهای طراحی شده بایستی قادر به پشتیبانی مدهای با کیفیت از تکانه زاویه‌ای مداری نور باشند. در تعیین میزان کیفیت مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور باید سه شرط زیر برآورده شود: الف- جفت‌شدگی اسپین-مدار مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور در تارهای نوری باید از بین برود. ب- پاشندگی مدها در یک بازه طول موجی مورد نیاز در مخابرات نوری (۱/۲۵ تا ۲ میکرومتر) باید مسطح باشد و ج- مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور باید از تلفات تحدید پایین برخوردار باشند.

جفت‌شدگی اسپین-مدار مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور

برای از بین بردن تبهگنی بین مدها، باید تمایز بالایی بین ناحیه مغزی و غلاف تار ایجاد شود تا شرط $(\Delta n_{eff}) 10^{-4}$ همچنین برای جلوگیری از تبهگنی تصادفی لازم است ضخامت ناحیه حلقوی درون مغزی کم باشد. این تمایز بالا در ضریب شکست و ضخامت پایین ناحیه حلقوی باعث افزایش جفت‌شدگی اسپین-مدار مدها می‌شود. هنگامی که جفت‌شدگی اسپین-مدار مدها اتفاق می‌افتد، مدها دیگر نمی‌توانند به قسمت‌های مداری و اسپین تقسیم

شوند. در این حالت مدها نه تنها ویژه‌مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور نیستند بلکه تکانه زاویه‌ای اسپینی را نیز شامل نمی‌شوند. این مدهای حاصل از جفت‌شدگی اسپین-مدار، مدهای ترکیبی تکانه زاویه‌ای مداری هستند که در آنها ساختار قطبش از شکل دایروی خارج شده و به صورت بیضوی نمایان می‌شود. مؤلفه α برای نمایش ساختار بیضوی قطبش در مدهای ترکیبی تکانه زاویه‌ای مداری نور، به صورت نسبت اندازه مؤلفه x میدان الکتریکی به مؤلفه y آن تعریف می‌شود:

$$\alpha = \left| E_x / E_y \right| \quad ۳$$

کوچک شدن α ، جفت‌شدگی اسپین-مدار مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور را جدی می‌کند و هرچه به ۱ نزدیکتر باشد تقارن دایروی ساختار قطبش مدها افزایش و از این رو جفت‌شدگی اسپین-مدار کاهش می‌یابد. بنابراین، تار طراحی شده باید هم از انتشار مدها با $m > 1$ جلوگیری کند و هم جفت‌شدگی اسپین-مدار مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور را از بین ببرد.

اثرات پاشندگی تار به وسیله گسترش ثابت انتشار مد β ، در یک بسط تیلور^۱ به دست می‌آید که فرکانس ω_0 در مرکز طیف پالس قرار دارد. پاشندگی کل در یک تار نوری از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad ۴$$

^۱ Taylor series

طراحی تارهای بلور فوتونی دایروی باید مسطح بودن پاشندگی مدها در بازه طول‌موج مخابراتی (۱/۲۵ تا ۲ میکرومتر) مورد بررسی قرار بگیرد چرا که این خاصیت می‌تواند برای تکنیک تسهیم طول موجی علاوه بر تکنیک تسهیم مدی بسیار مفید باشد. با افزایش تعداد حلقه‌های حفره هوا در ناحیه غلاف و همچنین ایجاد تمایز بالا بین ناحیه مغزی و غلاف، می‌توان تلفات تحدید تار طراحی شده را تا حد امکان کاهش داد.

نتایج شبیه‌سازی و بحث

تار بلور فوتونی دایروی استفاده شده در این مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است. جنس ماده زمینه از سیلیکا با ضریب شکست $n(1.55 \mu m) = 1.444$ و در ناحیه غلاف تار، پنج حلقه از حفره‌های هوا به شعاع $r = 0.8 \mu m$ و ضریب شکست $n_{air} = 1$ تعبیه شده که فاصله این حلقه‌های متحدالمرکز از یکدیگر برابر $\Lambda = 2 \mu m$ است. محل قرار گرفتن حفره‌های هوا در دستگاه مختصات قطبی (r, φ) به صورت $r = N\Lambda$ و $\varphi = 2n\pi/6N$ است که n مقادیر صحیح مثبت I تا $6N$ را به خود اختصاص می‌دهد. حلقه اول ($N = 1$) از حفره‌های هوا حذف شده است و ۴ حلقه حفره هوا از $N_{inner} = 2$ تا $N_{outer} = 5$ در ناحیه غلاف تار وجود دارد. همچنین یک حفره هوای مرکزی با شعاع $R_a = 1.2 \mu m$ برای ایجاد ناحیه حلقوی درون مغزی

که در آن β_1 و β_2 جملات اول و دوم در بسط تیلور ثابت انتشار هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n_{eff} + \omega \frac{dn_{eff}}{d\omega} \right) \quad 5$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn_{eff}}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n_{eff}}{d\omega^2} \right) \quad 6$$

در اینجا n_{eff} و n_g به ترتیب ضریب شکست‌های مؤثر و گروه v_g سرعت گروه است. از لحاظ فیزیکی، پوش یک پالس نوری با سرعت گروه v_g حرکت می‌کند، در حالی که مؤلفه β_2 نشان‌دهنده پاشندگی سرعت گروه^۱ (GVD) است و پهن‌شدگی پالس^۲ را توصیف می‌کند. یک ویژگی جالب در پاشندگی موج‌برها این است که D یا β_2 به پارامترهای طراحی تار مانند شعاع مغزی و اختلاف ضریب شکست بین مغزی و غلاف بستگی دارد. طولی موجی که در آن پاشندگی صفر می‌شود را طول موج صفر پاشندگی^۳ λ می‌نامند که اثرات پاشندگی به‌طور کامل در این نقطه ناپدید می‌شود. برای طول موج‌هایی که $\lambda > \lambda_D$ است، $\beta_2 > 0$ می‌شود و تار دارای پاشندگی عادی^۴ است. در رژیم پاشندگی عادی، فرکانس‌های بالا (جابه‌جایی آبی^۵) از فرکانس‌های پایین (جابه‌جایی قرمز^۶) در یک پالس نوری کندتر حرکت می‌کنند، اما در رژیم پاشندگی غیرعادی^۷، $\lambda < \lambda_D$ و $\beta_2 < 0$ این امر برعکس عمل می‌کند [۲۱].

^۵ Blue-shift

^۶ Red-shifted

^۷ Anomalous-dispersion

^۱ Group velocity dispersion

^۲ Pulse broadening

^۳ Zero-dispersion wavelength

^۴ Normal dispersion

سلمیر برای وارد کردن اطلاعات مربوط به ضریب شکست سیلیکا استفاده می‌شود:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{j=1}^3 \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - b_j}} \quad \forall$$

ضرایب سلمیر به کار برده شده برای سیلیکا عبارتند از:

$$a_3 = 0.8968766, a_2 = 0.4083099, a_1 = 0.6965325$$

$$b_2 = 1.394999 \times 10^{-2} \mu m^2, b_1 = 4.368309 \times 10^{-3} \mu m^2$$

و $b_3 = 9.793399 \times 10 \mu m^2$. ضریب شکست غلاف تار از

رابطه زیر به دست می‌آید:

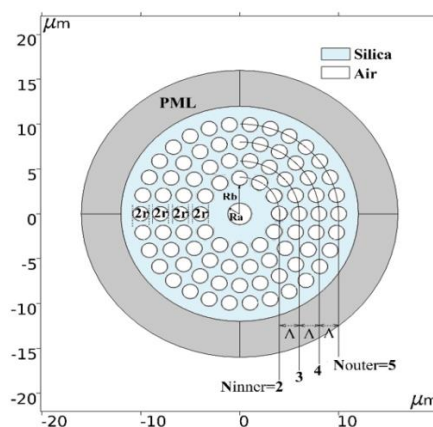
$$n_{cladd} = n_{SiO_2} (1 - f) + n_{Air} f \quad \wedge$$

که در اینجا n_{SiO_2} و n_{Air} به ترتیب ضرایب شکست هوا و ماده سیلیکا هستند و f کسر پرشدگی هوا است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = 3(r / \Lambda)^2 \quad \vartheta$$

برای به دست آوردن پارامترهای بهینه تار بلور فوتونی دایروی، شبیه‌سازی‌ها با مقادیر مختلف از کسر پرشدگی هوا f انجام شد و با مقایسه نتایج، بهترین مقدار به دست آمد. برای این منظور شعاع حفره هوای مرکزی R_a و شعاع بیرونی ناحیه حلقوی R_b را ثابت در نظر گرفتیم و یک ضخامت ثابت از ناحیه حلقوی برای انتشار مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور برابر ۲ میکرومتر ایجاد شد. با تغییر مقادیر مختلف از $2r / \Lambda$

قرار داده شده است. این ناحیه حلقوی بستر مناسبی را برای انتشار مدهای تکانه زاویه‌ای مداری فراهم می‌کند که شعاع داخلی این ناحیه برابر R_a و شعاع خارجی آن برابر $R_b = (N_{inner} \times \Lambda) - r = 3.2 \mu m$ است.



شکل ۱. سطح مقطع تار بلور فوتونی دایروی. اولین حلقه حفره هوا با $N = 1$ حذف شده است و غلاف تار شامل ۴ حلقه حفره هوا می‌باشد. به ترتیب شعاع حفره هوای مرکزی $r = 0.8 \mu m$ و $R_a = 1.2 \mu m$ و شعاع حفره‌های هوا در ناحیه غلاف هستند و ماده زمینه سیلیکا انتخاب شده است.

شبیه‌سازی تار بلور فوتونی از روش المان محدود تمام برداری^۱ انجام و شرایط مرزی به صورت یک لایه دایروی کاملاً منطبق شده^۲ در نظر گرفته می‌شود. در تحلیل مدها از ۱۰۰ نقطه در محدوده طول موجی $1.25 \mu m$ تا $2 \mu m$ استفاده شده است. سیلیکا به عنوان ماده زمینه تار انتخاب می‌شود و از آنجایی که ضریب شکست سیلیکا وابسته به طول موج است، از معادله

^۲ Perfectly Matched Layer

^۱ Full-vector finite element method

۰/۵ تا ۰/۹ اختلاف ضریب شکست مؤثر Δn_{eff} بین مدهای برداری و همچنین مرتبه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور که توسط تار بلور فوتونی دایروی پشتیبانی می‌شوند افزایش می‌یابد. از طرفی مقایسه الگوی شدت مدها نشان می‌دهد که با افزایش $2r/\Lambda$ ، مدها در ناحیه حلقوی درون مغزی بیشتر متمرکز می‌شوند. بنابراین بهترین انتخاب برای پارامتر $2r/\Lambda$ ، مقادیر ۰/۸ و ۰/۹ هستند که می‌توانند شرط عدم تبهگنی را ارضا کنند.

بررسی جفت‌شدگی اسپین-مدار

حال جفت‌شدگی اسپین-مدار را برای دو مقدار ۰/۸ و ۰/۹ از مؤلفه $2r/\Lambda$ ، مورد بررسی قرار می‌دهیم. مؤلفه‌های x و y میدان الکتریکی ($|E_x|$ و $|E_y|$) برای مد HE_{51} ، برحسب شعاع تار در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است $|E_x|$ و $|E_y|$ در تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده با $2r/\Lambda = 0.8$ ، تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند و برای طراحی تار با $2r/\Lambda = 0.9$ ، اندازه میدان الکتریکی در راستای x و y متفاوت است. بنابراین پارامتر α برای نمودار سمت راست در شکل ۲ تقریباً برابر ۱ و برای نمودار سمت چپ برابر ۰/۹ می‌شود و از این رو می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب $2r/\Lambda = 0.8$ بهترین حالت برای کاهش جفت‌شدگی اسپین-مدار در طراحی تار بلور فوتونی مورد نظر می‌باشد. از طرفی انتخاب $2r/\Lambda = 0.8$ فرآیند ساخت آسانتری را نسبت به $2r/\Lambda = 0.9$ دارد و امکان از بین رفتن مرز بین حفره‌های هوا در ناحیه غلاف کاهش می‌یابد. بنابراین اگر بخواهیم یک تار بلور فوتونی دایروی را با حذف

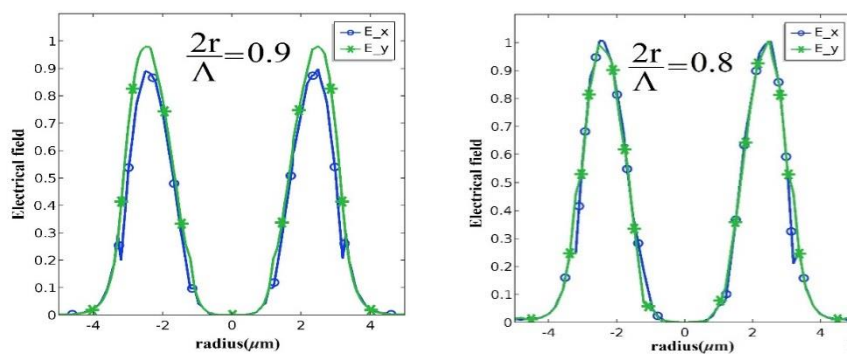
برابر با ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ شبیه‌سازی را برای هر مقدار در نرم‌افزار کامسول در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر انجام دادیم. این روند در شبیه‌سازی از یک سو پارامترهای هندسی بهینه در ناحیه غلاف تار بلور فوتونی دایروی را فراهم می‌آورد و از سوی دیگر ضخامت ثابت و کم ناحیه حلقوی اجازه انتشار به مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور با $m > 1$ را نمی‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف پارامتر $2r/\Lambda$ در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول، بالاترین مرتبه از مدهای برداری $HE_{l+1,m}$ و $EH_{l-1,m}$ برای هر طراحی از تار بلور فوتونی دایروی و اختلاف ضریب شکست مؤثر Δn_{eff} بین آنها نمایش داده شده است. بدیهی است که تار نوری قادر به پشتیبانی مدهای مراتب کمتر از بالاترین مرتبه مد، نیز هست. همچنین تمامی مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور با مراتب l که تار قادر به حمایت از آنها می‌باشد، نمایش داده شده است. نمایش الگوی شدت بالاترین مرتبه مد $HE_{l+1,m}$ می‌تواند در مقایسه نتایج تأثیر گذار باشد.

بررسی شرط اول و دوم

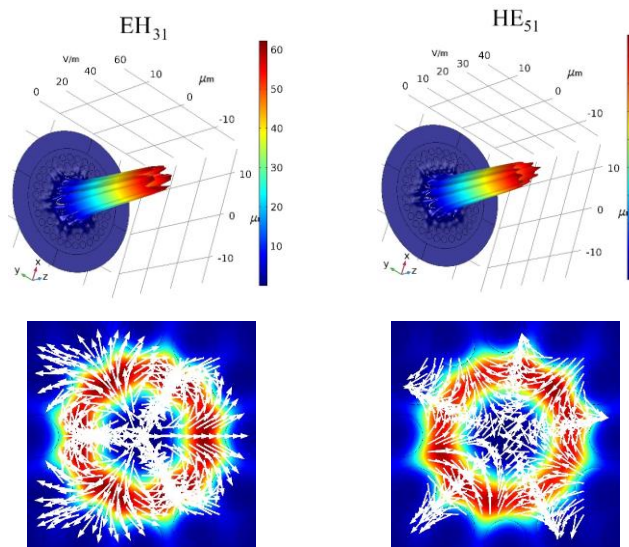
همان‌طور که انتظار می‌رفت در تمامی طراحی‌ها، تار نوری قادر به حمایت از مراتب شعاعی شدت با $m > 1$ نیست چرا که ضخامت ناحیه حلقوی درون مغزی کم (برابر ۲ میکرومتر) در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر $R_a = 1.2 \mu m$ و $R_b = 3.2 \mu m$ انتخاب‌های بهینه برای ارضای شرط عدم تصادف تبهگنی هستند. از مقایسه نتایج می‌توان فهمید که با افزایش $2r/\Lambda$ از

بهترین نوع ساختار از تار بلور فوتونی دایروی و همچنین توزیع میدان الکتریکی آنها بر روی سطح مقطع تار در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است انتشار مد به طور کامل در ناحیه حلقوی تار متمرکز شده است.

اولین حلقه حفره‌های هوا طراحی کنیم، باید پارامترهای R_a و $2r/\Lambda$ را به ترتیب برابر $1/2$ میکرومتر و 0.8 انتخاب کنیم که این امر می‌تواند با $r = 0.8 \mu\text{m}$ و $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ انجام شود. انتشار گروه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور با $l = 4$ ($EH_{3,1}$ و $HE_{5,1}$) در

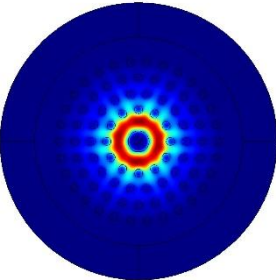
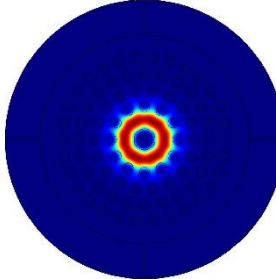
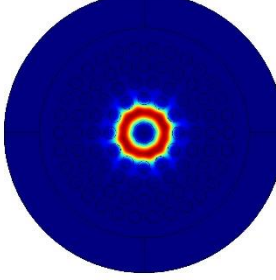
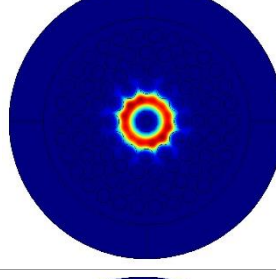
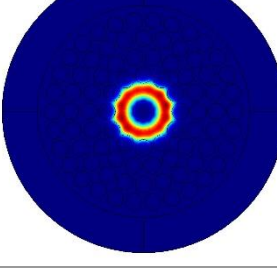


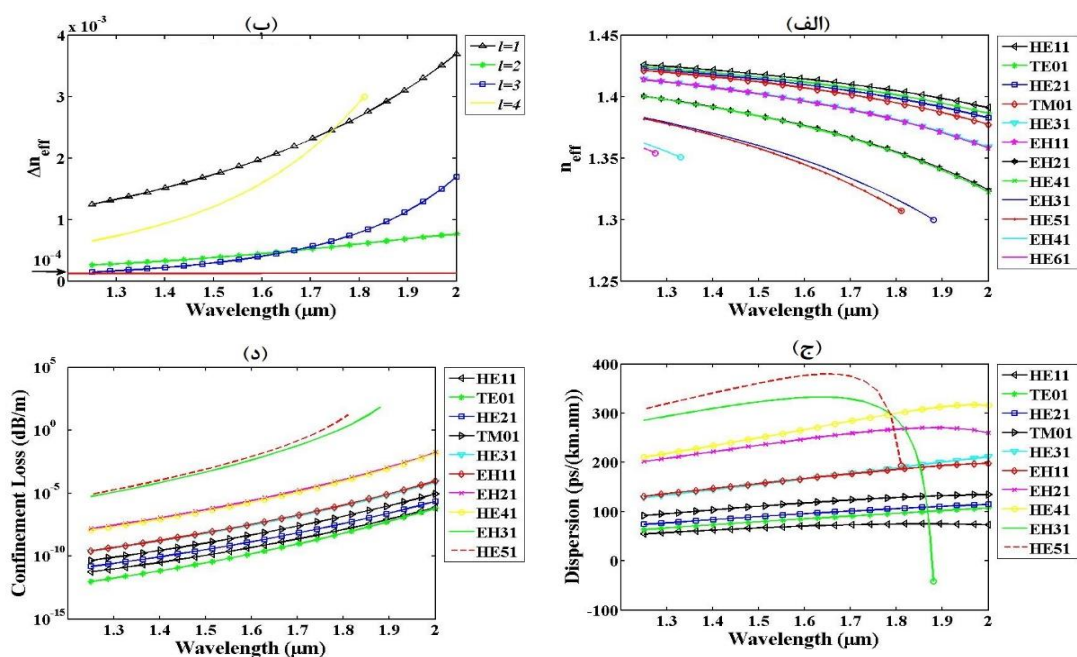
شکل ۲. نمودار $|E_x|$ و $|E_y|$ برای مد $HE_{5,1}$ برحسب شعاع تار. نمودارهای سمت راست و چپ به ترتیب مربوط به طراحی تار بلور فوتونی دایروی با $2r/\Lambda = 0.8$ و $2r/\Lambda = 0.9$ می‌شود.



شکل ۳. انتشار مدهای $EH_{3,1}$ و $HE_{5,1}$ درون تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده با پارامترهای بهینه انتخاب شده از سطح مقطع تار، توزیع میدان الکتریکی مدها در زیر آنها با بردارهای سفید رنگ نمایش داده شده است.

جدول ۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف پارامتر $2r/\Lambda$ در تار بلور فوتونی دایروی.

$2r/\Lambda$	بالاترین مرتبه ویژه مدهای برداری	Δn_{eff}	مرتبه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور تحت حمایت تار	توزیع شدت بالاترین مرتبه مدهای HE
۰,۵	HE_{31} EH_{11}	≈ 0	$l = 1$	
۰,۶	HE_{31} EH_{11}	$\approx 2 \times 10^{-4}$	$l = 1, 2$	
۰,۷	HE_{41} EH_{21}	$\approx 5 \times 10^{-4}$	$l = 1, 2, 3$	
۰,۸	HE_{51} EH_{31}	$\approx 1.4 \times 10^{-3}$	$l = 1, 2, 3, 4$	
۰,۹	HE_{51} EH_{31}	$\approx 1.4 \times 10^{-3}$	$l = 1, 2, 3, 4$	



شکل ۴. الف: ضریب شکست مؤثر ب: اختلاف ضریب شکست مؤثر ج: پاشندگی و د: تلفات تحدید مدهای برداری برای تار بلور فوتونی طراحی شده در نرم افزار لومریکال.

مدهای $(EH_{l-1,1}$ و $HE_{l+1,1})$ را در شکل ۴ ب نمایش داده ایم.

خط قرمز رنگ بر روی نمودار $\Delta n_{eff} = 10^{-4}$ را نشان می دهد که بیانگر مرز تهبگنی مدهای برداری است. همان طور که مشخص است تمامی مدها بالای خط قرمز رنگ قرار دارند و از این رو مدهای تکانه زاویه ای مداری نور تا مرتبه $l = 3$ ، کل بازه طول موجی را پوشش می دهند و مرتبه $l = 4$ از مد تکانه زاویه ای مداری نور، قادر به انتشار در بازه طول موجی 1.25 تا 1.81 میکرومتر درون تار طراحی شده است. در شکل ۴ ج منحنی پاشندگی D مدهای برداری بر حسب طول موج نمایش داده شده است. تمامی مدها به جز

مشخصه های مختلف مدهای برداری برای تار بلور فوتونی طراحی شده در شکل ۴ نشان داده شده است، به طوری که شکل ۴ الف ضریب شکست مؤثر مدها (n_{eff}) را در بازه طول موجی 1.25 تا 2 میکرومتر نشان می دهد. همان طور که مشخص است تار طراحی شده قادر به حمایت از مدهای برداری HE_{61} و EH_{41} است و از مراتب شعاعی با $m > 1$ پشتیبانی نمی کند. طول موج قطع مدهای HE_{61} ، EH_{41} ، HE_{51} و EH_{31} به ترتیب برابر 1.27 ، 1.34 ، 1.81 و 1.88 میکرومتر است. به منظور بررسی تولید مدهای تکانه زاویه ای مداری نور در بازه طول موجی مورد نظر، اختلاف ضریب شکست مؤثر (Δn_{eff}) بین گروه

ناحیه حلقوی به ترتیب $R_a = 1.2 \mu m$ و $R_b = 3.2 \mu m$ برای ارضای شرط عدم تبهگنی تصادفی به دست آمد و مقایسه الگوی شدت مدها نشان داد که با افزایش کسر پرشدگی هوا f ، مدها در ناحیه حلقوی درون مغزی بیشتر متمرکز می‌شوند به طوری که بهترین انتخاب برای پارامتر f ، ۰/۸ و ۰/۹ هستند که می‌توانند شرط عدم تبهگنی را ارضا کنند. همچنین نتایج نشان داد تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده قادر به انتشار گروه مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور با $l = 4$ است که به طور کامل در ناحیه حلقوی تار متمرکز می‌شوند. تار طراحی شده قادر به پشتیبانی مدهای برداری تا مرتبه HE_{51} و EH_{31} با پاشندگی نسبتاً مسطح در ناحیه مخابراتی است و طول موج قطع مدهای EH_{61} ، EH_{41} ، HE_{51} و EH_{31} به ترتیب برابر ۱/۲۷، ۱/۳۴، ۱/۸۱ و ۱/۸۸ میکرومتر است. کمترین تلفات تحدید مربوط به مد TE_{01} و بیشترین آن مربوط به مد HE_{51} است که در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر مقدار آنها به ترتیب برابر با $\alpha_{dB} \approx 10^{-10} dB/m$ و $\alpha_{dB} \approx 10^{-3} dB/m$ است. بنابراین، مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور در تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده دارای کیفیت بسیار خوبی از نظر پاشندگی و تلفات تحدید هستند، از این رو می‌توانند برای تکنیک تسهیم فضایی جهت افزایش ظرفیت انتقال اطلاعات در مخابرات نوری استفاده شوند.

EH_{31} و HE_{51} پاشندگی مسطح را در بازه طول موجی ۱/۲۵ تا ۲ میکرومتر تجربه می‌کنند. مدهای EH_{31} و HE_{51} نیز می‌توانند از ۱/۲۵ تا ۱/۷ میکرومتر پاشندگی نسبتاً مسطحی داشته باشند. بنابراین تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده کیفیت بالایی را در حوزه پاشندگی مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور دارد و از این رو می‌تواند برای تکنیک تسهیم طول موجی علاوه بر تکنیک تسهیم مد^۱ در مخابرات نوری استفاده شود.

در شکل ۴ تلفات تحدید تمامی مدها برای بررسی کیفیت مدی رسم شده است. کمترین تلفات تحدید مربوط به مد TE_{01} و بیشترین آن مربوط به مد HE_{51} است که در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر مقدار آنها به ترتیب برابر با $\alpha_{dB} \approx 10^{-10} dB/m$ و $\alpha_{dB} \approx 10^{-3} dB/m$ است.

این مقادیر از تلفات تحدید کم در تارهای نوری محسوب می‌شوند. بنابراین مدهای تکانه زاویه‌ای مداری نور در تار بلور فوتونی دایروی طراحی شده نیز دارای کیفیت بسیار خوبی در حوزه تلفات تحدید هستند.

نتیجه گیری

در این مقاله، تار بلور فوتونی دایروی برای هدایت و کنترل تکانه زاویه‌ای مداری نور طراحی و شبیه سازی شد. مقادیر بهینه برای شعاع داخلی و خارجی

^۱ Mode-division multiplexing

[7] Y. Ren, Z. Wang, P. Liao, L. Li, G. Xie, H. Huang, *et al.*, Experimental characterization of a 400 Gbit/s orbital angular momentum multiplexed free-space optical link over 120 m, *Optics letters* **41** (2016) 622-625.

<https://doi.org/10.1364/OL.41.000622>

[8] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, *et al.*, Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers, *science* **340** (2013) 1545-1548.

<https://doi.org/10.1126/science.1237861>

[9] C. Brunet, B. Ung, L. Wang, Y. Messaddeq, S. LaRochelle, and L. A. Rusch, Design of a family of ring-core fibers for OAM transmission studies, *Optics express* **23** (2015) 10553-10563.

<https://doi.org/10.1364/OE.23.010553>

[10] N. Bozinovic, S. Golowich, P. Kristensen, S. Ramachandran, Control of orbital angular momentum of light with optical fibers, *Optics letters* **37** (2012) 2451-2453.

<https://doi.org/10.1364/OL.37.002451>

[11] P. Gregg, P. Kristensen, S. Ramachandran, Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers, *Optica* **2** (2015) 267-270.

<https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000267>

[12] G. Wong, M.S. Kang, H. Lee, F. Biancalana, C. Conti, T. Weiss, *et al.*, Excitation of orbital angular momentum resonances in helically twisted photonic crystal fiber, *Science* **337** (2012) 446-449.

<https://doi.org/10.1126/science.1223824>

[13] C. Fu, S. Liu, Y. Wang, Z. Bai, J. He, C. Liao, *et al.*, High-order orbital angular momentum mode generator based on twisted photonic crystal fiber, *Optics letters* **43**

سیاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه صنعتی شیراز برای فراهم آوردن امکانات و پشتیبانی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

مرجع‌ها

[1] L. Allen, M.W. Beijersbergen, R. Spreeuw, J. Woerdman, Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes, *Physical Review A* **45** (1992) 8185.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>

[2] G. Gibson, J. Courtial, M.J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S.M. Barnett, *et al.*, Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum, *Optics express* **12** (2004) 5448-5456.

<https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005448>

[3] A.M. Yao, M.J. Padgett, Orbital angular momentum: origins, behavior and applications, *Advances in Optics and Photonics* **3** (2011) 161-204.

<https://doi.org/10.1364/AOP.3.000161>

[4] K. Ladavac, D.G. Grier, Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays, *Optics Express* **12** (2004) 1144-1149.

<https://doi.org/10.1364/OPEX.12.001144>

[5] M. Padgett, L. Allen, Optical tweezers and spanners, *Physics World* **10** (1997) 35.

[6] A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, *et al.*, Optical communications using orbital angular momentum beams, *Advances in Optics and Photonics* **7** (2015) 66-106.

<http://dx.doi.org/10.1364/AOP.7.000066>

- [20] H. Li, H. Zhang, X. Zhang, Z. Zhang, L. Xi, X. Tang, *et al.*, Design tool for circular photonic crystal fibers supporting orbital angular momentum modes, *Applied optics* **57** (2018) 2474-2481. <https://doi.org/10.1364/AO.57.002474>
- [21] G.P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, Springer, (2000).
- (2018) 1786-1789. <https://doi.org/10.1364/OL.43.001786>
- [14] H. Zhang, W. Zhang, L. Xi, X. Tang, X. Zhang, X. Zhang, A new type circular photonic crystal fiber for orbital angular momentum mode transmission, *IEEE Photonics Technology Letters* **28** (2016) 1426-1429. <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2551325>
- [15] H. Zhang, X. Zhang, H. Li, Y. Deng, X. Zhang, L. Xi, *et al.*, A design strategy of the circular photonic crystal fiber supporting good quality orbital angular momentum mode transmission, *Optics Communications* **397** (2017) 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.03.075>
- [16] W. Tian, H. Zhang, X. Zhang, L. Xi, W. Zhang, X. Tang, A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes, *Optical Fiber Technology* **30** (2016) 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.07.009>
- [17] Y. Deng, H. Zhang, H. Li, X. Tang, L. Xi, W. Zhang, *et al.*, Erbium-doped amplification in circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes, *Applied optics* **56** (2017) 1748-1752. <https://doi.org/10.1364/AO.56.001748>
- [18] H. Pakarzadeh, V. Sharif, Control of orbital angular momentum of light in optofluidic infiltrated circular photonic crystal fibers, *Optics Communications* **438** (2019) 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.01.007>
- [19] H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, *et al.*, 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength, *Optics letters* **39** (2014) 197-200. <https://doi.org/10.1364/OL.39.000197>