

热波成像技术及应用

王保成 张欣卉 方延平 唐卫红

(空军后勤学院二系物理教研室 徐州 221000)

热波成像技术是人们根据热波形成的机理,并与现代扫描电镜实验技术相结合而进行的一种显微成像技术。该技术对物质表面和亚表面缺陷进行非破坏性无损检测具有独特的优越性。

一、热波成像技术的物理过程

热波成像技术按其检测信号方式的不同,可分为两类:第一类为气体传声器光声检测系统,第二类为压电光(电子)声检测系统。

气体传声器光声检测系统使用得最早,也最为普遍。在这里,用于热波成像的光源是经过聚焦的激光束,当强度受到调制、且经过聚焦的一束激光通过透明窗口照射在密闭空腔内的试样上时,试样吸收光能,并把光能转变为热能,热能以热波的形式出现,从样品内部传播到样品的表面上,这部分热使得样品表面上一薄层气体被加热,时而膨胀,时而收缩,其频率与调制频率相同。由于试样表面薄层气体的热胀冷缩,因而在样品室内产生一个微小的压力变化,这一微小的压力变化推动着邻近的气体在腔内传播,直到被传声器接收。当试样表面或亚表面微区热结构有差异时,这些差别就会在光声信号的幅度和相位上反映出来,即产生反差。当激光束沿样品表面作 X-Y 扫描时,就会形成一幅光声像。

这种热波成像技术检测深度较深,并且探测器不需与样品接触,使用较方便。

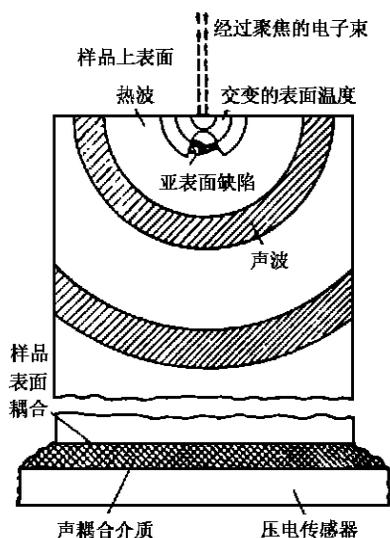


图1 热波成像的物理过程

第二类热波成像技术是压电光(电子)声检测系统。当强度受到调制,且聚焦的激光束或电子束照射在试样上时,试样局部则产生周期性的表面热,这种表面热是热波源,热波从受照区域开始传播,并与物质产生相互作用。热波的传播将在试样内形成快

发展,反红外探测隐身技术显得越来越重要。物理学研究表明,任何温度高于绝对零度的物体都发射红外线,不同温度的物体发射的红外线波长和强度不同。军事目标的发动机排出的热气波,使用着的武器装备、运动兵器与周围介质的摩擦等,都能引起目标温度与周围环境温度的差异,从而可以被对方的红外探测系统所探测到。反红外探测隐身技术除采用红外干扰有源隐身技术措施外,抑制武器装备等目标的红外辐射也是很重要的一个方面。美国的 F-19 隐身侦察/战斗机采取一系列红外隐身技术措施后,使其红外辐射减少了 90%。

(四) 声波隐身技术的物理原理

许多目标(如飞机、坦克和舰艇等)都会向周围介质(如空气、大地和水等)辐射高能级噪声声波,例

如发动机等机械构件工作时的振动,目标本身及其螺旋桨等部件的运动,所排气体对周围介质的振动等,都会发出噪声声波,这些声波极易被对方噪声传感器、声纳等专用波探测系统探测到。反声波探测隐身技术,就是控制目标声波辐射特征,降低对方声波探测系统探测概率的技术。美国的 F-117A 型隐身飞机采用全新设计的 F404 型发动机,有良好的隔音效果,据报道,在跑道上距离其 3m 处,它所发出的声音不高于蜜蜂发出的嗡嗡声。

目前,由于各种新型探测系统和精确制导武器的相继问世,隐身兵器的重要性与日俱增,隐身技术正向着综合运用、权衡隐身性能和其他性能、扩展频率范围和应用范围、降低成本等方向发展。科学家们正在不断探索新的隐身概念和新的隐身技术。

速变化的应力和应变场,一部分热波能量转换成同样频率的声波,并且由热波转换成声波时的幅度和相位直接与热波和物质的相互作用有关,这种相互作用控制着声波的幅度和相位。这样得到的声波通过声耦合介质,被压电传感器接收,并进一步转换成像,这种热波成像的物理过程见图1。压电光(电子)声检测系统可以工作在较高的频率,成像的分辨率高,并且可以观察大样品。

二、热波成像技术的特点

(1) 分辨率高 对于任何一种成像工具来说,分辨率是至关重要的,热波成像的分辨率主要取决于激发源的束斑大小和热波的波长。束斑尺寸越小,热波波长越短,则分辨率也越高。若用激光作为激发源,束斑尺寸可达到微米数量级,而若用电子束作激发源,则束斑尺寸可以进一步达到10纳米,因此用电子束作为激发源进行热波成像研究,可大大提高成像分辨率。另一方面,热波波长比相同调制频率下的声波波长小两个数量级左右,与声学显微成像技术相比,在较低的调制频率下可以得到较高的分辨率。

(2) 穿透能力强 热波的穿透深度大约为热波波长的1—2倍,它比光或电子束的穿透深度要高几个数量级。在热波穿透范围之内,试样在热性质上的微小差异均能在热波图像上反映出来。例如:当调制频率为1MHz时,热波在半导体硅片上的穿透深度约12纳米,在此深度之内的物质缺陷可较清楚地探测出来,这是任何光学显微镜和电镜所无法比拟的。

(3) 可以剖面成像 因为热波具有穿透本领,除了进行表面成像外,还可以进行表面以下不同层次上的非破坏性剖面成像。热波波长与试样的热导率 k 、比热 c 、密度以及调制频率之间具有如下关系式:

$$= 2 \left[\frac{2k}{c} \right]^{\frac{1}{2}}$$

从上式可以看出,对于同一试样,热波波长与频率 $^{1/2}$ 成反比,若改变调制频率,则热波波长也随着变化,因而可以得到不同穿透深度上的信息。故应用热波成像技术,通过改变调制频率可得到不同深度上的热波像,这种剖面像可以对试样亚表面缺陷进行无损检测。

三、热波成像技术的应用

在应用方面,热波成像技术越来越受到人们的重视,它正逐步发展成为一种很有用的无损检测手

段。目前,根据热波成像的原理,人们已研制出了多种热波成像显微镜,如光声显微镜、电子-声显微镜、离子-声显微镜等。用热波成像显微镜可以观察到光学、电子显微镜甚至声学显微镜所不能观察到的试样表面或表面以下微观热性质的差异。因此,尽管热波成像技术仍需完善,但它已经在集成电路检测、材料和材料科学、薄膜器件的界面分析、抗辐照材料表面损伤研究等方面获得了实际的应用。

(1) 集成电路的表面和亚表面无损检测

集成电路的布线常常是纵横交错,层层覆盖的,它使用在电子技术的各个领域,其可靠性极其重要,热波成像尤其适用于集成电路的这种可靠性检测。在集成电路制造过程中使用热波成像技术进行在线检测,可以把握住每一道工序,以保证产品质量,提高成品率。其次,用热波成像对使用中的集成电路进行定期检查,可以保证仪器的安全使用。

(2) 分析多晶材料的晶粒晶界

多晶材料由许多晶粒组成,但晶粒的取向不一致,若用电子-声显微镜成像,则这种取向的不一致将产生不同的电子-声信号,由此得到的热波像比通常的扫描电镜图像更逼真。它不仅能显示晶粒的反差,而且能显示晶界图像。这对多晶材料的研究工作具有很大的意义。

(3) 分析半导体材料中掺杂浓度的横向分布

热波成像是一种很有用的非破坏性的离子注入分布范围的常规分析手段。离子注入是半导体材料掺杂的一种常用技术,通常掺杂区域与其基体的导热性能有很大的差异,因而利用热波成像能够很方便地探测出杂质在基体中的横向分布。由热波图像可以清楚地看出离子注入区的分布范围,这种分布范围的大小可以与预期的结果进行比较,并且不需破坏样品。

(4) 薄膜材料的界面分析

对于器件的应用来说,膜的缺陷对其性能有重要的影响,因此,对薄膜进行缺陷检测很有必要,而进行非破坏性的剖面成像是热波成像技术的独特优点。利用热波成像可以分析膜的质量,检验衬底与膜之间是否存在杂质层,并且这种检测不破坏膜。

另外,利用热波成像技术还可以测定晶体的位错分析,检测抗辐照材料表面的损伤情况等等。目前,根据热波成像技术,人们正在研制各种热波成像的新仪器,这将为揭示物质的微观奥秘提供更多的研究和探测手段,其发展前景令人鼓舞。