

超声波扫描显微镜发展及应用综述

高媛¹, 杨敬², 李立², 胡志臣²

(1. 装备发展部某中心, 北京 100032;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 超声波扫描显微镜是一种利用超声波为传播媒介的无损检测成像设备, 相对于传统的破坏性检测, 超声显微镜不会对样品造成损伤; 主要介绍了超声波扫描显微镜的发展现状、关键技术现状、应用领域和未来发展方向等内容; 关键技术主要包括纳秒级窄脉冲产生技术、高频信号调理技术、高频聚焦式换能器研制技术和超声 C 扫描成像技术; 应用领域主要从材料科学检测行业、半导体测试行业、新能源行业进行了详细描述; 最后, 对超声波扫描显微镜的发展进行了展望; 随着超声波技术的发展, 声频会越来越高, 超声显微镜的能力将越来越大; 可以预料, 它与其他尖端技术结合, 将会发挥出更大、更独特的作用。

关键词: 超声波扫描显微镜; 半导体测试; 超声波; 探头

Development and Application of Scanning Acoustic Microscope

GAO Yuan¹, YANG Jing², LI Li², HU Zhichen²

(1. A Center of Equipment Development Department, Beijing 100032, China;

2. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: A scanning acoustic microscope is a kind of non-destructive testing imaging equipment using ultrasonic wave as a media. Compared with traditional destructive testing, a scanning acoustic microscope will not cause damage to a sample. The development status, key technology status, application field and future development direction of ultrasonic microscope are introduced in this paper. The key technologies mainly include a nanosecond narrow pulse generation technology, high frequency signal conditioning technology, high frequency focusing transducer development technology and ultrasonic C-scan imaging technology. The application is mainly described in detail from material science testing industry, semiconductor testing industry and new energy industry. Finally, the development of scanning acoustic microscope is prospected. With the development of ultrasonic technology, the frequency of sound will be higher and higher, and the power of ultrasonic microscope will be larger and larger. Combined with other cutting-edge technologies, it can be expected that it will play a bigger and more unique role.

Keywords: scanning acoustic microscope; semiconductor testing; ultrasonic; sensor

0 引言

材料内部缺陷有大有小, 目前工业探伤所能发现的缺陷尺寸在 500 μm 左右, 要想观察到更为细小的缺陷, 只能通过破坏的方法做金相或者电子扫描显微镜, 且仅仅能观察到特定的表面缺陷情况, 无法识别出样品中整个体积内的缺陷^[1-2]。同时常规超声由于分辨率的原因还存在对较薄材料难于检测的缺点。

超声扫描显微镜 (SAM, scanning acoustic microscope), 又称 SAT, 它是一种利用超声波为传播媒介的无损检测成像设备。超声波扫描显微镜的工作模式主要为 C-Scan 模式, 所以称为 C-SAM。

超声波扫描显微镜利用高频超声换能器将脉冲超声送入工件样品, 当超声波通过被测工件时, 会在不同材料间对结合面产生反射以及透射, 如液体与固体的结合面、固

体与气体结合面、金属与塑料之间的结合面及固体材料内部缺陷 (如分层、孔洞、裂纹、夹杂等) 会造成较大的振幅回波。超声波换能器接收反射波转换成电信号传给计算机, 计算机系统准确识别和提取反射回波信号。经过图像化处理, 可对工件内部精准扫描成像^[3]。

超声波扫描显微镜的硬件包括三轴运动控制平台、超声激励接收仪、数字化仪、超声波换能器 (探头) 及工控机等组成。超声波扫描显微镜按信号接收模式可分为反射模式和透射模式。反射式又称为脉冲回波法, 即利用反射波成像, 可以具体的聚焦到某一层, 从而可以判断缺陷深度。脉冲回波主要包括 A 扫描 (A-Scan)、B 扫描 (B-Scan)、C 扫描 (C-Scan)。

三种扫描方式如图 1 所示^[3]。A 扫描波形代表了样品上某一点深度方向上的全部回波信号, 即从样品顶部道底部

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-06-09。

作者简介: 高媛 (1979-), 女, 山东东营人, 博士, 高级工程师, 主要从事测试技术方向的研究。

引用格式: 高媛, 杨敬, 李立, 等. 超声波扫描显微镜发展及应用综述[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(8): 1-9.

的点到点波形图；通过换能器在样品某一方向移动，且在移动过程中逐点做 A 扫描，所最终得到的图像即为 B 扫描。C 扫描相当于对样品某一深度的截面进行扫描，通过该界面上的反射声波形成二维图像。从空间的扫描轨迹上看，可分别称为点扫描、线扫描和面扫描。多个 A 扫描可形成 B 扫描，多个 B 扫描可形成 C 扫描。层析扫描可生成任意深度的 C 扫描。

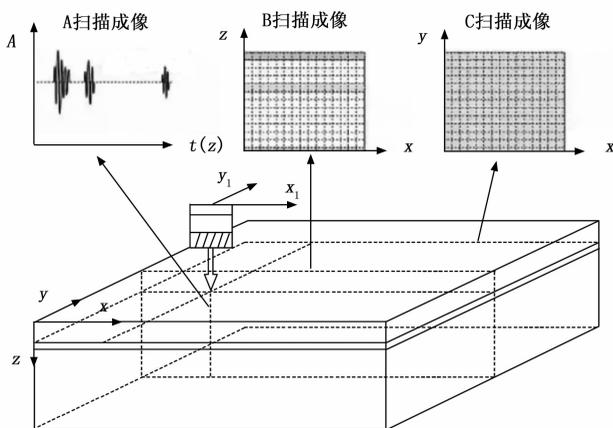


图 1 三种扫描方式示意图

与射线检测相比，超声波扫描技术具有灵敏度高、适用范围广、检测成本低、检测速度快、对人体和环境无害等优点，但同时具备一定的局限性，如对缺陷的取向有要求，不易检测与声束方向平行的缺陷，对不规则的或复杂形状的试件检测有一定的困难。

超声波扫描显微镜被广泛应用在物料检测 (IQC)、失效分析 (FA)、质量控制 (QC)、质量保证及可靠性分析 (QA/REL) 以及研发 (R&D) 等领域。可检测电子元器件、LED、金属基板的分层、裂纹等缺陷 (裂纹、分层、空洞等)。通过图像对比度判别材料内部声阻抗差异、确定缺陷形状和尺寸、确定缺陷方位。检测精度可达微米级别。

1 超声波扫描显微镜国内外发展现状

1.1 国外发展现状

第一台声学显微镜于 1973 年研制出来，随着技术的进步，超声波扫描显微镜的频率由 $10\ \mu\text{m}$ 提升至 $15\ \text{nm}$ ，频率也提升至近 $3\ \text{GHz}$ 。目前，超声波扫描显微镜已有成熟的商业产品，但该技术被国外厂家垄断。国外生产超声波扫描显微镜的主要由德国、美国和日本的厂家垄断^[4]。

德国公司生产的超声波扫描显微镜被广泛地应用于材料科学，半导体行业，生物学，太阳能以及晶圆键合缺陷检测等领域，给传统的精细结构观察带来了全新的方法。如单探头超声波扫描显微镜 SAM 401。该扫描显微镜的信号采样率最大可选 $5\ \text{GHz}$ ，超高速、线性驱动扫描平台的最大扫描速度达 $1\ 500\ \text{mm/s}$ ，X、Y 轴的重复精度为 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ 。同时，用户还可以根据工作需求选用多探头扫描的超声波

扫描显微镜，可以使用多个超声探头同时对不同样品进行扫描，以提高无损检测效率。如 SAM 404 四探头超声波扫描显微镜^[5]。

美国某公司生产的超声波扫描显微镜应用于微电子学、材料检测、电力能源、微机电系统与半导体测试等行业。如超声波扫描显微镜 Gen 7。Gen 7 提供了先进的硬件系统，具有极高的像素分辨率 (1G 像素)。X、Y、Z 轴的精度达到 $0.5\ \mu\text{m}$ 。系统的超声激励接收带宽为 $500\ \text{MHz}$ ，最高可以支持频率为 $400\ \text{MHz}$ 的超声波探头使用，有效扫描面积最大可以扫描 $350\ \text{mm} \times 350\ \text{mm}$ 的试件^[5]。

美国某公司生产的超声波扫描显微镜设备被广泛应用于各种材料的无损检测，包括半导体，汽车零件和其他先进元件。如 ECHO VSTM 的超声波扫描显微镜。此设备的扫描分辨率小于 $1\ \mu\text{m}$ ，在高分辨率下，扫描速度是传统超声波扫描显微镜的 2.5 倍；专门为更高精度要求，更复杂元器件设计的新一代设备。广泛应用内在 Flip chips、Stacked die、Bumped die、Bonded wafers 等。该公司研制了全自动超声扫描设备 ECHO ProTM，主要用于集成电路微电子封装中细微缺陷识别的先进超声扫描显微镜。该系统支持 $15\sim 300\ \text{MHz}$ 的超声波探头使用，最小能够检测薄至 $10\ \mu\text{m}$ 的空气缺陷^[6]。

1.2 国内发展现状

国内也开展了超声显微镜的研究，取得了一定的研究成果。如从 20 世纪 80 年代起就有研究机构开展了超声波扫描显微镜的研究工作，先后研制出了 THSAM1-7、TH-SAM-M 等一系列的超声波扫描显微镜^[6]。

文献 [7] 和文献 [8] 设计了一款基于 PCI 总线的超声扫描显微镜，采样速度达到 $250\ \text{MHz}$ 。该系统使用 CPLD 芯片对回波信号进行处理，并结合计算机计算对测试数据进行存储、处理和显示，使该系统可检测 $0.2\ \text{mm}$ 的缺陷^[7-8]。文献 [9] 开发了一台适用于微小缺陷检测的高频超声扫描显微系统，该系统的扫描范围为 $280\ \text{mm} \times 240\ \text{mm}$ ，采样频率为 $5\ \text{GHz}$ ，能够满足 $500\ \text{MHz}$ 的高频超声换能器的成像需求^[9]。文献 [10] 搭建了一套高效率扫描超声显微成像检测系统，并提出了“回”型扫描等扫描方法，将扫描效率提高了约 29%。同时提出以相位谱法增强缺陷或边缘点，提高检测效率和精度^[10]。

国内也有一些生产超声波扫描显微镜产品等。产品主要集中在 $50\ \text{MHz}$ 以下的检测能力，个别产品可以达到 $230\ \text{MHz}$ ，但超声激励接收设备和探头主要为国外进口产品。超声波扫描显微镜的扫描速率最大为 $1\ 000\ \text{mm/s}$ ，定位精度最小达 $1\ \mu\text{m}$ 。

与国外相比，国内对超声波扫描显微镜的研究起步较晚且研究成果较少，许多企业和研究所在科研和生产中所使用的高频超声波扫描显微镜主要依赖于进口产品。组成的关键部件如超声激励接收仪和超声波探头，国内目前没

有可以达到国外产品水平的可替代产品。

基于上述情况, 国内有单位研制了国产的四探头超声波扫描显微镜 AMC AM-401。该产品可进行单探头、双探头及四探头的扫描方式, 机械运动平台的重复精度可达 $\pm 1 \mu\text{m}$, 超声激励接收仪采样变频设计思想, 激励和接收带宽覆盖了 500 MHz。数据采集卡采用 PCIe 接口, 每通道的采样频率最大为 2 GHz。

2 超声波扫描显微镜关键技术

超声波扫描显微镜有三轴运动控制平台、超声激励接收仪、数字化仪、超声换能器和工控机等组成。超声波扫描显微镜商业成熟产品主要被国外公司垄断, 亟需突破关键技术, 实现国产化替代。关键技术主要集中于超声激励接收仪、超声换能器和超声波扫描成像方法的研究。

2.1 纳秒级窄脉冲产生技术

针对高频宽带的激励需求, 激励方法通常为编码激励^[11-12]或脉冲激励^[13-14]。编码激励不需要高激励电压, 可以在保证分辨率的情况下提高信噪比, 可用于甚高频和特高频带宽范围内的激励, 但编码激励信号产生和接收相对复杂且持续时间长。脉冲激励包括尖峰激励、方波激励等。为了提高信噪比, 在传感器的安全工作范围内, 脉冲激励电压应尽可能高, 可达到电压至数百伏。脉冲激励简单、经济、高频、宽带、应用范围广^[15]的优势常应用于频率较高的工作范围内使用。

文献 [16] 通过编码任意波形发生器再加功率放大器激励出了 200 MHz 超声信号, 在接收后通过互相关后减少了电反射造成的干扰, 但是相对而言降低了信噪比^[16]。文献 [17] 利用逻辑门的竞争冒险现象使得数字逻辑器件产生窄脉冲, 以此产生了脉冲宽度可调的纳秒级窄脉冲信号^[17]。文献 [18] 实现了基于场效应管的低成本单极性脉冲发生器。利用分立元件构成了场效应管驱动器, 并基于高速大功率金属氧化物半导体场效应管 (Fast-Power-MOS-FET) 和 -350 V 的恒定直流源构成了负脉冲信号发生装置, 可以产生脉冲宽度为 10~500 ns、带宽 1~60 MHz 的脉冲信号^[18]。文献 [19] 基于 GaN 半导体器件设计了单极性脉冲激励装置, 将脉冲信号的上升速率提高到 100 V/ns, 该设计可以用来激励中心频率为 50 MHz 的换能器, 并实现了自激自收和一激一收两种工作方式^[19]。文献 [20] 通过控制场效应管的通断控制电容的充放电状态实现了脉冲宽度为 350 ns, 峰值 400 V 的负脉冲信号, 并通过对放电电容、输出电阻与超声换能器之间进行匹配, 实现脉冲振幅的最佳值^[20]。文献 [21] 等人采用雪崩三极管 (Avalanche transistor) 设计出一款输出峰值电压 400 V、脉冲宽度 600 ps, 重频大于 25 kHz 的 12 级 Marx 电路脉冲源, 利用结构紧凑的 PCB 电路设计保证了输出波形的稳定性 (宽带抖动小于 1%)^[21]。

文献 [22] 使用基于三极管雪崩特性的窄脉冲产生电

路输出了上升时间低于 1 ns 级别的脉冲, 并成功应用在了煤矿井下通道超宽带通信中^[22]。文献 [23] 比对了单管、双管以及 Marx 脉冲产生电路之间的区别, 并通过对三极管选型、电路 PCB 以及充电电容的优化设计, 抑制了电路在实际使用过程中容易发生的脉冲触发抖动现象^[23]。文献 [24] 提出了一种采用基极触发方法的新型基于雪崩三极管的 Marx 电路拓扑电路, 解决高电压输出和高重复率操作之间的矛盾^[24]。文献 [25] 等利用三极管的雪崩击穿效应产生了 GHz 级别的窄脉冲波形^[25]。

超窄脉冲产生电路大多应用在超宽带通信领域, 该领域所用电压较小但带宽要求较高, 上升时间甚至低于 ns 级别。目前该方式的脉冲产生电路在超声上的应用较少, 需要进一步的研究。

2.2 高频超声信号调理技术

高速数据采集技术是当前信息技术领域热门的研究方向之一, 对信号的前期调理直接决定了后期所采集数据的性能, 故而信号调理电路的研发则尤为重要。信号调理电路的内容主要分为增益与滤波两方面, 目前国内外研究人员针对不同的应用需求, 对高频信号采集系统进行了大量研究^[26]。

2.2.1 增益放大电路的研究

针对增益放大电路的研究由多种方法, 但对于超声信号的放大电路, 需要考虑信号的带宽。

文献 [27] 使用两种放大器串联的方式, 对信号进行了两级放大, 提高了系统对信号的适应性; 同时, 针对超声信号强度受很多因素影响且变化范围广的特点, 使用二极管阵列对电路进行保护, 能够有效防止电压及电流对系统的瞬态干扰^[27]。

文献 [28] 提出了一种紧凑的数控可变增益放大器 (DVGA), 该放大器具有温度补偿线性分贝增益控制和直流偏移消除 (DCOC) 功能, 集成了温度补偿 dB 线性增益控制、输出共模反馈、6 位数字增益控制。该设计 DVGA 的测量增益范围为 18.4 dB, 平均步长为 0.3 dB, 2 MHz 至 1.9 GHz 的 3 dB 带宽^[28]。

另外, 文献 [29] 使用 ADI 公司的电压控制放大芯片 AD60390MHz 带宽下增益变化范围为 -11~31 dB 典型的增益调整精度为 0.5 dB^[29]。

2.2.2 滤波电路的研究

滤波电路方面通常有两种设计思路, 一种是无源滤波 (FC, frequency control filter), 另一种是有源滤波 (APF, active power filter,)。

针对超声换能器中心频率不固定的特点, 信号带宽需要根据需要进行调节, 程控滤波器主要有以下三种方法: 第一种通过模拟开关或单位器切换电阻网络; 第二种是有先用有源集成滤波芯片。最后一种是直接使用 DSP 芯片 (digital signal processor chip) 对模数转换器 (digital-to-analog

converter) 采集到的信号进行数字滤波再由 DAC 输出, 速度受到所用器件的限制^[30]。

文献 [31] 通过低温共烧陶瓷 (LTCC) 技术设计了一款低损耗高抑制双工器, 实现了对单个信号进行分割输出, 其内部由仅 LC 无源网络构成低/高通滤波器, 在通带内插入损耗小于 2.5 dB, 阻带内抑制大于 23 dB 的性能^[31]。

文献 [32] 选用最典型的有源滤波电路是巴特沃斯滤波器, 增加其滤波阶数, 通过仿真实现了上限截止频率 10 MHz, 通带增益 28 dB 的六阶巴特沃斯低通滤波器^[32]。

文献 [33] 等通过串联二极管通断改变并联电容的值, 进而改变电感之间的耦合关系从而改变其滤波效果, 该方法的优势在于功率几乎不损失, 可用在功率较大的应用场景中^[33]。

综上所述, 可变增益放大器因其方便控制的方式被广泛应用于可控增益领域内, 但是超声信号因其激励幅值过大不能直接接入可控可变增益放大器内部。有关可控滤波方面依然较为薄弱, 若使用无源滤波依然需要采用电子开关进行切换, 在高频信号工作范围内没有稳定可靠的截止频率连续可控滤波方式, 有待进一步研究。

2.3 高频聚焦式换能器研制技术

高频聚焦式换能器 (探头) 是超声波扫描显微镜的关键部件。换能器的频率越高, 超声波扫描显微镜的检测分辨率越高。在实际应用中, 超声波换能器的性能常由于传播中的衰减而无法达到期望中的效果, 如何提升超声波换能器性能将是超声波扫描显微镜发展的主要问题。

高频超声波换能器在制造过程中, 压电材料的选择是最关键的步骤。如何选择压电材料, 从两个方面考虑。一方面是材料的制备工艺。压电材料的厚度通常在工作频率的半波长处, 才能制造出性能好的换能器。当工作频率达到超高频时, 压电层的厚度加工是一个大问题。因此, 当选择材料时, 要考虑其生长情况、加工过程, 加工难度, 以及是否能更好与换能器的制备工艺相适应。另外一方面是压电材料的性能。压电材料的机电耦合系数、介电常数和声阻抗等是换能器设计中关键参数^[34]。

目前, 常用于做高频或超高频的聚焦换能器, 常用的由 LiNbO₃ 单晶材料 (铌酸锂)、ZnO 薄膜材料和 ALN 薄膜材料^[35]。

2.3.1 LiNbO₃ 单晶换能器

单晶具有很高的压电常数 d_{33} 和机电耦合系数 kt , 在高性能传感器制作方面, 使其具有良好的应用前景。此外, 与多晶铁电陶瓷不同, 单晶是不受晶粒和孔隙度等因素的限制。LiNbO₃ 单晶具有较高的声速、优异的压电性能和较小的介电常数, 在制造高频大孔径超声换能器方面具有优势。

文献 [36] 利用 LiNbO₃ 材料研制了 100~300 MHz 的高频聚焦换能器。300 MHz 的换能器的压电层厚度只有

9 μm ^[36]。文献 [37] 利用 LiNbO₃ 材料研制出了 400 MHz 的超声换能器, 压电层厚度只有 7.1 μm ^[37]。文献 [38] 研制了中心频率为 526 MHz 的超声换能器, LiNbO₃ 材料的压电层厚度只有 6 μm 。

上述的超声换能器的频率高, 波长小, 可应用于生物领域检测细胞结构。但是, 将 LiNbO₃ 的厚度加工至微米级别, 加工难度极大, 因此, 这种方法很难推广及应用。

2.3.2 薄膜式换能器

超声波扫描显微镜系统中所用的换能器常为透镜聚焦式换能器。通常在超高频范围内, 透镜是基于在蓝宝石或硅衬底上研磨或刻蚀形成球形空腔以实现聚焦效果^[39-40], 并在透镜另一面溅射 ZnO 或 AlN 薄膜作为压电材料。

ZnO 或 AlN 薄膜材料是使用 MEMS 工艺加工的, 由于这种压电薄膜材料的性能不如传统的铁电材料的压电性能, 因此, 在镀膜过程中需要掺杂其他材料来提高压电性能。如文献 [41] 和文献 [42] 将 Cr 掺杂到 AlN 中制作薄膜来提高其压电性能^[41-42]。文献 [43] 使用掺杂 Cr 的 AlN 薄膜研制了 40~80 MHz 的超声换能器^[43]。文献 [44] 研制出了 200 MHz 的掺杂 Cr 的 AlN 薄膜超声换能器。图 2 为 AlN 薄膜超声换能器的实物图^[44]。

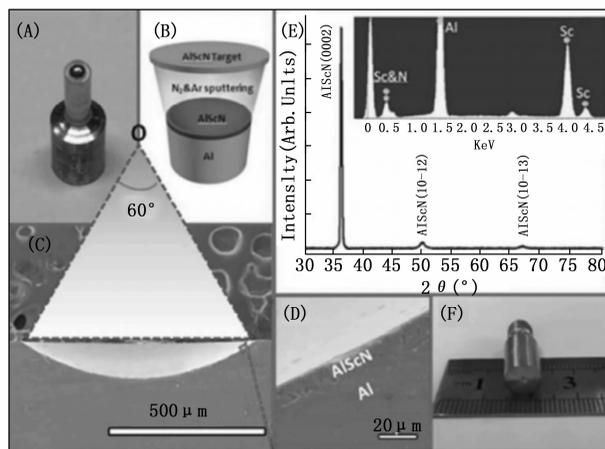


图 2 AlN 薄膜超声换能器

文献 [45] 研制了基于 MEMS 工艺的 ZnO 薄膜超声换能器, 中心频率为 200 MHz^[45]。文献 [46] 研制了在硅透镜上镀 ZnO 薄膜材料, 研制出了中心频率为 330 MHz 的超声换能器, 该换能器在生物学上具有很大潜力。图 3 为研制的 ZnO 薄膜换能器的实物图^[46]。

文献 [47] 提出了一种削弱边缘回波的透镜结构, 如图 4 所示。从而使边缘回波在时间轴上远离来自反射体的回波^[47]。然而, ZnO 材料因其在超高频范围内信号幅值过小而导致换能器性能较差。为解决这一问题, 后来有学者提出了一种金属有机气相沉积及溶胶-凝胶等方法^[48], 给使用透镜聚焦的超高频换能器提出一种新的解决思路。

国外具有成熟的生产中心频率 200 MHz 以下的超声换



图 3 ZnO 薄膜超声换能器

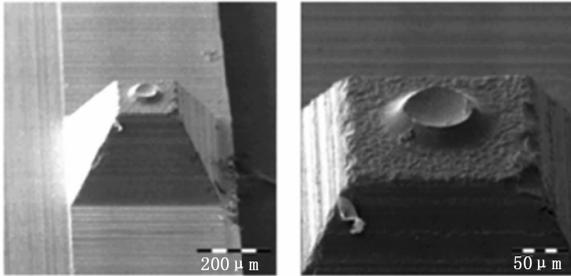
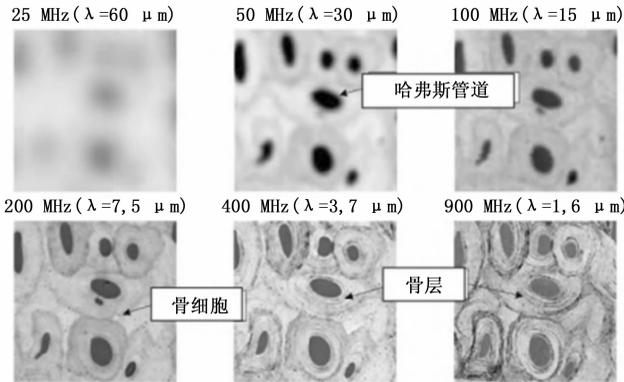


图 4 削弱边缘回波的透镜结构

能器的生产工艺, 200 MHz 以上也可定制生产, 目前已报道的国外可生产的高频超声换能器的最高频率为 2 GHz, 可以实现对生物活体细胞的检测。以下为骨骼细胞的检测结果。



样品: 骨骼 By Courtesy of Dr.Raum, University of Halle, Germany

图 5 骨骼细胞检测结果^[4]

国内目前成熟的技术可生产 25 MHz 以下的高频超声换能器。25 MHz 以上的高频超声换能器, 由于生产工艺的限制, 未有成熟的产品, 但有公司正在开展生产工艺的研究工作。

2.4 超声 C 扫描成像技术

高频超声 C 扫描成像技术, 可以获得被测试件表面以及内部在不同深度层面上的二维声学图像。

常规的超声 C 扫描成像技术如图 6 所示, 首先将被测试件放置于水槽中, 在扫描过程中, 高频超声换能器在预设的路径下进行扫查, 通常采用蛇形扫方式。换能器采用

反射工作模式, 当超声波透过被测试件表面、遇到缺陷(如孔隙、裂纹等)时, 会发生部分反射, 反映在时域信号当中即为直达波、缺陷回波以及底面回波, 如图 7 所示^[49]。

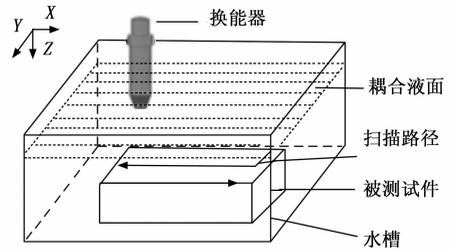


图 6 超声波 C 扫描式示意图

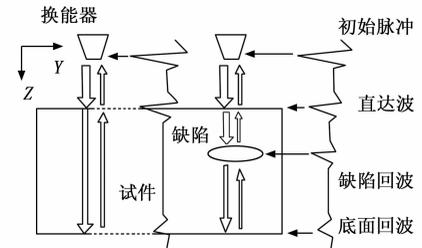


图 7 超声波传播路径示意图

将不同位置的回波信号的幅值或时间值作为成像的特征值, 将同一深度上的特征值按照位置关系列为二维数值矩阵, 即为对应深度处的 C 扫描成像结果^[49]。

在常规超声 C 扫描的成像基础上, 也发展使用不同特征值或信号处理技术的成像方法, 如 TOF (times of flight) 成像、频域成像、相位成像等技术。

超声回波信号除了时间和幅值信息外, 还包括其他的特征参量, 如脉冲宽度、到达时间 TOF、相位等。回波的 TOF 值, 一般取时窗范围内绝对值最大的峰值对应的时间值。TOF 成像主要用来判断结构的深度信息, 使用相对较少^[50]。

提出了基于傅立叶变换的频域成像的概念, 选取特定的频率来进行成像, 从而提高了图像的分辨率^[51]。利用频域成像的概念, 选取闸门内时域波形上数据进行 FFT 变换, 用当前超声换能器中心频率对应的数据成分进行成像^[52]。这种方法因其计算过程复杂、数据量庞大和计算时间长等问题无法应用于实时检测成像。

使用了相位成像模式, 是将回波信号中对应的相位信息提取出来。此方法需要提取某一位置的信号作为参考信号, 根据反射回波与参考信号相比是否发生相位反转来设置用于成像的颜色值^[53]。提出了基于极值统计理论的数据处理算法, 依据实验测得信号的幅值添加置信区间来确定缺陷回波的位置^[54]。提出利用基于 AR 模型的频谱外推方法, 有效改善了时域信号的质量, 且提高了成像结果的信噪比^[55]。

除此之外,利用 Gabor 小波特征用于检测复杂纹理背景下的缺陷^[56]。提出了基于局部协方差特征的图像插值方法,明显提高了 C 扫描图像分辨率,并且减小了边缘模糊效应,提高了图像中缺陷分布评价结果的准确性^[57]。

综上所述,试件扫描检测完成之后所采用的成像算法以及图像增强技术对提高 C 扫描图像的质量起着至关重要的作用,高质量的 C 扫描图像对被测试件及内部结构、缺陷尺寸大小以及形状的展示能力强于普通的 C 扫描图像。

3 超声波扫描显微镜应用领域

超声波扫描显微镜在材料科学检测、半导体测试行业和新能源等行业应用比较广泛。

3.1 材料科学检测领域

超声波扫描显微镜可检测的材料包括金属涂层材料、复合材料和金属材料等。

对发动机叶片材料 NiCoCrAlYTa 六元涂层试样进行检测。作者引入卷积滤波技术和波包分解技术,对界面混叠回波信号进行提取分析,实现了涂层厚度的准确检测^[58]。对薄层材料微小缺陷的检测以及超薄样本声学属性和几何尺寸的测量,使其成为薄层材料定征应用中一种首选的技术手段^[59]。

使用超声扫描显微镜对铝合金多层复合材料包壳厚度进行了检测,检测结果表明 SAM 技术可以有效对厚度约为 0.3~0.6 mm 的铝合金多层复合材料包壳进行厚度测量^[60]。同时,该作者又对铝合金浅焊缝熔深进行了检测,检测结果如图 8 所示^[61]。

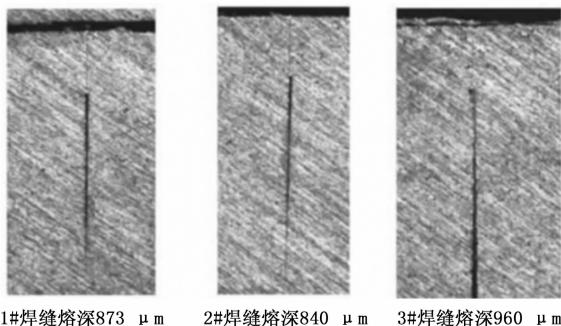


图 8 焊缝熔深检测结果

使用超声波扫描显微技术对复合构件焊缝熔深进行了检测,检测结果表明,焊缝熔深实测平均偏差为 137.4 μm 。该技术解决了焊缝熔深的检测难题,为实际工程应用提供参考^[62]。

对产氚包层焊缝进行了研究,盖板流道封焊为研究对象,采用不同参数探头及水层厚度,提高了检测灵敏度,并解决了盖板流道封焊中小缺陷不易检出的难题^[63]。

使用超声扫描显微镜对铜/铝摩擦焊缝进行检测,通过检测铜和铝的接合面的焊接情况来判断焊接质量,此方法检测灵敏度高、分辨率好、检测结果直观^[64]。

另外,超声波扫描显微镜还可应用于饰品的镀金层厚度的检测。利用超声波扫描显微镜对银镀金和铜镀金样品进行测试,实现对镀层样品厚度的定量分析,在无损前提下得到贵金属样品内部信息,对于未来珠宝检测行业具有重要指导意义^[65]。

3.2 半导体测试行业

超声波扫描显微镜应用在半导体测试行业,主要用于测试晶圆材料及各种封装的电子器件。

电子封装内部缺陷的尺度微小,引脚焊接的间距也很小,传统检测方法很难对其进行检测。利用聚焦高频超声来进行检测,能对试样表面、亚表面及其内部一定深度内的细微结构进行显微成像,用来检测电子封装和评估焊接质量^[66]。开发了一台低成本、最高采样率可达 4 GHz 的高频超声波扫描显微镜,并使用该系统清晰地观察集成芯片的封装情况^[67]。利用超声波扫描显微镜对塑封器件内部进行了检测,可检测塑封器件内部的分层及空洞等缺陷^[68]。使用超声波扫描显微镜对 IGBT 进行了检测,发现 IGBT 模块中的空洞、脱附等界面潜在缺陷,同时发现了 IGBT 模块的结构缺陷,这些缺陷的表征对评 IGBT 模块质量具有重要意义。超声波扫描显微镜还可以对电子芯片进行失效性分析。在电子芯片的失效模式主要分为几种,界面分层、倒焊封装中焊球的熔融、芯片破裂、分层、碎屑及散热盖失效等。使用超声波扫描显微镜的 C 扫描模式可以实现对上述失效模式进行检测^[70-71]。

目前成熟的超声显微镜系统广泛应用于半导体测试行业。超声波扫描显微镜对电路板进行检测的结果如图 9 所示^[2]。

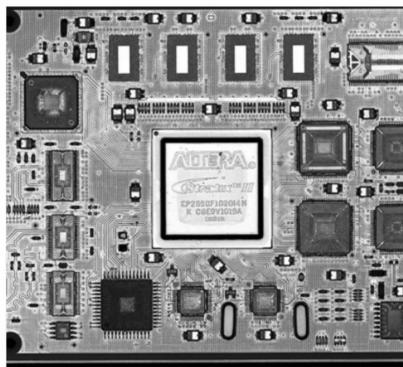


图 9 电路板测试结果

3.3 新能源行业

太阳能电池板为新能源一个典型应用。制造过程中光学不可见的异常和缺陷会降低太阳能电池板的质量,典型缺陷有裂纹、分层或气孔。需要使用超声波扫描显微镜进行成像和分析,减少缺陷的产生。图 10 是一个硅电池与粘接硅电池的基底间界面的声学图像,图像中点状物即为气孔缺陷^[72]。

近年来,各大新能源汽车厂商将热管理系统的性能作

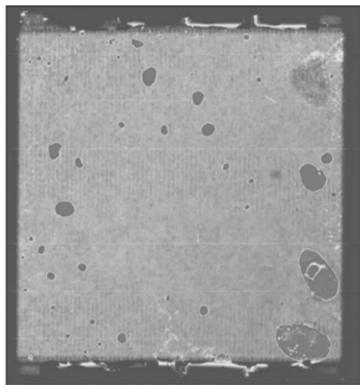


图10 聚光电池和基底间测试结果

为重点研发内容,核心部件水冷板的焊接质量直接关系到新能源汽车的可靠性与安全性。

新能源汽车的电池冷却系统主要包括电池、电池冷却器和水冷板等重要部件。常用电池用钎焊水冷结构主要有两种:水冷板结构和直冷板结构^[73]。这两种结构的水冷板主要焊接工艺完成,因此,除去考虑材料本身强度和产品的耐腐蚀能力以外,更多的是对于焊接质量的保证。图11为对水冷板扫查的结果^[73]。

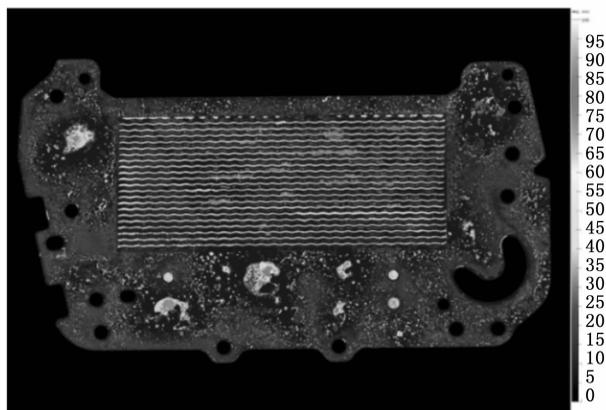


图11 水冷板检测结果

超声波扫描显微镜除了在上述行业应用之外,在新能源的电池行业、生物检测等行业也有应用。

4 超声波扫描显微镜发展

通过以上分析可知,超声波扫描显微镜应用广发,解决了工程上无法检测的难题。国内的设备主要以低频段为主,50 MHz以下比较常见。高频的高端设备基本以国外设备为主。因此,超声波扫描显微镜的发展主要由以下几个方面:

1) 向更高频率超声方向发展。超声波扫描显微镜的检测分辨率是由超声波的频率决定的。超声波频率越高,检测的分辨率越高,但同时,超声波的衰减也增大,得到的超声回波信号越小。因此,超声波的频率和衰减特性,限制了超声波扫描显微镜的使用。

因此,超声波扫描显微镜的发展,必将发展可以激励更高频的超声波设备,使超声波扫描显微镜的应用领域更加广泛。

2) 向自动化检测方向发展。目前,超声波扫描显微镜主要应用于实验室检测,对于生产线的检测需求也越来越多。未来更加自动化的设备需求会增多,如自动上料,自动检测及自动上下水循环系统等。

工业超声检测技术目前很大一部分都是人工操作,检测效率低,数据记录不完善、不规范。随着国家标准化工作的逐步完善,对检测的要求越来越高。而随着工业4.0、大数据等技术地不断推广,现阶段手工检测已经逐步被一些自动化设备替代。当然自动化的发展不是一蹴而就的事情,需要在实践中不断摸索、循序渐进。

3) 向智能化方向发展。超声波扫描显微镜对试件进行检测,检测的缺陷需要人工去判别。随着人工智能技术的发展,针对缺陷类型的识别和判断方法越来越多,对试件的剩余寿命的预测技术也逐渐成熟。因此,超声波扫描显微镜在自动化的基础上会继续向智能化的方向发展。可对缺陷的类型、大小及危害程度进行自动识别,并可对装备的剩余寿命进行预测。

4) 向国产化方向发展。随着国家对高端仪器的研制的政策支持,会加快超声波扫描显微镜的国产化研制工作。目前,国内生产的低频的超声扫描显微镜的硬件主要采用国外的关键组部件进行集成。核心技术未掌握,是限制国内超声波扫描显微镜发展的最大因素。因此,突破关键技术和国产化替代研制,是国内超声波扫描显微镜发展前进的方向和未来。

5 结束语

超声波扫描显微镜在无损检测领域发挥着独特优势。随着超声波技术的发展,声频会越来越高,超声显微镜的本领将越来越大。可以预料,它与其他尖端技术结合,将会发挥出更大、更独特的作用。

参考文献:

- [1] 柳思泉. 超声显微成像技术的应用与研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011, 29 (2): 49-53.
- [2] 钢研纳克无损检测. 材料分析新手段—超声波显微镜 [EB/OL]. (2023-02-21) [2022-10-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/J9WV793Vy4uW6fvCMzEIXw>.
- [3] NDT 互联网联盟. 你别闹了, 超声检测的 A 扫描、B 扫描、C 扫描你全明白了么? [EB/OL]. (2023-02-21) [2019-01-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/G0T-DrpmuVvh-ifjB-E2iA>.
- [4] 王坤, 冷涛, 毛捷, 等. 超声显微检测技术在电子封装中的应用与发展 [J]. 应用声学, 2021, 40 (5): 657-666.
- [5] 陈钊宝. 高频超声扫描系统开发及其应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [6] 陈戈林, 任文革. 声学显微镜及在电子器件工业中的应用

[J]. 半导体技术, 1994, 2 (1): 50-57.

- [7] 连红运, 吴定允, 李 南. 工业超声显微镜高速信号采集系统的研制 [J]. 仪表技术与传感器, 2008 (9): 50-57.
- [8] 连红运, 屈芳升, 王书双. 基于 PCI 总线的超声显微镜研究与设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (4): 86-91.
- [9] 张 正. 高频超声显微测量系统 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [10] 白小龙. 基于超声显微镜的薄层材料多参量一体化定征关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [11] MERILAINEN A I, FABRITIUS T, ESKELINEN J, et al. High frequency broadband arbitrary coded excitation in ultrasound microscopy [C] //2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2012.
- [12] HABIB A, VIERINEN J, ISLAM M A, et al. In vitro volume imaging of articular cartilage using chirp-coded high frequency ultrasound [C] //2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2018.
- [13] MIN G K, CHOI H, KIM H H, et al. Bipolar pulse generator for very high frequency (>100 MHz) ultrasound applications [C] //2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014.
- [14] XU X C, YEN J T, SHUNG K K. A low-cost bipolar pulse generator for high-frequency ultrasound applications [J]. Ultrasonics Symposium, IEEE, 2007, 54 (2): 443-447.
- [15] LIU F, SU L, FAN M, et al. Using scanning acoustic microscopy and LM-BP algorithm for defect inspection of micro solder bumps [J]. Microelectronics Reliability, 2017, 79 (12): 166-174.
- [16] MERILAINEN A I, KANANEN V, FRIDLUND C, et al. GHz ultrasonics with arbitrary code excitation [C] //2013 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2013.
- [17] 楚现涛, 唐 丹, 王 欣, 等. 一种新的激光扫描仪多回波处理电路设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15 (1): 65-69.
- [18] BROWN J A, LOCKWOOD G R. A Low-cost, high-performance pulse generator for ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2002, 49 (6): 848-851.
- [19] BONI E, BASSI L, CELLAI A. High frequency GaN-based pulse generator with active T/R switch circuit [C] //2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014.
- [20] SALAZAR J, CHAVEZ J A, ORTEGA J A, et al. High-power high-resolution pulser for air-coupled ultrasonic NDE applications [C] //IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, IEEE, 2002.
- [21] 袁雪林, 梁步阁, 吕 波, 等. 探地雷达高功率高稳定度脉冲源设计 [J]. 强激光与粒子束, 2007 (10): 1689-1692.
- [22] 王泰华, 张艳明. 煤矿井下超宽带脉冲电路的设计和仿真 [J]. 煤矿机电, 2013 (6): 5-8.
- [23] 孙正淳. 基于雪崩三极管 Marx 脉冲源的抖动抑制与峰值功率合成 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [24] CHENG L, CHEN Z, WANG H, et al. A novel avalanche transistor-based nanosecond pulse generator with a wide working range and high reliability [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-14.
- [25] 李 宇, 路 崇, 叶 威, 等. 一种基于双三极管并联的 UWB 窄脉冲发生器 [J]. 电子器件, 2017, 40 (2): 333-336.
- [26] 王奕文, 邵馨叶, 邵建龙. 水听器用信号调理电路相关问题研究 [J]. 电子测量技, 2020, 43 (1): 127-131.
- [27] 陈源林, 孙尚民, 许西宁. 基于 FPGA 和 STM32 的多通道超声信号同步采集系统设计 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (11): 142-147.
- [28] KUMA R, THANGARAS U, BHARATH A, et al. Temperature-compensated db-linear digitally controlled variable gain amplifier with DC offset cancellation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61 (7): 2648-2661.
- [29] 张家田, 秦宏伟, 严正国. 双模式宽带程控增益放大器模块设计 [J]. 现代电子技术, 2022, 45 (2): 62-66.
- [30] 张维昭, 马胜前, 冉兴萍. 宽频二阶程控低通滤波器设计 [J]. 电子技术应用, 2011, 37 (7): 97-99.
- [31] 贾冀洲, 叶 强. 低损耗高抑制 LTCC 双工器设计与实现 [J]. 压电与声光, 2019, 41 (6): 770-774.
- [32] 董金宁, 池思慧, 刘 宛, 等. 基于 CFA 的六阶巴特沃斯低通滤波器设计 [J]. 电子技术, 2018, 47 (9): 56-59.
- [33] HUANG Z, CHENG Y, LIU Y. VHF high-power tunable low-pass filter based on nested coupled helical inductor [J]. International Journal of Electronics, 2021, 108 (5): 876-886.
- [34] CHEN J, FEI C L. A review of ultrahigh frequency ultrasonic transducers [J]. Frontiers in Materials, 2022, 8: 733358.
- [35] 吴大伟. 高频超声换能器技术研究进展与展望 [J]. 振动·测试与诊断, 2017, 37 (1): 1-12.
- [36] FEI C, CHIU C T, CHEN X, et al. Ultrahigh frequency (100~300 MHz) ultrasonic transducers for optical resolution medical imaging [J]. Scientific Reports, 2016, 6 (1): 28360.
- [37] LIM H G, SHUNG K K. Quantification of inter-erythrocyte forces with ultra-high frequency (410 MHz) single beam acoustic tweezer [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2017, 45: 2174-2183.
- [38] CHEN X, LAM K H, CHEN R, et al. An adjustable multi-scale single beam acoustic tweezers based on ultrahigh frequency ultrasonic transducer [J]. Biotechnology & Bioengineering, 2017, 114: 2637-2647.
- [39] LI D, FEI C, ZHANG Q, et al. Ultrahigh frequency ultrasonic transducers design with low noise amplifier integrated circuit [J]. Micromachines, 2018, 9 (10): 515.

- [40] FEI C, HSU H S, VAFANEJAD A, et al. Ultrahigh frequency ZnO silicon lens ultrasonic transducer for cell-size microparticle manipulation [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 729: 556-562.
- [41] LUO J T, FAN B, ZENG F, et al. Influence of Cr-doping on microstructure and piezoelectric response of AlN films [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2009, 42 (23): 235406.
- [42] WISTRELA E, CHMIED S. Impact of sputter deposition parameters on the microstructural and piezoelectric properties of Cr_xAl_{1-x} N-x thin films [J]. *Thin Solid Films: An International Journal on the Science and Technology of Thin and Thick Films*, 2018, 648: 76-82.
- [43] SANO K H, KARASAWA R, YANAGITANI T. ScAlN thick film ultrasonic transducer in 40~80 MHz [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2018, 65: 2097-2102.
- [44] ZHU B, FEI C, WANG C, et al. Self-focused AlScN film ultrasound transducer for individual cell manipulation [J]. *ACS Sensors*, 2016, 2: 172-177.
- [45] SHARP C C, FENG G H, ZHOU Q F, et al. 200 MHz self-focused ZnO MEMS ultrasonic transducers for biomedical imaging [C] //2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, 2004, 3: 1946-1949.
- [46] FEI C, HSU H S, VAFANEJAD A, et al. Ultrahigh frequency ZnO silicon lens ultrasonic transducer for cell-size microparticle manipulation [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 729: 556-562.
- [47] JAKOB A, WEISS E C, KNOLL T, et al. Silicon based GHz acoustic lenses for time resolved acoustic microscopy [C] // Ultrasonics Symposium, 2007: 1605-1608.
- [48] JAKOB A, BENDER M, KNOLL T, et al. Comparison of different piezoelectric materials for GHz acoustic microscopy transducers [C] // 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2009.
- [49] 窦致夏. 双通道快速超声C扫描系统的研制及成像增强算法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [50] MANJULA K, VIJAYAREKHA K, VENKATRAMAN B, et al. Ultrasonic time of flight diffraction technique for weld defects: a review [J]. *Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology*, 2012, 4 (24): 5525-5533.
- [51] SEMMENS J E, KESSLER L W. Application of acoustic frequency domain imaging for the evaluation of advanced micro electronic packages [J]. *Microelectronics Reliability*, 2002, 42 (9/10/11): 1735-1740.
- [52] 郭祥辉. 电子封装结构超声显微检测与热疲劳损伤评估 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [53] 樊琼. 超高频超声显微测量系统 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [54] SONG Y, KUBE C M, TURNER J A, et al. Statistics associated with the scattering of ultrasound from microstructure [J]. *Ultrasonics*, 2017, 80: 58-61.
- [55] HONARVAR F, TABATABAI S A M, DUSATKO T, et al. A new signal processing technique for enhancement of ultrasonic testing signals [C] //Proc. 16th World Conf. on Nondestr. Testing, Montreal, Canada, 2004.
- [56] KUMAR A, PANG G. Defect detection in textured materials using Gabor filters [C] //2002 IEEE Industry Applications Conference, 2002.
- [57] 曹宗杰, 潘希德, 薛锦, 等. 提高超声C扫描图像分辨率的插值方法研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39 (9): 921-924.
- [58] 胡聪. NiCoCrAlYTa 六元涂层厚度的超声显微成像检测方法研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- [59] 陈剑. 基于超声显微镜的薄层材料多参量一体化定征关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [60] 任俊波, 唐月明. 铝合金多层复合材料包壳厚度超声扫描显微检测方法研究 [J]. *核动力工程*, 2016, 37 (4): 44-47.
- [61] 任俊波, 唐月明, 王学权, 等. 铝合金浅焊缝熔深超声显微检测技术研究 [J]. *材料导报: 纳米与新材料专辑*, 2015, 29 (1): 80-82.
- [62] 杨力, 张侃, 王学权, 等. 基于超声显微技术的复合结构件焊缝熔深检测 [J]. *科技视界*, 2019 (9): 74-75.
- [63] 王学芹, 王晓宇, 廖洪彬, 等. 超声显微检测方法对产氚包层焊缝的适用性研究 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2019, 39 (4): 359-364.
- [64] 魏志军, 沈海红. 超声显微技术在铜/铝摩擦焊质量控制中的应用 [J]. *物理测试*, 2022, 40 (1): 15-19.
- [65] 田庚凡, 黎敏, 张颖, 等. 应用超声显微镜技术检测饰品镀金层厚度 [J]. *贵金属*, 2022, 43 (S1): 170-175.
- [66] 樊琼. 超高频超声显微测量系统 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [67] 刘中柱, 徐春广, 郭祥辉, 等. 电子封装与焊接质量的超声显微检测技术 [J]. *电子与封装*, 2012, 12 (3): 1-6.
- [68] 夏雷, 邹治晏. 超声显微镜在塑封器件内部缺陷检测中的应用 [J]. *可靠性物理与失效分析技术*, 2020, 38 (3): 34-39.
- [69] 李寒, 曾雄, 徐凝华, 等. 超声扫描在IGBT模块质量分析中的应用 [J]. *大功率变流技术*, 2016, 2: 30-34.
- [70] 陈媛. CSP器件的无损检测方法 [J]. *环境技术*, 2010, 28 (3): 24-26.
- [71] 毛均泓. 扫描声学显微镜在半导体封装失效分析中的应用及前景 [J]. *华东科技*, 2010, 11: 78-79.
- [72] TOM, ADAMS. 采用声学显微镜确保太阳能电池的可靠性 [J]. *集成电路应用*, 2009, 8: 40-41.
- [73] Hiwave 和伍制造营. 水冷板焊接质量超声检测 [EB/OL]. (2023-04-23) [2023-02-18]. https://mp.weixin.qq.com/s/fr3Rrbw3lSnuzqoKiI_IjQ.