

文章编号: 1001-3806(2008)01-0027-03

用于连续波腔衰荡法测量的 LD 驱动电路设计

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: 为了将半导体激光器应用于连续波腔衰荡法腔损耗测量, 设计了半导体激光器的驱动电路。该电路由调制、驱动、温控等模块组成, 在采用多光束干涉理论对连续波腔衰荡法测量原理进行分析和数值模拟的基础上, 提出了驱动电路各模块的参数要求, 对该电路各参数进行测试后, 应用该电路建立了连续波腔衰荡法腔损耗测量系统, 并进行了实验。经测试得知, 在保证半导体激光器安全工作的前提下, 该电路对于半导体激光器的关断时间约为 60ns, 对半导体激光器的温度控制精度优于 0.01℃; 对某单程腔损耗约为 50×10^{-6} 的衰荡腔测试表明, 腔损耗测量精度优于 1%。结果表明, 该电路达到理论设计要求, 可应用于高精度腔损耗测量。

关键词: 仪器测量与计量; 光学测量; 连续波腔衰荡技术; 腔损耗; 半导体激光器; 驱动电路

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Design of driving circuits of semiconductor lasers for measurement of continuous-wave cavity ring-down technology

TAN Zhong-qi, LONG Xing-wu

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

Abstract: In order to apply semiconductor laser to measure cavity loss with continuous-wave cavity ring-down technology, the laser diode's driving circuit was designed. The circuit was composed of different modules, such as modulation, driver and temperature controller. Based on theory of passive cavity's multi-beam interference, modules' parameter demand was suggested after analysis and numerical simulation of ring-down signal. The measurement system of cavity loss was built with the circuit. Under the guarantee of the semiconductor laser trouble-free, tests indicated that the shutoff time of laser diode was about 60ns and the precision of temperature controller was better than 0.01℃. The measuring accuracy was better than 1% for a cavity whose single pass loss is about 50×10^{-6} . Results indicate that the circuit meet the theory design demands and can be applied in high-accuracy measurement of cavity loss.

Key words: instrumentation measurement and metrology; optical measurement; continuous-wave cavity ring-down technology; cavity loss; laser diode; driving circuit

引 言

腔衰荡技术 (cavity ring-down technology, CRDT) 是近些年出现的一种高灵敏度、高精度的腔损耗测量技术^[1-4], 该技术通过测量光波在无源腔中的衰减时间来获得腔的损耗值大小, 具有测量结果不受入射光强起伏噪声的影响及腔损越小测量精度越高等优点。对于无源腔而言, 腔的损耗主要来自于腔镜不完全反射损耗和腔内气体吸收损耗等, 因此, 该技术常被应用于常规手段无法测量的高反镜 (反射率大于 99.99%) 反射率测量及微量气体吸收的光谱检测中。

根据入射光的性质, 腔衰荡技术可分为脉冲腔衰荡技术和连续波腔衰荡技术, 国内学者已对该技术进行了广泛而深入的研究^[5-6], 但主要针对脉冲腔衰荡技术。相对于前者, 连续波腔衰荡技术具有更好的光谱分辨率、更快的测量速度以及更高的测量灵敏度和精度。目前, 国外学者已有相应的商业产品, 该技术的测量原理是: 将连续光引入由两片或更多高反镜组成的无源腔中, 当入射光频率满足腔谐振条件时, 入射光耦合进入谐振腔, 在腔内形成稳定振荡, 如果迅速切断入射光, 腔出射光功率将以单指数形式衰减, 光的衰减时间将反映出腔损耗情况。

半导体激光器以其体积较小、易调制及价格便宜等优势被广泛应用于通讯、医学和工业计量等各种场合^[7-8], 作者选用半导体激光器作为系统光源, 理论推导并数值分析连续波腔衰荡技术的测量原理^[1,4], 根据理论

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: xwlong110@sina.com

收稿日期: 2006-11-17; 收到修改稿日期: 2006-12-20

分析结果设计了半导体激光器的驱动电路,并进行了相关的实验研究,这是对该技术的工程应用的有益探索。

1 测量原理分析

连续光入射到无源腔上时,待出射光强稳定后,其透射光波场可根据多光束干涉理论求得如下^[4]:

$$E_t = \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{R}} \frac{c \exp(\alpha l/2) \exp(-i\omega_0 l/c)}{2l[\gamma_c - i(\omega_0 - \omega_q)]} E_0 \exp(i\omega_0 t) \quad (1)$$

式中, $\gamma_c = \frac{c}{2l} \frac{1 - R \exp(-\alpha l)}{R \exp(-\alpha l)} = \frac{1}{2t_c}$, E_0 为入射光场矢量的振幅, ω_0 为入射光角频率,对于直腔而言,式中 T, R 分别表示为两腔镜透射率、反射率的乘积, α 为腔内气体吸收系数, l 为腔长, c 为光速, ω_q 为腔谐振频率, t_c 为腔衰荡时间。假设在 $t=0$ 时刻入射光波场被单指数函数关断,即入射场的时域表达式可以写成如下形式:

$$E_i(t) = E_0 \exp[-\gamma_s + i\omega_0] t], (t > 0) \quad (2)$$

式中, $\gamma_s = 1/(2t_s)$, t_s 为光开关的时间。此时,腔出射光场可表示为:

$$E_t(t) = E_0 \cdot \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{R}} \exp[\alpha(\omega_0) l/2] \times \frac{\frac{c}{2} \left\{ \frac{\exp[-(\gamma_s + i\omega_0) t]}{\gamma_c - \gamma_s + i(\omega_0 - \omega_q)} + \frac{\exp[-(\gamma_c + i\omega_q) t]}{\gamma_c + i(\omega_0 - \omega_q)} \right\}}{[1 - \gamma_c/\gamma_s - i(\omega_0 - \omega_q)/\gamma_s] [\gamma_c + i(\omega_0 - \omega_q)]} \quad (3)$$

从(3)式中可看出,无源腔的透射光场特征与入射光关断时间密切相关,设腔衰荡时间 $t_c = 100\mu s$,通过 MATLAB6.5,就入射光关断时间 t_s 分别为 $99\mu s, 10\mu s, 1\mu s$ 及 $0\mu s$ 时 4 种情况下入射光关断时间腔透射光功率衰减线形进行数值模拟,结果如图 1 所示。

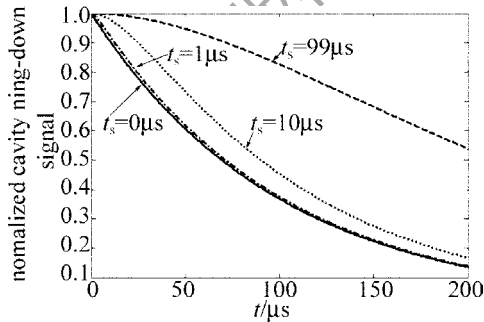


Fig 1 The curve of cavity emergent light power with different shut-off time of incident light t_s

从图 1 可知,当满足 $t_s \leq 0.01t_c$ 时,(3)式中第 2 项占主导作用,腔透射光强基本以腔衰荡时间单指数形式衰减,当两腔镜反射率足够大,腔损很小时,可表示为:

$$I(t) = I_0 \exp(-t/t_c) = I_0 \exp(-\delta c/l) \quad (4)$$

式中, I_0 为稳定出射时光强, δ 表示腔内单程损耗,可求得衰荡时间后即可求得腔损值。由上面分析可

知,无源腔出射光功率衰减线形与入射光关断时间密切相关,为了保证测量精度,入射光关断时间应小于腔衰荡时间的 1%,对于衰减时间为 $10\mu s$ 的无源腔而言,入射光关断时间应小于 $100ns$ 。

2 电路设计与器件选择

当选用气体或者固体激光器作为系统光源时,腔入射光的关断必须选用专门的高速光开关器件,如电光开关、声光开关等,其关断时间约为几十纳秒。而当选用半导体激光器时,由于入射光的关断很容易通过驱动电路关断其注入电流实现,因此可以节约一个昂贵的光开关器件,半导体激光器还可以通过调制注入电流在一定范围内改变出射光频率,使得连续波腔衰荡技术能测量不同入射光频率下的腔损耗值,对气体吸收的光谱检测具有重要的意义;半导体激光器的谱线宽度要比气体激光器大得多,相干长度远比不上气体激光器,但由于无源腔的选模特点,总会有满足腔谐振条件的部分光频出射腔外,成为可测量的量,使得腔衰荡法测量顺利进行。

本文中设计的半导体激光器驱动电路主要由以下几个部分组成:半导体激光器驱动模块、调制信号产生模块、半导体激光器温控模块以及总控制模块(见图 2)。在不损坏半导体激光器的前提下,由前面分析可

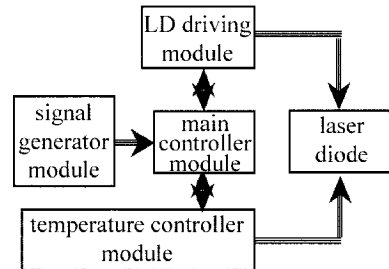


Fig 2 Illustration of laser diode drive circuit

知,为了保证驱动电路对半导体激光器注入电流的关断时间小于 $100ns$,首先要求有纳秒级下降沿信号发生电路。本文中选用信号发生芯片 MAX038 来产生开、关信号,该芯片输出 $\pm 1V$ 可调占空比的、上升(下降)时间约为 $12ns$ 的方波信号。方波信号通过半导体激光器驱动模块来达到开关光入射的目的,为了保证激光器安全及测量精度,选用超稳型激光二极管驱动模块 WLD3343,该模块在恒流工作模式下,电流扰动最大不超过 75×10^{-6} ,工作电流为 $2A$ 时,关断信号的响应时间约为 $320ns$,WLD3343 通过设置工作点电压值 ($0V \sim +2V$) 来控制注入电流大小,因此,MAX038 产生的方波信号不能直接连接到 WLD3343 输入端,需通过快速开关二极管与注入电流设定电压结合后,才能通过半导体激光器驱动模块完成对半导体激光器的

开、关任务,具体见图 3。

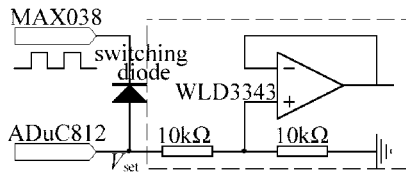


Fig 3 Modulation circuit of WLD3343's operating point input signal

半导体激光器各参数的稳定性与工作温度有关,特别是其出射光频率受温度影响显著^[8],一般单纵模半导体激光器光频率随温度的漂移约为 $20\text{GHz}/\text{C} \sim 30\text{GHz}/\text{C}$,为了保证半导体激光器安全、稳定工作,电路还必须带有高精度温控,温控模块 WTC3243 是一种模拟 PI(正比,积分)控制超稳型温度控制器,其最好温控精度为 0.001C ,本电路选用该模块对半导体激光器进行温控。图 2 中的总控制模块主要完成半导体激光器工作电流、温度的设置以及光功率和实际温度等的监控工作,本电路设计中,采用高度集成的 12 位数据采集系统芯片 ADuC812 来完成这些工作,ADuC812 带有 2 路 12 位分辨率的 D/A 转换器,这两路 D/A 用来分别设置半导体激光器注入电流和工作温度,而且可很方便的改变两者的值,进而改变激光频率,测量不同入射波长下的腔损值;ADuC812 还带有 8 路 12 位的 A/D 转换器,这足以满足对半导体激光器工作状态的监控。

3 电路的测试与应用

应用该电路建立起连续波腔衰荡腔损耗测量系统如图 4 所示,该系统主要由光源、无源腔、探测器、数据采集卡及计算机等部分组成,其中光源选用功率为 15mW ,中心波长为 650nm 的半导体激光器,其工作电流设为 85mA 。

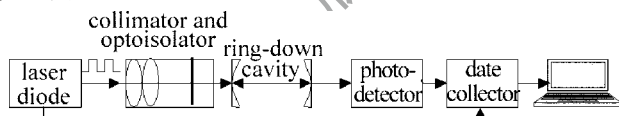


Fig 4 Illustration of experiment system

在应用该电路进行连续波腔衰荡测量前,对该电路有关参数进行了测试,主要是对于半导体激光器温控效果及光关断时间的测试。温度系数为 $5\%/ \text{C}$ 的 $10\text{k}\Omega$ NTC 热敏电阻与恒流源组成测温电桥, 25C 时,热敏电阻电压为 1V ,本文中采用 ADUC812 的 12 位精度 A/D 对该电压进行测量,数字化后,通过计算机串口将数据上传到计算机上存储、显示,实验显示, A/D 转换数据只有 1 位的变化 (0.61mV),考虑到这一变化还可能来自电路噪声,推知温度稳定度优于 0.01C 。半导体激光器出射光关断时间的测试采用如下方式进行:出射光经衰减片后,由高速光电探测器进行光电转化,用高速

数据采集卡(采样频率为 50MHz)将该信号数字化后通过计算机存储、显示,结果见图 5a。可以看出,在驱动电路调制下,出射光功率上升时间约为 $1.0\mu\text{s}$,而光关断时间约为 60ns ,优于设计要求的 100ns 水平。

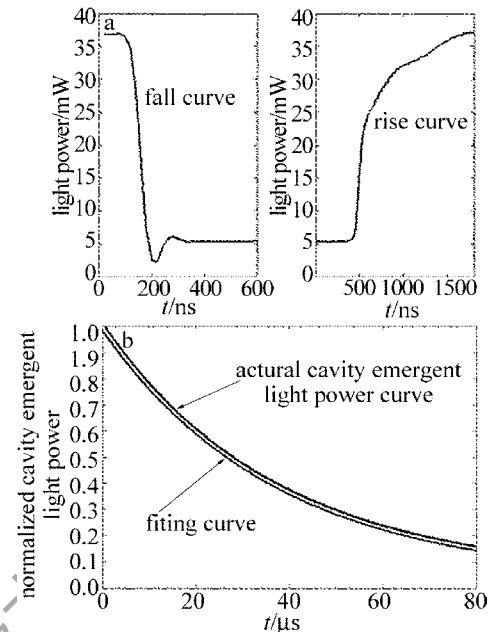


Fig 5 a - rise and fall edge of light power detected by photo detector b - ring down signal and its fitting curve

该系统对由两高反镜组成的波长约为 650nm 、腔损耗约为 50×10^{-6} 无源直腔进行了测量。测量用的数据采集卡分辨率为 12 位、采样频率为 50MHz 的高速数据采集卡,为了减少电路白噪声对测量结果的影响,腔衰荡信号进行了多次采样平均,100 次采样平均后得到腔衰荡信号曲线如图 5b 所示。采用 $f(t) = A \exp(-t/\tau) + B$ 的函数形式对数据采用列维布格-麦奎尔特法非线性最小二乘拟合^[9],拟合曲线如图 5b 所示,从图中可以看出,实际测得的衰荡信号与拟合曲线吻合,拟合方差与衰荡信号最小值之比为 1.7×10^{-3} 。对该衰荡腔进行重复测量,取其中 5 组结果进行分析,见表 1。从结果分析看出,应用该设计的电路,连续波腔衰荡腔损耗测量系统测量精度优于 1% 。

Table 1 Measurement result and analysis of measurement error

group	A	B	C	D	E
cavity loss/ 10^{-6}	50.0353	50.0053	50.2967	49.9568	49.9150
average loss/ 10^{-6}	50.0418				
standard deviation/ 10^{-6}	0.1497				

4 小结

理论推导连续波腔衰荡技术腔损耗测量原理,并数值模拟入射光关断时间对腔出射光功率(衰荡信号)衰减线形的影响,得出了测量要求的入射光关断时间数量级概念。根据分析结果,设计了用于连续波

(下转第 56 页)

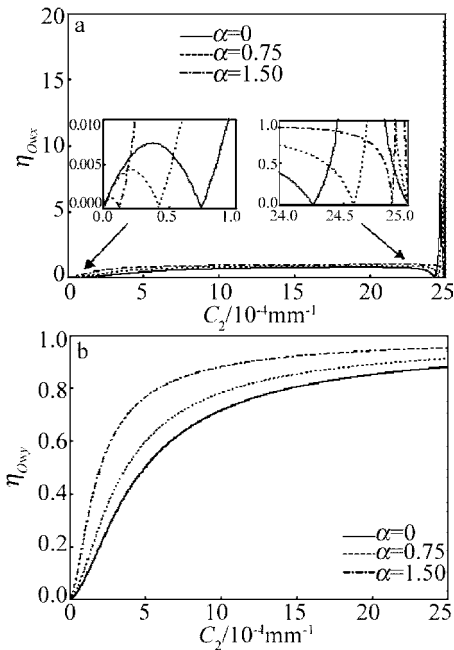


Fig 3 Relative errors η_{Owx} , η_{Owy} of the waist widths in the x and y directions in the image space as a function of the astigmatic coefficient C_2 for different values of the decentered parameter α a—relative errors η_{Owx} in the x direction; b—relative errors η_{Owy} in the y direction

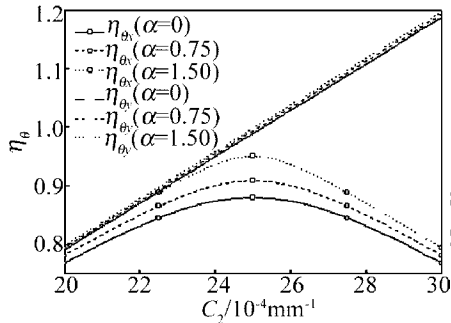


Fig 4 Relative errors η_{θ_x} , η_{θ_y} of the far-field divergence angles as a function of the astigmatic coefficient C_2 for different values of the decentered parameter α

影响,在 x 和 y 方向的远场发散角的相对误差 η_{θ_x} 和 η_{θ_y} 一般不相等,并且还和偏心参量 α 有关。图中当像散系

(上接第 29 页)

腔衰荡法测量的半导体激光器驱动电路,并对电路进行了测试,测试结果显示,设计的驱动电路对半导体激光器的关断时间约为 60ns,达到设计要求。用该测量系统对腔损耗约为 50×10^{-6} 的无源腔的实际测量结果表明,测量精度优于 1%。

参考文献

- [1] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. Appl Opt, 1984, 23 (8): 1238-1245.
- [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] BERDEN G, PEETERS R, MEIJER G Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications [J]. International Reviews

数 C_2 在一定范围内 (例如 $C_2 = 20 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1} \sim 25 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$) 取值时, η_{θ_x} 和 η_{θ_y} 随 C_2 增加而增加,但 C_2 在 $25 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1} \sim 30 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ 取值时, η_{θ_x} 随 C_2 增加而减小。

3 小结

对 ChG 光束通过像散透镜和理想透镜后束宽和远场发散角的相对误差变化作了研究。详细讨论了像方束腰和束宽以及远场发散角的相对误差与像散系数和偏心参量的变化关系。几何焦面上 x 和 y 方向的相对误差随像散系数和偏心参量变化规律相同,而在像方束腰处两方向相对误差变化不同。像散使 x 和 y 方向远场发散角的相对误差不相等,且与偏心参量有关。所得结果对设计合适的激光光学系统以控制光束参量变化的研究有实际意义。

参考文献

- [1] SIEGMAN A E. Laser [M]. Mill Valley: University Science Books, 1986: 468-469.
- [2] LÜB D. Laser optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 74-75 (in Chinese).
- [3] KANG X P, JI X L, LÜB D. Transformation of cosh-Gaussian beams passing through a multi-apertured optical system [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 490-492 (in Chinese).
- [4] CASPERSON L W, HALL D G, TOVAR A A. Hermite sinusoidal Gaussian beams in complex optical systems [J]. J O S A, 1997, A14 (15): 3341-3348.
- [5] TOVAR A A, CASPERSON L W. Production and propagation of Hermite-sinusoidal-Gaussian beams [J]. J O S A, 1998, A15 (9): 2425-2432.
- [6] LÜB D, MA H, ZHANG B. Propagation properties of cosh-Gaussian beams [J]. Opt Commun, 1999, 166: 165-171.
- [7] WANG X Q, LÜB D. Propagation of cosh-Gaussian beams through an apertured ABCD optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21 (10): 1214-1217 (in Chinese).
- [8] ALDA J, ALONSO J, BERNABEU E. Characterization of aberrated laser beams [J]. J O S A, 1997, A14 (10): 2737-2747.
- [9] in Physical Chemistry, 2000, 19 (4): 565-607.
- [4] LIANG Y H. Mirror reflectometer of very high reflectivity [D]. Changsha: Postgraduate Academic of National University of Defense Technology, 2000: 47-50 (in Chinese).
- [5] SUN F G, DAID W, 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).
- [6] YIH Y, PENG Y, TAN X Q, et al Experimental study on reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring-down method [J]. Laser Technology, 2005, 29 (4): 337-339 (in Chinese).
- [7] FU Y J, ZOU W D, XIAO H R, et al Optic power control of LD drive circuit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (5): 626-630 (in Chinese).
- [8] SUN X M. Theory and application of semiconductor laser's interference [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001: 25-28 (in Chinese).
- [9] HE G Y. Usual numerical value arithmetic volume of visual C++ [M]. Beijing: Science Press, 2002: 466-517 (in Chinese).