

激光与光电子学进展

超小自聚焦光纤探头对光纤 F-P 干涉信号的影响

王驰, 郑园成, 陈金波*, 孙建美, 陈伟, 陈斐璐, 王飞

上海大学机电工程与自动化学院精密机械系, 上海 200444

摘要 基于超小自聚焦(GRIN)光纤探头的干涉条纹对比度,研究了GRIN光纤探头对F-P干涉信号的影响。利用高斯光束分析超小GRIN光纤探头干涉条纹对比度理论公式,建立相应的测试实验系统。实验结果表明:聚焦光斑直径为15 μm的超小GRIN光纤探头,在腔长为600~1350 μm范围内,条纹对比度可以保持在0.8以上。而单模光纤探头的条纹对比度如果要保持在0.8,腔长范围仅为130~530 μm。因此,所研制的超小GRIN光纤探头可有效提高F-P干涉仪在大腔长时的干涉条纹对比度,为超小GRIN光纤探头在较长初始腔长或大动态范围的应用研究中提供了理论依据。

关键词 F-P干涉仪;超小GRIN光纤探头;高斯光束;条纹对比度

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213082

Influence of Ultra-Small GRIN Fiber Probe on Fiber F-P Interference Signal

Wang Chi, Zheng Yuancheng, Chen Jinbo*, Sun Jianmei, Chen Wei, Chen Feilu, Wang Fei

*Department of Precision Mechanical Engineering, School of Mechatronic Engineering and Automation,
Shanghai University, Shanghai 200444, China*

Abstract Based on the interference fringe visibility of the ultra-small GRIN fiber probe, we study the influence of the GRIN fiber probe on the F-P interference signal. Furthermore, we analyze a theoretical formula of the fringe visibility of the ultra-small GRIN fiber probe based on the Gaussian beam and establish a corresponding test experimental system for verification. The experimental results show that for the ultra-small GRIN fiber probe with a focal spot diameter of 15 μm, the fringe visibility remains above 0.8 within a cavity length of 600–1350 μm. However, for single-mode fiber probes, the fringe visibility remains at 0.8 within a cavity length range of 130–530 μm. Therefore, the proposed ultra-small GRIN fiber probe improves the fringe visibility of the F-P interferometer for a long cavity length. This paper provides the theoretical foundation for further research into the application of the ultra-small GRIN fiber probe, which requires a long initial cavity length or a large dynamic range.

Key words F-P interferometer; ultra-small GRIN fiber probe; Gaussian beam; fringe visibility

1 引言

光纤 Fabry-Perot(F-P)干涉仪因其体积小、安全可靠、抗电磁干扰、灵敏度高优点,可以实现多种物理量的测量,包括压力^[1]、温度^[2]、磁场^[3]、超声^[4]、振动^[5]等。F-P干涉仪通常是由普通单模光纤(Single-mode fiber, SMF)与反射端面构成的一个空气密封微腔结构,该结构利用反射端面感知外界参数的变化以改变微腔的长度,从而引起干涉信号改变来测量外界参数。上述结构被广泛应用于油压、深井压力、生物医学动脉等方面的测量。目前大多数光纤F-P干涉

仪使用SMF探头来传输信号,比如Zhou等^[6]开发的一种位移传感器和Li等^[7]研究的一种压力传感器。虽然普通SMF探头的结构简单,但是随着腔长的增加,干涉信号的条纹对比度会迅速降低,导致干涉信号的灵敏度和信噪比也随之降低。因此,可以通过提高干涉信号的条纹对比度,来增加信噪比和灵敏度,这种光纤探头在某些需要较长初始腔长或较大动态范围的应用领域至关重要,如结构健康检测中的裂纹和断裂检测。

为了提高F-P干涉仪的条纹对比度,有学者采用对光纤端面或反射面涂覆反射介质提高光纤和反射面

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2021-11-29; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61773249, 62175144)、上海市科技创新行动计划(20142200100)

通信作者: *jbchen@shu.edu.cn

反射率的方法^[8-10],但是光纤端面的涂覆工艺较为复杂,对条纹对比度的增强效果也极为有限。Gong等^[11-12]利用氢氟酸将超小自聚焦(Gradient-index, GRIN)光纤透镜腐蚀出一个微腔,并将其与SMF拼接,提高传感器的条纹对比度。然而对GRIN光纤透镜刻蚀微腔的难度较大,很难达到预期效果。随后,Zhang等^[13]利用1/4节距的GRIN光纤透镜与SMF进行拼接对出射光束进行准直,并实际研究了GRIN光纤探头在反射面反射率为0.04、腔长在500 μm以内时,对干涉条纹对比度的提高作用。Zhang等^[14]将1/4节距的GRIN光纤透镜和SMF进行拼接,制作了一个高灵敏度、高信噪比的涤纶树脂(PET)膜超声传感器。然而,在实际应用中还需要借助高反射面,以减少信号干扰。

目前,关于GRIN光纤探头在F-P干涉仪的条纹对比度研究鲜有技术报道。本文在已有研究成果的基础上,根据超小GRIN光纤探头的光学模型和高斯光束的传输特性,采用解析法推导了探头条纹对比度的理论方程。同时,搭建了一套光纤F-P干涉仪条纹对比度检测试验系统,分析并验证了实验和理论误差的影响因素。实验结果表明,对给定的超小GRIN光纤探头,在较大腔长时可以有效提高F-P干涉仪条纹对比度。

2 基本原理

超小GRIN光纤探头的光学模型,由SMF、无芯光纤(No-core fiber, NCF)和GRIN光纤依次组成^[15-19],如图1所示。其中:SMF用于传光;无芯光纤作为一种折射率均匀的光纤,可以对SMF光束进行扩束,从而克服SMF模场直径小的影响;GRIN光纤作为一种折射率渐变光纤,用于自聚焦。光源的光束经过SMF之后,由无芯光纤扩束、GRIN光纤聚焦,最终输出准直或聚焦光束。在图1中, L_0 、 L_1 分别为NCF和GRIN的长度, w_f 为聚焦光斑半径, z_w 为聚焦光斑位置到探头输出端面的距离。值得说明的是,在探头设计的过程中, L_0 和 L_1 的大小直接影响GRIN光纤探头的聚焦参数 w_f 和 z_w 。

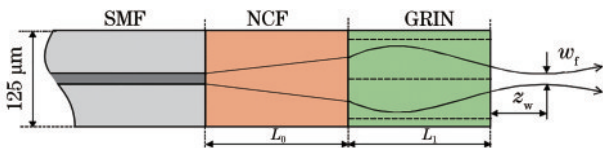


图1 超小GRIN光纤探头的光学模型

Fig. 1 Optical model of ultra-small GRIN fiber probe

基于SMF的F-P干涉仪的结构模型通常如图2所示。由于光纤端面的反射率很低(大约为0.04),二次以上的反射强度很小,干涉信号的光强可以采用双光束干涉模型建模分析。

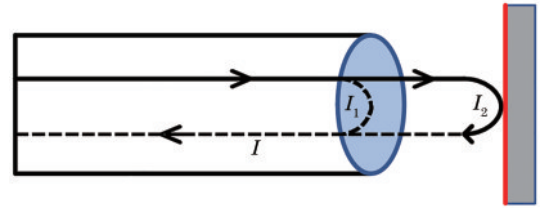


图2 F-P干涉仪的结构模型

Fig. 2 Structure model of F-P interferometer

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi n z}{\lambda} + \varphi\right), \quad (1)$$

式中: I_1 为光束在光纤端面反射的光强; I_2 为光束经过F-P腔在反射面反射的光强; I 为干涉信号的光强; z 为F-P干涉仪腔长; n 为F-P腔内填充介质的折射率,通常 $n=1$ 为空气的折射率; φ 为干涉信号的初始相位。

干涉信号的条纹对比度 V 可以表示为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = \frac{2\sqrt{I_1/I_2}}{1 + I_1/I_2} = \frac{2\sqrt{c}}{1 + c}, \quad (2)$$

式中: I_{\max} 为干涉信号的最大光强; I_{\min} 为干涉信号的最小光强; $c = I_1/I_2$ 。

由式(2)可知,当 $I_1 = I_2$ 时,条纹对比度达到最大值1。经光纤端面出射的光束,在反射端面反射后重新返回光纤时会存在耦合损耗,并且耦合损耗的光强会随着腔长的增加而增加,因此反射光强 I_2 会随着腔长的增加不断降低^[19]。

为了更精确计算反射光 I_2 的光强,需要考虑耦合效率。有学者利用平面波对耦合效率进行计算^[20],但是平面波不能真正反映光束的光强分布。

用高斯分布的形式进行分析,如图3所示。根据光学镜像原理,探头接收到的光强信号可以看作是从距离探头输出平面 $2z$ 处的虚拟GRIN光纤探头捕获的光强信号。

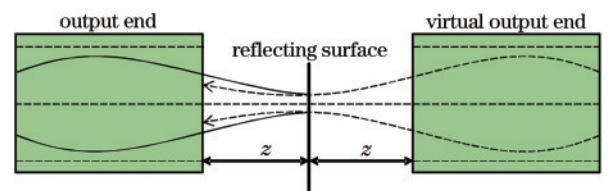


图3 GRIN光纤探头反射光束耦合模型

Fig. 3 Coupling model of reflected beam of GRIN fiber probe

根据文献[19],图3中的光束由GRIN光纤输出,经反射端面反射回GRIN光纤端面时的光强信号可以由高斯分布表示:

$$I(r, 2z) = \frac{2I_0}{\pi w^2(2z)} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2(2z)}\right), \quad (3)$$

式中: I_0 为探头的输出光强; w 为光斑半径; z 为GRIN光纤端面到反射面的距离。

在距探头输出平面的距离 $2z$ 处的光斑半径为

$$\omega(2z) = \omega_f \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda(2z - z_w)}{\pi\omega_f^2} \right]^2} \quad (4)$$

结合式(3)、式(4),可以计算出光纤探头的耦合效率为

$$\eta(2z) = \frac{\int_0^d I(r, 2z) 2\pi r dr}{I_0} = 1 - \exp \left\{ -d^2 \cdot \left\{ 2\omega_f^2 + 2 \left[\frac{\lambda}{\pi\omega_f} \cdot (2z - z_w) \right]^2 \right\}^{-1} \right\} \quad (5)$$

式中: d 为接收光纤探头的直径。

考虑耦合效率后的反射光强 I_1, I_2 可以表示为

$$I_1 = I_0 R_1, \quad (6)$$

$$I_2 = I_0 (1 - R_1)^2 R_2 \eta(2z), \quad (7)$$

式中: R_1, R_2 分别为光纤端面 and 反射端面的反射率。

结合式(2)、式(5)~式(7),可求腔长为 z 时的条纹对比度 $v(z)$ 为

$$v(z) = \frac{2\sqrt{R_1 R_2 (1 - R_2)^2 \eta(2z)}}{R_2 (1 - R_2)^2 \eta(2z) + R_1} \quad (8)$$

由式(8)可知,在给定源参数和探头结构参数的情况下,条纹对比度的函数与工作距离、光斑大小和腔长有关。需要注意的是,由于超小 GRIN 光纤探头的变折射率特点,当光源耦合到自聚焦透镜时,透镜的有效数值孔径限制了进入透镜的光量,造成光耦合损耗^[21]。这一原因是 GRIN 光纤的变折射率特点使其光耦合的效率在中心处最大,并沿着径向逐渐减小,因此光束的发散和探头倾斜会导致超小 GRIN 光纤探头的有效接收直径小于实际的 GRIN 光纤直径。为了反映探头的

实际耦合效率,研究分析了 GRIN 光纤的有效直径 kd (k 为有效直径因子),则实际的耦合效率 $\eta(2z, k)$ 和条纹对比度 $v(z, k)$ 分别为

$$\eta(2z, k) = \frac{\int_0^{kd} I(r, 2z) 2\pi r dr}{I_0} = 1 - \exp \left\{ -k^2 d^2 \cdot \left\{ 2\omega_f^2 + 2 \left[\frac{\lambda}{\pi\omega_f} \cdot (2z - z_w) \right]^2 \right\}^{-1} \right\} \quad (9)$$

$$v(z, k) = \frac{2\sqrt{R_1 R_2 (1 - R_2)^2 \eta(2z, k)}}{R_2 (1 - R_2)^2 \eta(2z, k) + R_1} \quad (10)$$

3 实验系统搭建

在实验系统中,使用中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的宽带光源,采用台湾卓越的 GRIN 透镜光纤($50/125 \mu\text{m}$)。基于本实验室已研究的对超小自聚焦光纤探头的数值分析、设计仿真和制作方法^[15-19],设计了具有聚焦效果的 GRIN 光纤探头,具体参数如表 1 所示。图 4 为探头的研制过程,所使用的光纤熔融-切割一体机和具体熔接切割步骤,如图 4(a)、图 4(b)所示。具体研制过程为,首先,将 SMF 熔接上 NCF,再以第 1 个熔点 A 为起点,切割一定长度的 NCF,之后熔接 GRIN 光纤,并以第 2 个熔点 B 为起点,切割一定长度的 GRIN 光纤。最终制得聚焦光斑大小为 $15 \mu\text{m}$ 的超小 GRIN 光纤探头。

表 1 超小 GRIN 光纤探头设计参数

Table 1 Design parameters of ultra small GRIN fiber probe

Probe	L_0 / mm	L_1 / mm	z_w / mm	$2\omega_f$ / μm
GRIN	0.20	0.20	0.26	15

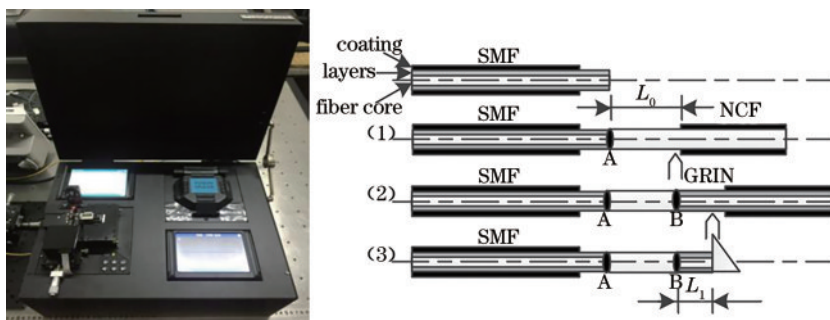


图 4 GRIN 光纤探头的研制过程。(a) 光纤熔融-切割一体机; (b) GRIN 光纤探头熔接步骤

Fig. 4 Manufacturing process of GRIN fiber probe. (a) Precision fiber cutting-fusion machine; (b) production process of GRIN fiber probe

图 5 为 F-P 干涉仪条纹对比度检测系统示意图,图 6 为对应图 5 的 F-P 干涉仪条纹对比度检测系统实物图。其中,探头和反射端面分别固定到调整平台 M、N 上,通过移动调整平台 M 调整探头到端面的距离以改变腔长。该系统由 C-L 波段放大自发辐射(ASE)宽带光源($1528 \sim 1565 \text{ nm}$)、3 dB 光纤环形器、2 个五维调整台 M、N(移动分辨率为 $5 \mu\text{m}$)、镀金反射端面

(反射率高达 0.9)、微型光谱仪(波长分辨率为 0.03 nm ,光强分辨率为 1 dB)和计算机等组成。其主要工作原理是:ASE 宽带光源发出的光,通过环形器分离后传递到超小 GRIN 光纤探头,然后垂直入射到反射端面,并通过五维调整台 M 不断调整探头与反射端面的距离来改变干涉腔长,然后利用微型光谱仪对干涉信号实现解调,最终由计算机获取其干涉信号。

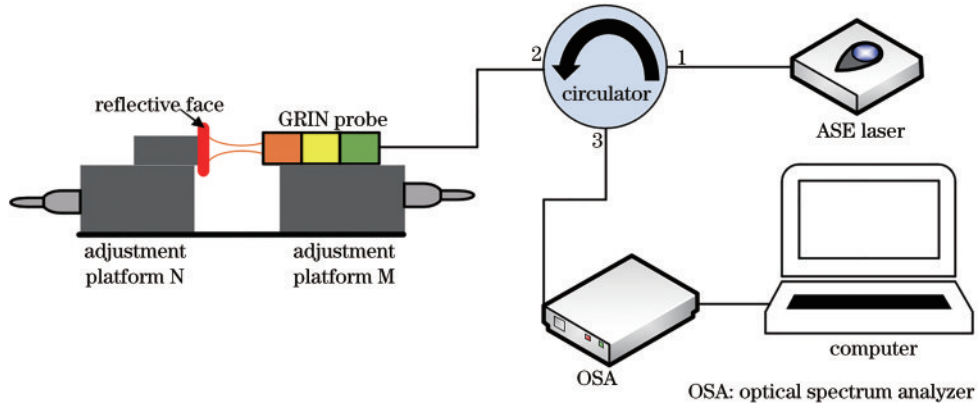


图 5 F-P干涉仪条纹对比度检测系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the fringe visibility detection system of F-P interferometer

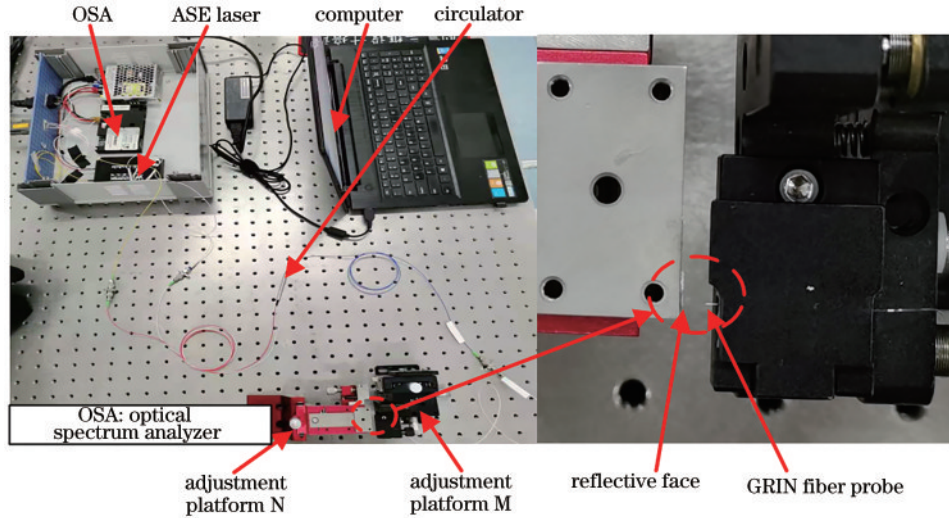


图 6 F-P干涉仪条纹对比度检测系统实物图

Fig. 6 Physical picture of the fringe visibility detection system of F-P interferometer

将 SMF 和 GRIN 光纤探头进行了对比实验,设置初始腔长为 $50\ \mu\text{m}$,以 $50\ \mu\text{m}\cdot\text{次}^{-1}$ 的速度向后移动五维调整台 M,直至腔长增加到 $2\ \text{mm}$ 。

4 测试结果分析与讨论

利用上述检测方案和系统,分别对 GRIN 光纤探头和 SMF 探头进行干涉条纹对比度实验,并进行对比分析。图 7 为 GRIN 光纤探头和 SMF 探头在腔长分别为 $250\ \mu\text{m}$ 、 $800\ \mu\text{m}$ 、 $1200\ \mu\text{m}$ 和 $1600\ \mu\text{m}$ 时的干涉光谱,其波峰和波谷分别对应式 (2) 中干涉信号 I_{max} 和 I_{min} ,因此通过波峰和波谷的光强可以计算得到干涉条纹对比度。

图 8 为超小 GRIN 光纤探头干涉条纹对比度的理论曲线和实测数据对比图。从图 8 中的理论条纹对比度曲线可知,在 $k=1$ 时(即 GRIN 光纤实际接收光束直径为 d),GRIN 光纤探头在聚焦位置附近($0\sim 250\ \mu\text{m}$)条纹对比度较低。随着腔长的增加,条纹对比度逐渐上升,且在 $1300\ \mu\text{m}$ 达到最大值 1。随后条纹对比度呈现下降趋势,在 $2\ \text{mm}$ 处条纹对比度下降到 0.9。当

$k=1$ 时,光纤探头的理论曲线和实验曲线具有相同的变化趋势,但是实验曲线变化的速度明显比理论快,导致峰值点前移,这是由于实际实验时会存在其他损耗,导致耦合效率下降。这里的损耗主要由两方面造成: 1) GRIN 光纤的最大入射角是变化的,最大入射角沿半径方向会逐渐减小,半径边缘位置的光无法完全耦合进 GRIN 光纤,导致 GRIN 光纤探头的有效直径减小; 2) 光纤与反射端面之间会存在一定倾角,造成反射回 GRIN 光纤端面的光也存在倾角和偏移,从而产生更多的损耗,因此实际实验中有效直径因子 $k < 1$,不同尺寸的光纤探头和实验会导致一定的差异。

需要注意的是,根据图 8 中的实测曲线,这里超小 GRIN 光纤探头的有效直径因子 k ,可采用模拟退火算法求解^[22-23],具体如下:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v_{\text{test}}(z(i)) - v_{\text{theory}}(z(i), k) - \mu]^2, \quad (11)$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v_{\text{test}}(z(i)) - v_{\text{theory}}(z(i), k)], \quad (12)$$

式中: $z(i)$ 为第 i 个点的腔长 ($i=0, 1, \dots, N$), N 为实验

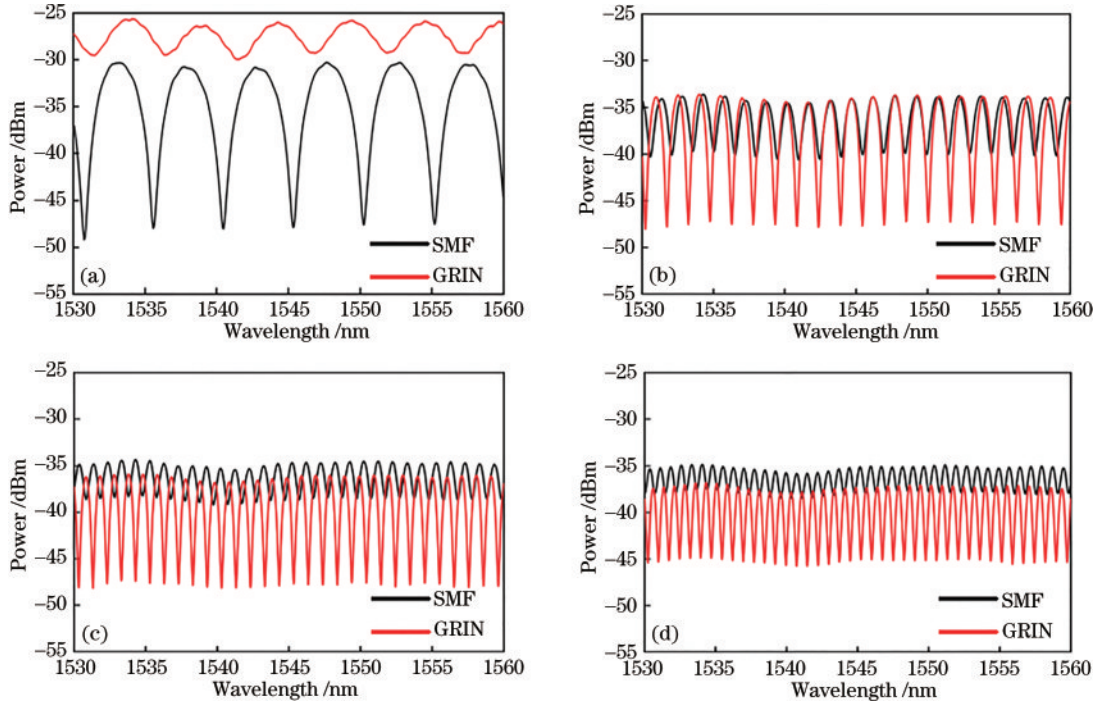


图 7 GRIN 和 SMF 光纤探头的干涉信号光谱。(a) 250 μm; (b) 800 μm; (c) 1200 μm; (d) 1600 μm

Fig. 7 Interference signal spectra of ultra-small GRIN fiber probe and SMF probe. (a) 250 μm; (b) 800 μm; (c) 1200 μm; (d) 1600 μm

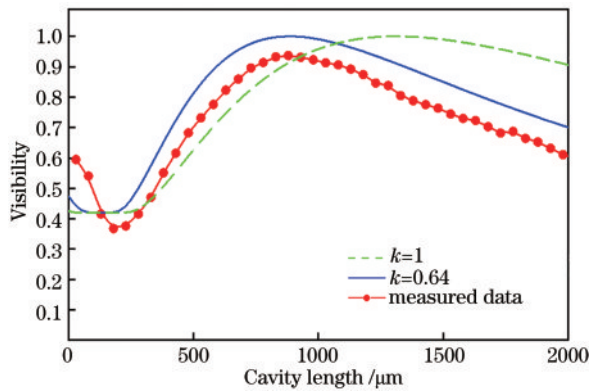


图 8 超小 GRIN 光纤探头的理论和测量数据

Fig. 8 Theoretical and measured data of ultra-small GRIN fiber probe

测试点数; $v_{\text{test}}(z(i))$ 、 $v_{\text{theory}}(z(i), k)$ 分别为 $z(i)$ 位置处的条纹对比度的实验值和理论值; μ 为条纹对比度的实验值和理论值之差的平均值; σ 为条纹对比度的实验值和理论值差值的平均方差。 σ 用于评估有效直径因子 k , 其值越接近于 1, 有效接收直径越接近 GRIN 光纤的实际直径。当 σ 达到最小值时, 可以求出有效直径因子 k 。需要说明的是, 采用差值的 σ 是由于实际实验中条纹对比度无法达到最大值 1, 即理论值一般优于实验值。

图 8 为超小 GRIN 光纤探头的理论和测量数据图。其中, 根据式 (12), GRIN 光纤探头有效直径因子 k 为 0.64。从图 8 中可知, 求出的有效直径理论条纹对比度和实验值几乎吻合。

对超小 GRIN 光纤探头和 SMF 探头之间的条纹

对比度进行比较, 如图 9 所示。随着腔长的增加, SMF 的条纹对比度在 250 μm 上升到最大值 0.95, 但当腔长增加到 2 mm 时, 条纹对比度逐渐下降到 0.25。而随着腔长的增加, GRIN 光纤探头的条纹对比度在 0~200 μm 先有一个小的下降, 由图 7(a) 可知, GRIN 光纤探头的干涉光强最高, 这主要是由于 GRIN 光纤实际的聚焦位置约为 400 μm。当腔长为 200 μm 左右时, 反射光束恰好聚焦在 GRIN 光纤接收端面, 致使反射光强 I_2 最大, 条纹对比度较低; 而当腔长在 200~900 μm 范围内时, GRIN 光纤探头的条纹对比度逐渐上升到最大值 0.94; 之后腔长增加到 2 mm 时, 条纹对比度下降到 0.6。

因此, 与 SMF 探头相比, GRIN 光纤探头在较大腔长时仍能保持较高的条纹对比度, GRIN 光纤探头

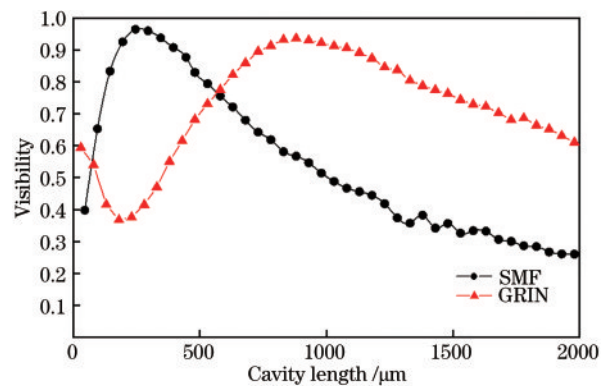


图 9 超小 GRIN 与 SMF 探头条纹对比度的比较

Fig. 9 Comparison of fringe visibility between ultra-small GRIN fiber probe and SMF probe

条纹对比度最高可达 SMF 的 2.4 倍。表 2 为两种探头的典型条纹对比度所对应的腔长。另外,从图 9 可知,在较短腔长 ($<100 \mu\text{m}$) 时,GRIN 光纤探头的条纹对比度也具有一定的优势。

表 2 典型条纹对比度对应腔长
Table 2 Typical visibility corresponds to cavity length

Probe	Visibility range		Peak position / Visibility
	>0.8	$0.5-0.8$	
SMF	130-530 μm	60-130 μm 530-1000 μm	250 μm / 0.95
GRIN	600-1350 μm	0-95 μm 350-600 μm 1350-2000 μm	900 μm / 0.94

5 结 论

在现有 GRIN 光纤探头的研究基础上,研究了超小 GRIN 光纤探头对 F-P 干涉仪条纹对比度的影响。首先,从理论上分析了 GRIN 光纤探头的条纹对比度公式。通过 GRIN 光纤的有效直径,研究了超小 GRIN 光纤探头的条纹对比度。然后,建立了相应 F-P 干涉条纹对比度的实验方案和系统,并对超小光纤探头进行了实际条纹对比度的测量。最后,利用模拟退火算法求出了 GRIN 光纤的有效直径,可知有效直径的条纹对比度理论数据与实验数据吻合性较好。实验结果表明,与 SMF 相比,超小 GRIN 光纤探头在大腔长时具有较高的条纹对比度。在 600~1350 μm 的腔长范围内,GRIN 光纤探头的条纹对比度保持在 0.8 以上。然而 SMF 探头的条纹对比度如果保持在 0.8,腔长范围仅为 130~530 μm 。所以,本文中所研制的超小 GRIN 光纤探头可以有效提高 F-P 干涉仪在大腔长时的干涉条纹对比度,为超小 GRIN 光纤探头在需要较长初始腔长或大动态范围的应用研究中提供理论依据和基础。

参 考 文 献

[1] Wang X, Jiang J F, Wang S, et al. All-silicon dual-cavity fiber-optic pressure sensor with ultralow pressure-temperature cross-sensitivity and wide working temperature range[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 521-529.

[2] Zhang P, Tang M, Gao F, et al. Simplified hollow-core fiber-based Fabry-Perot interferometer with modified vernier effect for highly sensitive high-temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 7100210.

[3] Lü R Q, Zhao Y, Wang D, et al. Magnetic fluid-filled optical fiber Fabry-Perot sensor for magnetic field measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(3): 217-219.

[4] Ma J, He Y, Bai X, et al. Flexible microbubble-based Fabry-Perot cavity for sensitive ultrasound detection and wide-view photoacoustic imaging[J]. *Photonics Research*,

2020, 8(10): 1558-1565.

[5] Xiong Y F, Xu F. Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2: 064001.

[6] Zhou X L, Yu Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(7): 1602-1606.

[7] Li C, Xiao J, Guo T T, et al. Interference characteristics in a Fabry-Perot cavity with graphene membrane for optical fiber pressure sensors[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(11): 2297-2306.

[8] Alcoz J J, Lee C E, Taylor H F. Embedded fiber-optic Fabry-Perot ultrasound sensor[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1990, 37(4): 302-306.

[9] Ran Z L, Rao Y J, Zhang J, et al. A miniature fiber-optic refractive-index sensor based on laser-machined Fabry-Perot interferometer tip[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7503: 75035U.

[10] Ushakov N, Liokumovich L. Resolution limits of extrinsic Fabry-Perot interferometric displacement sensors utilizing wavelength scanning interrogation[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5092-5099.

[11] Gong Y, Zhao T, Rao Y J, et al. A ray-transfer-matrix model for hybrid fiber Fabry-Perot sensor based on graded-index multimode fiber[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15844-15852.

[12] Gong Y, Guo Y, Rao Y J, et al. Fiber-optic Fabry-Perot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(23): 1708-1710.

[13] Zhang Y N, Li Y J, Wei T, et al. Fringe visibility enhanced extrinsic Fabry-Perot interferometer using a graded index fiber collimator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(3): 469-481.

[14] Zhang W L, Chen F Y, Ma W W, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a fringe visibility enhanced fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 11025-11033.

[15] Wang C, Xia X Q, Bi S B, et al. A numerical method for designing gradient-index fiber probes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8769: 87693B.

[16] 王驰, 许婷婷, 毕书博, 等. 测量自聚焦光纤透镜聚焦常数的曲线拟合算法[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3309-3315.

Wang C, Xu T T, Bi S B, et al. Curve-fitting algorithm of measuring focusing constant of gradient-index fiber lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3309-3315.

[17] Wang C, Xu T T, Bi S B, et al. Measurement of the focusing constant of gradient-index fiber lens and its application in developing GRIN fiber probes[J]. *Measurement*, 2016, 90: 542-548.

[18] Wang C, Xu L L, Zhu J, et al. A novel integrated fiber-optic interferometer model and its application in micro-displacement measurement[J]. *Optics and Lasers in*

- Engineering, 2016, 86: 125-131.
- [19] Wang C, Sun J M, Sun F, et al. Coupling efficiency of ultra-small gradient-index fiber probe[J]. Optics Communications, 2017, 389: 265-269.
- [20] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. Optics Letters, 1991, 16(4): 273-275.
- [21] 黄伟同, 杨瀛海, 罗祖宁, 等. 自聚焦透镜的有效半径和有效数值孔径[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 1993, 17(4): 17-21.
Huang W T, Yang Y H, Luo Z N, et al. Effective radius and effective numerical aperture of the self-focusing lens array[J]. Journal of Anhui University (Natural Sciences), 1993, 17(4): 17-21.
- [22] Bandyopadhyay S, Saha S, Maulik U, et al. A simulated annealing-based multiobjective optimization algorithm: AMOSA[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(3): 269-283.
- [23] Li Z K, Cao J T, Zhao X H, et al. Atmospheric compensation in free space optical communication with simulated annealing algorithm[J]. Optics Communications, 2015, 338: 11-21.