

500 MHz 反射式机械扫描声学显微镜 的研究和试制

陈戈林 胡思正 罗淑云 张克潜
(清 华 大 学)

1985年7月17日收到

摘要 本文叙述了 500MHz 反射式机械扫描声学显微镜的研究试制工作。介绍了显微镜的基本结构,分析和讨论了声透镜的分辨率和显微镜的实际分辨能力。测试结果证明该显微镜的分辨率已达 $2\mu\text{m}$ 。文章最后给出一些样品的声学图像和声学特征曲线。结果说明它具有独特功能和广泛的应用前景。

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A REFLECTION SCANNING ACOUSTIC MICROSCOPE OPERATING AT 500 MHz

CHEN GE-LIN HU SI-ZHENG LUO SHU-YUN ZHANG KE-QIAN
(Tsinghua University)

Received July 17, 1985

Abstract The research and development of a reflection scanning acoustic microscope operating at 500 MHz is described. The design and construction of the microscope, the acoustic transducer-focusing system, the mechanical component, the microwave and electronic system are presented. The resolution of the acoustic lens and practical ability of SAM are discussed. Experimental results show that resolution of the microscope is not worse than $2\mu\text{m}$. Finally, images and $V(Z)$ curves of some specimens obtained by using the SAM are given. It exhibits some specific performance.

一、引 言

声学显微镜是近年发展很快的一种新型显微装置。它可以得到物质表层、亚表层及内部深层结构信息。它问世后,在材料、微电子学、生物医学科学等方面得到应用,迅速发展^[1]。

目前声显微镜有三种类型^[2-4],我们研制的是用聚焦声波照射试样,用声电系统检测信息的声显微镜,通常简称为 SAM。声学显微镜和光学显微镜的成象机制不同,各自反映了物质的声学 and 光学特性。

SAM 有透射和反射两种类型。我们于 1983 年研制了一台透射式 SAM^[5]。现在又研制成功一台 500MHz 反射式 SAM。该显微镜的分辨率为 $2\mu\text{m}$,用于观测集成电路、金属材料、

光纤元件等样品,获得初步成果.

二、结构与 设计

1. 声显微镜的组成

我们研制的 THSAM-2 型 500MHz 反射式扫描声显微镜原理图如图 1 所示. 它由电路、声路和机械装置组成. 实物照片如图 2.

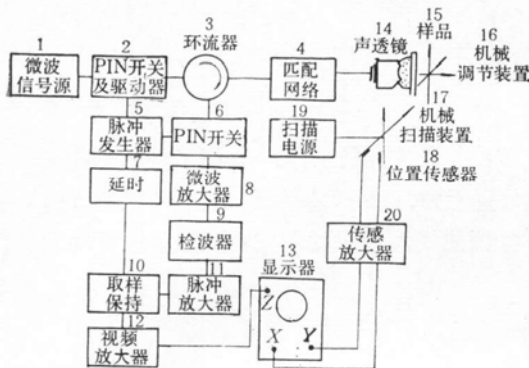


图 1 THSAM-2 型声学显微镜原理图

Block diagram of THSAM-2 SAM

- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. RF oscillator, | 2. PIN switch, |
| 3. Circulator, | 4. Matching network, |
| 5. Pulse generator, | 6. PIN switch, |
| 7. Delay, | 8. AMP, |
| 9. Detector, | 10. Sample and hold, |
| 11. AMP, | 12. AMP, |
| 13. Display, | 14. Lens, |
| 15. Object, | 16. Adjustment, |
| 17. Mechanical scan, | 18. Position sensor, |
| 19. Electronic driver, | 20. AMP. |

2. 声学系统

声学系统是显微镜的核心部件. 它包括声电换能器、声聚焦元件和声电匹配元件.

我们选用典型的 ZnO 体波换能器. 换能器的输入阻抗为^[6]

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} + Z_a(\omega) \quad (1)$$

$Z(\omega)$ 的实部常约 $1-3\Omega$, 和同轴传输线阻抗严重失配. 换能器的引线部分还有不均匀性. 若不进行电匹配会形成严重反射. 这不仅使声透镜两路插入损耗增加近 20dB, 还会增大微波开关在关闭期泄漏对有用信号的干扰. 为此, 选用最优化阻抗变换器来实现宽带阻抗匹配. 声显微镜选用两种声聚焦系统. 一种是蓝宝石单凹球面声透镜. 蓝宝石柱长约 10mm, 凹球面曲率半径约 0.25mm, 半张角约 50° . 另一种是玻璃金属球面换能器结构^[7]. 在声透镜凹球面上敷有一层声学增透膜来减小声阻抗不匹配的影响.

3. 微波系统和电路

(1) 微波系统. 信号源输出连续微波信号, 经 PIN 调制器形成脉冲调制微波信号. 为使

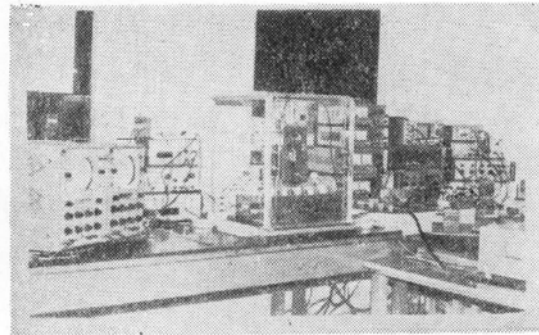


图 2 THSAM-2 型声显微镜照片

General view of the THSAM-2

脉冲宽度为 15—30ns 和关闭期隔离度优于 90dB, 调制器需配置合适的驱动器。接收系统中微波放大链的总增益大于 80dB, 前置级的噪声系数优于 3dB。

(2) 低频电路和显示系统。微波信号检波后, 经脉冲放大器、取样保持及差分放大器, 分送两台示波器。一台示波器显示声透镜行扫描时反射声讯号幅值。差分放大信号对另一台显示器进行亮度调制, 得到样品的声学图像。

(3) 机械扫描驱动电源和传感器。机械扫描用市电驱动。量度声透镜机械扫描的位置传感器精度要高, 否则会使图形畸变。

(4) 机械装置。为获得清晰图像, 要求样品表面和声束轴线垂直, 及样品表面能在声透镜焦平面附近作微米级的位置调整。我们制作的电控微位移装置可达到此要求。声透镜和样品间的相对运动由声透镜扫描实现。声透镜行扫频率为 50Hz, 帧扫描频率为 0.1Hz。行扫、帧扫幅值为 0.3—1mm。

三、成像原理

1. 成像方程和声透镜分辨率

反射式声显微镜的成像方程为^[8]

$$U_d\left(\frac{x_d}{M}, \frac{y_d}{M}\right) = \iint_S h(x_0, y_0) R(x_s - x_0, y_s - y_0) dx_0 dy_0 \quad (2)$$

式中 h 是成像系统的点扩散函数, 取决于声透镜结构和工作频率。由 h 可以算出声透镜的理论分辨率, 一般在 $0.6-0.8\lambda$ 之间^[9]。 R 是样品的反射系数。

2. 样品材料的声学特征曲线 $V(Z)$ 和图像灰度

由 (2) 式可知, 样品各点声学图像的灰度取决于声透镜及各点的反射系数。样品各点声学像的反差是由样品各点 R 不同形成的。样品表面反射信号一般由两部分组成。一部分是入射纵波直接反射回的, 另一部分是入射声波在样品表面激励起泄漏表面波形成的。使用大孔径角声透镜时, 后一分量影响较大。通常, 当样品表面位于声透镜焦平面时, 不同材料样品的反射信号不同。当样品表面偏离声透镜焦面时 (特别是样品和声透镜距离小于焦距时) 不同材料样品的反响差别可能更大。圆对称型声透镜, 反射信号与声透镜焦面和样品表面距离 Z 的关系为^[9]

$$V(Z) = 2\pi \int_0^{R_{10}} P^2(r) R(r/F) \exp(-jk_0 Z r^2/F) r dr \quad (3)$$

式中 $P(r)$ 是声透镜广义声瞳函数。

样品反射信号和 Z 的关系常称为样品材料的声学特征曲线。声透镜不同, 一种材料的 $V(Z)$ 曲线不同。同一声透镜, 不同材料的 $V(Z)$ 曲线不同; 甚至一种晶体不同取向的 $V(Z)$ 曲线也不同。当把反射信号送去调制显示器亮度, 不同材料样品就有不同灰度的图像。

3. 声显微镜的实际分辨率

一台成像装置的实际分辨率总是从它得到图像的精细程度来判断的。而图像的不同部分仅可用颜色不同或灰度差别来区别。因此, 影响声显微镜实际分辨率的因素有三。1. 声透镜的声斑尺寸——声透镜理论分辨率; 2. 试样不同区的 $V(Z)$ 曲线的差别; 3. 成像系统中信

号处理装置特性。

人们已熟知,扫描型衍射限制成像系统中,衍射声斑尺寸决定系统分辨率。但图像精细程度(即实际分辨率)首先取决于成像系统能否形成有反差的图像,其次才是图像精细程度。有的成像系统(如普通光学显微镜)上述两个因素无直接关系。而声显微镜中,这两个因素关系密切。只有样品各部分的 $V(Z)$ 曲线显著不同, SAM 才能得到有反差的图像,观察到样品结构细节。许多常用材料的 $V(Z)$ 曲线在 $Z = 0$ 区都很相近,仅在 $Z < 0$ 时才有明显差别。因此,用 SAM 观察样品时,要调整 Z 值,才能得到反差很强的图像。不同样品,最佳 Z 值不同。

当 $Z < 0$ 时,照射到样品表面的声斑比焦点处声斑尺寸大。因而实际分辨率可能低于声透镜理论分辨率。在 SAM 中,由样品反射回声波经换能器变成电信号,经过处理在 CRT 上显示。这样,我们可以利用信号处理技术(如图像增强等)增强反差提高图像精度。

总而言之, SAM 成像系统有较大的灵活性和潜力。充分利用它的优点,可以得到别的方法难于得到的高反差,高精度图像,甚至超衍射极限分辨率的图像也是可能的。

四、一些材料的声学特征曲线

材料的 $V(Z)$ 曲线是声显微成像的基础,用它还可以定量研究材料表层、亚表层状态。

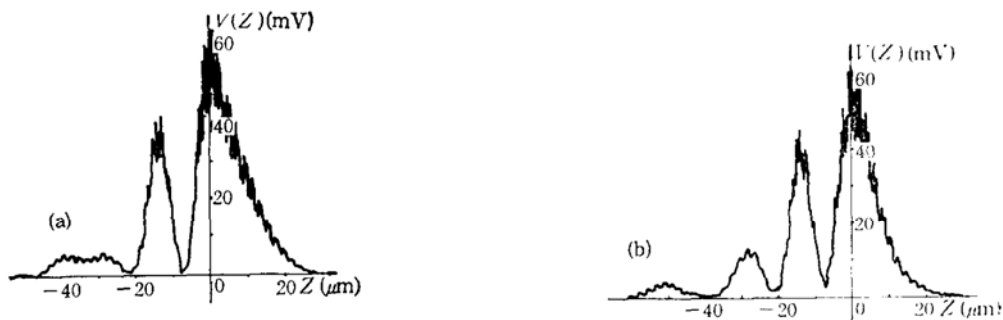


图 3 Z 切割蓝宝石(a)熔融石英(b)的 $V(Z)$ 曲线

$V(Z)$ for Z-cut sapphire (a) and fused quartz

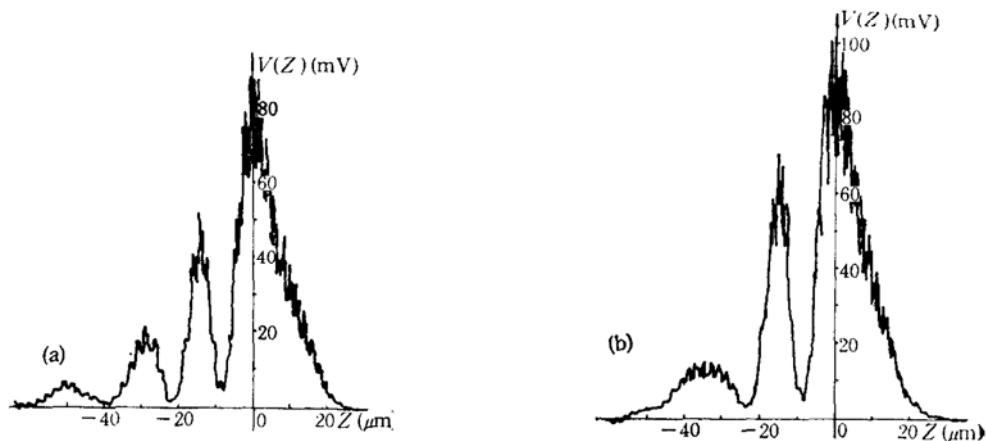


图 4 Y(a)、Z(b) 切割铌酸锂单晶的 $V(Z)$ 曲线

$V(Z)$ for Z-cut (a) and Y-cut(b) LiNbO_3

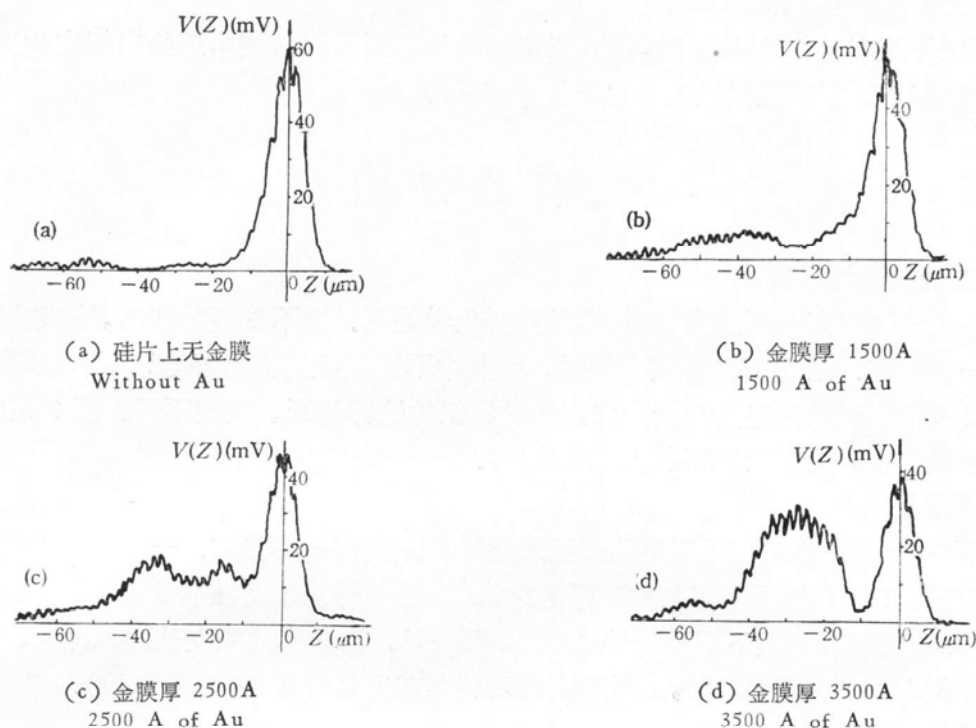


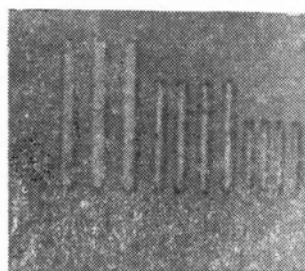
图5 硅片([100])上覆金膜的 $V(Z)$ 曲线
 $V(Z)$ for silicon ([100]) with different gold film

把 $V(Z)$ 曲线用于定量分析时,对设备的稳定性、动态范围等有更严格的要求。在测量 $V(Z)$ 曲线时, SAM 的视频放大信号送到 X-Y 记录仪的 Y 轴放大器,声透镜焦面和样品表面距离 Z 和记录仪的 X 轴位置同步。下面列举一些用球面换能器测得的结果。样品包括 Z 切割蓝宝石、熔融石英、不同取向铈酸锂单晶和覆有不同厚度金膜的硅片。

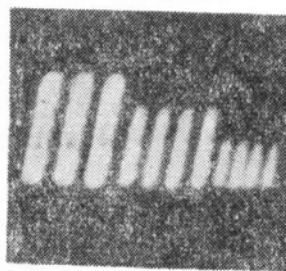
由上可知, $V(Z)$ 曲线反映材料表层和亚表层特性。可定量测试膜厚、分析材料成份、晶体定向。其优点是无损和可以逐点进行微区测试。检测点的线度在 $2-5\mu\text{m}$ 范围。

五、声显微镜分辨率测试

用我校微电子所制作的一种分辨率试验片硅片来测试 SAM 的分辨率。上有三组平行铝



(a) 光学像 ($\times 500$)
Optical



(b) 声学像 (368MHz)
Acoustical

图6 分辨率试验片图像
Image of resolution test

线条, 线条宽度分别是 2、3、4 μm 。

SAM 工作频率为 368MHz 时, 得到三组线条的清晰图象。图中还给出相应的光学照片。这说明 THSAM-2 型声显微镜的分辨率优于 2 μm 。

六、样 品 观 察

1. 金属金相结构观察

用光学显微镜观察金属的金相时, 样品需要化学处理。这不仅耗时费事, 处理过程也会使结构发生一些变化。用 SAM 观察金相时, 金属中不同组织结构的 $V(Z)$ 曲线不同。样品无需腐蚀就可得到明显反差的金相图像。各种组织的边界清晰、灰度不同。图 7 列出未腐蚀不锈钢和球墨铸铁的光学像和声学像(图版 I)。

2. 亚表层结构观察

SAM 的一个重要功能是可观察物质亚表层结构。观察一块硅片。一部分扩磷后, 蒸上一层 0.5 μm 铝膜。SAM 仍可观察到扩磷区的结构(图版 I-8)。未腐蚀不锈钢表面覆上 2 μm 钨钼膜后, SAM 仍可观察膜下不锈钢的金相(图版 I-9)。光盘膜沉积在玻璃基片上, 表面有些缺陷。当 SAM 调到 $Z < 0$ 时, 可观察到亚表层存在的某些缺陷(图版 I-10)。

3. 集成电路检测

SAM 可以观察集成电路多层结构、表面高低不平和电路中的缺陷(见图 11)。

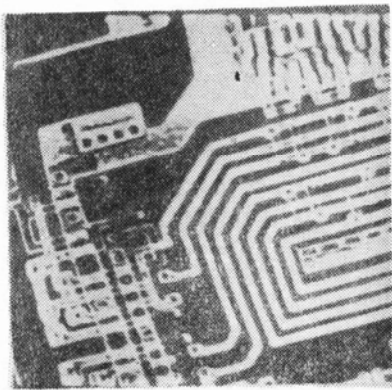


图 11 集成电路的声学像
Image for IC

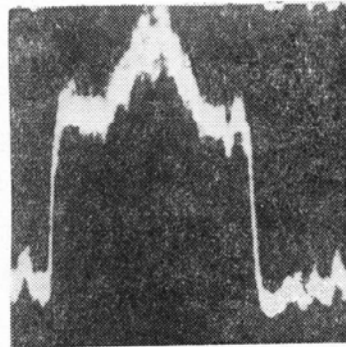


图 12 光纤耦合器折射率分布曲线
Refraction index distribution for a fibre coupler

4. 光纤折射率分布的直接观察

SAM 可以从亮度调制电压波形, 直接观察光纤包层及芯区折射率分布。我们还观察了一个光纤耦合器不同位置折射率的分布(见图 12)。这对分析耦合器特性、研制光纤及集成光学器件十分有益。

七、结 束 语

经过两年多的工作, 我们研制成功了 THSAM-2 型 500MHz 反射式声学显微镜。工作频率范围在 350—550MHz, 分辨率不低于 2 μm , 具有较强的材料微区表层、亚表层结构的观

察和分析能力。它能观察到未腐蚀金属样品的金相,光学材料的折射率、材料改性等。可观察亚表层的组织结构、缺陷。特别是通过材料声学特征曲线的研究,使 SAM 成为无损定量分析微区材料表层、亚表层特性的有用工具。它可以测定膜厚、判断晶体取向、分析材料改性、光学折射率等。这些事实说明声显微镜是一种很有前途的观察分析手段。

在工作过程中得到北京市半导体器件三厂,本校微电子所、材料研究所、我系有关教研组的支持和帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Lemons, R. A. and Quate, C. F., *Physical Acoustics*, XIV (Academic Press, New York, 1979), 1—92.
- [2] Wong, Y. H. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 538—540.
- [3] Kessler, L. W. and Yuhas, D. E., *Proc. IEEE*, **67** (1979), 526—535.
- [4] Lemons, R. A. and Quate, C. F., 1973 *Ultrasonics Symp. Proc. IEEE*, 18—21.
- [5] 陈戈林等, 应用科学学报, **2**(1984), 310—321.
- [6] Reeder, T. M. and Winslow, D. K., *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-17** (1969), 927—942.
- [7] 李德杰等, 应用科学学报, **2**(1984), 322—330.
- [8] Wickramasinghe, H. K., *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 664—672.
- [9] Quate, C. F. et al., *Proc. IEEE*, **67**(1979), 1079—1114.