

◇ 综述 ◇

超声显微检测技术在电子封装中的应用与发展

王坤^{1,2} 冷涛[†] 毛捷^{1,2} 廉国选¹

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 超声显微检测技术应用于电子封装领域始于 20 世纪 80 年代,如今已是检测电子封装可靠性和完整性的重要手段,被广泛应用到了电子封装的缺陷检测和精密测量等方面。针对电子封装的超声显微检测存在回波重叠、信噪比低等问题,近年来,发展了许多时频分析方法,用于获得优于常规方法的纵向分辨率,即实现超分辨率。该文首先介绍了超声显微检测的发展历史,对其检测原理和分辨率理论进行了简述;其次,综述了超声显微检测技术在电子封装中的主要应用与发展现状;然后,对超声显微检测的超分辨率成像方法进行了综述,分别介绍了基于小波分析的反卷积、连续小波变换和稀疏表示在实现超分辨率时的原理及适用场景;最后,探讨归纳了电子封装超声显微检测的主要研究方向及难点。

关键词: 超声显微检测; 电子封装; 超分辨率; 稀疏表示

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2021)05-0657-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.002

Application and development of scanning acoustic microscopy testing technology in electronic packaging

WANG Kun^{1,2} LENG Tao¹ MAO Jie^{1,2} LIAN Guoxuan¹

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application of scanning acoustic microscopy testing technology in the field of electronic packaging began in the 1980s. It is now an important means of testing the reliability and integrity of electronic packaging, and has been widely used in defect detection and precision measurement of electronic packaging. In view of the problems of echo overlap and low signal-to-noise ratio in the scanning acoustic microscopy testing of electronic packaging, many time-frequency analysis methods have been developed in recent years to obtain axial resolution, which is superior to conventional methods, that is, to achieve super-resolution. In this paper, the development history of scanning acoustic microscopy testing is introduced, and its detection principle and resolution theory are briefly described. Secondly, the main application and development status of scanning acoustic microscopy testing technology in electronic packaging are summarized. Then, the super-resolution imaging methods of scanning acoustic microscopy testing are summarized, and the principles and applicable scenarios of wavelet analysis based deconvolution, continuous wavelet transform and sparse signal representation in achieving super-resolution are introduced. Finally, the main research directions and difficulties of scanning acoustic microscopy testing of electronic packaging are discussed and summarized.

Keywords: Scanning acoustic microscopy testing; Electronic packaging; Super-resolution; Sparse signal representation

2020-11-09 收稿; 2021-01-24 定稿

作者简介: 王坤 (1994-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

† 通信作者 E-mail: lengtao@mail.ioa.ac.cn

0 引言

集成电路制造工艺中缺陷的在线检测是2020年中国科协发布的十个重大工程技术难题之一,电子封装是集成电路后道制造工艺中的重要工序,对其缺陷的检测具有重要意义。电子封装是指将一个或多个集成电路芯片包装、连接成电路器件的制造工艺^[1],它不仅具有电源和信号分配的作用,而且为芯片提供机械支撑、芯片保护和散热通道等支持。近年来,电子封装持续朝着超小型化、超高密度和高复杂度方向发展,其结构越来越复杂,服役环境越来越恶劣,人们对电子封装的可靠性需求日益提高。如图1所示,电子封装层次结构复杂,在制作、封装、集成和服役过程中难免会出现缺陷,主要的缺陷类型有分层、裂纹、空洞和夹杂物,在使用过程中,这些缺陷在热循环、电磁以及应力场的作用下不断扩展和演化,最终导致电子器件性能失效^[2],危害人们的财产和生命安全。

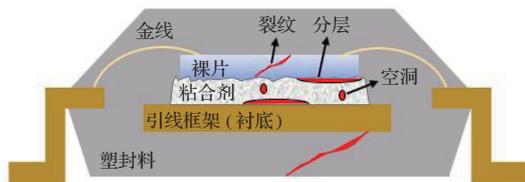


图1 电子封装典型结构和缺陷类型

Fig. 1 Typical structure and defect types of electronic packaging

为了提高电子封装的可靠性,发现其表面和内部的缺陷,需对其进行精确的无损检测,由于电子封装结构普遍集成度高、尺寸微小,要求无损检测技术有较高的分辨率。X射线检测和超声显微检测是电子封装领域最常用的两种无损检测技术,X射线检测技术采用的是透射模式,难以检测出试样内部的分层缺陷、微小裂纹,且对人体有害^[3];超声显微检测技术使用大于20 MHz的超声波,分辨率可以达到微米级甚至亚微米级,是一种可以无损、精细、高灵敏度地检测试样亚表层及内部结构的无损检测技术^[4],此外,超声显微检测技术对多层结构中的粘接不良、封闭裂纹等面积性缺陷特别敏感,在对电子封装进行检测时具有独特的优势。

电子封装是典型的多层结构,各层厚度约为亚毫米级甚至微米级,在对电子封装进行超声显微检测时,会存在由于纵向分辨率不足导致的回波重叠

问题,虽然提高超声波频率可以提高纵向分辨率,但是较高频率的超声波衰减大、穿透能力低,因此,如何在不增加超声波频率的情况下提高纵向分辨率,即实现超分辨率,具有重要的现实意义。对此,本文综述了超声显微检测技术在电子封装中的主要应用与发展,对超声显微检测的超分辨率问题进行了分析,介绍了现有研究方法在实现超分辨率时的原理及适用场景,为后续研究提供依据。

1 超声显微检测概述

1.1 超声显微检测技术的发展

声学显微镜(Scanning acoustic microscope, SAM)就是利用超声显微检测技术对材料进行无损、快速和高精度检测的设备,20世纪30年代,前苏联学者Sokolov提出了声学显微镜的设想,由于当时高频超声波的产生和信号处理技术的限制,直至1973年,才由Stanford大学Quate教授研究组研制出第一台声学显微镜,其分辨率为10 μm ,不如光学显微镜^[5];1978年,Jipson等^[6]将声学显微镜的频率提升至将近3 GHz,使之达到了与光学显微镜相当的分辨率;1983年,Hadimioglu等^[7]使用4.4 GHz的超声波对置于沸水中的试样进行了检测,获得了0.2 μm 的分辨率;1990年,Muha等^[8]使用15.3 GHz的超高频换能器,对置于加压液态氦中的试样进行了检测,分辨率达到了15 nm。声学显微镜、光学显微镜和电子显微镜是研究物质微观结构和性质的重要工具,其中,声学显微镜根据使用的频率能穿透到物体内部不同深度,精准聚焦到需要检测的层面,已被广泛应用在生物医学科学、材料科学、工艺学及微电子学等领域^[9]。如2007年,Weiss等^[10]使用0.86 GHz声学显微镜测量了活体HeLa细胞的声学特性,并测得了亚细胞结构的弹性参数;2020年,Burak等^[11]使用声学显微镜对模拟组织材料的声学特性进行了量化;2020年,Hertl等^[12]研究了水、异丙醇和氟碳等液体作为耦合液,用于电子元件的超声显微检测,获得了各种电子元件的失效分析图像。目前,研制声学显微镜商用设备的公司主要有德国PVA公司、美国Sonix公司、美国Sonoscan公司和中国电子科技集团公司第四十五研究所等,这些公司声学显微镜的分辨率均可达到亚微米级别^[13]。

1.2 超声显微检测原理

超声显微检测技术利用超声波对材料内部和表面进行检测，使用的超声波频率一般大于20 MHz，超声波在传播的过程中，遇到不同声阻抗的物质时，就会发生反射，反射波的幅值和相位会因材料形状和密度的不同而有所差异，因此使用超声波信号来获取材料缺陷和材料特性等信息^[3]。超声显微检测系统结构如图2所示，由声透镜聚焦超声换能器、脉冲发生器、接收放大电路、高精度扫描平台等单元组成。由计算机操控控制卡，然后对各个单元进行控制，由脉冲发生器产生高压窄脉冲激励信号，激励匹配后的声透镜聚焦换能器产生超声波，超声波通过耦合液入射到试样，由试样反射的超声波将携带试样的信息反射回声透镜聚焦换能器^[14]，反射波经过放大、滤波、A/D采集等处理，最终被传输至计算机，完成之后的信号和成像处理，配合不同的扫描方式和成像方法，SAM可以精准、快速地检测出缺陷的位置、形状和尺寸。

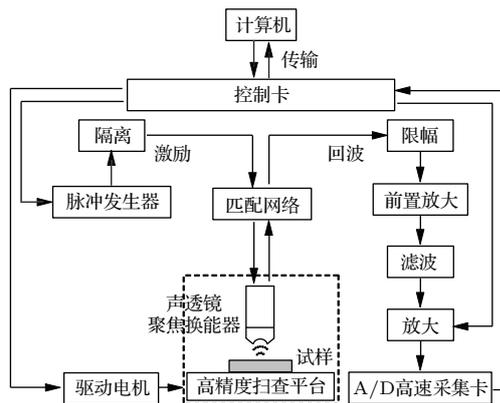


图2 超声显微检测系统

Fig. 2 Scanning acoustic microscopy testing system

1.3 超声显微检测分辨率

波在介质中的传播有3种描述机制：相干性、扩散性和近场性，只有在相干性机制下，波长才决定分辨率。超声波的传播距离比波长大几个数量级时，

依然能够保持相干性，所以超声波的分辨率取决于波长^[15]。SAM的分辨率分为横向分辨率和纵向分辨率，横向分辨率指在垂直于超声波传播方向上，可以区分开两个目标点之间的最小距离，由于SAM所用声透镜的球面像差对成像的影响很小，一般可以忽略，因此其横向分辨率主要由衍射极限决定，在理论上常用Sparrow准则来估算，即

$$d_{\text{Sparrow}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} 1.02 \lambda F^{\#}, \quad (1)$$

式(1)中， $F^{\#} \cong z_0/d$ ， z_0 为焦距， d 为换能器直径， λ 为换能器中心频率对应的波长^[16-17]。因此，SAM的横向分辨率由超声波波长、换能器晶片直径和焦距决定，理论上可以通过提高超声波频率和使用大孔径、短焦距的换能器来提升SAM的横向分辨率。

SAM的纵向分辨率指在超声波传播方向上可以区分开两个目标点之间的最小距离，主要取决于超声波频率，由脉冲持续时间决定，纵向分辨率理论值为

$$d_{\text{axial}} = \frac{ct_0}{2}, \quad (2)$$

式(2)中， c 为介质中声速， t_0 为脉冲持续时间，设计较好的换能器脉冲持续时间可以在两个周期以内。在传统的时域或频域成像中，纵向分辨率受到A扫描超声回波信号在时域或频域重叠的限制，已有研究^[18-20]通过时频分析方法来分析重叠的回波，提高了SAM的纵向分辨率。

不同频率的超声波在不同介质中的分辨率和穿透深度如表1^[21]所示，由于超声波在介质中的衰减与频率有关，超声波频率越高、衰减越大、穿透深度越小，因此应根据实际检测需求，选择合适的超声波频率。对于常见的电子封装，在厚度方向上，其各层之间的厚度约为几十至几百微米；在水平方向上，其内部结构的尺寸(如焊接凸点)为百微米左右，因此，对于电子封装的检测，常用的超声波频率为20 ~ 200 MHz。

表1 超声波在不同介质中的分辨率和穿透深度^[21]

Table 1 The resolution and penetration depth of ultrasonic in different media^[21]

频率/MHz	横向分辨率/ μm		纵向分辨率/ μm			穿透深度/mm	
	聚合物	金属	水	聚合物	金属	聚合物	金属
15	150	300	75	150	300	0.8-4.0	8-75
50	45	90	22	45	90	0.1-1.0	4-20
100	35	70	10	22	45	0.1-0.5	3-10
230	25	45	<5	<10	<20	0.2	2

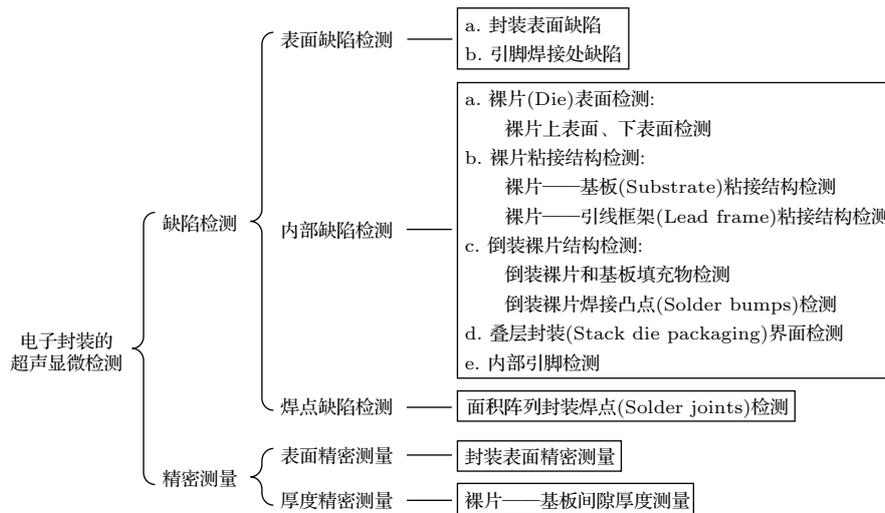


图3 电子封装的超声显微检测应用及分类

Fig. 3 Application and classification of scanning acoustic microscopy testing of electronic packaging

2 电子封装的超声显微检测

目前,超声显微检测技术在电子封装中的应用主要分为两大类,一是缺陷检测,包括表面、内部和焊点的缺陷检测,用于检测出电子封装存在的分层、裂纹、空洞和夹杂物等缺陷;二是精密测量,包括表面精密测量和厚度精密测量,用于对电子封装表面或内部厚度进行精密的测量,具体应用及分类如图3所示。

2.1 缺陷检测

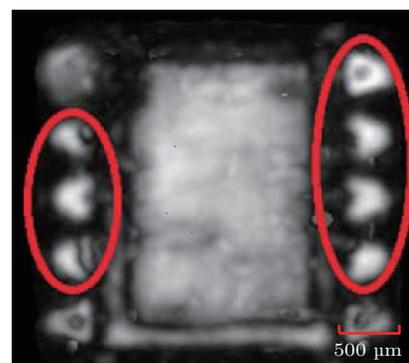
2.1.1 表面缺陷检测

SAM对电子封装的表面进行C扫查,不仅可以用于检测封装表面存在的裂纹、空洞和夹杂物等缺陷,更常见的是用于贴片式封装引脚焊接处的缺陷检测,用于发现贴片式封装引脚焊接处的虚焊、分层和空洞等问题。2012年,刘中柱等^[2]使用SAM,把时间闸门设置在引脚焊接处,通过C扫查发现了引脚焊接处的虚焊问题。

2.1.2 内部缺陷检测

电子封装是典型的多层结构,这种结构可能存在的缺陷包括分层、粘接不良、裂纹和空洞,通常集中在不同层之间的界面,使用SAM对电子封装内部进行缺陷检测有着其他检测方法无可比拟的优势。2000年,Abdul等^[22]使用SAM对裸片-引线框架粘接结构的粘接界面进行了检测,表明反射系数在很大程度上取决于界面粘接质量,可以用作表征粘接质量的定量指标。2009年,Santospirito等^[23]使用50 MHz Sonoscan D9000声学显微镜对裸片粘

接结构中的脱粘分层缺陷进行了检测,由于50 MHz超声波在黏合剂中的波长约为30 μm ,当层的厚度小于或与超声波的波长相当时,层的上下表面的反射回波会重叠,此时就很难分析界面的完整性。2017年,Qiu等^[24]使用30 MHz PVA SAM 300声学显微镜对微型小外形封装(Miniature Small Outline Package, MSOP)、小外形集成电路封装(Small Outline Integrated Circuit Package, SOIC)、四方扁平式封装(Low-profile Quad Flat Package, LQFP)等封装的内部引脚处进行了C扫查,其中MSOP封装内部引脚处C扫查结果如图4^[24]所示,由于引脚分层造成更大的声阻抗失配,产生了更强的回波信号,C扫查成像结果表现为明亮的白色区域。此外,针对倒装裸片,SAM可以对倒装裸片和基板之间填充物的空洞^[25]、倒装裸片和基板之间微焊接凸点的完整性^[26]进行检测;针对叠层封装,SAM可以对裸片之间界面的缺陷^[27]进行检测。

图4 MSOP封装内部引脚处的超声显微成像^[24]Fig. 4 Acoustic micro imaging of internal pins of MSOP^[24]

2.1.3 焊点缺陷检测

对于面积阵列封装,如BGA、CSP和Flip Chip,其I/O引出端在器件底部呈矩阵分布,适应了表面安装技术发展的需求,解决了高性能、高密度和多I/O数等封装难题^[28],这类封装的芯片通过底部的焊点连接到印刷电路板上,由于芯片和印刷电路板之间的热膨胀系数的差异,发生不一致的热变形,当焊点所受剪切应力超过焊料的断裂韧性,就会导致焊点循环疲劳失效,这时就可使用SAM对焊点进行检测,评估焊接互连质量。2010年, Yang等^[29]对Flip Chip封装芯片进行了热循环实验,并使用230 MHz Sonoscan D9000声学显微镜对芯片焊点进行了C扫查,结果如图5^[29]所示,热循环后焊点出现裂纹,产生了更强的回波信号,C扫查成像结果由灰色区域变成了明亮的白色区域,实现了异常焊点快速、准确的检测识别,2012年, Yang等^[30]提出了X射线检测和超声显微检测相结合的焊点检测方法,将X射线图像中获取的空洞信息与超声图像特征相融合,提高了异常焊点识别的准确性。

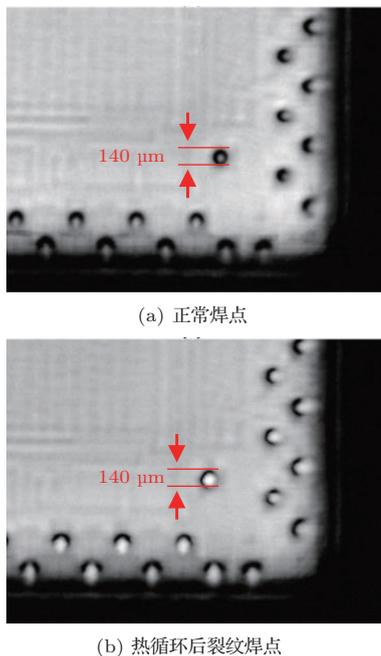


图5 Flip Chip封装焊点的超声显微成像^[29]

Fig. 5 Acoustic micro imaging of solder joints of Flip Chip package^[29]

2.2 精密测量

除了缺陷检测,超声显微检测技术在电子封装领域的另一类重要应用就是精密测量,包括电子封装的表面精密测量和厚度精密测量,其中,表面精密

测量和表面缺陷检测类似,这里不做过多说明。对于厚度精密测量,超声显微检测技术可以测量电子封装内部的层厚度和间隙厚度,例如,倒装裸片和基板通过焊接凸点进行连接,然后通过填充物消除它们之间的热应力来显著延长疲劳寿命,它们之间的间隙厚度对于形成良好形状的焊接凸点和固定体积填充物的恒定倒圆角至关重要。2001年, Tang等^[31]使用230 MHz SAM对倒装裸片和基板之间的间隙厚度进行了测量,结果表明SAM测量结果与传统的破坏测量方法相比偏差为1.36%,测量结果可靠,为电子封装厚度精密测量提供了一种无损、精确的测量方法。

3 超声显微检测的超分辨率成像方法

电子封装的典型特征就是多层结构,对于高集成度的电子封装,其各层厚度较小,约为亚毫米级甚至微米级,在对其内部界面进行检测时,由于相邻界面的反射回波在时域和频域上的重叠,两个反射回波的振幅会相互影响,导致波形畸变;在对其内部缺陷进行检测时,缺陷回波会被附近界面的反射回波所掩盖,上述多个回波的重叠问题^[32],导致不能在时域或者频域很好地分辨出目标回波,虽然提高超声波频率可以提高SAM的纵向分辨率,但是较高频率的超声波衰减大、穿透能力低,因此需要通过信号处理的方式分析重叠的回波,在不增加换能器频率的情况下提高纵向分辨率。此外,不同层之间的声阻抗差异导致超声波在试样内部发生多次反射造成的高衰减、高频超声信号本身的高衰减、来自检测系统和试样的噪声等原因,都会导致超声回波信号的信噪比较低,需要通过信号处理的方式来增强信号或者降低噪声,提高信噪比。

由于超声回波信号通常是受时间和频率限制的非平稳信号,因此,时频分析方法更适用于降低噪声和分析重叠的回波,实现超分辨率。非平稳信号的时频分析方法主要有3类^[33],一是二次型方法,如Wigner-Ville分布、Choi-Williams分布、Margenau-Hill分布;二是线性时频表示,如傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换(Wavelet transform, WT);三是稀疏表示(Sparse signal representation, SSR),如匹配追踪(Matching pursuit, MP)、基追踪。

二次型方法虽然在一定程度上揭示了信号的时频域信息,但是由于其固有交叉项干扰的影响,使得获得的信息变得不准确。WT是一种强有力的信

号时频分析方法,可以根据需求选取不同的尺度参数,以便选择不同的时间和频率分辨率,在去噪方面,WT利用信号和噪声在WT后所表现出来的不同特征进行信噪分离,不受信号与噪声频带重叠的影响,去噪优点明显,已有研究提出了基于WT的方法解决电子封装检测的上述问题,如2002年,Jhang等^[18]使用SAM对裸片顶层进行检测时,针对裸片顶层和底层的反射回波的叠加问题,提出了基于小波分析的反卷积方法(Wavelet analysis based deconvolution, WABAD),该方法有效地提高了纵向分辨率;2006年,Zhang等^[19]采用连续小波变换(Continuous wavelet transform, CWT)的时频分析方法,分离了重叠的回波,实现了优于传统时域和频域成像方法的纵向分辨率。SSR则是一种更加灵活、简洁和自适应的表示,不同于WT的是其采用的分解集是过完备原子字典而不是信号空间的正交基或非正交基,2004年,Zhang等^[20]使用SSR的时频分析方法,实现了信噪比和纵向分辨率的提高,下面分别对这3种方法的原理和适用场景进行分析。

3.1 基于小波分析的反卷积

在反射式超声检测系统中,系统接收到的超声回波信号 $y(t)$ 可以表示为换能器脉冲响应 $x(t)$ 与介质反射函数 $h_n(t)$ 的卷积,即

$$y(t) = x(t) \otimes h_n(t) + \xi(t), \quad (3)$$

式(3)中, $h_n(t) = \sum_{i=1}^n c_i \delta(t - t_i)$ 表示幅度变换和时移, $\xi(t)$ 为来自检测系统和试样的噪声。反卷积是卷积的逆过程,即从含噪声的时域超声回波信号 $y(t)$ 中估计出介质反射函数 $h_n(t)$,常用的反卷积方法有Wiener滤波法、 l_2 反卷积法等,其中Wiener滤波被认为是最成熟的方法。

为了解决反卷积方法对信噪比要求很苛刻且只适用于换能器脉冲响应与反射回波信号波形相似的情况,Jhang等^[18]提出了基于小波分析的反卷积方法,首先,该方法利用离散小波变换(Discrete wavelet transform, DWT)将超声回波信号 $y(t)$ 分解成第一层近似部分(即低频分量,A1)和细节部分(即高频分量,D1);然后,将A1分解成第二层近似部分(A2)和细节部分(D2),以此类推;最后,对某一层近似部分进行反卷积操作,因为近似分量中的各个回波信号较为相似,所以可以成功地利用反卷积方法分辨出重叠的回波。如图6^[18]所示,在对电子封

装裸片的上表面或下表面进行检测时,当裸片厚度小于或相当于超声波脉冲持续长度的一半时,裸片的上表面的反射回波和下表面的反射回波就会发生重叠,此时超声回波信号 $y(t)$ 如图7(a)所示,由回波 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 组成,其中 $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 发生了重叠,由于介质的频率相关衰减和换能器的聚焦效应,三者波形有较大差异。将封装表面回波 $s_1(t)$ 看作换能器脉冲响应 $x(t)$,对超声回波信号 $y(t)$ 进行基于小波分析的反卷积操作,结果如图7(b)所示,由图可知,该方法可以分辨重叠的回波。

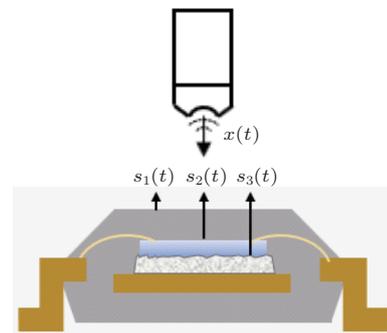
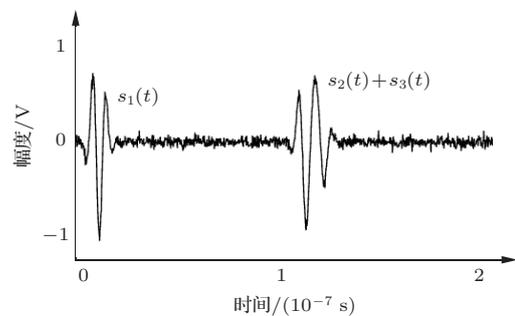
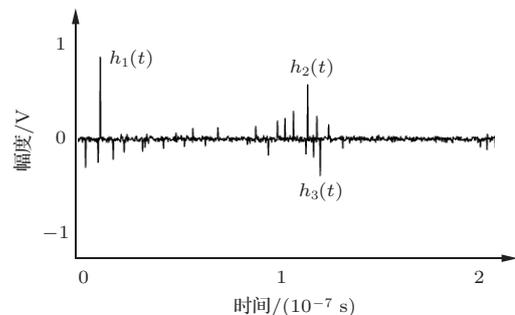


图6 裸片的超声显微检测^[18]

Fig. 6 Scanning acoustic microscopy testing of die^[18]



(a) 超声回波信号



(b) 基于小波分析的反卷积结果

图7 基于小波分析的反卷积

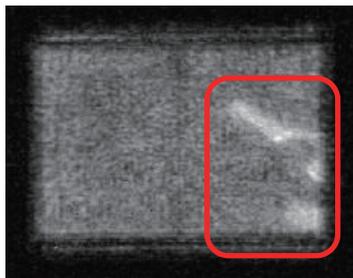
Fig. 7 Wavelet analysis based deconvolution

基于小波分析的反卷积方法是对反卷积方法的改进,解决了反卷积方法应用的局限性,但该方法只有选择了合适的层才能很好地分辨出重叠的回波;此外,在实际应用中,该方法得到的介质反射函数 $h_n(t)$ 有一定噪声,需精确已知各个界面或缺陷的具体位置,才能确定各个回波对应的反射函数,分辨重叠的回波。

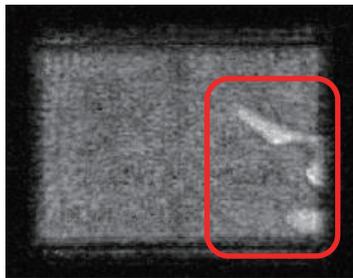
3.2 CWT

针对A扫查超声回波信号在时域或频域的重叠问题,如果可以在时频域中分辨重叠的回波,则可提高纵向分辨率。考虑到回波信号的非平稳特性,时频表示在提取回波信息方面比时域和频域方法有更好的效果。Zhang等^[19]使用CWT的时频分析方法分析重叠的回波,并对叠层封装裸片之间的界面进行了C扫查,结果如图8^[34]所示,可以观测到更清晰分层缺陷,在不增加超声波频率的条件下提高了纵向分辨率,该方法的具体实现步骤为:

- (1) CWT将A扫查信号分解为时频表示;
- (2) 识别出小波系数的局部极大值,局部极大值与代表回波的快速变化点有关;
- (3) 对局部极大值进行阈值操作、去噪和选择有效的局部极大值,选定的系数表示试样内部结构和缺陷反射出的不同回波分量;



(a) 传统时域成像



(b) 基于CWT的时频成像

图8 叠层封装的超声显微成像^[34]

Fig. 8 Acoustic micro imaging of stacked die package^[34]

(4) 根据使用的换能器频率和试样中的目标界面或缺陷位置确定时频窗,并选取最大系数值;

(5) 在每个 $x-y$ 位置显示所选系数值,生成C扫查图像。

Zhang等^[19]的研究结果表明,使用基于CWT的时频成像方法获得的纵向分辨率明显高于传统的时域和频域成像方法,但是,该方法的也有局限性,如^[33]: (1) 对分辨率的提高有限,只适合回波在时域或频域重叠较少的情况; (2) 对信号的分析不是自适应的,只有待分析信号的时频结构和基对时频空间划分的结构相近时,才会有很好的分析结果; (3) 小波分解结果不是稀疏的,由于基函数之间线性无关,小波分解之后信号的能量分散在不同的基上,致使信号表示不简洁,即信号表示不是稀疏的,不利于信号的处理和信息提取。

3.3 SSR

3.3.1 基于SSR的超分辨率成像方法

已知过完备集合 $\mathbf{D} = \{\mathbf{g}_k; k = 1, 2, \dots, K\}$,其元素是张成整个Hilbert空间 $H = \mathbb{R}^N$ 的单位矢量,若 $K \geq N$,称集合 \mathbf{D} 为过完备原子字典,简称原子字典,任给信号 $f \in H$,在 \mathbf{D} 中自适应地选取 m 个原子对信号 f 做 m 项逼近,即

$$f_m = \sum_{\gamma \in \mathbf{I}_m} c_\gamma \mathbf{g}_\gamma, \quad (4)$$

其中, \mathbf{I}_m 是 \mathbf{g}_γ 的下标集,由于 m 远小于空间 H 的维数 N ,式(4)定义的逼近被称为稀疏逼近,令 $\Gamma = \{\mathbf{I}_m | f = \sum_{\gamma \in \mathbf{I}_m} c_\gamma \mathbf{g}_\gamma\}$,且 $c = \{c_\gamma\}_{\gamma \in \mathbf{I}_m}$,则称 c 为信号 f 在字典 \mathbf{D} 上的一个表示,若 $\text{Card}(\mathbf{I}_m) < N$,则称 c 为信号 f 在字典 \mathbf{D} 上的SSR^[33]。SSR的一个非常重要研究内容就是设计和完善稀疏分解算法,稀疏分解过程是一种信号子空间分离过程,也是一种能量提取过程,可用分解所得的有限个原子和对应系数来重构原始信号,对于超声回波信号,界面或缺陷回波能量主要集中在小的时频子空间,在分解过程中,这些有用信号被分解为若干个原子,而噪声分布在整个时频平面,通常不匹配任何原子或者分解系数很小。

在对电子封装进行超声显微检测时,由于介质微观结构散射和频率相关衰减较大,超声波在介质中传播时形状会发生改变,式(3)模型将不再适用,更通用的超声回波信号模型为

$$y(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t) + \xi(t). \quad (5)$$

该模型将系统接收到的超声回波信号 $y(t)$ 表示为试样不同界面和缺陷反射回波信号 $s_i(t)$ 的线性组合, 其中 $s_i(t)$ 可以表示为反射系数 c_i 和入射信号 $x_i(t - t_i)$ 的乘积^[35-36], 即

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i x_i(t - t_i) + \xi(t). \quad (6)$$

同样考虑对叠层封装裸片之间的界面进行超声显微检测时有回波重叠的情况。图9(a)为超声回波信号 $y(t)$, 它由回波 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 组成, 其中 $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 发生了重叠, 首先, 根据回波结构特征生成函数, 然后, 对生成的函数进行平移、伸缩、旋转等变换, 得到原子字典, 最后, 依次在原子字典中自适应地选取若干个相关性最好的原子对信号 $y(t)$ 做逼近。图9(b)为稀疏分解结果的时频图, 在图中, 选取出的每个原子都用一个 Heisenberg 矩形表示, 分解系数则用矩形的暗度体现, 系数越大, 矩形越暗。完成了稀疏分解之后, 需要根据使用的换能器频率和试样中的目标界面或缺陷位置确定时频窗, 然后, 选择中心位于时频窗内且分解系数最大的原子, 选用的原子及其分解系数分别作为入射脉冲 x_i 和反射系数 c_i 的近似, 最后, 在每个 $x-y$ 位置显示所选分解系数值, 生成 C 扫描图像。成像结果如图10^[35]所示, 观测到了更清晰分层缺陷, 实现超声显微检测系统纵向分辨率的提高^[36]。

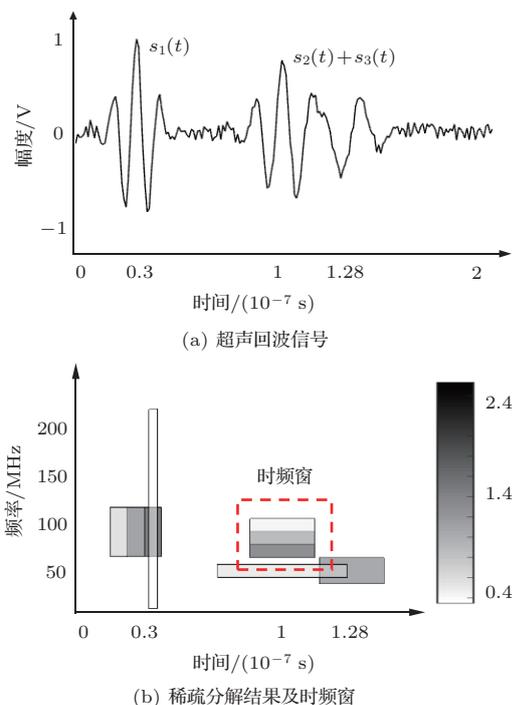


图9 稀疏表示

Fig. 9 Sparse signal representation

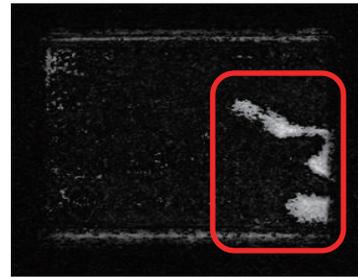


图10 基于SSR的时频成像^[35]

Fig. 10 Time-frequency domain imaging based on SSR^[35]

相比于传统的基于基分解的信号分析方法, SSR的优点有: (1) 满足信号SSR的需求, 稀疏分解将信号包含的信息或能量集中在少数原子上, 便于信息的提取和处理; (2) 满足信号自适应表示的需求, 原子字典包含各种种类的原子, 可以自适应地从字典中选择和信号结构最匹配的原子; (3) 可以有效地揭示非平稳信号的时频结构, 原子字典中的原子有很好的时频聚焦性, 可以很好地揭示信号的非平稳时变特性^[33]。

3.3.2 常用稀疏分解算法与原子字典

SSR的研究热点主要包括两方面, 即稀疏分解算法和原子字典, 表2列举了现有研究采用的几种稀疏分解算法和原子字典。

目前, 常用的稀疏分解算法主要分为3类: (1) 全局最优算法, 如组合方法、基追踪等, 这类算法解的稀疏性非常好, 但是计算速度较慢; (2) 局部最优算法, 如MP算法、最佳正交基、交互投影等, 这类算法解的稀疏性较好, 计算速度较快, 其中MP算法是一种在局部寻找最优稀疏分解的贪婪算法, 其得到的分解系数虽然不如全局最优算法稀疏, 但是效果已经较接近且计算复杂度低很多, 并且MP算法相比于其他局部最优算法, 计算精度最好^[33]; (3) 基于智能计算的MP算法, 如遗传算法、群体智能算法等, 这类算法大大提高了计算速度, 但算法复杂度较高。为了减少MP算法的计算量和存储量, 王建英等^[45]提出了基于原子字典集合划分和FFT的快速算法; 在此基础上, 郭金库等^[33]提出了基于自适应字典的快速算法, 进一步减少了存储量。

SSR要求原子字典具有充足的多样性和高度的冗余性, 且字典中的原子应当同时包含广泛的时频特性, 原子字典分为两类, 无训练原子字典(固定字典)和有训练原子字典(学习字典)。有训练字典虽然能够得到更稀疏的结果, 但是这类字典

的训练集需要试样各层界面、各个缺陷的大量非重叠回波,对不同换能器和电子封装的通用性较差,工程实现困难,因此更为常用的是无训练字典,

其中Gabor字典是与超声回波信号基本结构特征较为相似的一种过完备字典,非常适合处理超声信号。

表2 SSR在电子封装超声显微检测中的研究现状

Table 2 Research status of SSR in scanning acoustic microscopy testing of electronic packaging

研究日期和人员	稀疏分解算法	原子字典
2004.3 Zhang ^[20]	MP 算法	Gabor 字典
2004.6 Zhang ^[36]	基追踪/MP/最佳正交基算法	Symmlet 小波/Gabor 字典
2004.9 Ruiz-Reyes ^[37]	MP 算法	Morlet 函数字典
2005.8 Zhang ^[38]	MP 算法	ICA 学习字典
2006.3 Zhang ^[39]	FOCUSS 算法	FOCUSS-CNDL 学习字典
2006.5 Yang ^[40]	MP 算法	Daubechies 小波函数字典
2008.4 Zhang ^[41]	稀疏 Bayesian 学习算法	Gabor 字典
2009.1 Qi ^[42]	人工鱼群优化的 MP 算法	Gabor 字典
2016.1 周健鹏 ^[43]	正交 MP 算法	K-SVD 算法 Gabor 字典优化
2017.10 Qi ^[44]	基于人工蜂群优化的 MP 算法	Gabor 字典

4 总结与展望

超声显微检测技术是提高电子封装可靠性,发现电子封装表面和内部缺陷的一种有效无损检测技术,本文对超声显微检测技术在电子封装中的应用与发展现状进行了综述,并对现有超分辨率成像方法的原理和适用场景进行了介绍,其中,基于小波分析的反卷积方法是对反卷积方法的改进,由于其结果中仍有一些噪声,需精确已知各个界面或缺陷的具体位置,才能准确分辨重叠的回波;CWT方法则是通过时频表示提取回波信息,分析重叠的回波,该方法对分辨率的提高有限,只适合回波在时域或频域重叠较少的情况;SSR方法通过有限个原子和对应系数来重构超声回波信号,在对回波描述的准确性和鲁棒性方面性能更优^[19],针对SSR存在计算量和存储量较大的问题,王建英等^[45]和郭金库等^[33]均提出了相关优化方法。

对于超分辨率成像方法,SSR具有一定优势,其原子字典中的原子与超声回波信号的匹配程度决定着分辨重叠回波的能力,Gabor字典虽然与超声回波信号基本结构特征较为相似,但是依然有一定误差;有训练字典显然与超声回波信号更为匹配,但是其通用性较差,工程实现困难,因此,如何根据超

声回波信号结构特征构造合适的原子字典是该方法的重要研究方向。此外,对于超声显微检测硬件系统,相比于放大器、滤波器和高速A/D采集卡等较为通用的单元,输出激励脉冲电压较高、频带较宽并与换能器相匹配的脉冲发生器是整个硬件系统的核心和研究难点,目前在此方面的研究相对较少。这些难点预示着电子封装的超声显微检测还有很大的提升空间,通过各种信号处理技术的不断改进,借助硬件设备的快速发展,超声显微检测技术将在电子封装领域大有作为。

参 考 文 献

- [1] 张为民,郑红宇,严伟. 电子封装与微组装密封的特点及发展趋势[J]. 国防制造技术, 2010(1): 60-62.
- [2] 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): 1-5, 24.
Liu Zhongzhu, Xu Chunguang, Guo Xianghui, et al. Scanning acoustic microscopy testing technology for electronic package and welding quality[J]. Electronics & Packaging, 2012, 12(3): 1-5, 24.
- [3] 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.
- [4] 陈戈林,乐光启,胡思正,等. 声显微镜及其图象处理研究[J]. 电子学报, 1996(7): 7-11.
Chen Gelin, Yue Guangqi, Hu Sizheng, et al. Research on

- SAM and its image processing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1996(7): 7–11.
- [5] Lemons R A, Quate C F. Acoustic microscope—Scanning version[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(4): 163–165.
- [6] Jipson V, Quate C F. Acoustic microscopy at optical wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(12): 789–791.
- [7] Hadimioglu B, Quate C F. Water acoustic microscopy at suboptical wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 43(11): 1006–1007.
- [8] Muha M S, Moulthrop A A, Kozlowski G C, et al. Acoustic microscopy at 15.3 GHz in pressurized superfluid helium[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(11): 1019–1021.
- [9] 王应龙, 胡东云. 机械扫描声学显微技术的发展、应用与展望[J]. *应用声学*, 1990, 9(1): 42–45, 34.
- [10] Weiss E C, Anastasiadis P, Pilarczyk G, et al. Mechanical properties of single cells by high-frequency time-resolved acoustic microscopy[J]. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*, 2007, 54(11): 2257–2271.
- [11] Burak A, Irem D, Ozturk I E, et al. Acoustic impedance measurement of tissue mimicking materials by using scanning acoustic microscopy[J]. *Ultrasonics*, 2021, 110: 106274.
- [12] Hertl M, Mialhe F, Richard I. On the replacement of water as coupling medium in scanning acoustic microscopy analysis of sensitive electronics components[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 114: 113860.
- [13] 樊琼. 超高频超声显微测量系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [14] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- [15] Maev Gr R. Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: from principles to applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2013.
- [16] 张秀华. 高频超声检测模型研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [17] Canumalla S. Resolution of broadband transducers in acoustic microscopy of encapsulated ICs: transducer selection[J]. *IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies*, 1999, 22(4): 582–592.
- [18] Jhang K, Jang H, Park B, et al. Wavelet analysis based deconvolution to improve the resolution of scanning acoustic microscope images for the inspection of thin die layer in semiconductor[J]. *NDT & E International*, 2002, 35(8): 549–557.
- [19] Zhang G M, Harvey D M, Braden D R. Resolution improvement of acoustic microimaging by continuous wavelet transform for semiconductor inspection[J]. *Microelectronics Reliability*, 2006, 46(5–6): 811–821.
- [20] Zhang G M, Harvey D M, Braden D R. High-resolution AMI technique for evaluation of microelectronic packages[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(6): 399–400.
- [21] Wolter K J, Speck M, Heinze R. Reliability analysis in microelectronic packaging by acoustic microscopy[C]. *International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress*. IEEE Xplore, 2005.
- [22] Abdul J, Wang Y, Guo N, et al. Evaluation of quality of silicon/copper interfaces in IC packaging[C]. *Electronic Components & Technology Conference*. IEEE, 2002.
- [23] Santospirito G, Terzoli A. Fine die-attach delamination analysis by scanning acoustic microscope[C]. *European Microelectronics & Packaging Conference*. IEEE, 2009.
- [24] Qiu Y, Zhang S J. Study on the pin delamination of plastic encapsulated microcircuits using scanning acoustic microscope[C]. *2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin)*. 2017.
- [25] Lee S, Yim M J, Master R N, et al. Near void-free assembly development of flip chip using no-flow underfill[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2009, 32(2): 106–114.
- [26] Tismer S, Brand S, Klengel S, et al. Acoustic imaging of bump defects in flip-chip devices using split spectrum analysis[C]. *2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. IEEE, 2014.
- [27] Oh Z Y, Foo F J, Zee B. Optimization and application of acoustic imaging for defect detection in stack die packages[C]. *2018 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits*, 2018: 1–5.
- [28] 罗伟承, 刘大全. BGA/CSP 和倒装焊芯片面积阵列封装技术[J]. *中国集成电路*, 2009, 18(2): 49–55.
- Luo Weicheng, Liu Daquan. Area array package—BGA/CSP & flip chip[J]. *China Integrated Circuit*, 2009, 18(2): 49–55.
- [29] Yang R S H, Harvey D M, Zhang G M, et al. Reliability of solder joints assessed by acoustic imaging during accelerated thermal cycling[C]. *Electronic System-integration Technology Conference*. IEEE, 2010.
- [30] Yang R S H, Harvey D M, Zhang G M, et al. Fusion of acoustic and X-ray image features for solder joint through-life monitoring during thermal cycling tests[C]. *Electronic System-integration Technology Conference*. IEEE, 2012.
- [31] Tang C W, Chan Y C, Hung K C, et al. Nondestructive methodology for standoff height measurement of flip chip on flex (FCOF) by SAM[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2001, 24(2): 163–168.
- [32] Zhang G M, Harvey D M. Contemporary ultrasonic signal processing approaches for nondestructive evaluation of multilayered structures[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2012, 27(1): 1–27.
- [33] 郭金库, 刘光斌, 余志勇. 信号稀疏表示理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [34] Zhang G M, Harvey D M. Application of acoustic time-frequency domain imaging for the evaluation of advanced microelectronic packages[J]. 2010.
- [35] Zhang G M, Zhang C Z, Harvey D M. Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(3): 351–363.
- [36] Zhang G M, Harvey D M, Braden D R. Advanced acoustic microimaging using sparse signal representation for the evaluation of microelectronic packages[J]. *IEEE Transac-*

- tions on Advanced Packaging, 2006, 29(2): 271–283.
- [37] Ruiz-Reyes N, Vera-Candeas P, Curpian-Alonso J. New matching pursuit-based algorithm for SNR improvement in ultrasonic NDT[J]. NDT & E International, 2005, 38(6): 453–458.
- [38] Zhang G M, Harvey D M, Braden D R. An improved acoustic microimaging technique with learning overcomplete representation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(6): 3706–3720.
- [39] Zhang G M, Harvey D M, Braden D R. Adaptive sparse representations of ultrasonic signals for acoustic microimaging[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(2): 862.
- [40] Yang G, Zhang Q, Que P W. Matching-pursuit-based adaptive wavelet-packet atomic decomposition applied in ultrasonic inspection[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, 43(1): 62–68.
- [41] Zhang G M, Harvey D M, Braden D R. Signal denoising and ultrasonic flaw detection via overcomplete and sparse representations[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(5): 2963–2972.
- [42] Qi A L, Ma H W, Liu T. A weak signal detection method based on artificial fish swarm optimized matching pursuit[C]. World Congress on Computer Science & Information Engineering. IEEE, 2009.
- [43] 周健鹏. 稀疏分解理论在超声无损检测信号处理中的应用[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- [44] Qi A L, Zhang G M, Dong M, et al. An artificial bee colony optimization based matching pursuit approach for ultrasonic echo estimation[J]. Ultrasonics, 2018, 88: 1–8.
- [45] 王建英, 尹忠科, 张春梅. 信号与图像的稀疏分解及初步应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.