

椭圆芯保偏光纤模传输特性和模间干涉拍长的研究

陈卫东, 刘 丰

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘 要: 保偏光纤模传输特性和模间干涉拍长是模间干涉式光纤传感器设计中的关键参数, 对于确定光纤传感器的工作波长、动态范围和线性度具有重要作用. 本文从理论上对椭圆芯保偏光纤的模传输特性和模间干涉拍长进行了分析计算, 首先计算得到椭圆芯保偏光纤中几个线性偏振模的传输特性, 并据此得到两个低阶线性偏振模 LP_{01} 和 LP_{11}^s 的模间干涉拍长. 通过试验对计算得到的模间干涉拍长进行了研究, 理论和试验结果表明模间干涉具有数百微米的拍长, 可以用于设计稳定的光纤传感器.

关键词: 保偏光纤; 模间干涉拍长; 光纤传感器; 马卡梯里法

中图分类号: TN818 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1624-04

Research on the Modular Interference Beat Length of an Elliptical Core PMF

CHEN Wei-dong, LIU Feng

(College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: The modes propagation characteristics and modular interference beat length in Elliptical-core Polarization Maintenance Fiber (E-core PMF) are very important parameters for designing optic-fiber sensors based on modular interference. They play an important role in deciding the work wavelength, dynamic range and linearity of optic-fiber sensors. This paper calculates the modes propagation characteristics and modular interference beat length theoretically. The propagation characteristics of several low order modes in E-core PMF are calculated, and as a result, the modular interference beat length of LP_{01} and LP_{11}^s is obtained. An experiment is designed to investigate the modular interference beat length in an E-core PMF, and the experiment result shows that the beat length is about several hundreds micron, which is very suitable for designing applicable and reliable optic-fiber sensors.

Key words: polarization maintenance fiber; modular interference beat length; optic-fiber sensor; Marcattili method

1 引言

近年来, 能够传输线性偏振基模 LP_{01} 和第一个高阶线性偏振模 LP_{11}^s 的双模光纤在各种光纤传感系统中应用越来越广^[1~4]. 但是在弱导圆芯光纤中, 模式的简并性导致光在光纤中传输模式的不稳定, 难以将模式之间的干涉应用于实际的传感测量中. 采用特殊结构的光纤能够克服这一问题, 领结型保偏光纤、熊猫型保偏光纤^[5]及特殊的光子晶体光纤^[6,7]都具有这一特点. 椭圆芯保偏光纤因其保偏性是由物理结构引起的, 且工艺水平比较成熟, 比普通应力型保偏光纤和光子晶体光纤更适合制作实用化的光纤模间干涉传感器.

为了将椭圆芯保偏光纤模间干涉应用于实用化光纤传感器的设计中, 需要对椭圆芯保偏光纤模传输特性和模间干涉拍长进行研究. 本文利用等容原理和马卡梯里 (Marcattili) 法对椭圆芯保偏光纤的几个低阶模传输特

性和进行了理论计算, 并设计了实验系统对模间干涉拍长的计算结果进行了验证. 理论和实验结果表明采用该方法计算椭圆芯保偏光纤的模传输特性具有方法简单、计算精度比较高等优点, 对于确定椭圆芯保偏光纤的双模工作波长和传感应用中的动态范围具有重要意义.

2 保偏光纤中的模间干涉

对于椭圆芯保偏光纤, 若通过合适地选择工作波长和激励方式, 能够在光纤中只传输两个低阶线性偏振模 LP_{01} 和 LP_{11}^s , 这两个模式之间的干涉光强 I 和模间相位差 $\Delta\phi$ 之间的关系为^[8]:

$$I = |E(x, y)|^2 = |E_{LP_{01}}(x, y) + E_{LP_{11}^s}(x, y) \exp(i\Delta\phi)|^2 \quad (1)$$

式中 $E_{LP_{01}}(x, y)$ 和 $E_{LP_{11}^s}(x, y)$ 分别为 LP_{01} 和 LP_{11}^s 模的模场函数.

图 1 为干涉光强 I 和模间相位差 $\Delta\phi$ 间关系的仿

真结果,即随着两个模式之间相位差的变化,干涉输出的两个边瓣之间存在着能量交换的现象.即相位差从0变化到 $\frac{\pi}{2}$ 再到 π 的过程中,完成了一次能量从一个边瓣到另一个边瓣的交换,相位差从 π 变化到 2π 的

过程也将类似.如果能对干涉输出的两个边瓣中的一个(或两个)进行探测,就可以从探测到的光强变化得到两个模式之间的相位差,进而实现对引起模间相位差变化的物理量的传感测量.

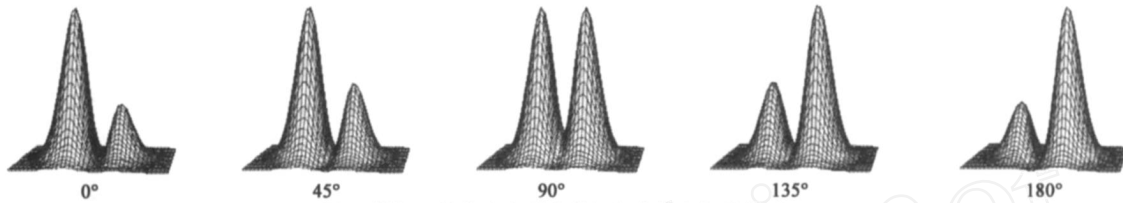


图1 模间干涉输出光强和模间相位差之间的关系

3 椭圆芯保偏光纤模传输特性的计算

3.1 椭圆芯保偏光纤模传输特性的数值计算方法

为了保证在光纤中只能传输两个低阶线性偏振模,需要对光纤中几个低阶模式的传输特性进行计算,从而确定最佳的工作波长.本文采用矩形近似算法,将椭圆芯光波导按照等容原理等效成矩形波导后进行计算^[9,10],即将椭圆截面的纤芯用矩形截面纤芯等效,等效时保证矩形面积和被等效的椭圆面积相等.对于x方向的偏振模 E_m^x 模,按照马卡梯里方法,其传播常数可以按式(2)计算:

$$\beta^2 = \beta_x^2 + \beta_y^2 - n_1^2 k_0^2 \quad (2)$$

式中 k_0 为波数, n_1 为纤芯折射率, β_x 和 β_y 可以通过解方程(3)得到:

$$K_x \cdot 2a = m\pi - \arctan\left(\frac{n_2^2 K_x}{n_1^2 p_x}\right) - \arctan\left(\frac{n_2^2 K_x}{n_1^2 q_x}\right) \quad (3a)$$

$$K_y \cdot 2b = n\pi - \arctan\left(\frac{K_y}{p_y}\right) - \arctan\left(\frac{K_y}{q_y}\right) \quad (3b)$$

$$\text{式中: } p_y = \sqrt{\frac{2}{y} - n_2^2 k_0^2} = \sqrt{k_0^2(n_1^2 - n_2^2) - K_y^2},$$

$$p_x = \sqrt{\frac{2}{x} - n_2^2 k_0^2} = \sqrt{k_0^2(n_1^2 - n_2^2) - K_x^2},$$

$$K_x = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \frac{2}{x}}, K_y = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \frac{2}{y}}$$

n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层折射率,对于y方向的偏振模 E_m^y 也具有类似的计算方法.

3.2 椭圆芯保偏光纤模传输特性的数值仿真

设某椭圆芯保偏光纤的长轴半径 $a = 3\mu\text{m}$,短轴半径 $b = 1\mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1 = 1.470$,包层折射率 $n_2 = 1.456$,利用上面的方法对几个模式进行数值仿真后,得到如图2所示的结果,图中横坐标为归一化频率 $V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$,纵轴为归一化传播常数 β/k_0 .从图2中可以看出,在椭圆芯保偏光纤中不同阶次的模式具有较大的传播常数差,同阶次偏振模的偶模和奇模也不是简并的,同样具有明显的传播常数差.这就可以通过合理地选择光源波长使光纤中只能传输 LP_{01} 模和 LP_{11}^e ,

并利用同偏振方向的这两个模式间的干涉来设计光纤传感器.在上述的光纤物理参数条件下,若利用 LP_{01} 和 LP_{11}^e 的模间干涉,则选择光源的中心波长应该使归一化频率 V 介于 LP_{11}^e 模和 LP_{21} 模式的截止点之间.然而,对于不同的光纤物理参数条件,可选的光源波长并不总是由 LP_{11}^e 模和 LP_{21} 模的截止点决定的.

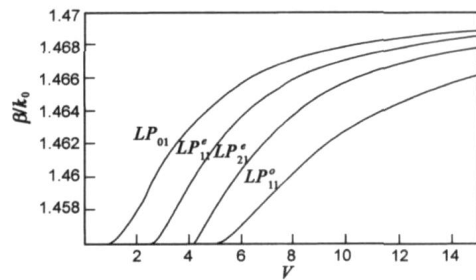


图2 一种椭圆芯保偏光纤中几个模式的归一化传播常数和V的关系

图3是对椭圆芯保偏光纤 LP_{11}^e 模、 LP_{21} 模和 LP_{11}^o 模的归一化截止频率 V_c 和光纤纤芯长短轴之比 a/b 之间关系的仿真结果,图中横坐标为光纤纤芯长短轴之比,纵坐标为模式的归一化截止频率.从图中可以看出,椭圆芯保偏光纤长轴和短轴比对 LP_{21} 和 LP_{11}^o 模的先后截止顺序具有明显的影响, $a/b = 2.3$ 是这两个模式先后截止的分界点,选择光源波长时要根据 a/b 的不同来

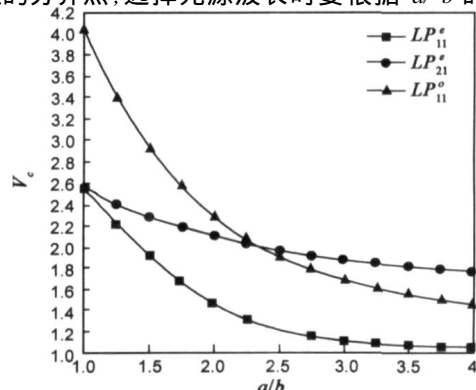


图3 椭圆芯保偏光纤几个低阶模式截止频率和纤芯长短轴比的关系

决定是使归一化频率介于 LP_{01}^e 模和 LP_{21}^e 的截止点之间还是介于 LP_{11}^e 和 LP_{01}^e 模的截止点之间.

4 一种椭圆芯保偏光纤模间干涉拍长的研究

4.1 模间干涉拍长

为了将 LP_{01} 和 LP_{11}^e 模间的干涉应用到光纤传感中,这两个模式的模间干涉拍长也是一个重要参数,它决定了光纤的调制长度和传感系统的线性度和动态范围.保偏光纤中 LP_{01} 和 LP_{11}^e 模间干涉拍长 L_B 定义为:

$$L_B = \frac{2}{\beta_{01} - \beta_{11}^e} \quad (4)$$

式中 β_{01} 和 β_{11}^e 分别为 LP_{01} 和 LP_{11}^e 模的传播常数.模间干涉拍长的计算可以在已经得到如图 2 所示的模传输特性的前提下,按照式(4)的方法较容易地实现.对于长轴半径 $a = 3\mu\text{m}$,短轴半径 $b = 1\mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1 = 1.470$,包层折射率 $n_2 = 1.456$ 的椭圆芯保偏光纤,计算得到当光波长为 980nm 时 ($V = 3.45$), LP_{01} 和 LP_{11}^e 模间干涉拍长约为 $250\mu\text{m}$,远大于普通干涉仪 $1\mu\text{m}$ 数量级的干涉拍长.

4.2 模间干涉拍长实验研究

为了对上述计算得到的模间干涉拍长进行验证,设计了如图 4 所示的实验系统.在图 4 中,波长为 980nm 的泵浦光源发出的光经光纤偏振器后变成线性偏振光进入保偏光纤,保偏光纤缠绕在一个压电陶瓷管上(压电陶瓷管的驱动电压可调),压电陶瓷驱动电压的调制作用会使保偏光纤长度受到调制,进而引起干涉输出光强分布发生如图 1 所示的两个边瓣强度交换现象,用光探测器对一个边瓣的强度进行探测并经过信号处理后得到和边瓣光强成正比的输出电压信号.实验中的保偏光纤长轴半径 $a = 3\mu\text{m}$,短轴半径 $b = 1\mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1 = 1.470$,包层折射率 $n_2 = 1.456$.保偏光纤输出端和探测器的尾纤用保偏光纤熔接机对准并手动调整慢轴偏振方向和偏轴量后熔接.根据模间干涉拍长的定义和压电陶瓷的逆压电效应工作原理,图 4 的试验方案中可以按照式(5)来计算模间干涉拍长 L_B :

$$L_B = l_2 = d_{zz} \cdot \frac{U}{d} \cdot N \cdot 2 \cdot r \quad (5)$$

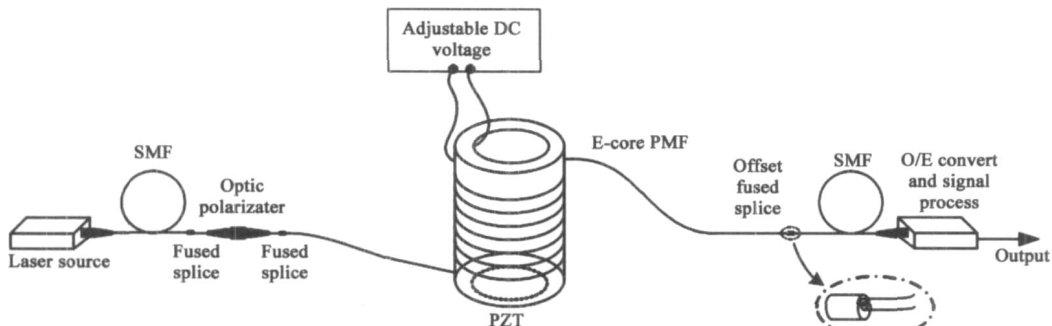


图4 模间干涉拍长测量实验系统

式(5)中 d_{zz} 为压电陶瓷的逆压电系数, U 为施加于压电陶瓷筒内外壁间的电压, d 为压电陶瓷管壁厚度, N 为缠绕在压电陶瓷上的光纤圈数, r 为压电陶瓷管外半径.

为了验证实验系统的可靠性和重复性,分别选用了两种参数不同的压电陶瓷圆筒 PZT1 和 PZT2 进行试验,实验中 PZT 圆筒和光纤缠绕圈数等具体参数如表 1 所示.

表 1 试验中 PZT 参数及缠绕光纤圈数

PZT 编号	PZT 筒壁厚 (mm)	PZT 筒外半径 (mm)	PZT 压电系数 (m/V)	光纤圈数
PZT1	3.2	20	200×10^{-12}	52
PZT2	3.2	20	160×10^{-12}	80

试验结果如图 5 所示,图中横坐标为施加于压电陶瓷圆筒上的直流电压,纵坐标为信号处理电路输出的电压信号.从图中可以看出:对于采用 PZT1 的试验,当其控制电压大约变化 500V 时,使得一个干涉边瓣的光

强波动一个周期,由式(5)可以算出该保偏光纤在 980nm 波长激励时 LP_{01} 和 LP_{11}^e 模间的干涉拍长约为 $204\mu\text{m}$;对于 PZT2 的试验,当其控制电压大约变化 400V 时,使得一个干涉边瓣的光强波动一个周期,同样地由式(5)计算模间干涉拍长约为 $201\mu\text{m}$.

上述实验结果虽然同理论计算有较大的误差,但是考虑到理论计算的近似算法误差、光纤缠绕在压电

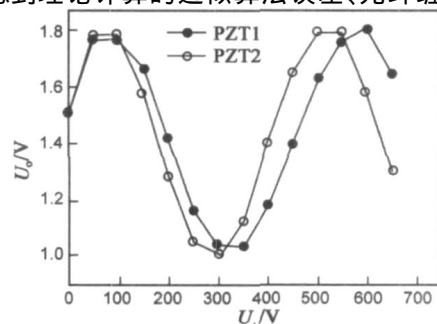


图5 模间拍长测量实验数据

陶瓷管上的松紧不均匀、光纤的弹光效应及 PZT 的机电耦合系数等因素,这个结果还是可以为基于模间干涉原理的光纤传感器提供设计参考的。

5 结论

理论和实验研究表明:椭圆芯保偏光纤物理参数的不同是决定保偏光纤双模工作波长的关键因素,椭圆芯保偏光纤长短轴之比 $a/b = 2.3$ 是 LP_{21}^e 和 LP_{11}^o 模式先后截止的分界点,双模工作波长应该选择在使归一化频率介于 LP_{11}^o 模和先截止的高阶模之间;椭圆芯保偏光纤的模间干涉拍长在百微米数量级上,要比传统的双臂干涉仪波长数量级的干涉拍长大得多,这虽然降低了干涉仪的灵敏度,但是却能有效地提高干涉仪系统的稳定性和扩大测量范围;模间干涉光纤传感器集传统双臂干涉仪的传感臂和参考臂于一根光纤中,结构简单、工作稳定,是实现干涉式光纤传感器实用化的一种新方法。

参考文献:

- [1] K Bohnert, G C de Wit, J Nehring. Coherence-tuned interrogation of a remote elliptical-core, dual-mode fiber strain sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(1): 94 - 102.
- [2] J N Blake, S Y Huang, B Y Kim, H J Shaw. Strain effects on highly elliptical core two-mode fibers [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(9): 732 - 734.
- [3] K Bohnert, P Gabus, J Kostovic, H Brandle. Optical fiber sensors for the electric power industry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3): 511 - 526.
- [4] Ashish M Vengsarkar, Craig Michie, Ljilja Jankovic, Brian Culshaw, Richard O Claus. Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(1): 170 - 177.
- [5] Aly, M H Abouelwafa, M S A Keshk, M M. Thermal-stress-induced birefringence in panda and bow-tie optical fibers [A]. *IEEE Proceedings of the fifteenth national radio science conference* [C]. 1998, (2): 24 - 26.
- [6] 姜淑琴, 王智, 任国斌, 简水生. 折射率导模高双折射光子晶体光纤的偏振特性 [J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 393 - 396.
LOU Shu-qin, WANG Zhi, REN Guo-bin, JIAN Shui-sheng. Polarization properties of indexing-guiding highly birefringence photonic crystal fibers [J]. *Acta electronica sinica*, 2005, 33(3): 393 - 396. (in Chinese)
- [7] 倪屹, 安亮, 张磊, 彭江得. 用于色散补偿的双芯光子晶体光纤设计 [J]. *电子学报*, 2004, 32(12): 2106 - 2108.
Ni yi, An Liang, Zhang Lei, Peng Jiang-de. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation [J]. *Acta electronica sinica*, 2004, 32(12): 2106 - 2108. (in Chinese)
- [8] Helin Wang, Weihong Bi, Aijun Yang, and Feng Liu. Modular interference characteristics of two - Mode fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(11): 621 - 624.
- [9] Tadeusz Martynkien, Waclaw Urbanczyk. Modeling of spectral characteristics of coming PMF-38 highly birefringent fiber [J]. *Optik* 113, 2002(1): 25 - 30.
- [10] Arun Kumar, R K Varshney and A K Ghatak. Analysis of rectangular-core dielectric waveguides: an accurate perturbation approach [J]. *Optics letters*, 1983, 8(1): 63 - 65.

作者简介:



陈卫东 男, 1971 年 3 月出生于吉林省长春市, 副教授。2005 年获得燕山大学自动化专业博士学位, 现任教于燕山大学信息科学与工程学院, 研究方向为光纤传感及自动控制系统, 目前已在国内外核心刊物上发表学术论文 20 余篇。
E-mail: wdchen@ysu.edu.cn

刘丰 男, 1976 年 1 月出生于吉林省东丰县, 副教授。2008 年获得燕山大学电路与系统专业博士学位, 现任教于燕山大学信息科学与工程学院, 研究方向为光纤传感及光电检测, 近年来在国内外核心刊物上发表学术论文 10 余篇。E-mail: kennan@ysu.edu.cn