

# 在线测量表面粗糙度的共光路激光外差干涉仪

梁 嵘 李达成 曹 芒 赵洪志 武勇军

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要** 一种新型的、用于在线测量表面粗糙度的激光外差干涉仪已研制完成。该仪器体积小 (25 cm × 20 cm × 10 cm)、抗外界环境干扰能力强。仪器以稳频半导体激光器作为光源。共光路设计, 使测量光和参考光沿同一路径入射到被测表面上。计大数和测小数周期相结合的外差信号处理方法, 实现了大的动态测量范围和很高的测量分辨率。同时还采用了全反射临界角法进行自动聚焦。该仪器的纵向和横向分辨率分别为 0.39 nm 和 0.73 μm; 自动聚焦范围为 ±0.5 mm, 在焦点 ±25 μm 范围内, 聚焦精度为 1 μm; 80 分钟内整机稳定性:  $3\sigma = 1.95$  nm。

**关键词** 表面粗糙度, 在线检测, 共光路, 外差干涉仪, 自动聚焦。

## 1 引 言

尖端科学技术的飞速发展, 使得对精加工、超精加工表面的要求日益增加, 如 X 射线元件、同步辐射器的反射镜、大功率激光器镜面及窗口、大规模集成电路元件的基片、光盘等, 而元件表面粗糙度的测量, 特别是表面加工中粗糙度的实时在线测量显得更加迫切。表面粗糙度的在线测量不但能正确地检测加工过程中的变化和缺陷, 而且对控制和改进加工方法、提高加工表面的质量和产品性能有着相当重要的意义。

对精加工、超精加工后的表面粗糙度进行在线测量, 对测量仪器有如下要求: 1) 具有高的测量分辨率和动态范围; 2) 测量软材质表面或超光滑镜面, 要采用非接触测量方法; 3) 必须有效地消除测量现场存在的外界震动、空气扰动以及导轨误差等; 4) 现场安装要使用方便<sup>[1]</sup>。目前, 测量表面粗糙度的仪器有许多种, 它们各有特点, 但多数只限于在实验室良好环境下使用。为满足在现场恶劣环境中对精加工、超精加工的表面粗糙度进行在线测量, 本文作者对 Huang<sup>[2]</sup>和韩昌元等<sup>[3]</sup>的方案作了进一步的改进, 精简了光路、增加了自动调焦系统, 研制出了用于在线测量表面粗糙度的共光路激光外差干涉仪。

## 2 系统原理和组成

仪器原理如图 1 所示。采用的半导体激光器波长为 780 nm, 功率为 10 mW。对它的工作温度和电流进行控制, 产生频率稳定的单模线偏振光(频率  $f_0$ ), 准直后经分束镜 BS<sub>1</sub> 分别进入声光调制器 AOM<sub>1</sub>(调制频率  $f_1 = 100$  MHz) 和 AOM<sub>2</sub>(调制频率  $f_2 = 98$  MHz)。AOM<sub>1</sub> 的一级衍射光(频率  $f_0 + f_1$ ) 经光阑后扩束, 由物镜会聚到被测表面上形成光探针, 作为测量

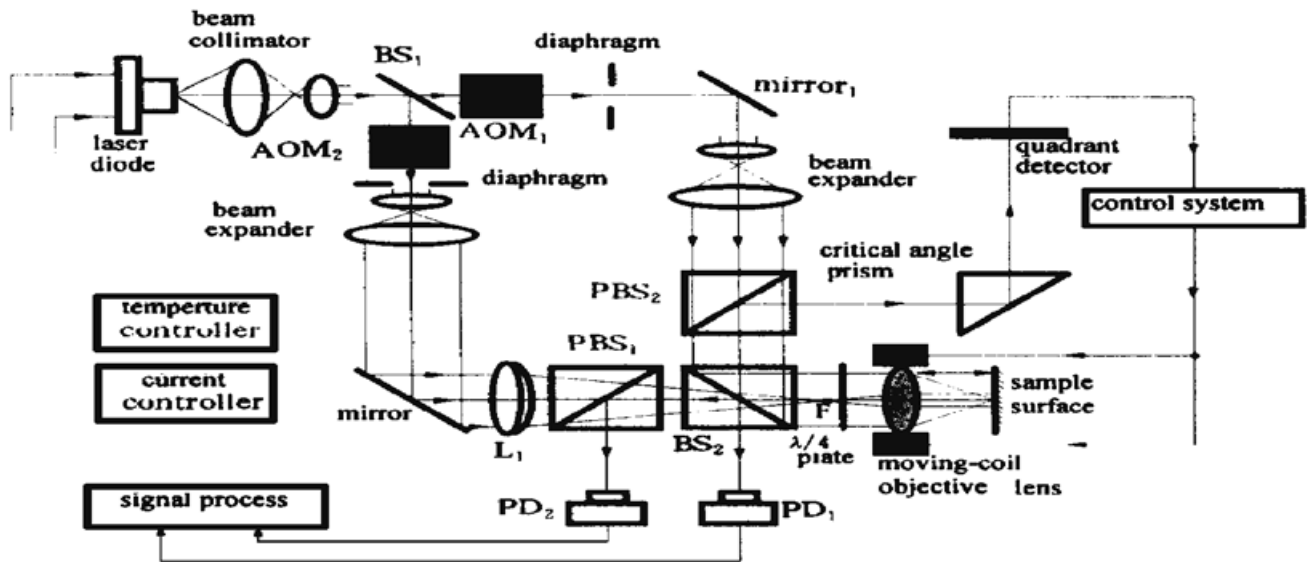


Fig. 1 The schematic diagram of common path heterodyne laser interferometer

光束。同样地, AOM<sub>2</sub> 的一级衍射光(频率  $f_0 + f_2$ ), 经光阑后扩束, 由会聚镜 L<sub>1</sub> 聚焦在物镜的后焦点 F 上, 然后经物镜形成平行光入射到待测表面上, 作为参考光。

测量光束经分光镜 BS<sub>2</sub> 的透射光和参考光束经 BS<sub>2</sub> 的反射光, 进入光电探测器 PD<sub>1</sub>, 形成光拍信号, 可表示为<sup>[2]</sup>:

$$I_1 \propto 1 + \cos [2\pi(f_1 - f_2)t - \phi_p] \quad (1)$$

其中,  $\phi_p$  是测量光与参考光之间由于传输路径不同而产生的相位差。

测量光束和参考光束从被测面反射回来, 再一次通过物镜、 $\lambda/4$  波片和分光镜 BS<sub>2</sub>, 到达偏振分光镜 PBS<sub>1</sub>。由于两次通过  $\lambda/4$  波片, 线偏振方向产生 90° 旋转, 故被 PBS<sub>1</sub> 反射进入光电探测器 PD<sub>2</sub>, 形成另一光拍信号, 该光拍信号可表示为:

$$I_2 \propto 1 + \cos [2\pi(f_1 - f_2)t - \phi_p - \phi_r(x)] \quad (2)$$

其中,  $\phi_r(x)$  表示由于待测表面轮廓的高低变化引入的测量光与参考光之间的相位差,  $x$  表示被测表面上测点的一维位置坐标。

设光探针对应的表面轮廓高度相对于参考光斑内表面轮廓的平均高度的差值为  $h(x)$ ,  $\lambda$  为半导体激光器的波长, 则有:

$$\phi_r(x) = 4\pi h(x) / \lambda \quad (3)$$

在信号处理过程中, 由于表面粗糙度的差异, 将造成返回测量信号幅度的变化。为保证测相精度, 光电信号先经过自动电压控制之后, 由高精度动态测相电路测相。测相电路采用了测小数周期和计大数相结合的方法, 实现了大的动态范围和很高的鉴相分辨率。最后数据送入计算机作粗糙度的各项参数评定。

此外, 从被测面反射回来的测量光束和参考光束, 经分光镜 BS<sub>2</sub> 和 PBS<sub>2</sub> 的反射进入临界角棱镜, 由临界角棱镜反射到四相限探测器上。通过检测测量光束在四相限探测器上的光强分布, 获取离焦信号<sup>[4]</sup>, 由比例积分 (PI) 控制电路产生相应的控制电流, 使带有线圈的测量物镜作轴向运动, 进行自动聚焦。参考光束将产生一固定直流信号, 不影响离焦信号的检测。

### 3 实验结果

该仪器的自动聚焦范围为  $\pm 0.5$  mm, 在焦点  $\pm 25$   $\mu$ m 范围内, 聚焦精度为 1  $\mu$ m, 3 dB

频带宽约为 40 Hz; 在 80 分钟内整机稳定性:  $3\sigma = 1.95 \text{ nm}$ 。仪器的纵向和横向分辨率分别为  $0.39 \text{ nm}$  和  $0.73 \mu\text{m}$ 。

在自动聚焦系统开环和闭环情况下, 对某一样块同一区段, 分别测量聚焦、近离焦和远离焦时的粗糙度数值, 取样长度为  $0.08 \text{ mm}$ , 其测量结果如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Results for open loop

open loop	in focus				close (+ 10 $\mu\text{m}$ )				distant (- 10 $\mu\text{m}$ )			
No.	1	2	3	average	1	2	3	average	1	2	3	average
$R_a/\text{nm}$	12.8	14.7	12.9	13.5	10.0	8.9	9.0	9.3	5.1	5.6	6.0	5.9
$R_y/\text{nm}$	67.0	74.6	68.6	70.1	45.7	41.1	45.7	44.2	32.0	35.0	39.6	35.5

Table 2. Results for closed loop

closed loop	in focus				close (+ 10 $\mu\text{m}$ )				distant (- 10 $\mu\text{m}$ )			
No.	1	2	3	average	1	2	3	average	1	2	3	average
$R_a/\text{nm}$	10.6	11.2	10.0	10.6	11.2	9.8	11.3	10.7	9.6	8.9	10.9	9.8
$R_y/\text{nm}$	64.0	67.0	68.6	66.5	60.9	56.4	57.9	58.4	58.7	53.3	65.5	59.1

表中,  $R_a$  为轮廓算术平均偏差,  $R_y$  为轮廓最大高度。

由实验结果可见, 开环条件下, 离焦时的测量结果比聚焦时的要小很多, 这是由于光探针变大, 降低了系统的横向分辨率。而在闭环时, 测量结果差别不大, 说明自动聚焦系统有效地减小了由于离焦造成光探针大小的变化带来的测量误差。

在精密磨床上的在线实际测量中, 粗糙度测量仪安装在磨床砂轮行程控制的 T 型导轨上, 利用磨床的横向进给来实现对被测工件的扫描。现场环境温度为  $27^\circ\text{C}$ , 由于磨床周围还有数控插齿机等机床在加工零件, 现场存在很强的震动。表 3 为对一精密磨削工件的粗糙度测试结果, 取样长度为  $0.080 \text{ mm}$ 。由于  $R_a$  在  $0.010\sim 0.020 \mu\text{m}$  内,  $R_y$  在  $0.063\sim 0.100 \mu\text{m}$  内, 故被测工件的粗糙度为  $\nabla 13$ 。

Table 3. Results for online measurement

area	1	2	3	4	5	average
$R_a/\text{nm}$	15.2	14.3	13.8	15.1	14.7	14.6
$R_y/\text{nm}$	91.4	88.4	86.8	76.2	79.6	84.5

此外, 对同一工件, 在实验室防震平台上进行了比对测量, 测量结果如表 4 所示。

Table 4. Measured in laboratory

area	1	2	3	4	5	average
$R_a/\text{nm}$	14.5	16.8	15.4	14.8	15.3	15.4
$R_y/\text{nm}$	85.4	87.6	89.1	81.2	90.3	86.7

对比实验结果看出, 在实验室环境下和在机加工车间的现场条件下测量的结果差别不大。这也说明干涉仪的共模抑制技术大大地降低了震动和环境干扰造成的影响, 证明仪器能在条件较恶劣的工业现场使用。

**结 论** 由于采用了激光共光路共模抑制技术, 克服了空气扰动、导轨误差和在线测量中震动等不利因素的影响, 使表面粗糙度测量能在线进行成为可能。计大数和测小数相结合的方法对外差光电信号进行处理, 实现了大的动态测量范围和高的测量分辨率。全反射临界角法

自动聚焦系统,保证了光学探针始终以最尖状态测量表面,从而实现了高的横向分辨率,同时也使测量过程简单、方便。

另外,还要进一步提高仪器的性能,在测量更粗糙表面的粗糙度及优化仪器结构方面作一些探索,使仪器具有更强的适应性和使用性。

### 参 考 文 献

- [1] Mitsui K. In-process sensors for surface roughness and their applications. *Precision Engng.*, 1986, **8** (4): 212~ 220
- [2] Huang C C. Optical heterodyne profilometer. *Optical Engineering*, 1984, **23**(4): 356~ 370
- [3] 韩昌元, 刘 斌, 卢振武等. 共路外差表面轮廓仪. *光学学报*, 1993, **13**(7): 670~ 672
- [4] Kohno T, Ozawa N, Miyamoto K *et al.*. High precision optical surface sensor. *Applied Optics*, 1988, **27**(1): 103~ 108

## Common Path Laser Heterodyne Interferometer for On-Line Measuring Surface Roughness

Liang Rong    Li Dacheng    Cao Mang    Zhao Hongzhi    Wu Yongjun

(State Key Lab. of Precision Measurement Technology and Instrumentation,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 9 March 1998; revised 5 June 1998)

**Abstract** A novel laser heterodyne interferometer used for on-line measuring surface roughness has been developed. It features compact volume ( $25\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ) and excellent immunity to environmental disturbances. The system employs a frequency-stabilized laser diode. The design of common path makes the measurement beam and the reference beam incident on the surface along the same way. The processing method of heterodyne signals combines integer measurement with fraction period measurement, so it has wide dynamic range and high resolution. In addition, critical angle method is introduced for automatic focusing. The height and lateral resolutions of the system are  $0.39\text{ nm}$  and  $0.73\text{ }\mu\text{m}$  respectively. The maximum range of automatic focusing is  $\pm 0.5\text{ mm}$  and the focusing accuracy is  $1\text{ }\mu\text{m}$  within  $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$  of the focus. The stability during 80 minutes is  $1.95\text{ nm}$  ( $3\sigma$ ).

**Key words** surface roughness, on-line measurement, common path, heterodyne interferometer, automatic focusing.