

六重准晶涡旋光光子晶体光纤特性

魏薇 张志明 唐莉勤 丁镭 范万德 李乙钢

Transmission characteristics of vortex beams in a sixfold photonic quasi-crystal fiber

Wei Wei Zhang Zhi-Ming Tang Li-Qin Ding Lei Fan Wan-De Li Yi-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 114209 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190381

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190381>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究

Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber

物理学报. 2017, 66(1): 014205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.014205>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor

物理学报. 2015, 64(6): 064213 <https://doi.org/10.7498/aps.64.064213>

光子晶体光纤重叠光栅理论模型与光谱特性研究

Theoretical model and spectrum characteristics of superimposed photonic crystal fiber grating

物理学报. 2016, 65(20): 204208 <https://doi.org/10.7498/aps.65.204208>

利用Kagome光纤实现多芯光子晶体光纤的输出合束

The beam combination of multi-core photonic crystal fiber by using the Kagome fiber

物理学报. 2016, 65(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.65.024206>

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究

Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals

物理学报. 2015, 64(12): 120702 <https://doi.org/10.7498/aps.64.120702>

空芯光子带隙光纤色散特性的实验研究

Experimental research on the dispersion property of hollow core photonic bandgap fiber

物理学报. 2016, 65(19): 194212 <https://doi.org/10.7498/aps.65.194212>

六重准晶涡旋光光子晶体光纤特性*

魏薇 张志明 唐莉勤 丁镭 范万德 李乙钢†

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2019年3月17日收到; 2019年4月9日收到修改稿)

设计了一种新型的六重准晶涡旋光光子晶体光纤, 利用矢量有限元分析方法进行了数值模拟. 研究结果表明光纤中模式有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$, 实现了7个本征矢量模(10个相位涡旋光)的稳定传输, 并以 HE_{21} 为对象, 对光纤模式的传输特性进行了分析研究. 研究结果表明, 在波段 1500—1600 nm 内, 涡旋光模式的限制性损耗在 10^{-8} — 10^{-7} 量级, 模场面积保持在 $40 \mu\text{m}^2$, 非线性系数在 10^{-3} 量级. 通过改变光纤中心空气孔的大小, 能够实现特定波段的色散平坦趋势, 当中心空气孔为 $1.9 \mu\text{m}$ 时, 光纤能够在 1500—1800 nm 波段保持色散平坦, 色散系数维持在 63.51 — $65.42 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间.

关键词: 光子晶体光纤, 涡旋光, 色散, 限制性损耗

PACS: 42.81.Bm, 42.81.Dp, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.68.20190381

1 引言

涡旋光是指波前具有螺旋形相位面 $e^{il\phi}$ 的一类光束, 其中 ϕ 指方位角, l 指拓扑荷数 (l 取整数), 涡旋光的中心具有相位奇点, 奇点处的相位具有不确定性, 振幅为零. 涡旋光分为偏振涡旋光和相位涡旋光, 其中偏振涡旋光又称为矢量光束, 分为 TM_{01} 和 TE_{01} 模; 相位涡旋光又称为轨道角动量光束 (OAM), 其携带 lh 的轨道角动量^[1]. 涡旋光因其独有的特性, 在许多领域有广泛的应用, 如光镊^[2]、原子操控^[3]、量子通信^[4]、光纤通信系统^[5-7] 等. 迄今为止, 光纤通信系统已经实现了频率、振幅、相位、偏振等相关的多路复用技术, 引入轨道角动量的多路复用, 并与现有的多路复用技术相结合, 能够有效地增加光纤通信系统的传输容量.

1989年, Collet 等^[8] 首次提出“光学涡旋”的概念, 涡旋光引起了科研工作者的广泛关注. 1992年, Allen 等^[9] 发现并证明光子可以携带轨道角动

量, 到目前为止, 光纤中涡旋光的研究主要集中在两个方面: 即光纤中涡旋光的产生和稳定传输. 目前关于光纤中涡旋光的产生有很多方法, 如: 通过对光纤进行扭转^[6] 或利用光纤布拉格光栅等装置对光纤施加应力, 实现模式转换, 从而获得涡旋光^[10-12]; 利用耦合模理论设计新型光纤, 将圆偏振高斯光束转换为涡旋光束^[13]. 另一方面, 光纤中涡旋光的稳定传输主要集中在环形光纤^[14,15]、多芯光纤^[16,17]、超模光纤^[18,19]、折射率梯度分布的光纤^[20,21] 等一系列新型光纤的设计上. 新型涡旋光纤的设计中, 需要打破传统光纤的弱波导条件, 提高纤芯和包层的折射率差, 并且对光纤不同区域进行合理的结构设计, 实现光纤本征模式间有效折射率差大于 10^{-4} , 从而实现光纤中涡旋光的传输. 通过将 OAM 复用技术与通信领域其他的多路复用技术相结合, 已经实现了 Tbit/s 的信息高速传输^[7]. 为了增加光纤中涡旋模式的传输数量, LaRochelle 课题组^[14] 通过设计空气孔环形涡旋光纤, 使光纤中稳定传输的涡旋光模式数达到 36 个; 为了在涡旋光

* 国家自然科学基金 (批准号: 11474170) 和天津市自然科学基金 (批准号: 16JCYBJC16900) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liyigang@nankai.edu.cn

传输距离上有所突破, 该课题组设计了折射率倒转抛物线式分布的光纤, 这一设计能够支持 4 个 OAM 模稳定传输 1.1 km^[20]. 以上一系列环形光纤的设计都是在 SiO₂ 基底上掺杂不同的氧化物 (GeO₂, P₂O₅ 等), 形成环形折射率梯度, 制作较为方便, 但是在一定程度上增大了模式的传输损耗, 因此在长距离传输方面具有较大的限制.

与普通光纤相比, 光子晶体光纤 (PCF) 在通讯领域具有良好的特性, 例如设计自由度大、传输损耗与色散易于调节等. 通过在包层区引入一定数量规则排列的空气孔, 便能提高纤芯和包层区折射率差, 而不用掺杂其他氧化物引起不必要的损耗. 以往光子晶体光纤的研究主要集中在单模光纤的设计中, 通过对光子晶体光纤的设计, 实现超零色散平坦的模式传输, 提高光纤传输距离^[22]. 而将光子晶体光纤与涡旋光相结合, 始于 Willner 课题组^[23], 通过设计六角结构光子晶体光纤, 实现了一阶涡旋光的传输. 2016 年, Zhao 等^[24] 通过设计六角结构的多芯光子晶体光纤产生了柱矢量光束 (矢量涡旋光). 从以上研究中可以看到, 由于六角形结构分布的纤芯圆对称性不高, 未与涡旋光的光场分布很好地匹配, 导致光子晶体光纤中涡旋光传输时产生不必要的损耗^[25]. 因此, 可以通过改变光子晶体光纤中空气孔的排布方式, 提高光子晶体光纤的圆对称性, 将纤芯区域设计成与涡旋光束光场分布一致的环形结构, 从而提高涡旋光的传输性能.

本文设计了新型的六重准晶涡旋光光子晶体光纤 (SPQCF), 其光纤设计中引入了六重准晶光子晶体结构, 该结构因其特殊的空气孔排布, 能够形成与涡旋光的光场分布相匹配的环形纤芯结构. 准晶是指具有准周期结构的晶体, 它具有旋转对称性和长程指向性, 但没有平移周期性的晶体, 将这种晶体结构引入光子晶体光纤可以降低空气孔排列的有序程度, 从而大大降低光纤的制作精度^[26,27]. 六重准晶涡旋光光子晶体光纤以 SiO₂ 为基底, 通过调节空气孔大小以及孔间距等参数, 对光纤进行了优化设计, 实现了模式间折射率的有效分离, 能够支持涡旋光在光纤中稳定传输. 并通过对光纤中色散、非限制性损耗等参数的分析, 对光纤中涡旋光的传输特性进行了深入的研究. 研究表明, 本征模式的限制性损耗在 10⁻⁷ 数量级, 非线性系数在 10⁻³ 数量级, 能够支持涡旋光的稳定传输. 通过调节中心空气孔 r_0 的大小, 实现了特定波段的色

散平坦, 在光孤子传输方面具有潜在应用.

2 理论分析

对于普通的少模或多模阶跃光纤, 矢量模式间的有效折射率差比较小, 不能有效分离, 因此忽略折射率梯度的影响, 采用标量近似解, 研究对象为标量模式 LP_{*m,n*}, 组成它的本征模式具有不同的传播常数, 因此不能长距离地稳定传输. 如果考虑折射率梯度的影响, 需要运用光纤中全矢量的波动方程:

$$\{\nabla_t^2 + n^2 k^2\} \mathbf{E}_t + \nabla_t \{\mathbf{E}_t \cdot \nabla_t [\ln(n^2)]\} = \beta^2 \mathbf{E}_t, \quad (1)$$

式中 n 是波导折射率, k 是自由空间波矢, λ 是波长, β 是矢量模的传播常数.

通过求解, 得到光纤中电场分布:

$$\mathbf{E}_{(r,\phi,z,t)} = \mathbf{E}_r e^{il\phi} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{E}_r 为径向场分布, $e^{il\phi}$ 表征涡旋光的螺旋相位面, 其中 l 为拓扑荷数, $e^{i(\omega t - \beta z)}$ 表示不同传播常数对应的模式解.

通过选用不同的坐标系, 将光纤中的本征矢量模表示为:

$$\begin{cases} \text{HE}_{l+1,m}^{\text{even}} \\ \text{HE}_{l+1,m}^{\text{odd}} \end{cases} = \mathbf{E}_r \begin{cases} \hat{x} \cos(l\phi) - \hat{y} \sin(l\phi) \\ \hat{x} \sin(l\phi) + \hat{y} \cos(l\phi) \end{cases}, \\ \begin{cases} \text{EH}_{l-1,m}^{\text{even}} \\ \text{EH}_{l-1,m}^{\text{odd}} \end{cases} = \mathbf{E}_r \begin{cases} \hat{x} \cos(l\phi) + \hat{y} \sin(l\phi) \\ \hat{x} \sin(l\phi) - \hat{y} \cos(l\phi) \end{cases}. \quad (3)$$

则光纤中的涡旋光定义为:

$$\begin{aligned} \text{OAM}_{\pm l,m}^{\pm} &= \text{HE}_{l+1,m}^{\text{even}} \pm i \text{HE}_{l+1,m}^{\text{odd}}, \\ \text{OAM}_{\pm l,m}^{\mp} &= \text{EH}_{l-1,m}^{\text{even}} \pm i \text{EH}_{l-1,m}^{\text{odd}}. \end{aligned} \quad (4)$$

因此涡旋光由本征矢量模的奇偶模的线性叠加组成, 其中奇偶模具有 $\pi/2$ 的相位差. 当 $l=0$ 时, 对应的是光纤基模; 当 $l=1$ 时, 对应的是 TM₀₁, TE₀₁, HE₂₁ 模, 其中 TM₀₁, TE₀₁ 为偏振涡旋, HE₂₁ 模为相位涡旋的本征矢量模, 可以组成 OAM_{±1,1}[±]. 当 $l>1$ 时, 同一拓扑荷数对应的本征模式可以线性组成 4 个 OAM 模.

设计涡旋光纤的主要目的在于增加本征矢量模间的有效折射率差, 使其模式有效折射率差大于 10⁻⁴, 从而有效地避免模式串扰, 支持涡旋光的稳定传输. 以光子晶体光纤结构进行设计, 能够很大程度上增大纤芯和包层的折射率差, 实现较好的模

式分离. 并且光子晶体光纤结构设计灵活, 方便对其进行进一步的优化设计.

3 六重准晶涡旋光光子晶体光纤的设计和传输特性

3.1 光纤设计

六重准晶涡旋光光子晶体光纤的端面结构如图 1(a) 所示, 基底材料为 SiO₂, 光纤中心为空气孔, 半径 $r_0 = 1.9 \mu\text{m}$, 内层小空气孔半径为 $r_1 = 0.6 \mu\text{m}$, 外层大空气孔半径 $r_2 = 0.96 \mu\text{m}$, 孔间距

$\Lambda = 2.4 \mu\text{m}$, 中心空气孔和内层小空气孔的孔间距为 2Λ . 图 1(b) 为光纤端面的折射率分布图, $N(r)/N_{\text{max}}$ 表示光纤端面归一化的折射率差分布, 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. 从图中可以看到中心空气孔和内层小空气孔之间形成折射率较高的环形纤芯, 可进行涡旋光的传输.

通过全矢量有限元分析方法, 对光纤进行模拟计算. 研究表明, 此光纤支持 7 个本征矢量模的传输 (10 个 OAM 模). 图 2 为光纤可传输的涡旋光模式的强度分布以及偏振分布图.

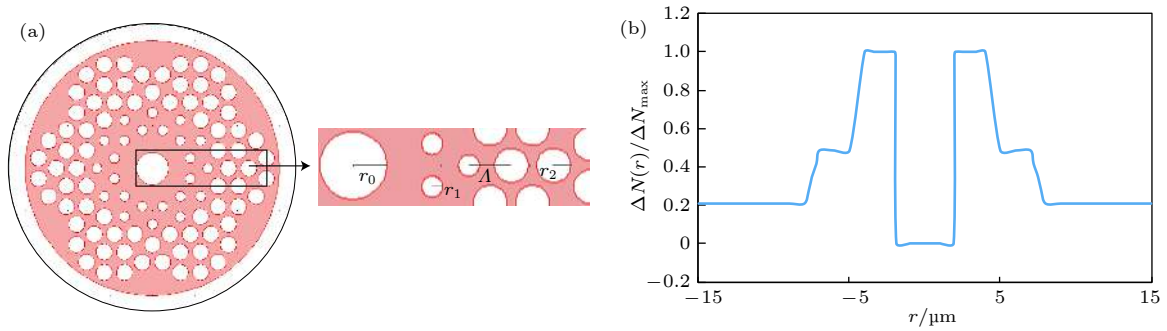


图 1 六重准晶涡旋光光子晶体光纤 (a) 光纤端面图; (b) 折射率分布图

Fig. 1. The sixfold photonic quasi-crystal fiber: (a) Cross-section of SPQCF; (b) index profile of SPQCF.

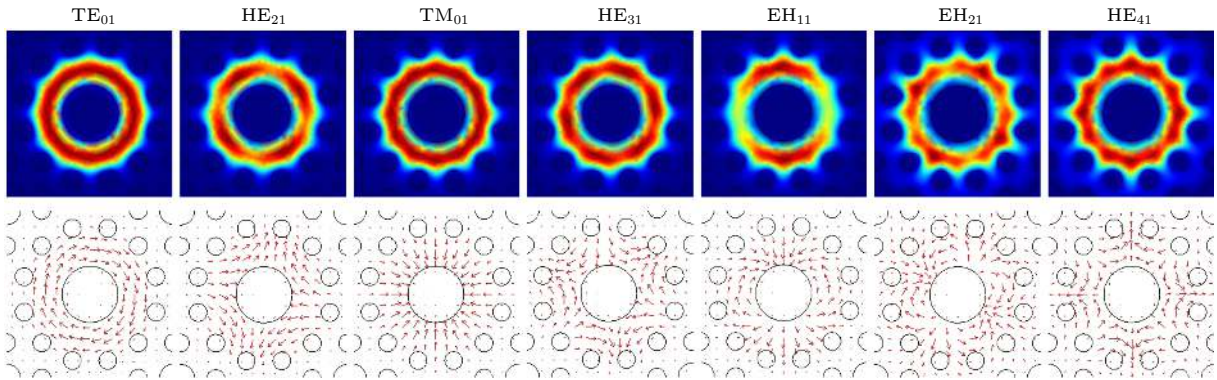


图 2 光子晶体光纤中涡旋光强度分布以及偏振分布

Fig. 2. Intensity and polarization of vortex beams in SPQCF.

图 3(a) 是各个模式间的有效折射率 (Δn_{eff}) 随波长的变化趋势; 图 3(b) 是各个模式间有效折射率差 (Δn_{eff}) 随波长的变化曲线图. 分析可得, 随着波长的增大, 模式的有效折射率减小, 有效折射率差增大, 因此波长越长, 越有利于模式的稳定传输. 对于高阶本征矢量模 (HE_{31} , EH_{11} ; HE_{41} , EH_{21}), 分别在 1000—1100 nm 和 1000—1300 nm 波段, 模式间有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} < 10^{-4}$, 因此并

没有实现有效分离, 不能支持涡旋光的传输. 但是在 1300—2000 nm 波段内, 各个相邻模式间有效折射率差均大于 10^{-4} , 因此, 能够在 700 nm 宽波段范围内实现涡旋光的传输.

3.2 光纤中涡旋光的传输特性

3.2.1 光纤的限制性损耗

对于光子晶体光纤而言, 限制性损耗是影响其

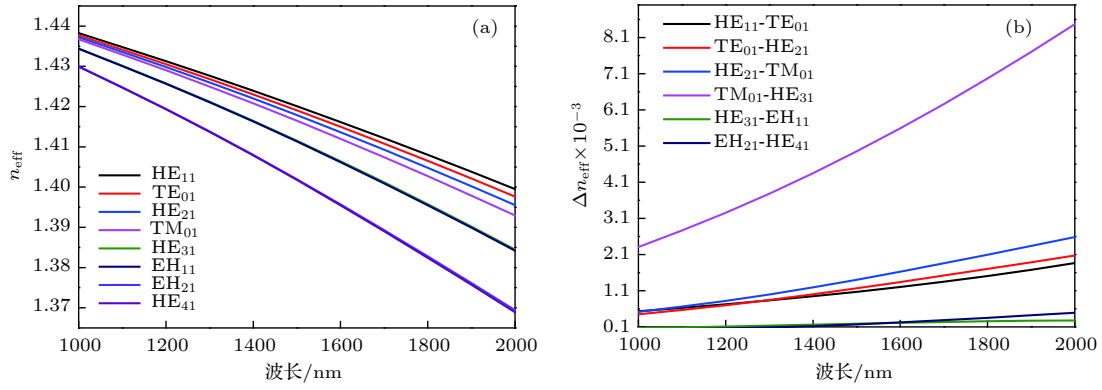


图 3 (a) 模式有效折射率 (n_{eff}); (b) 模式间有效折射率差 (Δn_{eff}) 随波长的变化曲线

Fig. 3. (a) Effective refractive indices; (b) effective index difference as a function of wavelength for vector modes in SPQCF.

传输性能的重要因素. 由于光子晶体光纤特殊的波导结构, 具有不同于普通光纤的损耗, 即限制性损耗. 其产生机理是由于空气孔大小的不同, 使纤芯对光的限制能力不同, 导致光波在光纤中传输时, 会有部分能量泄露到包层中. 光子晶体光纤中模式的限制性损耗公式为

$$CL = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) (\text{dB/m}), \quad (5)$$

其中 λ 为自由空间光波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率虚部, 代表光能量衰减参量.

以 HE₂₁ 模为例, 对其各项性能进行研究分析. 通过模拟计算, 分析了 1000—2000 nm 波段内, 光子晶体光纤限制性损耗随中心空气孔半径 r_0 的变化曲线, 如图 4 所示. 从图 4 中可以看到, 随着波长的增大, HE₂₁ 的限制性损耗增大; 当中心空气孔的半径变大时, HE₂₁ 模的限制性损耗也相应增大. 在波段 1500—1600 nm 内, 此光纤具有相当低的限制性损耗 (10^{-8} — 10^{-7} 量级), 因此在传输的过程中, 光能很好地局域在纤芯, 有效地抑制了限制性损耗对涡旋光传输的影响.

3.2.2 光纤的色散特性

光纤的色散公式为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (6)$$

D 为光纤模式的总色散系数, 包括材料色散系数和波导色散系数; c 为真空中的光速; $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率的实部. 图 5 所示为不同的中心空气孔半径下, HE₂₁ 模色散系数随波长 λ 的变化曲线. 从图 5 中可以看出, 随着中心空气孔半径 r_0 的改变, 能够实现特定波段的色散平坦趋势. 当中心空

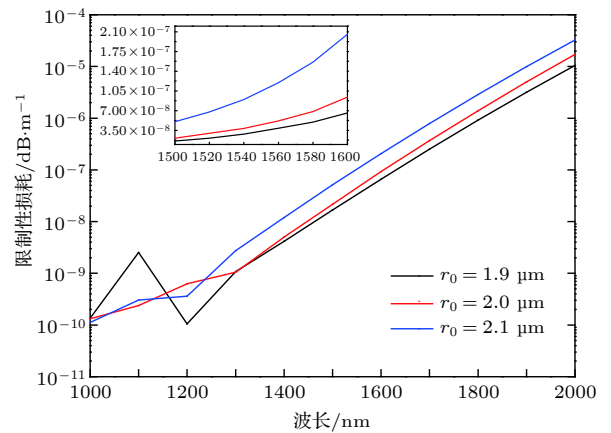


图 4 HE₂₁ 模的限制性损耗随波长的变化 (不同中心空气孔半径), 插图为 1500—1600 nm 波段内 HE₂₁ 模的限制性损耗

Fig. 4. Confinement loss as a function of wavelength for HE₂₁ mode with different r_0 , the inset shows the loss between 1500—1600 nm.

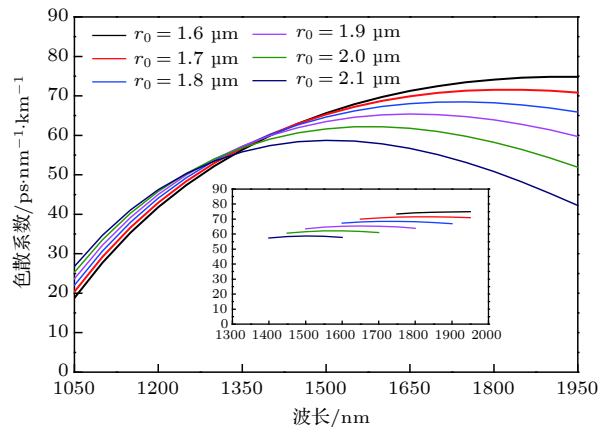


图 5 HE₂₁ 模色散系数随波长的变化 (不同中心空气孔半径), 插图为 r_0 对涡旋光平坦趋势的影响

Fig. 5. Dispersion as a function of wavelength for HE₂₁ with different r_0 , the inset shows the flat trend with different r_0 .

气孔为 1.9 μm 时, 光纤在 1500—1800 nm 波段保持色散平坦, 色散系数维持在 63.51—5.42 ps/(nm·km) 之间. 插图部分表示在不同中心空气孔半径下, 色散平坦趋势所对应的波段, 我们可以通过调节中心空气孔的大小, 对其色散平坦区域进行调节, 使光纤在特定波段实现色散平坦. 并且随着中心空气孔的增大, 色散平坦区域向短波段移动, 在光孤子传输方面具有潜在的应用.

3.2.3 光纤的模场面积和非线性特性

图 6(a) 表示不同中心空气孔半径下, HE_{21} 模模场面积随波长的变化, 模场面积表征光纤模式传输过程中实际的模场分布的大小,

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E^2| dx dy \right)^2}{\iint |E^4| dx dy}, \quad (7)$$

其中 E 表示光纤横截面上横向电场分量. 光子晶体光纤空气孔半径、孔间距以及空气孔排布的改变, 都会引起横向电场分量的变化, 从而造成模场面积的变化.

从图 6 可以得出, 随着波长的增大, HE_{21} 模的模场面积随之增大. 模场面积的增长曲率随着中心空气孔半径 r_0 的增大而增大. 在波长 1550 nm 处, 中心空气孔的变化对模场面积的影响甚微, $\Delta A_{\text{eff}} < 0.3 \mu\text{m}^2$ (ΔA_{eff} 表示当 r_0 改变 0.1 μm 时, 有效模场面积的变化量).

图 6(b) 表示在不同的光纤中心空气孔半径 r_0 下, HE_{21} 模的非线性系数随波长的变化. 光子晶体光纤非线性特性由非线性系数表征, 非线性系数的表达式为

$$\gamma = \frac{2\pi n_1}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

其中 A_{eff} 为光纤模式的模场面积, λ 为真空波长, n_1 为光纤基底材料的非线性折射率, 对于固定的光纤基底材料, 其非线性折射率是一定的. 当光纤的非线性系数很大时, 将会激发一系列的非线性效应, 阻碍光纤中涡旋光的稳定传输. 从图中分析可得, 随着波长的增大, HE_{21} 模的非线性系数减小, 非线性系数的变化曲率随中心空气孔半径的增大而减小. 由 (7) 式和 (8) 式可得 HE_{21} 模的有效模场面积和非线性系数呈倒数关系, 因此表现为图 6(a) 和图 6(b) 的变化趋势. 在所研究波段内, HE_{21} 模的非线性系数保持在 10^{-3} 量级内, 有利于光纤中

涡旋光的稳定传输. 在波长 1550 nm 处, $\Delta\gamma < 1 \times 10^{-4}$ ($\Delta\gamma$ 表示当 r_0 改变 0.1 μm 时, 非线性系数的变化量). 通过以上分析可以得到, 中心空气孔的变化对涡旋光模式的模场面积和非线性系数影响甚微, 因此降低了对光纤制作精度的要求.

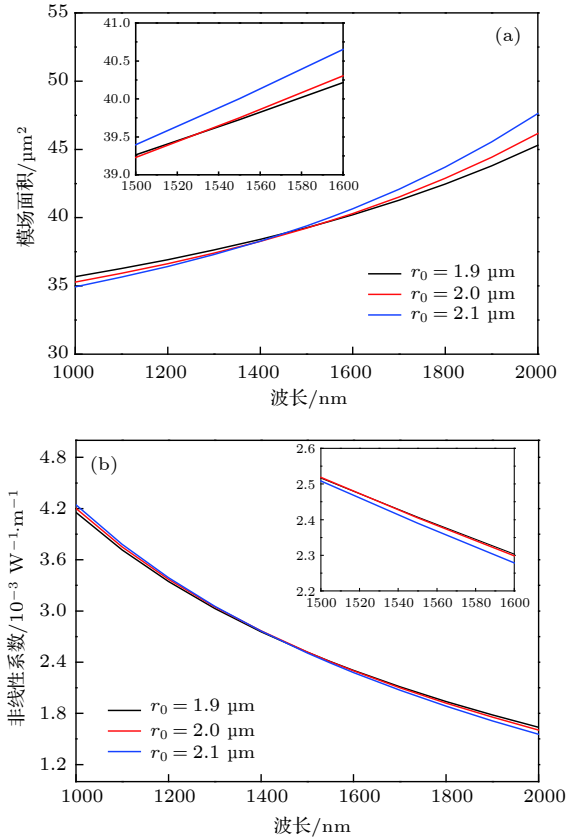


图 6 (a) HE_{21} 模的模场面积; (b) HE_{21} 模的非线性系数随波长的变化 (不同中心空气孔半径); (a), (b) 的插图分别为 波段内的模场面积和非线性系数

Fig. 6. (a) Effective mode area of HE_{21} , (b) nonlinear coefficient as a function of wavelength for HE_{21} mode with different r_0 , the inset shows the (a) effective modes area and (b) nonlinear coefficient between 1500–1600 nm.

3.2.4 涡旋光的稳定传输距离

涡旋光稳定传输的距离用 10 ps 走离长度 ($L_{10 \text{ ps}}$) 用来表征. $L_{10 \text{ ps}}$ 表示当两个本征矢量模具有 10 ps 的走离时差时 OAM 的传输长度. 对于一个 10 Gbit/s 的信号, $L_{10 \text{ ps}}$ 为一个比特长度 10%, 在实际信号探测中并不会影响到信号质量^[30]. 我们以这个参数来表征光纤信道传输的稳定性.

模式走离长度的公式为

$$L_{10 \text{ ps}} = \frac{c \times \Delta t}{n_{\text{HE}_{l,1}^{\text{even}}} - n_{\text{HE}_{l,1}^{\text{even}}}} = \frac{3 \times 10^{-3}}{n_{\text{HE}_{l,1}^{\text{even}}} - n_{\text{HE}_{l,1}^{\text{even}}}} (\text{m}), \quad (9)$$

其中 λ , c , Δt 分别为波长、真空中光速、走离时间.

图 7 表示光纤中不同本征模 10 ps 走离长度 $L_{10\text{ ps}}$ 随波长的变化. 对于光纤中涡旋光的稳定传输, 模式的 10 ps 走离长度越大, 其传输特性越好, 信号失真越小. 因此, 相比较而言, 由 HE_{21} 模组成的 $\text{OAM}_{1,1}$ 模的传输性能最好, 其保持信道稳定传输的距离大于 4.9 km. 但就全部的涡旋模式而言, 稳定的传输距离大于 1 km, 所以其整体的传输性能保持在很好的水平.

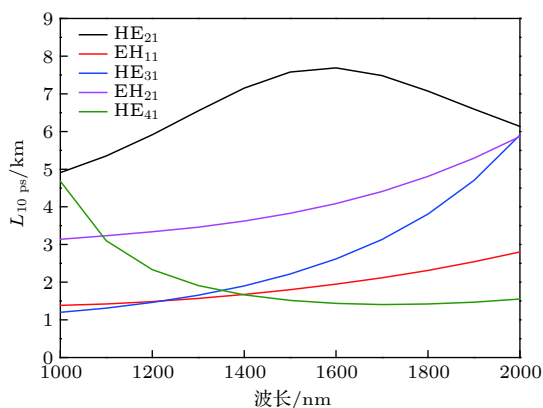


图 7 光纤中不同本征模的 $L_{10\text{ ps}}$ 随波长的变化

Fig. 7. $L_{10\text{ ps}}$ as a function of wavelength for vortex modes in SPQCF.

4 结 论

设计了新型的六重准晶涡旋光光子晶体光纤, 在模式分析的基础上, 以高阶模 HE_{21} 为例, 对其各个传输特性进行了深入分析. 通过数值模拟, 得到在通信波段 1500 nm 处, 本征模式间有效折射率差大于 10^{-4} , 能够支持 7 个本征矢量模 (10 个 OAM 模) 的稳定传输; 在 1500—1600 nm 波段内, 其限制性损耗处于 10^{-8} — 10^{-7} 量级. 通过调节中心空气孔的大小, 实现特定波段的色散平坦, 当中心空气孔为 1.9 μm 时, 光纤能够在 1500—1800 nm 波段保持色散平坦, 色散系数维持在 63.51 — $65.42\text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间. 同时, 在 1500—1600 nm 波段内, 其模场面积为 $40\ \mu\text{m}^2$, 非线性系数处于 10^{-3} 量级, 稳定传输的距离大于 1 km, 均有利于光纤中涡旋光的稳定传输. 光子晶体光纤的各项性能需要进一步的实验研究, 在实际生产中, 光子晶体光纤具备很成熟的制作工艺, 光纤拉制已

不成问题. 在光纤制作过程中, 因拉制工艺造成的光纤空气孔的膨胀或扭曲, 会对光纤的模式分离度以及传输特性产生一定的影响. 并且长距离光纤拉制工艺中的纵向均匀性, 以及与其他种类光纤的接续过程中因结构破坏而导致的损耗增大等问题也亟待解决. 但随着光子晶体光纤制作工艺的进一步发展, 以上问题有望得到突破, 六重准晶涡旋光光子晶体光纤将在光纤通信领域具有更大的应用价值.

参考文献

- [1] Ramachandran S, Kristensen P 2013 *Nanophotonics* **2** 455
- [2] Curtis J E, Grier D G 2003 *Opt. Lett.* **28** 872
- [3] Tabosa J W R, Petrov D V 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4967
- [4] Vaziri A, Pan J W, Jennewein T, Weihs G, Zeilinger A 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 227902
- [5] Brunet C, Rusch L A 2016 *Opt. Fiber Technol.* **31** 172
- [6] Wong K L G G, Xi X, Kang M S, Lee H W, Russell P 2012 *Science* **337** 446
- [7] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
- [8] Couillet P, Gil L, Rocca F 1989 *Opt. Commun.* **73** 403
- [9] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R, Woerdman J 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [10] McGloin D, Simpson N B, Padgett M J 1998 *Appl. Opt.* **37** 469
- [11] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F 2009 *Opt. Lett.* **34** 2525
- [12] Li S, Mo Q, Hu X, Du C, Wang J 2015 *Opt. Lett.* **40** 4376
- [13] Yan Y, Zhang L, Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Willner A E, Dolinar S J 2012 *Opt. Lett.* **37** 3294
- [14] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, LaRochelle S, Rusch L A 2014 *Opt. Express* **22** 26117
- [15] Brunet C, Ung B, Wang L, Messaddeq Y, LaRochelle S, Rusch L A 2015 *Opt. Express* **23** 10553
- [16] Li S, Wang J 2013 *IEEE Photon. J.* **5** 7101007
- [17] Li S, Wang J 2014 *Sci. Rep.* **4** 3853
- [18] Xia C, Bai N, Ozdur I, Zhou X, Li G 2011 *Opt. Express* **19** 16653
- [19] Li S, Wang J 2015 *Opt. Express* **23** 18736
- [20] Ung B, Vaity P, Wang L, Messaddeq Y, Rusch L, LaRochelle S 2014 *Opt. Express* **22** 18044
- [21] Zhang Z, Gan J, Heng X, Wu Y, Li Q, Qian Q, Chen D, Yang Z 2015 *Opt. Express* **23** 29331
- [22] Ferrando A, Silvestre E, Andres P, Miret J J, Andrés M V 2001 *Opt. Express* **9** 687
- [23] Yue Y, Zhang L, Yan Y, Ahmed N, Yang J Y, Huang H, Ren Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Opt. Lett.* **37** 1889
- [24] Zhao C, Gan X, Li P, Fang L, Han L, Tu L, Zhao J 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 1206
- [25] Zhang H, Zhang W, Xi L, Tang X, Zhang X, Zhang X 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 1426
- [26] Jin C, Cheng B, Man B, Li Z, Zhang D 2000 *Phys. Rev. B* **61** 10762
- [27] Jin C, Meng X, Cheng B, Li Z, Zhang D 2001 *Phys. Rev. B* **63** 195107

Transmission characteristics of vortex beams in a sixfold photonic quasi-crystal fiber*

Wei Wei Zhang Zhi-Ming Tang Li-Qin Ding Lei
Fan Wan-De Li Yi-Gang[†]

(*School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

(Received 17 March 2019; revised manuscript received 9 April 2019)

Abstract

In an optical fiber communication system, vortex beams have aroused great interest in the last several decades. Vortex beams possess many intriguing properties. For example, they have the ability to carry orbital angular momentum (OAM) which is mutually orthogonal. The OAM is a fundamental physical quantity of light which can be used as information carriers for transmission channel of optical fiber. Combined with the existing multiplexing techniques such as wavelength division multiplexing technique, advanced multilevel amplitude modulation formats, etc., the vortex beams provide an alternative to the increase of the transmission capacity and spectral efficiency of the optical fiber transmission system. Recently, long-length transmission of vortex-beam in optical fiber has been realized and there have also occurred some new designs of optical fiber on vortex beams, such as air-core ring shaped fiber, graded index vortex fiber, multi-ring fiber, and supermode fiber. Photonic crystal fiber (PCF) is flexible in design. Therefore, it is easy to regulate the transmission performance of PCF by adjusting the radius and the pitch of the air holes and so on. In this paper, we propose a newly designed sixfold photonic quasi-crystal fiber (SPQCF) to transmit vortex beams stably. Transmission characteristics of this newly designed fiber are simulated and calculated by using COMSOL multiphysics software. When the wavelength of the incident light is 1550 nm, the effective index difference between the vortex modes in a group is more than 10^{-4} which is large enough to preclude the LP modes from being formed, and to transmit 7 vector modes (10 OAM modes). Changing the radius and pitch of the air holes, we can regulate the dispersion characteristic and confinement loss of the SPQCF flexibly. At 1550 nm, the confinement loss of the SPQCF maintains 10^{-8} – 10^{-7} which is low enough to confine the vortex beams in the fiber core. When the incident light wavelength of HE_{21} ranges from 1500 nm to 1800 nm ($r_0 = 1.9 \mu\text{m}$), the dispersion coefficient of the SPQCF is between 63.51–65.42 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ which tends to be flat. By changing r_0 , the flat trend is adjusted to different wavelength range. This dispersion characteristic possesses great potential for the transmission of optical solitons. The effective mode area (HE_{21}) is about $40 \mu\text{m}^2$ and the nonlinear coefficient (HE_{21}) is maintained on the order of 10^{-3} between 1500–1600 nm. These features suppress the generation of nonlinear effect in the fiber and benefit the transmission of vortex beams. The stable transmission distance is longer than 1 km. In summary, we design a new type of PCF featuring quasi-crystal structure which has a ring shaped fiber core and supports the transmission of vortex beams stably.

Keywords: photonic quasi-crystal fiber, vortex beams, dispersion, confinement loss

PACS: 42.81.Bm, 42.81.Dp, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.68.20190381

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11474170) and the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 16JCYBJC16900).

[†] Corresponding author. E-mail: liyigang@nankai.edu.cn