

· 光电子学工程与应用 ·

## 光反馈光腔衰荡技术同时测量高反膜S和P偏振反射率

崔浩, 李斌成, 肖石磊, 王静, 王亚非, 高椿明

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

**【摘要】**提出采用光反馈光腔衰荡技术同时测量高反膜的S(垂直于入射平面)和P(在入射平面内)偏振反射率的方法, 通过将一束具有一定偏振比、光强方波调制的偏振光入射到衰荡腔中, 在调制方波下降沿记录从衰荡腔腔镜透射的光腔衰荡信号, 通过双指数拟合得到S、P相应的衰荡时间, 从而计算得到高反膜S、P偏振光的反射率。与采用纯S(P)光测量得到的偏振反射率相比, S和P偏振反射率偏差分别仅为1 ppm和15 ppm, 证明了同时测量结果的正确性。与传统光腔衰荡测量高反膜偏振反射率方法相比, 该测量方法装置简单, 操作方便, 测量更快速。

**关键词** 半导体激光; 高反膜; 测量; 光反馈光腔衰荡; 偏振光反射率

**中图分类号** TN247 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.02.024

## Simultaneous Measurement of S- and P-Polarization Reflectivity Using Optical Feedback Cavity Ring Down Technique

CUI Hao, LI Bin-cheng, XIAO Shi-lei, WANG Jing, WANG Ya-fei, and GAO Chun-ming

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** An optical feedback cavity ring down (OF-CRD) technique for simultaneously measuring the S-(perpendicular to the plane of incidence) and P-(in the plane of incidence) polarization reflectivity of highly reflective coatings is developed. Polarized light with a certain ratio of S- and P-polarization power and with square-wave modulated intensity is coupled into a ring-down cavity. The ring-down signal that leaks out from a cavity mirror is recorded at the negative edge of the modulation and fitted to a bi-exponential function to determine simultaneously the ring-down time for S and P polarizations. The reflection coefficients of highly reflective coatings for the S and P polarizations are therefore calculated from the determined ring-down time. Compared to the results obtained with purely S or P polarization, the differences for both S and P polarizations are respectively 1 ppm and 15 ppm, indicating the correctness of the simultaneous measurements. Compared to the conventional CRD approach, this simultaneous measurement method has the advantages of simpler configuration, easier operation, and higher speed.

**Key words** diode laser; highly reflective coating; measurement; optical feedback cavity ring down; polarized-light reflectivity

近年来, 高反射光学元件在激光陀螺<sup>[1]</sup>、引力波观测<sup>[2]</sup>、痕量气体检测<sup>[3-4]</sup>等领域应用越来越广泛。高反射光学元件的反射率直接关系到这些高精密激光系统的性能, 如何准确测量高反射元件反射率越来越重要。文献[5]提出通过测量谐振腔相移的衰减相移方法来测量待测元件的反射率, 该方法需要确保光源的方向强, 相干长度短, 这些要求导致在一般情况下测量精度难以保证。文献[6]提出时间衰减法, 通过测量光在谐振腔中的衰减时间来确定其腔的损耗, 从而得到待测光学元件的反射率。由于该

测量方法具有不受光源波动的影响和待测光学元件的反射率越高、测量精度越高等优点, 因此被广泛应用于高反射率测量<sup>[7-10]</sup>。2011年, 光学干涉薄膜会议公布了由不同国家、不同机构, 通过不同测量方法对同一批次的高反样品的反射率测量结果, 发现仅采用时间衰减法的测量精度高和一致性好, 证明了时间衰减法是唯一能够精确测量反射率高于99.99%的方法<sup>[11]</sup>。目前已经出现许多不同类型的时间衰减技术, 如采用脉冲光源<sup>[12]</sup>或窄谱连续光源<sup>[13]</sup>的光腔衰荡技术。本文采用半导体激光器作为光源

收稿日期: 2017-02-16; 修回日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61379013); 国家自然科学基金青年科学基金(61704023)

作者简介: 崔浩(1991-), 男, 博士, 主要从事薄膜反射率测量与光腔衰荡技术应用方面的研究。

的光反馈光腔衰荡技术<sup>[14-15]</sup>, 利用自混合效应(半导体激光器部分出射光经谐振腔反射回半导体激光器, 使激光器的输出光谱发生漂移到谐振腔的谐振频率处), 提高了激光与谐振腔的耦合效率, 从而极大提高了反射率测量精度, 而且无需隔离器和频率锁模简化了测量装置。根据菲涅耳公式, 光斜入射到介质表面的反射是各向异性的, 斜入射时薄膜S、P偏振光的反射率不同, 因此准确测量薄膜S、P偏振高反射率显得日趋重要。以前是通过在谐振腔前加偏振片产生S和P线偏振光源或者在谐振腔后加偏振分束器将出射光中的S和P偏振光分开来分别测量谐振腔的偏振损耗<sup>[16-17]</sup>, 本文提出无需偏振光学元件, 通过一束具有一定偏振比、光强方波调制的偏振光入射到谐振腔中, 在方波下降沿记录衰荡腔出射信号, 通过双指数拟合同时得到S和P偏振衰荡时间, 从而计算得到待测高反射元件的S和P偏振反射率。

## 1 理论

当波长为 $\lambda$ 的单色激光入射到如图1所示的三镜谐振腔时, 99%以上光直接由反射镜 $R_3$ 反射出去了, 只有相当少经过反射镜 $R_3$ 的透射光, 在谐振腔内来回多次反射, 记录从出射腔镜 $R_1$ 的透射光。

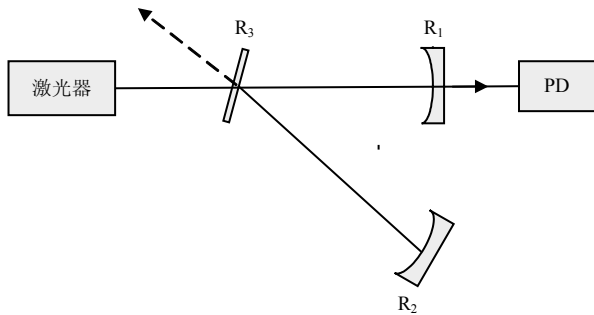


图1 三腔镜谐振腔示意图

假设谐振腔腔长(光从 $R_1$ 经 $R_3$ 反射到达 $R_2$ 的长度)为 $L$ ; 腔内介质(空气)的折射率为1; 激光束在腔内往返一周的相位延迟总量为 $\delta$ ;  $g_1$ 和 $g_3$ 为高反镜 $R_1$ 和 $R_3$ 的透过系数;  $r_1$ 、 $r_2$ 和 $r_3$ 为高反镜 $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R_3$ 的反射系数; 入射光电场振幅为 $A$ ; 透射光电场振幅为 $A_t$ ; 光从谐振腔内传播到周围介质时, 反射系数为 $r$ ; 当光从周围介质进入谐振腔内, 其相应的系数为 $r'$ ;  $g_3g_3+r_3r_3'=1$ ,  $r_3=-r_3'$ ,  $\delta=4\pi L/\lambda$ 。

当入射光束中既有S偏振分量又有P偏振分量, 就需要将光束分解为两个初始相位差为0的S偏振电场分量 $A_s$ 和P偏振电场分量 $A_p$ , 可以得到由腔镜 $R_1$ 第 $n$ 次透射电场振幅函数为:

$$A_n = A_s g_{3s} t_1 (r_1 r_2^2 r_3 e^{i\delta_s})^n \mathbf{j} + A_p g_{3p} t_1 (r_1 r_2^2 r_3 e^{i\delta_p})^n \mathbf{i} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ 分别代表P偏振(水平方向)和S偏振方向(竖直方向)的单位矢量。

因此, 第 $n$ 次透射光强为:

$$I_n = A_n A_n^* = A_s^2 T_{3s} T_1 (R_1 R_3^2 R_2)^n + A_p^2 T_{3p} T_1 (R_1 R_3^2 R_2)^n \quad (2)$$

式中,  $R_i = r_i^2$  ( $i=1,2,3$ )为反射镜 $R_i$ 的反射率;

$$T_1 = g_1^2; \quad T_{3s} = g_{3s}^2; \quad T_{3p} = g_{3p}^2。$$

$n$ 为光束在腔内的循环次数:

$$n = \frac{tc}{2L} \quad (3)$$

式中,  $c$ 为光速;  $t$ 为光传输时间。据式(2)和式(3)可得:

$$I(t) = I_{0s} e^{-\frac{c}{L} \ln(R_{3s} \sqrt{R_1 R_2}) t} + I_{0p} e^{-\frac{c}{L} \ln(R_{3p} \sqrt{R_1 R_2}) t} \quad (4)$$

式中,  $I_{0s}$ 和 $I_{0p}$ 分别是激光束被关断后经过腔镜 $R_1$ 的S和P偏振光初始透射光强, 可以表示为:

$$\begin{cases} I_{0s} = A_s^2 T_{3s} T_1 \\ I_{0p} = A_p^2 T_{3p} T_1 \end{cases} \quad (5)$$

通过式(4)可看出谐振腔的出射信号是随着时间以双指数衰减函数衰减, 定义S和P偏振衰荡时间 $\tau_s$ 和 $\tau_p$ 分别为从谐振腔出射信号S和P偏振分量的光强衰减到其初始值的1/e倍时所需要的时间, 则有:

$$I(t) = I_s e^{-\frac{t}{\tau_s}} + I_p e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (6)$$

式(6)为当入射光中既有S偏振分量又有P偏振信号的光腔衰荡技术基本公式。通过对谐振腔出射的光强信号以式(6)作为拟合函数进行双指数拟合得到S和P偏振衰荡时间 $\tau_s$ 和 $\tau_p$ 后, 再根据式(4)和式(6)可以得出S和P偏振光的平均反射率分别为:

$$\begin{cases} R_s = R_{3s} \sqrt{R_1 R_2} = e^{-\frac{L}{c\tau_s}} \\ R_p = R_{3p} \sqrt{R_1 R_2} = e^{-\frac{L}{c\tau_p}} \end{cases} \quad (7)$$

采用直腔与折叠腔相结合的方法, 同理测量直腔的平均反射率 $\sqrt{R_1 R_2}$ , 就可以得到待测光学元件 $R_3$ 的S和P偏振光反射率 $R_{3s}$ 和 $R_{3p}$ 。

## 2 实验与结果

基于光反馈光腔衰荡技术同时测量薄膜偏振反射率的试验装置示意图如图2所示, 图中P.S为偏振分光棱镜。光源采用半导体激光器(型号为IQ2A09(635-15)G2R4, 中心波长635 nm, 输出功率10 mW, 偏振消光比实测结果约为40:1), 由函数发生卡(型号为UF2-3012, 战略测试, 瑞典)进行方波调制, 调制

频率为100 Hz。半导体激光器出射激光直接入射到由两块曲率半径为1 m的平凹高反镜( $R_1$ 和 $R_2$ )和一块使用角度为 $30^\circ$ 的待测平面高反镜( $R_3$ )组成的测试谐振腔中, 其谐振腔长 $L$ 为0.728 m, 夹角 $\theta$ 为 $60^\circ$ 。探测器PD1(型号为1801, 新焦点)记录谐振腔输出光信号并将其传给数据采集卡(型号为UF2-3012, 战略测试, 瑞典), 通过自编LabVIEW软件, 进行数据分析。

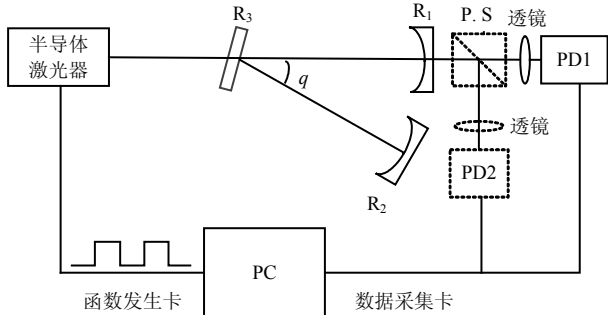


图2 偏振反射率测量实验装置示意图

首先通过旋转激光器将入射激光的偏振方向调整至与垂直方向约为 $45^\circ$ , 用探测器PD1测其谐振腔出射衰荡信号如图3中S+P线所示, 在纵坐标为对数坐标系的图3子图中发现该信号没有很好的线性关系, 说明该信号不是单指数衰减, 并将其信号按式(6)进行双指数拟合, 得到测试谐振腔S(或P)偏振光的衰荡时间分别为 $\tau_s$  (16.78  $\mu\text{s}$ )、 $\tau_p$  (4.25  $\mu\text{s}$ ); 再根据式(7)计算得到折叠腔S(或P)偏振光的平均反射率分别为 $R_s$  (99.985 50%)、 $R_p$  (99.942 9%); 由 $R_1$ 和 $R_2$ 组成的直腔平均反射率 $\sqrt{R_1 R_2}$ 已提前测得, 其结果为99.994 58%, 根据式(11)计算得到待测光学元件 $R_3$ 的S和P偏振反射率分别为 $R_{3s}$  (99.990 92%)、 $R_{3p}$  (99.948 3%); 重复测量33次, 每次测量结果如图4所示, 待测光学元件 $R_3$ 的S和P偏振反射率统计平均值分别为99.991 02%、99.948 8%, 相应标准偏差分别为0.000 07%、0.000 4%, 如此低的标准偏差证明了该方法重复精度足够高。

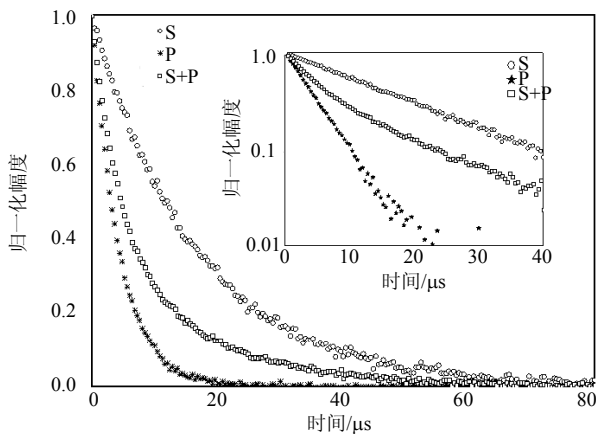


图3 一次谐振腔衰荡信号测量结果

为验证偏振反射率测量结果的正确性, 用传统方法将谐振腔透射信号用偏振分光棱镜分成垂直和水平分量, 增加探测器PD2, 同时测量其腔透射的S和P偏振信号, 测得实时波形如图4所示。可以发现S和P偏振信号由于光反馈效应在腔内同时起振, 其下降沿处的衰荡信号如图3所示, 将其信号用拟合函数 $I(t) = Ae^{u\tau} + B$ 进行单指数拟合, 得到测试谐振腔S(或P)偏振光的衰荡时间分别为 $\tau_s$  (16.87  $\mu\text{s}$ )、 $\tau_p$  (4.36  $\mu\text{s}$ ); S(或P)偏振光的平均反射率分别为 $R_s$  (99.985 61%)、 $R_p$  (99.944 4%); 同样重复测量33次, 测量结果如图5所示, 计算得到S偏振反射率为 $99.990\ 96 \pm 0.000\ 05\%$ , P偏振反射率为 $99.950\ 3 \pm 0.000\ 6\%$ 。

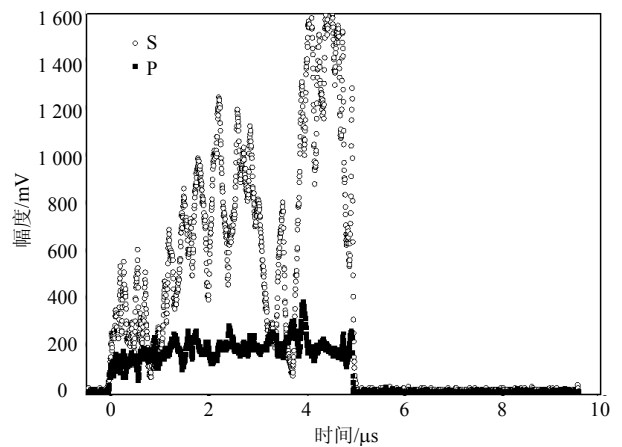


图4 谐振腔的实时波形图

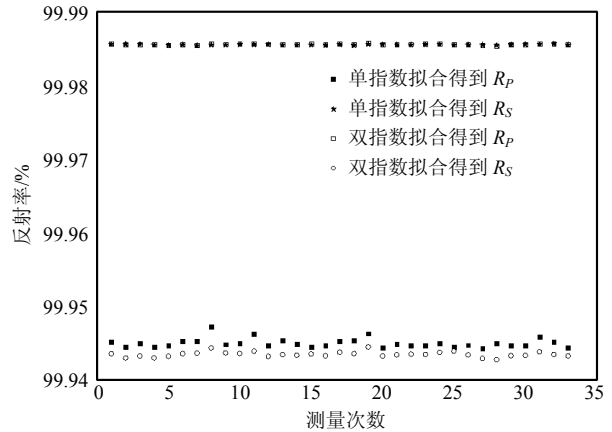


图5 双指数拟合和单指数拟合得到偏振反射率测量结果比较

测量结果表明基于光反馈光腔衰荡技术同时测量方法测得待测高反元件 $R_3$ 的S和P偏振反射率与传统纯S(P)光的偏振反射率测量结果分别相差1 ppm和15 ppm。由于光腔衰荡技术的特点是反射率越高, 测量精度越高, 所以P偏振反射率的测量误差要大于S偏振反射率, 与实验结果相符合。从实验结果看出,

光反馈光腔衰荡技术同时测量S和P偏振光反射率的方法是可行的。

### 3 结束语

本文在理论上推导了偏振光腔衰荡高反射率测量公式,建立了实验装置并测量了高反射率元件的偏振反射率。实验结果发现,当采用双指数函数对实验光腔衰荡数据进行拟合时,同时得到的S和P光反射率与传统单指数分别测量的S和P光反射率一致性较好,偏差分别仅为1 ppm和15 ppm。基于光反馈光腔衰荡的偏振反射率测量方法不仅可以同时测量S和P光反射率,而且不需要起偏器和半波片等偏振元件,简化了实验装置,降低了光路调节要求,提高了测量结果的可靠性。

### 参 考 文 献

- [1] MORRISON R F, STRANG C B. Missile laser gyro rate sensor[C]//Guidance & Control Conference. [S.l.]: [s.n.], 2015, 14(5): 317-318.
- [2] CONNAUGHTON V, BURNS E, GOLDSTEIN A, et al. Fermi GBM observations of LIGO gravitational wave event GW150914[J]. *Astrophysical Journal*, 2016, 826(1): 6.
- [3] ZHOU Sheng, HAN Yan-ling, LI Bin-cheng. Simultaneous detection of ethanol, ether and acetone by mid-infrared cavity ring-down spectroscopy at 3.8  $\mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 1-8.
- [4] HITZEMANN I, HOFFMANN T. Organic trace analysis of lignin phenols in speleothems using UHPLC-ESI-HRMS and their use as vegetation proxy[C]//Egu General Assembly Conference. Vienna, Austria: [s.n.], 2016, 18.
- [5] HERBELIN J M, MCKAY J A, KWOK M A. Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(1): 144-147.
- [6] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(8): 1238-1245.
- [7] 龚元, 李斌成. 连续激光光腔衰荡法精确测量高反射率研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1247-1250.  
GONG Yuan, LI Bin-cheng. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1247-1250.
- [8] 龚元, 李斌成. 宽谱连续波复合衰荡光腔技术测量高反射率[J]. *中国激光*, 2007, 34(6): 857-860.  
GONG Yuan, LI Bin-cheng. Broadband continuous-wave cavity ring-down technique with combined cavity configurations for high reflectivity measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(6): 857-860.
- [9] ZU Hong-yu, LI Bin-cheng, HAN Yan-ling, et al. Combined cavity ring-down and spectrophotometry for measuring reflectance of optical laser components[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26735-26741.
- [10] LI Bin-cheng, CUI Hao, HAN Yan-ling, et al. Simultaneous determination of optical loss, residual reflectance and transmittance of highly anti-reflective coatings with cavity ring down technique[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29135-29142.
- [11] DUPARRE A, RISTAU D. Optical interference coatings 2010 measurement problem[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C172-C177.
- [12] ALQUAITY A B S, ESSEBBAR E, FAROOQ A. Sensitive and ultra-fast species detection using pulsed cavity ringdown spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7217-7226.
- [13] LEE B C, HUANG W, TAO L, et al. A cavity ring-down spectroscopy sensor for real-time Hall thruster erosion measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(5): 053111.
- [14] GONG Yuan, LI Bin-cheng, HAN Yan-ling. Optical feedback cavity ring-down technique for accurate measurement of ultra-high reflectivity[J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(2-3): 355-360.
- [15] DESBOIS T, VENTRILLARD I, ROMANINI D. Simultaneous cavity-enhanced and cavity ringdown absorption spectroscopy using optical feedback[J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(1): 195-201.
- [16] HUANG H, LEHMANN K K. Effects of linear birefringence and polarization-dependent loss of supermirrors in cavity ring-down spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(21): 3817-3827.
- [17] GRAND Y L, FLOCH A L. Sensitive dichroism measurements using eigenstate decay times[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(9): 1244-1246.

编辑 漆蓉