

采用多模光纤透镜的光纤麦克风理论与实验研究

丁朋 董小鹏

(厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005)

摘要 对现有强度调制型光纤麦克风做了分析和讨论,采用单模光纤(SMF)熔接多模光纤(MMF)的方法设计了一种新的反射式光纤麦克风。适当长度的折射率分布为抛物线形的多模光纤具有准直透镜的作用,直接熔接在单模光纤上,可以使光纤麦克风进一步微型化、成本低廉化。用单频正弦波信号做声源测试该光纤麦克风,输出正弦波电压信号与声源频率一致,振幅随声源振幅线性变化。结果表明,该结构的光纤麦克风在原理和实验上可以用于语音通信中。

关键词 光纤光学;光纤麦克风;单模光纤准直器;反射式光强调制

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060603

Theoretical and Experimental Research on Fiber-Optic Microphone Using Multimode Fiber Lens

Ding Peng Dong Xiaopeng

(*Institute of Light-Wave Technology, School of Information Science and Engineering,
Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*)

Abstract Methods related to the design of intensity modulation fiber-optic microphone are reviewed. A novel scheme to realize the reflective fiber-optic microphone by using single-mode fiber (SMF) fusing multimode fiber (MMF) is proposed and verified experimentally. The MMF with appropriate length and refractive index of parabolic distribution has the function of collimating lens, which is fused with a SMF. For this fiber-optic microphone, the structure is secure, the volume is miniature, and the cost is low. Also there is no intensity noise caused by the instability of higher order mode. By using single frequency sine wave signal source, the fiber-optic microphone is tested. The frequency of output sine wave voltage signal is the same as that of the drive source, and the change of amplitude is linear. The results show that the fiber-optic microphone can be used for voice communication.

Key words fiber optics; fiber-optic microphone; single-mode fiber collimator; reflective intensity modulation

OCIS codes 060.2370; 120.0280; 120.3180; 120.5060

1 引言

光纤麦克风具有体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀、无需供电等优点,可广泛用于强电磁环境及供电困难、隐蔽情况等恶劣条件下的通信。光纤麦克风主要有相位调制型^[1~4]和强度调制型^[5~8]。相位调制型探测灵敏度高,但结构复杂,价格昂贵。强度调制型探测灵敏度虽然不及相位调制型,但其结构简单、微型,应用更加广泛。

强度调制型光纤麦克风的结构主要有单根光纤透射式^[5],单根光纤入射多根光纤接收式^[6],单根光纤弯曲式^[7]和单根 Y 型多模光纤(MMF)式^[8]。单根光纤弯曲式结构抗干扰不够强,频率响应不够好。单根光纤透射式与单根光纤入射多根光纤接收式存在的问题是光纤与光纤或者光纤与振动反射膜垂直对准困难,耦合

收稿日期: 2012-03-07; **收到修改稿日期**: 2012-03-19; **网络出版日期**: 2012-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)与厦门大学 985 与 211 工程资助课题。

作者简介: 丁朋(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: ladinglading@126.com

导师简介: 董小鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤技术及其在光通信与光传感领域的应用等方面的研究。

E-mail: xpdong163@163.com(通信联系人)

光强随距离变化的线性度差。单根 Y 型多模光纤式其实质是两根多模光纤集成在一个准直透镜上,由于有准直透镜的存在,解决了垂直对准和线性距离小的问题,但多模光纤在光强稳定性上不如单模光纤(SMF)。

为解决上述线性距离小、多模光纤光强稳定性不如单模光纤的问题,参考以纤芯折射率分布为抛物线形的多模光纤作为准直透镜的方法^[9,10],利用单模光纤熔接适当长度的多模光纤,用于光强调制型光纤麦克风。通过选取适当长度的多模光纤作为准直透镜,可以准直单模光纤出射的发散光束,以此降低单模光纤与振动反射膜垂直的精度要求和扩大光纤端面与反射膜之间的线性距离。在整个系统中,大多是以单模光纤传输信号光,光强稳定性也有很大的改进。多模光纤作为准直透镜熔接在单模光纤上,麦克风系统整体结构也更加牢固、体积更小。

2 工作原理

2.1 多模光纤准直分析

选取多模光纤,纤芯折射率分布为抛物线形,纤芯直径为 $62.5 \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.275,工作波长为 1550 nm ,则光线在多模光纤中传播时,光线周期长度为^[11]

$$L_p = \frac{2a\pi}{\sqrt{2\Delta}}, \quad (1)$$

式中 a 为多模光纤纤芯半径, Δ 为纤芯与包层折射率差。为使多模光纤起准直作用,长度 L 取 $L_p/4$,即 $L = 0.2615 \text{ mm}$ 。

结合高斯光束 q 参数 ABCD 法则和多模光纤传输矩阵^[12,13],采用数值计算方法求得单模光纤(模场半径为 $5.05 \mu\text{m}$)熔接 0.2615 mm 多模光纤,出射光模场半径为 $16.313 \mu\text{m}$ 。

高斯光束在空气中传输,其光斑半径随传输距离的变化关系为^[12]

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $w(z)$ 为高斯光束光斑半径, w_0 为光纤模场半径, λ 为工作波长, z 为空气中传输的距离。对比单模光纤熔接与未熔接 0.2615 mm 多模光纤的情况,高斯光束在空气中传输,光斑半径随传输距离变化,如图 1 所示。

对比图 1 中的两条曲线,单模光纤熔接 0.2615 mm 多模光纤后,高斯光束模场半径变大。在远场情况下,光斑半径变化小,光斑发散角随之变小,从而达到准直的效果。

2.2 反射光强耦合效率随光纤端面与反射膜距离的变化

光纤模场半径为 w_0 ,经图 2 所示光路传输后,反射光到达光纤端面时高斯光束光斑半径为 w_1 。

反射光耦合效率公式为^[11]

$$\eta = \frac{\left(\int_{A_\infty} E_0 E_1 dA \right)^2}{\left(\int_{A_\infty} |E_0|^2 dA \right) \left(\int_{A_\infty} |E_1|^2 dA \right)}, \quad (3)$$

式中 $E_i = \exp(-r^2/w_i^2)$, $i = 0, 1$ 。

对比单模光纤和单模光纤熔接 0.2615 、 0.2 、 0.14 、 0.1 mm 多模光纤情况下,反射光强耦合效率随光纤端面与反射膜距离变化的情况,如图 3 所示。

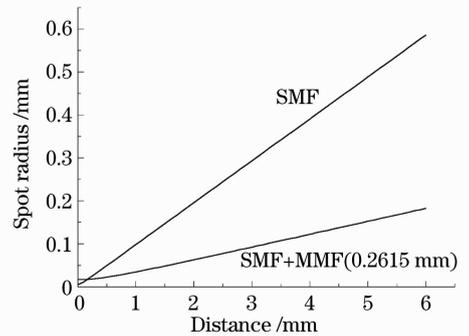


图 1 光斑半径随传输距离变化曲线

Fig. 1 Spot radius versus transmission distance

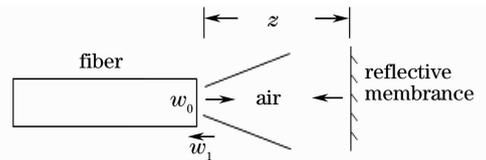


图 2 光路图

Fig. 2 Optical path

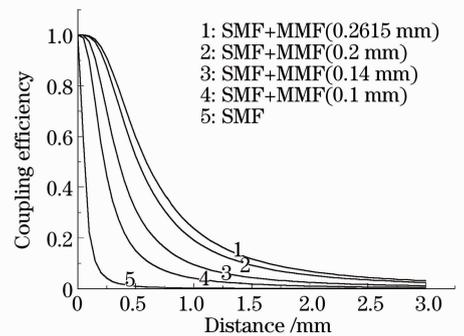


图 3 反射光强耦合效率随光纤端面与反射膜距离的变化曲线

Fig. 3 Reflection coupling efficiency versus distance between the end facet of optical fiber and the reflective membrane

由光路可逆原理可知,反射光经多模光纤传输后,其模场半径变为单模光纤模场半径。因此,反射光从多模光纤耦合进入单模光纤,效率为 100%。图 3 中曲线 1~4 也表示从反射膜反射的高斯光束耦合进入单模光纤的效率。由曲线 5 可以看出,单模光纤的可用线性范围最小,仅在 0~0.25 mm 范围内。由曲线 1~4 可以看出,熔接多模光纤后,可用线性范围增大。多模光纤长度在 $L_p/4$ 内逐渐增大,其准直效果越来越好,可用线性范围也越来越大。为得到最大的可用线性范围,取多模光纤长度为 $L_p/4$ 。

3 实验分析

3.1 多模光纤准直

多模光纤准直分析实验框架如图 4 所示。分布反馈 (DFB) 激光器为实验室自制,波长为 1550 nm,功率为 0.133 mW。多模光纤长度为 $5L_p/4$,即 1.311 mm。光束分析仪型号为 THORLABS BP109-IR2。高斯光束在空气中传输时光斑半径随传输距离的变化情况如图 5 所示。

对比图 5 中的曲线 3、4,单模光纤熔接 1.311 mm 多模光纤后,在远场情况下,光斑半径变化小,达到了准直的效果。曲线 1、3 和曲线 2、4 平行但不重合的原因是实验中光纤端面与光束分析仪 CCD 距离的读数误差。

3.2 反射光强耦合效率随光纤端面与反射膜距离的变化

光纤麦克风系统如图 6 所示。放大自发辐射 (ASE) 光源波长范围为 1520~1570 nm,功率为 $50 \mu\text{W}$;PIN 探测器电压放大倍数为 10^6 ;耦合器为单模光纤 3 dB 耦合器;振动反射膜为驻极体麦克风中的膜片,是一片极薄的塑料膜片,其中一面蒸镀一层纯金薄膜。

ASE 光源发出的非相干光从 A 端进入耦合器,以 50:50 的功率比分配给 B 端和 D 端,B 端光经单模光纤传输到 1.311 mm 长的多模光纤,后经空间入射到振动反射膜,振动反射膜反射的光耦合至多模光纤,经单模光纤传输到达 C 端,经耦合器到达 D 端,最后由 PIN 探测器得到光电转换电压信号。归一化探测电压信号随光纤与反射膜距离变化情况,如图 7 所示。

对比图 7 中的曲线 3、4,单模光纤熔接 1.311 mm 长的多模光纤后,光纤与反射膜之间的线性作用距离有所增大。对比曲线 1、3,熔接 1.311 mm 的多模光纤只达到熔接 0.14 mm 多模光纤准直的效果,并没有达到 0.2615 mm 多模光纤的效果。原因是由于切割工艺水平受限,实际多模光纤切割长度为 1.189 mm,并没有达到 1.311 mm。

3.3 光纤麦克风传感探头实验测试

根据图 7 曲线 3 可用线性范围,固定多模光纤端面与振动反射膜的距离为 0.26 mm,采用单频正弦波信号作声源,以驻极体电容麦克风探测信号作参考,与光纤麦克风同时探测声源,研究麦克风的频率响应(如图 8 所示)和振幅变化(如图 9 所示)。

图 8 中,光纤麦克风频率响应与声源驱动频率一致,

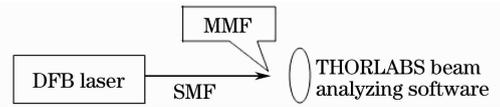


图 4 实验框图

Fig. 4 Experimental setup

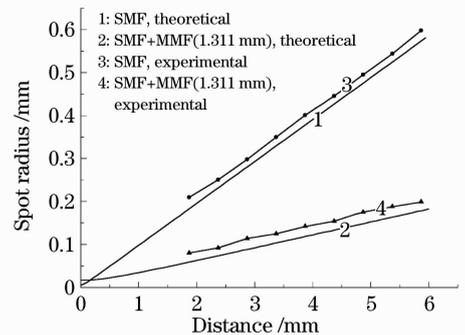


图 5 光斑半径随传输距离变化曲线

Fig. 5 Spot radius of transmission distance

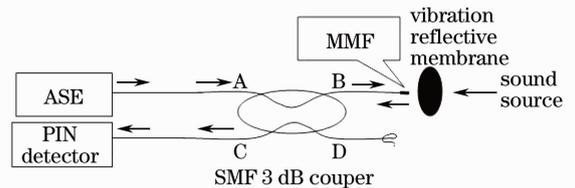


图 6 光纤麦克风系统图

Fig. 6 Optical fiber microphone system

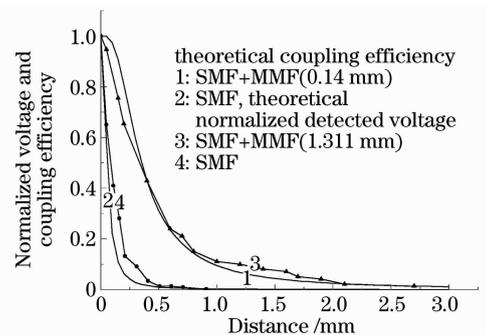


图 7 归一化探测电压随光纤与反射膜距离变化曲线和理论耦合效率曲线

Fig. 7 Normalized detected voltage and theoretical coupling efficiency versus distance between optical fiber and reflective membrane

光纤麦克风与驻极体电容麦克风参考探测信号频率也相同,说明光纤麦克风可以反映声源频率。图9中,光纤麦克风探测的正弦波信号振幅随声源驱动正弦波信号振幅线性增大,说明光纤麦克风可以反映声源的振幅。综合图8、9,此结构的光纤麦克风可以反映声源的频率变化和振幅变化。

4 结 语

通过理论分析和实验,证明可以选取适当长度的多模光纤作为准直透镜。把这样的多模光纤熔接在单模光纤上,扩大了光纤与振动反射膜之间的可用线性距离,同时,整个系统光强信号稳定性有所提高。以400 Hz正弦波声源测试该光纤麦克风,结果表明,该光纤麦克风频率响应为400 Hz;以450 Hz、不同振幅的正弦波声源测试该光纤麦克风,结果表明,该光纤麦克风振幅响应可以反映原正弦波声源的振幅。采用单模光纤直接熔接多模光纤的技术,与传统的准直透镜与单模光纤连接相比,操作简单,系统结构牢固,体积小,成本低廉。

参 考 文 献

- 1 T. K. Lim, Y. Zhou, Y. Lin *et al.*, Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(4): 301~308
- 2 Norbert Furstenau, H. Horack, Walter Schmidt, Extrinsic Fabry-Perot interferometer fiber-optic microphone[J]. *IEEE Trans. Instrum. Measurement*, 1998, **47**(1): 138~142
- 3 Wang Xiaoning, Wang Guangming. Application of the Sagnac effect in the optical fiber hydrophone[J]. *Applied Acoustics*, 1996, **15**(5): 21~23
王小宁, 王光明. Sagnac效应在光纤水听器中的应用[J]. *应用声学*, 1996, **15**(5): 21~23
- 4 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*, All polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 415~417
孟洲, 胡永明, 熊水东等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 415~417
- 5 W. B. Spillman, Jr., R. L. Gravel. Moving fiber-optic hydrophone[J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(1): 30~31
- 6 Andong Hu, Frank W. Cuomo, Allan J. Zuckerwar. Theoretical and experimental study of a fiber optic microphone[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, **91**(5): 3049~3052
- 7 J. S. Schoenwald, L. R. Bivins. RF amplitude modulated fiber optic acoustic sensing[C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1990. 327~330
- 8 Xu Haiying, Jiang Yonglie, Wang Li *et al.*, Design and research on the sensing probe of fiber-optic microphone[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2004, **12**(4): 716~719
徐海英, 蒋永烈, 王丽等. 光纤麦克风传感探头的设计研究[J]. *传感技术学报*, 2004, **12**(4): 716~719
- 9 P. L. Baldeck, F. Raccah, R. R. Alfano. Observation of self-focusing in optical fibers with picosecond pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(8): 588~589
- 10 Xiong Huaping, Cao Mingcui. The research and design of micro-align-lens[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(5): 437~439
熊华平, 曹明翠. 微型准直透镜的研究与设计[J]. *激光技术*, 2003, **27**(5): 437~439

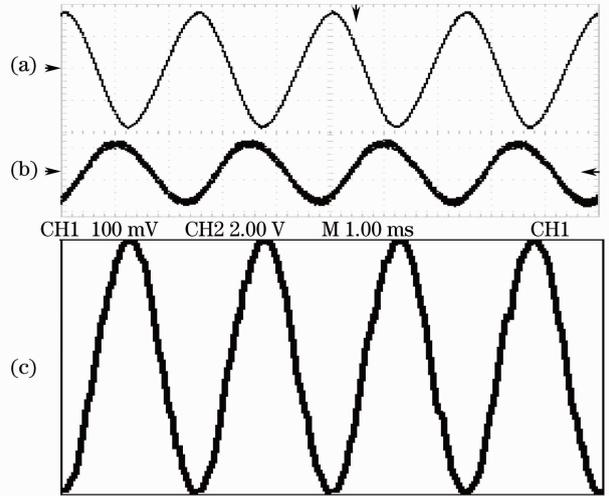


图8 400 Hz正弦波驱动(a); 光纤麦克风(b)与驻极体电容麦克风(c)的探测信号比对

Fig. 8 (a) 400 Hz sine wave and detected voltages of (b) optical fiber microphone and (c) electret condenser microphone

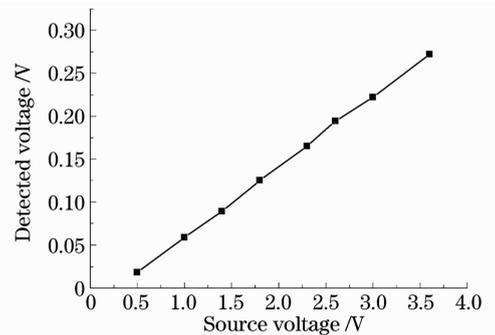


图9 450 Hz正弦波驱动时探测信号振幅随驱动振幅变化曲线

Fig. 9 Amplitude of detected signal versus amplitude of driving voltage when the sine wave frequency is 450 Hz

- 11 A. W. Snyder, J. D. Love. Optical Waveguide Theory[M]. Zhou Youwei, Lin Zhiyuan, Yao Huihai *et al.* Transl. . Beijing: Posts & Telecom Press,1991. 22~23, 510~511
A. W. 斯奈德, J. D. 洛夫. 光波导理论[M]. 周幼威, 林志瑗, 姚慧海 等译. 北京: 人民邮电出版社, 1991. 22~23, 510~511
- 12 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Laser Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 74~77
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 74~77
- 13 Rao Yunjiang. Optical Fiber Technology[M]. Beijing: Science Press, 2006. 56~59
饶云江. 光纤技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 56~59