

文章编号: 0258-7025(2007)07-0962-05

# 模式失配对连续波腔衰荡技术测量的影响

谭中奇, 龙兴武

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 对连续波腔衰荡技术中的模式失配对测量结果的影响进行了理论分析和实验研究。在腔菲涅耳数较大时, 基于高斯光束的参数  $q$  变换规律及模式耦合有关理论, 分析和模拟了引起模式失配的两个主要因素——光束半径失配和相前曲率失配对一般稳定腔连续波腔衰荡法测量的影响, 并进行了实验验证。结果表明, 当腔的菲涅耳数较大时, 模式失配主要影响无源腔出射光功率的大小, 而对其衰荡特征影响不大。在同等模式耦合条件下, 选择功率大的光源及聚光面积大的探测器有利于提高测量精度。

**关键词** 测量; 模式失配; 光腔衰荡; 测量精度

**中图分类号** TN 247; TN 248 **文献标识码** A

## Influence of Mode Mismatch on Measurement of Continuous-Wave Cavity Ring-Down Technology

TAN Zhong-qi, LONG Xing-wu

(College of Optoelectronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The influence of mode mismatch on measurement in continuous-wave cavity ring-down technology was theoretically analyzed and experimentally studied. According to  $q$ -conversion of Gauss beam and mode coupling theory, the influence of light beam radius mismatch and phase front curvature mismatch on measurement was numerically simulated and experimentally confirmed as to general stable cavity with large Fresnel number. The results show that mode mismatch mainly affects the cavity ring-down signal output power rather than its ring-down feature when the cavity's Fresnel number is large. Under the same case of mode coupling, a laser of higher power and a detector of larger focal area can improve the measuring accuracy.

**Key words** measurement; mode mismatch; cavity ring-down; measuring accuracy

## 1 引 言

腔衰荡技术作为一种非常规腔损耗测量方法, 具有高灵敏度、高精度及测量结果不受入射光强起伏影响等优点<sup>[1~4]</sup>, 特别适合于高反镜反射率测量及微量气体浓度的光谱法检测。根据入射光的性质, 腔衰荡法可分为脉冲法和连续光波法<sup>[3,4]</sup>。在腔衰荡法测量应用中, 因入射光及被测无源腔都有各自的模式, 便产生了入射模与系统模(无源腔模式)的匹配问题。理论上可以通过高斯光束的传播变换理论和等价共焦腔等方法, 利用匹配元件(曲面

镜、透镜等)实现入射模与系统模的完全匹配<sup>[5]</sup>, 但因各种原因, 特别是当采用半导体激光器作为系统光源时, 其激光谱线较宽, 且光源模式为非严格的高斯模, 在实际工程中要想达到严格的模式匹配十分困难。当入射光模的能量不能转入相应的系统模(即模式失配)时, 会激发起多个系统模, 发生模式转换。在腔菲涅耳数较小时, 横模的衍射损耗随其阶次的增加迅速变大, 腔出射光功率信号呈多指数函数衰荡; 而更主要的是, 模式失配使得有限聚光面积的探测器获得的光功率减少, 引起信号信噪比的变差, 从而给测量结果带来误差。

收稿日期: 2006-08-31; 收到修改稿日期: 2007-03-19

作者简介: 谭中奇(1978—), 男, 湖南人, 博士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: tzq780904@163.com

导师简介: 龙兴武(1958—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com

易亨瑜等<sup>[6~8]</sup>针对脉冲腔衰荡法中共焦腔腔长失调引起的模式失配对测量精度的影响进行了详细的分析,提高了测量精度;龚元等<sup>[9]</sup>就连续波情况下的腔长失谐对光腔衰荡法测量结果的影响进行了初步实验;冀玉领等<sup>[10,11]</sup>对入射光与无源腔之间的非共轴及光轴之间的微小夹角引起的模式失配进行了研究。而本文对连续波腔衰荡技术中光束半径失配和相前曲率失配对测量的影响进行分析和讨论。光束半径失配和相前曲率失配是模式失配的两个重要因素。

## 2 理论分析及数值模拟

入射模与系统模不匹配时,将激发多个系统模。由于厄米-高斯函数的正交性,耦合只发生在偶偶模和奇奇模之间<sup>[5]</sup>。设从一个系统的基模耦合到另一个系统的基模的功率耦合系数为  $K$ ,有

$$K = (C_{00} C_{00}^*)^2 = \frac{4}{\left(\frac{\bar{w}}{w} + \frac{w}{\bar{w}}\right)^2 + \left(\frac{\pi w \bar{w}}{\lambda}\right)^2 \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{\bar{R}}\right]^2}, \quad (1)$$

式中  $C_{00}$  为入射模的  $x$  或  $y$  方向场向系数模的同一方向场的振幅耦合系数,  $C_{00}^*$  为  $C_{00}$  的复共轭,  $w, \bar{w}$  分别为某参考面上入射模和系统模的光斑半径,  $R, \bar{R}$  为某参考面上入射模和系统模的等相位面曲率半径。入射模向其他高阶模功率耦合系数为  $|C_{0m}|^2 \cdot |C_{0n}|^2$  ( $m, n$  分别为系统模的  $x, y$  方向横向参数), 其中

$$|C_{0m}|^2 = |C_{m0}|^2 = \frac{m!}{2^m \left(\frac{m!}{2}\right)^2} \sqrt{K} (1-K)^{m/2}, \quad (2)$$

当凹凹腔腔长为 0.48 m, 两腔镜曲率半径都为 10.0 m, 入射光波长为 650 nm 时, 腰斑半径约为 0.56 mm, 位于腔中央。图1模拟了无源腔高斯光

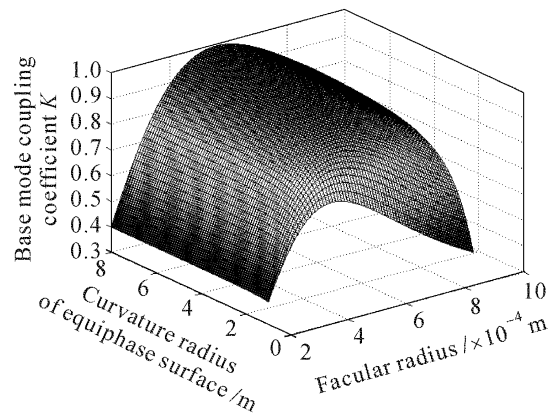


图1 不同模式情况下的基模功率耦合

Fig. 1 Basic mode coupling coefficient in different mode mismatch

腰处入射模光斑半径为 0.2~1.0 mm, 等相位面曲率半径为 2.0~8.0 m 时的基模耦合系数示意图。

在反射镜尺寸有限的情况下,模式的衍射损耗随其阶次的增加而迅速增大,具体腔衍射损耗值可以通过用数值计算的方式求得,腔的结构确定后,其各阶模衍射损耗主要由腔的非涅耳数决定。在实际应用中,常选择非涅耳数较大的无源腔,此时各阶模的衍射损耗很小,衍射损耗对测量的影响可以不作考虑。

无源腔出射光场的分布是入射光在腔内往返多次衍射叠加的共同结果,不同的初始入射光形成的稳定场分布是不相同的,模式耦合系数也不尽相同。入射光关断后,由于模式失配的存在,入射光经过在无源腔内一次往返后,其光腰位置和大小发生了变化,可能会引起腔出射光场分布发生改变,从而引起出射光功率衰减过程变形。这样一个过程可依照高斯光束的参数  $q$  变换规律<sup>[12]</sup> 进行分析。当入射光突然关断后,光在腔内往返  $n$  次后光场的分布可认为是由前次光束  $q_{n-1}$  经过一次往返传输后形成的新光束  $q_n$  决定,由参数  $q$  变化规律及腔矩阵  $T$  得到

$$\begin{cases} \frac{1}{q_0} = \frac{1}{R_0} - i \frac{\lambda}{\pi w_0^2}, & q_n = \frac{Aq_{n-1} + B}{Cq_{n-1} + D}, \\ \mathbf{T} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2L/R_2 & 2L(1 - L/R_2) \\ -[2/R_1 + 2(1 - 2L/R_1)/R_2] & -[2L/R_1 - (1 - 2L/R_1)(1 - 2L/R_2)] \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $q_0$  为入射高斯光束入射镜面处的参数  $q$  值,  $q_n$  为入射高斯光束在腔内  $n$  次往返后的  $q$  值,  $L$  为腔长,  $R_1, R_2$  为两腔镜曲率半径。将(3)式代入(1)式可得入射光基模向无源腔各阶模耦合系数,此时在聚光面大小为  $r_0$  的探测器上获得的总腔衰荡光强  $I(t)$  可表示为

$$\begin{cases} K_{mm}(t) I_0 \exp(-t/t_0) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} |\psi_{mm}(r, \theta, z, t)|^2 r dr d\theta \\ I(r_0, z, t) = \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} |\psi_{00}(r, \theta, z, t) \exp(-i\omega_{00}t) + \psi_{02}(r, \theta, z, t) \exp(-i\omega_{02}t) \dots|^2 r dr d\theta \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $K_{m_i}$  为耦合系数,  $I_0$  为入射光光强,  $t_0$  为腔衰荡时间,  $t_0 = L/(\delta c)^{[1]}$  (其中  $\delta$  为腔的损耗, 主要包括腔镜不完全反射损耗及腔内气体吸收损耗等,  $c$  为光速),  $\omega$  为谐振频率,  $\phi_{m_i}$  为沿  $z$  方向传播的高斯光束,  $r$  为垂直  $z$  方向平面的圆坐标半径。

对称共焦腔对于任意旁轴入射光都是二次简并的, 此时腔衰荡过程中的腔出射光场分布及各阶模耦合系数均不发生变化。因此, 对于理想共焦无源腔, 模式失配并未改变其衰荡曲线特征(衰减时间及线形), 而主要影响腔出射光功率信号的幅值, 当然探测器最后获得的信号幅值还与其聚光面积大小有关。

在工程实际中, 器件调节、温度变化及外界震动等因素使得共焦腔不可能达到理想状态, 更为一般的情况是无源腔为一般稳定腔, 其自再现模唯一、模式失配时, 入射光经过腔内一次往返后参数  $q$  值发生了变化。在脉冲腔衰荡法中, 这种变化将会严重影响腔出射光功率的衰荡线形<sup>[6~8]</sup>。而在连续波腔衰荡法中, 以凹凹无源腔为对象, 依据(3), (4)式模

拟光束半径和相前曲率失配同时存在的情况, 分析腔衰荡信号特征(不同探测器聚光面积  $r = 0.5 \text{ mm}$  及  $r = 2.0 \text{ mm}$ ) 以及其给测量结果带来的影响。在数值模拟中, 并未考虑不同模式间可能存在的拍频项, 因为在连续波腔衰荡系统中选用的探测器响应带宽有限(数兆赫兹), 远小于拍频项频率(数十、百兆赫兹)。

根据(1), (3), (4)式数值模拟 650 nm 入射光在无源腔(腔损为  $100 \times 10^{-6}$ ) 光腰处光束半径为 0.8 mm, 相前曲率为 5.0 m 情况下衰荡过程中的入射光束  $q$  值变化、基模功率耦合系数及线形变化情况, 如图 2 所示。可看出, 入射光关闭后, 其光斑  $q$  值随着时间的变化而呈周期性变化, 其基模与无源腔基模耦合效率不变, 图 2(c) 模拟了这种情况下不同光电探测器聚光面积下的腔衰荡曲线。将衰荡信号进行单指数拟合后, 即可求得无源腔的腔损值, 由于探测器输出的信号不可避免地存在噪声, 因此在数值模拟中加入幅值为信号最大值 0.1% 的噪声, 分析结果如表 1, SNR 为衰荡信号最大值的信噪比。

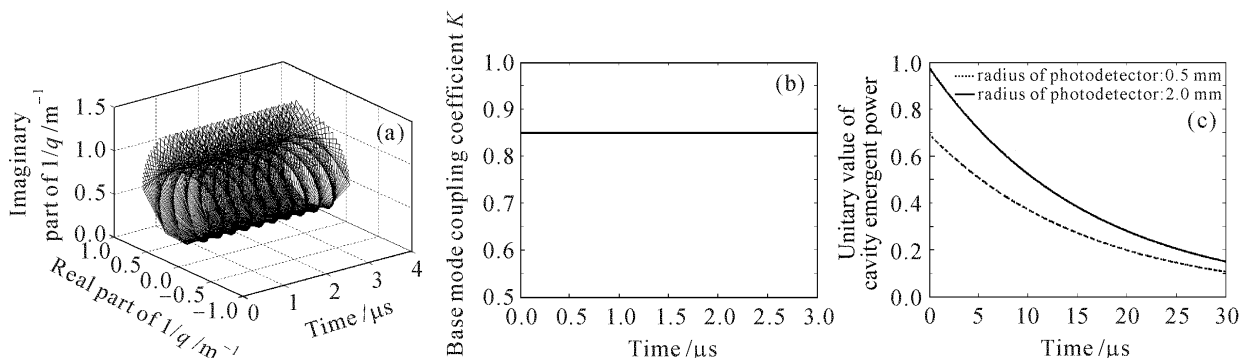


图 2 模式失配时, 腔光腰处入射模  $q$  值(a), 基模功率耦合系数(b)及衰荡信号(c)随时间的变化

Fig. 2 Change of  $q$  value at cavity waist (a), basic mode coupling coefficient (b), and ring-down signal (c) with time under the condition of mode mismatch

表 1 不同模式失配、不同探测器聚光面积情况下的衰荡信号及其拟合结果

Table 1 Ring-down signal and fitting result with different mode mismatch and detector's light gathering area

Radius of light gathering area /mm	0.5		2.0	
Incident light shape ( $\omega_0 / \text{mm} \times R_0 / \text{m}$ )	0.8 × 5.0	0.6 × 10.0	0.8 × 5.0	0.6 × 10.0
$K_0$	0.8501	0.9893	0.8501	0.9893
SNR /dB	28.42	28.92	29.90	30.00
Cavity loss / $\times 10^{-6}$	99.780	99.810	99.844	99.851

从数值模拟结果可以看出, 模式失配时并不改变腔衰荡信号的单指数衰减线形, 而主要引起探测器获得的信号信噪比发生变化, 从而给测量带来误差。减少模式失配程度、增大探测器聚光面积及入射光功率能减少此测量误差。

### 3 实 验

建立起一套连续波腔衰荡测量系统, 其结构如图 3 所示。该系统采用波长 650 nm 的半导体激光器作为光源, 通过关断半导体激光器的注入电流来

达到关断光入射的目的,节省了一个光开关器件。同时由于半导体激光器的线宽较大(约0.8 nm),且输出光功率大(15 mW),不需要调谐即可谐振,结构相对简单。该系统选用的探测器为 Si 探测器,其响应带宽为 10 MHz。在方波驱动电路(下降沿约 50 ns)调制下的半导体激光器经过准直和隔离器后,进入无源腔,当下下降沿到达时,驱动电路同时触

发高速数据采集卡(PCI4712, 40 MHz, 12 bit)进行采样,记录的衰荡信号经计算机非线性最小二乘拟合(列维布格-麦奎尔特法)得到衰荡时间,从而根据  $t_0 = L/(\delta c)$  求得腔损值。为了减少随机噪声信号对测量结果的影响,测量中通常对衰荡信号进行多次累计,然后平均。

实验分两步进行,首先考察不同探测器聚光面

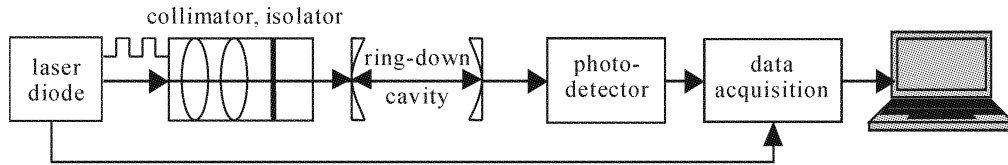


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of experiment system

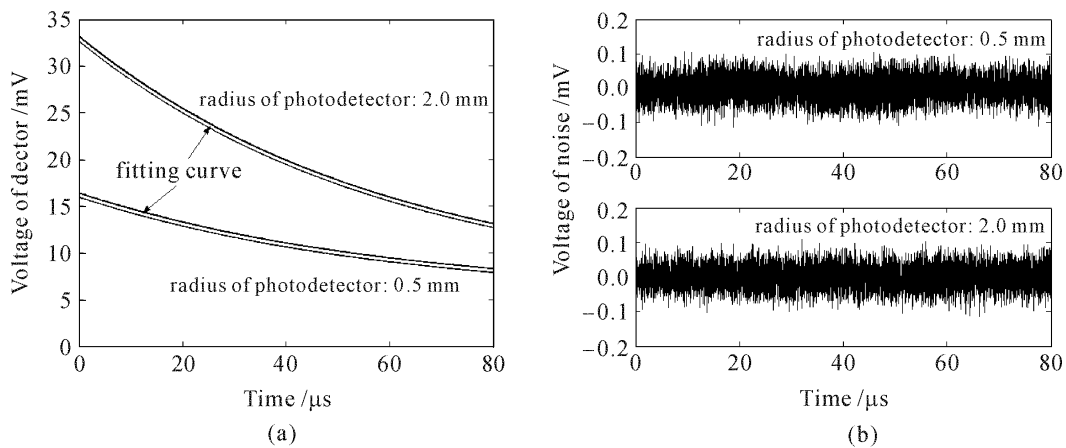


图 4 模式失配时,不同探测面积得到的衰荡信号(a)及其拟合误差(b)

Fig. 4 Ring-down signal (a) and fitting result (b) of different detecting area under the condition of mode mismatch

表 2 模式失配时,不同探测面积下测得的衰荡信号及其拟合结果

Table 2 Ring-down signal and fitting result of different detecting area under the condition of mode mismatch

Radius of light gathering area /mm	0.5					2.0				
Maximal signal value /mV	23.43	24.30	18.25	14.92	16.10	29.15	29.43	36.46	31.19	32.97
Cavity loss / $\times 10^{-6}$	55.24	55.52	55.44	55.82	55.74	55.50	55.54	55.92	55.18	55.86
Variance of fitting /mV	0.046	0.045	0.047	0.048	0.047	0.050	0.041	0.039	0.039	0.043

积下,存在模式失配时的衰荡信号线形及其拟合结果。无源腔选用两片曲率半径为10.0 m,反射面尺寸为 $\phi 25$  mm的球面镜,利用极低损耗离子溅射镀膜技术,在 Oxford 500 机上镀膜,腔镜的反射率大于 99.95%,腔长为0.48 m。半导体激光器出射场为非严格的高斯分布,发出的光经过透镜组后,经光隔离器垂直入射到无源腔上,此时光斑大小约为 3.0 mm,略有椭圆度。可知这种情况下的光入射,不可避免地存在模式失配。测得的腔衰荡信号及其拟合后的偏离单指数函数的噪声如图 4 所示。

从实验结果可以看出,在模式失配情况下腔衰

荡信号仍呈很好的单指数衰减线形,探测器光敏面积的不同,仅改变了腔衰荡信号的信噪比。对获得的腔衰荡信号的数据分析发现,和理论分析结果不同,实际获得的腔衰荡信号在函数形式上常表示为单指数项与常数项之和,其中常数项来自于探测器及其放大电路的偏置电压。采用列维布格-麦奎尔特法对腔衰荡信号进行数据拟合,得到的有关数据如表 2 所示。

为考察不同模式失配情况下,连续波腔衰荡法测量是否存在误差,我们进行了另一组实验。通过改变半导体激光器的准直系统焦距,从而改变入射

光斑的大小(2.0 mm→3.0 mm)及发散角,由此模拟不同入射光模式下的衰荡信号情况。测量的对象是另一个腔损约为 $100 \times 10^{-6}$ ,腔长为0.50 m的稳

定腔,并在探测器前加一个 $\phi 20$  mm的透镜对腔出射光进行聚焦,实验测量的数据如表3。

从表3数据可看出,在不同模式失配情况下,腔

表3 不同模式失配情况下测得的衰荡信号及其拟合结果

Table 3 Ring-down signal and fitting result with different mode mismatch

Incident light shape /mm	2.0					3.0				
Maximal signal value /mV	242.8	220.4	243.7	306.3	208.6	132.5	166.6	156.6	117.4	113.7
Cavity loss / $\times 10^{-6}$	115.1	115.6	115.2	113.3	112.9	118.9	119.3	115.3	120.3	119.4
Variance of fitting /mV	0.120	0.118	0.128	0.124	0.154	0.107	0.121	0.123	0.092	0.096

出射光功率衰减信号仍呈单指数衰减,只是腔出射光功率大小发生变化,引起了探测器获得的信号信噪比变化,但这对腔损耗的测量影响不大(两种情况下平均测量腔损误差约为 $4 \times 10^{-6}$ ),这种差别可能来自腔镜反射率的不均匀性以及不同情况下谐振点的微小差别。实验结果与理论分析中的数值模拟结果基本相符。

## 4 结 论

在无源腔菲涅耳数较大,不考虑腔内各阶模式衍射损耗带来的影响时,在腔内光衰荡过程中,模式失配情况下的入射模与系统模之间的各阶耦合系数不变,腔出射光场的分布也不随衰荡的进行而变化,同时由于探测器响应带宽有限,模式失配的程度仅影响腔出射光功率大小,而对其衰荡线形影响不大。减少模式失配程度、选择聚光面积较大的探测器及提高入射光功率有利于提高信号强度,从而提高信号信噪比。连续波腔衰荡法与脉冲腔衰荡法的测量结果对模式失配的敏感度不同。脉冲腔衰荡法测量的是单个脉冲光波在腔内的往返透射的光功率,模式失配时,脉冲光波在腔内一次往返并不能实现自再现,引起每次往返后探测器处光场的分布发生变化,使得有限探测器聚光面积上的光功率偏离指数衰减曲线。而连续波腔衰荡法的腔出射场是光波在腔内无数次往返出射叠加的结果,当入射光在腔内形成稳定振荡后,初始态已经不再重要,因此衰荡过程中,光一次往返的变化并不改变出射光场的分布,有限探测器聚光面积上的腔出射光功率信号仍按照单指数形式衰减。

## 参 考 文 献

1 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8):1238~1245

2 A. O'Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12):2544~2551

3 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications [J]. *Int. Rev. Phys. Chem.*, 2000, **19**(4):565~607

4 Sun Fuge, Dai Dongxu, Xie Jinchun *et al.*. Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):35~38  
孙福革,戴东旭,解金春等.用光腔衰荡光谱方法精确测量高反镜的反射率[J].*中国激光*, 1999, **A26**(1):35~38

5 Fang Honglie. Theory of Optical Cavity [M]. Beijing: Science Press, 1981  
方洪烈.光学谐振腔理论[M].北京:科学出版社, 1981

6 Yi Hengyu, Peng Yong, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(Suppl.):486~488  
易亨瑜,彭永,胡晓阳等.衰荡腔腔长失调的实验分析[J].*中国激光*, 2003, **30**(增刊):486~488

7 Yi Hengyu, Lü Baida, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment on its metrical precision of ring-down cavity spectroscopy [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2004, **16**(8):993~996  
易亨瑜,吕百达,胡晓阳等.腔长失调对光腔衰荡法测量精度的影响[J].*强激光与粒子束*, 2004, **16**(8):993~996

8 Yi Hengyu. Misalignment simulation of cavity ring-down waveform [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):399~404  
易亨瑜.衰荡腔失调下的波形仿真[J].*中国激光*, 2006, **33**(3):399~404

9 Gong Yuan, Li Bincheng. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1247~1250  
龚元,李斌成.连续激光光腔衰荡法精确测量高反射率[J].*中国激光*, 2006, **33**(9):1247~1250

10 Ji Yuling, Yang Peiling. Characteristic of modes coupling between axis offset cavities [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(4):20~23  
冀玉领,杨培林.非共轴腔之间的模式匹配特征[J].*激光杂志*, 2002, **23**(4):20~23

11 Ji Yuling, Li Shuguang, Hou Lantian. Characteristics of mode coupling between titled cavities [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(1):20~22  
冀玉领,李曙光,侯蓝田.倾斜腔之间的模式匹配特征[J].*光子·激光*, 2003, **14**(1):20~22

12 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Theory of Laser [M]. Fourth edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 28~30  
周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理[M].第4版.北京:国防工业出版社, 2000. 28~30