

文章编号 : 0258-7025(2001)01-0029-04

# 激光自混合干涉仪的实验研究\*

马军山 王向朝 方祖捷

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

强锡富

(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

**摘要** 分析了激光自混合干涉仪位移测量误差及特点,提出了干涉仪的设计原则。对激光自混合干涉仪的系统稳定性与测量分辨力进行了实验研究,给出了改善系统稳定性与测量分辨力的有效方法。

**关键词** 自混合干涉, 半导体激光器, 位移, 测量误差

中图分类号: TH 744.3 文献标识码: A

## Experimental Study on Self-mixing Interferometer in Laser Diode

MA Jun-shan WANG Xiang-zhao FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

QIANG Xi-fu

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Displacement measurement error and its character of self-mixing interferometer are analyzed. The design ruler of self-mixing interferometer is presented. The system stability and measurement resolution are experimentally studied, and the method for improving system stability and measurement resolution is given.

**Key words** self-mixing interferometer, laser diode, displacement, measurement error

## 1 引言

基于激光自混合效应的测量技术,近年受到测量领域的广泛重视,成为研究热点之一,已被用于速度<sup>[1]</sup>、位移<sup>[2]</sup>及距离测量<sup>[3]</sup>。测量机理是利用被测物体形成的反馈光与激光器谐振腔内部光相干涉,进而使激光器的输出强度发生变化<sup>[4]</sup>。因此,基于该机理的干涉仪的一个突出特点就是结构简单、紧凑,在仪器小型化、集成化方面极具潜力。已有用于光盘信息读取<sup>[5]</sup>以及微机械谐振传感器<sup>[6]</sup>等微型传感器的研究报道,均是利用了其可集成化的优点。

本文将针对位移测量,分析半导体激光自混合干涉仪测量误差因素及各项误差的特点,对干涉仪的系统稳定性与测量分辨力有关特性进行实验研究,研究结果将为干涉仪实际设计中各项参数的合理选择提供参考。

## 2 理论分析

### 2.1 工作原理

在光反馈存在条件下,当反馈光光程小于激光器相干长度时,激光器振荡波长 $\lambda$ 及输出光强 $I$ 满足以下方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2nL = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2nL - C \sin \left[ \frac{2\pi}{\lambda} 2nL - \arctan(\alpha) \right] \quad (1)$$

$$I = I_0 + \Delta I \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} 2nL \right) \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 与 $\lambda_0$ 分别为有光反馈和无光反馈时的激光器波长, $n$ 为空气折射率, $\alpha$ 为激光器线宽展宽因子, $L$ 为外腔长度, $C$ 为比例于光反馈强度与外腔长度乘积的参数, $I_0$ 及 $\Delta I$ 分别为输出光强直流分量与交流分量的振幅。

当外部反射物体沿光轴移动时,激光器输出光强将呈周期性变化,形成干涉条纹,其周期为半个单体激光器波长。这样,通过条纹计数就可以实现位移测量。

\* 国家自然科学基金(编号 59675077)资助项目。

收稿日期:1999-10-15;收到修改稿日期:1999-11-23

## 2.2 误差分析

式(1)表明,反馈光程差变化时,激光器波长将会发生变化。但这种变化是周期性的,其周期为半个激光波长。设波长随位移的变化为 $\Delta\lambda(L)$ ,则有<sup>[4]</sup>

$$\int_{L_0}^{L_0+\lambda_0/2} \Delta\lambda(L) dL = 0 \quad (3)$$

因此,反馈光导致的激光波长的非线性变化对整数条纹计数没有影响,仅会给小数条纹相位测量带来误差。在弱光反馈条件下,反馈光对波长的影响比较小,故本文不考虑这项误差。

对于实际的干涉仪,测量是这样进行的:在时刻 $t_1$ 测量镜处于测量的起始位置,如图1所示。此时初始程差为 $2L_0$ ,对应的干涉条纹级数为

$$m_1 = 2nL_0/\lambda_0 \quad (4)$$

在时刻 $t_2$ ,测量镜被移动测量长度 $L$ 后,处于位置 $M'$ ,测量结束。此时光程差为 $2n(L_0 + L)$ ,对应的干涉条纹级数为

$$m = 2n(L_0 + L)/\lambda_0 \quad (5)$$

显然有

$$m = m_1 + m_2 \quad (6)$$

$m_2$ 为对应于测量长度的干涉条纹数

$$m_2 = 2nL/\lambda_0 \quad (7)$$

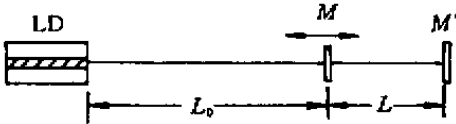


图1 误差分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of error analysis

在实际测量中,采用干涉条纹计数法,测量开始时使计数器对 $m_1$ 置零。因此,对应于测量长度,计数器计得的干涉条纹数为 $m_2$ 。

为全面考察测量开始时环境条件对标准状态偏离的影响,和在测量时间 $t_2 - t_1$ 内,环境条件的变化引起 $n, \lambda_0, L_0$ 等参数变化对测量结果带来的影响,可对式(6)进行全微分

$$dm = dm_1 + dm_2 \quad (8)$$

根据式(5)和式(7)可得

$$dm_1 = \frac{2L_0}{\lambda_0} dn + \frac{2n}{\lambda_0} dL_0 - \frac{2n}{\lambda_0^2} L_0 d\lambda_0 \quad (9)$$

$$dm_2 = \frac{2L}{\lambda_0} dn + \frac{2n}{\lambda_0} dL - \frac{2n}{\lambda_0^2} L d\lambda_0 \quad (10)$$

所以测量结束时产生的误差为

$$\Delta m = \int dm = \int dm_1 + \int dm_2 = \Delta m_1 + \Delta m_2 \quad (11)$$

由于在测量开始时的环境条件相对于标准状态有偏离,在测量过程中又相对于初始状态有变化,因此,测量误差中的每一项包含两部分:

(1)由测量起始时的环境条件对标准状态有偏离而产生的增量,以 $\Delta$ 表示。这些增量在整个测量过程中可视为常值,故可以使用此增量代替式(9)和(10)

$$\Delta m_1 = \frac{2L_0}{\lambda_0} \Delta n + \frac{2n}{\lambda_0} \Delta L_0 - \frac{2n}{\lambda_0^2} L_0 \Delta \lambda_0 \quad (12)$$

$$\Delta m_2 = \frac{2L}{\lambda_0} \Delta n + \frac{2n}{\lambda_0} \Delta L - \frac{2n}{\lambda_0^2} L \Delta \lambda_0 \quad (13)$$

(2)由测量过程中环境条件变化而产生的变动量以 $\delta$ 表示

$$\delta m_1 = \int \frac{2L_0}{\lambda_0} \delta n + \frac{2n}{\lambda_0} \delta L_0 - \frac{2n}{\lambda_0^2} L_0 \delta \lambda_0 \quad (14)$$

$$\delta m_2 = \int \frac{2L}{\lambda_0} \delta n + \frac{2n}{\lambda_0} \delta L - \frac{2n}{\lambda_0^2} L \delta \lambda_0 \quad (15)$$

全部干涉条纹数为

$$m + \Delta m = (m_1 + \Delta m_1 + \delta m_1) + (m_2 + \Delta m_2 + \delta m_2) \quad (16)$$

测量开始时,使计数器置零,即 $m_1 + \Delta m_1 = 0$ 。测量结束时,计数器计得的干涉条纹数

$$m' = m_2 + \Delta m_2 + \delta m_2 + \delta m_1 \quad (17)$$

式(16)表明,计数器计得的干涉条纹数由四部分组成:

1)  $m_2$ ,对应于被测长度真值的条纹数 2)  $\Delta m_2$ ,该项误差包含了因测量开始时的环境条件偏离标准状态,而由 $\Delta n, \Delta L$ 及 $\Delta \lambda$ 引起的三项误差,均与被测长度 $L$ 有关 3)  $\delta m_2$ ,该项误差是因测量开始时的环境条件在测量过程中不能被保持,而由 $\delta n, \delta L$ 及 $\delta \lambda$ 引起的,也均与被测长度 $L$ 有关 4)  $\delta m_1$ ,这项误差在形式上与 $\delta m_2$ 相似,但有着完全不同的物理意义。反映了在测量过程中,干涉仪的初始光程差随着环境条件的变化而变化。该误差与被测长度无关,而与初始腔长有关。

可见,同传统干涉仪一样,为减小测量误差,对激光光源进行稳频及对空气折射率进行修正,是极其必要的。另一方面,为减小测量过程中激光器波长变化及空气折射率变化导致的测量误差,在满足测量范围的前提下,应尽可能设置短的初始外腔。

### 3 实验

#### 3.1 实验装置

图 2 为所建立的激光自混合干涉位移测量实验装置示意图。光源为 SHARP 公司的 LT022MD 型单纵模半导体激光器,峰值波长为 780 nm,两只激光器的阈值电流为 42.5 mA 与 47.5 mA。光探测器使用封装于激光器内部的 PIN 光电二极管。准直透镜为 TSL20 型自聚焦透镜,数值孔径为 0.37,直径为 2 mm。PZT 位移驱动系统可以提供的最大位移为 14.8  $\mu\text{m}$ ,用来驱动反射物以形成完整的干涉条纹。由步进电机驱动的移动台移动范围为 100 mm,用来改变初始腔长。干涉信号由数据采集卡进行采样。

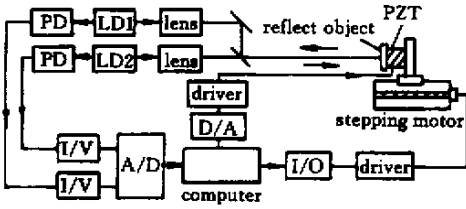


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental setup

#### 3.2 测量结果

##### 3.2.1 测量分辨力

首先考察干涉条纹幅度与注入电流的关系。图 3 给出了两只激光器在不同注入电流激励下得到的干涉条纹对比度实验测量曲线。在阈值处,干涉条纹对比度最大,随着注入电流增大,干涉条纹对比度逐渐减小,这种特性尚有待理论解释。可见,在阈值处,对获得高的信噪比是有利的。但是当注入电流在阈值处时,激光器还没有完全激振,是以多纵模方式工作的,随着注入电流的增大,子模逐渐被抑制,呈现单模振荡状态。在多模状态,干涉条纹周期仍为半个中心波长,但干涉区域是不连续的,测量只能在某一干涉区域进行,只有毫米级范围<sup>[7]</sup>。

在不同光反馈强度下,信号的信噪比是不同的。图 4 为由镜面和粗糙的白纸作为反射面得到的自混合干涉信号。可以看出,条纹幅度相差近 40 倍,且由于镜面反射率较高,干涉条纹呈倾斜状(如图 4(a)所示),而由白纸散射形成的干涉条纹由于反馈光较弱,保持对称的正弦形状(如图 4(b)所示),这与文献的理论分析是一致的。并且前者

的信噪比大大高于后者,对提高测量分辨力极为有利。但对反馈强度也是有限制的,当其达到一定程度时,激光器将进入混沌状态,出现低频干扰<sup>[8]</sup>,对测量反而不利。

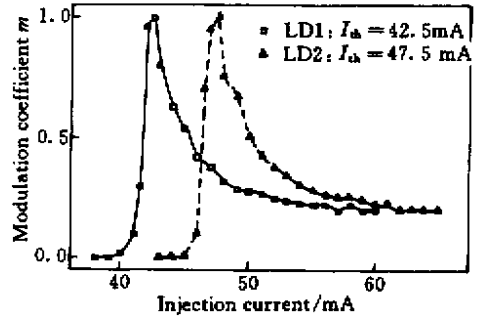


图 3 调制系数与注入电流的关系

Fig.3 Relationship between modulation coefficient and laser injection current

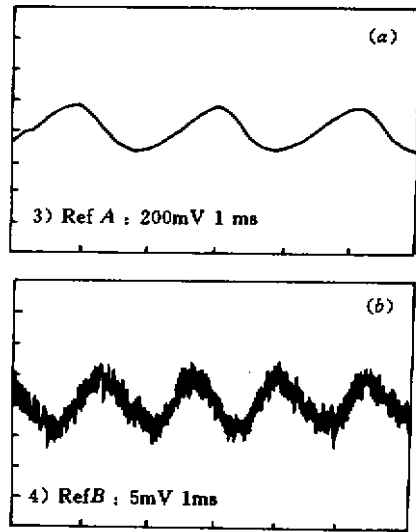


图 4 由不同反射物体得到的自混合干涉信号

Fig.4 Signal of self-mixing interferometer with different reflector

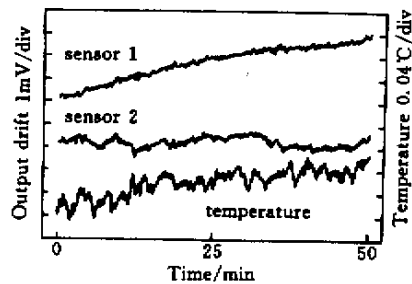


图 5 稳定性与噪声测量曲线

Fig.5 Measured curve of stability and noise

对未采用温度控制电路和采用温度控制电路

的两只半导体激光器 LD1 和 LD2 进行测量。它们均工作在单模状态,反射物为光滑的白纸,反射率介于镜面与粗糙白纸之间,得到的干涉信号幅度分别为 25 mV 与 27 mV。然后保持反射物静止,记录信号输出。图 5 给出了 50 min 的静止信号测量曲线。由测量结果可知,信号高频噪声在 0.5 mV 左右。当仅对条纹整数计数时,由于不确定度为  $\lambda_0/2 = 390 \text{ nm}$ ,所以高频噪声对测量没有影响。但当在一个条纹内测量时,高频噪声就成为测量分辨率的上限。

### 3.2.2 系统稳定性

温控可以稳定光源频率与光强,是提高系统稳定性的有效措施。表 1 给出了两只半导体激光器漂移特性测量结果。对于  $L = 20 \text{ mm}$  的情况,在 50 min 的测量中,随着外界温度的上升,未采取温度控制措施的系统产生较大的漂移(2 mV),而采取温控措施的系统的漂移被控制在 1 mV 以内。在实际测量中,信号强度的变化被认为是干涉信号相位变化导致的,所以会给位移测量带来误差。

在不同外腔长度条件下,干涉仪的漂移特性是不同的。以未采取温控措施的干涉仪为例,当  $L = 20 \text{ mm}$  时,在 50 min 的测量中,输出信号漂移 2 mV,当  $L = 40 \text{ mm}$  时,输出信号漂移 3.5 mV。当外腔更长时,信号漂移的影响就不可忽略了。可见,初始外腔短可以有效减小由于测量过程中的环境条件变化导致的测量误差。由于实际系统中,激光器发光点到其封装的玻璃间有 1 mm 左右的距离,或者加入准直透镜,外腔的最短长度是大于激光器谐振腔长度的。

表 1 系统稳定性测量结果

Table 1 Measured results of system stability

n	Output drift without temperature controlling/mV		Output drift with temperature controlling/mV	
	L = 20 mm	L = 40 mm	L = 20 mm	L = 40 mm
1	1.5	3.0	0.7	1.0
2	1.7	2.8	0.9	1.2
3	1.4	3.5	0.6	0.9
4	1.8	3.3	0.7	1.1

## 4 结 论

1)对于激光自混合干涉仪,为减小位移测量误

差,对光源进行稳频是重要前提。对半导体激光器而言,进行温度控制对频率稳定是有效果的。

2)在满足测量范围的条件下,应使干涉仪具有短的初始外腔长度,这样可以减小测量过程中测量条件变化导致的测量误差。

3)对于半导体激光自混合干涉仪,注入电流在阈值处时,干涉条纹幅度最大,具有最高的信噪比。但由于激光器处于多纵模振荡状态,将使干涉仪测量范围受到限制。

4)为使干涉仪具有较高的分辨力,应有较高的反馈光强。但反馈光强过高,可能使系统进入混沌状态。因此,必须合理选择反射物体。

## 参 考 文 献

- 1 K. Matsubara, W. Stork, A. Wagner *et al.*. Simultaneous measurement of the velocity and the displacement of the moving rough surface by a laser Doppler velocimeter. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(19):4516 ~ 4520
- 2 S. Donati, G. Giuliani, S. Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1):113 ~ 119
- 3 Sun Xiaoming, Ma Junshan, Qiang Xifu. Study on theoretical models of absolute distance measurement based on the self-mixing interference in laser diode. *Chinese J. Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1998, **19**(3):274 ~ 278 (in Chinese)
- 4 Sun Xiaoming, Ma Junshan, Qiang Xifu. Theoretical analysis of the self-mixing interference in laser diode. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(11):1018 ~ 1022 (in Chinese)
- 5 Young Joo Kim, Yutaka Hasegawa, Kenya Goto. The Deposition and Characteristics of an External Cavity Semiconductor Laser for the Lensless Optical Memory System. *The Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics, Korea*, 1999. 559 ~ 560
- 6 Hiroo Ukita, Yuji Uenishi, Hidenao Tanaka. A photomicrodynamic system with a mechanical resonator monolithically integrated with laser diodes on gallium arsenide. *Science*, 1993, **260**:786 ~ 788
- 7 Ma Junshan. Study of several theory of the self-mixing interference in laser diode. *A Dissertation for the Degree of D. Eng.*, Harbin Institute of Technology (哈尔滨工业大学工学博士学位论文), 1999. 27 ~ 31 (in Chinese)
- 8 Ming-Wei Pan, Bei-Pei Shi, George R. Gray. Semiconductor laser dynamics subject to strong optical feedback. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(3):166 ~ 168