

板壳状微电子器件的数字层析成像检测方法

傅 健,王宏钧,李 斌,江柏红

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

摘 要: 传统工业 CT(industrial computed tomography, ICT)成像方法受扫描原理和探测器、射线源等硬件条件的限制,难以对芯片、印刷电路板等板、壳状微电子器件实施有效的数字层析成像检测.为此,讨论了一种基于锥束射线倾斜扫描和代数重建技术(Algebraic Reconstruction Technique, ART)的薄板层析成像(Computed Laminography, CL)方法,研究了其基于投影凸集理论的投影预处理方法及基于不同区域相似性的重建图像非局部平均降噪后处理方法,建立了基于非晶硅面阵探测器的实验系统,并完成了 CPU 芯片和印刷电路板的 CL 成像.实验结果证明了该方法的正确性.

关键词: 层析成像;薄板层析成像;代数重建技术;投影凸集;板壳状微电子器件

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2010)07-1580-05

Computed Laminography Imaging Inspection Method for Plate-Shell Microelectronic Devices

FU Jian, WANG Hong-jun, LI Bin, JIANG Bai-hong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Limited by the scan principle and the hardware such as detectors and X-ray sources, conventional industrial computed tomography (ICT) can not execute the effective tomography imaging of plate-shell microelectronic devices. In order to realize the tomography imaging of this kind of microelectronic device, a method called computed laminography (CL) has been researched. It is based on the cone-beam X-ray tilt scan and the algebraic reconstruction technique (ART). The projection pre-processing method based on the projection convex on sets (POCS) and the non-local means post-processing method based on the similarity between different regions have been discussed. An experiment system based on a-si flat panel detector has been developed. The CL imaging experiments of CPU chip and printed circuit board have been executed successfully. The validity of this method was verified by the results of experiments.

Key words: tomography; computed laminography; algebraic reconstruction technique; projection convex on sets; plate-shell microelectronic devices

1 引言

随着微电子学的发展,各类微电子器件的应用越来越多,加工工艺越来越复杂,可靠性要求越来越高^[1],传统机、电测试方法已难以满足要求.为此,国内外均采用了工业计算机层析成像(industrial computed tomography, ICT)技术来对微电子器件进行检测,取得了较好效果^[2,3].

ICT是一种新型的非接触式测试技术,在微电子、航空、航天等领域高技术装备的研制、生产和使用过程中得到越来越广泛的应用^[4].它采用X射线对被检测对象做周向回转扫描,以重建算法根据探测器采集的射

线透射图像序列重构物体被扫描区域的层析图像,无损地全息再现构件内部几何、物理形态.现行的ICT技术,对于板壳状结构的层析检测,射线不可避免要对比厚度尺寸大得多的长、宽尺寸所在截面作透射扫描.显然这种扫描透射投影数据灵敏度和空间分辨率,与从厚度方向扫描相比,要低得多,于是重建出的断层图像结构细节分辨率必然很低.因此,现有ICT技术对长、宽尺寸大而厚度小的板壳状结构,无法提供有效的层析检测技术.

各类芯片、多层印刷电路板等微电子器件是典型的板壳状构件,其内部封装质量、焊点状态、材料异常和缺陷的检测、故障的诊断以及内部结构形态的定量分析,急需有效的数字层析成像技术.为此, Matsuo 研究了

一种基于数字滤波重建的数字综合层析方法^[5]; Baranov 研究了一种基于非线性反投影重建的层析方法^[6]; Zhou 和 Gondrom 等研究了一种类似的称为薄板层析成像(Computed Laminography, CL)的方法,取得了较好效果^[7].在此基础上,本文讨论了一种基于锥束射线倾斜扫描和代数重建技术(Algebraic Reconstruction Technique, ART)的 CL 方法,建立了基于非晶硅面阵探测器的实验系统,研究了其基于投影凸集理论的投影预处理方法及基于不同区域相似性的重建图像非局部平均降噪后处理方法,并完成了 CPU 芯片和印刷电路板的 CL 成像.

2 CL 成像原理

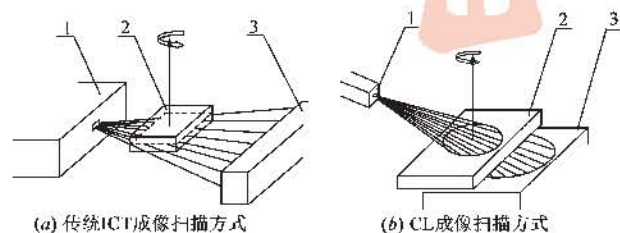
图 1 为传统 ICT 成像扫描方式和 CL 成像扫描方式.如图 1(a)所示,传统 ICT 需要射线从长、宽尺寸所在截面对构件作 360°周向回转扫描,其扫描投影数据灵敏度 and 空间分辨率,与从厚度方向扫描得到的投影相比,要低得多. CL 成像方法成像扫描方式如图 1(b)所示.在该扫描方式下,射线源与面阵探测器构成的射线锥束,相对于构件长、宽表面以 45°倾斜入射,射线源与探测器都静止,构件绕其旋转轴做周向回转扫描.其扫描形成的投影数据能同等地获得垂直于构件方向和平行于构件方向的材质信息.上述投影数据经 ART 重建后,可完成构件被扫描区域的数字层析检测.

相较于传统 ICT 成像方法,基于锥束射线倾斜扫描的 CL 成像方法有如下特点:

(1)由于是从被检结构最小尺寸方向上透视投影,故重建数据具有更高灵敏度和分辨率,可保证三维层析图像有足够高的空间分辨率;

(2)由于采用 ART 重建算法,仅需较少的投影数据,即可获得较高层析质量,避免了传统滤波反投影(Filter Back-Projection, FBP)重建算法和非线性反投影重建方法在弱 Tuy 条件下的近似重建,从而降低了层间特征粘联混叠问题;

(3)由于这种扫描方式在被检结构长、宽方向是开放的,所以做层析检测时不受被检结构长、宽尺寸大小的限制.



1. X-射线源; 2. 被检结构; 3. 探测器
图 1 数字层析成像扫描方式

3 ART 重建算法

图 1(b)所示 CL 成像属于典型投影数据非完备重建问题^[8].在此情况下,ART 具有明显优势.

3.1 基本思想及求解步骤

在图 1(b)扫描方式中,每一条射线可用一线性方程表示.因此,每一个扫描角度下,所有射线对应的线性方程可以构成一个线性方程组:

$$P = WX \quad (1)$$

其中,向量 X 表示物体射线衰减系数值分布,向量 P 表示 X 射线图像的投影值,矩阵 W 表示由 X 射线源、物体、探测器三者坐标之间关系确定的成像几何结构参数.重建算法的任务就是,根据探测器测得的 P 来求取未知的 X .

ART 迭代求解方程组的基本思想如下:

$$x = x^{(0)} \quad (2)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{q_{ik} - n_{ik}^T x^{(k)}}{\|n_{ik}\|^2} n_{ik} \quad (3)$$

其中, k 为迭代次数; n_{ik} 为该射线所经过的像素信息; λ 为收敛因子,一般为 $0 < \lambda \leq 1.0$,但是通常远小于 1.0.

ART 算法求解过程如下:首先确定一初始值向量 $x = x^0$;在每一迭代步骤 k ,计算每一条射线真实投影值 q_{ik} 与该射线经过的所有像素点的系数值累加和 $n_{ik}^T x^{(k)}$ 之差;对该差值乘以一收敛因子 $\lambda^{(k)}$,用其反投影重建该射线经过的所有像素.对所有射线进行该投影及反投影运算,直到达到一定迭代次数或所有像素值在一次迭代前后之差都小于一限定值.

3.2 重建参数选择

在迭代重建过程中,各种重建参数的正确选择是非常重要的.在 CPU 芯片和多层印刷电路板的 CL 成像中我们发现,当以直接反投影重建得到的图像除以总切片数作为初始图像 $x^{(0)}$ 时,ART 算法在迭代过程中更容易收敛,且结果更接近准确值.此外,研究表明,收敛因子选得过小,则迭代过程收敛较慢,收敛因子选得过大,所得到的解偏离准确值较大.在实际 CL 成像中,对 λ 进行各种尝试后发现,当 $0.05 \leq \lambda \leq 0.1$ 时,可获得最佳的层析图像.

4 图像处理

为保证重建 CL 图像的质量,需要在 ART 重建前后进行图像处理.为此,研究了基于投影凸集(Projection Convex on Sets, POCS)的投影图像预处理方法和基于不同区域相似性的 CL 图像非局部平均降噪后处理方法.

4.1 基本 POCS 的预处理方法

POCS 是信号重建的重要理论方法之一,其基本思想如公式(4)所示.它通过多帧低分辨率图像来恢复一

帧高分辨率图像,利用多帧低分辨率图像中所包含的丰富信息量进行带约束的迭代超分辨率处理,以获得高于记录图像中所用硬件设备分辨率的高分辨率图像^[9].

$$\hat{s}_i^{j+1}(m_1, m_2) = T_A \prod_{(0,0) \leq (n_1, n_2) \leq (N-1, N-1)} T_{n_1, n_2, k}[\hat{s}_i^j(m_1, m_2)] \quad (4)$$

其中, \hat{s}_i 是原高分辨率图像 s_i 的估计; T 为投影算子; m_1, m_2, n_1, n_2 为图像中像素位置; N 为原高分辨率图像 s_i 的大小; k 为低分辨率图像数目; j 为迭代次数.

基于上述原理,本文将 CL 投影图像序列视为一组相关的低分辨率图像序列,实现了一种获取高分辨率投影序列的方法.其基本步骤如下:

(1) 选择原始 CL 投影图像中的一幅作为基准图像,与它相邻的四幅低分辨率图像都作为参考图像;

(2) 对基准图像进行双线性插值,得到高分辨率图像的初始估计;

(3) 根据公式(4),对估计图像进行投影迭代重建,直至满足约束条件;

(4) 重复上述步骤,直至所有原始 CL 投影图像都被高分辨率重建.

4.2 CL 图像非局部平均降噪后处理方法

受射线源光子起伏噪声、探测器热噪声以及 POCS 预处理的影响,CL 重建图像会存在较大的噪声.为此,本文实现了一种基于图像不同区域相关性的非局部均匀降噪方法.其基本思想如公式(5)所示,在进行像素平均降噪时考虑局部区域的相似性,使得具有高相似性的区域之间进行平均降噪,而不相似的区域之间几乎不进行平均降噪,那么就可抑制噪声的同时达到保留图像细节纹理信息的效果^[10].

$$h(i) = \sum_{j \in I} w(i, j) v(j) \quad (5)$$

其中, $v(i)$ 为原始含噪图像; $h(i)$ 为降噪后图像;权重 $w(i, j)$ 表示像素 i 和像素 j 的相似性,且满足 $0 \leq w(i, j) \leq 1, \sum_{j \in I} w(i, j) = 1$.

5 计算机仿真

为了验证本文扫描方式及 ART 重建算法的正确性,设计了一个如图 2(a) 所示的模型,进行计算机仿真验证.模型特征如表 1 所示.收敛因子 $\lambda = 0.08$, 360° 扫描采样 120 幅投影.

图 2(b)和(c)给出了三维 FBP 重建第 5 层和第 16 层的重建切片图像;图 2(d)和(e)给出了三维 ART 重建第 5 层和第 16 层的重建切片图像.计算机仿真结果证明,三维 ART 重建结果正确,且层间混叠小于 FBP 重建结果.

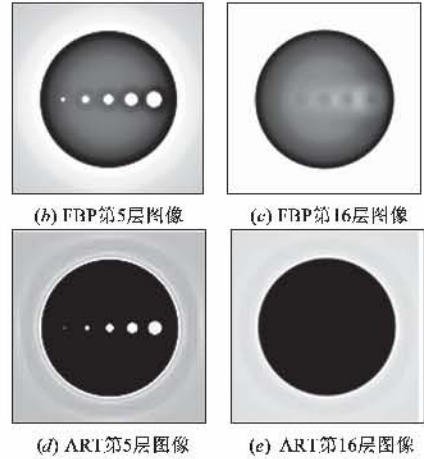
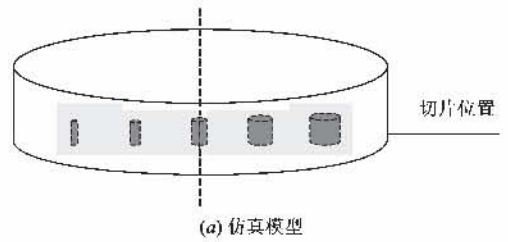


图2 CL成像重建仿真结果

表1 模型几何参数

	半径	轴线中心坐标		上下面 Z 坐标		衰减系数
	r	x_0	y_0	z_{bot}	z_{top}	μ
圆柱 1	45	0	0	0	20	1.0
圆柱 2	1	0	-30	0	10	0.0
圆柱 3	2	0	-15	0	10	0.0
圆柱 4	3	0	0	0	10	0.0
圆柱 5	4	0	15	0	10	0.0
圆柱 6	5	0	30	0	10	0.0

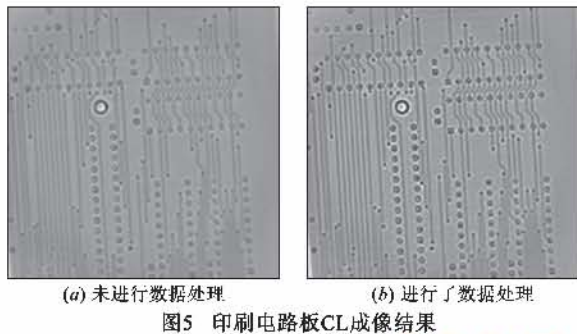
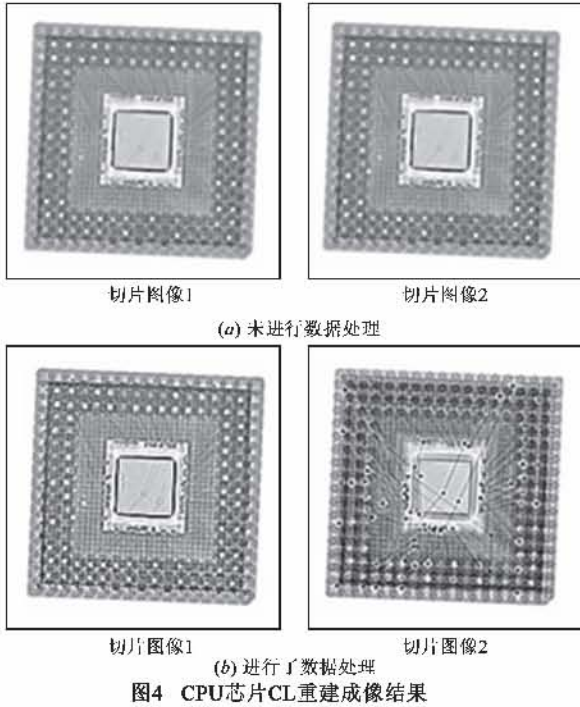
6 实验

图 3 为搭建的基于非晶硅面阵探测器的 CL 成像实验系统.在该系统上,对 CPU 芯片和印刷电路板进行了 CL 成像,利用锥束射线倾斜扫描方式获取了 CL 投影数据,以 ART 进行了重建,获得了良好的成像效果.图 4(a)为未进行投影数据 POCS 预处理和非局部平均降噪



图3 CL成像实验系统

后处理的 CPU 芯片 CL 重建结果,图 4(b)为进行了投影数据 POCS 预处理和非局部平均降噪后处理的 CPU 芯片 CL 重建结果;图 5(a)为未进行投影数据 POCS 预处理和非局部平均降噪后处理的印刷电路板 CL 重建结果,图 5(b)为进行了投影数据 POCS 预处理和非局部平均降噪后处理的印刷电路板 CL 重建结果.实验结果表明本文方法正确.



7 结论

计算机仿真和实验结果表明,本文研究的基于锥束射线倾斜扫描和 ART 重建算法的 CL 成像方法是正确的,是一种有效的板壳状微电子器件数字层析成像检测方法.如果配以微、纳米焦点 X 射线源,本文 CL 方法层析成像细节分辨率可达微米和数百纳米级,可为微电子学的发展提供重要的支撑手段.此外,本文研究结果对航空、航天领域舵、翼、帆板等板、壳结构的数字层析检测问题也有重要的参考价值.

应当指出,受 X 射线物理学的制约,样品材料对 CL

成像效果有一定影响.这是因为实际当中,X 射线与不同密度材料间的相互作用差异较大,而 CL 成像假定 X 射线与不同密度材料间的相互作用是相同的.因此,当微电子器件由密度相近的金属材料或非金属材料构成时,成像效果较好;但当微电子器件材料同时包含密度差加大的金属和非金属材料时,将出现条状金属伪影,降低成像效果.此外,由于 X 射线光子起伏波动噪声的存在,CL 切片厚度也对切片图像的质量有一定影响.当切片较厚时,X 射线信号的统计噪声较弱,CL 图像信噪比较高,但切片间的层间分辨率降低;当切片较薄时,X 射线信号的统计噪声较大,CL 图像信噪比较低,但切片间的层间分辨率提高.实际应用中,应根据微电子器件的具体情况,灵活选择 X 射线能量、切片厚度等成像工艺参数,以达到最佳的成像效果.

参考文献:

- [1] 王蕴辉,于宗光,孙再吉.电子元件可靠性设计[M].北京:科学出版社,2007.
Wang Yunhui, Yu Zongguang, Sun Zaiji. The Reliability Design of Electronic Components[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Gondrom S, Maisl M. 3D reconstructions of micro-systems using x-ray tomographic methods[EB/OL]. http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/inspection_of_micro-systems/568_gondrom.pdf.
- [3] The Future Trend of PCB Inspection - Real 3D X-Ray Laminography[EB/OL]. <http://www.prodelegroup.com/fra/download/20070119-1407-Article%20RayonX%20en%20ang.pdf>
- [4] 傅健.X 射线三代工业 CT 工程基础技术研究与应用[D].北京:北京航空航天大学,2004.
Fu Jian. Research and application on engineering techniques for X-Ray generation III industrial CT[D]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [5] Matsuo H. Three-dimensional image reconstruction by digital tomosynthesis using inverse filtering[J]. IEEE Transaction on Medical Imaging, 1993, 12(2): 307 - 313.
- [6] Baranov V A. A variational approach to non-linear back projection in computed tomography[A]. Proceedings of 4 th International Symposium [C]. Novosibirsk, Russia, Utrecht: VSP, 1995. 82 - 97.
- [7] Gondrom S, Zhou J. X-ray computed laminography: an approach of computed tomography for applications with limited access[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 90: 141 - 147.
- [8] 王宏钧.工业射线 CL 成像及其代数重建算法研究[D].北京航空航天大学,2006.
Wang Hongjun. Industrial Ray CL Imaging and Research of its

Algebraic Reconstruction Algorithm[D]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.

- [9] 庞亚红, 毛幼菊. 一种基于凸集投影(POCS)的数字图像超分辨率重建算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 4: 69 - 71.

PangYahong, MaoYouju. A super-resolution image reconstruction algorithm on the theory of projection onto convex sets (POCS)[J]. Computer Engineering and Applications(in Chinese), 2005, 4: 69 - 71.

- [10] Mahmoudi M, Sapiro G. Fast image and video denoising via non-local means of similar neighborhoods[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(12): 839 - 842.

作者简介:



傅健男, 北京航空航天大学副教授, 博士/博士后, 国防科技检测技术专家, 全国锅容标委专家, 中国体视学会材料科学分会理事, “中国体视学与图像分析”期刊编委, 研究方向为多维信息探测、成像与可视化技术, 长期从事数字辐射成像与生物医学成像理论研究和工程技术开发, 特别是数字射线成像(DR)、计算机层析成像

(CT)、显微 CT、相位衬度成像以及中子成像技术. 先后承担国家自然科学基金、航空科学基金、国防基础科研项目多项, 为航空、航天、核工业及特种设备等部门研发多套先进的 DR/3D-CT 系统, 促进了国内数字辐射成像技术的发展. 发表中、英文论文 40 余篇, 其中 SCI、EI 和 ISIP 检索 30 余篇, 申请/获得 CT 发明专利 5 项. E-mail: fujian706@buaa.edu.cn