

文章编号: 0253-2239(2006)10-1459-5

多模光纤中简并模式群的分别探测*

杨 春¹ 王 勇² 徐长青²

(¹ 东南大学电子工程系光子学与光通信研究室, 南京 210096
² Department of Engineering Physics, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada)

摘要: 用多模倾斜光纤光栅 (Tilted fiber Bragg grating, TFBG) 实现多模光纤中简并模式群 (Degenerated mode group, DMG) 的分别探测。多模倾斜光纤光栅将光纤中的导模耦合到辐射光线, 用透镜将辐射光线聚焦在焦平面上, 使非简并模式群对应的辐射光线的像在焦平面上分离。在焦平面上用空间滤波器使简并模式群选择透过并进行分别探测。用芯径为 62.5 μm 的标准通信多模光纤进行了简并模式群分别探测实验, 用单模光纤激励多模光纤, 测量简并模式群功率随激励光纤的横向对准偏差的变化关系。低阶简并模式群的测量结果与仿真计算结果基本一致, 高阶简并模式群的测量结果与仿真结果有一些不同。用倾斜光纤光栅进行单简并模式群激励, 在单简并模式群条件下测量简并模式群耦合效率的想法还需进一步实验验证。

关键词: 光纤光学; 多模光纤; 倾斜光纤光栅; 模式; 辐射光线; 模式分离

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Separate Detection of Degenerated Mode Group of Multimode Fiber

Yang Chun¹ Wang Yong² Xu Changqing²

(¹ Laboratory of Photonics and Optical Communication, Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096
² Department of Engineering Physics, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada)

Abstract: Separate detection of the degenerate mode groups (DMGs) of multimode fiber was realized by using a multimode tilted fiber Bragg grating (TFBG). With multimode TFBG, the DMGs were coupled into the radiation ray that was focused separately on the focal plane of a lens. The radiation ray corresponding to the nondegenerate mode group is separated on the focal plane, so that the radiation ray of DMGs was selected and detected. The experiment of DMG separate detection was conducted with a standard communication multimode fiber with a core diameter of 62.5 μm . The multimode fiber was excited by a single mode fiber, and optical power of DMGs was measured while changing the lateral misalignment of exciting fiber. The measured results of the lower-order DMGs were in consistence with the numerical results, but there appeared a few deviations for the higher-order DMGs. Further experiments needed to be conducted to verify the idea of exciting a single DMG in a multimode fiber using a TFBG and then measuring the coupling coefficient under this condition.

Key words: fiber optics; multimode optical fiber; tilted fiber Bragg grating; mode; radiation ray; mode separation

1 引 言

在多模光纤和少模光纤的系统 and 器件中, 非简并模式的行为通常各不相同, 系统的整体性能取决于众多模式行为的综合影响^[1~4]。例如, 光功率在简并模式群 (DMG) 中的分布, 即模式功率分布

(MPD), 就是一个影响系统性能的关键因素。模式功率分布决定了多模光纤通信系统的带宽, 通过模式选择激励提高带宽是下一代多模光纤通信系统研究的重点课题^[5,6]。在单模光纤通信系统中用少模光纤进行色散补偿时, 光功率是否全部耦合到具有

* 国家自然科学基金 (60007005)、江苏省创新人才项目 (BK2003406) 和国家留学基金 (22832041) 资助课题。

作者简介: 杨 春 (1970~), 男, 江苏淮安人, 东南大学电子工程系教授, 博士, 主要从事光通信和光纤传感方面的研究。
E-mail: yangchun@seu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-23; 收到修改稿日期: 2006-03-10

较大的负色散值和相对色散斜率的较高阶模 (Higher-order modes) 是决定系统性能的关键因素^[7]。在少模光纤干涉仪中, 模式功率分布决定了可见度的大小^[8]。而在大多数的多模光纤传感器中, 不同模式对被测量的敏感程度也不尽相同, 例如光纤倏逝场化学传感器中具有较大倏逝场深度的高阶模比低阶模的敏感度高, 在基于光纤微弯效应的机械量传感器中高阶模的弯曲损耗比低阶模的高。

自光纤发明以来, 一直没有很好的方法将多模光纤和少模光纤中的单个模式分离并测量模式功率分布。传统的测量模式功率分布的方法基于光纤出射端的近场和远场分析, 在 1985 年之前已经进行了大量的研究和综述^[9]。由于模式在近场和远场中是重叠的, 这种方法需要在已知光纤折射率剖面分布的前提下通过近场或远场的类似反傅里叶变换的积分运算才能得到近似的、连续模式功率分布, 而不能得到分离的简并模式群的光功率^[9]。最近, 另一种方法利用短脉冲的时域扩散也可以得到近似的、连续模式功率分布, 但需要使用脉冲宽度小于 10 ps 的超快激光和色散已知的专用的探测光纤, 并且也不能得到分离的简并模式群的光功率^[6]。总之, 现有的方法都不能将简并模式群分离从而对单个简并模式群进行分别探测, 因此不能对多模光纤系统和器件中的模式行为进行直接的实验研究。

本文提出了用倾斜光纤光栅 (TFBG) 将多模光纤和少模光纤中的导模耦合出光纤并进行简并模式群分别探测的设想, 并在少模光纤上成功地进行了实验验证^[10]。但标准的多模通信光纤中的模式数远远超过少模光纤, 用倾斜光纤光栅能否实现多模光纤中简并模式群的分别探测需要实验验证。本文在标准多模通信光纤中制作了倾斜光纤光栅, 用倾斜光纤光栅将导模耦合出光纤, 并用空间滤波实现了简并模式群的分别探测。此外, 用单模光纤对多模光纤进行偏心激励, 测量了每个简并模式群的光功率与激励光纤横向对准偏差的关系。

2 倾斜光纤光栅中导模向光纤外的耦合

倾斜光纤光栅可以将光纤中的导模耦合出光纤成为辐射光线, 相位匹配条件可以表示为^[11,12]

$$\beta_i + (2\pi n_{\text{clad}} \cos \varphi_i) / \lambda = (2\pi \cos \theta_g) / \Lambda_g, \quad (1)$$

式中 n_{clad} 是光纤包层的折射率, β_i 是第 i 阶导模的传播常量, θ_g 和 Λ_g 分别是倾斜光纤光栅的倾斜角和周期, λ 是光波长, 辐射角 φ_i 是第 i 阶导模对应的辐射光线与光纤轴线的夹角。(1) 式表明, 如果两模式的

传播常量不等则辐射角也不等, 因此对应的辐射光线在空间是分离的。由于多模光纤的简并模式群中大量简并模式的传播常量非常接近, 对应的辐射光线的辐射角近似于连续而无法分离。而不同阶简并模式群的传播常量相差较大, 对应的辐射光线在空间分离。因此, 在单波长条件下, 有可能用倾斜光纤光栅将多模光纤中的导模耦合到辐射光线, 并使各阶简并模式群对应的辐射光线在空间分离。

3 多模倾斜光纤光栅模式分别探测系统

多模倾斜光纤光栅模式分离探测系统如图 1 所示。为了在芯径为 $62.5 \mu\text{m}$ 的标准多模通信光纤中制作倾斜光纤光栅, 用波长为 248 nm 的紫外光通过周期为 1060.71 nm 的相位掩模板对加氢的多模光纤侧面曝光, 光纤与相位掩模板平行并且光纤轴与相位掩模板周期方向的夹角为 20° , 倾斜光纤光栅的长度为 20 mm 。

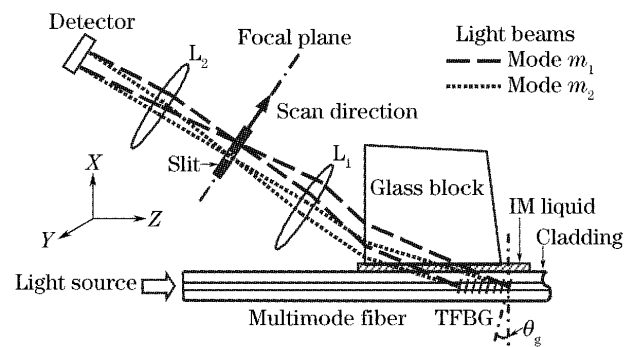


图 1 多模倾斜光纤光栅简并模式群分离探测系统简图
Fig. 1 Diagram of degenerate mode group (DMG) separation and detection system using a multimode tilted fiber Bragg grating (TFBG)

倾斜光纤光栅将导模耦合出纤芯成为辐射光, 辐射光经过置于光纤外侧的折射率匹配液和玻璃块折射到空气中。透镜 L_1 将辐射光聚焦到其焦平面上, 也即辐射光的空谱平面。在倾斜光纤光栅的整个长度上, 与 m 阶简并模式群对应的辐射光线的辐射角 φ_m 是恒定的, 因此可以被聚焦在空谱平面上。

所用多模光纤的相对折射率差 $\Delta = 0.02$, 纯熔融石英包层在 1520 nm 波长的折射率按赛耳迈耶尔 (Sellmeier) 公式计算得 $n_2 = 1.4442$, 光纤轴心折射率 $n_1 = 1.4740$ 。假设光纤折射率剖面为抛物型, 线偏振模的传播常量可表示为^[13]

$$\beta_{\nu, \mu} = k_0 n_1 \left[1 - \frac{2(2\mu + \nu - 1)}{k_0 n_1} \sqrt{\frac{2\Delta}{a^2}} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 k_0 为空间波数, a 为纤芯半径, $\nu(0, 1, 2, \dots)$ 为极角方向模阶数, $\mu(1, 2, \dots)$ 为径向模阶数。简并模式群的主模阶数 m 为

$$m = 2\mu + \nu - 1, \quad (3)$$

根据(2)式和(3)式计算, 光纤在 1520 nm 波长共有 19 个简并模式群。

简并模式群的功率与光纤的激励条件有关。图 2 是用红外相机(Hamamatsu C2741)拍摄的简并模式群对应的辐射光线在空间谱平面上的像。将可调谐激光器(Agilent 8168F)通过单模光纤(SMF-28)激

励多模光纤, 光波长为 1520 nm, 出纤光功率为 6.0 mW。图 2(a)中, 多模光纤与多模光纤对准激励, 可见较低阶的 12 个简并模式群得到了显著的激励, 而更高阶的模式几乎没有被激励。图 2(b)是单模光纤与多模光纤的横向对准偏差为 30 μm 的偏心激励情形, 可见较低阶的 8 个简并模式群几乎没有被激励, 而阶数大于 8 的简并模式群得到了显著的激励。图 2 表明, 多模光纤中的所有简并模式群都能够被耦合出光纤, 其对应的辐射光线在空间谱平面上彼此分离, 可以被分别探测。

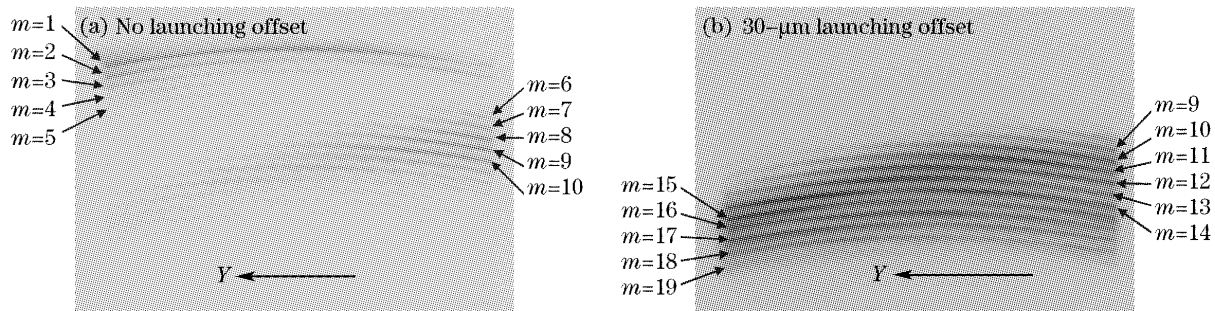


图 2 偏心激励条件下简并模式群对应的辐射光线在空间谱平面上的像

Fig. 2 Images of radiation ray corresponding to DMGs on the spatial spectrum plane under different launching offsets

为了对单个简并模式群进行直接探测, 如图 1 所示, 在空间谱平面上设置了与简并模式群像的形状一致的并且可以移动的环形狭缝, 狭缝的间隙为 150 μm 。这个狭缝在电动平移台(Newport 850F)的驱动下可沿图 1 所示的方向移动, 用作为空间滤波器, 可以选择一个简并模式群的对应辐射光线通过。透镜 L_2 将通过狭缝的光线聚焦到光功率计(HP8153A, 精度 0.1 nW)上, 就可以实现对一个简并模式群的直接探测。

4 简并模式群的分离探测实验

用压电平移台(Melles Griot NanoMax-TS 平移台和 17RCZ 闭环控制器)连续改变用于激励的单模光纤与多模光纤对准的横向偏差, 用图 1 所示的系统对简并模式群进行分离实时探测。图 3 是 19 个简并模式群的光功率随横向对准偏差的变化关系曲线。图 3(a)是实际测量的结果, 图 3(b)是理想抛物型折射率剖面的多模光纤的数值仿真结果。对比图 3(a)和图 3(b), 低阶简并模式群的实验结果和仿真结果基本一致; 而高阶简并模式群的结果有较大

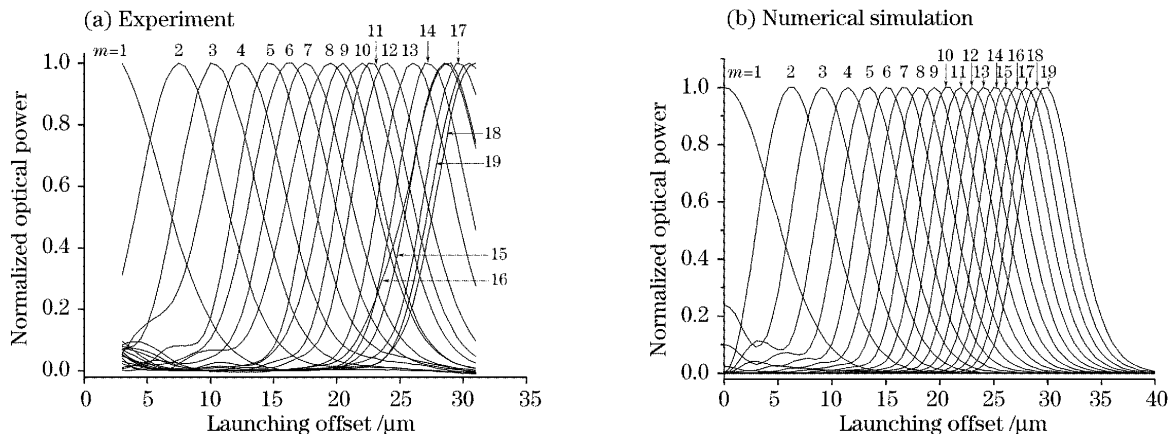


图 3 简并模式群的光功率随激励偏心距的变化关系曲线

Fig. 3 Optical power of DMGs varying with launching offset

的不同,尤其是第 13 阶以上的简并模式群,例如第 16 阶简并模式群的曲线比仿真曲线宽,第 18 阶简并模式群的峰值和第 19 阶简并模式群的峰值次序颠倒。造成高阶简并模式群的实验结果与仿真结果不一致的原因可能在于:1)用于仿真的理想抛物型折射率剖面与实际光纤的梯度折射率剖面有差异,特别是纤芯与包层的界面附近;2)实验时,用于激励的单模光纤与多模光纤有小的角度对准偏差;3)多模光纤的入射端面与光纤轴不垂直或者局部有缺陷。上述分析表明,图 1 的系统能够实现多模光纤中简并模式群的分别实时探测;理论和仿真计算的参量不可能反映对象的所有情况或者与对象有偏差,因此合理的理论和仿真结果虽然能够揭示模式的主要规律,但也与实际情况有明显的不同之处。这就说明模式分别探测对于多模光纤系统和器件的研究是非常必要的。

5 讨 论

对于多模倾斜光纤光栅,各阶简并模式群耦合系数也不相同,需要用实验的方法测量得到。对于少模倾斜光纤光栅,由于模式较少,可以采用改变激励条件,通过解线性方程组的方法求得耦合系数^[10]。但多模光纤中简并模式群较多,如果仅采用改变单模激励光纤的横向对准偏差的方法,由图 3 可见虽然各简并模式群的功率变化不同步,但高阶简并模式群的功率变化曲线是相关的,例如第 6 阶简并模式群的曲线可由第 5 阶简并模式群和第 7 阶简并模式群的曲线线性表示,则无法得到足够数量的线性无关的方程用来解出所有简并模式群的耦合系数。由此可见,为了得到足够多的线性无关的方程,可以考虑组合改变 2 维的横向对准偏差和 3 维的角度对准偏差。另一个更直接地实验测量耦合系数的办法是在多模光纤中只激励一个简并模式群,然后测量辐射功率的大小。这种方法的困难在于多模光纤中单简并模式群的激励一直没有很好的方法。考虑到这个情况,我们在后续研究中将尝试用光源代替图 1 中的探测器,利用倾斜光纤光栅实现多模光纤的单简并模式群激励。

实验中发现,各阶简并模式群辐射光线的能量较小,表明倾斜光纤光栅的耦合系数较小。这可能是由于多模光纤的芯径较大,而用紫外光侧面曝光法制作倾斜光纤光栅时,由于纤芯的吸收,光栅的折射率改变只在紫外曝光一侧的近包层纤芯区域,因此导模场与光栅折射率变化剖面的重叠不多,重叠

积分值较小,导致耦合系数不大^[14,15]。

6 结 论

用倾斜光纤光栅实现了多模光纤简并模式群的分别探测。倾斜角为 20°的倾斜光纤光栅能将标准通信多模光纤中所有的简并模式群耦合到辐射光线,用透镜可以将辐射光成像在焦平面上,且不同简并模式群的像彼此分离。在焦平面上用狭缝可以对辐射光线进行空间滤波,使单个简并模式群对应的辐射光线通过并被直接探测。

致谢 感谢 the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada(NSERC)、the Ontario Photonics Consortium(OPC)和 the Canada Foundation for Innovation(CFI)的资助。

参 考 文 献

- 1 Yang Chun, Bi Xiaofeng, Guan Zhiqiang. Optical power distribution in multimode polymer optical fiber under offset launching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1259~1264 (in Chinese)
杨春,毕晓峰,管志强. 偏心激励聚合物光纤横截面的光功率分布[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1259~1264
- 2 Zhan Yage, Lei Jianqiu, Liang Peihui *et al.*. Study of the laser beam quality and polarization degree in large-core optical power fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 173~176 (in Chinese)
詹亚歌,雷建求,梁培辉等. 大芯径功率光纤中传输的激光束质量与偏振度研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 173~176
- 3 Wang Honghai, Tong Weijun. Effect of periodic scrambling on the transmitting characteristic of multimode fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 177~180 (in Chinese)
汪洪海,童维军. 周期性扰动对多模光纤传输性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 177~180
- 4 Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- 5 P. Pepeljugoski, S. E. Golowich, A. J. Ritger *et al.*. Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1242~1255
- 6 S. E. Golowich, W. A. Reed, A. J. Ritger. A new modal power distribution measurement for high-speed short-reach optical systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 457~468
- 7 S. Ramachandran, B. Mikkelsen, L. C. Cowsar *et al.*. All-fiber grating-based higher order mode dispersion compensator for broad-band compensation and 1000-km transmission at 40 Gb/s[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(6): 632~634
- 8 A. Kumar, N. K. Goel, R. K. Varshney. Studies on a few-mode fiber | optic strain sensor based on LP₀₁-LP₀₂ mode interference[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(3): 358~362
- 9 D. Rittich. Practicability of determining the modal power distribution by measured near and far fields[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(3): 652~661
- 10 C. Yang, Y. Wang, C. Q. Xu. A novel method to measure

- modal power distribution in multimode fibers using tilted fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(10): 2146~2148
- 11 R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings* [M]. San Diego: Academic Press, 1999. 158~165
- 12 Y. Li, M. Froggatt, T. Erdogan. Volume current method for analysis of tilted fiber gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(10): 1580~1591
- 13 Fan Chongcheng, Peng Jihu. *Guided Wave Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 126 (in Chinese)
范崇澄, 彭吉虎. 导波光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 126
- 14 Yang Chun, Gao Feng. Numerical simulation on effect of saturation length for few-mode fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1853~1857 (in Chinese)
杨 春, 高 峰. 饱和长度对少模光纤光栅影响的数值仿真[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1853~1857
- 15 D. Kokou, L. Sophie, F. Marie. Numerical analysis of the contribution of the transverse asymmetry in the photo-induced index change profile to the birefringence of optical fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1463~1470