

飞秒激光刻蚀 V 型光纤微腔及其干涉谱特性

张伟刚 刘卓琳 殷丽梅

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 实验发现飞秒激光单步刻蚀的光纤微腔两个反射壁与纤芯轴向并不完全垂直,微腔形状与飞秒激光经显微物镜聚焦后的焦点相对于光纤的位置有关。当激光经显微物镜聚焦于光纤侧表面时,刻蚀的微腔形状近似 V 型。与常规的光纤法布里-珀罗(F-P)腔相比,V 型光纤微腔干涉谱出现了自由光谱范围、微腔光损耗以及干涉条纹对比度与波长有关等反常现象。通过引入倾斜因子概念,构建了 V 型光纤微腔模型,推导出 V 型 F-P 腔干涉公式,初步建立了 V 型光纤微腔干涉理论。利用该理论研究了 V 型光纤微腔的干涉谱特性,数值模拟了不同倾斜度对光纤微腔干涉谱的影响。理论分析结果与实验光谱测量结果相符。

关键词 光学器件;飞秒激光;光纤微腔;倾斜因子;V 型法布里-珀罗干涉仪;激光微加工

中图分类号 TN253; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0706007

Femtosecond Laser Micro-Machined V-Shaped Fiber Micro-Cavity and Its Interference Spectrum Characteristics

Zhang Weigang Liu Zhuolin Yin Limei

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract It is found that two reflected walls of fiber micro-cavity fabricated by one-step femtosecond laser micro-machining technology are not perpendicular to the fiber axis. The cavity shape is decided by the relative position of focused femtosecond laser and fiber, which can be approximated as V-shaped when femtosecond laser is focused on the side surface of the fiber. Compared with conventional fiber Fabry-Pérot (F-P) cavity, the free spectral range, optical loss and the interference fringe of the V-shaped fiber F-P cavity contrast change with the wavelength, showing abnormal characteristics. By introducing the concept of inclination factor, V-shaped fiber micro-cavity model is constructed, the cavity interference formula and the V-shaped micro-cavity interference theory are established. According to this theory, the effect of reflector inclination degree on interferogram characteristics of V-shaped F-P micro-cavity is simulated. The simulated interferogram is verified by experimental results.

Key words optical devices; femtosecond laser; fiber micro-cavity; inclination factor; V-shaped Fabry-Pérot interferometer; laser micro-machining technology

OCIS codes 060.2310; 140.3945; 120.2230; 230.4000; 320.7090

1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪以其尺寸小、耐腐蚀及抗电磁干扰等优点,在复杂及恶劣环境得到了很好应用^[1,2]。光纤 F-P 干涉仪可分为本征型(IF-PI)、非本征型(EF-PI)和在线型(ILF-PI)三类。作为传感器应用,三者中的 ILF-PI 具有独特的结构

优势,其原因在于干涉腔中的介质为空气,作为传感的光纤空气腔与导入或反射的光纤外径相同。由于 ILF-PI 光纤传感器既具有 EF-PI 的横向应变不敏感和极小温度灵敏度等优点,同时又具有 IF-PI 的确定标距、免受应力集中等优点,因此这种光纤传感器具有非常好的潜在应用价值。

收稿日期: 2011-01-29; **收到修改稿日期**: 2011-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(10974100, 10674075, 60577018)和天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(10JCZDJC24300)资助课题。

作者简介: 张伟刚(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

近年来,飞秒激光在材料加工领域逐渐发展成为不可或缺的有力工具。超强飞秒激光能对大多数固体材料曝光,使其焦点处的自由电子、等离子体快速产生,致使材料表面被烧蚀^[3]。飞秒激光持续时间为飞秒量级,远小于材料中受激电子通过转移、转化等形式的能量释放时间,从根本上避免了热扩散的存在和影响^[4],实现了真正意义上的冷加工。利用飞秒激光微加工技术,可在光纤上刻蚀微通道^[5]、F-P干涉仪^[6~10]、微孔^[11]、微腔^[12,13]和长周期及超长周期光纤光栅^[14~16]等,用于折射率、应变等物理量的传感测量且能够获得较高的灵敏度。对于光纤F-P干涉腔的研制,人们追求的是两个反射壁与纤芯轴向的高垂直性(即两个反射壁的高度平行)^[7],而对于两个反射壁与纤芯轴向不完全垂直(即两个反射壁有一定的倾斜度)的情况则未给予足够重视,或者采用预补偿和双加工^[9]以及光纤端面光刻^[10]等方式进行校正,或者只对该现象做简要的解释^[8]。

本文作者在进行飞秒激光刻蚀光纤微腔实验时,曾经多次发现测量的干涉谱与常规光纤F-P干涉谱不符,并对此进行了深入的研究。激光强度在空间上一般呈高斯型分布,其特点是随着传输距离的增加,光束发散,光斑扩大,光场横向分布趋于平缓,即入射激光经过聚焦后在焦斑中心的位置强度最大;趋向于焦斑边缘时,强度逐渐减弱^[10]。当飞秒激光在光纤侧面刻蚀微腔时,作为透明材料的光纤对飞秒激光产生多光子吸收,且当激光能量达到破坏

阈值以上时才能有效地刻蚀。在刻蚀过程中,因物镜焦点位于光纤侧表面,其焦点处能量密度最大,从光纤表面沿径向至纤芯,激光光束趋于发散且能量密度逐渐减少,导致微腔形状偏离矩形,即微腔两侧反射壁与纤芯轴向不完全垂直,侧面观察时呈现类似V型槽状,这与常规的光纤F-P腔结构有所不同。

本文报道了利用飞秒激光在单模光纤上单步刻蚀两个反射壁与纤芯轴向并不完全垂直的光纤微腔干涉谱实验,发现微腔形状与飞秒激光经显微物镜聚焦后的焦点相对光纤的位置有关。针对光纤微腔干涉谱出现的自由光谱范围、微腔光损耗以及干涉条纹对比度与波长有关等反常现象,引入倾斜因子概念,构建了V型光纤微腔模型,推导出V型F-P腔干涉公式,初步建立了V型光纤微腔干涉理论,并利用该理论数值模拟了不同倾斜因子对光纤微腔干涉谱的影响。

2 光纤微腔的刻蚀

2.1 光纤微腔刻蚀装置

图1为飞秒激光刻蚀光纤微腔实验装置图。系统参数如下:飞秒激光中心波长800 nm,脉冲宽度50 fs,脉冲重复频率1 kHz,最大输出平均功率约2 W。实验前,将光束经显微物镜聚焦至光纤的侧表面,刻蚀中使用多个中性衰减片降低激光能量以获得最佳实验效果。

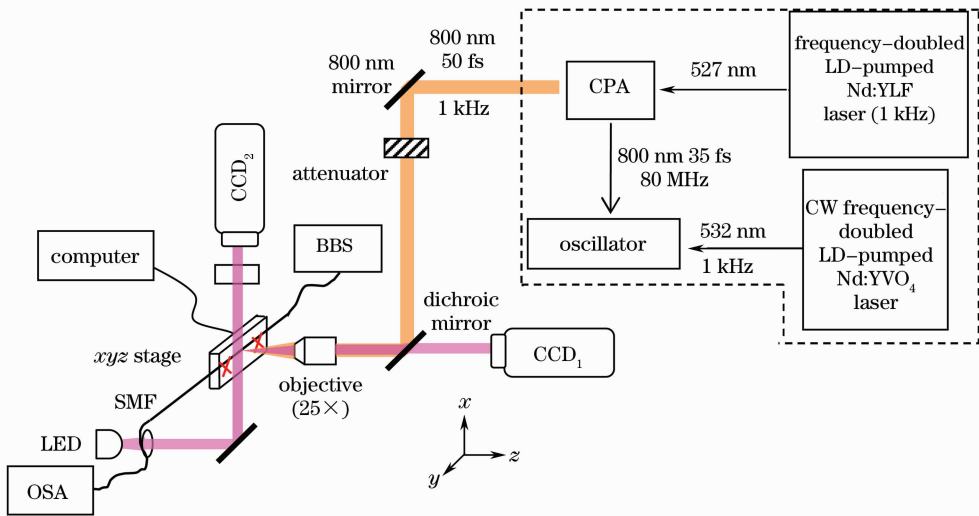


图1 飞秒激光刻蚀光纤微腔实验装置图

Fig.1 Experimental setup of fiber micro-cavity fabrication by femtosecond laser

由高斯光束远场发散角($\theta = 2\lambda / \pi\omega_0$)可知,束腰半径越小光斑发散越快,束腰半径越大则光斑发散越慢。这说明,聚焦透镜的数值孔径越大,刻蚀的光

纤微腔两个反射壁平行度越差,但数值孔径过小又会降低定位精度^[9]。综合上述考虑,选择物镜放大倍数为25,数值孔径为0.45,三维平移台移动精度

1 μm 。为实时监测微腔刻蚀,在实验装置的左侧放置一照明用发光二极管,使光纤得到充分照明,微腔刻蚀过程及其形状能实时被 CCD 成像,同时传递给图像监视器进行显示。

2.2 光纤微腔与干涉谱

刻蚀实验表明,光纤微腔形状与飞秒激光经显微物镜聚焦后的焦点相对光纤的位置有关。激光功率越大,光束平行度越好;刻蚀速度越慢,则微腔两个反射壁表面越粗糙^[9]。相对于表面粗糙度,两个反射壁的平行程度对微腔干涉谱及其条纹对比度影响更大。因此,本实验选择飞秒激光脉冲能量为 30 μJ 左右,三维平移台沿 x 轴扫描速度为 0.002 mm/s。图 2 为实验刻蚀的单模光纤微腔侧视图,可以明显看出微腔的两个反射壁不平行,呈现为 V 形状,且该 V 型腔的深度 h 与等效后等腰三角形的高度 H 相等。当然,有些微腔的深度小于等效后的等腰三角形高度^[10]。图 3 为实验测量得到的光纤微腔干涉谱。

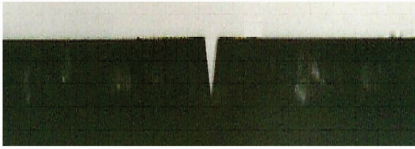


图 2 飞秒激光刻蚀 1550 nm 单模光纤微腔显微照片
Fig. 2 Microgram of micro-cavity written on 1550 nm single-mode fiber fabricated by femtosecond laser

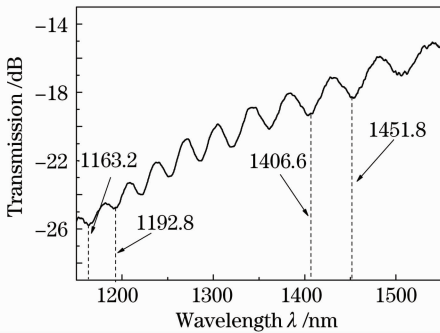


图 3 光纤 V 型 F-P 微腔实验测量干涉谱
Fig. 3 Experimental interference spectrum of fiber V-shaped F-P micro-cavity

微腔刻蚀实验表明,根据微腔刻蚀深度的不同,光纤微腔既可以是光纤 F-P 干涉仪,也可以是光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪。当微腔深度超过芯径时,可形成光纤 F-P 干涉仪;当微腔底部位于芯径内部时,则可形成光纤 M-Z 干涉仪。根据对图 3 干涉曲线的分析得知,实验刻蚀的光纤 V 型 F-P 微腔纤芯处两端面间距约 6 μm ,微腔深度为 $h=86 \mu\text{m}$ 。显然,这个深度保证了飞秒激光刻蚀的微腔透过了

单模光纤的纤芯,可以形成光纤 F-P 干涉仪。经过测量计算得知,微腔的底角约为 7.15° 。

3 理论建模及对比分析

3.1 光纤微腔理论建模

对于图 2 所示的飞秒激光刻蚀的光纤微腔形状,因其两个反射壁与纤芯轴向并不完全垂直,故常规的平行反射壁 F-P 干涉模型已不再适用。考虑到飞秒激光刻蚀的光纤微腔反射率很低,在理论分析这种 V 型光纤微腔时,其实际的多光束干涉过程可用双光束干涉加以近似。为简明分析问题且不失一般性,将图 2 的光纤微腔结构等效为倒立的等腰三角形,建立 V 型光纤微腔模型,如图 4 所示。其中等腰三角形的高度为 H ,底边长为 L ,微腔底角为 θ ;微腔深度为 h ,腔内介质折射率为 n_2 (对于空气腔, $n_2 \approx 1$),腔外纤芯折射率为 n_1 。

建立直角坐标系,设微腔左侧壁 A 点为坐标原点(0, 0),光束传播方向自左向右,利用光线追迹方法可以计算出实际光程,具体步骤如下。首先,光线由 A 点入射到微腔左侧壁上,其中一部分光线发生反射,另一部分光线折射进入微腔内。然后,进入微腔的光线传输到右侧壁的 B 点发生反射,再由 C 点折射出微腔;图中 P 点为 A 点反射光线和 C 点折射光线的反向延长线。最后,根据几何关系得到实际光线的程差为 $\delta = n_2(AB + BC) + n_1(CP - AP)$ 。图 4 中的点划线为光线在两个腔壁处反射或折射的法线。

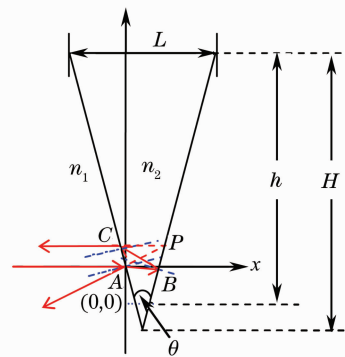


图 4 V 型光纤微腔模型示意图
Fig. 4 Schematic diagram for the V-shaped fiber cavity model

为了定量分析光纤微腔两个反射壁的平行程度(微腔底角 θ 的大小)对其干涉谱特性的影响,本文引入倾斜因子来定量描述微腔的倾斜度。考虑到微腔底角有一定限度,设最大底角为 θ_m ,定义倾斜因子 γ 为

$$\gamma = \frac{\theta}{\theta_m}, \quad (0 < \gamma < 1) \quad (1)$$

其中倾斜因子 γ 表征了光纤微腔两反射壁的平行程度。显然,底角 θ 越大,则 γ 越大。理论上,当 $\theta \rightarrow \theta_m$ 时, $\gamma \rightarrow 1$, 表示微腔倾斜因子趋向最大;当 $\theta \rightarrow 0^\circ$ 时, $\gamma \rightarrow 0$, 表示微腔倾斜因子接近最小,即两个反射壁趋向平行,成为理想的平行壁 F-P 干涉腔。

对于给定的光纤微腔,其腔的深度 h 、底角 θ_0 等微腔尺寸是固定的。若给定光束的入射角,则可以计算出两束相干光线间的光程差。经模拟分析可知,光程差 δ 可表示为

$$\delta = k\lambda + f(\gamma), \quad (2)$$

式中 k 为常数, f 是与倾斜因子 γ 或底角 θ 相关的函数。 δ 的计算,可由几何关系式 $\delta = n_2(AB + BC) + n_1(CP - AP)$ 得到。

根据双峰测量方法,设 $\lambda_1, \lambda_2 (\lambda_1 < \lambda_2)$ 是干涉谱中两个相邻谱峰对应的波长值,它们的干涉级次分别为 m 和 $m + 1$ 。令 $\Delta\varphi$ 为两束光的初始相位差,于是有

$$\frac{2\pi\delta_1}{\lambda_1} + \Delta\varphi = 2m\pi, \quad (3)$$

$$\frac{2\pi\delta_2}{\lambda_2} + \Delta\varphi = 2(m + 1)\pi. \quad (4)$$

将(3),(4)式相减并联合(2)式,令 $S = \lambda_2 - \lambda_1$, 得到

$$f(\gamma) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{S}, \quad (5)$$

式中 S 为自由光谱范围,即光纤微腔干涉谱中相邻两个波谷或波峰之间的距离。

3.2 光纤微腔光谱模拟

在分析光纤微腔实验干涉谱测量数据的基础上,根据上面建立的 V 型光纤微腔模型进行了干涉谱数值模拟。理论分析表明,干涉谱的形状和 S 的大小由微腔内的折射率 n_2 和光程差 δ 决定,而光程差 δ 又与倾斜因子 γ 有关。 γ 大小不同,会使光纤微腔干涉谱的峰值位置和自由光谱范围发生变化。根据全反射定律,大于全反射角的光线将无法进入微腔。因此,对于给定的光纤,刻蚀的微腔必定存在一个最大的底角 θ_m 。对于单模光纤,该微腔最大底角不超过 40° 。于是,光谱数值模拟只需考虑入射角不大于 40° 的光线相干情况即可。

设微腔纤芯处两端面间距为 $15 \mu\text{m}$, $\theta_m = 40^\circ$ 。图 5 为底角 θ 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,每间隔 5° 时模拟得到的光纤微腔系列干涉谱。模拟分析表明,随着倾斜因子 γ 增大,自由光谱范围 S 变小,这说明光程差 δ 随之在减小。

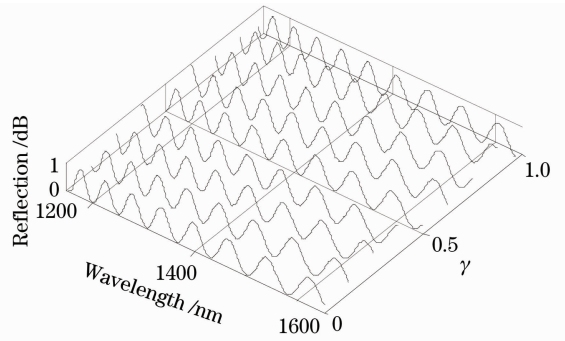


图 5 光纤微腔干涉谱随倾斜因子 γ 的变化
Fig. 5 Interference spectrum of fiber micro-cavity changes with inclination factor

从图 5 可以看出,对于不同的倾斜因子 γ ,光纤微腔干涉谱峰值位置及自由光谱范围亦不同。当 γ 从 1 变化到 0 时,干涉谱发生了蓝移,这表示光束在微腔中的光程差 δ 在逐渐减小。图 6 给出了 γ 在 $0.2 \sim 0.4$ 之间变化时的光谱移动幅度,其中 A, C 代表两个相邻谐振峰波谷的变化, B 代表二者的间隔变化。此时,光纤微腔中的光程差不能简单地用 n_2L 表示,而应由(2)式计算。

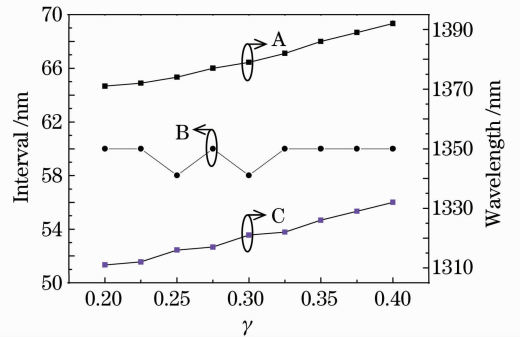


图 6 两相邻谐振峰波谷与其间隔关系拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of interval of two adjacent resonant wavelength peaks

3.3 理论实验对比分析

就微腔刻蚀实验而言,若激光束呈现良好的高斯分布且与纤芯轴向完全垂直,则刻蚀的微腔形状接近等腰三角形。理论与实验对比分析步骤如下。

1) 计算实验刻蚀的微腔结构参数,判断其形状。

首先,对实验干涉谱进行分析。由图 3 可见,干涉谱的自由光谱范围向着长波方向逐渐增大,这与常规 F-P 干涉仪的基本特征一致,尚不能说明刻蚀的微腔形状呈 V 型。

其次,采用两种模型对比分析。选取两个不同波段中两相邻波谷数值(在 1100 nm 波段,取 $\lambda_1 = 1163.2 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1192.8 \text{ nm}$;在 1400 nm 波段,取

$\lambda_1 = 1406.6 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1451.8 \text{ nm}$), 采用平行腔 F-P 干涉仪公式 $nL = \lambda_1 \lambda_2 / [2(\lambda_2 - \lambda_1)]$, 计算得到的微腔长度均约 $23 \mu\text{m}$ 。而根据本文建立的理论模型及其关系式, 对图 3 测量数据计算得到的微腔纤芯处两个端面间距则约 $6 \mu\text{m}$, 该值与实际测量值相符。

最后, 综合对比, 确定微腔形状。对比上述分析可见, 平行微腔与 V 型微腔二者计算结果相差约 4 倍。这说明本实验刻蚀的微腔形状与常规 F-P 腔不同, 它更接近具有一定倾斜因子的 V 型腔。进一步分析表明, 该微腔的底角 $\theta \approx 7.1^\circ$, 深度 $h = 86 \mu\text{m}$, 其深度已超过芯径, 实际形成了 V 型光纤 F-P 微腔。

2) 根据实验刻蚀微腔参数进行光谱模拟, 研判模型建构的合理性和理论分析的有效性。

首先, 取 $\theta \approx 7^\circ$, 以图 3 光纤微腔干涉谱在 1400 nm 波长附近的波谷为例, 计算不同波长下反射光与入射光的强度比值, 如图 7 所示。

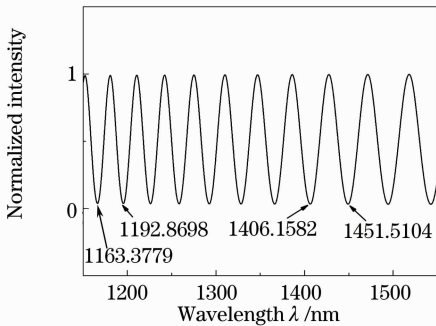


图 7 不同波长下反射光与入射光强度的比值

Fig. 7 Ratio of reflected intensity to incident intensity as a function of wavelength

其次, 对图 3 和图 7 进行对比分析, 以检验理论模型的合理程度。图 8 为实验测量与模拟结果的波峰、波谷对应波长值。其中, 实心点和空心点分别为波谷和波峰对应的数据点; 横坐标代表理论模拟值, 纵坐标代表实验测量值; 虚线为连接横、纵坐标轴的对角线, 它代表理论分析与实验测量完全吻合的情况。研究表明, 理论分析与实验测量的波峰与波谷差的平均值分别为 1.06 nm 和 -0.54 nm , 最大差值为 9.6 nm , 不超过对应波长的 0.64% , 即理论与实验结果基本吻合。这说明, 本文构建的模型可用于 V 型光纤微腔分析, 上述分析结果是有效的。

3) 深入分析影响 V 型光纤微腔损耗主要因素, 探索光纤微腔的可能应用。

首先, 研究微腔损耗主要因素。理论和实验研究表明, 光纤微腔中的光损耗与刻蚀参数、微腔形状

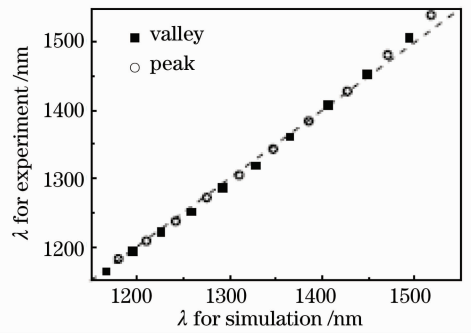


图 8 实验测量与模拟结果的波峰、波谷对应波长值

Fig. 8 Wavelength values of experimental measurements and simulation results corresponding to the peaks and valleys

及传输波长有关, 其影响因素复杂。为分析简明且突出微腔干涉机理阐释, 图 7 的模拟计算仅考虑了材料色散因素, 尚未计及微腔损耗的影响。对此, 认为主要有两个方面的原因。一方面, 刻制的光纤微腔形状与飞秒激光经显微物镜聚焦后的焦点相对光纤的位置有关, 加之刻蚀过程中受刻蚀技术、工艺的限制以及外界因素的影响或干扰, 微腔的形状与理想的三角形有差异, 两个腔壁不是理想的平面, 因而光反射率有所降低。另一方面, 根据飞秒激光与材料相互作用机理, 飞秒激光入射到光纤上, 在作用区域内材料形成高温高压等离子体, 除了以喷发的形式飞溅去除之外, 尚有残留的等离子体会粘附到光纤微腔的侧壁, 以致降低了腔壁表面的光滑程度, 影响光的反射效率, 如图 3 中的干涉条纹对比度实验测量值为 2 dB 左右, 且光波在 V 型腔中的损耗规律是从短波至长波逐渐减小的。由于微腔为开腔形式, 其散射光出射后将无法再回到光纤纤芯内继续传输。

图 9 为图 3 中的干涉谱波峰损耗(实圆点)和波谷(十字点)绝对值与对应波长四次方倒数的拟合曲线, 其线性拟合度分别为 0.9904 和 0.9962 。

其次, 探索光纤微腔的可能应用。对于飞秒激光刻蚀的 V 型光纤微腔, 由于两个反射壁与纤芯轴向并不完全垂直, 因此对弯曲特别敏感。初步实验发现, 当该微腔向开口一端弯曲时, 微腔两个反射壁趋于平行, 其干涉条纹整体发生蓝移; 反之, 当微腔向开口的反向一端弯曲时, 进一步增大了微腔两个反射壁的非平行程度, 其干涉条纹整体发生红移。初步实验已证明了这一光谱特性。预期这种 V 型光纤微腔在弯曲(曲率)、扭转(扭角、扭矩、扭应变)、化学、生物以及环境等传感方面具有重要的应用前

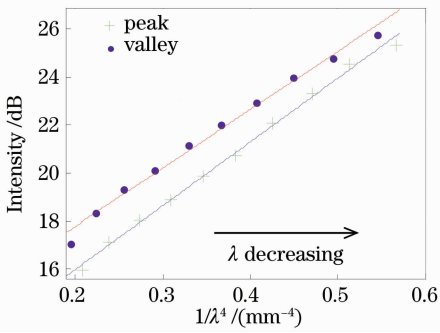


图9 干涉谱波谷和波峰损耗与波长四次方倒数的拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of loss and the reciprocal of fourth power wavelength

景,深入研究工作正在进之中。

4 结 论

将飞秒激光经显微物镜聚焦于单模光纤侧表面,发现单步刻蚀的光纤微腔两个反射壁与纤芯轴向并不垂直,测量的光纤微腔干涉谱有别于常规的光纤 F-P 干涉谱,其特点是自由光谱范围沿长波方向逐渐增大,干涉谱波谷和波峰损耗的绝对值随波长的增大而减小。利用光线追迹法构建了 V 型光纤微腔模型,初步建立了 V 型光纤 F-P 干涉理论。通过引入倾斜因子来定量描述微腔的倾斜度,对 V 型光纤 F-P 干涉谱特性进行了理论分析,数值模拟了微腔反射壁倾斜度对其干涉谱的影响,理论分析结果与实验光谱测量相符。本文建立的 V 型光纤微腔模型及其理论分析和实验结果,对研究两个反射壁非平行的干涉腔具有参考价值。并且,V 型光纤微腔是一种新型的光纤 F-P 腔,对其结构进行优化以及研制相应的新型 V 型光纤微腔器件,有望在结构弯曲和扭转、生物化学检测以及环境监测预警等方面获得应用。

致谢 感谢朱晓农教授、张楠博士对本研究实验部分的支持。

参 考 文 献

1 Anbo Wang, Hai Xiao, J. Wang *et al.*. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(10): 1495~1501

2 Hai Xiao, Jiangdong Deng, Gary Pickrell. Single-crystal sapphire fiber-based strain sensor for high-temperature applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2276~2283

3 Ming Li, Saipriya Menon, John P. Nibarger *et al.*. Ultrafast electron dynamics in femtosecond optical breakdown of dielectrics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(11): 2394~2397

4 A. H. Ghin, R. W. Schoenlein, T. E. Glover *et al.*. Ultrafast structural dynamics in InSb probed by time-resolved X-ray diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**: 336~339

5 Y. Lai, K. Zhou, L. Zhang *et al.*. Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2559~2561

6 Tao Wei, Yukun Han, Yanjun Li *et al.*. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5764~5769

7 Tao Wei, Yukun Han, Hai-Lung Tsai *et al.*. Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6): 536~538

8 Yunjiang Rao, Ming Deng, Dewen Duan *et al.*. Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 14123~14128

9 M. Li, G. Cheng, W. Zhao *et al.*. Inscription high-fringe visibility Fabry-Perot etalon in fiber with a high numerical aperture objective and femtosecond laser [J]. *Laser Physics*, 2008, **18**(8): 988~991

10 Wu Yiming, Li Ming, Cheng Guanghua. Fabricating micro fiber Fabry-Perot sensor with femtosecond laser pulses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 584~587

吴易明,李 明,程光华. 飞秒激光制造微型光纤法布里-珀罗干涉传感器 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 584~587

11 Ying Wang, D. N. Wang, Minwei Yang *et al.*. Refractive index sensor based on a microhole in single-mode fiber created by the use of femtosecond laser micromachining [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3328~3330

12 Zhang Qi, Zhang Weigang, Zhang Jian *et al.*. Micro-cavity fabricated by femtosecond lasers and its application in fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 713~717

张 琦,张伟刚,张 健等. 飞秒激光蚀刻光纤微腔及其在光纤环衰荡腔中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 713~717

13 Wang Chunbao, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Research on character of the cascade of fiber cavity and connection with fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1485~1489

王春宝,张伟刚,刘卓琳等. 光纤微腔级联性质及布拉格光栅特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1485~1489

14 Minwei Yang, D. N. Wang, Ying Wang *et al.*. Long period fiber grating formed by periodically structured microholes in all-solid photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2183~2189

15 Shujing Liu, Long Jin, Wei Jin *et al.*. Structural long period gratings made by drilling micro-holes in photonic crystal fibers with a femtosecond infrared laser [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5496~5503

16 Fan Hongjian, Zhang Weigang, Yan Aidong *et al.*. Spectrum analysis for non-uniform ultra-long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1547~1552

范弘建,张伟刚,颜爱东等. 非均匀超长周期光纤光栅的频谱分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1547~1552