

高品质光学微球腔谐振特性及鉴频特性分析

王梦宇,金雪莹,王静,陈黎明,王克逸

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230026)

摘要:光学微球腔的回音壁模式使其存储能量大,从而获得高的品质因数。该文介绍了微球腔的制备方法;介绍了微球腔与锥形光纤的耦合理论,并对其耦合特性作出了分析;搭建了微球腔谐振谱探测系统并分析了不同耦合模式下的谐振特性;设计了微球腔谐振频率跟踪与锁定系统。通过仿真得到了不同调制频率下的鉴频曲线,分析了其吸收谱线与色散谱线特性。实验制得微球腔直径为 $\varnothing 440 \mu\text{m}$,耦合状态下的品质因数可达 1.08×10^8 ;调制频率对鉴频曲线特性影响很大,低频调制下,优化调制后,可提升跟踪锁定效果,为后续的实验奠定了良好的基础。

关键词:光纤光学;光学微球腔;耦合理论;谐振谱;调制;鉴频特性

中图分类号: TN815 **文献标识码:** A

Analysis of Resonance and Frequency Discrimination Characteristics of Optical Microsphere Cavity With High Quality

WANG Mengyu, JIN Xueying, WANG Jing, CHEN Liming, WANG Keyi

(Dept. of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The optic microsphere cavity (OMC) can store more energy because of its whispering gallery mode (WGM), so that it obtains higher quality factors (Q); The preparation method of OMC was introduced in this paper, and the coupling principle of OMC with tapered fiber was introduced and the coupling characteristic was analyzed. An OMC resonance detection system was set up and the resonance characteristic of different coupling mode was analyzed. An OMC resonance frequency tracking and locking system was designed. The frequency discrimination curve at different modulation frequency was obtained and the characteristics of absorption line and dispersive line were analyzed. The experimentally fabricated OMC has the diameter of $\varnothing 440 \mu\text{m}$, the Q factor of 1.08×10^8 under coupling condition. The modulation frequency can significantly affect the frequency discrimination characteristics. Under low frequency modulation, the tracking and locking effect can be improved after optimizing the modulation. The study lays a good foundation for the following experiments.

Key words: fiber optics; optic microsphere cavity; coupling principle; resonance spectrum; modulation; frequency discrimination characteristics

0 引言

光学微谐振腔^[1](微腔)是一类可将光场限制在极小空间区域内的光学系统。其应用已覆盖如研究非线性光学效应^[2]、低阈值激光器^[3]及窄线宽光学滤波器^[4]等学科领域。而微腔根据结构和光场的不同,主要可分为 Fabry-Perot(F-P)型腔、光子晶体微腔和回音壁模式微腔^[5](WGM微腔)3类。其中 F-

P型微腔的品质因数 Q 一般为 $10^3 \sim 10^4$;光子晶体微腔自身结构及加工技术精度受限;而WGM微腔的 Q 高(最高可达 10^9)。典型WGM微腔有微盘腔^[6]、环形腔及微球腔(OMC)等。

本文基于微球腔进行理论和实验方面的研究,采用制备的光学微球腔与锥形光纤耦合结构,对探测实验得到的微球腔谐振谱和仿真实验得到的跟踪锁定谐振频率的鉴频曲线进行分析。

收稿日期:2016-12-11

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(61275011)

作者简介:王梦宇(1992-),男,江西丰城人,硕士生,主要从事微腔的制备及性能的研究。E-mail: mengyu@mail.ustc.edu.cn。通信作者:王克逸(1962-),男,河北保定人,教授,博士生导师,主要从事信息光学和微光学的教学和科研工作的研究。E-mail: kywang@ustc.edu.cn。

1 微球腔的制备

相对于制备微盘腔、环形腔复杂的微机械系统 (MEMS) 制造工艺, 本文实验采用 CO_2 激光熔融光纤法, 利用微小体积熔融 SiO_2 光纤的表面张力来制备微球腔。图 1(a)、(b) 分别为微球腔制备实验装置和原理图。制备微球腔时, 将三维调整架的光纤端部调整到焦点处, 然后竖直向下移动一段距离 (L) 后, 再将 CO_2 激光经透镜聚焦后照射在中心波长 $\lambda=1550\text{ nm}$ 的单模光纤上, 光纤熔融后在其表面张力作用下自动形成微球腔, 可通过改变 L 来改变微球腔的大小。为确定微球腔的大小, 安装 CCD 实时成像装置, 图 1(c) 为实验制得直径 D 为 $\varnothing 440\ \mu\text{m}$ 的微球腔, 自带有光纤柄, 更利于实验的操控。

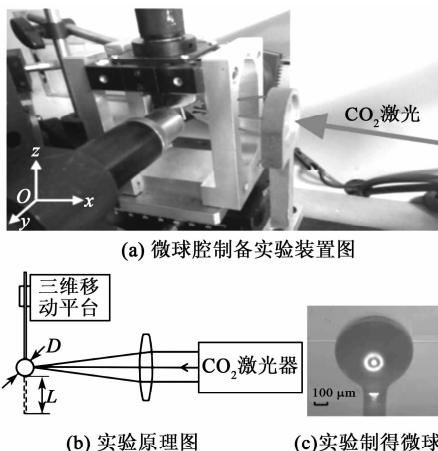


图 1 微球腔制备实验装置、实验原理图及实验制得微球腔

Q 和自由谱宽 (FSR) 是微球腔的 2 个最重要参数。 Q 值反映其存储能量的能力, 定义为腔内光场的能量除以光波绕腔体 1 周消耗的能量^[7], 分为内部本征 Q_{in} 和外部耦合状态下 Q_{ex} 。 FSR 是微球腔 2 个相邻的谐振模式间的波长或频率间隔^[8]。且

$$Q_{in} = \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{c/\lambda}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

$$FSR = \frac{c}{n_1 L} = \frac{c}{\pi n_1 D} \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为微球腔谐振谱的半高全宽; $n_1=1.45$ 为 SiO_2 折射率; c 为光速。通过计算可得, $Q_{in}=1.84 \times 10^7$, $FSR=149.68\text{ GHz}$ 。经多次探测实验和测量, 所制备的微球腔 Q 值可达 $10^7 \sim 10^8$ 。

2 理论分析

2.1 微球腔与锥形光纤耦合理论

将微球腔接近 1 根通过氢氧焰加热的拉制法来制得锥形光纤, 其耦合示意图如图 2 所示, 图中, E_{cross} 为锥形光纤的透过场。用多光束干涉原理^[9] 对

其谐振特性进行分析。在锥形光纤中输入的光 E_{in} , 一部分光 E_{1-out} 不经过微球腔, 直接输出, 另一部分光 $E_{1-cross}$ 耦合进入微球腔中传播。微球腔中传播的光, 一部分光 E_{2-out} 因倏逝场效应耦合到输出端, 另一部分光 $E_{2-cross}$ 继续在微球腔腔内传输。循环 N 次后, 这些不同光程的光将会在锥形光纤的输出端叠加, 新形成的光场和原来的光场将发生干涉, 最终形成多光束干涉光场输出 E_{out} 。

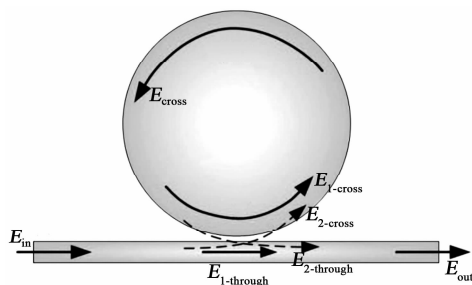


图 2 微球腔与锥形光纤耦合示意图

根据微球腔与锥形光纤耦合强度的不同, 可将其耦合状态分为欠耦合 ($Q_{in} < Q_{ex}$)、临界耦合 ($Q_{in} = Q_{ex}$) 和过耦合 ($Q_{in} > Q_{ex}$) 3 种状态^[10]。耦合状态可通过调节微球腔与锥形光纤的耦合强度改变, 3 种状态下微球腔的谐振谱线如图 3 所示。临界耦合状态下的耦合最高效, 在谐振点处, 锥形光纤中几乎所有的光都进入到微球腔中。

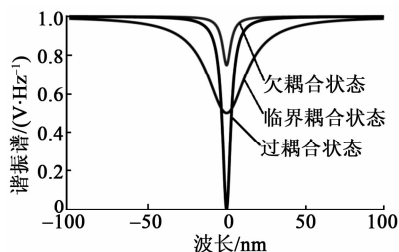


图 3 3 种不同耦合状态下微球腔谐振谱线示意图

在临界耦合状态下, 将耦合结构等效为一个耦合系数 k , 损耗系数 e , 传输系数 l 的耦合器, 则系统单圈传播系数 $R=(1-k)^{1/2}(1-e)^{1/2}(1-l)^{1/2}$; 定义直接耦合输出系数 $U=(1-k)^{1/2}(1-e)^{1/2}$, 交叉耦合系数 $P=k(1-e)(1-l)^{1/2}$ 。则直接耦合输出光场为

$$E_{1-through} = UE_{in} = (1-k)^{1/2}(1-e)^{1/2} \cdot E_{in} \quad (3)$$

在微球腔内传播不同整数倍的光程输出在锥形光纤输出端叠加光场可表示为

$$E_{cross} = PR^{n-1}(t - n\tau)\exp(j\pi n) \cdot E_{in} \quad (4)$$

式中 τ 为光波在微球腔中传播 1 周所需时间; n 为光波在微球腔传播的次数。

由多光束干涉原理,微球腔输出后光场可表示为

$$E_{out} = [U - P \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \exp(-i\omega n\tau)] \cdot E_{in} \quad (5)$$

式中 ω 为入射激光角频率。光波经过微球腔的传递函数可表示为

$$H(\omega) = \frac{E_{out}}{E_{in}} = U - P \cdot \frac{1 - R^n \exp(-i\omega n/FSR)}{1 - R \exp(-i\omega/FSR)} \exp(-i\omega/FSR) \quad (6)$$

2.2 微球腔谐振频率锁定相关理论

实验时,由于可调谐激光器的波长存在不稳定性,根据常用的 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术^[11]设计了一套基于微球腔耦合结构的 PDH 稳频系统对微球腔的谐振频率进行跟踪锁定,具体原理如图 4 所示。从可调谐激光器发出的单频激光束通过光隔离器,进入电光相位调制器(EOM)进行相位调制。经 EOM 调制后的激光载波及其边带从偏振器输出后变为偏振光,并耦合进入微球腔与锥形光纤的耦合结构,最后经光电探测器将光信号转换成电信号输出。检测 PDH 鉴频信号另一路采用对本征信号进行移相,补偿其通过两条路径的相位差,然后与电信号滤波放大解调后的输出信号进行混频,最终通过低通滤波后得到锁定微球腔谐振频率的鉴频信号,该信号最终经过 PID 伺服反馈系统和压电陶瓷(PZT)驱动单元(PZT-DR)反馈到激光器。

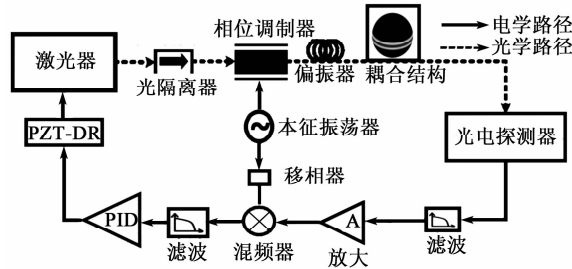


图 4 微球腔谐振频率跟踪与锁定原理图

设单频激光信号经过相位调制后的光场为

$$E_{PM} = E_0 \exp(i\omega t + iB \sin \Omega t) \quad (7)$$

式中: E_0 为入射光振幅; B 为调制度; Ω 为相位调制器调制频率。

将其按贝塞尔函数展开可得

$$E_{PM} = E_0 \exp(i\omega t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(B) \exp(in\Omega t) \quad (8)$$

由式(6)并忽略高阶边频,取贝塞尔系数的一、0 和 1 阶近似运算,则微球腔输出光场可表示为

$$E_{out} = E_0 \exp(i\omega t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(B) \exp(in\Omega t) \cdot$$

$$H(\omega + n\Omega) \approx E_0 \{ J_0(B) H(\omega) \exp(i\omega t) + J_1(B) H(\omega + \Omega) \cdot \exp[i(\omega + \Omega)t] - J_{-1}(B) H(\omega - \Omega) \cdot \exp[i(\omega - \Omega)t] \} \quad (9)$$

光电探测器得到对应的反射光功率可表示为

$$P_{ref} = |E_{out}|^2 = \{ P_c |H(\omega)|^2 + P_s [|H(\omega + \Omega)|^2 + |H(\omega - \Omega)|^2] + 2(P_c P_s)^{1/2} \{ \text{Re}[H(\omega) H^*(\omega + \Omega) - H^*(\omega) H(\omega - \Omega)] \cdot \cos \Omega t + \text{Im}[H(\omega) H^*(\omega + \Omega) - H^*(\omega) H(\omega - \Omega)] \cdot H^*(\omega) H(\omega - \Omega) \cdot \sin \Omega t \} + 2\Omega_{terms} \} \quad (10)$$

式中: $P_c = J_0^2(B) P_0$ 为载波光功率; $P_s = J_1^2(B) P_0$ 为一阶边带光功率; $2\Omega_{terms}$ 为 2 个一阶边带相互干扰作用的结果。

光电流信号经滤波放大与参考信号在混频器中进行同频解调,解调后滤波输出鉴频信号:

$$e = -2A(P_c P_s)^{1/2} \{ \text{Re}[H(\omega) H^*(\omega + \Omega) - H^*(\omega) H(\omega - \Omega)] \cdot \cos \Omega t + \text{Im}[H(\omega) \cdot H^*(\omega + \Omega) - H^*(\omega) H(\omega - \Omega)] \cdot \sin \Omega t \} \quad (11)$$

式中 A 为所有相关解调电路的幅度增益,正弦项描述色散特性,余弦项描述吸收特性。

由式(11)可看出,当 Ω 较小时,式(11)中正弦项可忽略,鉴频信号表现为吸收特性;当 Ω 较大时,式(11)中余弦项可忽略,鉴频信号表现为色散特性。两者表现不同调制频率的对应不同鉴频特性。

利用鉴频信号对微球腔的谐振信号进行跟踪锁定时,鉴频信号零点附近的斜率和信噪比会直接影响到跟踪锁定后的效果。斜率越大,信噪比越大,跟踪锁定的效果越好。

3 实验与分析

3.1 微球腔谐振谱特性分析

搭建微球腔谐振谱探测系统对其谐振特性进行分析,原理图如图 5 所示,实验装置中所用可调谐激光器为 New Focus Velocity 6728 系列半导体激光器,最大输出功率为 30 mW,中心波长为 1 550 nm;光电探测器 Thorlabs PDA 10CF-EC,带宽为 150 MHz;偏振控制器为四川超光通信公司生产的三环型光纤偏振控制。实验中,选择三角波信号对激光器驱动的频率为 20 Hz,电压幅度在 -2.4 ~ 2.4 V。探测得到微球腔谐振谱曲线如图 6 所示。由于锥形光纤处于微球腔的不同位置,激发的

WGM 不一,因此,微球腔的谐振谱形状不同。

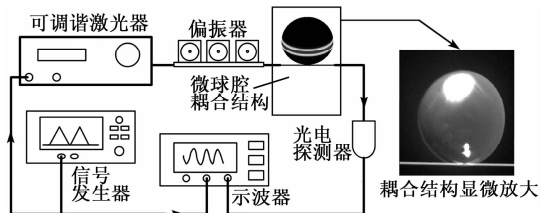


图5 微腔探测系统原理图

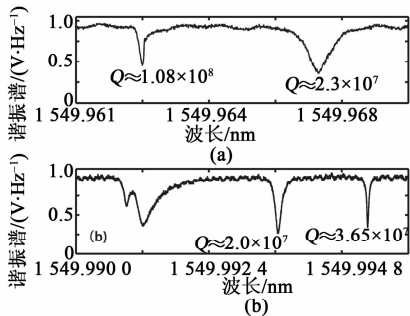


图6 微球腔谐振谱图

测量得到的微球腔 Q 值(外部耦合状态 Q_{ex}) 通过计算谐振峰的半高宽得到,移动锥形光纤获得不同的 Q_{ex} 值,可达 1.08×10^8 ,这时耦合模式处于欠耦合状态;大部分模式 Q_{ex} 值在 2×10^7 量级,这时耦合模式处于过耦合状态。拥有高 Q_{ex} 值的谐振模式同时会降低耦合结构的耦合效率。实验发现,存在一些谐振模式的 Q_{ex} 值很低,尤其是当锥形光纤远离球腔中心位置区域时,这可能是因不同 WGM 的模式重叠导致,也可能是增大了耦合结构的模式体积,光纤柄与微球腔表面污染物相互作用的结果。

3.2 PDH 鉴频曲线特性分析

选取耦合系数为 6%,耦合损耗系数为 8%,传输系数为 5%的锥形光纤与微球腔耦合结构作为实验分析对象。实验使用微球腔直径为 $\varnothing 440 \mu\text{m}$,改变调制频率,将鉴频信号的实部和虚部展开,低频和高频调制仿真下,分别得到色散谱线和吸收谱线结果如图 7 所示。

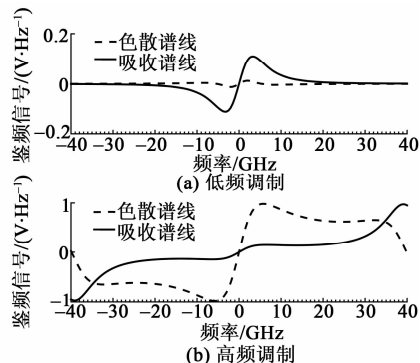


图7 低频、高频调制下色散与吸收谱线图

鉴频信号零点附近的线性区域,将其定义为鉴频信号的线性动态范围,具体表现为鉴频特性控制范围的大小。由图 7(a)可看出,在低频调制下,吸收谱线的斜率和线性动态范围更大,鉴频曲线表现为吸收特性;而在高频调制下图 7(b)中,鉴频发生了改变,色散谱线的斜率和线性动态范围更大,鉴频曲线表现为色散特性。

对鉴频信号进行进一步分析,不断改变电光相位调制器调制频率,鉴频信号斜率和线性动态范围随调制频率变化如图 8 所示。由图 8(a)、(b)可看出,当频率在一定范围内,鉴频曲线线性动态范围不断变大,可控范围不断增加,表现出很好的鉴频特性。

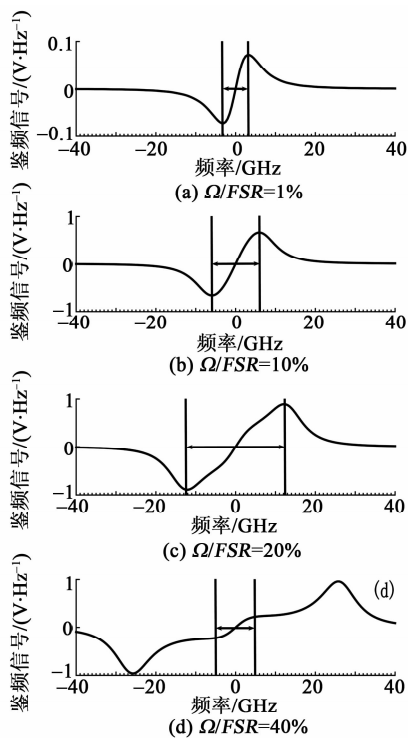


图8 鉴频信号线性动态范围随调制频率变化图

当调制频率达到一定值后(见图 8(c)),鉴频曲线发生了改变,两侧出现微小的谐振峰,称其为边带,且随着调制频率的进一步变大(见图 8(d)),误差信号的鉴频曲线不断恶化,出现了扭曲现象,此时斜率和线性动态范围都变小。由于微球腔 FSR 线宽过高,调制所需的调制频率也想要求较高,但调制频率过高的情况下,鉴频信号会失去对微球腔谐振的跟踪锁定作用。因此,在后期的具体实验中对微球腔宜采用低频调制。

在电光相位调制器采用低频调制的情况下,鉴

频曲线表现为吸收特性,色散项可忽略。假定调制频率相位设置趋近0时, $\cos(\Omega t)=1$,则

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[H(\omega)H^*(\omega+\Omega)-H^*(\omega)H(\omega-\Omega)] &\approx \\ 2\operatorname{Re}[H(\omega)\frac{d}{d\omega}H^*(\omega)] &\approx \frac{d|H(\omega)|^2}{d\omega}\Omega \quad (12) \end{aligned}$$

假定对鉴频信号取导数,可得

$$k_0 = \frac{d(e)}{d\omega} \approx -2AP_0J_0(B)J_1(B) \cdot \Omega \frac{d|H(\omega)|^2}{d\omega} \quad (13)$$

根据式(13),在低频调制下,增大相关解调电路的增益 A 、可调谐光功率 P_0 、贝塞尔系数 $J_0(B)J_1(B)$ 及调制频率,都能使鉴频曲线斜率 k_0 增大,从而获得更好的跟踪锁定效果。进一步优化调制度也可得更好的鉴频曲线,由仿真得到的调制度优化曲线如图9(a)所示。由图可看出, $B=1.08$ 时, $J_0(B)J_1(B)$ 为最大值。不同调制度对应鉴频曲线图如9(b)所示。由图可得出, $B=1.08$ 时,鉴频曲线斜率最大。

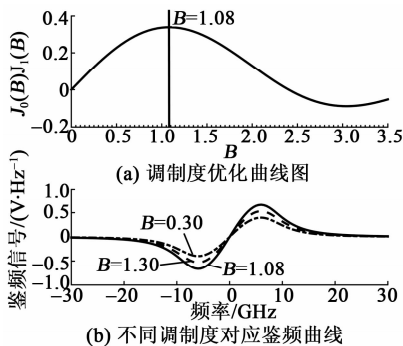


图9 调制度优化曲线图及不同调制度对应鉴频曲线图

4 结束语

通过采用 CO_2 激光熔融光纤法制备了直径为 $\varnothing 440 \mu\text{m}$ 的微球腔,对微球腔和锥形光纤的耦合特性进行了理论分析,并根据多光束干涉原理对微球腔的谐振特性作出了分析。通过微球腔谐振谱探测实验得到了不同耦合模式下的 Q_{ex} 值的谐振谱曲线,最大达到 1.08×10^8 ;通过仿真实验得到了不同调制频率情况下 PDH 鉴频曲线对应的不同特性,即当相位调制器调制频率较低时,鉴频信号表现为吸收特性;当相位调制器调制频率较高时,鉴频为表现色散特性。仿真实验还得到,在低频调制下,优化调制度后,锁定效果更好,为后面深入研究微球腔谐振频率的锁定实验提供了理论参考和数据依据。

参考文献:

- [1] VAHALA K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839-46.
- [2] DOMINGUEZJUAREZ J L, KOZYREFF G, MARTORELL J. Whispering gallery microresonators for second harmonic light generation from a low number of small molecules [J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 254.
- [3] MURUGAN G S, ZERVAS M N, PANITCHOB Y, et al. Integrated Nd-doped borosilicate glass microsphere laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 73-75.
- [4] WANG P, DING M, MURUGAN G S, et al. Packaged, high-Q, microsphere-resonator-based add-drop filter[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5208-5211.
- [5] 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 resonate mode in optical micro-sphere cavities [J]. Acta Photonica, 2002, 31(Z2): 221-226.
- [6] DIALLO S, LIN G, CHEMBO Y K. Giant thermo-optical relaxation oscillations in millimeter-size whispering gallery mode disk resonators[J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3834-7.
- [7] 张蔚云, 闫树斌, 甄国涌, 等. 面向角速度传感系统的微球腔实验研究[J]. 传感技术学报, 2014(1): 26-31.
ZHANG Weiyun, YAN Shubin, ZHEN Guoyong, et al. The experimental study of microsphere cavity for the angular velocity sensor system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014(1): 26-31.
- [8] 李鹏. 面向加速度检测的 MEMS 微环谐振腔传感关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [9] 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.
- [10] 吴至境. 频率精细可调谐布里渊光纤激光器及其在微波光子学中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [11] 胡妹玲, 耿伟彪, 苑丹丹, 等. 相位调制光外差稳频信号检测技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 233-238.
HU Zhuling, GENG Weibiao, WAN Dandan, et al. PDH frequency stabilization signal detection technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 233-238.