

文章编号: 1001-3806(2017)02-0235-05

## 基于相敏检波和位置探测器的位移检测系统

黄沛<sup>1</sup>, 陈博<sup>2</sup>, 李岩<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084; 2. 北京理工大学 附属中学, 北京 100081)

**摘要:** 为了实现对微小位移的测量, 研制了一套基于单模光纤输出半导体激光器和 2 维位置敏感探测器的位移检测系统, 可以有效地抑制环境光噪声。对半导体激光器的注入电流进行 1kHz 的调制, 实现输出光功率的调制。在信号处理电路中, 采用相敏检波技术, 解调探测器的输出交流信号, 得出光斑能量中心位置, 消除外界干扰。结果表明, 测量精度优于 1 $\mu\text{m}$ 。这一结果对于多自由度误差检测是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 位置检测; 相敏检波; 2 维位置敏感探测器

**中图分类号:** TN247; TL814

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.02.018

## Displacement measurement system based on phase-sensitive detection and position sensitive detector

HUANG Pei<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. The Attached High School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to realize the measurement of micro displacement, a displacement detection system based on semiconductor laser with single mode optical fiber output and 2-D position sensitive detector (PSD) was developed to suppress ambient light noise effectively. The output power of laser was sinusoidally changed when injection current was modulated with 1kHz. The desired signals from PSD which is illuminated by the modulated light source are demodulated from the noise with phase-sensitive detection technique. In the signal processing circuit, using phase sensitive detection technology, the output alternating current signal of detector was demodulated and spot energy center position was gotten. Therefore, the disturbance of background light was eliminated. The results show that the measuring accuracy is better than 1 $\mu\text{m}$ . The study is helpful for multi-degree-of-freedom errors measurement.

**Key words:** laser technique; position detection; phase-sensitive detection; 2-D position sensitive detector

### 引言

2 维位置敏感探测器 (position sensitive detector, PSD) 是一种新型的半导体位置信息连续输出探测器, 目前被广泛用来探测位置的变化和微小角度变化<sup>[1-4]</sup>。首先其对待测光斑的形状没有要求; 其次, PSD 具有光敏面无分割, 能够进行连续测量, 有响应速度快、中心区域线性度好的优点; 同时, PSD 具有电路设计简单、分辨率高、响应速度快的特点, 在位移检测系统<sup>[5]</sup>、长导轨直线度测量方向<sup>[6-7]</sup>得到广泛的应用。在实际使用中, PSD 的光敏面极有可能会暴露在光照环境中, 因

此与其它光电检测方法一样, PSD 工作时会受到除了准直光源以外的环境光干扰<sup>[8-10]</sup>, 影响测量的精度和可靠性。为此, 如何克服杂光作用的干扰是很多研究者关心的问题。分析了杂光在 PSD 上的作用模式, 研究了杂光下的输出信号与杂光的非线性关系, 推导出存在杂光干扰时 PSD 输出信号与杂光的关系以及位置误差方程。WANG<sup>[11]</sup>等人给出了光学滤波、测量本底噪声以及锁相的实用方法。LI<sup>[12]</sup>等人提出采用比例-积分-微分 (proportion-integral-differential, PID) 控制激光二极管的驱动电源来消除 PSD 背景光的补偿方法。MO<sup>[13]</sup>等人采用神经网络实现了 PSD 背景光的非线性补偿。

本文中研制出一种基于相敏检波技术, 采用调制的半导体激光器和 2 维 PSD 研制了一套位移检测系统。该系统通过调制半导体激光器的注入电流实现对输出光功率的调制, 利用相敏检波技术只对驱动频率的信号进行解调, 从而得到光斑位置变化值。采取调

基金项目: 国家重大科技专项课题资助项目 (2012ZX04003071)

作者简介: 黄沛 (1989-), 男, 博士研究生, 现主要从事精密计量与测试的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liyan@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2016-01-25; 收到修改稿日期: 2016-05-26

制解调的方法可以提高信噪比和抗干扰能力并且有效地消除背景光的干扰。

### 1 位置灵敏探测器的选择

目前用来探测光斑位置的光电探测器有3种<sup>[14]</sup>: 电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)、四象限探测器(quadrant detector, QD)和2维PSD。QD线性度一般,而且存在死区,对光斑能量分布要求高。CCD线性度好,对光斑的要求也比较低,但是响应时间却在毫秒量级,对于需要快速反应的场合应用存在一定的限制。PSD可探测光斑能量中心的位置,因此对于光斑的形状和能量分布均没有太高的要求;PSD的光敏面无分割,能够进行连续测量,中心区域线性度好;与CCD相比,其响应速度快,响应时间是在微秒量级。图1为2维PSD探测原理图,2维PSD有4个电流输出管脚。光束入射到PSD的光敏面时,PSD产生与入射光功率成比例的光生电荷,并形成电流流向PSD的管脚。

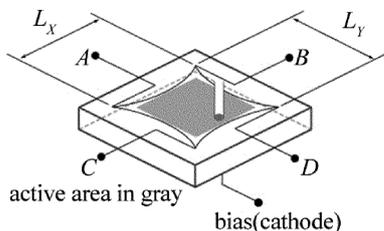


Fig. 1 Principle diagram of 2-D PSD

光斑能量中心在PSD上的位置X和Y表示为:

$$\begin{cases} \frac{2X}{L_x} = \frac{(A + C) - (B + D)}{A + B + C + D} \\ \frac{2Y}{L_y} = \frac{(A + B) - (C + D)}{A + B + C + D} \end{cases} \quad (1)$$

式中,A,B,C和D是PSD 4个管脚的输出电流, $L_x$ 和 $L_y$ 是光敏面的长度。为了使用方便,一般采用可见光作为目标光源,2维PSD的光谱响应范围最好覆盖可见光波段。除此之外,光敏面积以及测量分辨率,分别对应于测量的量程与分辨率,是2维PSD选择的重要原则。当目标激光器与2维PSD相距较远时,激光器输出的光斑需要进行扩束,减小发散角,因此光敏面积势必要大于光斑大小。本文中设计的位移检测系统,期望能达到毫米量级量程以及微米量级的测量分辨率,因此选用日本滨松公司的S1880型2维位置敏感探测器。它具有12mm×12mm光敏面积,光斑位置分辨率达到1.5μm,光谱响应范围在320nm~1060nm之间,是一款合适的位置灵敏探测器。

### 2 半导体激光器调制电路

目前PSD的目标光源大多是半导体激光器或氦

氛激光器,这些激光器大多使用的是恒定功率。所以在测量过程易受到杂散光或者背景光的干扰。本文中采用光纤输出的半导体激光器作为光源。半导体激光器具有体积小、功耗低、价格低廉、易于调制等优点。通过调制注入电流实现对输出光功率的调制。在激光器的阈值电流 $I_{th}$ 以上,理论上输出功率与驱动电流呈线性关系。采用具有一定直流偏置的交流信号来驱动激光器,控制偏置电流以及交流调制深度,使得PSD工作在线性区。这样,PSD的A,B,C,D 4个管脚的输出均是交流电流信号。在信号处理电路中,采用相敏检波技术只对驱动频率的信号进行解调,得出光斑位置,可消除背景光干扰,从而提高信噪比和抗干扰能力。

半导体激光器的P-N结易于损坏,静电、驱动电流大于阈值电流、瞬态尖峰电压都可能会导致激光器寿命减短甚至永久损坏<sup>[15-16]</sup>。因此,需要特殊设计半导体激光器的驱动电流源。驱动电路包括三部分,分别为缓启动,偏置电流以及交流调制,如图2所示。

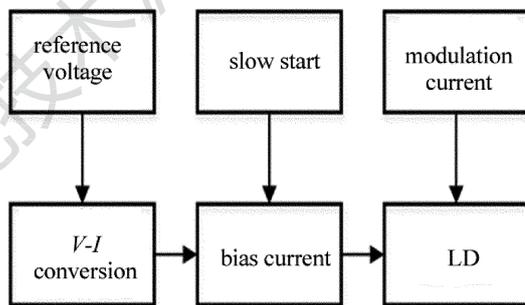


Fig. 2 Driving circuit diagram of semiconductor laser

#### 2.1 缓启动

图3是电源缓启动电路原理图。其核心器件是可调三端稳压器LM317,输出电压可通过调整电阻 $R_4$ 改变。缓启动时间由电阻 $R_3$ 和电容 $C_2$ 组成的充放电电路决定。接通电源后,由于电容 $C_2$ 充电,三端稳压器两端的电压缓慢上升。相反,当断开电源时,电容 $C_2$ 放电,稳压器的输出电压缓慢下降。接通电源后通过半导体激光器的电流缓慢增加到设定值,断开电源时输出电压缓慢下降。

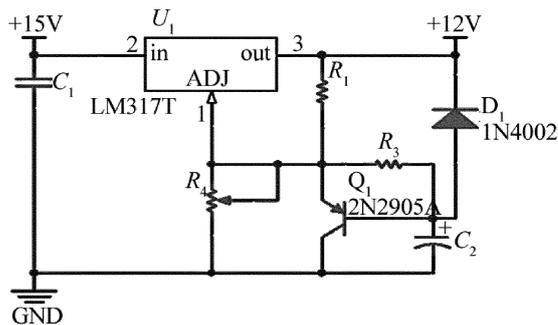


Fig. 3 Schematic circuit diagram of slow start power

### 2.2 偏置电流

为使半导体激光器正常工作,要为激光二极管提供大于阈值电流的偏置电流  $I_0$ 。图4是偏置电流产生原理图。精密电压芯片 LM336 产生的基准电压经分压后为  $U_0$ 。根据运算放大器的性质,流过三极管  $Q_2$  发射级和集电极的电流为  $U_0/R_{10}$ 。因此,只要  $U_0/R_{10}$  恒定,流过半导体激光器的电流恒定。注入电流的稳定性直接影响激光器的输出,使用低温漂电阻  $R_{10}$  以保证偏置电流的稳定性。

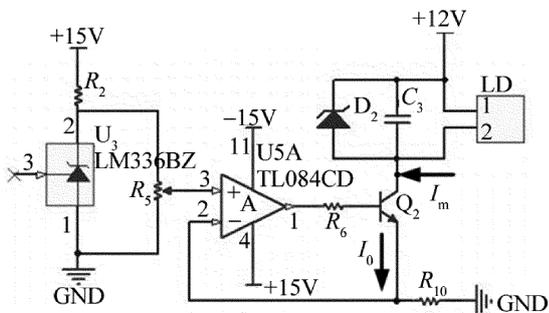


Fig. 4 Schematic circuit diagram of bias current

### 2.3 交流调制

图5是调制电流产生电路原理图。图中所有电阻的阻值为  $R$ 。输入端为交流电压  $U_m$ ,则调制电流为  $I_m = U_m/R$ 。交流调制电路的输出端接到三极管的集电极。流过激光器的电流为直流偏置电流与调制电流之差  $I_0 - I_m$ 。输入电压  $U_m$  使用有源晶振进行分频后得到,调制信号电压的频率为 1kHz,远离背景光的频率,且作为后期解调电路的参考信号。同时需要注意的是,调制电流的大小不能超过激光器所能承受的最大电流。

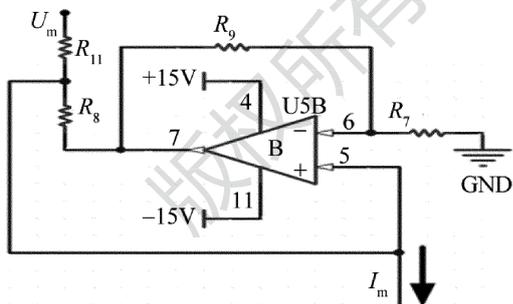


Fig. 5 Schematic circuit diagram of alternating current modulation

## 3 PSD 信号处理电路

探测器 PSD 的输出不仅包括激光器产生的光电转换电流,还包括背景光的噪声电流以及 PSD 的暗电流。经放大后,输出电压包含交流信号电压和噪声电压。所以通过解调手段将交流信号从噪声电压中提取出来,从而提高信噪比以及测量系统的抗干扰能力。PSD 信号处理电路中采用相敏检波技术解调信号。图6是信号处理框图,包括  $I-V$  转换、二级放大、相敏检波

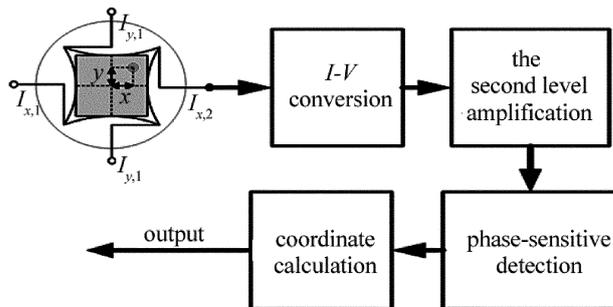


Fig. 6 Principle diagram of signal processing

以及坐标计算。

其中电流转换电压电路和电压二级放大电路采用经典的运放电路就可以实现。但是需要通过一个基准电流,调整二级放大电路的放大倍数,使电路对 PSD 的 4 路输出电流放大倍数必须相等。相敏检波电路则是解调信号的核心电路,其电路框图如图7所示。

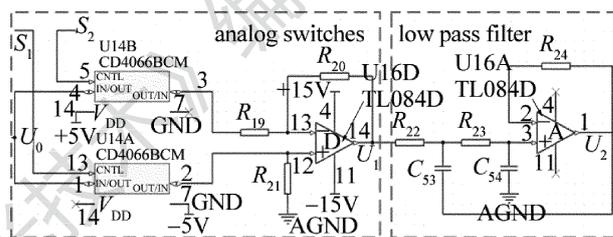


Fig. 7 Schematic circuit diagram of phase-sensitive detection

$S_1$  和  $S_2$  为参考信号,控制模拟开关 CD4066 的开关,参考信号由半导体激光器调制电路提供。当参考信号是高电平时,模拟保持开关导通状态;当参考信号是低电平时,模拟开关保持截止状态。低通滤波提取输出电压  $U_1$  的直流分量。相敏检波原理如图8所示。当参考信号变为高电平时,输入电压  $U_0$  通过模拟开关,模拟开关输出电压  $U_1$  为  $U_0$ ;参考信号变为低电平时,输入电压  $U_0$  经反转后输出,模拟开关输出电压  $U_1$  是  $-U_0$ 。参考信号和输入信号同向时,低通滤波后的

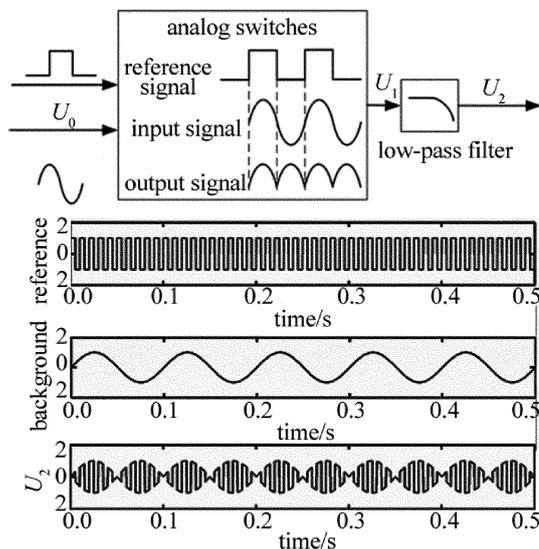


Fig. 8 Principle diagram of phase sensitive detection

电压  $U_2$  正比于  $U_0$  的幅值;当参考信号和输入信号相位差为  $90^\circ$ ,经低通滤波后电压  $U_2 = 0V$ ;当参考信号和输入信号相位差为  $180^\circ$ ,经低通滤波后电压  $U_2$  正比于  $-U_0$  的幅值。干扰信号经过检波电路后的输出电压关于横坐标轴对称,经低通滤波后的电压为  $0V$ 。因此,通过相敏检波可有效减小背景光对测量的影响。

#### 4 测试结果

PSD 4 路输出电流为  $A, B, C, D$ 。根据 PSD 探测原理,需通过加减法运算以及除法电路计算光斑能量中心坐标。通过常规的加法和减法电路得到用于除法运算的分子  $(A + C) - (B + D)$ ,  $(A + B) - (C + D)$  和分母  $(A + B + C + D)$ 。用模拟除法器 AD538 来完成位置探测方程中的实时除法运算,可消除测量靶镜在移动中光强衰减及激光器功率波动造成的误差。除法器电路在使用前需要经过调零和调整放大倍数。输出电压值通过 A/D,采集成数字信号,换算成光斑能量中心在 PSD 上的位置。

将 PSD 固定于精密六轴位移台 (PI, P-562. 6CD) 上,其位移的闭环分辨率达到  $1\text{nm}$ ,量程为  $200\mu\text{m}$ ,线性误差为  $0.01\%$ 。足以满足本系统的标定和对比试验。半导体激光器的出射端固定,出射光经准直后被 PSD 接收。控制位移台以  $1\mu\text{m}$  的步进量分别在  $x$  方向和  $y$  方向进行移动并记录 PSD 的输出。图 9 为测试结果,图 9a 为  $x$  方向的分辨率测试结果,图 9b 为  $y$  方向的分辨率测试结果。由图可知,PSD 能够清晰地分辨出  $1\mu\text{m}$  的位移,每层台阶的峰峰值小于  $1\mu\text{m}$ 。

进一步验证系统的抗背景光干扰的特性,将激光

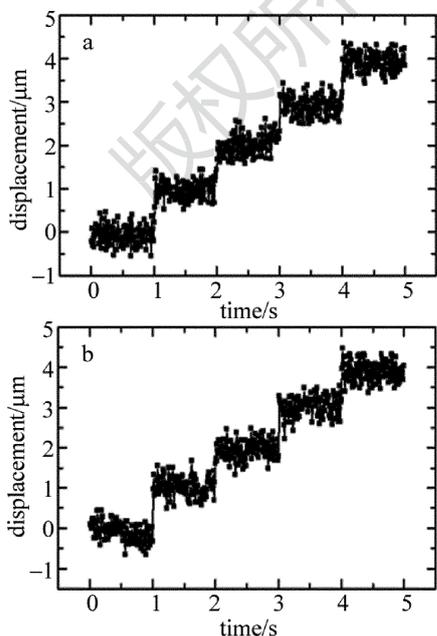


Fig. 9 Relationship between displacement and time  
a—x direction b—y direction

器以及 PSD 固定不动,连续采集 PSD 的输出坐标值。一开始是在无背景光照射情况下测量,在持续了 90s 后,使用灯光照射在 PSD 的光敏面。这一过程的采集数据如图 10 所示。由图可以看出,90s 前后没有明显的噪声变化,说明背景光并不影响测量结果。

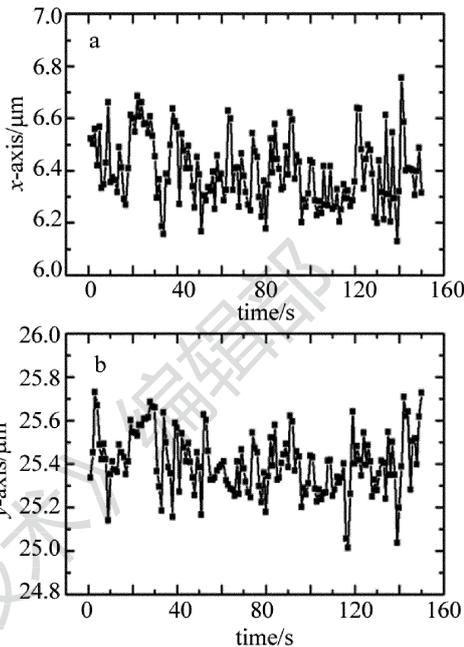


Fig. 10 Effect of background lights on measurement result

#### 5 结论

基于相敏检波技术,本文中研制了一套位移检测系统。采用光纤半导体激光器作为目标光源,设计了带调制的驱动电路。PSD 信号处理电路中采用相敏检波技术解调信号。通过对 PSD 的 4 路输出信号进行  $I-V$  转换、二级放大、相敏检波以及坐标计算的过程得到光斑能量中心的位置。实验结果表明,所设计的系统可以应用到微小位移的测量,同时背景光的照射对位移测量不会造成影响。

#### 参考文献

- [1] DUAN J, SUN X, CAI J H, et al. Applications research to PSD in the laser displacement detecting system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1):281-284 (in Chinese).
- [2] LIU J Y, YANG J Q, DONG D F. Application and research of laser tracker's optoelectronic aiming technology based on PSD[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(7):98-100 (in Chinese).
- [3] YU L, WANG F M. One dimension PSD and applications to precision measurement[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(7):143-144 (in Chinese).
- [4] YANG S L, SU Y B, HE J T, et al. Study of measurement accuracy of position sensitive detectors[J]. Laser Technology, 2014, 38(6):830-834 (in Chinese).
- [5] SONG D Y, LIU T G, DING X K, et al. Precise PSD micro-displacement online measurement system[J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(2):168-173 (in Chinese).

- [6] CHEN J H, ZHANG J M, LÜ Y P. Design of position detector for alignment laser line based on the PSD[J]. *Measurement & Control Technology*, 2012, 31(10):8-11 (in Chinese) .
- [7] LIU C Q, SONG Q, SUN Z W, *et al.* A new PSD-based method for measuring four-degree-of-freedom of long linear guide rails[J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(6):26-30 (in Chinese) .
- [8] YUAN H X, LÜ A M, HE A Zh. Position error analysis of PSD irradiated under steady background light[J]. *Journal of Transducer Technology*, 1998, 17(5):33-36 (in Chinese) .
- [9] LÜ A M, YUAN H X, HE A Zh. Experimental study of the effect of light source on position precision of PSD [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(3):192-194 (in Chinese) .
- [10] FAN Z G, ZHANG F S, ZUO B J, *et al.* Effect of noise ray on properties of position sensitive detector [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):442-444 (in Chinese) .
- [11] WANG G Zh, DING H S, DING H. Light disturbance to position sensitive detectors—pattern and methods to overcome it[J]. *Journal of Tsinghua University( Science and Technology Edition)*, 1997, 37(1):61-64 (in Chinese) .
- [12] LI L, MU X Y. A novel method to eliminate the disturbance of background light for PSD[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, 25(9):15-19 (in Chinese) .
- [13] MO Ch T, CHEN C Z, ZHANG L L, *et al.* Study on background light compensation of photo-electric position sensitive detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(4):427-431 (in Chinese) .
- [14] LI J L, LAN X Y, CHEN H Y, *et al.* Design of current supply for high power laser diode[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3):309-312 (in Chinese) .
- [15] LIBBRECHT K G, HALL J L. A low-noise high-speed diode laser current controller[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(8):2133-2135.
- [16] ERICKSON C J, ZIJLL M V, DOERMANN G, *et al.* An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(7):073107.