

相位调制对高 Q 光学微球腔谐振特性的影响

张建辉,徐鹏飞,安盼龙,李小枫,薛晨阳,张文栋,闫树斌

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,电子测试技术重点实验室,山西 太原 030051)

摘要:光学微腔由于其极高的品质因数(Q)特性而具有广泛的应用前景。该文根据光学微球腔与锥形光纤的耦合原理对光学微球腔的谐振特性进行了实验研究。通过实验研究了相位调制参数对光学微球腔谐振深度的影响,并获得了相位调制电压和调制频率与光学微球腔谐振深度变化的关系。实验结果表明,相位调制参数的变化,对光学微球腔的谐振特性——谐振深度,有一定影响,在应用中根据需求选择合适的相位调制参数。

关键词:光纤光学;光学微腔;调制;谐振特性;传感技术

中图分类号: TN815

文献标识码: A

Effect of Phase Modulation on Resonance Characteristics of the High- Q Optical Micro-sphere Cavity

ZHANG Jianhui, XU Pengfei, AN Panlong, LI Xiaofeng, XUE Chenyang, ZHANG Wendong, YAN Shubin

(Key Lab. of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, Science and Technology on Electronic

Test & Measurement Lab. North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The optical micro-cavity has broad applications because of its high Q characteristic. In this paper, based on the coupling principle of optical microsphere cavity with the tapered fiber, the resonance characteristics of optical microsphere cavity are studied experimentally. The relationship between the voltages and frequencies of phase modulation and the depth change of optical micro-sphere cavity has been obtained. The experimental results show that the changes of phase modulation parameters have certain effect on the resonance characteristics (that is, resonant depth) of optical micro-sphere cavity. Thus the proper phase modulation parameters should be selected according to the application requirements.

Key words: fiber optics; optic micro-cavity; modulation; resonance characteristic; sensing technology

0 引言

光学微腔一般是指直径介于几微米至几百微米之间的光学介电谐振器,通常使用的材料是二氧化硅(SiO_2)等光学玻璃,微腔的类型有多边棱镜、微型圆柱、圆盘和圆环等。光学微球腔^[1-3]是光学微腔的一种,指半径从几微米到几百微米的球形光学谐振腔,是一种新型的光学谐振腔^[4]。近年来,光学微球腔由于具有极高的品质因数(Q)和较小的模式体积而受到日益广泛的关注。该谐振腔的谐振特性主要来源于其独特的回音壁模式(WGM),在这种模式下,光波会在光学微球腔内表面上不断地进行全反射^[5],从而被约束在球内且沿着光学微球腔的赤道面绕行,绕行的光波满足一定的相位匹配时,就可互相叠加增强,几乎无能量损失,因而具有极高的 Q

值(可达 10^{10})。光学微球腔的高 Q 特性使其广泛应用在要求极细线宽、极高能量密度和亮度或极细微探测能力的领域中,如非线性光学和腔量子电动力学及窄带光学滤波、高灵敏度运动传感器和极低阈值激光器等^[6]。

本文利用锥形光纤与光学微球腔耦合激发的谐振模式,通过改变相位调制器上的调制电压和调制频率研究了相位调制参数对光学微球腔的谐振特性——谐振深度的影响^[7]。

1 基本原理

光在光纤中传播时,光纤的锥形区域会透过包层辐射出倏逝光场,当倏逝光场的频率与光学微球腔中赤道面上的本征频率相等时,锥形光纤的包层所携带的光就会耦合进光学微球腔^[8],通过不断的

收稿日期:2013-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91123036,61178058,61275166);山西省自然科学基金资助项目(2010011003-2)

作者简介:张建辉(1986-),男,河南太康人,硕士生,主要从事光纤传感、光学谐振腔方面的研究。E-mail: zhangjianhui_you@126.com。闫树斌(1975-),男,山西交城人,硕士,博士,山西省优秀青年学术带头人,主要从事光 MEMS、集成光学传感、量子光学器件等研究工作。E-mail: shubin_yan@nuc.edu.cn。

全反射形成回音壁模式^[9-10]。

光学微球腔与锥形光纤的耦合^[11]整体结构如图 1 所示, $|E_i|^2$ 为第 i 个端口的输入或输出能量, 参量 E_i 为第 i 个端口的归一化复场振幅。图 1 所示的场传输耦合关系式为

$$E_3 = \sqrt{1-k^2} E_1 + ikE_2 \quad (1)$$

$$E_4 = ikE_1 + \sqrt{1-k^2} E_2 \quad (2)$$

其中, E_2 与 E_4 间的关系为

$$E_2 = E_4 \alpha e^{i\varphi} \quad (3)$$

式中: k 为锥形光纤与光学微球腔之间的耦合系数; $\alpha (< 1)$ 为光学微球腔的衰减系数; $\varphi = \beta L$ 为光在谐振腔内环绕一周的相移量, $L = \pi D$ 为谐振腔的路径长度(这里取光学微球腔周长), β 为谐振腔中激发模式的传播常量, 且有

$$\begin{aligned} \beta &= K_0 \frac{1}{X_{nm}} = K_0 \left[N - \left(\frac{N}{2} \right)^{1/3} X_{nm}^{-3/3} \zeta_n + \right. \\ &\quad \left. \frac{P}{(N^2 - 1)^{0.5}} X_{nm}^{-1} + o(X_{nm}^{-3/3}) \right] \approx \\ &K_0 \frac{1}{X_n} \approx K_0 \left[N - \left(\frac{N}{2} \right)^{1/3} X_{nm}^{-3/3} \zeta_n + \right. \\ &\quad \left. \frac{P}{(N^2 - 1)^{0.5}} X_n^{-1} + \frac{1}{6} \left(\frac{N}{2} \right)^{1/3} \zeta_n^2 X_n^{-3/3} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: K_0 为真空波矢量; N 为光学微球腔的介质折射率; n, l, m 分别为光学微球腔的径向模数、角向模数及方位角模数; $X = \pi D / \lambda$ 为尺寸参量; ζ_n 为 Airy 函数的根, $\zeta_1 = -2.338$, $\zeta_2 = -4.088$ 。在 TE 模式下, $P = N$, 在 TM 模式下, $P = 1/N$, 其中 P 为随 N 在 TE、TM 两种不同模式下的一个变量。根据式 (1)~(3) 可得图 1 所示的光纤输入与输出间的传递函数:

$$H = \left| \frac{E_2}{E_1} \right| = 1 - \frac{C}{1 + M \sin^2(\varphi/2)} \quad (5)$$

其中

$$C = 1 - \left(\frac{k - \alpha}{1 - \alpha k} \right)^2 \quad (6)$$

$$M = \frac{4\alpha k}{1 - \alpha^2} \quad (7)$$

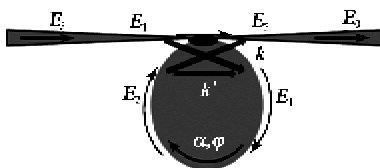


图 1 光学微球腔与锥形光纤的耦合结构

光学微球腔直径 $D = 1 \text{ mm}$; $N = 1.47$; $k = 0.95$; k' 为锥形光纤输出端光振幅的耦合系数; $\alpha = 0.78$ 。

2 实验与分析

为了研究光学微球腔的谐振特性^[12]受相位调制器^[13]调制电压和调制频率参数的影响, 设计并搭建了的实验系统如图 2 所示。其中, 激光光源采用 NKT Photonics 1 550 nm 超窄线宽激光器(线宽小于 1 kHz), 相位调制器 PM 为 Thorlabs LN65S 10 GHz 相位调制器; 光学微球腔是由氧化硅在熔融状态下靠表面张力自然形成的标准球形, D 为 1 mm; 信号发生器为斯坦福 Model DS345; 光电探测器为 New Focus 公司可调光电探测器 Model 2053, 带宽为 10 MHz, 最大转换增益为 $18.8 \times 10^6 \text{ V/W}$ 。

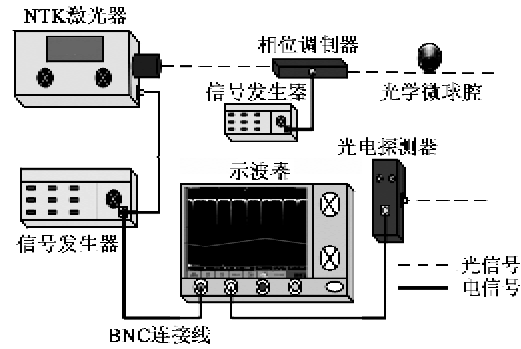
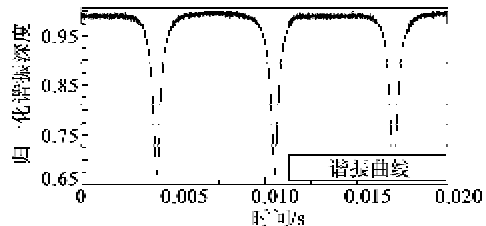
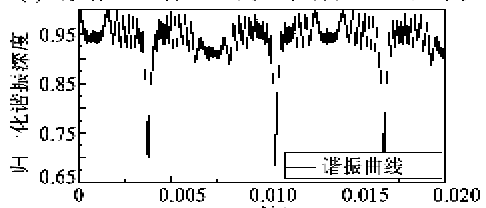


图 2 光学微球腔谐振特性测试系统

实验中, 激光器中心波长为 1 550 nm, 功率为 5 mW, 同时, 信号发生器产生正弦波通过对 PM 施加不同调制信号对激光进行调制。图 3 为未对激光进行调制时光学微球腔的谐振曲线。由图可知, 接入相位调制器后对光学微球腔的谐振曲线也产生了一定的变化, 但这不影响对相位调制器调制参数改变过程中对谐振深度的研究。



(a) 谐振特性测试系统中未接入相位调制器 PM 时的谐振曲线



(b) 光学微球腔谐振特性测试系统中接入相位调制器 PM 后的谐振曲线

图 3 未加调制时光学微球腔的谐振曲线

在实验中,通过保持相位调制器的调制频率 f_m 不变的情况下,改变调制信号的电压 V_{pp} ,得到了 f_m 一定时光学微球腔谐振曲线的谐振深度随 V_{pp} 增大的部分结果示意图如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知,光学微球腔的谐振深度在 f_m 一定时随 V_{pp} 的增大而减小;通过保持相位调制器的 V_{pp} 不变的情况下,改变 f_m ,得到了 V_{pp} 一定时光学微球腔谐振曲线的谐振深度随 f_m 增大的部分结果示意图如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可知,光学微球腔的谐振深度在 V_{pp} 一定时随 f_m 的增大而减小。

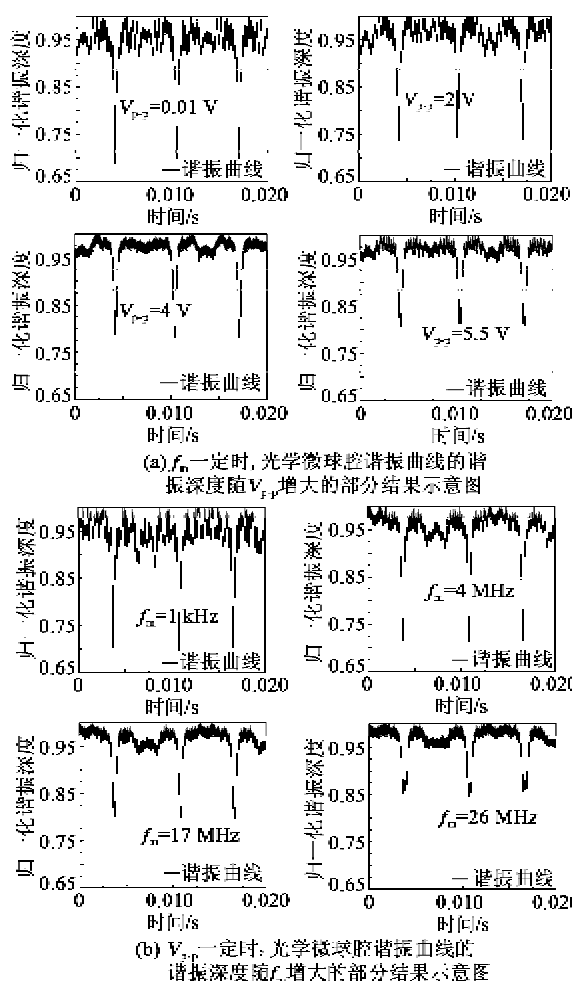


图 4 一定 f_m 、 V_{pp} 时对应的光学微球腔谐振曲线谐振深度

另外,通过采集大量实验数据进行数据处理和分析得到的光学微球腔的谐振深度变化与 f_m 在 1 MHz、15 MHz、25 MHz 随 V_{pp} 变化和 V_{pp} 在 2 V、4 V、6 V 随 f_m 变化的关系,如图 5 所示。

1) 在 f_m 一定时,谐振深度随 V_{pp} 的增大而减小,且 f_m 越大,谐振深度越小。

2) 在 V_{pp} 一定时,谐振深度随 f_m 的增大也在减小,且 V_{pp} 越大,谐振深度越小。

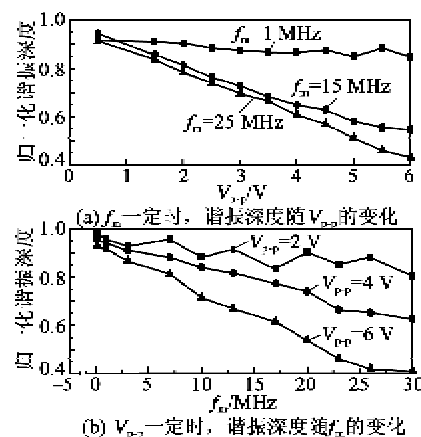


图 5 谐振深度变化与 V_{pp} 和 f_m 的关系

3 结束语

理论分析了光学微球腔与锥形光纤耦合激发谐振的原理。实验研究了相位调制器的调制电压和调制频率对光学微球腔谐振特性的影响。根据实验结果和分析实验数据,获得了相位调制器在调制频率不变情况下,光学微球腔的谐振深度随调制电压的增大而减小;在调制电压不变情况下,光学微球腔的谐振深度随调制频率的增大而减小。

参考文献:

- [1] 严俊,王宗宝,王克逸,等. 光学微球腔的壳层结构研究[J]. 光子学报, 2006, 35(2): 197-200.
YAN Jun, WANG Zongbao, WANG Keyi, et al. The study of optical microsphere cavity with a stratified structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(2): 197-200.
- [2] 王克逸,金乐天,周绍祥,等. 光学微球腔谐振模式研究[J]. 光子学报, 2002, 31(Z2): 221-226.
WANG Keyi, JIN Letian, ZHOU Shaoxiang, et al. The study of resonant mode in optical microsphere cavities[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(Z2): 221-226.
- [3] 严英占,吉喆,王宝花,等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1789-1793.
YAN Yingzhan, JI Zhe, WANG Baohua, et al. Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1789-1793.
- [4] 鞠涛. 光学微球腔场的分析及耦合特性的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [5] 陆颖,王吉有,徐晓轩,等. 微球与锥形光纤耦合系统的光学特性[J]. 南开大学学报, 2000, 33(4): 6-10.
LU Ying, WANG Jiyou, XU Xiaoxuan, et al. The optical characteristics of microsphere-tapered fiber couple

- system[J]. Nakai Journal, 2000, 33(4): 6-10.
- [6] 张宇光,李鹏,王丽,等. 外界环境对微球腔品质因数的影响[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 803-806.
ZHANG Yuguang, LI Peng, WANG Li, et al. Effect of the environment on microsphere Q-factor [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 803-806.
- [7] 王丽,严英占,张宇光,等. 振动噪声对高 Q 光学微腔耦合系统的影响及抑制方法[J]. 发光学报, 2011, 32(9): 950-955.
WANG Li, YAN Yingzhan, ZHANG Yuguang, et al. Effect of the environment on microsphere Q-factor[J]. Journal of Luminescence, 2011, 32(9): 950-955.
- [8] 刘丽飒,蔡志平,温国斌,等. 熔锥光纤与球微腔耦合系统的理论模拟[J]. 光电工程, 2004, 31(4): 20-23.
LIU Lisa, CAI Zhiping, WEN Guobin, et al. Theoretical simulation for a coupling system with taper fiber and silicon-microsphere resonator[J]. Optical Engineering, 2004, 31(4): 20-23.
- [9] TAN W, SHI L, CHEN X. Modeling of an optical sensor based on whispering gallery Mmodes (WGMs) on the surface guiding layer of glass filaments[J]. Sensors, 2008, 8(10): 6761-6768.
- [10] 张远宪,韩德显,祝昆,等. 包层介质折射率引起的回音壁模式光纤激光波长漂移[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 691-694.
ZHANG Yuanxian, HAN Deyu, ZHU Kun, et al. Wavelength shift of whispering-gallery-mode fiber laser caused by fiber cadding refractive index[J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(3): 691-694.
- [11] 严英占. 面向角速度传感的高 Q 值微谐振腔及其结构关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [12] 马慧莲,金仲和,丁纯,等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 731-734.
MA Huilian, JIN Zhonghe, DING Chun, et al. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(8): 731-734.
- [13] 张建辉,徐鹏飞,马可贞,等. 谐振式陀螺检测信号调制技术研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(7): 946-949.
ZHANG Jianhui, XU Pengfei, MA Kezhen, et al. The research of modulation technology detected signal for the resonator gyro[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(7): 946-949.
- (上接第 37 页)
- [6] DE OLIVEIRA R, FRAZAO O, SANTOS J L, et al. Optic fibre sensor for real-time damage detection[J]. Computers and Structures, 2004, 82(17/19): 1315-1321.
- [7] READ I, FOOTEL P, MURRAY S. Optical fibre acoustic emission sensor for damage detection in carbon fibre composite structures[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(1): 5-9.
- [8] DAHLEM M, SANTOS L, FERREIRA L A, et al. Passive interrogation of low-finesse Fabry-Perot cavities using fiber Bragg grating[J]. Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 990-991.
- [9] MAYER D G, KINGHORN B P, ARCHER A A. Differential evolution-an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimization[J]. Agricultural Systems, 2005, 83(3): 315-328.
- [10] FAN H Y, LAMPINEN J A. Directed mutation operation for the differential evolution algorithm[J]. International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice, 2003, 10(1): 6-15.
- [11] CRUZ I L L, WILLIGENBURG L G V, STRATEN G V. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 40(1): 179-197.
- [12] MENG B, ZHU M. Nonlinear object tracking using particle filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9): 1421-1426.
- [13] SHAN Ning, SHI Yikai, LIU Xia. Structural optimization design of double wavelength optical fiber F-P sensing system based on DE algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 301-305.