

文章编号: 0253-2239(2003)06-0729-5

# 两重外腔的自混合干涉及其信号分析\*

王 鸣<sup>1,2</sup> 聂守平<sup>1</sup> 李达成<sup>3</sup>

1 南京师范大学物理科学与技术学院光电技术江苏省重点实验室, 南京 210097  
2 南昌大学物理系, 南昌 330029  
3 清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084

**摘要:** 提出了具有两重外腔的自混合干涉。根据半导体激光器的自混合干涉理论, 研究了两重外腔自混合干涉模型, 及其信号的调制和解调方法。该方法用一个附加的参考反射镜在半导体激光器(LD)和目标间形成两重外腔, 参考外腔用于补偿光学频率涨落引入的相位误差。用快速傅立叶变换相位探测技术(FFT)分析自混合干涉信号。运用这些方法, 可提高相位测量精度, 在微光机电系统、光学工程和其他工程应用上有潜在的实用价值。

**关键词:** 光学计量; 自混合干涉; 傅里叶变换方法; 两重外腔; 半导体激光器

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## 1 引 言

激光反馈效应是指入射在外反射表面的光部分返回, 并耦合到激光腔内。重新注入的激光与激光腔内的光混合, 引起输出功率变化和频率变化, 形成外光学反馈效应。激光自混合干涉是反馈效应产生的干涉。在自混合干涉信号中, 相位和振幅的变化与外腔的光程及外反射表面有关, 这个性质被用于各种传感应用, 用于测量速度、长度、位移或振动<sup>[1~3]</sup>。

理论研究表明, 激光反馈干涉的机理不同于传统的干涉。通常, 反馈干涉的信号是非对称的。但在一定的条件下, 外腔长度变化引起激光输出强度的波动, 类似于传统的双光束干涉现象, 即一个条纹移动对应半个光波波长的位移, 强度波动深度与传统双光束干涉系统相当。

由于半导体激光器具有体积小、重量轻、结构简单、光波长可调的特点, 调节驱动电流, 能实现频率调制和动态干涉。自混合干涉可以在半导体激光器的内激光腔实现。通过外腔长度和反馈强度的变化调制输出光的光谱特征和光强, 封装在半导体激光器管壳内另一侧的光电二极管探测反馈干涉信号, 检测光学反馈造成的强度和位相变化, 可以确定物体的状态。由于半导体激光器同时用作传感器的光

源和探测器, 不需要传统干涉仪的分束器和参考镜等光学元件, 易准直。这些优点使得半导体激光器的自混合干涉在部分应用领域优于传统干涉。

自混合干涉信号常用条纹峰值计数方法分析, 但是位移测量精度仅在  $\lambda/2$ 。用相位测量方法分析信号, 测量精度提高到几十分之一波长。有两种方法调制反馈干涉信号。外腔调制方法是改变外部腔长达到调制参考相位。由于信号调制与距离无关, 外腔可以很短, 适用于微机械<sup>[4]</sup>。频率调制是常用的调制方法, 改变注入电流将同时调制光学频率和光输出功率。已经采用解调自混合干涉信号相位的方法有伪外差和锁相方法<sup>[5,6]</sup>, 我们用快速傅里叶变换方法(FFT)分析自混合干涉信号, 获得了  $\lambda/50$  的相位测量精度<sup>[7]</sup>。

本文提出两重外腔的自混合干涉。该方法用一个附加的参考反射镜在半导体激光器和目标间形成两重外腔, 参考外腔用于补偿光学频率涨落引入的相位误差。

## 2 单外腔自混合干涉

半导体激光器的光学反馈效应的理论分析有两种方法<sup>[8,9]</sup>。一是严格求解 Lang 和 Kobayashi 建立的速率方程, 得到出射光的频率和光强的表达式。二是采用法布里-珀罗腔模型分析, 其原理见图 1。系统由激光器的两个端面和被测靶面构成了两个法布里-珀罗腔, 如图 1(a)所示。半导体激光器发射的光在外腔中传播到靶面, 一部分输出光被反射、返

\* 国家自然科学基金和江苏省自然科学基金资助课题。

E-mail: mwang@email.njnu.edu.cn

收稿日期: 2002-02-15; 收到修改稿日期: 2002-06-17

回并耦合到激光腔,和激光腔内的光形成自混合干涉,自混合干涉的结果使得发射光的振幅和频率受到调制。图中的  $r_1$  和  $r_2$  是半导体激光器两端面的振幅反射率,  $r_3$  是被测靶面的振幅反射率。  $D$  是内激光腔的长度,  $L$  是外腔的长度。可用如图 1(b) 所示的等效腔对自混合干涉进行理论分析。

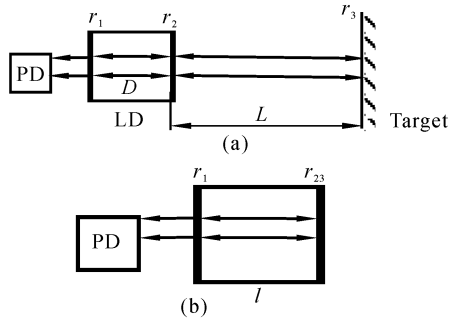


Fig. 1 Schematic diagram of the optical feedback effect.  
(a) A laser diode with an external cavity;  
(b) Equivalent model

在弱反馈的条件下,  $r_3 \ll r_2$ , 可以忽略在外腔中的多重反射, 等价腔的有效振幅反射率表示为

$$r_{23} = r_2 - (1 - |r_2|^2)r_3 \exp(-i\Phi), \quad (1)$$

$\Phi$  为复振幅的相位,  $\Phi = 2\pi\nu t$ ,  $t = 2L/c$ ,  $\nu$  是在光学反馈条件下输出光的频率。

复振幅的模  $|r_{23}|$  可以写成

$$r_{23} = r_2 [1 + \xi \exp(-i\Phi)], \quad (2)$$

式中  $\xi$  表示激光由外腔返回到激光腔的耦合系数,

$$\xi = \frac{r_3}{r_2} (1 - |r_2|^2).$$

对等价腔求其稳态解, 得出等价腔出射光的频率和强度的表达式为

$$\nu_0 - \nu = \frac{C}{2\pi t} \sin(2\pi\nu t + \arctan \alpha), \quad (3)$$

$$I = I_0 [1 + m \cos \Phi] = I_0 [1 + m \cos(2\pi\nu t)] = I_0 \left[ 1 + m \cos \left( 4\pi \frac{\nu}{c} L \right) \right], \quad (4)$$

其中,  $I_0$  和  $\nu_0$  为没有光学反馈时的光强和光学频率,  $\alpha$  是线宽增强因子,  $m$  为纹波系数,  $C$  为外反馈强度参量。

由(4)式可见, 具有光学反馈的半导体激光器的输出光强是周期性的信号, 输出强度不仅随着注入电流变化, 而且随外部腔长和光学反馈强度变化。当注入电流固定时, 输出光强随外部腔长的变化周期是半个波长, 即  $\lambda/2$ 。当注入电流被线性调制时, 光学频率被调制

$$\nu(t) = \nu_0(t=0) + \beta t, \quad (5)$$

其中  $\nu_0(t=0)$  为光学频率的直流分量  $\nu_0$ ,  $\beta$  为调制系数。

输出光强的相位变化为

$$\Phi = \frac{4\pi\nu(t)}{c} L(t). \quad (6)$$

我们用快速傅里叶变换方法确定自混合干涉信号的相位<sup>[7]</sup>。为此, 先将相位表示成基本频率  $f$  和初相  $\phi_0$ :

$$\Phi = 2\pi \frac{\nu_0}{c} 2L_0 + 2\pi \frac{2\beta L_0}{c} t = 2\pi f t + \phi_0, \quad (7)$$

其中信号基本频率  $f$  由光频调制系数  $\beta$  和初始腔长  $L_0$  确定:

$$f = 2\beta L_0 / c, \quad (8a)$$

初相  $\phi_0$  由光频的直流分量和初始腔长  $L_0$  确定:

$$\phi_0 = 2\pi \frac{\nu_0}{c} 2L_0, \quad (8b)$$

如果腔长由初始长度  $L_0$  偏移到  $L = L_0 + d$ , 则相位变成

$$\begin{aligned} \Phi &= 4\pi \frac{\nu(t)}{c} L \approx \\ &2\pi \frac{\beta}{c} 2L_0 t + \frac{4\pi\nu_0}{c} d + 2\pi \frac{\nu_0}{c} 2L_0 = \\ &2\pi f t + \phi + \phi_0. \end{aligned} \quad (9)$$

相移  $\phi$  由腔长偏移量  $d$  确定:

$$\phi = \frac{4\pi\nu_0 d}{c}. \quad (10)$$

用快速傅里叶变换方法确定频率, 提取信号相位的方法如下:

先对自混合干涉信号(4)式进行快速傅里叶变换运算:

$$\begin{aligned} I(\mu) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \exp(-2\pi i \mu t) dt = \\ &I_0(\mu) + I_1(\mu - f) \exp(i\theta) + \\ &I_1(\mu + f) \exp(-i\theta) + \dots, \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} I_0(\mu) &= \int_{-\infty}^{\infty} I_0(t) \exp(-2\pi i \mu t) dt, \\ I_1(\mu) &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(t) \beta \exp(-2\pi i \mu t) dt, \\ \theta &= \phi + \phi_0. \end{aligned}$$

$I_0(\mu)$  和  $I_1(\mu)$  分别为零级和一级谱分量。取一级谱峰值对应的频率为信号频率  $f$ , 用一级谱峰值对应的傅里叶系数计算信号的相位:

$$\theta = \arctan \frac{\text{Im}[I(f)]}{\text{Re}[I(f)]}. \quad (12)$$

相移是

$$\phi = \theta - \phi_0. \quad (13)$$

### 3 两重外腔自混合干涉

本文提出的双外腔的自混合干涉系统测量位移和距离时,可以减少由于激光频率的涨落和外腔的空气扰动所带来的信号频率和相位的测量误差。

由参考反射镜和激光腔端面之间组成参考外腔,而由测量物面和激光腔端面之间组成测量腔,设  $L_1$  和  $L_2$  是参考外腔和测量腔的长度,如图 2(a) 所示。图 2(b) 是双外腔的等价腔,  $r_3$  和  $r_4$  是参考镜和测量物面的振幅反射率。

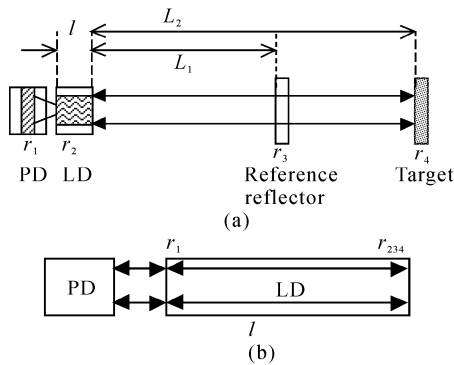


Fig. 2 Self-mixing interferometers with dual external cavities. (a) A laser diode with dual external cavities; (b) Equivalent model

等价腔的有效振幅反射率表示为

$$r_{234} = r_2 + \frac{1}{4}(1 - |r_2|^2)r_3 \exp(-i\Phi_1) + \frac{1}{4}(1 - |r_2|^2)r_4 \exp(-i\Phi_2), \quad (14)$$

参考外腔和测量腔的耦合系数分别为  $\xi_1$  和  $\xi_2$ :

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= \frac{r_3}{4r_2}(1 - |r_2|^2), \\ \xi_2 &= \frac{r_4}{4r_2}(1 - |r_2|^2). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

在弱反馈的条件下,  $\xi_1$  和  $\xi_2 \ll 1$ , 复振幅的模  $|r_{234}|$  能写成

$$|r_{234}| = r_2(1 + \xi_1 \cos \Phi_1 + \xi_2 \cos \Phi_2), \quad (16)$$

式中  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  是参考光和测量光的相位,

$$\Phi_1 = 2\pi f_1 + \phi_{01}, \quad \Phi_2 = 2\pi f_2 + \phi_{02}, \quad (17)$$

其中,  $f_1$  和  $f_2$  表示参考光和测量光的信号频率,  $\phi_{01}$  和  $\phi_{02}$  表示参考光和测量光的初始相位,

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{2\beta L_1}{c}, \quad \phi_{01} = 2\pi \frac{v_0}{c} 2L_1 - 2m\pi \\ f_2 &= \frac{2\beta L_2}{c}, \quad \phi_{02} = 2\pi \frac{v_0}{c} 2L_2 - 2n\pi \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$m$  和  $n$  是整数 ( $m, n = 0, 1, 2, \dots$ )。

仿照第 2 节对等价腔求解, 得出等价腔的输出光强:

$$I(t) = I_0(t)[1 + m_1(t)\cos(2\pi f_1 t + \phi_{01}) + m_2(t)\cos(2\pi f_2 t + \phi_{02})]. \quad (19)$$

计算上式的傅里叶变换, 得到双外腔的频率谱:

$$I(\mu) = I_0(\mu) + I_1(\mu - f_1)\exp(i\phi_{01}) + I_2(\mu - f_2)\exp[i(\phi_{02})]. \quad (20)$$

由(20)式可见, 频率谱有两个峰值频率, 对应于参考腔的共振频率(条纹信号频率)  $f_1$  和相对位相  $\phi_{01}$ ; 对应于测量腔的频率  $f_2$  和相对位相  $\phi_{02}$ 。从(18)式能够推出频率与距离之间的关系:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{L_2}{L_1}, \quad (21)$$

以及相移的表达式:

$$\phi = \phi_{01} \frac{f_2}{f_1} - \phi_{02} + 2\pi \left( \frac{f_2}{f_1} m - n \right). \quad (22)$$

由(21)式和(22)式可见, 条纹信号频率之比与两个腔长之比为一固定值, 由于光学频率的扰动产生的信号相位误差对两个外腔来说是相同的, 使用参考外腔能补偿扰动产生的误差。

### 4 实验和结果

实验系统如图 3 所示, 包括半导体激光器 LD-PD(Sharp LT021, 780 nm, 10 mW, 内封装光电二极管 PD), 一个非球面的校准透镜、参考镜 RM。靶镜 M 被平台上的测微计和压电陶瓷致动器(PZT)移动, 通过测微计改变距离, 通过压电陶瓷驱动器控制位移。Sharp LT021 的电流调制参量是 2.5 GHz/mA, 实验中半导体激光器的驱动电流由 50 mA 的直流分量和幅度 3.5 mA、频率 100 Hz 的交变分量合成, 电流调制系数为 1.4 mA/mS, 频率调制系数  $\beta$  是 3.5 GHz/mS。

信号调制和解调的处理框图见图 4, 自混合干涉信号是腔共振与电流调制(a)产生的干涉强度迭加。如果用同步信号(b)控制采样, 获得线性调制产生的干涉强度(c), 用差分电路去掉线性调制分量, 得到自混合干涉信号(d), 最后通过傅里叶变换处理。

实验采集的双外腔自混合干涉信号见图 5(a), 它是两个谐波信号的叠加, 并外加了一些噪声。图 5(b) 是干涉信号的傅里叶频谱。参考外腔和测量腔的长度分别是 10.5 cm 和 15.9 cm, 按(18)式和激光器调制参量计算出两个信号频率分别是  $f_1 =$

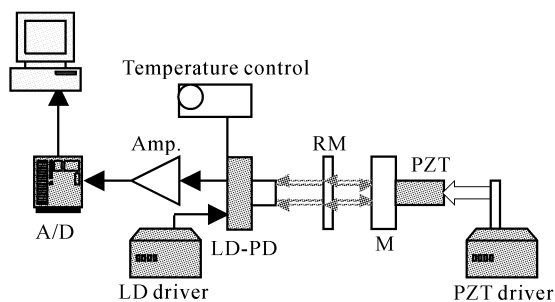


Fig. 3 Experimental setup

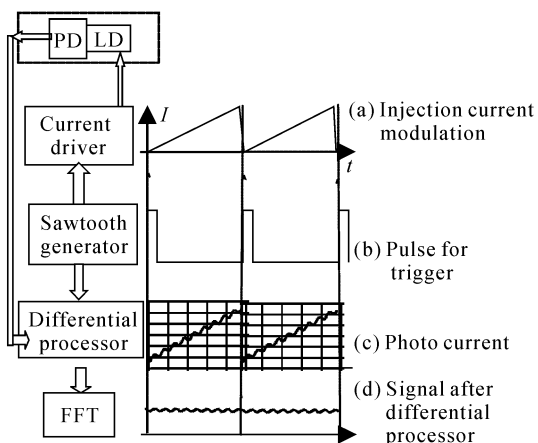


Fig. 4 The block diagram of signal processing system

12250 Hz,  $f_2 = 18550$  Hz。实验中测量得到的两个信号频率分别是  $f_1 = 12368$  Hz,  $f_2 = 18727$  Hz, 见图 5(b) 中两个峰值。频率测量的相对误差小于 1%。通过计算载频的傅里叶系数获得信号初始相位。

光学频率和环境的扰动会给干涉信号带来噪声,影响相位测量精度。为估计双外腔方法减小相位测量误差的作用,实验显示了靶镜静止时干涉信号中噪声的相位变化和相位测量补偿结果。图 6 是双外腔方法的相位测量及补偿结果。图 6(a) 显示了信号有噪声和漂移时,对应参考腔和测量腔的信号相位变化,相位变化的最大幅度在 0.45 rad。图 6(b) 是表示经过补偿后的相位变化,相位变化的最大幅度在 0.18 rad。

**结论** 半导体激光器的自混合干涉具有结构简单,光路易准直,无需附加器件的特点。因而能够发展成小型,在线测试距离和微位移的传感器。对于光学频率涨落时带来的干涉信号的噪声和漂移,应用双外腔光学系统和快速傅里变换相位测量方法可以有效地降低相位测量误差。

感谢原日本国静冈大学来关明副教授的指导和帮助。

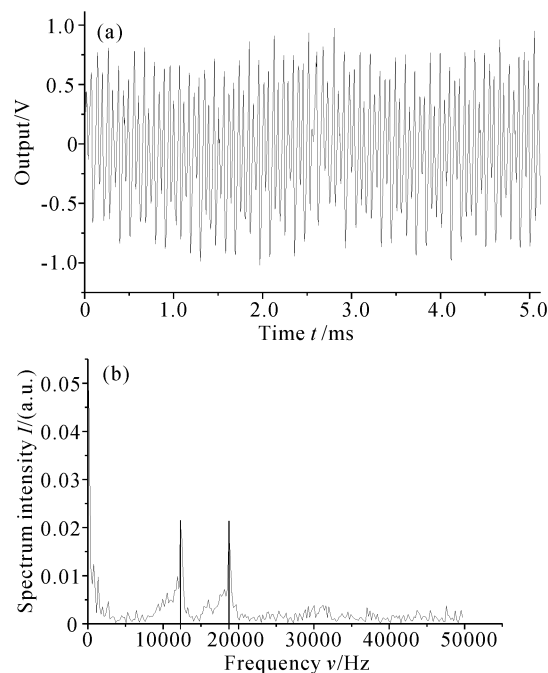


Fig. 5 SMI signal and analysis of dual external cavities. (a) The fringe signal with dual external cavities; (b) Fourier spectra

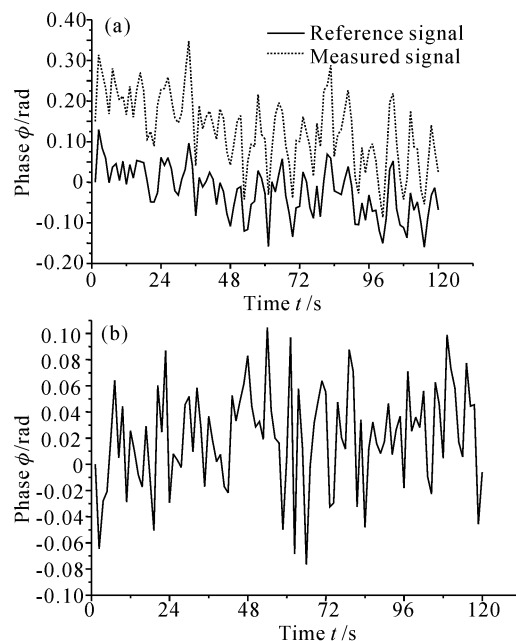


Fig. 6 Phase compensation result of dual external cavity method. (a) Phases of the reference cavity and measured cavity; (b) Phase after compensation

## 参 考 文 献

- 1 Beheim G, Fritsch K. Range finding using frequency-modulated laser diode. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):1439~1442
- 2 Yoshino T, Nara M, Mnatzakanian S *et al.*. Laser diode

- feedback interferometer for stabilization and displacement measurements. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(5):892~897
- 3 Shinohara S, Mochizuki A, Yoshida H *et al.*. Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(9): 1417~1419
- 4 Wang Ming, Lai Guanming. Displacement measurement based on Fourier transform method with external laser cavity modulation. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(8): 3440~3445
- 5 Kato J, Kikuchi N, Yamaguchi I *et al.*. Optical feedback displacement sensor using a laser diode and its performance improvement. *Meas. Sci. Technol.*, 1995, **6**(1):45~52
- 6 Suzuki T, Hirabayashi S, Sasaki O *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(3):543~548
- 7 Wang Ming. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis. *Optics & Laser Technol.*, 2001, **33**(6):409~416
- 8 Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(3):347~35
- 9 Donati S, Giuliani G, Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **QE-31**(1): 113~119

## Self-Mixing Interferometry of Dual External Cavities and Its Signal Analysis

Wang Ming<sup>1,2</sup> Nie Shouping<sup>1</sup> Li Dacheng<sup>3</sup>

1 *Jiangsu Province Key Laboratory of Optoelectronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097*  
2 *Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330029*  
3 *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084*

(Received 15 February 2002; revised 17 June 2002)

**Abstract:** A novel self-mixing interferometry (SMI) with dual external cavities was proposed. The model of interference, as well as the modulation and demodulation of interference signal are analyzed. The developed technique uses an additional reference reflector to form dual external cavities between the LD and the target, and reference external cavity is used to compensate the phase error due to optical frequency fluctuation. FFT phase detection technique was applied to analyze SMI signal. By using these techniques, the high precision measurement can be obtained. It is a promising technique used in microelectromechanical systems (MEMS), optical engineering and other engineering application.

**Key words:** optical metrology; self-mixing interferometry; Fourier transform method; dual external cavities; semiconductor laser