

三种涡旋光光子晶体光纤的设计

魏薇, 张羚翔, 张志明, 唐莉勤, 丁镭, 李乙钢*

南开大学物理科学学院, 天津 300071

摘要 为进一步研究光子晶体光纤中涡旋光的传输特性, 提出了 3 种不同结构的涡旋光光子晶体光纤, 即三角晶格环形光子晶体光纤 (TLPCF)、折射率倒转抛物线式光子晶体光纤 (IPGIF) 和六重准晶涡旋光光子晶体光纤 (SPQCF)。利用矢量有限元分析方法, 模拟计算了光纤中各个涡旋光模式的传输特性, 研究表明: 3 种涡旋光光子晶体光纤中的模式有效折射率差均大于 10^{-4} , 支持不同数量的涡旋光传输。其中 TLPCF 的色散系数最小, SPQCF 的色散系数最大, 两者在宽波段 (1400~1700 nm) 内均保持了色散平坦趋势; 3 种光纤的限制性损耗均小于 1×10^{-7} dB·m⁻¹, 能够将光很好地局限在纤芯内部; 3 种光纤的非线性系数均保持在 10^{-3} 量级; 涡旋光模式稳定传输的距离大于 1 km。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 涡旋光; 矢量有限元; 色散; 限制性损耗

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0906006

Design of Three Vortex Photonic Crystal Fibers

Wei Wei, Zhang Lingxiang, Zhang Zhiming, Tang Liqin, Ding Lei, Li Yigang*

School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract In order to study the transmission characteristics of vortex beams in a photonic crystal fiber (PCF), we propose three different vortex PCFs, i. e., triangular lattice ring photonic crystal fiber (TLPCF), inverse-parabolic graded-index profile photonic crystal fiber (IPGIF), and sixfold photonic quasi-crystal fiber (SPQCF). By using the vector finite element method, we analyze the transmission characteristics of vortex modes in three PCFs. The results indicate that the effective refractive index difference between adjacent vector modes is larger than 10^{-4} , which is conducive to the transmission of vortex beams. The dispersion coefficient of TLPCF is the smallest, and that of SPQCF is the largest. Both of TLPCF and SPQCF can maintain the flat dispersion over a wide wavelength range (1400-1700 nm). The confinement losses of these three fibers are below 1×10^{-7} dB·m⁻¹, so that light can be confined in fiber core well. The nonlinear coefficients of the three different PCFs are in the order of 10^{-3} , and the stable transmission distances of the three different PCFs are longer than 1 km.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; vortex beams; finite element method; dispersion; confinement loss

OCIS codes 060.5295; 060.2280; 060.2270

1 引 言

涡旋光是指具有螺旋形相位面 $\exp(il\phi)$ 的一类光束, 其中 ϕ 为方位角, l 为拓扑荷数 (l 取整数), 其呈现出环形的光场分布, 携带轨道角动量 (OAM)。在光通信领域中, OAM 是不同于相位、偏振的另一种可以携带光信息的载体, 因此能够大大提高光通信的信道容量和频谱效率。近年来, 涡旋光成为光通信领域的研究热点。1981 年, Baranova 等^[1] 在实验中发现光束中存在 OAM。1992 年, Swartzlander

等^[2] 在 Kerr 介质中观察到具有 OAM 的光束, 发现涡旋光孤子, 并且研究了具有 OAM 的光束在光子晶格中的传播规律。随后出现了许多产生携带 OAM 的涡旋光的方法, 如利用螺旋相位波片、衍射相位全息图、超材料、Q 板和光纤光栅^[3-8] 等产生涡旋光, 这些都是在自由空间产生涡旋光的方法。为了将涡旋光用于信息传输, 研究人员将目光转向了光纤中涡旋光的传输和产生, 致力于提高涡旋光信息传输的稳定性。对于光纤中涡旋光的传输, 需要打破光纤的弱波导条件, 提高纤芯和包层的折射率

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-04-22; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(11474170)、天津市自然科学基金(16JCYBJC16900)

* E-mail: liyigang@nankai.edu.cn

差。合理的光纤结构设计使得光纤中本征模式有效分离,且本征矢量模间的有效折射率差大于 10^{-4} ,从而实现光纤中涡旋光的传输。Bozinovic 等^[9]利用设计的环形光纤,并结合波分复用等技术实现了 Tbit/s 的低串扰长距离的信息传输。Brunet 等^[10]设计了一种新型的环形光纤,通过在 SiO₂ 基底上掺杂 GeO₂ 和 P₂O₅,实现了 36 个 OAM 模式的传输,迄今为止,这是在实验中实现的最大数量的 OAM 模的传输。但由于掺杂了其他的氧化物(GeO₂ 和 P₂O₅),光纤损耗较大,只能用于短距离传输。其他应用于 OAM 模传输的涡旋光纤主要有多芯光纤^[11]、超模光纤^[12-13]、折射率渐变分布式光纤^[14-15]以及光子晶体光纤^[16-17],这些光纤都是以环形纤芯为基础。如 Ung 等^[14]设计了一种折射率倒转抛物线式少模涡旋光纤,此种光纤在实验上将 OAM_{±1,1} 模传输了 1.1 km。为了进一步提高光纤模式的各项传输性能,科研工作者开始关注光子晶体光纤中涡旋光的传输,光子晶体光纤因其具有周期性的二维结构,结构设计上灵活可控,与普通的阶跃光纤相比具有更大的设计自由度,能够实现对传输特性更灵活的调节^[18-19]。Zhao 等^[16]设计了一个多芯光子晶体光纤,提出了一种产生偏振涡旋光束的新方法,因此在设计涡旋光光子晶体光纤方面有借鉴价值。Yue 等^[17]设计了环形光子晶体光纤,这一设计以 As₂S₃ 为基底,增大纤芯和包层的折射率差,利用涡旋光束实现超连续光谱的产生。

本文利用光子晶体光纤结构上灵活可控的优势,设计了 3 种以 SiO₂ 为基底的光子晶体光纤,分别为三角晶格环形光子晶体光纤(TLPCF)、折射率倒转抛物线式光子晶体光纤(IPGIF)以及六重准晶涡旋光光子晶体光纤(SPQCF)。这 3 种不同的光纤端面设计,使本征矢量模间的有效折射率差大于 10^{-4} ,实现了模式间的有效分离。通过分析其涡旋光的传输特性,发现 TLPCF 和 SPQCF 在 1400~1700 nm 间均保持了色散平坦趋势,3 种光纤的限制性损耗均小于 1×10^{-7} dB · m⁻¹,非线性系数均保持在 10^{-3} 量级;涡旋光模式稳定传输的距离大于 1 km。因此,通过改变光子晶体光纤空气孔排布方式,可以调控涡旋光模式的传输特性。

2 理论分析

光纤中 OAM 涡旋光的模式用 OAM_{*l,m*} 来表示^[10],其中,*l* 表示拓扑荷数,*m* 表示径向阶数,代表涡旋光同心圆的个数。当 *l*=0 时,构成两个正交

偏振的光纤基模 HE_{±1} (上标 ± 表示左、右旋圆偏振方向),因光纤基模的拓扑荷数为 0,不携带 OAM,其光场分布并不包含相位因子,因此不具有螺旋式的相位分布,所以不属于涡旋光模式。当 $|l|=1$ 时,光纤模式由两个偏振涡旋光束(矢量光束)和两个相位涡旋光束(OAM 光束)构成,其中偏振涡旋光束是指 TM₀₁ 和 TE₀₁ 模式的涡旋光束,不携带 OAM。另外两个相位涡旋光束携带拓扑荷数为 1 的 OAM,其表达式为

$$\text{OAM}_{\pm 1,1}^{\pm} = \text{HE}_{2,1}^{\text{even}} \mp i\text{HE}_{2,1}^{\text{odd}}, \quad (1)$$

式中:下标 ± 表示波前旋转方向;上标 even 和 odd 分别代表偶模和奇模。当 $|l|>1$ 时,由于具有不同的圆偏振方向(左旋偏振光和右旋偏振光)和相位旋转方向,光纤中存在 4 种模式的涡旋光,其表达式为

$$\begin{cases} \text{OAM}_{\pm l,1}^{\pm} = \text{HE}_{l+1,1}^{\text{even}} \mp i\text{HE}_{l+1,1}^{\text{odd}} \\ \text{OAM}_{\mp l,1}^{\pm} = \text{EH}_{l-1,1}^{\text{even}} \mp i\text{EH}_{l-1,1}^{\text{odd}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:OAM_{±*l*,1}[±] 的圆偏振方向与波前旋转方向相同;OAM_{∓*l*,1}[±] 的圆偏振方向与波前旋转方向相反^[10]。对用于涡旋光传输的光子晶体光纤的研究集中在对 $l \geq 1$ 的涡旋光的研究。

当表征涡旋光径向模式的参数 $m > 1$ 时,称为高阶径向模式,其主要受纤芯厚度的影响。高阶径向模式的产生将会对光纤通信系统的解复用技术带来困难,因此在光纤设计中,将尽可能地减小纤芯厚度,抑制高阶径向模式的产生^[20-21]。

当一束高斯光束通过普通的多模光纤,纤芯和包层的折射率差使得光纤中能够传输不同模式的光,但由于模式间的有效折射率差较小,模式间存在着模式耦合,此时光纤中只能传输标量线偏振模(LP 模)。当进行合理的光纤结构设计,使得光纤中模式间的有效折射率差大于 10^{-4} 时,可实现光纤中各个模式的有效分离,从而实现光纤中涡旋光模式的传输^[22]。

3 涡旋光光子晶体光纤的传输模式

利用基于有限元法的仿真软件 COMSOL Multiphysics,设计了 3 种不同结构的涡旋光光子晶体光纤。图 1(a) 所示为普通 TLPCF,TLPCF 由两层空气孔组成,内层小空气孔半径 $r_{11} = 0.3 \mu\text{m}$,外包层空气孔半径 $r_{12} = 0.8 \mu\text{m}$,孔间距 $\Delta_1 = 2 \mu\text{m}$,内层空气孔和外包层空气孔的距离为 $2\Delta_1$,该距离也是纤芯的厚度。图 1(b) 所示为 IPGIF,与图 1(a) 所示的光子晶体排布相同,都是三角晶格排布,第一层空气孔半径 $r_{11} = 0.9 \mu\text{m}$,第二层空气孔半径 $r_{12} = 0.4 \mu\text{m}$,第三层空气孔半径

$r_{i3} = 0.1 \mu\text{m}$,剩下的几层为包层空气孔,半径 $r_{i4} = 0.9 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda_i = 2 \mu\text{m}$ 。通过空气孔半径梯度式的排布,形成纤芯和包层的折射率差,以打破弱波导条件,实现模式分离。图 1(c)所示为 SPQCF,空气孔呈准晶结构排布。中心空气孔半径 $r_{s0} = 1.9 \mu\text{m}$,内包层空气孔半径 $r_{s1} = 0.6 \mu\text{m}$,外包层空气孔半径 $r_{s2} = 0.96 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda_s = 2.4 \mu\text{m}$ 。三

种光纤的基底材料都为 SiO_2 。图 2 为三种光子晶体光纤端面的折射率分布图。 $N(r)/N_{\text{max}}$ 表示光纤端面的归一化折射率差分布,其中 $N(r)$ 表示径向上各个点的折射率, N_{max} 表示光纤端面的最大折射率, r 为光纤端面某一点的坐标。图 2 的插图为 3 种涡旋光光子晶体光纤传输 HE_{21} 模的光场分布(左)和电场分布(右)图。

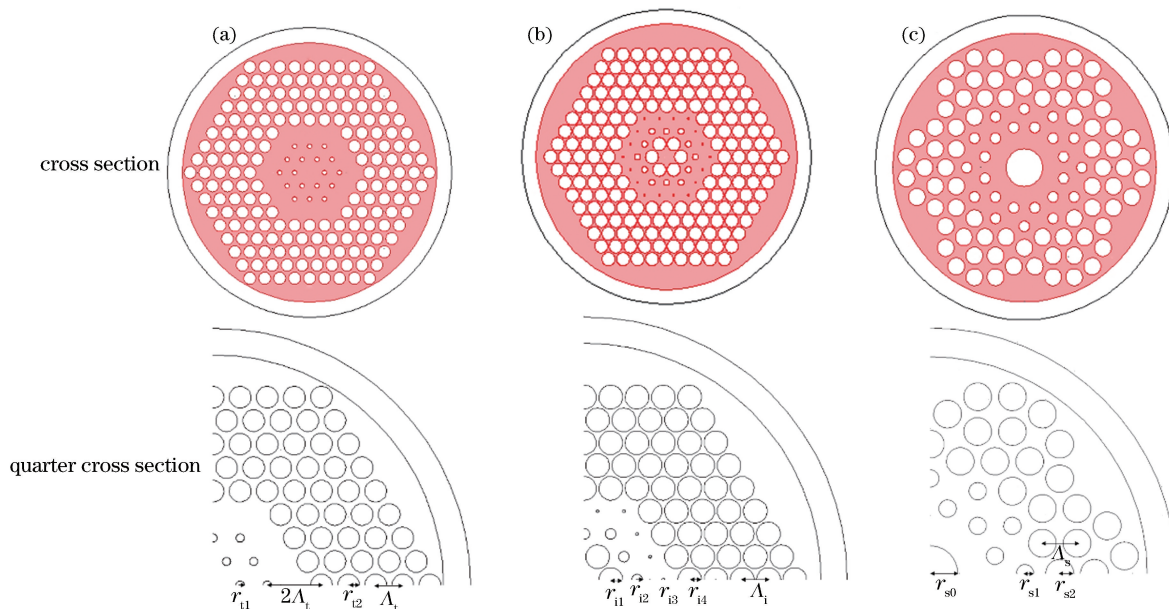


图 1 3 种涡旋光光子晶体光纤端面图。(a) TLPCF; (b) IPGIF; (c) SPQCF

Fig. 1 Cross sections of three different photonic crystal fibers. (a) TLPCF; (b) IPGIF; (c) SPQCF

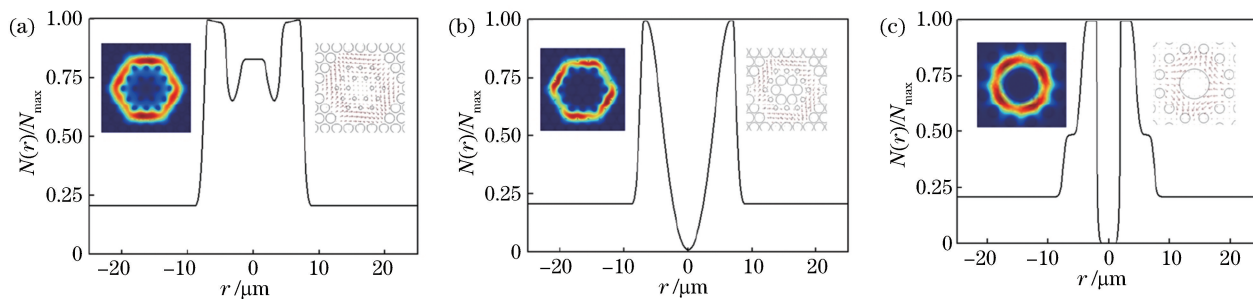


图 2 3 种涡旋光光子晶体光纤端面折射率分布图。(a) TLPCF; (b) IPGIF; (c) SPQCF

Fig. 2 Refractive index profiles of three different vortex photonic crystal fibers. (a) TLPCF; (b) IPGIF; (c) SPQCF

光纤中涡旋光的传输需要实现模式间有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$,图 3 所示为 1550 nm 波长处 3 种涡旋光光子晶体光纤中涡旋光模式间的有效折射率差。从图 3 可以看出,涡旋光模式间的有效折射率差均大于 10^{-4} ,因此 TLPCF 可以传输 14 种涡旋光模式,并且在 1000~1200 nm 波长范围内能够传输 $\text{OAM}_{5,1}$ 模式。IPGIF 可以传输 18 种涡旋光模式,SPQCF 支持 10 种涡旋光模式的传输。表 1 所示为 1550 nm 波长处,不同涡旋光光子晶体光纤的模式

分离度以及涡旋光的传输个数,在图 1(a)所示的 TLPCF 中, TE_{01} 、 HE_{21} (将 $\text{HE}_{21}^{\text{even}}$ 和 $\text{HE}_{21}^{\text{odd}}$ 统称为 HE_{21}) 和 TM_{01} 涡旋光模式的有效折射率差分别为 3.62×10^{-4} 和 4.59×10^{-4} 。在图 1(b)所示的 IPGIF 中, TE_{01} 与 HE_{21} 、 HE_{21} 与 TM_{01} 涡旋光模式的有效折射率差分别为 6.48×10^{-4} 和 9.74×10^{-4} 。在图 1(c)所示的 SPQCF 中, TE_{01} 与 HE_{21} 、 HE_{21} 与 TM_{01} 涡旋光模式的有效折射率差分别为 1.25×10^{-3} 和 1.51×10^{-3} 。

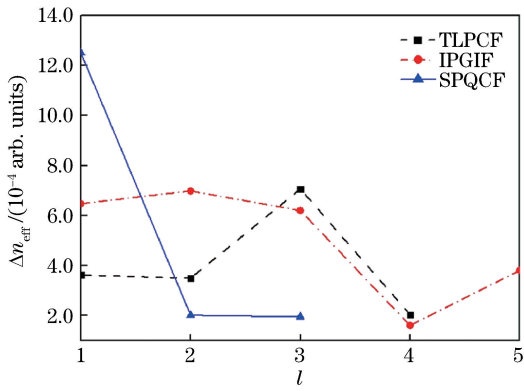
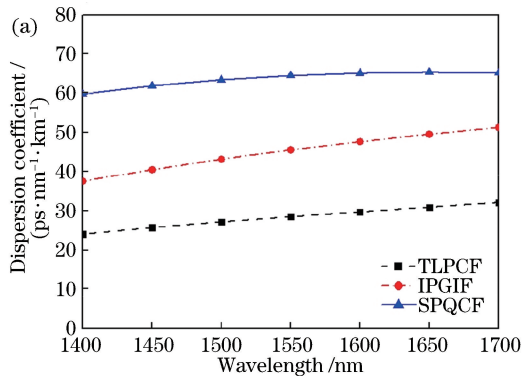


图 3 3 种涡旋光光子晶体光纤中涡旋光模式间的有效折射率差

Fig. 3 Δn_{eff} of adjacent vortex beams in three different vortex photonic crystal fibers

表 1 不同涡旋光光子晶体光纤的 Δn_{eff} 以及涡旋光传输个数
Table 1 Δn_{eff} and number of vortex beams of three different vortex photonic crystal fibers

Type of photonic crystal fibers	Δn_{eff}		Number of vortex beams
	TE ₀₁ -HE ₂₁	HE ₂₁ -TM ₀₁	
TLPCF	3.62×10^{-4}	4.59×10^{-4}	14
IPGIF	6.48×10^{-4}	9.74×10^{-4}	18
SPQCF	1.25×10^{-3}	1.51×10^{-3}	10



4 涡旋光传输特性

4.1 涡旋光色散特性

3 种涡旋光光子晶体光纤的基底材料都为 SiO₂, 由于特殊的空气孔排布, 其模式间有效折射率差大于 10⁻⁴. 不考虑模间色散的影响, 光纤中色散主要包括波导色散和材料色散^[23]. 图 4(a) 所示为 3 种涡旋光光子晶体光纤中 HE₂₁ 模色散系数随波长的变化. 可以看出: 在通信波段 1400~1700 nm 范围内, TLPCF 的色散系数最小, 波动范围为 24.03~32.10 ps·nm⁻¹·km⁻¹, 其次为 IPGIF, 色散系数的波动范围为 37.56~51.36 ps·nm⁻¹·km⁻¹, SPQCF 的色散系数相对较大, 波动范围为 59.90~65.26 ps·nm⁻¹·km⁻¹. 同时对 3 种涡旋光光子晶体光纤中不同本征模式在 1550 nm 波长处的色散值进行对比分析, 如图 4(b) 所示. 从图 4(b) 可以看出, 随着拓扑荷数的增大, 涡旋光模式的色散系数增大, 整体的色散系数小于 156 ps·nm⁻¹·km⁻¹, 保持在低色散水平, 其中 IPGIF 能够传输的涡旋光模式最多, 其高阶模 HE₆₁ 的色散系数最大 (155.7 ps·nm⁻¹·km⁻¹), 但仍能够通过色散补偿技术进行色散补偿. 3 种光纤设计中 SPQCF 的色散平坦度最好, 其次是 TLPCF, 最后是 IPGIF.

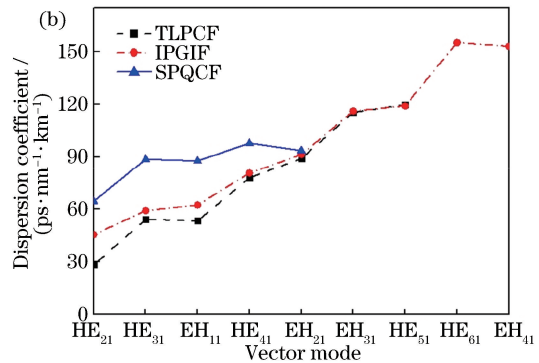


图 4 3 种涡旋光光子晶体光纤的色散系数。(a) HE₂₁ 模色散系数随波长的变化; (b) 不同本征模在 1550 nm 处的色散系数
Fig. 4 Dispersion coefficient in three different vortex photonic crystal fibers. (a) Dispersion coefficient of HE₂₁ mode versus wavelength; (b) dispersion coefficients of different supporting vector modes at 1550 nm

4.2 涡旋光限制性损耗

光子晶体光纤结构中规则的空气孔排布使得光在传导过程中会在包层空气孔缝隙中发生泄漏, 从而导致光在传输中产生损耗^[24]. 图 5(a) 所示为 3 种不同结构的光子晶体光纤中 HE₂₁ 模限制性损耗随波长的变化. 可以看出: 在 1400~1700 nm 波段内, IPGIF 的限制性损耗最小, 保持在 1.32×10^{-13} dB·m⁻¹ ~ 2.17×10^{-10} dB·m⁻¹ 之间,

TLPCF 的限制性损耗保持在 4.92×10^{-10} dB·m⁻¹ ~ 3.39×10^{-11} dB·m⁻¹ 之间, 而 SPQCF 的限制性损耗相对较大, 保持在 1.08×10^{-9} dB·m⁻¹ ~ 8.57×10^{-8} dB·m⁻¹ 之间. 图 5(b) 所示为 3 种涡旋光光子晶体光纤中不同本征模在 1550 nm 处的限制性损耗. 可以看出: 光纤中不同涡旋光模式的限制性损耗不同, 其中 TLPCF 和 SPQCF 中涡旋光模式的限制性损耗都保持在 10⁻¹¹ ~ 10⁻⁹ 量级, 而

SPQCF 中涡旋光模式的限制性损耗相对较大,保持在 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ 量级。3 种光纤设计都能将涡旋光的限制性损耗限制在 10^{-7} 量级以下,因此都能够较好地抑制光子晶体光纤中的损耗,实现涡旋光的稳定传输。

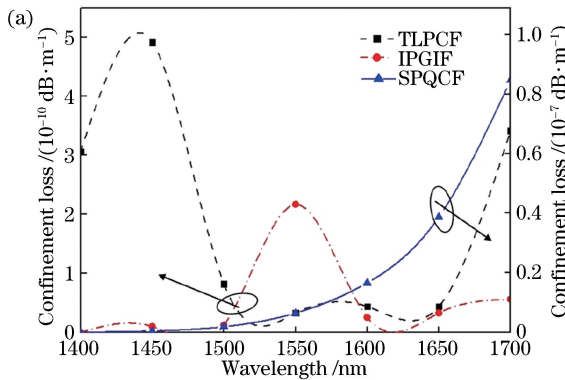
4.3 涡旋光非线性特性

与普通光纤相比,光子晶体光纤可传导的波长范围更大,对功率水平的限制较小,在非线性和域中得到广泛应用。可用非线性系数来衡量光子晶体光纤中非线性的大小,其计算式为

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{n_1}{A_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中: n_1 为光纤基底材料(SiO_2)的非线性折射率,此处取值为 $2.36 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; A_{eff} 为有效模场面积; λ 为波长。

图 6(a)所示为 3 种不同结构的光子晶体光纤中 HE_{21} 模的非线性系数随波长的变化。可以看出:



随着波长的增大,3 种结构的光子晶体光纤中 HE_{21} 模的非线性系数减小。在 $1400 \sim 1700 \text{ nm}$ 波长范围内,SPQCF 的非线性系数最大, HE_{21} 模的非线性系数处于 $2.29 \times 10^{-3} \sim 2.74 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内;TLPCF 的非线性系数相对最小, HE_{21} 模的非线性系数处于 $0.96 \times 10^{-3} \sim 1.27 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内。图 6(b)所示为 3 种涡旋光光子晶体光纤中不同本征模式在 1550 nm 波长处的非线性系数。可以看出,不同本征模式的非线性系数不同,但所有模式的非线性系数都保持在 10^{-3} 量级。因此,3 种光子晶体光纤的非线性系数都保持在低量级,不会激发光纤中的非线性效应,有利于涡旋光的稳定传输。

4.4 涡旋光稳定传输的距离

图 7(a)为 3 种不同结构的光子晶体光纤中的 HE_{21} 模的 10 ps 走离长度($L_{10 \text{ ps}}$)随波长的变化。 $L_{10 \text{ ps}}$ 表示当两个本征矢量模具有 10 ps 的走离时差

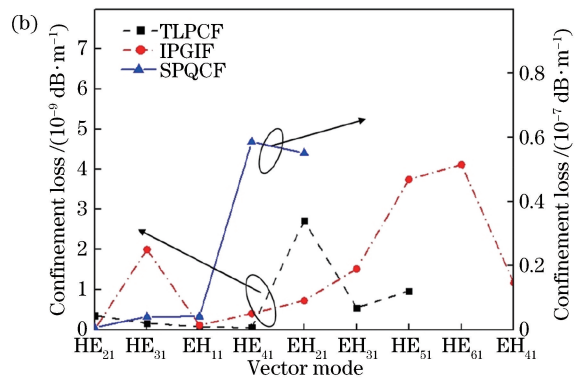


图 5 3 种涡旋光光子晶体光纤的限制性损耗。(a) HE_{21} 模限制性损耗随波长的变化;
(b)不同本征模在 1550 nm 处的限制性损耗

Fig. 5 Confinement loss in three different vortex photonic crystal fibers. (a) Confinement loss of HE_{21} mode versus wavelength; (b) confinement losses of different supporting vector modes at 1550 nm

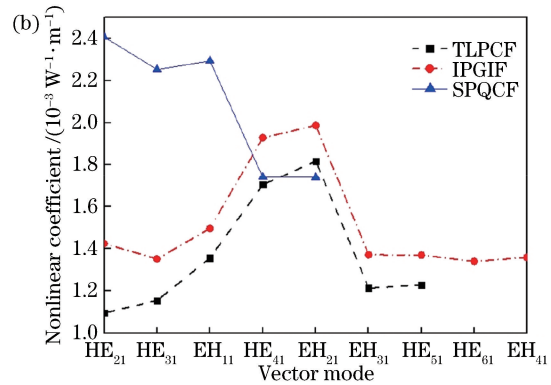
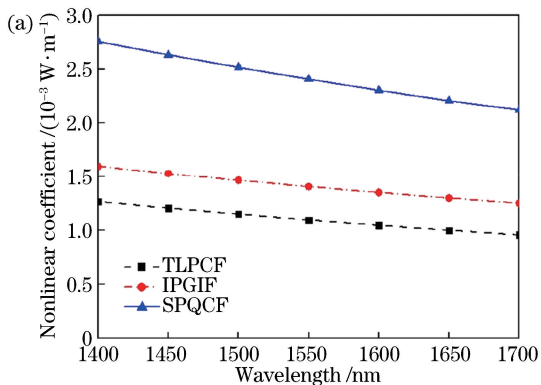


图 6 3 种涡旋光光子晶体光纤的非线性系数。(a) HE_{21} 模非线性系数随波长的变化;
(b)不同本征模在 1550 nm 处的非线性系数

Fig. 6 Nonlinear coefficient in three different vortex photonic crystal fibers. (a) Nonlinear coefficient of HE_{21} mode versus wavelength; (b) nonlinear coefficients of different supporting vector modes at 1550 nm

时 OAM 的传输长度^[25]。从图 7(a)可以看出: 涡旋光模式的稳定传输距离随着波长的变化只发生极微小的波动, 因此, 波长对涡旋光模式的稳定传输距离影响甚微。图 7(b)为 3 种涡旋光光子晶体光纤中不同本征模在 1550 nm 处的 10 ps 走离长度。从图 7(b)可以看出: 涡旋光光子晶体光纤中不同涡旋光模式的走离长度不同, 其中对于 TLPCF 以及 IPGIF, 当 $l+1=3n(n \geq 1)$ ($HE_{l+1,1}$)

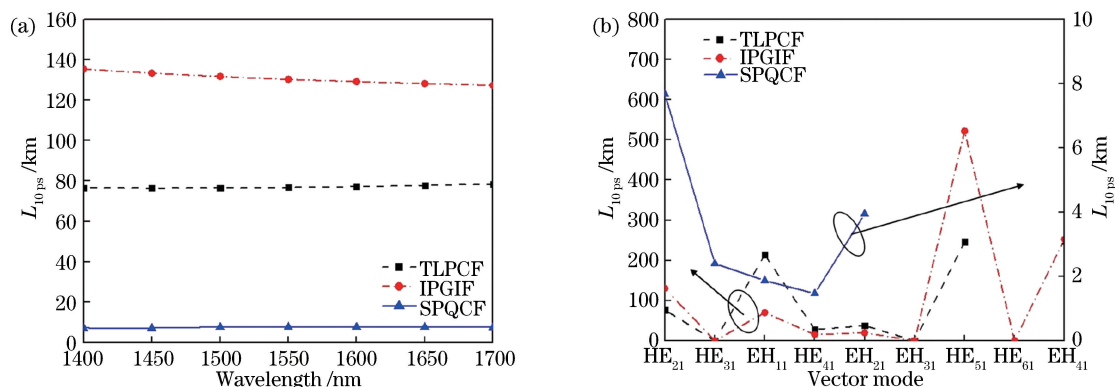


图 7 3 种涡旋光光子晶体光纤的走离长度 ($L_{10\text{ps}}$)。 (a) HE_{21} 模 $L_{10\text{ps}}$ 随波长的变化; (b) 不同本征模在 1550 nm 处的 $L_{10\text{ps}}$

Fig. 7 $L_{10\text{ps}}$ in three different vortex photonic crystal fibers. (a) $L_{10\text{ps}}$ of HE_{21} mode versus wavelength;

(b) $L_{10\text{ps}}$ of different supporting vector modes at 1550 nm

5 结 论

利用光子晶体光纤结构灵活可控的优势, 设计了 3 种不同结构的光子晶体光纤, 并对这 3 种光子晶体光纤传输的涡旋光进行模式特性分析。研究表明, 3 种涡旋光光子晶体光纤的有效折射率差均大于 10^{-4} , 能够支持不同数量的涡旋光的传输。TLPCF 的色散系数在光通信波长范围内相对最小, SPQCF 的色散系数最大, 两者都能在光通信波段保持很好的色散平坦趋势; 3 种光纤结构中涡旋光的限制性损耗都能保持在 10^{-7} 量级以下, 有效地抑制了传输过程中涡旋光的限制性损耗; TLPCF 的非线性系数最小, 但是 3 种结构的光纤非线性系数在通信波长范围内都能保持在 10^{-3} 量级; 3 种涡旋光光子晶体光纤中涡旋光模式稳定传输的距离大于 1 km。上述一系列的研究表明: 涡旋光光子晶体光纤能够实现涡旋光的稳定传输, 通过调节光纤结构参量, 可以对光纤中的各项传输特性进行调节, 这在提高光纤通信容量方面具有很大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Baranova N, Zel'Dovich B Y, Mamaev A, *et al.* Dislocations of the wavefront of a speckle-inhomogeneous field (theory and experiment) [J]. JETP Letters, 1981, 33(4): 195-199.
- [2] Swartzlander G A, Jr, Law C T. Optical vortex solitons observed in Kerr nonlinear media [J]. Physical Review Letters, 1992, 69(17): 2503-2506.
- [3] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, *et al.* Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate [J]. Optics Communications, 1994, 112(5/6): 321-327.
- [4] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, Chen C C, *et al.* Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30196-30203.
- [5] Yu N, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [6] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, *et al.* Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications [J]. Journal of Optics, 2011, 13(6): 064001.
- [7] Bozinovic N, Golowich S, Kristensen P, *et al.* Control of orbital angular momentum of light with optical fibers [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2451-2453.
- [8] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. Advances in Optics and Photonics, 2015,

- 7(1): 66-106.
- [9] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [10] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, *et al.* Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [11] Li S H, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5 (5): 7101007.
- [12] Xia C, Bai N, Ozdur I, *et al.* Supermodes for optical transmission [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (17): 16653-16664.
- [13] Li S H, Wang J. Supermode fiber for orbital angular momentum (OAM) transmission [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18736-18745.
- [14] Ung B, Vaity P, Wang L, *et al.* Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18044-18055.
- [15] Zhang Z S, Gan J L, Heng X B, *et al.* Optical fiber design with orbital angular momentum light purity higher than 99.9% [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (23): 29331-29341.
- [16] Zhao C Y, Gan X T, Li P, *et al.* Design of multicore photonic crystal fibers to generate cylindrical vector beams[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(4): 1206-1211.
- [17] Yue Y, Zhang L, Yan Y, *et al.* Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in an As_2S_3 ring photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1889-1891.
- [18] Knight J C. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [19] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [20] Li H, Zhang H, Zhang X G, *et al.* Design tool for circular photonic crystal fibers supporting orbital angular momentum modes [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2474-2481.
- [21] Zhang H, Zhang X G, Li H, *et al.* A design strategy of the circular photonic crystal fiber supporting good quality orbital angular momentum mode transmission [J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 59-66.
- [22] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 455-474.
- [23] Zhang L X, Wei W, Zhang Z M, *et al.* Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(1): 014205. 张羚翔, 魏薇, 张志明, 等. 环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究 [J]. *物理学报*, 2017, 66(1): 014205.
- [24] Liao K, Liao J F, Xie Y M, *et al.* A defect photonic crystal fiber with high birefringence and negative dispersion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070604. 廖昆, 廖健飞, 谢应茂, 等. 一种高双折射负色散的缺陷型光子晶体光纤 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070604.
- [25] Yue Y, Yan Y, Ahmed N, *et al.* Mode properties and propagation effects of optical orbital angular momentum (OAM) modes in a ring fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 535-543.