

差动型激光自混合干涉式位移测量系统*

禹延光¹⁾ 强锡富¹⁾ 魏振禄²⁾ 孙晓明¹⁾

1), 哈尔滨工业大学精密仪器系, 哈尔滨 150001
2), 大庆石油管理局采油工艺研究所, 大庆 163000

摘 要 提出了一种利用激光自混合干涉效应的差动式位移测量系统, 建立了系统的数学模型, 经仿真分析及实验验证表明: 和单激光管结构相比, 该系统位移分辨力提高了二倍, 达 $1/4$ 光波长, 且能大大减小光反馈强度引起的噪声及温度干扰。

关键词 半导体激光器, 自混合干涉, 差动, 位移测量。

1 引 言

自混合干涉问题起源于光反馈对激光应用系统的影响。1963 年, King^[1]等首先发现一个可动外部反射镜引起激光输出强度波动, 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。这个现象奠定了自混合干涉的基础。人们开始探讨该现象产生的物理本质及有效利用这种现象进行物理量测量的方法。近年来的研究成果表明^[2], 自混合干涉同传统的干涉仪具有相同的相位灵敏度, 而由于其结构简单、紧凑、易准直等独特优点, 使得在很多应用场合取代传统干涉仪。

利用自混合干涉进行位移测量, 大多采用单半导体激光管, 与被测对象共同形成复合腔激光器。被测对象的移动改变激光器的外腔长, 由此调制激光器的输出能量和光频。这种单管结构系统, 具有半个光波波长的位移分辨力, 但存在较多问题, 如分辨力不够高、受温度影响、光反馈引起强度噪声(甚至可能淹没干涉信号)等。这些一直是自混合干涉测量技术待解决的热点问题。1994 年, Wang^[3]等采用合成波长技术, 用双激光管结合光纤组成了位移测量系统。该装置能够产生大于任何一个单管波长的合成波长。该系统特点是避免光或电的多路复用元件, 使自混合型波长合成系统比传统的波长合成系统结构大大简化, 利用相位测量提高了位移分辨力, 并扩大了位移测量系统动态范围, 但相位测量法的动态范围局限于 $1/4$ 波长。1996 年, Takahashi^[4]又构成了更高分辨力的主动外差式自混合位移测量系统。系统分辨力达 5 nm, 量程也限于一个波长范围。

以上两个系统在提高分辨力技术上有很大进展, 共同存在的问题是牺牲了测量范围, 另外, 强度噪声和温度的影响没有考虑。其实, 在半导体激光研究领域, 关于含外腔激光器的

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-11-30; 收到修改稿日期: 1999-03-22

噪声抑制技术已有较深入的研究，如注入小的波动信号、限制激光器的工作电流等措施，但这些技术能否成功地被利用在自混合干涉测量中，它们是否影响自混合干涉效应，尚需进一步探讨和实验验证。

本文提出了一种利用激光自混合干涉效应的差动式位移测量系统，建立了系统的数学模型，经仿真分析及实验验证表明，和单激光管结构相比，该系统位移分辨力提高了二倍，达四分之一光波波长，理论上测量范围限于相干长度的一半。对称的结构能大大减小光反馈强度引起的噪声干扰及温度影响。

2 模型建立

2.1 单管结构的位移测量系统模型

半导体激光管位移传感器系统如图 1 所示。

图 1 中，激光二极管 LD 的输出经自聚焦透镜 L 准直后照射到被测物体 M 上，M 又将一部分光反馈回激光腔，激光器的输出端和 M 构成外腔，当外腔长小于激光的相干长度的一半时，整个系统可以看作复合腔激光器。PD 是设置在激光器后部的探测器，监测激光器的输出光强；LD 采用直流激励。为便于系统模型的建立，采用图 2 所示的等效图。

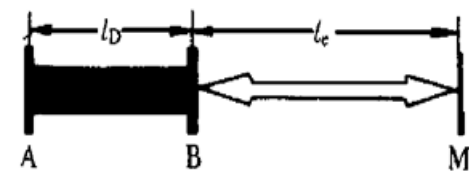


Fig. 2 Effective figure

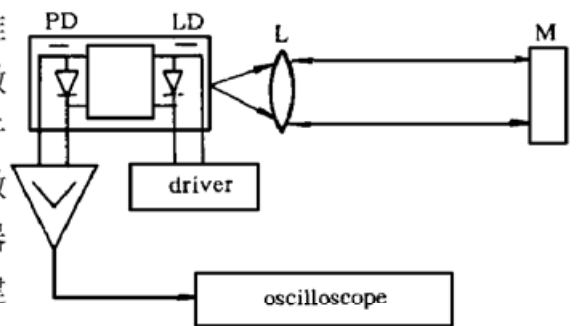


Fig. 1 Schematic diagram of the displacement system using single laser diode

建立，采用图 2 所示的等效图。A、B 分别表示半导体激光器的两个腔面，M 为外腔反射面，激光器内腔长为 l_D ，外腔长为 l_e ，A、B 面幅值反射率为 R ，B 面透射率为 ξ ，M 面幅值反射率为 R' ，激光器激活层媒质的折射率 n_c 。设初始时，左腔面 A 存在光波为 $E \exp [i(\omega t + \varphi)]$ ，其中， E 为光波幅值， ω 为光波频率，光波初始相位 φ 取为 0，该光束向右传播，一路经右腔面 B 反射，在内腔中往返一周；另一路透过 B 在外腔往返后，又耦合至内腔回到 A，最终汇集 A 处的光波叠加。当 M 向右移动 Δl_e 时，外部反馈光的相位变化为 $\theta(t) = 2kl_e + 2k\Delta l_e$ 。当激光系统稳定时，叠加后的波应与初始波相同。因此有：

$$E \exp (i\omega t) = R^2 E \exp [i(\omega t + 2n_c k l_D)] + \gamma R' \xi R E \exp \{i[\omega t + 2n_c k l_D + \theta(t)]\} \quad (1)$$

其中， γ 为外部光耦合至腔内的耦合系数。化简后：

$$R^2 \exp [i(2n_c k l_D)] \{1 + \beta \exp [i\theta(t)]\} = 1 \quad (2)$$

其中， $\beta = \gamma R' \xi / R$ ；激光介质的复折射率用下式表示：

$$n_c = n - i g \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式得：

$$R^2 \exp (2g k l_D) \sqrt{[1 + \beta \cos \theta(t)]^2 + \beta^2 \sin^2 \theta(t)} \exp (2i n k l_D) \exp (i\phi) = 1 \quad (4)$$

式中，

$$\tan \phi = \beta \sin \theta(t) / [1 + \beta \cos \theta(t)],$$

当 β 很小时，近似有：

$$\phi \approx \beta \sin \theta(t)$$

$$\sqrt{[1 + \beta \cos \theta(t)]^2 + \beta^2 \sin^2 \theta(t)} \approx 1 + \beta \cos \theta(t)$$

由(4)式得，系统稳态条件为：

$$\left. \begin{aligned} gk &= -\frac{1}{2l_D} [\ln |R^2| + \beta \cos \theta(t)] \\ 2nkl_D + \beta \sin \theta(t) &= 2\pi M \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 M 为正整数，因外腔腔长的变化改变外部反馈光的相位而使激光器内腔载流子密度发生变化，从而使激光介质折射率 n_c 也发生变化，导致波矢 $k \rightarrow k + \Delta k$ 。设无外腔时，载流子密度为 N_0 。对应折射率实部、虚部分别为 $n_0 = n(N_0)$ 、 $g_0 = g(N_0)$ ；有光反馈存在时，载流子密度变化 ΔN ，对应折射率实部、虚部分别为 $n(N_0 + \Delta N)$ 、 $g(N_0 + \Delta N)$ ；若 n_c 随载流子密度发生线性变化，实部变化率为 χ ，虚部变化为 ρ 。则：

$$\left. \begin{aligned} n(N_0 + \Delta N) &= n_0 + \chi \Delta N \\ g(N_0 + \Delta N) &= g_0 + \rho \Delta N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式后，经整理有：

$$\left. \begin{aligned} c\Delta k &= \omega - \omega_0 = -\frac{\gamma_1}{\cos \alpha} \sin [\theta(t) + 2\Delta k l_e - \alpha] \\ \Delta N &= -\frac{n_0 \gamma_1}{ck\rho} \cos [\theta(t) + 2\Delta k l_e] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $\alpha = \arctan(\chi/\rho)$ ， $\gamma_1 = c\beta/2n_0l_D$ ，因光强 I 变化与载流子密度变化成正比，设比例系数为 I_0 ，并令

$$x = 2\Delta k l_e, \quad C = \beta l_e/n_0l_D \cos \alpha,$$

所以有：

$$\left. \begin{aligned} x &= -C \sin(2kl_e + 2k\Delta l_e + x - \alpha) \\ I &= -I_0 \cos(2kl_e + 2k\Delta l_e + x) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8) 式为单管半导体激光位移系统的一般模型。

2.2 差动结构的位移测量系统模型

差动结构的位移测量系统如图 3 所示。它包含两个单管激光自混合干涉位移测量系统，差动结构以外反射物 M 为中心对称，即两激光器的初始外腔长相等， $l_{e1} = l_{e2} = l_e$ ， LD_1 、 LD_2 采用同一型号并用同一电流激励，当外反射器右移 Δl_e 时，

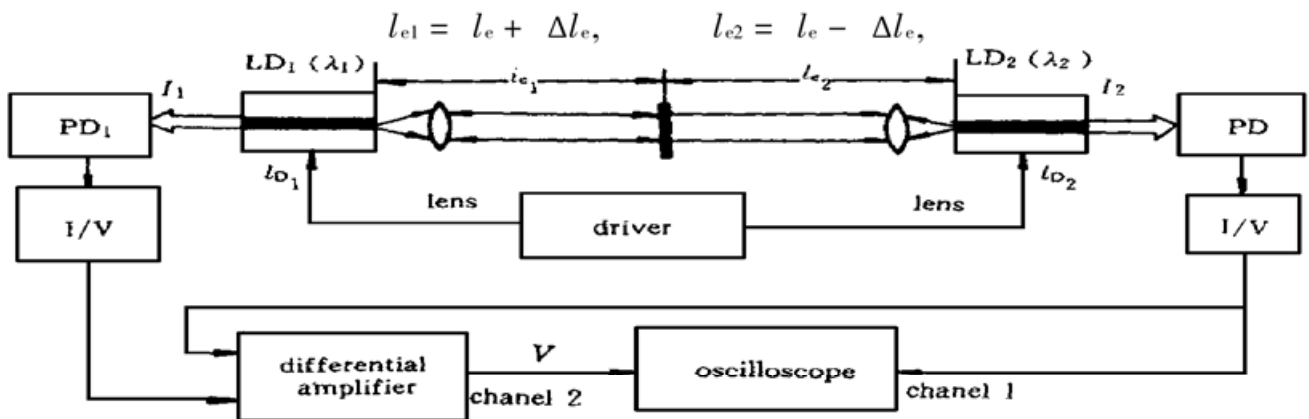


Fig. 3 Schematic diagram of the differential displacement measuring system

由(8)式得: 两个激光器的输出光强分别为:

$$I_1 = - I_0 \cos [2kl_e + 2k\Delta l_e + x_1] \quad (9)$$

其中

$$x_1 = - C \sin (2kl_e + 2k\Delta l_e + x_1 - \alpha)$$

$$I_2 = - I_0 \cos [2kl_e - 2k\Delta l_e + x_2] \quad (10)$$

其中

$$x_2 = - C \sin (2kl_e - 2k\Delta l_e + x_2 - \alpha)$$

被 PD 检测后, 经 I/V 变换电路, 然后进入差动放大电路, 设这几个环节的总增益为 A , 则差动放大电路的输出为:

$$\left. \begin{aligned} V &= A(I_1 - I_2) = 2AI_0 \sin [2kl_e + (x_1 + x_2)/2] \sin [2k\Delta l_e + (x_1 - x_2)/2] \\ x_1 &= - C \sin (2kl_e + 2k\Delta l_e + x_1 - \alpha) \\ x_2 &= - C \sin (2kl_e - 2k\Delta l_e + x_2 - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(11)式可作为差动结构的系统模型。

3 仿真分析及实验

3.1 仿真分析

对(8)式和(11)式进行仿真分析。取 $C = 1$, $2kl_e = m\pi$ (m 为正整数)。单管结构的位移测量系统仿真波形如图 4 中曲线 1 所示; 差动结构的仿真波形如图 4 中曲线 2 所示。由仿真波形看出: 两种结构的输出都是周期函数, 对应同样的位移量, 差动结构的波动周数是单管结构波动周数的 2 倍。

差动结构的初始外腔参数选择应有一定的规则, 外腔选择不当将导致干涉波形较复杂, 不利于测量。如 $2kl_e = n\pi/2$ (n 为奇整数) 时, 波形如图 5。经多次参数选取和仿真分析, 系统处于最佳工作状态要求初始外腔的选择应满足 $2kl_e \approx m\pi$ (m 为正整数), 同时, $C \leq 1$ 。

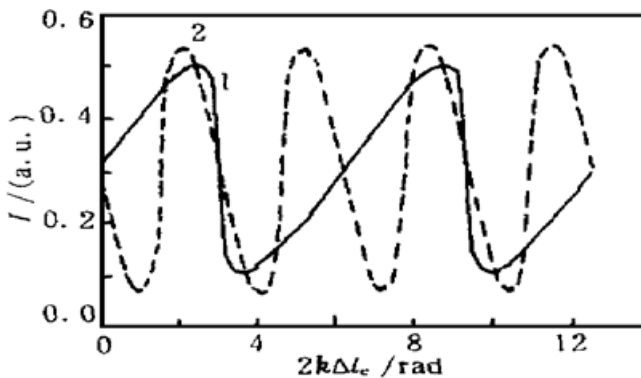


Fig. 4 Simulating wave

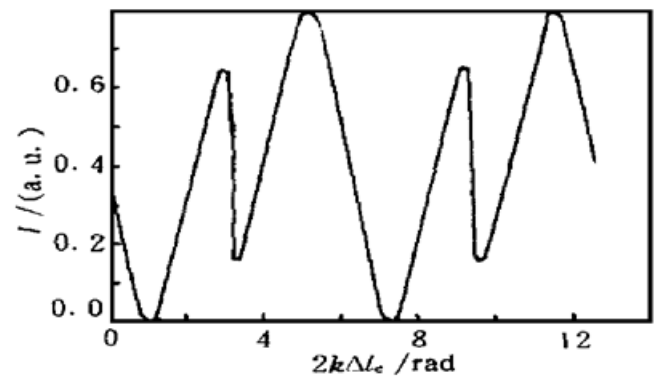


Fig. 5 Simulating wave with an improper external cavity

以上理论分析没有考虑强度噪声和温度的影响, 当这两项干扰存在时, 因对称的结构, 差动结构的两个激光器输出强度均附加一个相同的干扰量, 经差动放大电路处理后相消。

3.2 实 验

实验系统如图 3 所示。其中激光器采用 LT022, $\lambda = 780 \text{ nm}$, $I_{th} = 53 \text{ mA}$, 本实验采用 $I = 64.5 \text{ mA}$ 。被测物体是镜面, 安装在压电陶瓷上, 通过电压精密控制镜面位移。单管结构和差动结构的输出信号分别送入数字存储示波器的通道 1 和 2。位移测量时, 示波器的电压分辨率为 100 mV/div , 时间扫描速率为 1 ms/div , 如图 6 所示。因扫描频率较高, 图中所记录信号没有反映出噪声的影响, 因此, 又专门记录了噪声信号, 如图 7 所示, 示波器的电压分辨率为 50 mV/div , 时间扫描速度为 5 ms/div 。

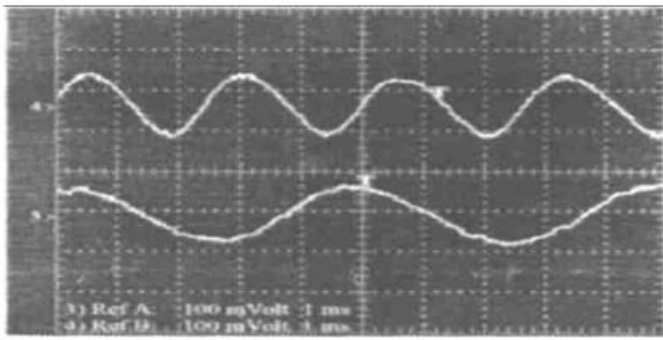


Fig. 6 Waveform of experimental system

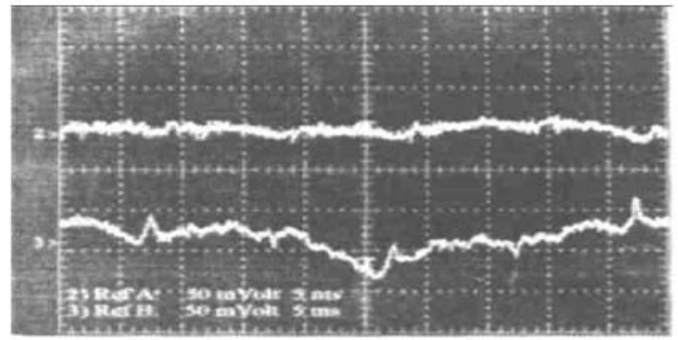


Fig. 7 Intensity noise

单管结构系统输出如图 6 中波形 3, 强度噪声如图 7 中波形 3。差动结构系统输出如图 6 中波形 4, 强度噪声如图 7 中波形 2。显然差动结构大大削弱了噪声信号。

结 论 经仿真分析和初步的实验验证, 利用激光自混合干涉效应的差动式位移测量系统具有以下特点:

- 1) 和单激光管结构相比, 系统位移分辨力提高了 2 倍, 达 $1/4$ 光波波长。
- 2) 对称的结构能大大减小光反馈强度引起的噪声干扰及温度影响。
- 3) 系统处于最佳工作状态的参数选择规则为: $C \leq 1$, 同时初始外腔选择应为, $2kl_e \approx m\pi$ 。

$m\pi$ 。

参 考 文 献

- [1] King P G R, Steward G J. Metrology with an optical master. *New Scient*, 1963, **17**: 180~ 182
- [2] Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V. Self-mixing Interference in a diode laser: Experimental observations and theoretical analysis. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9): 1551~ 1558
- [3] Wang W M, Grattan K T V. Active optical feedback in a dual-diode laser configuration applied to displacement measurements with a wide dynamic range. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 1795~ 1801
- [4] Takahashi N, Kakuma S. Active heterodyne interferometric displacement measurement using optical feedback effects of laser diode. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(3): 802~ 806

A Differential Displacement System Using Laser Self-Mixing Interference Effect

Yu Yanguang¹⁾ Qiang Xifu¹⁾ Wei Zhenlu²⁾ Sun Xiaoming¹⁾
 1), Department of Precision Instrument, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
 2), The Research Institute of Oil Extraction and Technics, Oil Administer Bureau of Daqing,
 Daqing 163000

(Received 30 November 1998; revised 22 March 1999)

Abstract A differential displacement system using the self-mixing interference effect in a laser diode and its model is established. It is confirmed by computer simulating and experiment that the resolution of this system is two times of that of common single laser diode system. The intensity noise and temperature disturbance can be decreased greatly.

Key words semiconductor laser, self-mixing interference, difference, displacement measurement.