

PSD233 型位置敏感元件的特性 及其在 AFM 中的应用

张冬仙 章海军 林晓峰

(浙江大学光电系, 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江, 杭州, 310027)

摘要 给出了自制的 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 位置敏感元件(PSD)的光谱响应特性, 覆盖从紫外光、可见光到红外光($320 \sim 1150\text{nm}$)的广阔区域. 采用光束偏转法对其时间响应特性和位置敏感特性进行测定. 阐述了 PSD 在卧式原子力显微镜(AFM)系统中的应用, 介绍了卧式 AFM 的工作原理和控制系统, 提供了部分样品的 AFM 扫描图像. 结果表明, 该 AFM 系统具有较高的成像效率以及良好的工作稳定性、图像重复性和对比度, 系统的最大扫描范围为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$, 分辨率达到 1nm 量级, 表明 PSD 在光谱响应、时间响应和位置敏感特性等方面具有优良性能.

关键词 PSD, 光谱响应, AFM, 纳米技术.

CHARACTERISTICS OF PSD233 POSITION SENSITIVE DETECTOR AND ITS APPLICATION IN ATOMIC FORCE MICROSCOPE

ZHANG Dong-Xian ZHANG Hai-Jun LIN Xiao-Feng

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The spectral response of $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ position sensitive detector (PSD) covering a wide spectral range from 320nm to 1150nm . The beam deflection method was employed to determine the temporal response and position sensitive properties of the PSD. As an application of the PSD, we developed a horizontal atomic force microscope(AFM), introduced the basic concept and controlling system of the AFM, and presented some sample images scanned by the AFM. The results show that the horizontal AFM is an efficient system for image acquisition, which has an excellent repeatability, reliable stability and ideal image contrast. The maximum scan range is up to $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$, and the resolution of the AFM is at the nanometer scale. It is obvious that the new PSD is of outstanding characteristics of spectral response, temporal response and position sensitive property.

Key words PSD, spectral response, AFM, nanotechnology.

引言

位置敏感元件(Position Sensitive Detector, 简称 PSD)^[1-3]是一种对光敏面上入射光位置敏感的光电探测器, 即当入射光点落在器件光敏面的不同位置时, 相应地输出不同的光电流信号, 通过对输出信号的处理, 确定入射光点在器件光敏面上的位置. PSD 具有位置分辨率高、光谱响应范围宽(从可见光、红外光到微波)、响应速度快等主要特点. 此外, 位置信号与光斑大小、形状及焦点无关, 仅与入射光

斑的光通量密度分布的重心位置有关; 受光面内无盲区, 可同时测量位移及光功率; 测量的位置信号连续变化, 没有突变点, 故能获得目标位置连续变化的信号, 可达到极高的位置分辨准确度; 使用中不需要扫描系统, 极大地简化了外围电路. 目前, PSD 已广泛应用于自动控制、聚焦、对准、定位、跟踪以及测量物体的位移及运动轨迹等方面. 近年来, 以扫描隧道显微镜(STM)^[4-5]与原子力显微镜(AFM)^[6-7]为代表的扫描探针显微镜技术, 已成为纳米技术飞速发展的重要基础. 其中又以 AFM 的应用领域更为广

泛,而 AFM 的关键元件之一即为 PSD 器件. 尽管进口的 AFM 性能已日趋完善,但仪器的昂贵价格和严格的操作要求,使其难以推广应用,从而在很大程度上制约了我国纳米科技的发展与普及,为此迫切需要将 AFM 国产化. 近年来,本系致力于 PSD 器件的研发,已实现一维和二维 PSD 的小批量生产. 作为 PSD 器件的一个重要应用例子,我们用自制的 PSD 替代进口产品,成功研制了新型卧式 AFM 系统,已在国内科研院所的物理学、化学、材料学、生物学、微电子学、微型机械和光电子学等领域广泛应用. 本文介绍和测定了本系研制的 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 二维 PSD(简称 PSD233)的主要特性,并简要介绍了基于自制 PSD 的 AFM 系统的工作原理、控制系统及性能指标,给出了部分样品的扫描图像结果. 据此验证了该型 PSD 元件的优良特性.

1 原理与方法

PSD 的基本结构类似于光电二极管,但是它的工作原理与光电二极管不同,光电二极管基于 p-n 结或肖特基结的光生伏特效应,而 PSD 基于 p-n 结或肖特基结的横向光电效应,它不仅是光电转换器,更重要的是光电流的分配器.

PSD233 为单面分流四边形电极结构,如图 1(a)所示,光敏面的四周是 4 条直线形状且各自独立的铝电极①~④,背面有一公共电极⑤,工作时在公共电极加上反偏电压. 图 1(b)为该型 PSD 的断面结构示意图,共有 3 层构成,上面为 P 层,下面为 N 层,中间插入一较厚的高阻 I 层,它们全被制作在同一硅片上,P 层不仅作为光敏层,而且还是一个均匀的电阻层. 此 P-I-N 结构的特点是 I 层耗尽区宽,结电容小,光生载流子几乎全部都在 I 层耗尽区中产生,没有扩散分量的光电流,因此响应速度比普通

pn 结光电二极管要快得多.

当入射光照射到 PSD 的光敏层上,在入射位置上就产生了与光能成比例的电荷,在电荷作为光电流通过电阻层(P 层)由电极输出. 由于 P 层电阻是均匀的所以由电极①和电极②输出的电流分别与光点到各电极的距离(电阻值)成反比,若以 PSD 的中心点作为原点,则有

$$I_x = I_0 \frac{L-x}{2L}, \quad (1)$$

$$I_{x'} = I_0 \frac{L+x}{2L}, \quad (2)$$

$$x = \frac{I_{x'} - I_x L}{I_{x'} + I_x}. \quad (3)$$

只要检测出①、②两极的电流大小,即可根据式(3)计算出光点在 X 方向的位置. 同理光点在 Y 方向的位置可由式(4)计算得到,由此确定光点在光敏面上的位置.

$$y = \frac{I_{y'} - I_y L}{I_{y'} + I_y}. \quad (4)$$

PSD233 的主要性能已达到国际上同类产品的先进水平. 图 2 给出了在日本滨松公司测试所得的该型 PSD 的光谱响应曲线^[8],峰值波长在 $850 \sim 860\text{nm}$ 之间,光谱响应范围覆盖从紫外 320nm 到红外 1150nm 的广阔区域,丝毫不逊于日本滨松公司生产的同类型号 PSD^[9]. 应该指出,虽然 PSD 的光谱响应峰值在红外区,但因其响应范围较宽,为了光路调节和仪器操作方便,在 AFM 系统中选用了波长为 650nm (红光)、功率 10mW 的半导体激光器作为光源,同样获得了理想的结果.

PSD233 其他的主要性能指标,也与日本滨松公司生产的同类型号 PSD^[9]、S1743、S1200、S1869 的主要性能接近(如表 1 所示).

从国外进口的某些 AFM 系统,扫描采集一幅样

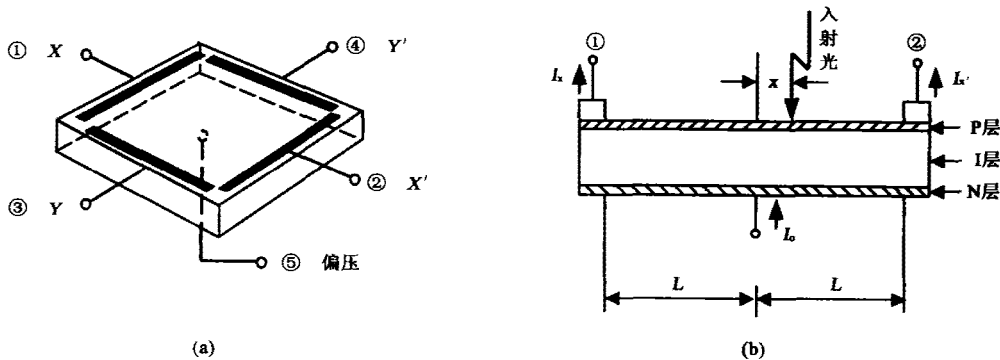


图 1 PSD233 的示意图:(a)结构示意图(b)断面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of PSD233:(a) structure (b) section

表1 PSD233 和 S1743、S1200、S1869 的主要性能
Table 1 Main features of PSD233 and S1743, S1200, S1869

型号	峰值响应度 (A/W)	位置测量误差 (μm)	位置分辨率 (μm)	暗电流 I_d $V_r=5\text{V}$ (nA)	极间电阻 (K Ω)
PSD233	0.5	$\pm 50 \sim \pm 400$	5	10	6
S1743	0.6	$\pm 50 \sim \pm 100$	3	10	10
S1200	0.6	$\pm 150 \sim \pm 300$	10	500	10
S1869	0.6	$\pm 300 \sim \pm 600$	20	1000	10

品图像需要 8 ~ 10min 时间,在此过程中,周围环境的电干扰、光干扰以及振动、温度变化等因素,都将直接影响到图像的准确性和完整性,为此需要提高仪器的扫描效率.本文研制的 AFM 系统,设定扫描完成一幅 400×400 像素的图像仅需 10s,因此,PSD 的时间响应速度必须大于 16kHz.采用光束偏转法^[10]检验了 PSD 的时间响应特性(如图 3 所示),基于这一方法建立的检测系统,实际就是 AFM 的核心部分.实验中由信号发生器产生一个 20kHz 的正弦波电压信号,经放大后驱动压电陶瓷,后者推动微悬臂产生纳米级振动.反射臂将此振动放大后,由 PSD 元件接收振动信号,经放大处理后输出振动波形.用示波器观察比较驱动信号和 PSD 检测到的振动信号 2 种波形,如果后者失真,则说明基于 PSD 的光束偏转法检测系统来不及响应;反之,则说明 PSD 的时间响应特性可满足 AFM 的要求.图 4 给出了示波器记录的输入和输出波形,可见 2 种波形的频率完全一致.输出正弦波形的锐化是由于压电陶瓷的响应造成的,但其振幅并不存在失真.这一结果表明,该型 PSD 的时间频率响应至少大于 20kHz,即完全满足 AFM 高扫描效率的要求.

另外,在图 3 所示的光束偏转法系统中,微悬臂有效长度为 $100\mu\text{m}$,光反射臂有效长度为 10cm,由此构成的光杠杆放大比约为 2000 倍.而由日本滨松公司测得的 PSD233 的位置分辨率可达 $3 \sim 5\mu\text{m}$,因

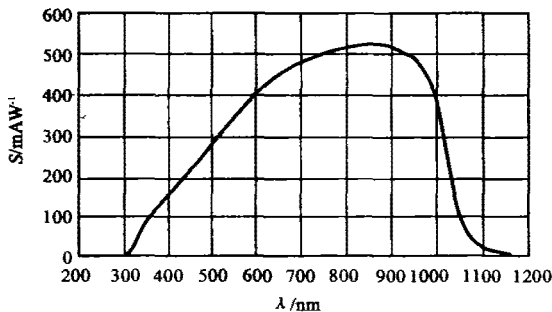


图2 PSD233 的光谱响应曲线,响应范围:320 ~ 1150nm;峰值波长:850 ~ 860nm

Fig. 2 Spectral response curve of PSD233, spectral range: 320 ~ 1150nm; peak sensitivity wavelength: 850 ~ 860nm

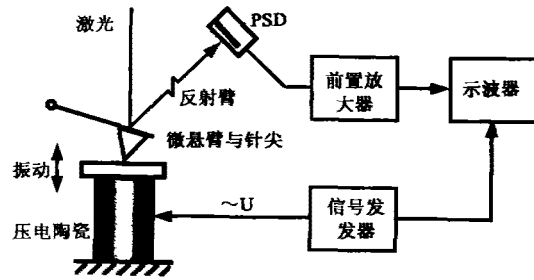


图3 PSD233 时间响应的光束偏转法示意图
Fig. 3 Beam deflection method used to measure the temporal response of PSD233

此,通过微悬臂(微探针)扫描并由 PSD 检测得到的 AFM 图像的分辨率可达 1nm 量级.图 4 所示的输出波形的幅值也验证了这一点,已知陶瓷管的电压伸缩系数约为 5nm/V,实验中所施加的电压幅值为 2V,输出波形所代表的幅值应为 10nm 左右,这进一步说明,基于 PSD233 的 AFM 系统完全可达到纳米级的分辨率.

2 仪器

根据 PSD233 的位置分辨率、光谱响应范围以及响应速度等特性,采用它作为光电接收元件建立了卧式 AFM 系统.将立式 AFM 改为卧式设计,主要是为了消除微悬臂自身的重力对纵向原子力的干扰,避免其对微悬臂偏转灵敏度和偏转量的影响.在卧式 AFM 中,重力方向与用于成像的原子力相互垂直,从而提高了仪器的灵敏度.卧式 AFM 的系统框图如图 5 所示.样品相对于探针的横向扫描,由计算机通过 D/A 接口控制扫描电路实现.在扫描过程中,为使探针与样品保持一定的纵向间距,引入了比例-积分-微分(PID)反馈控制电路系统. XYZ 扫描控制器由 3 根互相垂直的管状压电陶瓷与样品台构成,其稳定性和强度使之适合对不同大小与重量的样品扫描成像.在等高模式下,当样品扫描时,作用于针尖上的原子力随样品表面的起伏而变化,检测 PSD 输出光电流的大小,即可推知微悬臂偏转量(对应于原子力)的大小,最终获得样品表面的三维微观形貌;在恒力模式时,利用反馈系统使探针-样品间距保持恒定,即原子力大小恒定,检测 Z 向压电陶瓷的控制电压变化,同样可获得样品的形貌图像. AFM 的计算机软硬件系统在此不作详述.

3 实验结果

为了检验 PSD233 的主要特性,考察卧式 AFM

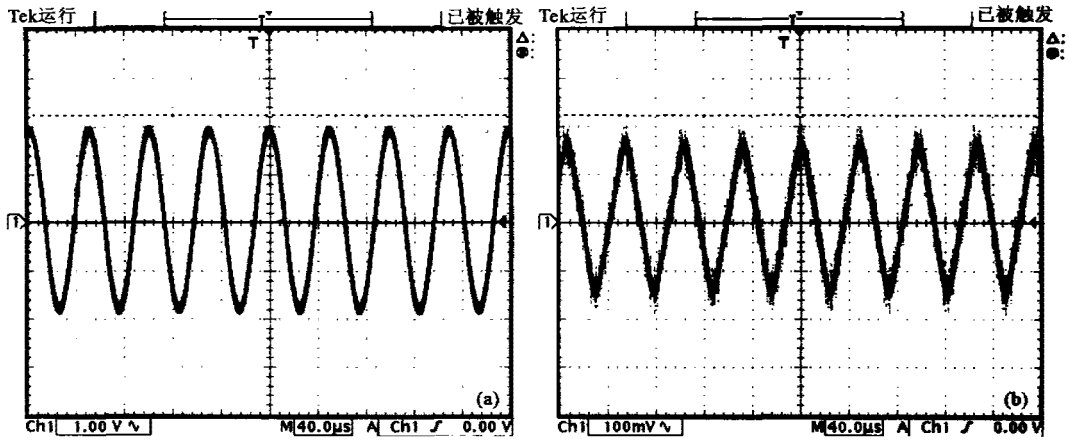


图 4 PSD233 的时间响应特性,频率 20kHz: (a)输入电压波形(b)输出电压波形
 Fig. 4 Temporal response characteristic of PSD233. Frequency, 20kHz (a) input voltage (b) output voltage

系统的分辨率、扫描范围、以及图像清晰度、重复性、对比度等相关性能,对不同样品进行了大量的实验测试. 实验中采用“V”字型微悬臂,其有效长度分别为 $100\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$,所有实验均在室温和大气条件下进行. 图 6 所示为利用卧式 AFM 扫描获得的多孔氧化铝膜的纳米结构图像,包含 400×400 个像素点,扫描电压 120V ,范围 $1.2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$,扫描时间 10s . 图像清晰地展示了氧化铝的多孔结构,总体上呈规则的六边形分布,孔径在 $40\text{nm} \sim 50\text{nm}$ 之间;图 7 为纳米铜膜表面结构的 AFM 图像,分布有不同大小和高度的纳米颗粒,粒径从数纳米至数十纳米不等. 这些实例说明,该 AFM 系统具有良好的图像对比度、清晰度及可靠性,成像效率高,适用范围广,分辨率达到纳米级. 此外,高压控制电路系统所能提供的最高扫描电压为 500V ,约对应于 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 的最大扫描范围.

先后投入研发力量开发了一系列的一维和二维 PSD 以及相应的外部处理电路,占据了 PSD 的绝大部分市场. 国内对 PSD 器件的研发起步不久,但已取得较大进展. 性能测试实验表明,本系研制的 PSD233 元件的位置分辨率、光谱响应范围、响应速度等主要性能均已达到同类产品的先进水平. 而基于该型 PSD 元件研制的卧式 AFM 系统,显示了良好的图像重复性、稳定性和对比度,仪器扫描效率高,分辨率达到 1nm 量级,最大扫描范围 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$. 另一方面,虽然 PSD 的光谱响应峰值波长在 $850 \sim 860\text{nm}$ 的红外区,但 AFM 系统采用波长 650nm 的半导体激光器作为光源,同样获得了理想的效果. 这些都进一步验证了自制 PSD 元件所具有的优良性能.

4 结论

随着 PSD 元件的应用领域日益广泛,对 PSD 的需求量越来越大. 日本、美国、瑞典的一些公司

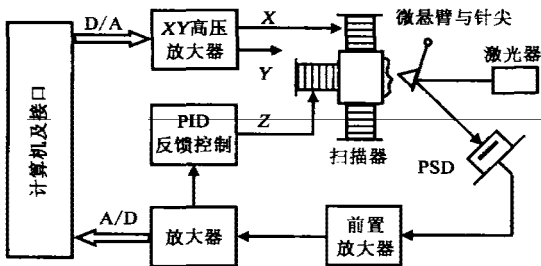


图 5 卧式 AFM 的系统框图
 Fig. 5 Schematic diagram of the horizontal AFM system

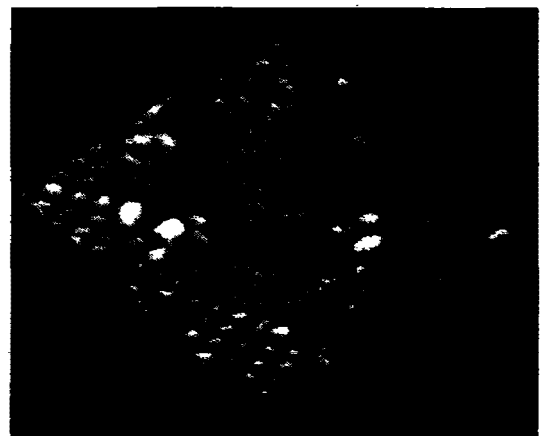


图 6 多孔氧化铝表面的 AFM 图像,扫描范围 $1.2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$
 Fig. 6 AFM image of the surface of porous alumina, $1.2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$ scan

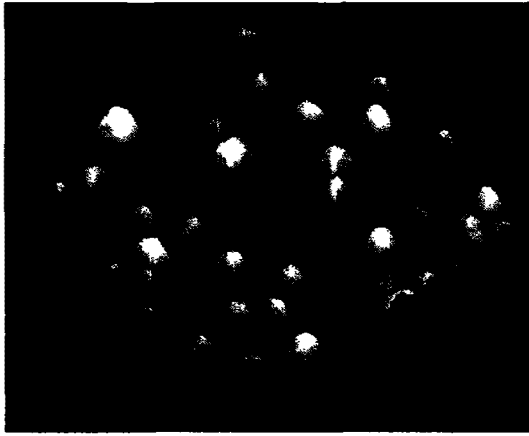


图7 铜膜表面的 AFM 图像,扫描范围 $1.2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$

Fig. 7 AFM image of the surface of copper film, $1.2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$ scan

致谢 感谢浙江大学光电系国家光学仪器工程技术研究中心在器件及研究测试工作中提供的支持和帮助。

REFERENCES

[1] MIAO Jia-Ding, XU Wen-Juan, MU Tong-Sheng. *Photoelectric Technology*. Hangzhou: Zhejiang University Press (缪家鼎,徐文娟,牟同升. 光电技术. 杭州:浙江大学出版社), 1995: 150—155

- [2] Yamamoto K, Yamaguchi S, Terada Y. New structure of two-dimensional position sensitive semiconductor detector and application. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 1985, NS-32(1): 438—442
- [3] ZHANG Guang-Jun. The PSD element and its application in accurate measurements. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*(张广军. PSD 器件及其在精密测量中的应用. 北京航空航天大学学报), 1997, 20(3): 259—262
- [4] Binnig G, Rohrer H. Scanning tunneling microscope. *Helev Phys Acta*, 1982, 55(4): 726—729
- [5] BAI Chun-Li. *Technology of Scanning Tunneling Microscopy and its Application*. Shanghai: Science&Technology Press (白春礼. 扫描隧道显微镜及其应用. 上海:上海科学技术出版社), 1991: 91—129
- [6] Binnig G, Quate C F. Atomic force microscope. *Phys Rev Lett.*, 1986, 56(5): 930—935
- [7] BAI Chun-Li, TIAN Fang, LUO Ke. *Technology of Scanning Force Microscopy*. Beijing: Science Press (白春礼,田芳,罗克. 扫描力显微术. 北京:科学出版社), 2000: 138—150
- [8] GUO Fu-Yuan, HUANG Mei-Zhen, CHEN Yu-Qing. Characteristic test and analysis of the tetra-lateral electrode frame position sensitive detector. *Laser & Infrared*(郭福源,黄梅珍,陈钰清. 四边形电极结构 PSD 的特性测试与分析. 激光与红外), 2002, 32(5): 342—344
- [9] Hamamatsu Photonics K K. Catalog of Hamamatsu Si PSDs. *Cat. No. KPSD1003E04*, 1997, 6: 3—5
- [10] Putman C A, Grooth B G, Hulst N F, *et al.* A theoretical comparison between interferometric and optical beam deflection technique for the measurement of cantilever displacement in AFM. *Ultra-microscopy*, 1992, 42: 1509—1513