

天文光纤模式转换器的研究

朱晓亮^{1,2} 孙伟民¹ 闫 奇¹

(¹ 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001
² 浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 介绍了一种特殊的天文光纤模式转换器,称之为光纤刷。研究了这种天文光纤模式转换器的制作技术及各纤芯之间的耦合特性。由于天文成像低色散的要求,研究了这种光纤刷的超模耦合特性,并且为了比较不同超模的发散情况,分别计算了光纤刷的近场超模和远场超模。通过远场超模发散半径的比较,发现同相超模具有最小的发散角和最好的光束质量。研究结果对类似光纤模式转换器件的研究具有启发意义。

关键词 光纤光学;天文;模式转换器;光纤刷;耦合;超模

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s106003

Investigation of Astronomical Fiber Mode Converter

Zhu Xiaoliang^{1,2} Sun Weimin¹ Yan Qi¹

(¹ Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China
² College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract A special kind of astronomical fiber device which is called as optical fiber brush is introduced. Its fabricating technique and the supermode coupling characteristics are investigated. Due to the low dispersion of astronomical imaging, the supermode coupling characteristic of the optical fiber brush is studied. In order to investigate and compare the divergence angle of different supermodes, near-field and far-field distributions of them are also calculated. Comparing with the far-field mode radius, it's found that the in-phase supermode has the least divergence angle and the best beam quality. The research result can be helpful to investigate similar fiber mode converters.

Key words fiber optics; astronomical; mode converter; optical fiber brush; coupling; supermode

OCIS codes 060.2330; 060.2400; 130.1750; 230.1150

1 引 言

光纤在天文光学中常用于捕捉星象并将其传给光纤光谱仪。2008年10月落成的大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST望远镜)是我国目前最大的光学望远镜和世界最大口径的大视场望远镜。LAMOST望远镜利用4000根大口径光纤将收集到的微弱光信号传输到16台光纤光谱仪中。如何获得低色散、高质量的光模式是天文光纤器件成功的关键。

光纤具有重量轻、损耗低和抗电磁干扰等优点,

自问世之日起迅速受到人们的关注^[1-5]。其中多芯光纤具有高集成和高耦合光功率的特点,多芯光纤在天文学领域也受到了各国学者的关注^[6-7]。

由于光纤光谱仪输入插口为狭窄长条形缝隙,因此在天文光学中多芯光纤收集到的星象光场不能直接传输到光纤光谱仪中,光纤刷(OFB)的提出正是为了解决这一问题而制作的一种光场模式转换器。本课题组设计的OFB使得任意种类的多芯光纤都可以与OFB光入射端各纤芯直接连接,并以长条形光场出射,因此可以轻易地与光纤光谱仪连接。

收稿日期: 2013-10-15; **收到修改稿日期**: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61307005,01331114)、浙江省教育厅科研项目(Y201223669)

作者简介: 朱晓亮(1981—),女,博士,讲师,主要从事光纤通信、集成光学等方面的研究。

E-mail: zhuxiaoliang@mail.zjgsu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

本文介绍了一种简单有效的 7 芯 OFB 的制作技术,并对各纤芯之间的耦合特性进行了研究。为了改善 OFB 的光束质量,研究了这种光纤刷的超模耦合特性,并且计算了光纤刷的近场超模分布和远场超模分布。通过远场超模发散半径的比较,发现当 OFB 中各纤芯靠得足够近时,OFB 产生的各超模取决于相邻纤芯之间倏逝波耦合产生的相对相位差,其中同相超模具有最小的发散角和最好的光束质量。

2 光纤刷的制作技术

采用一种简单有效的方法,成功地制作了 7 芯光纤刷。所设计的理想光纤刷结构如图 1 所示,在同一个包层中有多个具有相同折射率、相同半径的纤芯排列成线性阵列。

为了使得制作的 OFB 满足上述要求,将一种大芯径塑料包层石英芯光纤浸入丙酮溶液,其包层可以完全溶于丙酮溶液,而石英纤芯完好无损。用这种方法可以得到折射率、半径等各参数均相同的纤

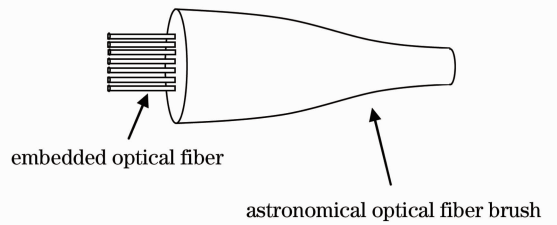


图 1 光纤刷的结构

Fig. 1 Structure of optical fiber brush

芯。将得到的石英纤芯嵌入到光子晶体光纤预制棒的空气孔中,将这种复合光纤预制棒熔融拉制成 OFB。拉制过程中 OFB 截面图如图 2(a)所示,侧面图如图 2(b)所示。在拉制过程中使用气泵避免 OFB 的纤芯和包层之间形成气泡,拉制成功的 OFB 截面图如图 2(c)所示。由图 2(a)和图 2(c)可见各纤芯在熔融拉锥过程中呈长方形形状,这是由于在实际操作中对熔融拉锥速度和温度不能完美地控制,使得复合光纤预制棒的空气孔塌缩时其内各纤芯受挤压程度不同而造成的。

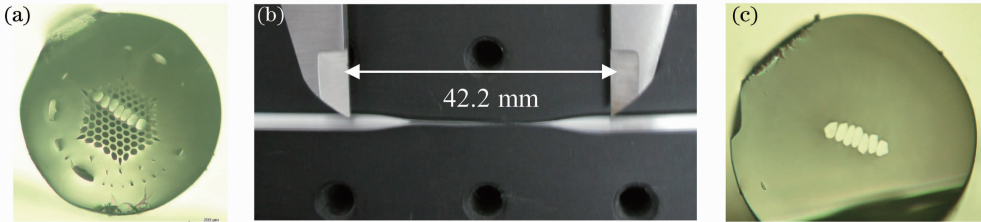


图 2 光纤刷的制作。(a)拉锥过程中 OFB 截面图;(b)光纤锥形状;(c) OFB 截面图

Fig. 2 Fabrication of OFB. (a) Cross section of OFB while heating and tapering; (b) shape of the taper; (c) cross section of OFB

实验所用 7 芯 OFB 如图 2(c)所示,各纤芯物理参数相同,纤芯半径 $r=3.5 \mu\text{m}$,相邻两纤芯间距离 $d=7.5 \mu\text{m}$,任意相邻两纤芯间传播常数相同、耦合系数相同。纤芯及包层折射率分别为 $n_1=1.460$ 和 $n_2=1.4572$ 。在入射光波长 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ 的条件下,此 OFB 各纤芯仅支持单模。由于 OFB 锥区结构及形状变化足够缓慢,因此在 OFB 各纤芯中存在的主要是纤芯导模,仅有少量的光变为泄露模由锥区辐射损失。因此可以使用导模理论建立一个简化的模型对 OFB 中各纤芯的耦合进行分析。

3 光场特性分析

由于在一阶近似的条件下,7 芯 OFB 非相邻纤芯间耦合远小于相邻纤芯间的耦合,因此作为近似,只考虑相邻两纤芯间的耦合。下面将以 7 芯 OFB 中央纤芯受到激励后各纤芯耦合光功率情况为例,对 OFB 各纤芯间倏逝波耦合进行说明。设初始激

光从中央纤芯入射且入射光功率为 1,根据耦合模理论及模场叠加理论^[8],7 芯 OFB 从左至右各纤芯入射光功率分别为 0,0,0,1,0,0,0。各纤芯的耦合效率可由耦合模方程计算得到^[9],如图 3 所示。由

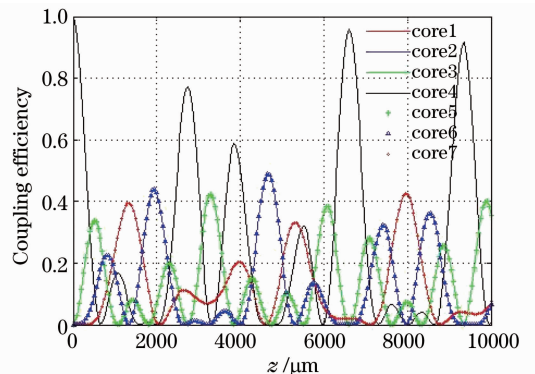


图 3 光纤刷各纤芯耦合效率

Fig. 3 Coupling efficiencies of fiber cores in optical fiber brush

图可见,光从中央纤芯入射后,由于各纤芯靠的足够近,倏逝波耦合作用使光功率迅速耦合进入其他各纤芯中,且左右纤芯光功率以中央纤芯为参照对称相等。这与 OFB 的结构和入射光功率条件所预期产生的结果是一致的。

此外,7 芯 OFB 输出光场强度分布为各超模线性叠加构成的混合模,模场强度与各纤芯初始入射光功率及传输长度 z 有关。依然设 7 芯 OFB 各纤芯入射光功率分别为 $0, 0, 0, 1, 0, 0, 0$, 在此初始条件下,求解耦合模方程特征值及特征向量^[9]。基于超模的线性叠加理论,超模的振幅分布为^[10]

$$\psi^v(x, y, z) = \left[\sum_m \phi_m^v \psi_m(x, y) \right] \exp(\lambda_v z), \quad (1)$$

式中 $\psi^v(x, y, z)$ 为第 v 个超模的振幅, ϕ_m^v 表示本征矢 ψ^v 的第 m 个分量, λ_v 为耦合模方程的第 v 个本征值。 $E_m(x, y)$ 为第 m 个纤芯的横向场分布, 其表达式为

$$\psi(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right) M, \quad (2)$$

式中 ω_0 为模场半径。

由(1)式可知,在 7 芯 OFB 折射率确定的情况下,各超模强度分布仅与芯间距有关,而与传输长度 z 无关。将(2)式代入(1)式计算可得 7 芯 OFB 超模场如图 4 所示,各模式用整数 v 标记,其中 $v=4$ 的超模为同相超模(所有纤芯同相位)。

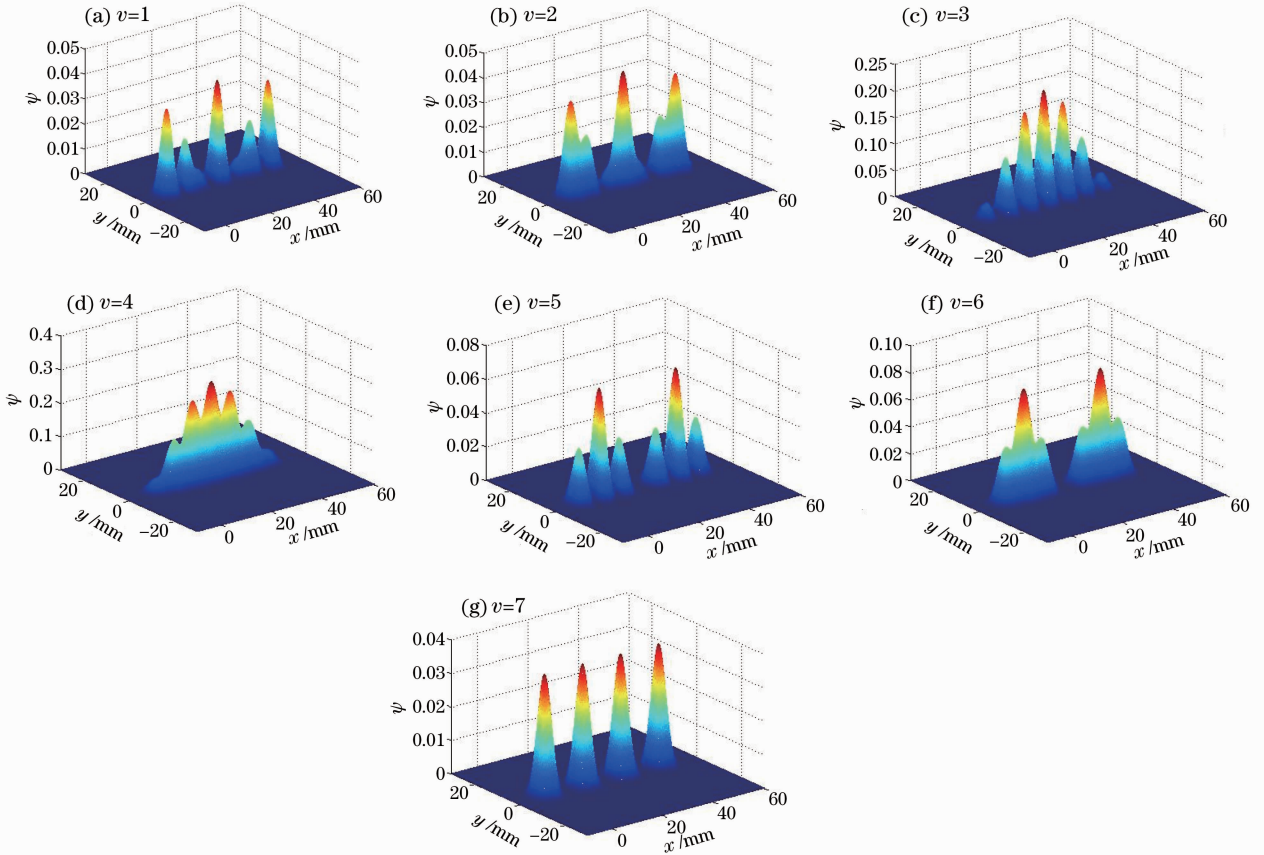


图 4 OFB 的 7 个超模场分布

Fig. 4 7 supermodes' intensity distributions of OFB

4 超模质量对比

通过第 3 节各超模近场强度分布的计算,利用柯林斯公式可对其远场强度分布进行计算,在传输距离 l 处各超模复振幅分布为

$$\psi_l^v(x_l, y_l, l) = \frac{\exp(-jk l)}{j\lambda l} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E^v(x_0, y_0, z_0) \exp\left\{\frac{-jk}{2l} [(x - x_l)^2 + (y - y_l)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (3)$$

式中 x_0, y_0, z_0 为光纤输出端位置坐标, x_l, y_l 分别为出射光传输 $z = l$ 处光场横向位置坐标, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。当 $l = 75 \mu\text{m}$ 时计算所得模序数分别为 $v=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 的超模远场强度分布如图 5 所示。

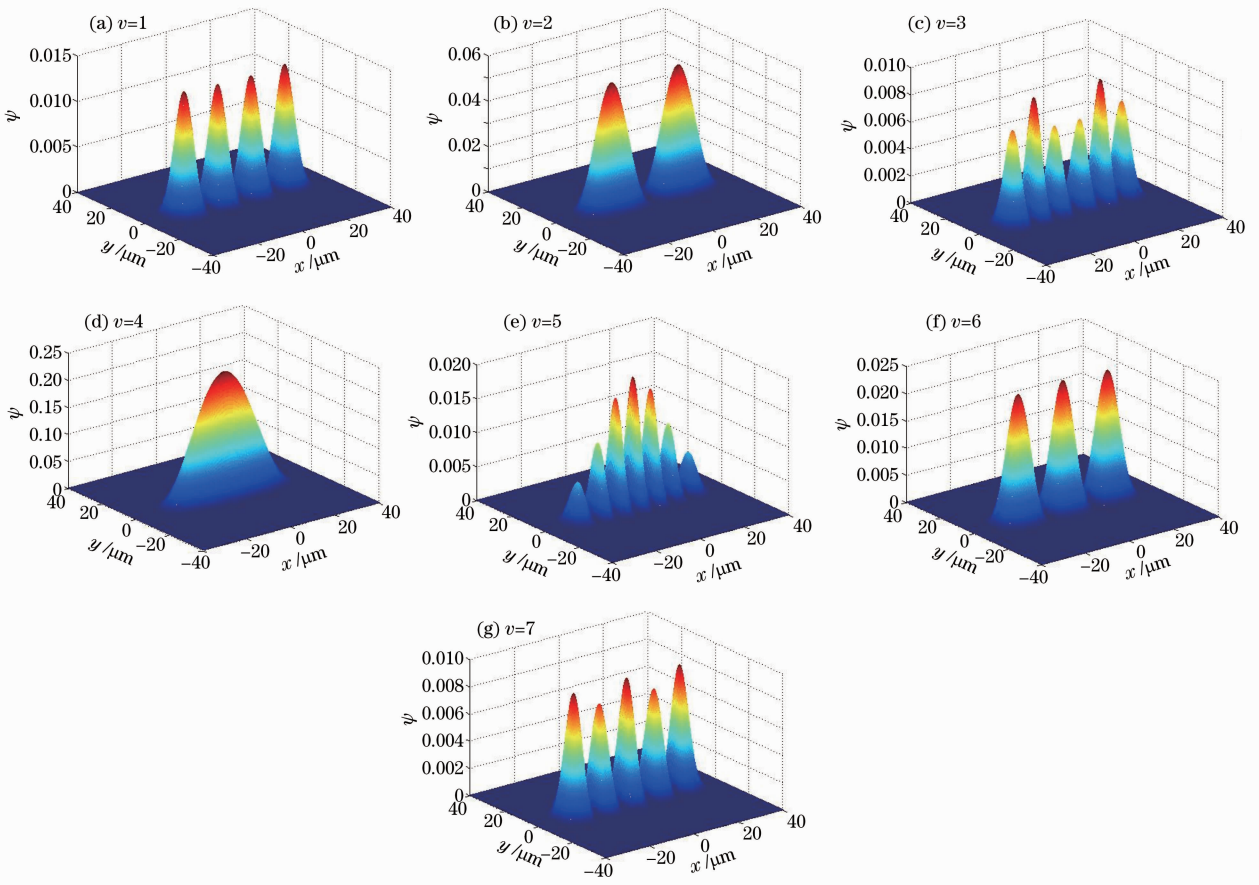


图 5 OFB 的 7 个远场超模场分布

Fig. 5 7 far-field supermodes' intensity distributions of OFB

若定义模场半径为光场强度最大值和 e 的比值,对 $v=1,2,3,4,5,6,7$ 各超模光束的远场光斑半径进行计算,可得 OFB 中央纤芯被激励的情况下,在传输距离 $l=75 \mu\text{m}$ 处,对应于各超模远场光斑半径分别为 $27.34, 23.80, 28.53, 17.60, 29.12, 26.31, 28.10 \mu\text{m}$ 。由各超模远场光斑半径比较可知,第 4 个超模即同相超模相较于其他超模在远场光束传输时,光斑扩散最小,光束质量最好。

5 结 论

研究了一种天文光纤模式转换器,通过将设计的 OFB 输入端与多芯光纤纤芯相连接,可以将任意多芯光纤出射光场转变为线性光场。介绍了一种简单有效的 7 芯 OFB 制作技术,并对各纤芯之间的耦合特性进行了研究。为了便于今后对这种天文光纤模式转换器光束质量进行改进,研究了这种天文光纤模式转换器的超模耦合特性,并且计算了 OFB 的近场超模分布、远场超模分布。通过远场超模发散半径的比较,发现当 OFB 中各纤芯靠得足够近时,

OFB 产生的各超模取决于相邻纤芯之间倏逝波耦合产生的相对相位差,其中同相超模具有最小的发散角和最好的光束质量。通过模式选择,抑制质量较差的模式输出,可获得较高的光束质量,从而提高天文模式转换器输出光斑质量。研究结果为高转换效率、高光束质量的光纤模式转换器的制作及优化提供了依据,对其他类似模式转换器在天文领域的应用研究具有借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.*. Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628001.
赵华新, 蒋永翔, 罗天穹, 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628001.
- 2 Chen Xiaodong. Characteristics of all-fiber gas Raman light source based on hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0505003.
陈晓东. 基于氢气填充空芯光子晶体光纤的全光纤型气体拉曼光源特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0505003.
- 3 Ma Lingfang, Liu Min, Li Dan, *et al.*. A kind of hollow dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0805006.
马玲芳, 刘敏, 李丹, 等. 零模间发散双空芯光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0805006.

- 4 Chen Yixin, Zhao Chunliu, Liu Xing, *et al.*. Research and development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010055.
陈益新, 赵春柳, 刘 星, 等. 基于光子晶体光纤环境的光纤传感器的研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010055.
- 5 Zhu Xiaoliang, Zhang Xiaodong. Side-polished coupling for a single-mode fiber and a novel capillary optical fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0605006.
朱晓亮, 张晓东. 单模光纤与新型毛细管光纤的侧抛耦合[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605006.
- 6 S G Leon-Saval, T A Birks, J Bland-Hawthorn, *et al.*. Multimode fiber devices with single-mode performance [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(19): 2545–2547.
- 7 Joss Bland-Hawthorn, Pierre Kern. Astrophotonics: a new generation of astronomical instruments [C]. *Optical Fiber Communication*, 2010, OThA; OThAT.
- 8 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Yang Jun, *et al.*. Coupling model of standard single-mode fiber and capillary fiber [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(29): 5624–5628.
- 9 Guan Chunying, Yuan Libo, Dai Qiang, *et al.*. Supermodes analysis for linear-core-array microstructured fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(11): 1741–1745.
- 10 J A Besley, J D Love. Supermode analysis of fibre transmission [J]. *IEE Proc Optoelectron*, 1997, 144(6): 411–419.

栏目编辑：王晓琰