

文章编号: 0258-7025(2005)03-0389-05

# 大台阶高度测量的外差共焦方法

闫聚群<sup>1</sup>, 柳忠尧<sup>1</sup>, 林德教<sup>1</sup>, 张蕊<sup>1</sup>, 殷纯永<sup>1</sup>, 徐毅<sup>2</sup>, 许婕<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)  
<sup>2</sup> 中国计量科学研究院, 北京 100013

**摘要** 台阶高度是微电子产品的一个重要性能参数。基于双频激光干涉共焦显微系统(DICM)提出了一种微电子掩模板台阶高度测量的扫描方法,在共焦显微扫描样品表面,当光强达到最大值时,将采样外差干涉的相位作为精确对准的判据。该扫描方法集中融合了外差干涉测量和共焦显微测量的优点,同时实现了高分辨率与较大量程的测量,该系统测量台阶高度的范围取决于 Z 向位移扫描仪 PI-Foc 的扫描范围,可达数十甚至近百微米。实验结果表明该系统在普通恒温的实验条件下 1 h 内的漂移不超过 5 nm,该系统已经用于 20 μm 高台阶的测量,对准分辨率为 0.1 nm,实验结果与台阶高度实际值有很好的 consistency。

**关键词** 测量与计量;共焦显微术;外差干涉;相位测量;台阶

**中图分类号** TB 92;TN 247 **文献标识码** A

## Method of Heterodyne Confocal Microscopy Measuring Big Step Height

YAN Ju-qun<sup>1</sup>, LIU Zhong-yao<sup>1</sup>, LIN De-jiao<sup>1</sup>,  
ZHANG Rui<sup>1</sup>, YIN Chun-yong<sup>1</sup>, XU Yi<sup>2</sup>, XU Jie<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instruments,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)  
<sup>2</sup> National Institute of Metrology of China, Beijing 100013, China)

**Abstract** Step height is an important parameter of micro-electronic mask. A new approach named dual-frequency interferometric confocal microscope (DICM) is proposed which combines scanning confocal microscopy with heterodyne interferometry. The phase of heterodyne interferometry is recorded as an aim criteria when optical intensity of confocal microscopy is in maximum. This method implements high resolution (0.1 nm) and relatively large measurement range (>15 μm) simultaneously. Also the step height measurement range depending on the range of Z axis PI-Foc scanner which theoretically can be extended to 100 μm. The results show that in ordinary laboratory condition, with temperature controlled, the drift of phase measurement is about 5 nm in an hour. The 20 μm step height has been successfully measured and the results agree with the actual value.

**Key words** measurement and metrology; confocal microscopy; heterodyne interferometry; phase measurement; step

## 1 引 言

集成电路的各种几何参数指标已成为影响器件质量和成品率的重要因素。芯片、掩模板中的线条宽度、间距、台阶高度、膜厚等的测量和标定及这些

几何尺寸的量值统一和溯源就显得十分重要<sup>[1,2]</sup>。

共焦扫描显微系统不仅可以抑制成像中弱杂散光,而且在相同成像条件下,其轴向分辨率为普通显微系统的 1.4 倍<sup>[3]</sup>,具有三维层析成像功能,已经广泛地应用于生物、生物医学、工业探测以及计量学领

收稿日期:2003-11-15;收到修改稿日期:2004-02-25

基金项目:国家自然科学基金(50027002)和清华大学博士生创新基金联合资助项目。

作者简介:闫聚群(1978—),男,清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,主要从事激光外差干涉计量及其相关技术的研究。E-mail:yanjuqun@tsinghua.org.cn

域<sup>[3~5]</sup>。但普通的共焦显微镜其轴向分辨率仍然只停留在亚微米量级,且光源的噪声和漂移直接影响测量结果。为此提出了差动共焦式纳米级光聚焦探测系统<sup>[6]</sup>,其测量分辨力可达 2 nm。但是该系统仍采用光强测量的方法使得测量精度受到光强曲线非线性的影响。外差干涉技术也被广泛应用于表面形貌测量领域,如用于集成电路表面结构成像的 Linnik 显微术<sup>[7]</sup>、双光束声光调制外差形貌测量仪等<sup>[8]</sup>。文献[9,10]完成的双频干涉共焦显微系统(DICM)结合共焦显微技术和外差干涉测量技术,利用光强轴向响应曲线的近线性区域监测外差干涉测量的相位信息,把台阶高度测量范围扩展到 5  $\mu\text{m}$  左右。

在双频干涉共焦显微系统的基础上,本文提出了一种新的对准方法,在共焦显微扫描样品表面,当光强达到最大值时,将采样外差干涉的相位作为对准的判据。相对于传统共焦显微镜<sup>[5,6]</sup>,双频干涉共焦显微系统实现了更高的轴向分辨率。

## 2 工作原理

本文所使用的掩模板台阶高度测量仪系统光路如图 1 所示。光源  $L$  为低频差横向塞曼 He-Ne 激

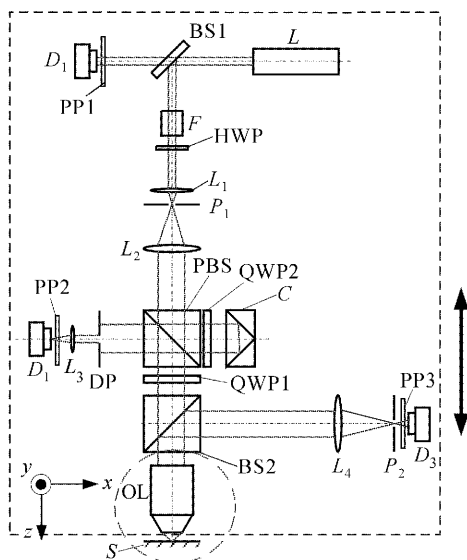


图 1 双频干涉共焦显微镜系统光路图

Fig. 1 Scheme of measuring system combining dual-frequency interferometry with confocal technology

$L$ : transverse Zeeman laser; BS1, BS2: beam splitter;  $D_1 \sim D_3$ : detector;  $F$ : Farady box; HWP: half wave plate;  $L_1 \sim L_4$ : lens;  $P_1, P_2$ : pin hole; PBS: polarazation beam splitter; PP1, PP2, PP3: polarizing plate; QWP1, QWP2: quarter wave plate;  $C$ : cube corner; OL: objective lens;  $S$ : samples; DP: diaphragm

光器<sup>[8]</sup>,该激光器光频稳定性优于  $5 \times 10^{-8}$ ,输出频差为 81.2 kHz 的一对正交线偏振光,经分束器 BS1 分光后一路透射被探测器  $D_1$  接收形成参考信号  $S_r$ ,另一路光经过法拉第盒  $F$ ,  $\lambda/2$  波片(HWP),透镜  $L_1$  会聚到针孔  $P_1$  上,从  $P_1$  投射出的光经透镜  $L_2$  后出射为平行光,该束平行光经过偏振分光镜(PBS)后,分成  $S$  分量和  $P$  分量, $S$  分量被偏振分光镜反射经  $\lambda/4$  波片 QWP1 变成圆偏振光,到达角锥棱镜  $C$  后平行折回,从  $C$  返回的圆偏振光经过 QWP1 后偏振方向偏转  $90^\circ$  变成  $P$  方向的线偏振光,该线偏振光到达偏振分光镜后透射,经小孔光阑 DP,透镜  $L_3$ , 偏振片 PP2 到达探测器  $D_2$ ;  $P$  分量被偏振分光镜透射,经过 QWP2,分光镜 BS2,显微物镜 OL 到达样品表面,样品表面反射光线在 BS2 处又被分为两部分,其中一部分光线被 BS2 透射,另外一部分被 BS2 反射。透过 BS2 的光线经 QWP2 到达偏振分光镜,由于该光线也经过两次  $\lambda/4$  波片,其偏转方向偏转  $90^\circ$  后变成  $S$  方向的线偏振光,在偏振分光镜处被反射,经过 DP,透镜  $L_3$ , 偏振片 PP2 到达探测器  $D_2$ ,与先前到达  $D_2$  的光线发生干涉,其信号被探测器  $D_2$  接收,这个就是外差干涉测量中的测量信号  $S_m$ 。把  $S_r$  和  $S_m$  信号送至现场可编程门阵列(FPGA)相位卡<sup>[8]</sup>比相,该相位卡的测相当量为  $0.1^\circ$ ,其结果被计算机采集,使双频共焦显微镜的分辨率提高到亚纳米量级<sup>[9]</sup>,可得到待测样品高度变化的细节信息。在 BS2 反射的光被透镜  $L_4$  会聚到针孔  $P_2$  并被探测器  $D_3$  接收, $P_1, L_2, BS2, OL, L_4, P_2$  构成了一套典型的共焦显微系统,由  $D_3$  探测的信号记做  $S_c$ ,把  $S_r$  和  $S_c$  送到锁相放大器中,通过扫描  $Z$  向位移的同时采样  $S_c$  的幅值就能够得到样品的高度信息。由外差测量得到的样品高度在半波长以内,结合共焦信号得到的高度信息就能够得到样品高度的准确信息,也就是本文所探讨的大台阶的测量问题。

为了详细地解释本系统的扫描测量大台阶的原理,把图 1 中的显微物镜和待测样品部分放大,如图 2 所示。

扫描测量开始,  $X$  方向压电陶瓷(PZT)扫描样品  $A$  点时  $Z$  向位移扫描仪 PI-Foc 带动显微物镜作  $Z$  向扫描,同时监测共焦光强  $S_c$  的最大值,当光强达到最大值时,记此时  $S_r$  和  $S_m$  的相位差为  $\Phi_A$ ,同时记  $Z$  向 PI-Foc 的位移值为  $D_A$ ;  $X$  方向压电陶瓷扫描样品  $B$  点时  $Z$  向 PI-Foc 带动显微物镜做  $Z$  向扫描,当共焦光强最大值时记此时  $S_r$  和  $S_m$  的相位差

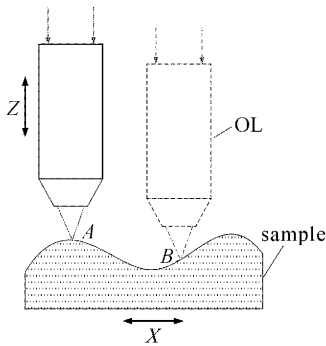


图 2 扫描原理分析

Fig. 2 Analysis of scanning principle

为  $\Phi_B$ , 同时记  $Z$  向 PI-Foc 的位移值为  $D_B$ 。

假设  $A, B$  高度差精确值为  $H_{AB}$ , 则应有

$$H_{AB} = \frac{\Phi_A - \Phi_B + 2k\pi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} + \zeta, \quad (1)$$

$$H_{AB} = D_A - D_B + \epsilon, \quad (2)$$

其中  $\zeta$  为相位测量误差对应的高度值,  $\epsilon$  为共焦系统高度定位的误差值,  $\lambda$  为 He-Ne 激光器波长,  $k$  为  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  中的某个整数值, 且有

$$-\frac{\epsilon_{\max}}{2} < \epsilon < \frac{\epsilon_{\max}}{2}, \quad (3)$$

$$-\frac{\zeta_{\max}}{2} < \zeta < \frac{\zeta_{\max}}{2}. \quad (4)$$

对于双频干涉共焦显微系统, 采用的针孔直径为  $20 \mu\text{m}$ , 物镜为  $20\times$  数值孔径为  $0.40$  焦距为  $180 \text{ mm}$  的无限筒长显微物镜, 则共焦系统  $Z$  向分辨力为  $80 \text{ nm}$ , 而带动显微物镜做  $Z$  向扫描的 PI-Foc, 其分辨力为  $1 \text{ nm}$ ,  $Z$  向扫描采用的步长为  $50 \text{ nm}$ , 由此可知  $\epsilon$  的极限值为  $\pm 80 \text{ nm}$  (这是理论上的极限偏差)。双频干涉共焦显微系统相位测量部分相位分辨率为相位  $0.1^\circ$ , 由此  $\zeta$  的极限值为  $\pm \lambda/7200$ 。

如图 3 所示, 设存在整数  $K$ , 满足

$$-\frac{\epsilon_{\max}}{2} < \left[ \frac{\Phi_A - \Phi_B + 2K\pi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} - (D_A - D_B) \right] < \frac{\epsilon_{\max}}{2}, \quad (5)$$

则对于任意小于  $K$  的整数  $N$  和任意大于  $K$  的整数  $M$  必然有

$$\left[ \frac{\Phi_A - \Phi_B + 2N\pi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} - (D_A - D_B) \right] < -\frac{\epsilon_{\max}}{2}, \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_{\max}}{2} < \left[ \frac{\Phi_A - \Phi_B + 2M\pi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} - (D_A - D_B) \right], \quad (7)$$

可以确定  $A, B$  两点的高度的测量值为

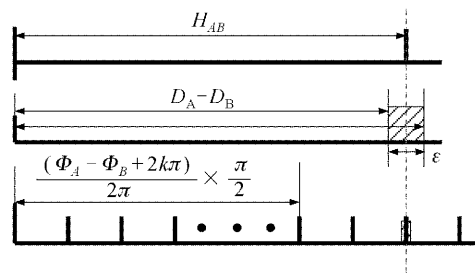


图 3 测量原理分析图

Fig. 3 Scheme of measurement principle analysis

$$H'_{AB} = \frac{\Phi_A - \Phi_B + 2K\pi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

从以上的分析进一步推论可知, 只要  $Z$  向扫描范围足够大并且扫描步长满足共焦系统光强分辨力的要求, 从理论上可知双频干涉共焦显微系统能够测量高度与  $Z$  向扫描范围相近的台阶, 即  $Z$  向扫描范围多大, 就可以测量高度约小于  $Z$  向扫描范围的台阶。对于双频干涉共焦显微系统而言, 其测量精度由精测实现, 精测的相位测量分辨力为  $0.1^\circ$  对应  $0.1 \text{ nm}$ , 即系统台阶高度测量分辨力约为  $0.1 \text{ nm}$ <sup>[9]</sup>。这就从理论上证明了双频干涉共焦显微系统能够实现台阶高度测量的大范围和高分辨力。

## 3 实验

### 3.1 实验装置

实验装置如图 4 所示, 虚线框中所示为双频干涉共焦显微系统的光路, 整个双频干涉共焦显微系统装在步进电机驱动的  $Z$  轴上。  $X, Y$  方向的大范围扫描量程为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 由步进电机驱动, 样品放置于德国 PI 公司生产的 P-731K037 型二维柔性铰链压电陶瓷微动台上, 该工作台行程为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ , 步进分辨力为  $1 \text{ nm}$ 。  $Z$  向精确定位由 PI 公司的 P-721 型 PI-Foc 实现, PI-Foc 的扫描行程为  $100 \mu\text{m}$ , 步进分辨力为  $1 \text{ nm}$ 。

### 3.2 系统稳定性与示值稳定性

系统稳定性是指当实验装置处于无人干预状态时, 系统测量值漂移的情况。 漂移量越大表明系统的稳定性越差, 反之就说明系统具有良好的稳定性。 双频干涉共焦显微系统在中国计量科学研究院恒温实验室的测量稳定性 (实验室恒温标称为  $20^\circ \pm 0.1^\circ$ ) 如图 5 所示, 在  $1 \text{ h}$  之内相位漂移约  $5^\circ$ , 对应  $4.4 \text{ nm}$ 。

系统的示值稳定性实际上表征的是系统在短时

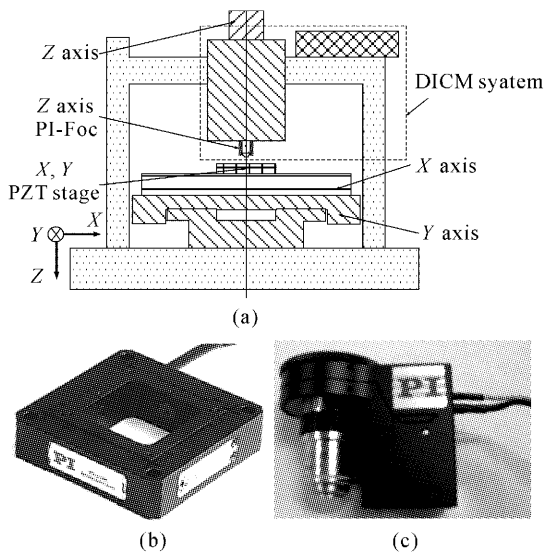


图 4 实验装置示意图

(a) 实验装置示意图; (b) P-731K037 两维压电陶瓷工作台; (c) PI-Foc 扫描仪

Fig. 4 Scheme of measurement assembly

(a) scheme of measurement assembly;

(b) 2D PZT table (P-731K037); (c) PI-Foc scanner

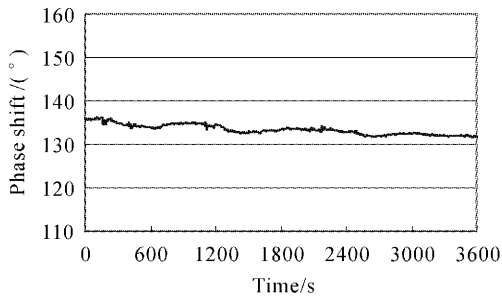


图 5 双频激光外差共焦显微系统稳定性实验结果(1°对应 0.9 nm)

Fig. 5 Stabilization measurement of DICM system (1 degree means 0.9 nm)

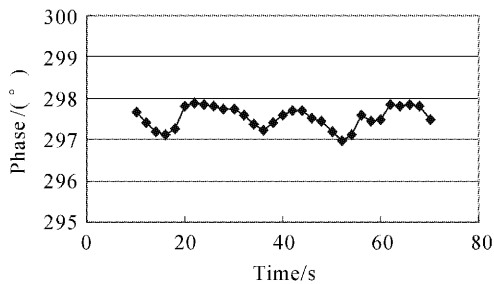


图 6 系统短时间示值稳定性实验结果(1°对应 0.9 nm)

Fig. 6 Indicating value stabilization of DICM system in short time (1 degree means 0.9 nm)

间的稳定性能。结果如图 6 所示,在短时间内相位变化量不超过 1°,对应 0.9 nm。

以上指标表明双频干涉共焦显微系统在较好的恒温条件下有良好的系统和示值稳定性,适用于微电子掩模板纳米测量。

### 3.3 大台阶测量

实验所测量的大台阶由两个量块搭成,在一个 80 mm×30 mm×10 mm 量块上利用分子间作用力粘一个 1.04 mm 量块(1.04±0.0002 mm),之后紧贴 1.04 mm 量块粘一个 1.02 mm 的量块(1.02±0.0002 mm),如图 7 所示,即为搭建的高度约为 20 μm 的台阶。

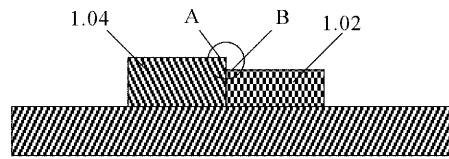


图 7 三个量块搭建的大台阶

Fig. 7 High Step built by three gauges

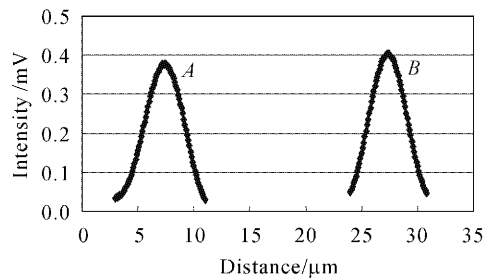


图 8 系统调节过程中 AB 两处系统的轴向响应曲线

Fig. 8 Intensity response curves at A and B

将图 7 所示的量块放置在压电陶瓷微动台上,调节待测表面处于显微物镜下方。把显微物镜出射光线对准量块的 A 部位,调节系统 Z 向步进电机,使得显微物镜的出射光线会聚于 A 部位,并且当 PI-Foc 带动显微物镜做 Z 向扫描时,系统共焦轴向响应曲线完整并且与理论曲线相吻合,而且外差干涉测量系统的信号幅度能够满足测量系统的要求;调节待测表面 B 部位处于显微物镜出射光线的正下方,此时物镜不能将光线会聚在 B 部位,微调 Z 向 PI-Foc 带动显微物镜使得光线会聚于 B 部位,确认此时系统共焦轴向响应曲线也能够完整并且与理论曲线相吻合,外差干涉测量系统的信号幅度也能满足测量系统的要求。在调节过程中,在 A, B 测量的系统轴向响应曲线如图 8 所示,表明系统调节完毕。

测量时先在 A 处进行 Z 向扫描,在共焦光强达到最大值处记录相位值  $\Phi_A$ ,重复测量 8 次,然后通过 X 向步进电机把显微镜移到 B 处,同样的方法测

量 8 次, 测量结果如表 1 所示。

表 1 大台阶测量结果  
Table 1 Measurement result of big step

No.	$\Phi_A$	$D_A$	$\Phi_B$	$D_B$
1	351.5	7.85	227.7	27.05
2	349.4	7.25	232.4	27.20
3	347.5	7.50	243.6	27.55
4	356.2	7.35	217.8	27.15
5	347.4	7.40	239.0	27.40
6	357.6	8.05	231.4	27.45
7	356.7	7.80	228.3	27.25
8	353.8	8.00	248.7	27.50
Average	352.5	7.65	233.6	27.32

由式(1)~(5)可确定  $K = 62$ , 由式(8)可确定

$$H'_{AB} = \frac{\Phi_A - \Phi_B + 2K\pi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} = 19.7213 \mu\text{m}. \quad (9)$$

从量块的标称尺寸可知量块的实际高度  $H_{AB} \in [19.6, 20.4] \mu\text{m}$ , 式(9)结果与量块高度差的实验值有很好的 consistency。

该方案的测量精度主要由精测来决定, 台阶测量的标准偏差为 9.4 nm。误差一部分来自系统的漂移, 因为样品是采用两个量块叠加构成的, 其表面的不平整将引起测量结果的偏差较大, 测量结果的平均值与量块高度差有很好的 consistency, 表明该实验方法正确, 测量结果可靠。

### 3.4 实验应用

某单位挤压成型的锥形器件, 为了避免表面划伤, 使用光切法、干涉显微镜进行测量该器件的粗糙度, 结果都不令人满意。使用本文介绍的方法测量的数据如图 9 所示, 轮廓最大高度  $R_y = 3.1 \mu\text{m}$ 。

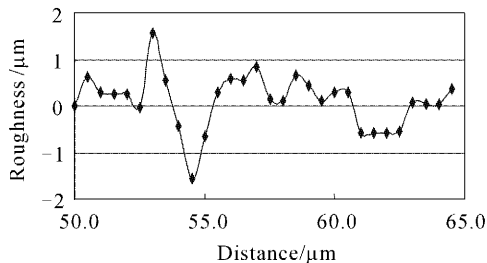


图 9 粗糙度测量结果

Fig. 9 Results of roughness measurement

## 4 结 论

微电子掩膜板台阶高度测量的对准方法测量台

阶高度的范围取决于 Z 向 PI-Foc 的扫描范围。实验结果表明该方法在普通恒温的实验条件下 1 h 内的漂移不超过 5 nm, 将该方法用于 20  $\mu\text{m}$  台阶的测量, 对准分辨力为 0.1 nm, 实验结果与台阶高度实际值有很好的 consistency。使用外差共焦扫描测量方法后双频干涉共焦显微系统可用于微电子掩膜板、机电系统(MEMS)等数十微米台阶高度的测量, 也可以用于标准量块的精度级别鉴定。

### 参 考 文 献

- 1 D. M. Gale, M. I. Pether, J. C. Dainty. Linnik microscope imaging of integrated circuit structures [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1):131~148
- 2 Mircea V. Dusa, Linard Karklin. Edge detection strategies for sub-0.5- $\mu\text{m}$  reticle metrology [J]. *Solid State Technology*, 1995, **9**:101~108
- 3 Gu Min. Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes [M]. Beijing: New Time Press, 2000  
顾敏. 共焦显微术的三维成像原理[M]. 北京: 新时代出版社, 2000
- 4 Yang Lisong, Wang Guiying, Wang Jiangang *et al.*. Research on confocal scanning imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(10):931~934  
杨莉松, 王桂英, 王建岗 等. 共焦扫描成像研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(10):931~934
- 5 Tang Zhilie, Liang Ruisheng, Zhu Xiaosong *et al.*. Image property of polarized confocal scanning microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8):1118~1122  
唐志列, 梁瑞生, 朱小松 等. 偏振共焦扫描激光显微镜的成像特性研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8):1118~1122
- 6 Wang Fusheng, Tan Jiubin. Optical focus detection system with nanometer resolution using differential confocal microscope [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3):232~234  
王富生, 谭久彬. 差动共焦式纳米级光聚焦探测系统的研究[J]. *光学技术*, 2001, **27**(3):232~234
- 7 Dai Gaoliang, Song Deqiang, Yin Chunyong *et al.*. Study on transverse Zeeman laser tube with subnanometric capability [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1998, **38**(11):65~78  
戴高良, 宋德强, 殷纯永 等. 用于亚纳米测量的横向塞曼激光器的研究[J]. *清华大学学报*, 1998, **38**(11):65~68
- 8 Dejiao Lin, Juqun Yan, Zhixia Chao *et al.*. Phasemeter with externally trigger applied for PZT-modulated interferometer [J]. *International J. Electron.*, 2002, **89**(10):759~769
- 9 Lin Dejiao, Liu Zhongyao, Zhang Rui *et al.*. System to measure step height by combining dual-frequency interferometry and confocal microscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):1015~1018  
林德教, 柳忠尧, 张蕊 等. 双频干涉共焦台阶高度测量系统[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):1015~1018
- 10 Lin Dejiao, Liu Zhongyao, Xu Yi *et al.*. A novel apparatus to measure the step height of the mask by means of non-contact method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(1):1~5  
林德教, 柳忠尧, 徐毅 等. 一种新型的非接触式掩膜板台阶高度测量仪[J]. *计量学报*, 2004, **25**(1):1~5