

文章编号: 1001-3806(2007)04-0438-04

腔长变化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, 长沙 410073)

摘要: 为了阐明腔长变化对测量的影响, 在考虑入射光源光谱线宽的情况下, 采用腔衰荡法和多光束干涉等有关理论, 就两种极限情况下腔长变化对连续波腔衰荡法测量的影响进行了分析和数值模拟, 并据此讨论了一般情况下腔长变化给测量带来的影响。分析表明, 腔长变化主要使衰荡腔谐振频率变得不稳定, 从而使得衰荡腔出射光功率及其衰荡特征发生变化, 进而给测量带来严重误差, 这将为分析该技术测量误差来源以及提高其测量精度提供理论指导。

关键词: 仪器测量与计量; 连续波腔衰荡法; 反射率; 腔长变化; 单指数衰减

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Influence of cavity length change on measurement of CW cavity ring-down

TAN Zhong-qi, LONG Xingwu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to clarify the impact of cavity length change on measurement taking the laser's linewidth into account, the influence of cavity length change on the measurement of cavity ring-down in two limiting cases was analyzed and simulated by using cavity ring-down and multiple-beam interferometry theory, hereby the general cases were discussed. Analyses showed the instability chiefly changed resonant frequency of ring-down cavity, then varied the emergent light power and the feature of ring-down signal which should bring serious measurement error. All of these will provide theory direction to measurement error analysis and improve measurement accuracy.

Key words measurement and metrology; continuous-wave cavity ring-down technology; reflectivity; change of cavity length; single exponent ring-down

引 言

腔衰荡法^[1]作为一种高精度、高灵敏度的测量方法, 常被应用于高反镜反射率测量以及痕量气体的光谱法检测中。它通过光波在无源谐振腔中的衰减时间来测量腔的损耗, 具有测量结果不受入射光强起伏影响及腔损耗越小精度越高等优点。腔衰荡法根据入射光性质分为脉冲腔衰荡法^[2-7]和连续波腔衰荡法^[8]。脉冲腔衰荡法用脉冲激光器作为光源, 宽度为几纳秒的脉冲光在无源腔中来回反射、逐渐衰减; 与脉冲腔衰荡法不同, 连续波腔衰荡法建立在多光束干涉理论的基础上, 采用连续光源 (由于可以采用半导体激光器做为光源, 该技术更利于工程化), 当入射光频率与无源腔某谐振频率重合时, 腔出射光强最大, 如果此时迅速切断光源, 出射光强将随时间以指数形式衰减^[8]。出射光强衰减时间常数 t_0 反映了腔损耗情况, 有 $t_0 =$

l/c ; 其中 δ 为腔损耗, l 为腔长, c 为光速。指数拟合探测器获取的腔衰荡信号得出衰减时间常数 t_0 后, 可最终求出腔损耗值。

相对于脉冲腔衰荡法而言, 连续波腔衰荡法对谐振腔腔长的变化更加敏感。实际应用中, 由于外界温度变化或环境机械震动等原因, 总存在腔长的变化。不考虑腔镜失调情况下, 腔长静态失调变化对脉冲腔衰荡法测量的影响, 有学者^[4,5]已进行过分析, 作者现就连续波腔衰荡法应用中腔长动静态变化对测量的影响进行分析和讨论。

1 分析及模拟

在稳定腔结构中, 只要腔长的变化不足以引起腔结构的改变 (由稳定腔变为不稳定腔), 其几何损耗可忽略不计。当然, 腔长的微小变化会引起入射光耦合效率以及腔内衍射损耗的微小变化, 但这些都影响测量结果的主要原因。对于连续波腔衰荡测量系统而言, 腔长的不稳定带来的测量误差主要是腔内谐振频率的不稳定引发的腔出射光强以及腔衰荡信号特征的改变而造成的。

作者简介: 谭中奇 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事光电检测方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: Xw_bng110@sina.com

收稿日期: 2006-06-29; 收到修改稿日期: 2006-11-10

在连续波腔衰荡法测量过程中,不同的腔长变化速度对测量的影响机理是不同的;同时,由于不同损耗值的腔具有不同的衰荡时间,测量中需要的充光时间也不相同,因此,相同的腔长变化速度对于不同的衰荡腔测量影响也不尽相同。以腔衰荡时间内腔失调引起的腔中心频率变化(中心频率变化幅度等于入射光线宽)为参考速度 v_0 ,可对不同情况进行分析。腔长变化引起的腔纵模频率 ν_c 在一定范围 $\Delta\nu$ 内漂移,不考虑腔内介质折射率影响时^[9],有:

$$\Delta\nu = \frac{\partial\nu_c}{\partial l} \Delta l = -\nu_c \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

对于某两腔镜反射率为 99.99%,腔长为 0.5m 的无源谐振腔,设入射光波长为 650nm,光谱线宽为 2MHz^[10],通过(1)式可求出当衰荡腔长变化率为 4.3×10^{-9} (腔长变化 2.15mm)。不考虑其它损耗,其腔衰荡时间为 16.7μs 此时 $v_0 = 1.28 \times 10^{-4}$ m/s

如果腔长变化速度远小于 v_0 ,入射光有足够的时间在谐振腔内起振,这时,多光束干涉加强条件仍能满足,腔纵模概念仍旧适用,此时采用多光束干涉理论进行分析。对于前面设定的衰荡腔,其腔纵模线宽约为 0.01MHz 远小于入射光谱线宽 2MHz 因此,在腔纵模宽度内,激光功率可以近似为常数。这时腔出射光强公式可以表示为:

$$I_1 = \frac{A I_0 \nu_0 / \pi}{\nu_0^2 + (\omega_c + \Delta\omega - \omega_0)^2} \int_0^{\nu_0} \frac{1}{1 + [(\omega - \omega_c) / \nu_c]^2} d\omega \quad (2)$$

式中, A 为系数, I_0 表示光入射光强, ν_0 为入射光光谱半线宽, ν_c 表示腔纵模半峰全宽, ω_0, ω_c 分别表示为入射光中心频率和腔的纵模频率, $\Delta\omega$ 为两者之差, ω 为入射光频率。假定无腔长变化时入射光中心频率与腔谐振中心频率重合,即 $\omega_0 = \omega_c$,对于入射光光谱宽度为 2MHz 耦合系数为 1,光强为 10mW 的情况,此时的腔出射最大光强约为 50μW。

由(2)式可分析在激光功率相同时,不同激光线宽情况下的腔长变化给腔出射光强带来的影响(见图 1)。

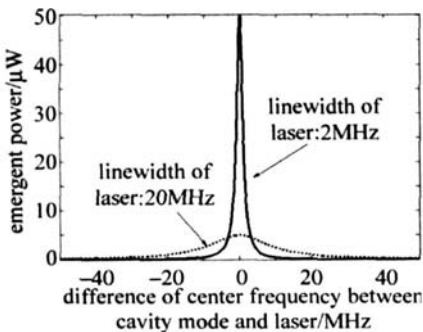


Fig 1 Cavity emergent power changes with deviation between laser central frequency and cavity resonant frequency

从图 1 可以看出,腔长变化将会影响腔出射功率,激光谱线越窄,这种影响越明显。依据(1)式可知,要保持腔谐振频率变化范围为 2MHz 需要腔长的稳定度为 4.3×10^{-8} 。当采用线宽为 2MHz 的光源,单次测量出射光功率将变化接近 100%;但当采用入射激光线宽为 20MHz 时,出射光强变化幅度减少 50%。

实践证明,探测器获得连续波腔衰荡信号通常表示为:

$$f(t) = A \exp(-t/t_0) + B \quad (3)$$

的函数形式,式中, A 和 B 为系数, t 为时间,通过拟合探测器获得的腔衰荡光功率信号,拟合得到的腔衰荡信号衰减时间 t_0 就能得到有关腔损耗参数,对函数形式为(3)式的数据拟合通常采用非线性最小二乘法进行。其中列维布格-麦奎尔特方法实用效果很好^[11],现已成为求解非线性最小二乘问题的标准方法。

腔出射光功率的变化必定会引起探测器获取的信号信噪比变化,从而给数据拟合带来误差,影响测量结果。表 1 所示的数据为实际测得的某衰荡腔在不同腔出射光强情况下,腔衰荡法测量得到的列维布格-麦奎尔特非线性最小二乘法数据拟合结果和拟合误差情况,由此可以模拟不同腔出射光强与测量结果之间的关系。可从表中看出,不同腔出射功率情况,数据拟合结果不同,但可知腔出射光功率越小,其拟合误差越大,其测量结果越不可靠。

Table 1 Data fitting of cavity ring-down signal with different outgoing light power

group	A	B	C	D	E
maximum signal of detector/mV	57.4	120.8	136.9	156.9	178.9
loss of cavity/10 ⁻⁶	40.8714	37.0316	35.2536	35.9846	36.3628
ratio of fitting variance and maximum detector value	0.0103	0.0033	0.0035	0.0034	0.0031

虽然腔长变化会引起腔出射功率的变化,但由于腔衰荡信号起振、衰荡时间很短(与腔损有关,一般为微秒级),腔长变化很小,甚至可忽略,这种腔失调并不会影响腔出射光信号的单指数衰减特征。这是因为,腔衰荡时间决定于腔损耗,无论是高反镜还是气体吸收,在激光线宽范围内,其损耗系数看作常数,只要入射光关断时间足够快,腔衰荡仍成单指数函数形式衰减。

当腔长变化速度足够快,远大于 v_0 ,光波根本没有时间在腔内起振,此时多光束干涉概念不再存在,腔纵模也将不复存在。腔出射光强不能再表示成(2)式的形式,腔出射光强可以认为是一系列不同幅值、不同相位光波的叠加,出射光波场不再满足光的稳定干涉条

件, 出射光强可以表示为经历过多次反射后的入射光强的叠加, 这时候连续波腔衰荡近似为脉冲腔衰荡, 有:

$$I_t = I_0 T_1 T_2 + I_0 T_1 (1 - T_1) (1 - T_2) T_2 + I_0 T_1 (1 - T_1)^2 (1 - T_2)^2 T_2 \dots \quad (4)$$

式中, T_1, T_2 为前后腔镜透过率。由 (4) 式可算得, 对于 10mW 半导体激光器, 两腔镜反射率为 99.99% 的无源腔最终出射光强约为 0.5μW。这种情况下的腔出射光功率与入射光关断时间之间关系和脉冲腔衰荡法不同, 分析如下。设入射光在关断前后光强表示为:

$$\begin{cases} I_0(t) = I_0, & (t < 0) \\ I_0(t) = I_0 \exp(-t/t_s), & (t \geq 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中, t_s 表示光关断时间常数。则可得知, 入射光关断后腔出射光强可以表示为:

$$I_t(Nt_c) = I_0 T_1 T_2 \left[\frac{(R_1 R_2)^N}{1 - R_1 R_2} + \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-\frac{n - N}{t_s} t_c\right) (R_1 R_2)^n \right] \quad (6)$$

式中, R_1, R_2 为前后腔镜反射率。 $t_c = 2l/c$ 表示腔时间常数, 腔衰荡时间常数 $t_0 \approx 16.7\mu s$ 。通过 (6) 式, 取入射光关断时间为 1.0μs, 0.1μs 两种情况下的腔出射光强进行数值分析 (见图 2 图 3)。从两图可看出, 只要入射光关断时间足够短, 在腔长高速变化情况下, 腔出射光强仍能保持单指数衰减特征。

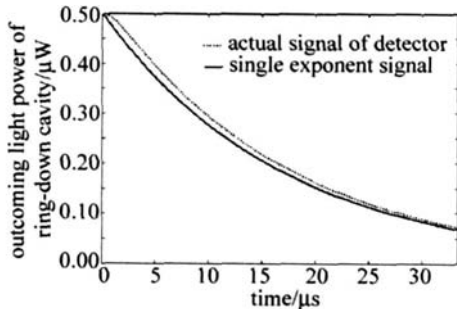


Fig 2 Ring-down curve of signal when shut time is 1.0μs

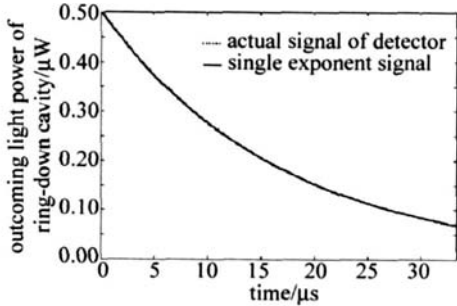


Fig 3 Ring-down curve of signal when shut time is 0.1μs

当腔长变化速度与 v_0 具有相同的数量级时, 分析和建模比较困难, 但在探测器信号的连续采集数字化过程的任意某时刻, 仍可用腔的多光束干涉理论进行分析 (见 (2) 式)。在此情况下, 腔衰荡信号采样时间内的腔长变化不再能忽略。腔长的变化使得衰荡信号

偏离单指数衰减形式, 如果腔长的变化使得腔纵模向着入射激光的中心频率移动, 测得信号衰荡减缓, 可知, 测得的腔衰荡时间将大于真实值; 相反, 如果腔纵模远离激光中心频率时, 测得信号衰荡加快, 测得的腔衰荡时间将小于真实值; 当腔纵模围绕某频率振荡时, 腔衰荡信号将不再光滑, 而是围绕某单指数信号起伏。下面, 就这种腔长变化情况下的腔衰荡信号衰荡特征进行模拟仿真, 模拟对象为腔损耗约为 44×10^{-6} 的衰荡腔, 假定腔衰荡信号采样时间内腔长变化引起的腔纵模变化幅值为 20MHz, 此时腔长变化幅度为其 4.3×10^{-8} 倍 (650nm 处), 对于腔长为 0.5m 的谐振腔, 腔长变化量为 21.5nm, 变化速度为 $1.28 \times 10^{-3} m/s$ ($t_0 \approx 16.7\mu s$)。入射光关断时, 激光中心频率与腔纵模频率重合, 比较激光线宽为 2MHz, 20MHz 两种情况下的腔衰荡信号特征如图 4 所示, 假设入射光关断时间为 0。

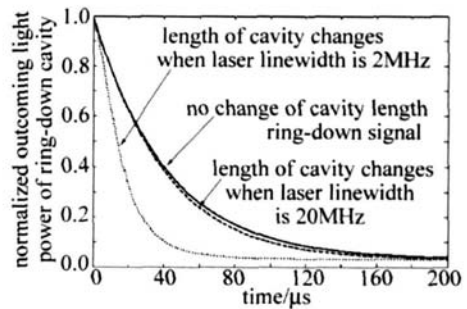


Fig 4 Ring-down signal curve of different laser's linewidths (2MHz and 20MHz) when cavity length changes

可见, 腔长的变化引起测量结果的变化, 在相同的腔长变化速度和变化幅值时, 不考虑腔出射光强的变化, 激光谱线越宽, 其测量结果对于这种变化越不敏感。腔长变化在改变腔衰荡信号衰荡时间的同时, 也改变了其单指数衰减特征, 这一点可以从数据拟合方差与最大信号值之间的比值看出。

2 讨论与小结

上面分析中, 首先针对腔长变化可能出现的两种极端情况进行, 从中可以得出, 对于一般的半导体激光器而言, 在连续波腔衰荡光谱技术中, 只要入射光关断时间足够快, 极端情况下的腔长变化并不会改变腔出射光强的单指数衰减特征, 而是主要影响着出射光功率的幅值。但对于一般情况下的腔失调, 上述分析结果不再成立, 腔衰荡信号将偏离单指数衰减形式。很明显, 腔长变化对于连续波腔衰荡法测量是不利的, 特别是腔衰荡过程中的腔长变化, 它将会引起信号单指数衰减特征的变坏, 给测量结果带来极大的误差。经分析认为, 对于这种因为腔长的变化引起的误差, 有效的应对方式有以下几种: (1) 采用膨胀系数小的材料

做腔体,同时对腔体采取减震、恒温等措施,从腔体结构上减少腔长变化;(2)通过调节入射光频率来保持入射光与无源腔的匹配耦合,让入射光频率随腔长变化而变化,减少两者相对的不稳定性;(3)采用入射光谱线较宽的半导体激光器作为光源,同时提高入射光功率。值得提到的是,也有利用腔长变化来测量的新方法,比如在连续波腔衰荡法基础上产生的腔内增强吸收法,该方法就是刻意打破腔稳定谐振条件,通过一段时间内的出射光功率的积分来测量腔内气体吸收^[12],可以看出,原理类似前面分析中的极限情况中的快速腔长变化情况。

参 考 文 献

- [1] BERDEN G, PEETERS R, MEIJER G. Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications [J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 2000, 19(4): 565~ 607.
- [2] O'KEEFE A, DEACON D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Review of Science Instrum*, 1988, 59(12): 2544~ 2551.
- [3] SUN F G, DAID X, XIE J Ch *et al* Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999, A26(1): 35~ 38(in Chinese).
- [4] YIH Y, PENG Y, HU X Y *et al* Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 31(S1): 486~ 488(in Chinese).
- [5] YIH Y, LÜ B D, HU X Y *et al* Influence of length misadjustment on isometrical precision of ring-down cavity spectroscopy [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2004, 16(8): 993~ 996(in Chinese).
- [6] YIH Y, LÜ B D, PENG Y *et al* Influence of detector's aperture on isometrical precision of ring-down cavity [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 231~ 236(in Chinese).
- [7] YIH Y, PENG Y, TAN X Q *et al* Experimental study of reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring down method [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 337~ 339(in Chinese).
- [8] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S M. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl Opt* 1984, 23(8): 1238~ 1245.
- [9] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN Ch R *et al* Theory of laser [M]. Beijing Defence Industry Press 2000. 166~ 167(in Chinese).
- [10] CHEN X Z, YAO J L, LIY M *et al* A narrow linewidth diode laser for high resolution spectroscopy and its properties [J]. *Acta Optica Sinica* 1996, 16(10): 1383~ 1388(in Chinese).
- [11] HE G Y. Usual numerical value arithmetic volume of visual C++ [M]. Beijing Science Press 2002. 466~ 517(in Chinese).
- [12] PEI Sh X, GAO X M, CUI F P *et al* Study of cavity enhanced absorption spectroscopy based on a swept diode laser [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* 2004, 2(6): 30~ 33(in Chinese).
- (上接第 405 页)
- [2] SRIVASTAVA D, CHANG ITH, LORETTO M H. The optimization of processing parameters and characterization of microstructure of direct laser fabricated TiAl alloy components [J]. *Materials and Design* 2000, 21: 425~ 433.
- [3] MILEW SKI J Q, DICKERSON P G, NEMEC R B. Application of a manufacturing model for the optimization of additive processing of Inconel alloy 690 [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 1999, 91: 18~ 28.
- [4] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMIATN S H. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity and build height in laser deposited Ti6Al4V [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43: 299~ 305.
- [5] JI S, LI P, ZENG X. Microstructure and mechanical property analyses of the metal parts direct fabricated by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 130~ 132(in Chinese).
- [6] ZHANG Y, XIM, SHI L *et al* Microstructure and properties of 316L stainless steel fabricated by laser direct forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering* 2002, 31(2): 103~ 105(in Chinese).
- [7] ZHONG M, YANG L, LIU W *et al* Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2004, 31(4): 482~ 487(in Chinese).
- [8] TAN H, CHEN J, YANG H *et al* Real-time sensing and closed-loop control of laser rapid forming process [J]. *Applied Laser* 2005, 25(2): 73~ 76(in Chinese).
- [9] LI P. Direct laser fabrication of 3-dimensional metal parts based on laser cladding [D]. Wuhan Huazhong University of Science & Technology, 2005. 33~ 95(in Chinese).
- [10] YANG T, HU Q, ZENG X *et al* Study on the algorithm of sectional contour lines building for laser direct metal forming [J]. *Electron and Information Technology*, 2003(6): 32~ 35(in Chinese).
- [11] The Compiling Group for the Book *Methods of orthogonal experimental design* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1979. 52(in Chinese).