

改进环光纤结构中轨道角动量模式特性分析

黄桂勇¹ 周守利^{1,2} 覃亚丽¹ 薛林林¹ 鄢曼¹¹浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023²中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要 提出了一种改进环光纤结构,在原环光纤中引入一高折射率层,利用模式重组效应,增大了轨道角动量模式之间的有效折射率差,减弱了模式间的简并现象。通过数值仿真,对该改进环光纤结构的参数进行了优化设计,最终实现了不同轨道角动量模式间约 10^{-3} 的有效折射率差,从而可以有效地抑制传输过程中的模间串扰,改善环光纤中轨道角动量模式的传输性能。

关键词 光纤光学; 轨道角动量; 环光纤; 有效折射率; 模式重组效应

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.080604

Modal Characteristics Analysis of Orbital Angular Momentum in a Modified Ring Fiber

Huang Guiyong¹ Zhou Shouli^{1,2} Qin Yali¹ Xue Linlin¹ Yan Man¹¹College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China²National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract A modified ring fiber by introducing a high refractive index layer is proposed. With the effect of mode reorganization, index differences between the orbital angular momentum (OAM) modes are enlarged, thereby reducing the degeneracy among OAM modes. Parameters of the modified ring fiber are designed properly by numerical simulations, and modal index difference of about 10^{-3} is achieved, which effectively minimizes the coupling between OAM modes and thus improves the transmission property of ring fiber.

Key words fiber optics; orbital angular momentum; ring fiber; effective refractive index; mode reorganization effect

OCIS codes 060.2280; 060.2330; 160.4760

1 引言

轨道角动量(OAM)光束具有螺旋型相位波前 $\exp(il\varphi)$, 其中 l 是拓扑荷, 它已经广泛应用在微机械系统的驱动、微观粒子的诱捕和操控、超高分辨率的显微成像、高维量子信息存储等领域^[1-3]。近年来, 不同拓扑荷的 OAM 模式所固有的空间正交性引起了人们的兴趣, 人们提出可将其作为载波应用到通信系统中以提高信道的传输容量^[4-7]。2013年, 美国南加州大学研究小组通过 OAM 复用在上 1 m 的自由空间距离上实现了 2.56 Tbit/s 的数据传输容量的实验^[6]; 同年, 美国波士顿大学研究小组利用光纤中 OAM 模式复用实现了 1.6 Tbit/s 数据容量传输的实验, 实验的传输距离为 1.1 km^[7]。

对于光纤中 OAM 模式的复用, 已有研究表明, 普通多模光纤并不适合作为 OAM 模式传输的载体^[8]。因为在普通多模光纤中, 矢量模式的简并现象非常严重, 高纯度的 OAM 模式很难被激励; 另外, 在传输的过程中, 不同 OAM 模式也很容易因外界环境的扰动而发生模间串扰。为此, 丹麦技术大学研究组提出了一种具有环形折射率分布的环光纤结构^[9-10], 该结构通过对圆环折射率和径向尺寸的特殊设计, 增大了不同 OAM

收稿日期: 2015-02-05; 收到修改稿日期: 2015-03-05; 网络出版日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(61405178)、安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室开放基金(OEIAM201410)、中国博士后科学基金第 54 批面上—一等资助项目(2013M540147)

作者简介: 黄桂勇(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究。E-mail: 1013459488@qq.com

导师简介: 薛林林(1986—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感、光器件仿真、光纤通信方面的研究。

E-mail: xuelinl@zjut.edu.cn(通信联系人)

模式间的有效折射率差,从而有效地减弱了矢量模式间的简并现象,减小了传输过程中 OAM 模式的模间串扰,使 OAM 模式的长距离传输成为可能;同时该光纤结构通过控制圆环的径向尺寸使环内模式保持为径向单模状态,解决了高纯度 OAM 模式激励困难的问题;另外,环光纤具有圆对称的折射率分布,制造相对简单,可低成本批量加工,因此可作为未来光纤通信领域比较理想的信息载体^[8]。但是,目前该环光纤的设计优化是单纯地依靠增大圆环内外的折射率差来减弱矢量模式间的简并,所达到的效果较为有限,目前可达到的相邻 OAM 模式间的有效折射率差为约 10^{-4} ^[9];而对于光纤中 OAM 模式的传输,不同模式间的有效折射率差越大,模式间的简并现象越弱,传输的稳定性越高。另外,在环光纤结构中,圆环高折射率的实现需要借助高掺杂浓度的材料,这也导致了传输损耗的增大^[11]。

在环光纤的基础上,本文提出了一种改进结构,在原环光纤中引入一高折射率层,利用由此产生的模式重组效应,进一步增大 OAM 模式之间的有效折射率差,从而有效地抑制模间串扰,优化环光纤结构的传输性能。最后,通过数值仿真对引入的高折射率层参数进行了优化设计。

2 改进环光纤结构

图 1(a)为环光纤结构^[9-10],图 1(b)为改进环光纤结构的示意图,其中 n_1 表示包层和芯层的折射率, n_2 、 n_3 分别为传输层和高折射率层的折射率。 R_n ($n=1, 2, 3, 4$) 为每一层到纤芯的距离。为了便于表示每层的厚度,用 R_{n0} ($n=1, 2, 3, 4$) 依次表示芯层、传输层、高折射率层和包层的厚度。

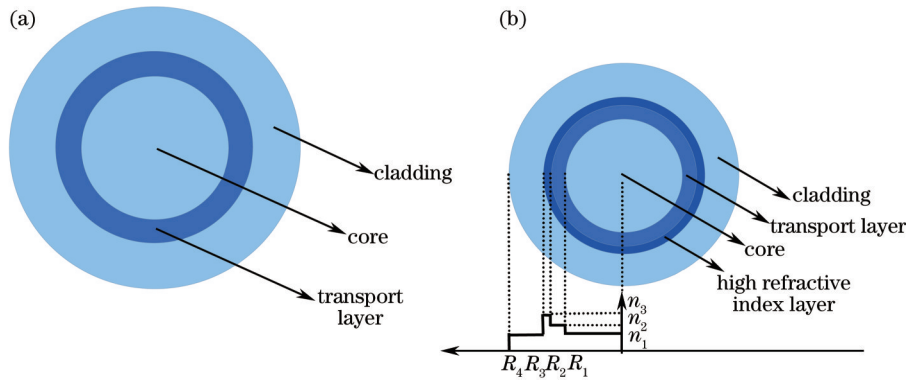


图 1 环光纤和改进环光纤结构的横截面示意图

Fig.1 Cross section sketches of ring fiber and modified one

3 数值仿真和分析

3.1 光纤中 OAM 模式的描述

光纤中的 OAM 模式可表达为光纤中同阶矢量模的奇模和偶模的叠加^[10]:

$$\begin{aligned} \text{HE}_{mn}^{\pm} &= \text{HE}_{mn}^{\circ} \pm j\text{HE}_{mn}^{\circ} \approx F_{m-1,n}(\hat{x} \pm j\hat{y})\exp[\pm j(m-1)\varphi] \\ \text{EH}_{mn}^{\pm} &= \text{EH}_{mn}^{\circ} \pm j\text{EH}_{mn}^{\circ} \approx F_{m+1,n}(\hat{x} \mp j\hat{y})\exp[\pm j(m+1)\varphi], \\ V_{0n}^{\pm} &= \text{TM}_{0n} \pm j\text{TE}_{0n} \approx F_{1,n}(\hat{x} \pm j\hat{y})\exp(\mp j\varphi), (m > 1) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 HE_{mn}° 和 EH_{mn}° 分别为 HE 和 EH 模式的奇模和偶模, $F_{m,n}$ 为相应标量模的径向场分布。由(1)式可以看出, HE_{mn}^{\pm} 模式具有螺旋形相位波前,其拓扑荷为 $|m-1|$,记为 $\text{OAM}_{\text{HE}_{mn}}$; EH_{mn}^{\pm} 模式的拓扑荷为 $|m+1|$,记为 $\text{OAM}_{\text{EH}_{mn}}$ 。

由于改进环光纤中高折射率层的引入,在仿真过程中,采用高阶全矢量频域有限差分算法对环光纤中的 OAM 模式进行求解^[12],以保证解的精度,在此基础上对改进环光纤结构中 OAM 模式的特性进行分析。

3.2 数值仿真与分析

在改进环光纤结构中,由于引入的高折射率层的折射率较传输层高,因此传输层中的 OAM 模式场会被牵引至高折射率层中;且随着高折射率层厚度的增加,各个模式的有效折射率也会增大;当高折射率层的厚度增加至一特定值时,各高阶模会转变为相邻的低阶模,新的模式有效折射率分布将覆盖未加高折射率层时各模式有效折射率的初始分布,新的模式场分布将覆盖未加高折射率层时各模式的场分布,该过程就是模式重组过程^[13]。

图2给出了 $OAM_{HE_{31}}$ 模式在光纤中的径向场分布 $|E_r|$ 随高折射率层厚度变化的关系曲线。仿真所采用的光纤参数为 $R_{10}=4\ \mu\text{m}$, $R_{20}=1\ \mu\text{m}$, $R_{40}=24\ \mu\text{m}$, R_{30} 为高折射率层的厚度。芯层和包层的折射率 n_1 为 1.444, 传输层的折射率 n_2 为 1.494, 高折射率涂层的折射率 n_3 为 1.6, 工作波长为 1550 nm。从图中可看出, 当 $R_{30}=0$ 时, 径向场的峰值出现在距离纤芯大约 $4.4\ \mu\text{m}$ 处, 此时能量主要集中在传输层中; 随着高折射率层厚度的增加, $OAM_{HE_{31}}$ 模式的场不断向外被牵引至高折射率层中; 当 $R_{30}=0.7\ \mu\text{m}$ 时, 径向场强的峰值出现在距离纤芯大约 $5.2\ \mu\text{m}$ 处, 此时能量主要集中在高折射率层中。

图3给出了各个模式的有效折射率 N_{eff} 随高折射率层厚度变化的关系曲线, 当高折射率层厚度在一定范围内增大时, 由于模式重组效应, 各阶模式的有效折射率也随之增大。其中 EH_{11} 和 HE_{31} 、 EH_{21} 和 HE_{41} 、 EH_{31} 和 HE_{51} 是三组简并的模式对。从图3中可以看出, 一方面, 随着高折射率层厚度的增加, 三组模式对的有效折射率差越来越大; 另一方面, 当高折射率层厚度增加时, 由于各个模式的有效折射率增大速度不同, 原先两个非简并模式的有效折射率不断接近, 如图3中的 EH_{11} 和 HE_{41} 所示。从这两个模式所对应曲线的变化趋势看, 它们随着高折射率层厚度的增加最终会变为简并的模式, 这也是模式重组效应的自然结果^[13]。因此在高折射率层参数的优化设计中, 不能一味地增大其厚度进而增大原简并模式对之间的有效折射率差, 还要兼顾非简并模式的情况。图4给出四组模式对之间有效折射率差 ΔN_{eff} 随高折射率层厚度的变化曲线, 其中三条上升的曲线对应于原简并模式对之间的有效折射率差, 而下降曲线对应于原非简并模式对之间的有效折射率差。

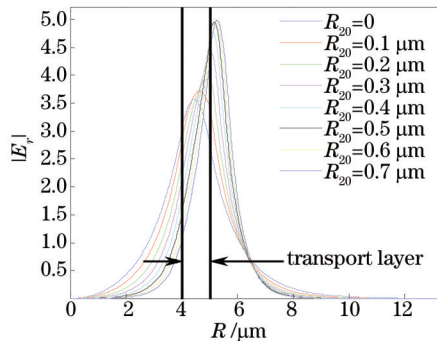


图2 光纤中 $OAM_{HE_{31}}$ 模式的径向场分布 $|E_r|$ 与高折射率层厚度的关系曲线

Fig.2 Amplitudes of radial electric fields $|E_r|$ of $OAM_{HE_{31}}$ mode for different high refractive index layer thicknesses

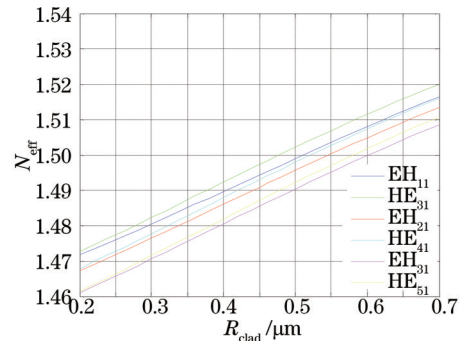


图3 各个模式的有效折射率与高折射率层厚度的关系曲线

Fig.3 Variations of effective refractive index of OAM modes with thickness of high refractive index layer

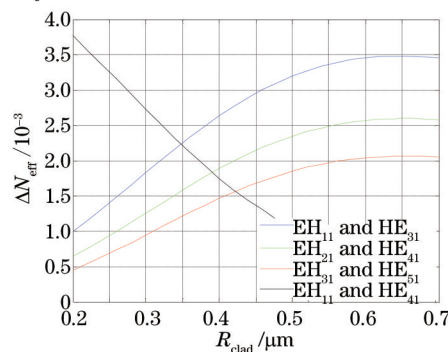


图4 模式对之间的有效折射率差与高折射率层厚度的关系曲线

Fig.4 Effective refractive index difference of OAM modes as a function of high refractive index layer thickness

根据以上仿真结果, 在选取高折射率层厚度时, 应主要考虑两点:

1) 既要让原简并模式之间的有效折射率差尽可能大, 同时也要兼顾原非简并模式之间的有效折射率差, 进行折衷选择。由图4可以看出, 在曲线的交点附近 ($0.35\sim 0.42\ \mu\text{m}$), 各模式间的有效折射率差较为均匀, 可以作为高折射率层厚度的理想选择。表1给出了 $0.42\ \mu\text{m}$ 厚度附近不同模式有效折射率差的数值计算结果。

表1 图4曲线交点处的有效折射率差

Tabel 1 Effective refractive index difference of OAM modes at intersection points of Fig.4

$R_{30}/\mu\text{m}$	0.422	0.423	0.424	0.425
$\Delta N_{\text{eff}}(\text{EH}_{31} \& \text{HE}_{51})$	1.563×10^{-3}	1.567×10^{-3}	1.573×10^{-3}	1.577×10^{-3}
$\Delta N_{\text{eff}}(\text{EH}_{11} \& \text{HE}_{41})$	1.467×10^{-3}	1.560×10^{-3}	1.552×10^{-3}	1.544×10^{-3}

2) 在选择高折射率层厚度时,还要考虑模式的损耗问题。由图2可知,随着高折射率层厚度的增加,OAM模式能量的峰值逐渐由传输层迁移至高折射率层。而高折射率层的材料掺杂浓度非常高,信号在其中传输会导致较大的损耗。因此,在优化环光纤结构参数的过程中,要尽量将能量束缚在传输层中。

综合以上两个因素,高折射率层的厚度最终选择为 $0.40 \mu\text{m}$ 。

表2列出了原环光纤结构和改进环光纤结构中,原简并模式之间的有效折射率差。可看到相对原环形结构,改进的结构中有效折射率差提高了一个数量级,可以有效地减弱模式间的简并现象,又可以从某种程度上降低模式的传输损耗。

表2 普通光纤、环光纤以及改进环光纤中原简并模式之间的有效折射率差对比

Tabel 2 Comparisons of effective refractive index difference for normal fiber, ring fiber and modified ring fiber

Mode name	$\Delta N_{\text{eff,normal}}$	$\Delta N_{\text{eff,old}}$	$\Delta N_{\text{eff,new}}$
EH_{11} and HE_{31}	9.0×10^{-7}	1.6×10^{-4}	2.6×10^{-3}
EH_{21} and HE_{41}	2.0×10^{-6}	1.1×10^{-4}	1.9×10^{-3}
EH_{31} and HE_{51}	3.8×10^{-6}	8.0×10^{-5}	1.5×10^{-3}
EH_{41} and HE_{61}	6.4×10^{-6}	1.8×10^{-5}	1.2×10^{-3}

4 结 论

提出了一种改进的环光纤结构,并通过仿真分析对该结构参数进行了优化设计,有效地增大了OAM模式间的有效折射率差,改善了环光纤中OAM模式的传输性能。另外,该结构减弱了传输层对高折射率材料的依赖,有望解决目前环光纤传输损耗大的问题;该结构保留了原环光纤所具有的圆对称的折射率分布,制造相对简单,可低成本批量生产。

参 考 文 献

- 1 S Furhapter, A Jesacher, S Bernet, *et al.*. Spiral phase contrast imaging in microscopy[J]. *Opt Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- 2 David G Grier. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- 3 A Mair, A Vaziri, G Weihs, *et al.*. Entanglement of orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- 4 A E Willner, J Wang, H Huang. A different angle on light communications[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 655-656.
- 5 S Ramachandran, N Bozinovic, P Gregg, *et al.*. Optics vortices in fibers: a new degree of freedom for mode multiplexing[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012, Tu.3.F: Tu.3.F.3.
- 6 J Wang, J Y Yang, I M Fazal, *et al.*. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 488-496.
- 7 N Bozinovic, Y Yue, Y X Ren, *et al.*. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- 8 Y Yue, Y Yan, N Ahmed, *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.
- 9 S Ramachandran, P Kristensen, M F Yan. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16): 2525-2527.
- 10 N Bozinovic, S Golowich, P Kristensen, *et al.*. Control of orbital angular momentum of light with optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2541-2543.
- 11 Shuhui Li, Jian Wang. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings×22 modes)[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3853.
- 12 Y C Lu, L Yang, W P Huang, *et al.*. Improved full-vector finite-difference complex mode solver for optical waveguides of circular symmetry[J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(13): 1868-1876.
- 13 I D Villar, I Matias, F Arregui, *et al.*. Optimization of sensitivity in long period fiber gratings with overlay deposition[J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 56-69.

栏目编辑:殷建芳