

环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究

张羚翔 魏薇 张志明 廖文英 杨振国 范万德 李乙钢

Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber

Zhang Ling-Xiang Wei Wei Zhang Zhi-Ming Liao Wen-Ying Yang Zhen-Guo Fan Wan-De Li Yi-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 014205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.014205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型全固态准晶体结构大模场光纤特性研究

Investigation of a novel all-solid large-mode-area photonic quasi-crystal fiber

物理学报.2014, 63(3): 034206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034206>

高效率掺 Tm^{3+} 双包层光纤及光纤激光器的研制

Development of high efficiency Tm^{3+} -doped fiber and Tm^{3+} -doped fiber laser

物理学报.2014, 63(1): 014209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014209>

双包层掺 Bi 光纤的制备及其光谱特性研究

Preparation and spectral characteristics of Bi-doped double cladding fiber

物理学报.2012, 61(8): 084215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.084215>

亮孤子在宇称时间对称波导中的传输和控制

Transmission and control of bright solitons in parity-time symmetric waveguide

物理学报.2015, 64(6): 064211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064211>

耦合广义非线性薛定谔方程的相互作用表象龙格库塔算法及其误差分析

A fourth-order Runge-Kutta in the interaction picture algorithm for simulating coupled generalized nonlinear Schrödinger equation and its error analysis

物理学报.2013, 62(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154205>

环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究*

张羚翔 魏薇 张志明 廖文英 杨振国 范万德 李乙钢†

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2016年6月15日收到; 2016年9月26日收到修改稿)

由于涡旋光具有轨道角动量, 将它应用于光纤通信领域可以有效提高信息传输速率. 设计了一种环形光子晶体光纤, 利用 COMSOL Multiphysics 软件对其涡旋光 TE_{01} , HE_{21}^+ 和 TM_{01} 模式特性进行模拟计算, 它们之间有效折射率差分别为 4.59×10^{-4} 和 3.62×10^{-4} ; 其中, TE_{01} 模式的涡旋光在入射光波长范围为 1650—1950 nm 时, 色散值在 44.18 — $45.83 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间平坦; 入射光波长在 1550 nm 时, TE_{01} 模式的涡旋光的非线性系数为 $1.37 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 该结构的光子晶体光纤的涡旋光具有损耗小、色散平坦等特性, 对光纤中传输涡旋光、将涡旋光应用于超连续谱等方面的研究具有重要意义.

关键词: 光子晶体光纤, 涡旋光, 色散, 非线性系数

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

DOI: 10.7498/aps.66.014205

1 引言

随着现代通信的发展, 人们对传输信息的技术要求越来越高. 近年来, 光纤通信技术凭借传递信息量大、速度快的优点, 得到了越来越多的科研工作者的关注. 在光纤中, 涡旋光 (VB) 模式传输与现在常用的线偏振 (LP) 模式传输不同, 每一个传播常数携带两个正交的轨道角动量模式, 极大地提高了通信信道容量和频谱效率. 又由于光子晶体光纤其结构设计灵活、制作方便, 具有单模传输、大模场面积、损耗低、非线性、双折射和色散可调节等特性^[1], 与普通光纤相比较有着很大的差别, 因此利用光子晶体光纤传输涡旋光可以有效控制涡旋光的传输特性, 并且对光通信领域在提高信息传输效率等方面具有重要意义.

涡旋光是一种光束中心位置存在相位奇点, 并且奇点处光强为零的光, 光波相位围绕该奇点沿垂直于传播方向呈螺旋状分布, 具有轨道角动量. 1989年, Couillet 等^[2]首次提出“光学涡旋”; 1992年, Swatzlander 和 Law^[3]首次发现涡旋光孤子. 目前, 在空间中产生涡旋光的方法有很多, 如

利用厄米-高斯光束 (H-G 光束) 通过螺旋相位板、液晶空间光调制器、超材料或衍射相位全息片, 可以得到空间涡旋光^[4], 若将涡旋光应用于光纤中, 则会遇到涡旋光模式的有效分离和稳定传输等困难, 因此不能很好地应用于光纤通信领域.

2009年, Ramachandran 等^[5]设计了一种特殊的阶跃型折射率光纤 (又称涡旋光纤), 在长度为 100 m 的光纤中可以稳定地传输 TM_{01} 模式的涡旋光, 此外 Ramachandran 还将涡旋光纤应用到量子加密技术、模式分割多路技术等^[6]. 2012年, Wong 等^[7]将光子晶体光纤进行扭转, 通过调节光子晶体光纤的扭转率来控制涡旋光的色散、非线性等特性. 2012年, Willner 研究组^[8]利用 As_2S_3 作为空气孔光子晶体光纤的基底材料得到了 TE_{01} 模式涡旋光, 通过对其色散、非线性等特性的研究, 得到了 522 nm 展宽的色散平坦曲线, 并且入射光在 1550 nm 时, 非线性系数为 $11.7 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$. 从而得到 1196—2418 nm 之间的超连续光谱. 2014年, Ung 等^[9]设计了一种折射率分布为反抛物线型的光纤 (IPGIF), 其中涡旋光矢量模 TE_{01} , HE_{21}^+ 和 TM_{01} 在光纤传输中的有效折射率差在

* 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

2.15×10^{-4} 左右, 并且这几种模式可以稳定地在光纤中传输 1.1 km, 这给模分复用技术带来新的应用前景.

本文以二氧化硅为基底材料, 通过对大小孔层的优化设计, 构建了具有环形纤芯的光子晶体光纤 (PCF); 该光纤可实现对涡旋光模式的有效分离和稳定传输; 对涡旋光的色散、非线性和限制性损耗等传输特性进行了详细的理论分析研究, 并对其应用前景进行了展望.

2 光纤中的涡旋光

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矢量光束, 由径向矢量光束 TM_{01} 和角向矢量光束 TE_{01} 两种模式组成; 相对而言, 相位涡旋光又称轨道角动量 (OAM) 涡旋光, 携带着 lh 的动量 (l 为拓扑荷数, 若 $l = 1$ 时, 1 阶 OAM 涡旋光为 HE_{21}^{\pm} 两种模式的线性组合). 在阶跃型光纤中, 当不考虑偏振方向时, 通过光纤中横向场波动方程可以得到的标量近似解, 无法得到涡旋光模式的解; 而当波动方程中加入偏振方向时, 此时的光纤的波动方程称之为全矢量波动方程, 表示为^[10]

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

其中, \mathbf{e}_t 为横向电场强度, k 为自由空间波矢 ($k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长), β 为每一矢量模解的传播常数 (其所对应的矢量模有效折射率 $n_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{2\pi}\beta$), n 为波导的折射率. 在阶跃型光纤的波导理论中, 通过电磁场的全矢量波动方程、麦克斯韦方程组以及光纤的连续性条件可以得到光纤的本征方程以及模式解^[11], 当 $l = 1, m = 1$ 时, 其解为

$$\{\mathbf{e}_{t;1,1}\} = \left\{ \begin{array}{c} HE_{21}^+ \pm iHE_{21}^- \\ TM_{01} \\ TE_{01} \end{array} \right\}. \quad (2)$$

又根据波导理论以及 n_{eff} 和模式耦合之间的关系^[12], 为得到某一个稳定传输的涡旋光模式, 其必要的条件是使这个模式的涡旋光的有效折射率与其他模式的有效折射率差 Δn_{eff} 大于 10^{-4} . 若 Δn_{eff} 越大, 也就意味着越容易将光纤中涡旋光的某一个模式从其他模式中分离出来. 光子晶体光纤的优点在于其结构设计灵活, 可以优化 Δn_{eff} 的大小, 便于对涡旋光中的模式进行分离分析. 为了更好地了解涡旋光在光纤中的传输特性, 本文着重从 TE_{01} , HE_{21}^{\pm} 和 TM_{01} 模式的涡旋光入手, 并且对 TE_{01} 模式的涡旋光进行详细分析.

3 涡旋光在光子晶体光纤中的特性

3.1 光子晶体光纤的设计

环形光子晶体光纤截面结构如图 1 (a) 所示, 光纤的中心为实心结构, 基底材料为 SiO_2 , 内层由两层空气孔组成, 其半径 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$; 包层由四层空气孔组成, 其半径 $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, 孔间距为 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, 内层空气孔与包层空气孔间距为 2Λ . 图 1 (b) 为此光纤结构的折射率分布图, 内层空气孔和包层空气孔之间形成折射率较高的传导涡旋光的环形纤芯结构, 这种光子晶体光纤的设计有利于增大不同模式的光在光纤传播中模间的有效折射率差, 从而得到 TM_{01} , HE_{21}^{\pm} , TE_{01} 模式的涡旋光.

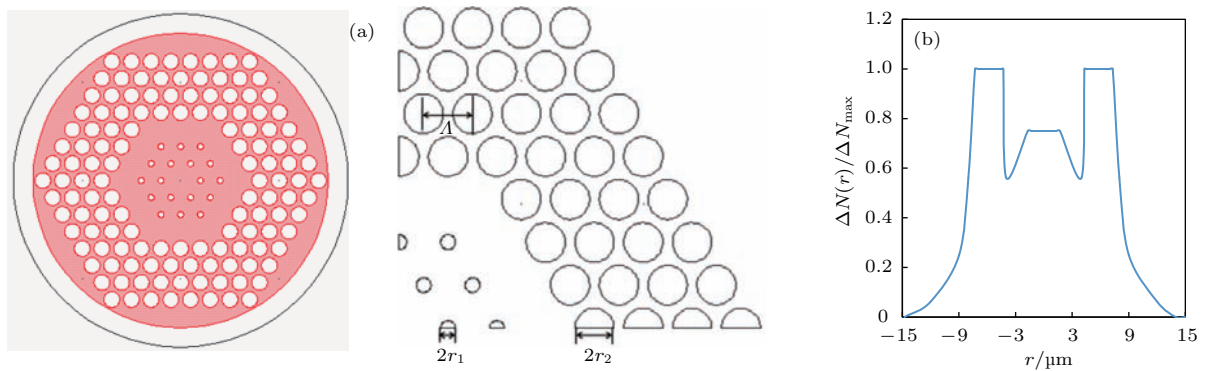


图 1 (网刊彩色) 环形光子晶体光纤 (a) 横截面图及四分之一横截面图; (b) 折射率分布图

Fig. 1. (color online) The ring photonic crystal fiber: (a) Cross-section of ring PCF and a quarter in cross section; (b) index profile.

使用基于有限元法的仿真软件COMSOL Multiphysics对光纤进行数值模拟计算, 得到各波长下每种模式的有效折射率曲线. TM_{01} , HE_{21}^{\pm} , TE_{01} 三种模式下的有效折射率对入射光波长的变化曲线如图2所示. 随着波长的增大, 三种模式的有效折射率都逐渐减小; 其中, 在入射光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时, TE_{01} 与 HE_{21}^{\pm} 的有效折射率差和 HE_{21}^{\pm} 与 TM_{01} 有效折射率差分别是 3.62×10^{-4} 和 4.59×10^{-4} , 其值均大于 10^{-4} , 因此可以认为这些涡旋模式的光能够在此光纤中稳定传输. 图3是 TM_{01} , HE_{21}^{\pm} 和 TE_{01} 三种模式下的光强分布图和偏振分布图. 从图中可以看出这三种模式的光在内层空气孔和包层空气孔之间环形纤芯中稳定传输, 并且均为中心处光强为零的涡旋光, 其中, TE_{01} 和 TM_{01} 为偏振涡旋光模式, HE_{21}^{\pm} 为相位涡旋光

模式.

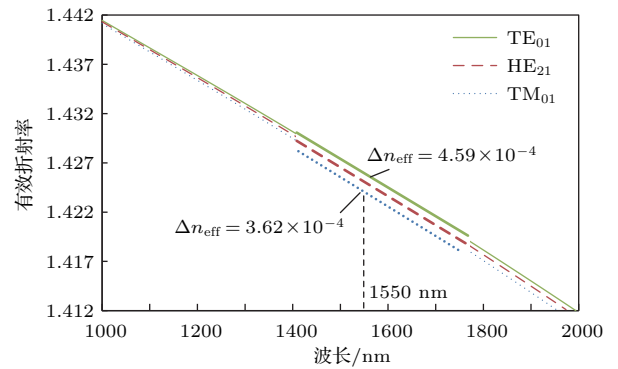


图2 (网刊彩色) TM_{01} , HE_{21}^{\pm} 和 TE_{01} 三种模式下的有效折射率对入射光波长 λ 的变化曲线

Fig. 2. (color online) Effective refractive indices as a function of wavelength for TM_{01} , HE_{21}^{\pm} and TE_{01} modes.

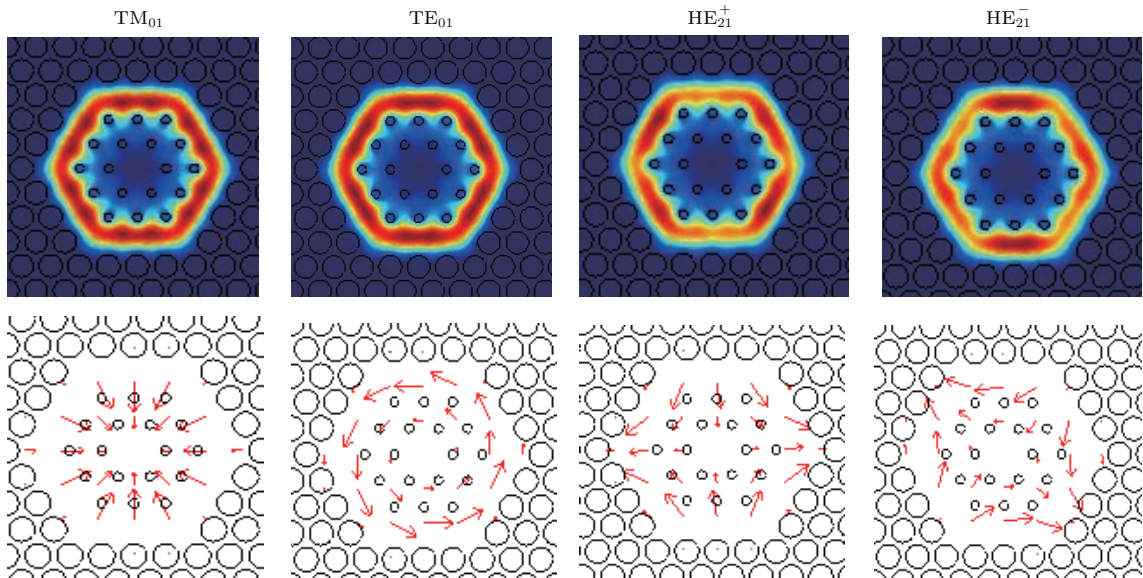


图3 (网刊彩色) TM_{01} , HE_{21}^{\pm} 和 TE_{01} 三种模式下的涡旋光及偏振分布

Fig. 3. (color online) Intensity and polarization of vortex modes (TM_{01} , HE_{21}^{\pm} , TE_{01}).

3.2 涡旋光在环形光子晶体光纤中的传输特性

光纤的总色散分为波导色散、材料色散、模间色散. 由于这种结构的光子晶体光纤涡旋光模式的有效折射率差大于 10^{-4} , 可以忽略模间色散, 因此在计算色散时, 只涉及波导色散和材料色散, 其表示为^[13]

$$D_{\text{总}} = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2}, \quad (3)$$

其中, c 为光在真空中的传播速度, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为矢量模的有效折射率的实部, λ 为波长. 图4(a)为通过

改变 r_1 的大小来优化光纤 TE_{01} 模式的色散传输特性曲线. 当 $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, 孔间距为 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, r_1 分别为 $0.3, 0.4$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 在同一入射光波长下, 随着内层孔半径 r_1 的增大, TE_{01} 模式的总色散值也随之增大, 在 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$ 时, 入射光波长 $1050\text{--}1950 \text{ nm}$ 范围内总色散值波动范围小于 $45 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$; 在 $r_1 = 0.4$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 色散值在波长为 $1750\text{--}2000 \text{ nm}$ 的区域内趋于平坦, 有利于在超连续谱等方面进行研究. 图4(b)为通过改变孔间距大小 Λ 来分析光纤的色散传输特性曲线. 在 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, Λ 分别为 $2.0, 2.1$

和 $2.2 \mu\text{m}$, 入射光波长小于 1400 nm 时, 随着孔间距 Λ 增大, 其色散值减小; 相反, 当入射光波长大于 1400 nm 时, 随着孔间距 Λ 的增大, 其色散值也随之增大. 此外, 光纤结构在 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.1 \mu\text{m}$ 时, 入射波波长在 1100 nm 附近出现了色散零值. 这种结构下的光子晶体光纤可应用于色散补偿、光孤子产生和传输等方面的研究.

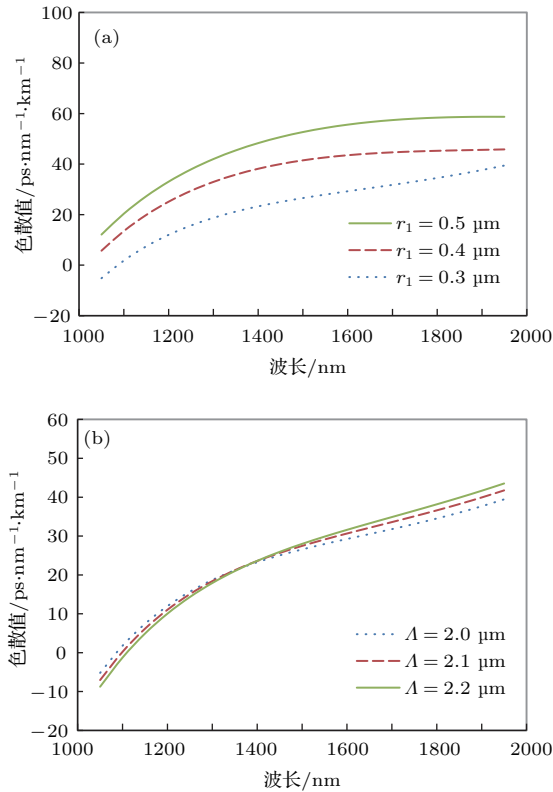


图4 (网刊彩色) TE_{01} 模式的色散值随波长 λ 的变化 (a) r_1 对光子晶体光纤的色散传输特性的影响; (b) Λ 对光子晶体光纤的色散传输特性的影响
Fig. 4. (color online) Dispersion as a function of wavelength for vortex mode (TE_{01}) with different: (a) r_1 ; (b) Λ of the ring PCF.

由于光子晶体光纤包层的空气孔数量有限, 光在纤芯中传导的过程中会在包层的空气孔之间的缝隙中逸出, 从而造成光子晶体光纤的传输损耗^[14]. 图5为 TE_{01} 模式的限制性损耗随波长的变化曲线. 如图5(a), 在 $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, r_1 分别为 $0.3, 0.4$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤结构下, 通过计算可以得出光纤 TE_{01} 模式的限制性损耗虽然有波动, 但是整体趋势是上升的. 同样地, 如图5(b), 在 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, Λ 分别为 $2.0, 2.1$ 和 $2.2 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤结构下, 限制性损耗曲线是上升的, 这表明随着入射光波长的增加, 光在包层中泄露的情况越来越明显. 由于 TE_{01}

模式的限制性损耗均在 10^{-8} 量级范围内, 因此可以看出这种结构的光纤在传输涡旋光时损耗较小, 为实验中涡旋光在光纤中的稳定传输奠定了基础.

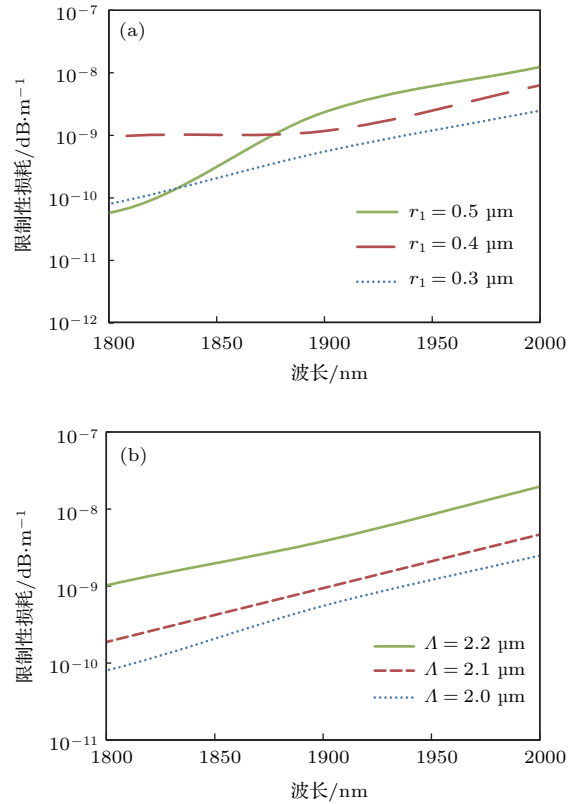


图5 (网刊彩色) TE_{01} 模式的限制性损耗随波长 λ 的变化曲线 (a) r_1 对光子晶体光纤的损耗传输特性的影响; (b) Λ 对光子晶体光纤的损耗传输特性的影响
Fig. 5. (color online) Confinement loss as a function of wavelength for vortex mode (TE_{01}) with different: (a) r_1 ; (b) Λ of the ring PCF.

光纤的非线性系数是由光纤的基底材料和模场面积决定的, 模场面积越小, 其非线性程度越大^[15]. 图6为 TE_{01} 模式的非线性系数随波长的变化曲线. 如图6(a)为在 $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, 孔间距为 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, r_1 分别为 $0.3, 0.4$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 这种光子晶体光纤 TE_{01} 模式的非线性系数随着波长的变化曲线. 随着波长的增大, TE_{01} 模式的非线性系数减小; 在同一入射光波长下, 随着空气孔 r_1 的增大, 其非线性系数变化曲线也随之上升. 图6(b)为在 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, Λ 分别在 $2.0, 2.1$ 和 $2.2 \mu\text{m}$ 时, 光子晶体光纤 TE_{01} 模式的非线性系数变化曲线. 可以看出在同一入射光波长下, 随着孔间距 Λ 的增大, 非线性系数逐渐减小; 并且这三条非线性系数变化曲线在长波长区域呈逐渐收敛状态. 除此之外, 这种结构的光子晶体光纤的非线性

系数在 10^{-3} 量级, 且长波非线性系数较小, 有利于涡旋光在光纤中传输.

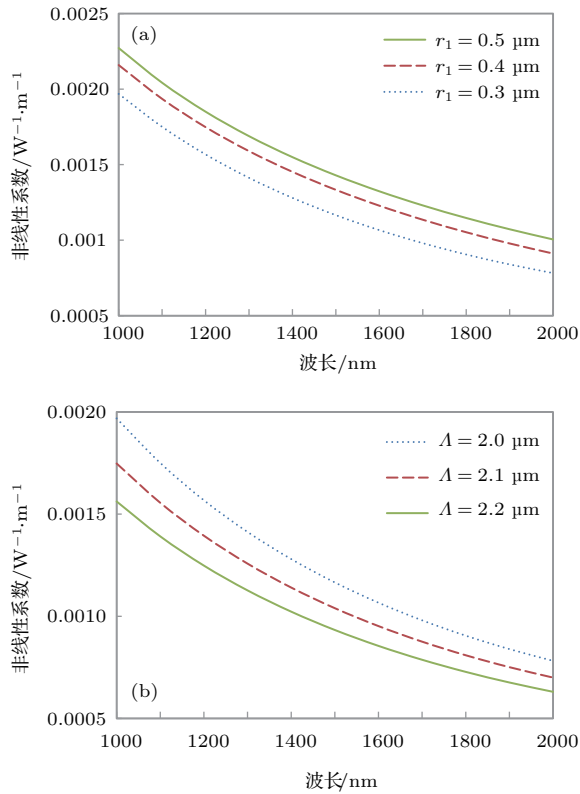


图6 (网刊彩色) TE_{01} 模式的非线性系数随波长 λ 的变化 (a) r_1 对光子晶体光纤的非线性传输特性的影响; (b) Λ 对光子晶体光纤的非线性传输特性的影响
Fig. 6. (color online) Nonlinear coefficient as a function of wavelength for vortex mode (TE_{01}) with different: (a) r_1 ; (b) Λ of the ring PCF.

4 结 论

将光子晶体结构和涡旋光模式应用于光纤中, 设计了一种具有环形纤芯光子晶体结构的涡旋光纤. 数值模拟研究表明: 这种光纤涡旋光模式(TE_{01} , HE_{21}^{\pm} , TM_{01})的有效折射率差大于 10^{-4} ; 光纤结构参量为 $r_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, 当入射光波长范围为 $1650\text{--}1950 \text{ nm}$ 时, TE_{01} 模式的涡旋光色散值在 $44.18\text{--}45.83 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间波动, 色散值趋于平坦. 光纤结构参量为 $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$, $r_2 = 0.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, 波长在 1550 nm 时,

TE_{01} 模式涡旋光的非线性系数为 $1.37 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 该结构的光子晶体光纤不仅可实现对涡旋光模式的有效分离和光纤中的稳定传输; 而且, 其所具有的损耗小和色散平坦等特性, 在将涡旋光应用于现代光通信领域的模分复用技术以及涡旋光超连续谱产生^[16]等方面具有重要意义.

参考文献

- [1] Jiang L H, Hou L T, Yang Q Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4726 (in Chinese) [姜凌红, 侯蓝田, 杨倩倩 2010 物理学报 **59** 4726]
- [2] Couillet P, Gil L, Rocca F 1989 *Opt. Commun.* **73** 403
- [3] Swartzlander G, Law C 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 2503
- [4] Hou J, Wang L B, Yang C Y, Chen S P 2014 *J. South-Central Univ. National. (Nat. Sci. Edition)* **33** 67 (in Chinese) [侯金, 王林波, 杨春勇, 陈少平 2014 中南民族大学学报(自然科学版) **33** 67]
- [5] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M 2009 *Opt. Lett.* **34** 2525
- [6] Ramachandran S, Kristensen P 2013 *Nanophotonics* **2** 455
- [7] Wong G, Kang M, Lee H, Biancalana F, Conti C, Weiss T, Russell P 2012 *Science* **337** 446
- [8] Yue Y, Zhang L, Yan Y, Ahmed N, Yang J, Huang H, Ren Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Opt. Lett.* **37** 1889
- [9] Ung B, Wan L, Brunet C, Vaity P, Jin C, Rusch L, Messaddeq Y, La Rochelle S 2014 *Optical Fiber Communication Conference San Francisco, USA, March 9–13, 2014*, pTu3K.4
- [10] Snyder A W, Love J D 1983 *Optical Waveguide Theory* (London: New York: Chapman and Hall) p239
- [11] Gloge D 1971 *Appl. Opt.* **10** 2252
- [12] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
- [13] Hou Y, Zhou G Y, Hou L T, Jiang L H 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1068 (in Chinese) [侯宇, 周桂耀, 侯蓝田, 姜凌红 2010 中国激光 **37** 1068]
- [14] Haxha S, Ademgil H 2008 *Opt. Commun.* **281** 278
- [15] Li J Y, Peng J G, Jiang Z W, Chen W, Li H Q, Luo W Y 2008 *Study Opt. Commun.* **4** 1 (in Chinese) [李进延, 彭景刚, 蒋作文, 陈伟, 李海清, 罗文勇 2008 光通信研究 **4** 1]
- [16] Yamamoto T, Kubota H, Kawanishiet S 2003 *Opt. Express* **11** 1537

Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber*

Zhang Ling-Xiang Wei Wei Zhang Zhi-Ming Liao Wen-Ying Yang Zhen-Guo
Fan Wan-De Li Yi-Gang[†]

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

(Received 15 June 2016; revised manuscript received 26 September 2016)

Abstract

In the last decade, the vortex beams have received lots of attention for their orbital angular momentum. When they are applied to optical fiber communication field, the data channels will increase and information propagation speed will be effectively improved. Recently, researchers have shown the capabilities of long length stably propagation, nonlinear frequency conversion and mode division multiplexing of vortex modes in a ring fiber. Due to the photonic crystal fiber (PCF) having very flexible design degrees of freedom, it will enable a wide range of propagation properties. In this paper, a SiO₂ air-hole ring PCF is proposed for separation and propagation of optical vortex modes. By using COMSOL Multiphysics software, the vortex modes (TE₀₁, HE₂₁[±] and TM₀₁) are simulated and calculated. The differences in effective refractive index between them are 4.59×10^{-4} and 3.62×10^{-4} respectively. One can analyze the propagation properties of vortex beams in the ring PCF by changing the size of first layer air hole radius and air hole pitch. When the incident light wavelength of TE₀₁ mode ranges from 1650 nm to 1950 nm, this ring PCF can achieve a total dispersion variation between 44.18 to 45.83 ps·nm⁻¹·km⁻¹, which is tend to be flat. When incident light wavelength is 1550 nm, the nonlinear coefficient of TE₀₁ mode vortex light is 1.37 W⁻¹·km⁻¹. Due to the fact that long wavelength light is easier to leakage through the cladding than the short wavelength light, the confinement loss increases with the wavelength. When incident light wavelength is 2000 nm, there is still an eight-orders-of-magnitude of the low confinement loss. Theoretically, flat dispersion and low loss vortex beams in this fiber can be beneficial to propagating stably, and the vortex modes lay the foundation for long distance propagation in the optical fiber. In the future, this ring PCF will be used in optical fiber communication field and applications in aspects such as continuous spectrum research, which can make it have immense advantage over traditional fibers.

Keywords: photonic crystal fiber, vortex beams, dispersion, nonlinear coefficient

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

DOI: 10.7498/aps.66.014205

* 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