

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0308-05

# 含预反馈的激光自混合干涉型位移测量结构<sup>\*</sup>

禹延光<sup>1)2)</sup> 姚建铨<sup>1)</sup> 叶会英<sup>2)</sup>

(1), 天津大学精密仪器与光电子工程学院 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072 )  
(2), 郑州大学电子工程系, 郑州 450052

摘要 : 提出了含预反馈的激光自混合干涉型位移测量结构, 建立了系统模型, 经理论分析和实验验证, 结果表明 : 该结构具有提高温度量程、提高测量信号信噪比及获得粗糙表面的锯齿干涉信号等特点。

关键词 : 半导体激光 ; 自混合干涉 ; 预反馈 ; 位移测量

中图分类号 : TH744 文献标识码 : A

## 1 引 言

近年来, 激光自混合干涉法因其结构简单、紧凑、鲁棒而越来越引起关注。激光自混合干涉技术是光反馈效应的研究和消除不利光反馈影响的过程中产生的, 由于在很多应用场合能取代传统的、复杂的干涉系统而逐渐形成一个崭新的有深远应用前景的研究领域。关于该领域的历史背景, 本文作者在其他几篇文章中曾作过介绍<sup>[1-5]</sup>。

激光自混合干涉的基本现象早在 1968 年就有报道, 20 世纪 80 年代中期, 美国、日本的一些学者开始利用这些基本现象进行距离和速度的测量, 90 年代, 英国、意大利、法国的学者也步入自混合干涉技术的研究, 近几年, 自混合干涉的研究已扩展到振动测量<sup>[6]</sup>、探伤研究<sup>[7,8]</sup>、模具谱分析<sup>[9]</sup>、形貌测量<sup>[10,11]</sup>等, 尤其是与大规模集成制造技术结合, 利用表面微机械技术, 可使微光学动力系统集成在单片半导体基片上<sup>[12,13]</sup>, 向微型传感器发展。

以往的研究大多是利用基本的自混合干涉结构, 问题集中在如何选择激光注入电流的调制方式、如何确定注入激励的大小、如何改善干涉信号处理电路、能进行何种量的测量等问题上。本文针对自混合干涉测量结构, 采用预反馈技术, 通过对该系统的理论分析和实验验证, 结果表明 : 与一般自混合干涉型位移测量结构相比, 该结构能够获得粗糙测量面的稳定的锯齿型自混合干涉信号, 由于锯齿型干

涉信号含有位移的方向信息, 可以直接进行方向辨识, 预反馈的最佳调整, 可使激光测量系统处于降低反馈光噪声、压窄谱线的状态, 因此系统具有高信噪比、大量程的优良性能。

本文建立了含预反馈结构的自混合干涉系统理论模型, 分析了该系统的位移干涉信号波形, 然后实验证明了理论分析结果。

## 2 实验结构描述

含预反馈的自混合干涉位移测量系统如图 1 所示。与一般自混合干涉结构不同, 激光器和被测目标之间插入了一个反射率较高的光学镜, 调整反馈镜位置, 有一定的反馈光馈入激光腔, 对激光器的性能作初步改善, 相当于形成一个外腔激光器, 其谱特性受外反射镜的位置和反射率影响。选用具有粗糙表面的被测物, 对入射光形成散射, 使反馈回激光腔的光强很弱, 不改变系统的谱性能。

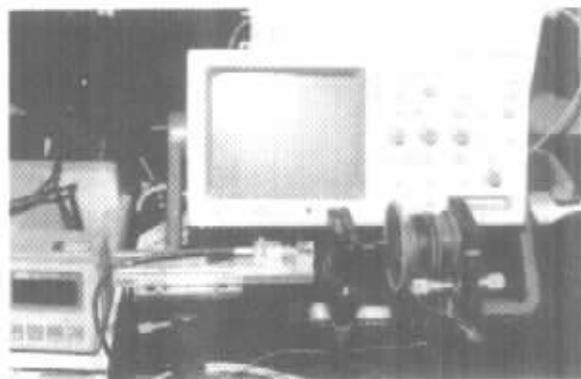


Fig. 1 Self-mixing interference system with optical pre-feedback

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60178039)及河南省自然科学基金(0111060200)资助课题。

E-mail : yanguangyu@263.net

收稿日期 2000-12-26 ; 收到修改稿日期 2001-04-09

### 3 系统模型的建立

含预反馈的自混合干涉系统和一般激光自混合干涉系统的等效模型如图 2(a)、图 2(b)所示。

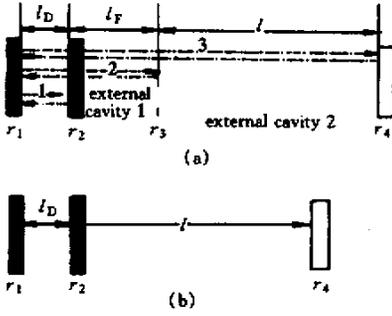


Fig.2 (a) Four-mirror effective figure with pre-feedback ;  
(b) Three-mirror effective figure of a general self-mixing system

图 2 中  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$  分别表示激光器前后腔面、预反射镜面和被测物表面的幅值反射率。 $l_D$ 、 $l_E$ 、 $l$  分别为激光腔内腔、外腔 1、外腔 2 的几何长度。对于图 2(a), 假定初始时激光器左腔面存在一束光, 为  $E \exp(i\omega t + \phi_0)$ , 该光束分别经激光器右腔面、预反射镜和被物体反射后, 汇聚在激光器左腔面。为分析方便, 将光束分解为三束光进行描述, 系统稳定时, 三束光在腔面的叠加应与初始光束相同, 才能形成稳定的激光。三束光各自经历一次往返传播后为:

第一束光波透过激光器右腔面、预反射镜后, 被被测物反馈回激光腔, 至激光器左腔面反射后向右的光波为

$$r_1 t_1 t_2 r_4 f_1 f_2 E \exp[i(\omega t + 2kl_D n_c + 2k(l + l_E) + \phi_0)],$$

式中  $t_1$ 、 $t_2$  分别为激光器右腔面和反射镜的透射率;  $f_1$ 、 $f_2$  分别为外腔 1 到激光器内腔和外腔 2 到激光器外腔 1 的反馈光耦合系数;  $k$  为波矢;  $n_c$  为激光媒质复折射率。第二束光波透过激光器右腔面、被预反射镜反馈回激光腔, 至激光器左腔面反射后向右的光波为

$$r_1 t_1 r_3 f_1 E \exp[i(\omega t + 2kl_D n_c + 2kl_E + \phi_0)];$$

第三束光波被激光器右腔面反射, 至激光器左腔面再反射后向右的光波为

$$r_1 r_2 E \exp[i(\omega t + 2kl_D n_c + \phi_0)].$$

三束光叠加后与初始光束相同, 才能满足激光激发条件, 即

$$E \exp[i(\omega t + \phi_0)] = r_1^2 E \exp[i(\omega t + 2n_c k l_D + \phi_0)] +$$

$$f_1 r_1 t_1 r_3 E \exp[i(\omega t + 2n_c k l_D + 2kl_E + \phi_0)] + r_1 f_1 f_2 t_1 t_2 r_4 E \exp[i(2n_c k l_D + 2kl_E + 2kl + \phi_0)], \quad (1)$$

(1) 式化简后得

$$1 = r_1^2 \exp[i(2n_c k l_D)] |Z| \exp[i \arg(Z)], \quad (2)$$

其中

$$Z = 1 + C_1 \exp(i\omega\tau_E) + C_2 \exp(i\omega\tau), \quad (3)$$

$$C_1 = f_1 t_1 r_3 / r_1, \quad C_2 = f_2 t_2 C, \quad C = f_1 t_1 r_4 / r_1,$$

$$\omega\tau_E = 2kl_E, \quad \omega\tau = 2kl.$$

由于

$$n_c = n - ig, \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (2) 式, 则

$$1 = r_1^2 |Z| \exp(2gkl_D) \exp[i \arg(Z)], \quad (5)$$

将 (5) 式的实部和虚部分离, 可得系统激发条件为

$$gk = \frac{1}{2l_D} (\ln|r_1|^2 + \ln|Z|), \quad (6a)$$

$$2nkl_D + \arg(Z) = 2\pi M, \quad (6b)$$

$M$  为正整数。当反馈光不存在时 (6) 式简化为

$$g_0 k_0 = \frac{1}{2l_D} \ln|r_1|^2, \quad (7a)$$

$$2n_0 k_0 l_D + \arg(Z) = 2\pi M, \quad (7b)$$

(7) 式是单激光管激发条件。

当外部反馈光存在时, 腔内载流子的密度  $N$  将发生改变, 同时折射率  $n_c$  也将改变, 因此引起波矢的变化 ( $k \rightarrow k_0 + \Delta k$ )。在反馈光为 0 处线性化  $n$ 、 $g_0$ 。令  $N_0$  为对应的载流子密度,  $n_0$ 、 $g_0$  为对应的复数折射率的实部和虚部, 记为  $n_0 = n(N_0)$ ,  $g_0 = g(N_0)$ 。反馈光存在时, 作一级近似展开  $n(N)$ 、 $g(N)$ , 有:

$$\left. \begin{aligned} n(N_0 + \Delta N) &= n_0 + (dn/dN_0) \Delta N = \\ &= n_0 + \chi \Delta N, \\ g(N_0 + \Delta N) &= g_0 + (dg/dN_0) \Delta N = \\ &= g_0 + \rho \Delta N. \end{aligned} \right\} (8)$$

(8) 式中  $\chi$ 、 $\rho$  分别为复数折射率  $n_c$  的实部和虚部随载流子密度  $N$  的变化率。将 (8) 式代入 (6) 式, 并以  $(k_0 + \Delta k)$  代替  $k$ , 有

$$(g_0 + \rho \Delta N)(k_0 + \Delta k) =$$

$$-\frac{1}{l_D} (\ln|r_1|^2 + \ln|Z|),$$

$$\chi n_0 + \chi \Delta N (k_0 + \Delta k) l_D + \arg(Z) = 2\pi M.$$

只考虑基模,  $M = 0$ 。将  $\Delta N$ 、 $\Delta k$  作为独立变量并消去  $\Delta N \Delta \omega$  项, 得

$$\Delta k = -\frac{\arg(Z) + (\chi/\rho) \ln|Z|}{2n_0 l_D [1 - g_0 \chi / (n_0 \rho)]} \quad (9)$$

令线宽展宽因数  $\alpha = \chi/\rho$ ,  $\tau_D = 2n_0 l_D/c$  为激光在内腔往返时间,  $\tau$  为光束在外腔往返时间,  $\tau = 2l/c$  为激光在外腔往返时间, 当  $g_0 \chi / (n_0 \rho)$  远小于 1 时 (9) 式变为

$$\omega\tau - \omega_0\tau = \frac{\tau}{\tau_D} (\alpha \ln|Z| - \arg|Z|), \quad (10)$$

(10) 式为激光自混合干涉系统的方程。

将 (7a) 式代入 (6a) 式, 得

$$gk = g_0 k - \frac{1}{2l_D} \ln|Z|,$$

则阈值增益变化量  $\Delta G'$  为

$$\Delta G' = gk - g_0 k_0 = -\frac{1}{2l_D} \ln|Z|, \quad (11)$$

(11) 式为激光系统的阈值条件。为方便使用, 将系统的相位方程和阈值方程写在一起,

$$\left. \begin{aligned} \omega\tau - \omega_0\tau &= A[\alpha \ln|Z| - \arg(Z)], \\ \Delta G &= -\ln|Z|, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中

$$A = \tau/\tau_D, \quad \Delta G = l_D \Delta G'.$$

为便于同一般自混合结构对比, 同理, 可以推导出图 2(b) 中一般自混合干涉模型仍为 (12) 式, 记作

$$\left. \begin{aligned} \omega\tau - \omega_0\tau &= A[\alpha \ln|Z'| - \arg(Z')], \\ \Delta G &= -\ln|Z'|, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中  $Z' = 1 + c_3 \exp(i\omega\tau)$ 。

该模型的一级近似便是一般自混合干涉模型<sup>[14]</sup>。

## 4 模型的数值分析

当测量面位移与初始外腔之比远小于 1 时, 近似认为  $A$  为常数, 对预反馈模型 (12) 式和一般自混合模型 (13) 式进行数值解分析。图 3 是预反射镜的反馈光相位为  $\omega\tau_E = (2K + 1)\pi$  ( $K$  为正整数),  $C_3 = 0.001$  时, 对应不同预反馈参数  $C_1$ , 阈值变化的波动成分峰-峰  $G_{P-P}$  随反馈光相位变化的特性图, 即位移干涉条纹仿真波形图, 图中  $G_{P-P}$  分别对应 0.13、0.075、0.048。可以得到以下结论: 随着反馈参数  $C_1$  的增加, 位移干涉条纹幅值增加, 且逐渐发生倾斜。

图 4 是预反射镜的反馈光相位为  $\omega\tau_E = 2K\pi$  ( $K$  为正整数),  $C_3 = 0.001$  时, 对应不同预反馈参数  $C_1$  的位移干涉条纹仿真波形, 对应  $G_{P-P}$  分别为 0.021、0.024、0.032。显然, 随着反馈参数  $C_1$  的增加, 位移干涉条纹幅值减小, 且基本为正弦波形, 没有倾斜现象,

初相位发生改变。图 3 和图 4 相比较, 后者的最大幅值也小于前者的最小幅值。因此  $\omega\tau_E = (2K + 1)\pi$  时, 预反馈结构的干涉信号波动深度最大。

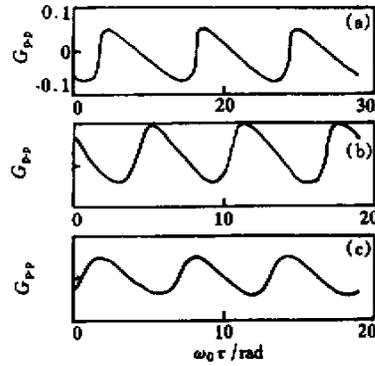


Fig. 3 Simulating waves of the structure with pre-feedback, when  $\omega\tau_E = (2K + 1)\pi$ . (a)  $C_1 = 0.7$ ; (b)  $C_1 = 0.5$ ; (c)  $C_1 = 0.2$

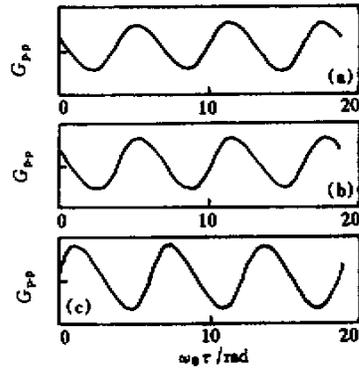


Fig. 4 Simulating waves of the structure with pre-feedback, when  $\omega\tau_E = 2K\pi$ . (a)  $C_1 = 0.7$ ; (b)  $C_1 = 0.5$ ; (c)  $C_1 = 0.2$

对应预反馈结构的相同参数, 对不含预反馈的一般自混合模型 (13) 式进行位移干涉条纹的仿真, 其无反馈结构的仿真波形如图 5 所示,  $C_3 = 0.001$ 。由图可知, 1) 其干涉信号近似为正弦波形; 2) 干涉信号幅值小于预反馈结构的信号幅值 (图 3 和图 5 比较)。

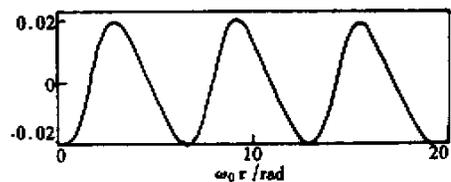


Fig. 5 Simulating wave of the structure without pre-feedback,  $C_3 = 0.001$

## 5 实验观察

实验系统如图, 用粗糙白纸作反射面, 将其粘贴

在扬声器表面,扬声器施加 22.45 Hz, 937.5 mV 的正弦激励信号,分别用一般自混合干涉结构和预反馈结构测量扬声器振动信号,如图 6 和图 7 中波形  $A_1$  所示。波形  $A_2$  是扬声器振动激励信号曲线。显然,含预反馈结构的干涉信号幅值远大于一般自混合干涉结构的信号幅值。

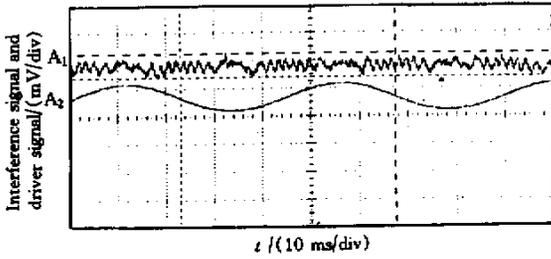


Fig. 6 Displacement interference signal without pre-feedback using paper measurement surface

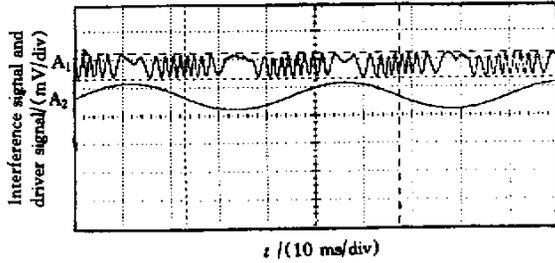


Fig. 7 Displacement interference signal with pre-feedback using paper measurement surface

调整预反射镜的位置,使系统获得最佳状态,示波器所记录扬声器的振动干涉信号如图 8 中波形  $A_1$  所示,波形  $A_2$  是扬声器振动激励信号曲线。显然,此时扬声器的振动干涉信号倾斜的类锯齿波形,倾斜方向对应振动方向。

由文献 [2, 13] 的研究结论可知,激光管激励电流设在阈值附近时,干涉信号的调制深度最大,易获得自混合干涉现象。但此时激光管工作在多模状态,谱线很宽,相干长度非常小,且光能量极低。用

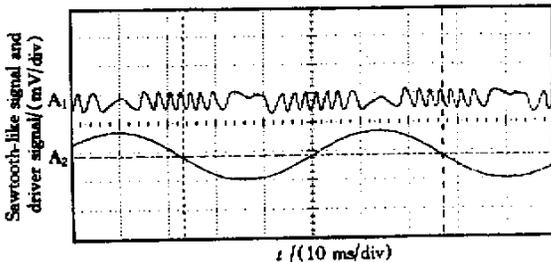


Fig. 8 Sawtoothlike interference signal

粗糙的白纸作测量面,实验表明初始外腔只能限定 5 cm 以内,否则将很难观察到自混合干涉现象。而采用预反馈结构,通过对预反射镜的位置调整,系统性能大为提高。实验表明,同样的激励电流下,不必改变光点大小,初始外腔的距离提高到 30 cm 处,仍可获得较佳的自混合干涉效果。文献 [14] 关于谱线宽研究的理论支持该实验结果。

图 9 记录了 50.2 mA 的激励电流 ( $I_{th} = 49 \text{ mA}$ ) 下,不同初始距离时对应的干涉条纹波形,图中波形 1、2、3、4 分别对应初始外腔为 8 cm、12 cm、20 cm、30 cm。显然,初始外腔距离越大,干涉信号幅值越小,这与光点的大小有关,20 cm 处对应的光点直径约为 1.5 mm,30 cm 处光点直径更大,当调整自聚焦透镜,使此处光点直径很小时,仍可获得较大幅值的干涉信号。因此,采用预反馈结构极大地提高了量程范围。

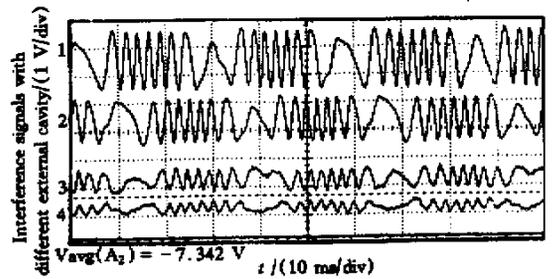


Fig. 9 Interference signals with different initial external cavity

结论 利用预反馈结构,通过预反射镜的初始位置的调整,可以使测量系统获得良好的测量性能。通过以上分析,得出预反馈结构特点如下:

- 1) 当预反射镜的反馈光相位为  $\omega\tau = (2K + 1)\pi$  时,预反馈参数  $C_1$  越大,位移干涉信号波形倾斜的程度越大;
- 2) 利用预反射镜对激光管进行谱线压窄,则系统相干长度大于单管激光的相干长度,从而获得更大的测量范围;
- 3) 用粗糙面作被测表面,对入射光形成散射,不要求对系统进行精细调整,易保证反馈光进入激光管内腔,反馈光水平低,对系统影响小,通过预反馈设计,仍可获得较大信噪比的锯齿型位移干涉信号,从而实现位移的适时测量。

而不含预反馈的结构,根据文献 [15] 研究结果,若用粗糙面作测量面,测干涉信号为正弦信号,不包含位移信息,且信号幅值较小。要获得锯齿波形的

干涉信号,必须用反射率较高的测量面,如镜面,但需要精细调整反馈光,保证回馈激光腔内部,否则,自混合干涉将不存在。此外镜面的位置对系统谱特性有较大的影响,如谱线的周期压窄和展宽,当镜面作动态的测量面时,势必造成测量误差。

### 参 考 文 献

- [1] Yu Yanguang, Cheng Ming, Qiang Xifu. Self-mixing interference effects in a laser diode with multiple optical feedback. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2001, **21**(10):1093~1098(in Chinese)
- [2] Yu Yanguang, Sun Xiaoming, Qiang Xifu. The self-mixing interference phenomenon inside semiconductor laser operating below threshold: Experimental and theoretical analysis. *Optical Technology*(光学技术), 2000, **26**(2): 115~117(in Chinese)
- [3] Su Xiaoming, Yu Yanguang, Qiang Xifu. Condition for the sawtooth-like waveform of self-mixing interference signal. *Optical Technology*(光学技术), 1999, **25**(2):68~70(in Chinese)
- [4] Yu Yanguang, Qiang Xifu. The correct interpretation about a phenomenon of the self-mixing interference in semiconductor laser. *Chinese J. Lasers (B)*, 2000, **B9**(1)24~29
- [5] Yu Yanguang, Qiang Xifu, Wei Zhenlu *et al.*. A differential displacement system using laser self-mixing interference effect. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(9):1269~1273(in Chinese)
- [6] Roos P A, Stephens M, Wieman C E. Laser vibrometer based on optical feedback-induced frequency modulation of a single-mode laser diode. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34): 6754~6761
- [7] Servagent N, Bosch T, Lescure M. A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, 1997, **46**(4):847~850
- [8] Bosch T, Servagent N. A displacement sensor for spectrum analysis using the optical feedback in a single-mode laser diode. *IEEE Instr. and Meas. Tech. Conference*, 1997, May. 870~873
- [9] Suzuki T, Sasaki O, Maruyama T. Phase-locked laser diode interferometer for surface profile measurement. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20):4407~4410
- [10] Bosch T, Servagent N, Chellali R *et al.*. Three-dimensional object construction using a self-mixing type scanning laser range finder. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, 1998, **47**(5):1326~1329
- [11] Hauptmann M A, Grattan K T V, Palmer A W *et al.*. Silicon resonator sensor systems using self-mixing interferometry. *Sensors & Actuators (A)*, 1996, **55**:71~77
- [12] Ukira H, Uenishi Y, Tanaka H. A photomicrodynamic system with a mechanical resonator monolithically integrated with laser diode on gallium arsenide. *Science*, 1993, **260**(5109):786~788
- [13] de Groot P J. Range depended optical feedback effects on the multi-mode spectrum of laser. *Diode. J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(7):1199~1214
- [14] Yu Yanguang. *Study on the Theory and Displacement Measurement Method of Self-Mixing Interference in Laser*. [Eng. D. dissertation] Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000 62~65(in Chinese)
- [15] 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

## A Self-Mixing Interference Structure with Pre-Feedback Used for Measuring Displacement

Yu Yanguang<sup>1)2)</sup> Yao Jianquan<sup>1)</sup> Ye Huiying<sup>2)</sup>

(1), College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072

(2), Electronic Engineering Department, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052

(Received 26 December 2000; revised 9 April 2001)

**Abstract:** A new self-mixing interference structure including the pre-feedback is proposed and its model is established. It is confirmed by computer simulating and experiment that the pre-feedback one can extend the measuring range and increase the signal-to-noise ratio and obtain the sawtooth interference signal from a rough surface.

**Key words:** semiconductor laser; self-mixing interference; pre-feedback; displacement measurement