

反射式超声显微镜的V(Z)技术

孙承平

(上海876研究所)

超声显微镜自1973年问世以来,随着工作频率的提高,分辨率不断得到改善。如3千兆赫的声透镜,耦合液为水的情况,分辨率达0.34微米,可与光学显微镜相提并论。尤其对不透明或反射差的材料,超声显微镜更有独到之处。八十年代大规模集成电路工艺和微处理器技术的发展和普遍应用,促进超声显微镜不仅能高分辨率成像而且由定性转为定量,成为高精度分析和无损检测的多功能精密仪器设备。其中,多年来逐渐形成的一种测量方法—V(Z)技术对超声显微镜的开发与研究有重要作用。

V(Z)技术专指反射式超声显微镜。其结构大致分下列几部分:

1. 压电换能器和扫描器—换能器由溅射的氧化锌(ZnO)薄膜、上下两面蒸镀金膜电极组成。它一方面作为发射器,将外加的射频脉冲转换成沿薄膜法向传播的平面声波;另一方面又作为接收器,将从样品表面反射回的脉冲声场转换成电信号,输出到监测器和显示系统。扫描器中除包括显微镜所允许的各种工作频率在内的宽频带射频脉冲发生器和检测器外,还包括从时间上分离输入脉冲和输出脉冲的循环器;分离来自样品表面真、假反射脉冲的时间选通电路以及使声透镜能在小范围(如2毫米×2毫米)内移动的扫描驱动器。

2. 声透镜—超声显微镜的核心。常用金属铝或高声速单晶材料兰宝石。其柱体部分为传播介质。球面或柱面部分起透镜作用,将沿柱体传播的声束会聚成一个点或一条线。前者称点聚焦声透镜,后者称线聚焦声透镜。

无论哪种透镜,V(Z)技术都适用。为减小声能在传播过程中的损失和更有效地利用,必须在声透镜和被测样品表面之间充满某种耦合介质。对它的要求是声速低和衰减小。如果声透镜材料的声速和耦合介质的声速差得越大,会聚的像差则越小。为使不同介质之间的声阻抗更好地匹配,可在曲面内侧增加 $\lambda/4$ 玻璃涂层。常用的耦合介质为水。较之更为优越的有液金属镓和汞、加温的水、低温液氦(He)、高压惰性气体氙(Xe)和氩(Ar)等。

反射式超声显微镜的结构是以反射式光学显微镜为基础。声透镜连同扫描器一起,和光学显微镜的物镜一样,组装在物镜旋转台上。可先用光学物镜快速调焦或拍摄光学像,然后转动旋转台,换上声透镜,再记录声学像。

3. 样品工作台—因样品不用机械扫描,故工作台基本与光学显微镜类似,有分别沿X、Y方向用步进马达驱动的电动平台;移动范围为50毫米×50毫米,最小距离为1微米,移动速度为1.5毫米/秒。不同的有为V(Z)技术测量专用,沿声透镜轴向Z移动的压电平台;移动距离为60微米,最小距离为0.02微米。此外,还有分别绕X、Y轴稍作转动的工作台,倾斜角度为 $\pm 10^\circ$ 。这是在样品上,下表面稍不平行情况下使被测表面调至水平或各向异性晶体切割定向稍有偏离情况下为调准面向而设置的。

4. 带有显示器的微机系统—其任务有三:一是声学像的显示、存贮和处理;二是V(Z)曲线的记录和数值分析;三是通过软件自动控

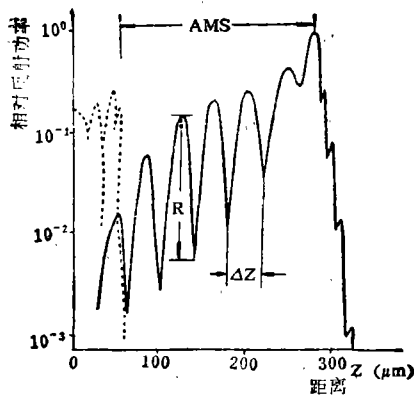


图1 <111> Si的V(Z)曲线

制每帧声学像的定标、排序和成像过程。

V(Z)技术的基础是V(Z)曲线。从声束聚焦在样品表面($Z=F$, F 为声透镜焦距)开始,逐渐移近声透镜和样品表面之间的距离,逐点记录输出电压 V 随轴向坐标 Z 变化的函数关系,组成V(Z)曲线。该曲线的中间部分有周期性,且与样品材料的弹性性质密切相关,称作材料的声学特征标记(Acoustic Material Signature),简写成AMS。表征AMS的特性参数有谷周期间距 ΔZ 、峰深度 R 以及相邻谷深度变化 ΔV 等。

V(Z)曲线产生的必要条件,除上述散焦($Z < F$)外,还要满足全反射条件—被测材料声速大于耦合介质声速以及材料的表面波全反射临界角 θ_R 小于声透镜的半孔径角 $\theta_{\max}$ 。

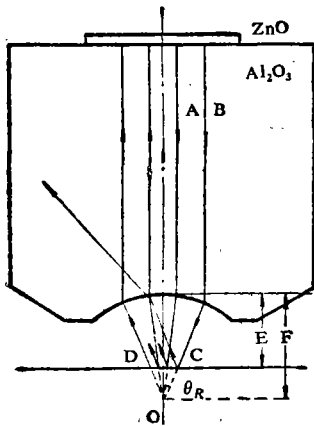


图2 V(Z)曲线的射线模型

因固体材料中存在纵波速度 $V_l >$ 切变波速度 $V_{sh} >$ 表面波速度 V_R 的关系。按全反射临界角的定义 $\theta_i = \sin(V_{\text{耦}}/V_l)$,故 $\theta_l < \theta_{sh} < \theta_R$ 。只要 $\theta_R \leq \theta_{\max}$,其他模式的临界角 θ_l 和 θ_{sh} 必然也满足了。

关于V(Z)曲线的形成, R. D. Weglein等人^[1-5]认为:经声透镜会聚到样品表面的声束包含很宽的入射角范围,既可以小于 θ_R ,亦可以大于 θ_R 。从样品表面反射后,因声透镜的强折射,返回声束中大部分超出换能器范围,不能被接收。而实际上对输出电压有贡献的入射声束只有两种:一种是声透镜轴附近的轴向声束A,另一种是表面波临界角附近的临界声束B,临界声束到达样品表面后,直接镜面反射,也是没贡献的,但它同时能激发表面波;表面波沿样品表面传播至一定距离(图2中的CD)后,又以 θ_R 角再辐射回耦合介质。这部分反射声束好像从声透镜焦点发出的一样,所以能按原来的会聚路径返回到换能器,再被接收。当声透镜移近样品表面的过程中,入射距离减小,表面波传播距离增加,且与临界角之间满足一定几何关系

$$CD = \frac{2(F-Z)\sin\theta_R}{\cos\theta_R}$$

因此临界声束反射束和轴向声束反射束之间的相位差随 Z 的减小呈周期性变化,即两声束到达接收换能器时产生干涉现象。按相消干涉条件,V(Z)曲线上的干涉周期 ΔZ 直接和样品表面波速度 V_R 有下列关系:

$$\Delta Z = \frac{V_{\text{耦}}}{2F(1 - \cos\theta_R)}$$

另因声透镜与样品表面间距减小,散焦加剧,入射能量减弱以及表面波传播过程中,能量随距离的增加呈指数衰减,故V(Z)曲线上干涉峰的强度也随 Z 的减小而下降。1982年Weglein^[6]估计了表面波衰减的经验公式:

$$L = 8.67(\lambda_R/Z\sin\theta_R)\ln(R+1)/(R-1) \text{ (dB)}$$

其中 R 和 Z 是对应某个峰的深度和位置。

既然 $V(Z)$ 曲线反映了样品材料的声反射特性,即反射信号强度、相位和材料弹性性质—密度、声速和衰减之间的关系。因此, $V(Z)$ 技术的主要应用是固体材料弹性性质的微观测量。从干涉周期 ΔZ 直接可推出材料表面波速度:

$$V_R = \frac{V_{\text{耦}}}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{V_{\text{耦}}}{2F \cdot \Delta Z}\right)^2}}$$

对于点聚焦透镜, V_R 代表测量点周围所有方向表面波速度的平均,故适用于各向同性材料;对于线聚焦透镜, V_R 代表沿聚焦线方向传播的表面波速度,更适合于各向异性材料。一般推算值与理论值之间相差1~4%。

$V(Z)$ 曲线还反映声反射特性随散焦加剧的变化。也就从纵向(一个表面波波长的深度)揭示材料弹性性质的变化。这样,在样品表面存在另一种介质薄膜涂层的情况下。推算的表面波速度随膜厚的增加,由衬底材料的表面波速度逐渐过渡到膜材料的表面波速度。反之,由表面波速度亦可估算涂层膜厚。而且超声显微镜工作频率越高,起测的厚度越薄,厚度变化对表面波速度的影响越灵敏。目前能测出硅(Si)片上160埃的金膜。如果频率升至3千兆赫,厚度可薄至20埃。 $V(Z)$ 技术有利于极薄膜或易碎膜的无损检测及自动测厚。

1980年Quate^[7]提出用液金属镓作耦合介质得到的 $V(Z)$ 曲线推出各向同性材料的弹性常数 C_{11} 和密度 ρ 。继之Smith^[9]用微探针探测空间反射谱的方法,记录甲基丙烯酸甲脂—水界面整个切变波和纵波的慢度表面和微观密度。利用这种方法,一方面能给出各向同性材料切变波和纵波的弹性模量,另一方面通过慢度表面的形状揭示各向异性材料的结构和晶面取向。

1982年Smith^[9]采用环状声透镜排除 $V(Z)$ 曲线中的纵波分量,在无干涉情况下从

$V(Z)$ 曲线的斜率直接得出表面波衰减的测量值。考虑临界角的变化和耦合介质吸收后,最终的表面波衰减为:

$$\alpha_{SAW} = \alpha_{\text{测}} / 2 \tan \theta_R + 2 \alpha_{\text{耦}} / \cos \theta_R$$

$V(Z)$ 技术应用的另一重要方面是利用不同膜层材料 $V(Z)$ 曲线的迭加原理,选定复合多层结构中各层声学像的最佳成像条件。例如SOS结构的H-MOS晶体管^[10]存在四种不同的区域:

衬底: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.4\mu\text{mSiO}_2$

连接线: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 1.2\mu\text{mAl} + 0.4\mu\text{mSiO}_2$

门电路: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.9\mu\text{mSi} + 0.1\mu\text{mSiO}_2 + 1.2\mu\text{mAl} + 0.4\mu\text{mSiO}_2$

电源线: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.9\mu\text{mSi} + 1.2\mu\text{mAl} + 0.4\mu\text{mSiO}_2$

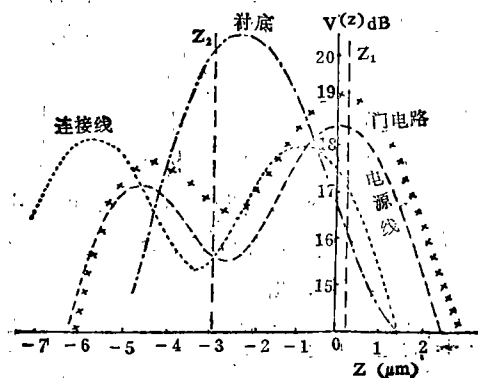


图3 SOS结构的 $V(Z)$ 曲线迭加

图3表示不同组分的 $V(Z)$ 曲线。它们迭加后的强弱反映为声学像的反差。如处于 Z_1 位置,门电路反射最强,电源线次之,连接线和衬底较弱。所以连接线和衬底很暗,电源线不清楚,而门电路却很亮。但调到 Z_2 位置,衬底最强,其他都比较弱,这样衬底由暗变亮,正好和 Z_1 的情况相反。说明可根据各组分 $V(Z)$ 的迭加图,调节 Z ,就可清楚观察或记录不同组分的声学像。利用 $V(Z)$ 技术可及时检测中间膜层的缺陷和伤—空穴、缝隙、玷污、杂质、短路、断路、离层和虚焊等。因此适用于微电子工艺产品质量的无损检验和

(下转第54页)

所以当比较器20由于负向第二个波 f_2 而产生输出脉冲时触发器40的Q端将由0变1(如图9 40Q), 其结果在 P_5 时刻点形成接收信号Z。这样, 即使超声波受到衰减, 由于适当改变了比较器10的基准电压, 从下次测量开始, 又能够进行正确的测量。

另一方面, 当比较器10的基准电压为 E_{s2} 时, 如果由于某种原因, 信号P的第一个波 f_1 如图8虚线所示变大而超过 E_{s2} 时, 则就不可能进行和图9所示相同的动作, 接收信号在 P_3 点业已形成。在这种情况下也同样会造成 P_3-P_4 、 P_4-P_5 即 $2T$ 时间的误差。然而, 出现这种情况时, 如图8的 $70'$ 、 H' 、 L' 所示, 即误触发检测电路根据检测到的误触发其L

又变为1, 因此, 从下次测量开始, 又按5所示的动作进行测量。

由上所述可知, 图3和图4所示的电路是利用换能器输出信号P过OV(例如第五个时刻点 P_5)来检测出超声波到达接收换能器的时刻。因此与超声波的衰减无关, 能够正确地检测出超声波传到接收换能器的时刻, 所以能提高超声波测量仪表的精度。

(王规生 编译)

参 考 文 献

- [1] 中川行雄、贺田康夫, <超音波传播时间检出回路装置>昭55-23476[公开昭和55年(1980年)]
- [2] 鷲见哲雄, <超音波受信信号の检出方法及V'装置>昭54-41783[公开昭和54年(1978)]

(上接第42页)

自动控制。

总之, 近年来V(Z)技术在理论和应用上都有不少新的进展, 必将赢得人们更多的关注。

参 考 文 献

- [1] Weglein R. D. "A model for predicting acoustic material signatures" A. P. L., vol. 34, No. 3, p. 179(1979)
- [2] Weglein R. D. "Characteristic material signatures by acoustic microscope" E. L., vol. 14, No. 12, p. 352(1978)
- [3] Atalar A. "A physical model for acoustic signatures" J. A. P., vol. 501, No. 2, p. 8237(1979)
- [4] Parmon W. "Ray interpretation of the mate-

rial signature in the acoustic microscope" E. L., vol. 15, No. 21, p. 684(1979)

- [5] Smith I. R. "Theoretical analysis of V(Z) curves measured by acoustic line-focus beam" Ultrasonics Symposium, p. 623(1982)
- [6] Weglein R. D. "Rayleigh wave absorption via acoustic microscope" E. L., vol. 18, No. 1, p. 20(1982)
- [7] Quate C. F. "Microwaves, acoustic and scanning microscopy" Scanned Image Microscopy, p. 23(1980)
- [8] Smith I. R. "Elastic constants measurement in the acoustic microscope" Ultrasonic Symposium p. 644(1982)
- [9] Smith I. R. "SAW attenuation measurement in the acoustic microscope" E. L., vol. 18, No. 22, p. 955(1982)
- [10] Atalar A. "An angular-spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscope" J. A. P., vol. 49, No. 10, p. 5130(1978)