

文章编号: 0258-7025(2009)04-0959-05

探测器的响应特性及对连续波腔衰荡技术测量的影响

谭中奇 龙兴武 张斌

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对近红外探测器 PDA400 的响应特性进行了测试, 并就探测器响应特性对连续波腔衰荡法腔损耗测量结果的影响进行了理论分析和实验研究。通过求得的探测器线性响应情况下的响应函数, 推导出衰荡信号输入时探测器的输出信号线形, 发现原本应呈单指数衰减的信号变为了双指数衰减。根据探测器响应时间的测试结果, 针对 PDA400 探测器增益设置为 20 dB, 40 dB 两种典型情况下的衰荡信号拟合进行了研究。提出了针对不同探测器增益设置(不同响应时间)时的衰荡信号数据处理方式, 并进行实验验证, 消弱了探测器响应特征对腔损耗测量结果的影响。最后就探测器非线性响应情况下的衰荡数据处理作了讨论。

关键词 测量; 腔损耗; 连续波腔衰荡法; 探测器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093604.0959

Detector's Response Characteristic and Its Influence on Metrical Result of Continuous-Wave Cavity Ring-Down Technique

Tan Zhongqi Long Xingwu Zhang Bin

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The response characteristic of near infrared detector PDA400 was measured, then the theoretical analysis and experimental study, which focused on the relation between detector's response characteristic and metrical result of continuous-wave cavity ring down technique, were both carried on. With the linear response function, the output signal of PDA400 was deducted when ring down signal was used as input. In this case, analysis shows that the signal shape of PDA400 has turned from single to double exponential function. After the response times of PDA400 in different gains were measured, the fitting method of ring down signal in two typical detector's gain(20 dB and 40 dB) was studied, and two kinds of methods were proposed and tested with experiments. Furthermore, when considering detector's nonlinear response, the method of data processing is discussed too.

Key words measurement; cavity loss; continuous-wave cavity ring-down; detector

1 引言

腔衰荡技术作为一种非常规腔损耗测量技术, 已被广泛应用于高反射率测量^[1~4]及气态物质弱吸收检测^[5~7], 该技术通过测量光波在高 Q 值无源腔中的衰减时间来获取腔的总损耗值, 从而避免了入射光强起伏对测量结果的影响; 同时当腔损耗越小时, 腔输出信号的衰减时间将越长, 系统对腔损耗的测量精度也会越高。

根据入射光的性质^[8], 腔衰荡法可分为脉冲法

和连续光波法。无论是那种形式的腔衰荡技术, 理论分析都表明, 衰荡腔的出射光功率将呈单指数衰减函数, 其衰减时间即代表腔的损耗值。为了准确获得出射光功率的衰减时间, 目前常用的做法是: 用光电探测器将衰荡光信号转换为电信号, 通过高速数据采集卡将信号数字化后, 由计算机用函数拟合法求得其衰减时间。从这个过程可看出, 腔损耗准确测量的前提条件是保证衰荡信号在传输过程中不失真; 但若不可避免存在信号失真时, 则需要对数据

收稿日期: 2008-05-16; 收到修改稿日期: 2008-07-07

作者简介: 谭中奇(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事光电检测和光谱测量等方面的研究。E-mail: zhqitan@sina.com

导师简介: 龙兴武(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光与光电子技术等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com

拟合前采取措施消除信号失真对测量结果的影响。这些工作不仅对于单波长腔损耗测量(多用于腔镜反射率测量^[4])还是多波长腔损耗测量(多用于物质吸收光谱测量^[9])意义都十分重大。

引起衰荡信号传输过程中失真的各种因素中(探测器、数据采集卡等),光电探测器性能的影响最为显著。在脉冲法中,由于其腔出射光衰荡信号为一个峰值呈指数衰减的光脉冲信号(脉冲宽度为纳秒级,前后脉冲间隔由腔长决定)。此时探测器响应速度及幅值响应特征决定其输出电信号的失真度。对此,文献^[10]进行了较为深入的分析,并提出了测量结果的两种校对途径;尽管连续光波法改用连续激光器作为光源,使得腔出射光功率信号变为衰减时间为微秒级的连续单指数衰减信号,但探测器的响应特征对腔损耗测量结果同样存在显著影响。

2 理论分析

对探测器在不同增益设置下的幅值及时间响应特征进行测量,测量的对象是电流调制下的分布反馈(DFB)激光器光输出,测量结果如图 1 所示。其中图 1(a)为电流调制信号为锯齿波时,不同增益设置时的探测器 PDA400 对 DFB 激光器出射光信号的响应曲线。从图可看出,探测器对光功率信号的幅值响应的线性特征明显(对其严格的线性度测量需专门实验补充^[11,12]),但随着增益的变大,探测器对跃变信号的响应变慢。为准确测量探测器的时间响应特征,将电流调制信号改为小幅值方波,方波的上升、下降沿时间约为 40 ns (Agilent, MSO6052A),此时探测器输出信号如图 1(b)所示。从图(b)可看出,对于负跃变光信号的探测器响应曲线为光滑的单指数衰减函数,对 PDA400 的响应曲线进行单指数拟合,可得到小幅值方波调制信号下增益为 0~40 dB 时探测器的平均响应时间分别为 82.0967 ns, 100.1181 ns, 297.5152 ns, 831.9968 ns 及 2.4527 μ s。

根据以上测试结果,建立探测器系统的数学模型^[13]。假设给探测器添加一个单边阶跃跃变光信号时,即输入信号函数形式为 $x(t) = u(-t) + \alpha u(t)$, $0 \leq \alpha < 1$, 可知探测器输出的信号也将为单指数衰减函数,即 $y(t) = ku(-t) + k(1-\alpha)\exp(-t/t_{y0})u(t) + \alpha ku(t)$, k 为幅值响应系数。当 k 与输入信号相关时,此时的探测器为非线性系统,由于目前对于这种非线性系统没有较简单的办法进行处理,因此分析困难;当 k 与输入无关时,探测器为线

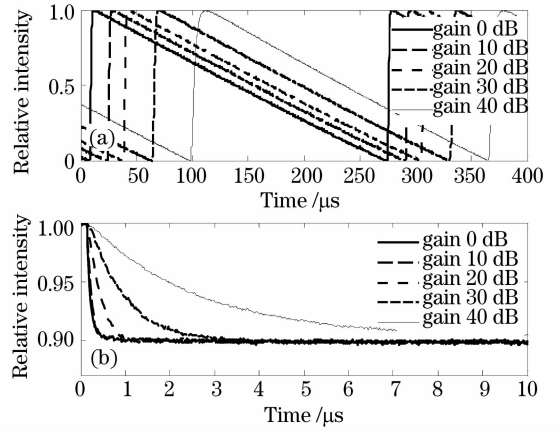


图 1 不同增益下 PDA400 对下降沿光信号的响应曲线 (a) 锯齿波调制光信号的响应图; (b) 小幅值调制光信号的响应图

Fig. 1 Response curve of PDA400 to light signal's trailing edge with different detector's gains. (a) the laser modulated with saw wave signal; (b) the laser modulated with small square wave signal

性系统,此时可将探测器系统由时域转换为频域进行分析,可据此来考察单指数衰减信号输入时探测器的输出信号形式。系统的函数可表示为

$$H(\omega) = \frac{\pi k \delta(\omega) - \frac{k}{j\omega} + \frac{k}{1/t_{y0} + j\omega} + \alpha k \pi \delta(\omega) + \frac{\alpha k}{j\omega}}{\pi \delta(\omega) - \frac{1}{j\omega} + \alpha \pi \delta(\omega) + \frac{\alpha}{j\omega}} = \frac{k}{1 + j\omega t_{y0}} \quad (1)$$

当实际衰减时间为 t_x 的单指数衰荡信号(函数形式表示为 $x(t) = u(-t) + \exp(-t/t_x)u(t)$) 入射到探测器上时,根据(1)式,可求得探测器的输出信号 $y(t)$ 表示为

$$\left\{ \begin{aligned} Y(\omega) &= X(\omega)H(\omega) = \\ &k \cdot \frac{\pi \delta(\omega) - 1/j\omega + 1/(1/t_x + j\omega)}{1 + j\omega t_{y0}}, \\ y(t) &= F^{-1}[Y(\omega)] = \\ &ku(-t) + k \left[\frac{t_{y0}}{t_{y0} - t_x} \exp(-t/t_{y0}) + \right. \\ &\left. \frac{t_x}{t_x - t_{y0}} \exp(-t/t_x) \right] u(t). \end{aligned} \right. \quad (2)$$

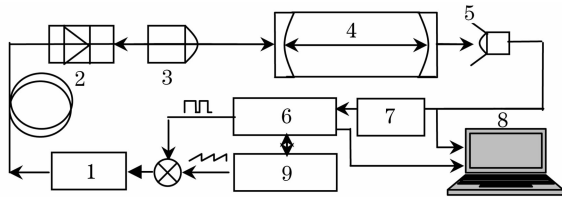
从式(2)的函数表达式可看出,当探测器的响应时间有限时,其输出信号将偏离原本的单指数函数衰减,改为双指数衰减形式,且这种偏离程度由探测器的响应时间及其与腔衰减时间常数之间的比列关系来决定。连续波腔衰荡法测量中,腔损耗的获取

通常通过单指数函数拟合衰荡信号求得,如果对此时的探测器输出信号仍就用单指函数对其进行拟合,拟合结果必定偏离腔损耗的真实值。

由(2)式可知,若要从 $y(t)$ 中较为准确地恢复出原始信号衰减时间,可以针对不同探测器增益设置(对应不同的探测器响应时间),采取如下措施:若探测器增益较小(如 0 dB, 10 dB, 20 dB),在对衰荡信号拟合前,舍掉信号开始一定时间段内的数据,该措施相当于将(2)式中的探测器本身响应衰减项消除,不计入拟合范围;若探测器增益较大(如 30 dB, 40 dB),衰荡信号拟合中的目标函数可改为双指数衰减函数。

3 实验研究

以 PDA400 为系统探测器,建立调谐式连续波腔衰荡测量法腔损耗测试系统进行实验,系统结构如图 2 所示。



1: DFB laser; 2: isolator; 3: collimator; 4: low loss cavity; 5: PDA400 Detector; 6: comparator and trigger; 7: peak detector; 8: A/D and computer; 9: driver circuit

图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of experimental system

该系统固定腔体不动,通过调谐入射光的频率使得外部入射光在无源腔内谐振,PDA400 监测腔出射光功率大小,并将输出值传给峰值探测电路,由此来设定阈值。当腔输出光功率大于阈值时,比较电路在极短(约 40 ns)时间内关断 DFB 激光器,进行衰荡测量,并同时触发高速数据采集卡采集 PDA 探测到的单指数衰减信号,由计算机拟合此衰荡信号求得腔损耗值大小。利用此系统,针对探测器两种典型响应时间情况(增益设置为 20 dB, 40 dB)、

不同腔损耗值情况下的腔衰荡法腔损耗测量及衰荡信号处理方式进行比较研究。

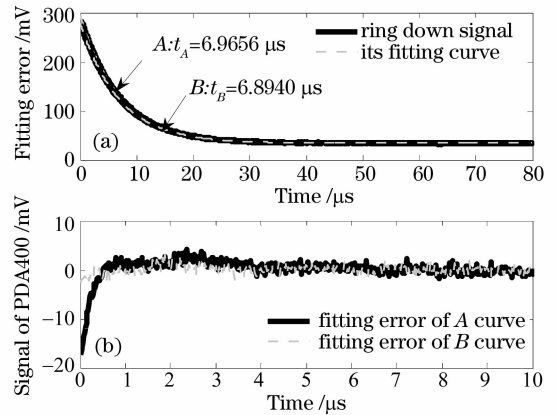


图 3 PDA400 增益为 20 dB 时腔衰荡测试及拟合图

A : 全段数据拟合; B : 部分数据拟合

Fig. 3 Ring down signal and its fitting when the gain of PDA400 is 20 dB. A : Fitting of all data; B :

Fitting of part data

图 3(a)为单程损耗约为 170×10^{-6} 无源腔用连续波腔衰荡法测量得的衰荡曲线。根据理论分析,对衰荡数据进行不同处理方式的比较。图中的 A 线为高速数据采集卡所采集的长度 $80 \mu s$ 范围内的衰荡曲线及其采用非线性最小二乘法^[14]进行单指数拟合的结果;图中的 B 线以理论推导结果为指导,将衰荡信号最开始的 $0.5 \mu s$ 内的数据舍去,再进行拟合的结果。从图 3(b)的两次拟合的误差结果可明显看出,完整的腔衰荡信号最初开始存在一个较快的衰减信号,这就是探测器本身响应引起的。由于目前除连波腔衰荡技术本身外,对于这种极弱损耗的测量没有其他方法来验证。因此,此时分析以 5 次腔衰荡信号的衰减时间重复测量精度为参照,对两种数据处理方式的优劣进行比较,结果如表 1 所示。从表 1 的结果可看出,当探测器响应时间较小时,本文所提出的简单的数据处理方式是行之有效的,且效率较高,能提高系统腔损耗结果的测量精度,保证结果的真实性。

表 1 PDA200 增益设为 20 dB 时,5 组衰荡数据不同拟合方式下的分析结果

Table 1 Analysis results of 5 groups of ring down signal with different methods when gain of PDA200 is 20 dB

Method	Group 1/ μs	2/ μs	3/ μs	4/ μs	5/ μs	Average/ μs	Stard error/ μs
A: t_A	6.9656	6.8311	6.8682	6.8547	6.8891	6.8817	0.0460
B: t_B	6.8940	6.8036	6.8551	6.8591	6.8615	6.8547	0.0291

当无源腔的腔内损耗增加时(在入射光波长处,

如腔内存在某种吸收介质),同等入射光功率及光谱

线宽的前提下,腔出射光功率将大大减少。为了保证探测器所获取信号的幅值,通常的办法是增大探测器的增益,但这将使探测器响应时间变长。采取此方法对探测器增益设置为 40 dB 情况下的腔损耗测量及数据处理方式进行实验。

图 4(a)中的衰荡信号,仍旧对其进行单指数函数拟合,可见拟合较为成功,但并不意味着拟合结果真实。根据前面测得的 40 dB 设置时的探测器响应时间,对其进行双指数函数拟合。由于腔损耗较大时,其测量误差较大,因此以函数拟合误差为标准,考察不同目标函数拟合情况下的拟合精度。分析结果如表 2 所示。从表 2 看出,探测器响应较慢时,若用单指数函数进行拟合得到的腔衰减时间要远大于双指数函数拟合的结果,同时拟合误差也提示,双指数衰减函数更加符合实际情况,已知探测器该增益设置处的响应时间后,可求得较为真实的腔损耗值。

表 2 PDA400 益为 40 dB 时,目标函数为 A (单指数), B (双指数)时的衰荡信号拟合结果
Table 2 Fitting results of ring down signal with target function A (single exponential function) and B (double exponential function) when the gain of PDA400 is 40 dB

A : $T_0 / \mu\text{s}$	B : $T_1 / \mu\text{s}$	B : $T_2 / \mu\text{s}$	Fitting error A / mV	Fitting error B / mV
2.8229	2.3763	2.4355	2.0080	1.9692
2.8976	2.3392	2.4259	2.3326	2.1205
2.8400	2.4847	2.4280	2.0661	2.0387
2.8389	2.5054	2.4526	1.9613	1.9519

4 结果分析

连续光波腔衰荡技术中,探测器所测量的信号为单指数衰减信号。在分析中,一般认为探测器为线性响应,因此当探测器响应时间有限时,这就涉及到用一个有限时间响应的探测器对随时间变化的光衰荡信号的检测问题,此时的衰荡信号为探测器时间响应与信号时间变化之间的卷积。为准确获取测量数据的衰减时间,通常的做法是:首先确定系统的响应函数 $h(t)$, 得到响应函数后,简单的数学反卷积就可获得光衰退信号的实际值。但这种处理方式数据处理量较大,同时在实验中也发现,不同温度及入射光幅值时,探测器响应时间也会有波动,若要较为全面、准确地测量响应函数,实验量大且实验条件要求苛刻。本文中讨论分析都是基于线性系统,即分析时着重于探测器时间响应特征,而忽略了探测器的幅值非线性响应。若探测器的响应为非线性时,这涉及到一个非线性系统响应问题。当衰荡信

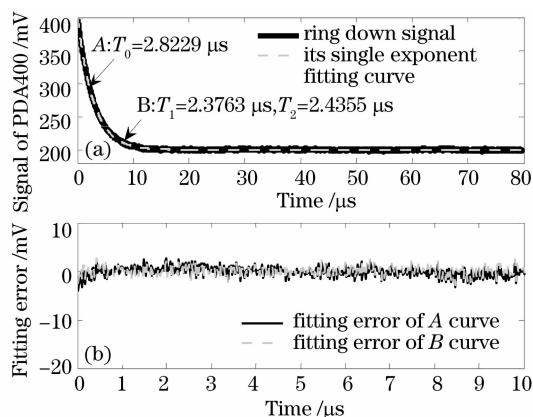


图 4 PDA400 增益为 40 dB 时腔衰荡信号及拟合图
A : 单指数函数拟合; B : 双指数函数拟合

Fig. 4 Ring down signal and its fitting when the gain of PDA400 is 40dB. A : Fitted with single exponential function; B : Fitted with double exponential function

号入射时,探测器的非线性响应将直接影响探测器输出电信号的线形,导致其发生更加复杂的畸变。在对此情形下的衰荡信号处理,首先应对探测器系统的非线性度进行准确测量,这些方法包括叠加法^[11]、滤光片衰减法^[12]等,然后由测量结果来修正探测器响应系数,将非线性系统线性化后,即可按照线性系统(本文的方法)进行分析处理。此外,连续波腔衰荡法中,系统入射光关断速度以及无源腔腔内能量谐振程度都会影响衰荡信号的线形,因此本文的数据分析中出现的个别偏离理论的情况可以由此解释。

5 结论

本文从探测器响应函数入手,推导出当探测器线性响应时的衰荡信号入射情况下的探测器输出函数形式,并根据推导结果提出了不同探测器响应特性下的较为简单的数据处理方式,减少了探测器有限响应时间带来的测量误差。

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 Jiang Yue. A method for measuring ultra-low loss of an optical cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(11): 986~990
蒋跃. 谐振腔极低损耗的测量研究[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(11): 986~990
- 3 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
- 4 Tan Zhongqi, Long Xingwu. Theoretical derivation and experimental research of continuous-wave cavity ring-down technology[J]. *Applied laser*, 2006, **26**(6): 452~456
谭中奇, 龙兴武. 连续波腔衰荡技术原理推导及实验研究[J]. *应用激光*, 2006, **26**(6): 452~456
- 5 A. O'Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser resources[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2551
- 6 Sheng Xinzhi, Lou Shuqin, Wang Zhicheng *et al.*. Ring-down mass spectrum of NO [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2001, **25**(6): 25~31
盛新志, 娄淑琴, 王志成. 一氧化氮的衰荡质谱[J]. *北方交通大学学报*, 2001, **25**(6): 25~31
- 7 Wang Chunmei, Li Jiong, Gong Tianlin *et al.*. Determination of the absolute absorption cross section of oxygen forbidden transition by cavity ring down spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27** (11) : 2087~2090
王春梅, 李炯, 龚天林等. 腔衰荡光谱技术测量 O₂ 禁戒跃迁绝对吸收截面[J]. *光学学报*, 2007, **27** (11): 2087~2090
- 8 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications [J]. *Int. Rev. Phys. Chem.*, 2000, **19**(4): 565~607
- 9 Tan Zhongqi, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Etaloning effects in continuous-wave cavity ring down spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10), 1563~1566
谭中奇, 龙兴武, 黄云等. 连续波腔衰荡光谱技术中的标准具效应研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10), 1563~1566
- 10 Yi Hengyu, Lü Baida, Zhang Kai *et al.*. Influence of detector responsibility on its metrical result of ring-down cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 997~1000
易亨瑜, 吕百达, 张凯等. 探测器响应特性对光腔衰荡法测量结果的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 997~1000
- 11 Wu Dazheng, Yang Linyao, Zhang Yongrui. *Signal and Linear System Analysis* [M], Beijing, Higher Education Press, 1998. 22~23
吴大正, 杨林耀, 张永瑞. *信号与线性系统分析(第三版)* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 22~23
- 12 Li Zuoyang. A simple revision of nonlinear response of photodetector [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1991, **8**(4): 452~456
李祚泳. 光电探测器非线性响应的一种简易修正[J]. *量子电子学*, 1991, **8**(4): 452~456
- 13 Zhang Kang, Chen Jinbang. Linearity measurement of photodetectors and data processing techniques [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(8): 758~764
张康, 陈进榜. 光电探测器直线性检测及数据处理[J]. *光子学报*, 1997, **26**(8): 758~764
- 14 Tan Zhongqi, Long Xingwu. Fast data fitting in the application of cavity ring-down technology [J]. *Laser Journal*, 2007, **28** (4): 20~21
谭中奇, 龙兴武. 腔衰荡技术应用中的快速数据拟合[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(4): 20~21