

国外超声显微镜及其应用

上海科学技术情报研究所

一九七九年七月

国外超声显微镜及其应用

超声显微镜是七十年代才迅速发展起来的一种新型显微观察工具。它利用超声波与物体相互作用时能够透过物体的特点,结合激光、电视、压电换能等技术,可以显示物体内部的显微结构。

最近几年,随着超高频超声波等技术的发展,使超声显微镜的分辨率有很大的改进,从而也使显微技术获得很大的突破,填补了光学显微镜、电子显微镜及其他分析仪器的空白。目前,超声显微镜在医学诊断、生物研究、工业探伤等许多领域都有重要的应用,故而已引起许多国家如美、日、英等国的重视和关注,现将有关情况介绍如下。

一、国外超声显微镜发展现状

早在1936年,苏联科学家 S. Sokolov 就提出短波长超声波可用来形成被观察材料的放大图。可见,用超声波代替光波显示不透光材料细微结构的想法早已有了。不久提出了超声显微镜的概念,它吸引着许多科学工作者从事这方面的研究工作,期望能提高人们对显微结构的认识。

但是,超声显微镜的研究遇到了一连串较棘手的问题,例如超声显微镜的分辨率是由超声波波长所决定的,要获得几微米以下的分辨率,就必须用频率高达几百兆赫的超声波。这有待超声换能技术的突破;又如超声图象如何能转换成人眼看得见的光学图象,这又有赖于超声处理技术的进展。

直到七十年代初,由于高频超声技术、激光技术和信号处理技术取得重大进展,因而为超声显微镜的发展奠定了基础。如1971年,美国真尼兹无线电公司发展了超声全息摄影技术,结合激光扫描实时成象,获得分辨率为几微米的超声显微图。从当时来看,这是技术上的一个飞跃。经过四年多的发展,美国 Sonoscan 公司为印第安纳大学印第安纳波利斯高级研究中心安装了第一台商用激光扫描式超声显微镜(SLAM)。在1975年,“超声显微镜100型”获得了美国“工业研究”杂志每年一度评选的100项新产品的优胜奖。

在这期间,1973年美国斯坦福大学的 Calvin F. Quate 等人研制成机械扫描式超声显微镜(SAM)。该大学的 Wickramasinghe 等人利用相位比振幅对物体结构更敏感的特点,研制了透射型 SAM,它采用频率为1千兆赫的超声波获得与振幅象相对应的相位图。这种显微镜还可用于测定薄层部分的相位速度。

最近,美国斯坦福大学已研制成分辨率可与光学显微镜相媲美的新型 SAM。其分辨率是以往超声显微镜的3倍。这台超声显微镜采用了蓝宝石半球面透镜,将频率为2千兆赫的超声波(相当于光波长)通过140℃的加压机,集束到试样的一点。透过试样内部的声波发生反射,再由水反射到蓝宝石透镜,由涂于透镜的氧化锌压电元件转换成电信号。这样,通过声波束扫描试样,就能获得试样内部信息的显微图。

英国伦敦大学研制成功的超声显微镜,其声图象不但能在电视屏幕上显示出来,而且还能存入计算机中,随时可重现。显微镜的中心有个小的水容器,试样悬挂在容器内一面积为 13毫米^2 的金属小框内,水容器两侧的压电元件加有频率为2千兆赫的超声波。

日本东北大学研制成的SAM,采用凹面形超声换能器,由于不用难加工的蓝宝石透镜,结构更为简单。

目前,美国有四台SAM,欧洲至少有三台,其频率为150兆赫~3千兆赫。3千兆赫超声显微镜分辨率优于1微米,375兆赫SAM分辨率为1.67微米。每台超声显微镜都建于实验室,并用于实验室,造价约80,000美元,许多研究人员都迫切期望SAM商品化。

SLAM目前主要是由Sonoscan公司制造。目前市场上已有四台,其中三台是由Sonoscan公司制造,其工作频率为100兆赫,分辨率为10微米,另一台是由美国农业部旧金山西区实验室制造,其工作频率为100和500兆赫,分辨率约为3微米。典型的SLAM造价为97,000美元。

二、超声显微镜的种类、结构与工作原理

超声显微镜的种类有多种,有机械扫描式超声显微镜、激光扫描式超声显微镜、吸收式超声显微镜、布拉格衍射成像式超声显微镜等等,这里主要介绍机械扫描式超声显微镜和激光扫描式超声显微镜。

1. 机械扫描式超声显微镜(SAM)

根据超声波的检测方法,SAM结构可分为透射型和反射型两种。透射型是检测经散射(或衰减)后透射试样的超声波。反射型是检测试样反射出的超声波。目前,大多数场合是采用透射型显微镜检测超声波的振幅,但有时也可通过检测超声波的相位来制作图象。根据所观察的对象,可选用连续超声波,或脉冲超声波。

透射型SAM的主要部分是蓝宝石透镜,一端为平面,另一端是抛光的半球形凹面。平面端涂覆了一层氧化锌压电薄膜,这层氧化锌可将射频电流转换成声波,也可将声波转换成电信号。半球形表面用一层很薄的玻璃覆盖,玻璃作为阻抗换能器,或者作为蓝宝石与水之间的机械连接。

试样放在一对焦点重合的蓝宝石声透镜之间,用水作为声场介质。由压电式超声波发送器发射出平面超声波,波束经过声透镜在水中聚焦,由另一个声透镜集成平面超声束。让试样框夹作机械振动,超声波束扫描试样面(通常采用频率为50~1000赫),利用电动扬声器可动线圈的振动作X轴扫描,另一方面,用小型马达作Y轴扫描,扬声器以小于几毫米/秒的速度移动,这时,超声波束由接收换能器变成电信号,在阴极射线管上就显示出显微图象。

反射型SAM是检测试样表面或内部的反射波,经换能器而变成二维图。发射、接收换能器放置于试样表面。其操作机理与透射型SAM相似。

SAM主要的操作局限性是声波从透镜传到试样,在透过试样时会发生衰减;用水作为透镜和试样间的介质,虽比空气传播更有效,但也有局限性,水的衰减系数大,由于声在水中传播的距离正好与它的频率平方成反比,因此,如果声频率由1千兆赫增到2千兆赫,则分辨率就能提高1倍,但声穿透介质的距离就可能减少到四分之一。这表明在高频条件下,声

穿透的距离小得惊人。因此,在Quate等人研制的3千兆赫SAM中,透镜半径仅是40微米。为了让声在水中进一步传播,连水也得加热到60℃。目前,有两种方法可弥补这种衰减。一种方法是采用比水的衰减系数小的液体,例如用二硫化碳和水银,比加热的水还要好。目前认为在超声波透镜与试样之间充填适当的液体,可使声显微镜分辨率大大提高。另一方法是采用低温液体,在Quate实验室的Joseph Heiserman已研制了一台SAM,能在2°K低温下工作。声在低温液体的传播速度比在水中要慢些。在液态氦中的声速约是室温下水中声速的一半,在液态氮中声速约是液态氦中的四分之一。因而不问任何给定的频率,声波长都成比例地减少。用低温液体,其获得的分辨率至少要比光学显微镜提高1倍。

SAM装置结构简单,使用方便,目前美、英、日等国的许多研究所都在进行研究。

2. 激光扫描式超声显微镜(SLAM)

SLAM和SAM之间最重要的区别在于SLAM不聚声束。它们的操作方式不同,SAM是机械扫描,SLAM是激光扫描。SAM分辨率取决于声波的波长,而SLAM分辨率取决于扫描激光束直径。SLAM能实时显示光图象和声图象。

SLAM有一平面压电换能器,它对试样表面均匀地发射声波。在与声波相对的试样面上加一块反射滑动盖板(非常光洁的非生物试样不用反射盖板)通过试样得到调制的透射声波在反射盖板上产生振动,结果产生“阴影象”。用很细的激光束扫描反射盖板,反射的激光束由光电探测器所接收,将阴影象转换成电信号,经处理后同时放大,分别在电视屏幕上实时显示出光图象和声图象。

SLAM也可采用干涉法工作,以产生模拟光干涉条纹的图象。通过混合声信号和与声波相关的电子参考信号而制得图象。干涉图由一系列垂直交替的光带和暗带即干涉条纹组成。对于声透射均匀的试样,这两种带互相平行且等距,对于折射率不同或厚度不同的试样,干涉条纹就有位移。

激光扫描式超声显微镜采用激光后,体积较庞大。

三、超声显微镜应用

超声显微镜是利用试样声学性能的差别,用声成像的方法产生高反差、高放大倍数的声象装置,它能观察原始试样的细节,而不用象电子显微镜那样需要真空状态,也不用象光学显微镜那样要将试样染色以提高反差。目前,在生物医学、电子工业、冶金工业等方面已获应用,取得不少成果。

1. 生物医学方面的应用

SAM可在不损伤细胞的前提下对动植物的细胞组织进行观察。用光学显微镜观察时,试样必须用特殊的有机染料进行染色才成,但用SAM可以省去染色过程,即能对原始组织进行观察,因而成为生物学的重要研究手段。

超声显微镜对硬组织病原学和病理学也增添了新的研究方法。生物体的硬组织如齿的复弹性显微结构可用SLAM显示出来。

如用100兆赫的SLAM,可观察各种器官。例如,可鉴别肺脏组织中的纤维变性状态;研究各种药物对鼠心脏收缩的影响,但用光学显微镜是观察不到心瓣膜的。又如可测出许多组

织的主要结构成份——骨胶原对声的衰减最大,并能测定单股骨胶原中的声速,而其他技术是测不到的。认为这些结果对于超声立体成象及结构组织的了解都提供有用的信息。

超声显微镜能鉴别细胞的弹性变化,因为对于研究红血细胞是很有用的。新生成的红血细胞富有弹性,但正常生存120天后弹性会消失。因此超声显微镜根据鉴别所得的弹性变化情况,就可测定细胞的寿命。超声显微镜也可发现细胞早期分裂,因而可用于诸如某种贫血的研究,贫血的红血细胞的分裂比正常的要快。超声显微镜对人体无危害,因此非常适用于医疗诊断。

2. 电子工业方面的应用

最近几年,微电子元件,特别是集成电路的质量检验也在考虑用超声显微镜。如斯坦福大学用1.84兆赫SAM检验大规模集成电路,可得到分辨率为0.5微米的图象。目前,如半导体、电路板、集成电路芯片、陶瓷和金属等都倾向于采用超声显微镜检验。初步结果证明,这种技术能探测试样表面下隐藏的孔隙与缺陷,对非破坏性分析很有用。例如将两片薄的黄铜之间焊一片铜网栅,用光学显微镜只显示光洁的黄铜表面图象,而用150兆赫透射型SAM,所得的图象清晰地显示铜片上的网栅,并显出铜片中心有焊接不良的暗区。

Carnegie-Mellon大学证明,超声显微镜在微电子元件的质量控制中特别有用。例如晶体管生产流水线中晶体管片焊管帽,一般采用Au-Sn焊料焊接硅片与铜片。铜片实际上也是散热片,焊接必须要均匀,以防出现热斑。目前,采用X射线摄象法,有很大的局限性,图象不能放大。所以小的缺陷往往要错过,要发现小缺陷,就得破坏性检验。用超声显微镜鉴别,则能发现焊料中的缺陷和其他焊缝缺陷。超声显微镜对多层片状电容器生产质量控制也是有用的。

美国休斯研究实验室用375兆赫的SAM检验各种集成电路,发现通过改变试样与透镜的距离能使集成电路各层成象,从而检验出表面下层的裂痕、孔隙和其他缺陷。

SLAM也可用于检验例如陶瓷电容器芯片的缺陷,采用干涉型SLAM,能清晰地显示出小孔隙、分层区和其他缺陷。

3. 冶金工业方面的应用

超声显微镜能用于检测钛合金板材氩弧焊后内部的缺陷,在 3×4 毫米的声显微图中可观察到焊区内的裂纹。也可非破坏性检验罐头容器的焊区裂缝,并可把气泡和杂质区分开来。使用SAM观察钴-钛合金试样,能清楚地了解内部异相界面的情况,而用光学显微镜却不能识别出这样的金相结构。

陶瓷燃气涡轮叶片若采用X射线摄象,无法显示出叶片内全部的孔隙,而只能观察到一组孔隙。分层缺陷也不能探出。采用超声显微镜,就能显示出全部的孔隙及其分层缺陷。

采用SLAM,还能测定试样内与材料的其他部分已失去机械连接的部分,例如能探出涂层和衬底脱落的现象。

4. 其他方面的应用

超声显微镜已用于玻璃、岩石试样及聚合物等不透光材料的探伤,可测出25微米那么小的缺陷位置。

四、结 束 语

超声显微镜在材料分析、质量控制、生物医学的研究中具有重要的应用。

近年来,已提出了研制超声显微镜的一些方案,Quate 正在研究用光透镜代替接收的声透镜,以透射方式工作,用脉冲激光照射试样,在这种情况下,仪器就象声-光显微镜那样工作,能鉴别出试样内特殊部位的化学成分。同时,也在研究一种可提高分辨率的方法,通过超声照射试样,由试样以谐振频率发射的声波成象,显示研究材料的新信息。目前,还提出了立体视 SAM 和相当于光学显微镜中的暗视野超声显微镜等方案。科学家们对超声显微镜做了不少的基础理论工作。今后,要进一步研究超声图象的信息处理技术,继续提高图象分辨率,开拓超声显微镜的应用领域。预示超声显微镜有光明的前景。

参 考 资 料

1. Science Vol.201 No.4361 1978.9.22 P1110
2. Industrial Research /Development Jan.1978 P52
3. Industrial Research /Development April 1978 P102
4. Ultrasonics Vol.15 No.5 1977.9 P205
5. 应用物理 47[4]1978 P356~359
6. 日经エレクトロニクス, 1979.2.19 P116
7. エレクトロニクス 78.No.12

(情报研究室电子组供稿)