

高精度度微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪

唐才杰 江毅

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 通过在镀膜单模光纤端面制作微透镜,构造了微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪。利用 ABCD 矩阵方法分析了微透镜法布里-珀罗腔的模场。由于微透镜的会聚作用,法布里-珀罗腔模场可以和单模光纤模场良好的匹配,从而达到高精度度和低插入损耗。实验制作的微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪,自由光谱区范围 32.28 nm,精细度为 78,峰值透射比为 73%;在法布里-珀罗腔的光学腔长增加到 100 μm 的情况下,峰值透射比仍然大于 50%。该微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪制作容易、对设备要求低,可以封装成光纤法布里-珀罗滤波器和传感器,具有广泛的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤法布里-珀罗干涉仪; 微透镜

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.1062

High-Finesse Micro-Lens Optical Fiber Fabry-Pérot Interferometers

Tang Caijie Jiang Yi

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer is demonstrated by manufacturing micro-lenses on the mirrored endfaces of two single-mode optical fibers. The mode field of the Fabry-Pérot cavity is theoretically calculated by using ABCD matrix method. The mode field of the Fabry-Pérot cavity matches that of a single-mode optical fiber very well due to the focusing of micro-lenses, thus resulting in high finesse and low insertion loss. A micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer with free spectral range of 32.28 nm, finesse of 78 and peak transmittance of 73% is experimentally demonstrated. It can maintain a peak transmittance better than 50%, even if the optical cavity length of the Fabry-Pérot cavity is increased to 100 μm . This kind of micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer is easy to build, and can be used as optical fiber Fabry-Pérot filters and high-finesse optical fiber Fabry-Pérot sensors.

Key words fiber optics; fiber optic sensor; optical fiber Fabry-Pérot interferometer; micro-lens

1 引 言

外腔式光纤法布里-珀罗(法珀)干涉仪结构紧凑、抗偏振影响,可以构成光纤法珀滤波器和传感器,在光纤传感领域具有广泛的应用^[1-7]。但是由于外腔式光纤法珀干涉仪的衍射损耗,要获得高精度度和低损耗,必须严格限制法珀腔的腔长(一般小于 10 μm)^[8]或者采用复杂的工艺制作成平-凹、凹-凹腔结构^[9]。所以在光纤传感中一般采用低精细度的外腔式光纤法珀干涉仪或非索干涉仪^[1-7],光源的

利用效率低,探测光强弱;同时由于精细度低,在解调腔长时,干涉条纹峰值波长的测量精度低^[5, 10]。

微透镜光纤或微透镜阵列耦合系统是目前应用日益广泛的光耦合系统,可以改变入射光的模场使之和接收光纤的模场相匹配,从而达到高的耦合效率,广泛应用于激光器和光纤,以及光纤和光纤间的光耦合^[11]。同时微透镜也用于垂直腔面发射激光器(VCSEL),使谐振腔和光纤达到良好的模式匹配^[12]。本文通过在镀膜单模光纤端面制作微透镜,

收稿日期: 2008-06-13; 收到修改稿日期: 2008-09-24

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-07-0076)和国家 863 计划(2008AA04Z406)资助课题。

作者简介: 唐才杰(1982-),男,博士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: tangcaijie@bit.edu.cn

导师简介: 江毅(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感及光电子技术等方面的研究。

利用微透镜的汇聚作用,使法珀腔的模场和单模光纤的模场相匹配,从而获得高精度和低损耗的微透镜光纤法珀干涉仪。

2 结构和制作方法

微透镜光纤法珀干涉仪的结构如图 1 所示,单模光纤的端面镀高反射膜,镀膜光纤端面上制作有微透镜,两根这样的光纤相互对准、镀膜光纤端面彼此平行构成微透镜光纤法珀干涉仪。

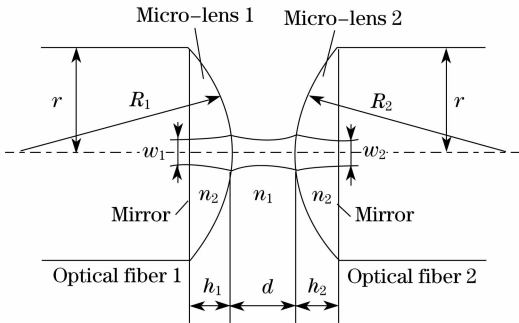


图 1 微透镜光纤法珀干涉仪的结构示意图

Fig. 1 Configuration of the micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer

利用光学谐振腔的变换矩阵分析微透镜光纤法珀干涉仪的特性^[13, 14]。以光纤 1 的端面为参考面。光纤 1 的出射光在法珀腔内往返一周的 ABCD 变换矩阵为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR_1} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \cdot \\ &\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R_2} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ &\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR_2} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \cdot \\ &\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R_1} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $r=62.5 \mu\text{m}$ 为光纤的半径; h_1, h_2 为光纤 1、2 端面微透镜的高度; R_1, R_2 为光纤 1、2 端面的微透镜的曲率半径, $R_1 = (r^2 + h_1^2)/2h_1$, $R_2 = (r^2 + h_2^2)/2h_2$; n_1 为空气折射率, n_2 为微透镜材料的折射率, 对 NOA61 紫外固化光学胶 (Norland Products Inc.), 在 25°C 、 1550 nm 波长 $n_2 = 1.541$ ^[15]; $n = n_2/n_1$; d 为微透镜顶点之间的距离; A, B, C, D 为 ABCD 变换矩阵的四个元素, 如式(1)定义。法珀腔的光学腔长

nL 为

$$nL = n_1 d + n_2 (h_1 + h_2). \quad (2)$$

当满足条件 $(D+A)^2/4 < 1$ 时法珀腔内存在稳定的高斯模式, 此时基模在参考面上的曲率半径和模场半径分别为

$$R = \frac{2B}{D-A}, \quad (3)$$

$$w = \sqrt{\frac{\lambda |B|}{\pi}} \left/ \left[1 - \left(\frac{D+A}{2} \right)^2 \right]^{1/4} \right., \quad (4)$$

其中 $\lambda = \lambda_0/n_2$, λ_0 为真空中的光波长。由(1)、(3)式可知法珀腔的基模在参考面上的曲率半径 $R = \infty$, 要实现模式的匹配需要使法珀腔在参考面上的模场半径 w 同单模光纤出射光的束腰半径 w_f 相近。实验所用光纤为 SMF-28 单模光纤 (Corning Inc.), 在 1550 nm 波长 $w_f \approx 5.2 \mu\text{m}$ ^[16]。

由于控制微透镜高度比较困难, 设计时选择两个微透镜的高度相等, 首先确定了微透镜高度 h , 通过变换矩阵计算了在不同微透镜高度时, 法珀腔的基模在参考面上的模场半径 w 同微透镜顶点间距 d 的关系。根据(4)式可得 $w \propto \sqrt{\lambda}$, 对于常用的 C+L 波段 ($1530 \text{ nm} \sim 1610 \text{ nm}$), 用波长 1550 nm 代替整个 C+L 波段来计算模场半径, 这个近似带来的误差小于 1.8% , 所以只计算了波长为 1550 nm 时的模场半径。计算结果如图 2 所示, 对不同的微透镜高度 h , 微透镜顶点间距 d 在一个比较大的范围内, w 和 w_f 相近, 法珀腔和单模光纤间能够实现良好的模式匹配。

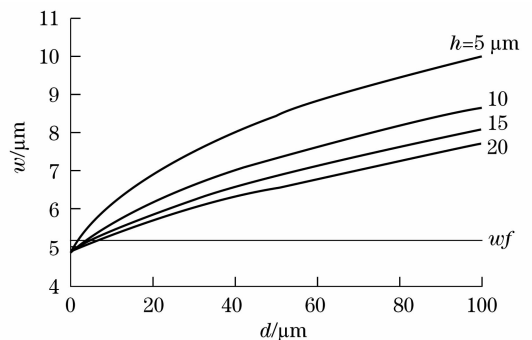


图 2 不同微透镜高度 h 下, 法珀腔的模场半径 w 同微透镜顶点间距 d 的关系

Fig. 2 Relation between cavity mode radius, w , and the spacing of the two micro-lenses, d , for several values of the micro-lens height, h

利用透光性能良好的聚合物可以非常容易的在光纤端面上制作微透镜^[11], 光纤端面微透镜可以采用如图 3 所示的方法来制作:

1) 切割一根裸光纤,蘸取一定量的 NOA61 紫外固化光学胶,和一根端面镀膜的光纤在光纤熔接机上对准。

2) 调节两个光纤端面间的距离,使光学胶接触到镀膜光纤端面,控制光纤端面间的距离使光学胶不溢出镀膜光纤端面;拉开光纤端面间的距离,两个光纤端面之间的光学胶从中间断开几乎平均分配到两个光纤端面。通过选择端面粘有不同胶量的裸光纤,重复前述步骤,还可以增加或减小镀膜光纤端面的胶量,从而获得不同的微透镜高度。

3) 将镀膜光纤端面向下竖直放置,光纤端面的光学胶在重力和表面张力的作用下形成良好的球形;经过一段时间,约 10 min,用紫外灯将胶固化;所用紫外灯为波长 252 nm,功率 1 W 的灯管,紫外灯距离镀膜光纤端面约 3 cm,固化时间 30 min。

微透镜的质量强烈地影响到微透镜光纤法珀干涉仪的性能,微透镜的不对称以及顶点偏移,不但会使干涉仪的透射谱出现多个高阶横模,同时会极大的增加干涉仪的插入损耗。所以必须保证光纤端面没有缺损,仔细控制制作过程,使光学胶浸润而不溢出光纤端面,同时充分竖直悬置形成良好的球形。

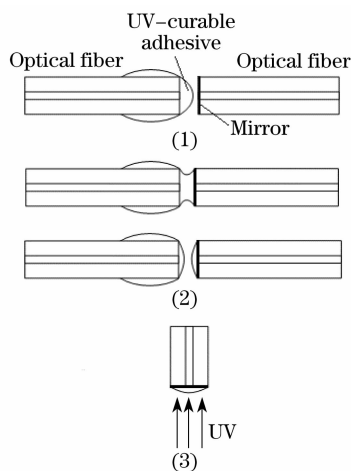


图 3 光纤端面微透镜的制作方法

Fig. 3 Fabrication process of a micro-lens on a fiber end surface

3 实验和结果

在光纤端面镀介质高反射膜,根据图 3 所示的方法在镀膜光纤端面上制作了微透镜。然后将两根制作好的光纤在熔接机上对准形成微透镜光纤法珀干涉仪,如图 4 所示。由于光纤熔接机手动调节精度的限制,微透镜的高度不能做到很小,从而限制了能够获得的最大自由光谱区范围。测量法珀腔的透

射谱,计算相应的法珀腔的光学腔长;用数码相机拍摄微透镜光纤法珀干涉仪的图片,结合 Adobe Photoshop CS3 Extend 的图像分析功能测出微透镜高度和腔长的相对关系,从而根据(2)式计算出微透镜的高度。测得两个微透镜的高度均为 $8.5 \mu\text{m}$,由于熔接机对准机构的热漂移,法珀干涉仪光学腔长、图形测量的误差,测量的微透镜高度约有 $0.5 \mu\text{m}$ 的误差。

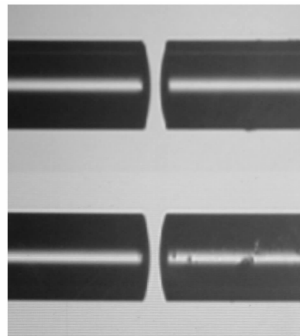


图 4 制作的微透镜光纤法珀干涉仪

Fig. 4 Micrograph of a micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer

图 5 为微透镜光纤法珀干涉仪的透射谱,测得精细度为 78,峰值透过率为 73%;自由光谱区范围为 32.28 nm,由此计算出法珀腔光学腔长 $nL = 36.7 \mu\text{m}$,微透镜顶点间距离 $d = 10.5 \mu\text{m}$ 。在图 5(a)

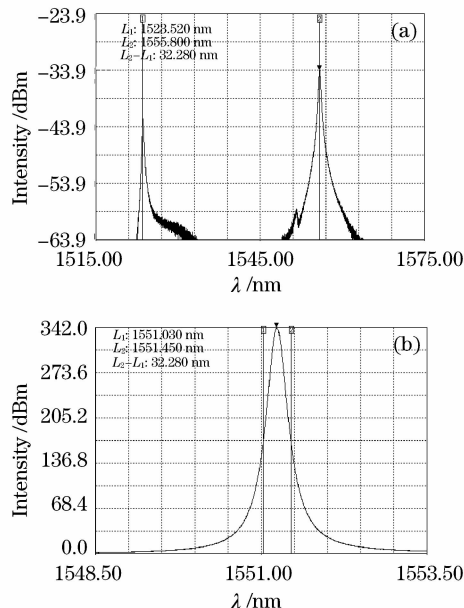


图 5 微透镜光纤法珀干涉仪的透射谱。(a) 干涉仪的自由光谱区范围;(b) 干涉仪的半峰全宽

Fig. 5 Transmission spectrum of the micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer. (a) Free spectral range of the interferometer; (b) full width at half maximum (FWHM) of the interferometer

对数坐标下可以观察到位于 1523.5 nm 的第一个透射峰不对称,这源于所用的放大自发辐射(ASE)光源的光谱在 1531 nm 有一个很强的峰,而 1523.5 nm 正位于 ASE 光源光谱的上升沿,从而导致测量的透射峰不对称。同时可以观察到透射谱中出现了高阶横模,其强度与相邻透射峰相比,低约 25 dB。

调节微透镜顶点之间的距离 d , 改变微透镜光纤法珀干涉仪的腔长, 测量在不同的微透镜顶点距离下干涉仪的透射谱和峰值透过率, 如图 6 所示。在微透镜顶点间距离达到 70 μm , 法珀腔的光学腔长 100 μm 时, 干涉仪的峰值透过率仍然大于 50%; 在 10% 的峰值透过率要求下, 法珀腔的光学腔长可以做到 250 μm 。

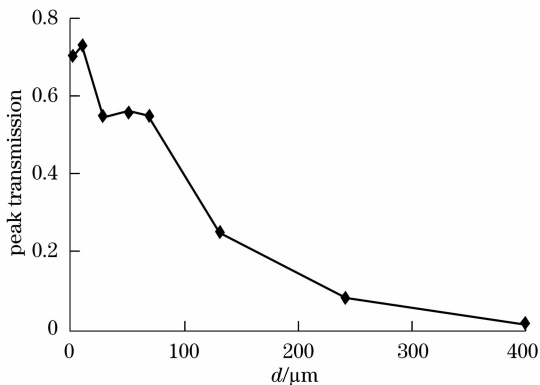


图 6 微透镜光纤法珀干涉仪峰值透过率同微透镜顶点间距离 d 的关系

Fig. 6 Relationship between peak transmission of the micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometer, and the spacing of the two micro-lenses, d

4 结 论

提出了一种微透镜光纤法珀干涉仪结构, 通过在镀膜单模光纤端面制作微透镜, 利用微透镜的会聚作用, 使法珀腔的模场和单模光纤的模场良好地匹配, 从而获得高的精细度和低的插入损耗。利用 NOA61 紫外固化光学胶作为微透镜材料, 在光纤熔解机上成功制作了微透镜光纤法珀干涉仪, 微透镜高度 8.5 μm , 自由光谱区范围 32.28 nm, 精细度 78, 峰值透过率 73%。该微透镜光纤法珀干涉仪制作方法简单, 成本低, 可以封装成光纤法珀滤波器和传感器, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

1 Rao Y J. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006,

12(3): 227~237
 2 Jiang Yi. White light interferometry for the measurement of extrinsic Fabry-Pérot interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(03): 381~384
 江 毅. 测量光纤外腔 Fabry-Pérot 干涉仪的白光干涉术[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 381~384
 3 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*. 2008, **28**(2): 255~258
 邓洪有, 饶云江, 冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258
 4 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
 段德稳, 朱 涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
 5 Jing Zhenguo, Yu Qingxu, Zhang Guiju *et al.*. A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1347~1351
 荆振国, 于清旭, 张桂菊等. 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1347~1351
 6 Wang Wei, Rao Yunjiang, Tang Qingtao *et al.*. Micromachining of an in-fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor by using a femtosecond laser. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1660~1664
 王 维, 饶云江, 唐庆涛等. 飞秒激光加工的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1660~1664
 7 Jiang Shaoji, Liang Youcheng, Zhu Xi *et al.*. Asymmetric Fabry-Pérot interferometric cavity for fiber optical sensors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 563~565
 8 Yu B, Pickrell G, Wang A. Thermally tunable extrinsic Fabry-Pérot filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(10): 2296~2298
 9 Yufei Bao, Stephon K. Ferguson, Donald Q. Snyder. Waferless fiber Fabry-Pérot filters: US, 6904206[P], 2005
 10 Qi B, Pickrell G R, Xu J C *et al.*. Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(11): 3165~3171
 11 Kim K R, Chang S, Oh K. Refractive microlens on fiber using UV-curable fluorinated acrylate polymer by surface-tension[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(8): 1100~1102
 12 Laurant N, Guilhabert B, Gu E *et al.*. Tunable single-mode fiber-VCSEL using an intracavity polymer microlens[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(19): 2831~2833
 13 An H L. Theoretical investigation on the effective coupling from laser diode to tapered lensed single-mode optical fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(1-3): 89~95
 14 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *Laser Principle* [M]. 4th ed, Beijing: Publishing House of National Defense, 2000
 周炳昆, 高以智, 陈国嵘等. *激光原理* [M]. 第 4 版, 北京: 国防工业出版社, 2000
 15 Norland Products Inc. Norland Optical Adhesive 61. <https://www.norlandprod.com/adhesives/nea61pg2.html>
 16 Corning Inc. Corning SMF-28 Optical Fiber Product Information. <http://www.corning.com/opticalfiber>