

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107067

X波段 T/R 组件键合金丝的自动检测技术

马美铭 禹胜林 张杰 王雨壮 周为荣
(南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210000)

摘要: X波段 T/R 组件中,键合金丝的数量、长度、拱高、跨距、焊点位置等参数会对微波传输特性产生严重的影响。通过自动检测技术实现上述参数的自动检测,可以推断出 X波段 T/R 组件键合质量是否合格。基于变焦显微测量技术,通过自主设计的图像采集平台,获取到键合金丝的一组图像,然后通过多聚焦图像融合、聚焦评价等图像处理技术,实现了键合金丝的拱高和跨度的微米级测量,测量结果相对误差小于 0.7%。该方法该技术有利于提高金丝键合成品质量的检测效率,提高 X波段 T/R 组件的生产效率。

关键词: T/R 组件;键合金丝;变焦显微测量;模板匹配;多聚焦图像融合;聚焦评价

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Automatic detection technology of gold bonding wires in X-band T/R module

Ma Meiming Yu Shenglin Zhang Jie Wang Yuzhuang Zhou Weirong

(School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In X-band T/R module, the number, length, arch height, span, solder joint position and other parameters of gold bonding wires will have a serious impact on the microwave transmission characteristics. Through the automatic detection technology to achieve the automatic detection of the above parameters, we can infer whether the bonding quality of X-band T/R module is qualified. Based on the focus variation measurement technology, the micron scale parameter measurement of the gold bonding wires is realized, and the relative error of the measurement result is less than 0.7%. In this method, a group of images of the gold bonding wires are obtained through the self-designed image acquisition platform, and then the arch height and span of the gold bonding wires are measured through image processing technologies such as multi focus image fusion and focus evaluation. This technology is helpful to improve the detection efficiency of gold wire bonding products and the production efficiency of X-band T/R module.

Keywords: T/R module; gold bonding wires; focus variation measurement; template matching; multi-focus image fusion; focus evaluation

0 引言

X波段 T/R 组件的生产过程中,常采用金丝键合技术实现微带传输线、单片微波集成电路和集总式元器件之间的互连^[1]。与数字电路中互连线不同的是,X波段 T/R 组件中键合金丝的数量、长度、拱高、跨距、焊点位置等参数,会对微波传输特性产生严重的影响。随着键合金丝拱高的增加,键合金丝长度增大,回波损耗变小,插损损耗变大^[2-4]。对 X波段 T/R 组件中键合金丝进行上述参数的测量,可以推断出组件中的微波特性是否满足设计需求。

现有的集成电路工艺中,键合质量检测设备只能实现键合强度^[5]及焊点质量检测^[6-7]。键合产品的微波特性,仍

然需要对键合产品进行人工检测,因此产品质量检测效率较低,需要花费的时间和经济成本较大。若通过测量仪器实现键合金丝参数的自动测量,将提升 X波段 T/R 组件中键合金丝质量的检测效率,促进集成电路产业的发展。

为实现键合金丝参数的测量,荆晓冬等^[8]通过 CT 技术实现了金属键合引线的三维测量,测量准确度较高,但测量速度慢(约 15 h),且对测量夹具的稳定性要求严苛,无法提高键合金丝的自动检测效率。刘亮^[9]通过一种单相机倾斜拍摄的图像测量系统,实现了键合金丝的参数测量,但是测量误差率较大,尤其是对拱高的测量,误差为 3.33%。

本文基于变焦显微测量技术^[10-12],实现了 X波段 T/R 组件中键合金丝微米级参数测量。该方法通过图像采集平

收稿日期:2021-06-25

台获取到键合金丝的一组图像, 然后通过多聚焦图像融合、聚焦评价等图像处理技术实现了键合金丝的拱高和跨度测量。

1 设计原理

1.1 变焦显微测量技术原理

变焦显微测量技术原理如图 1 所示。

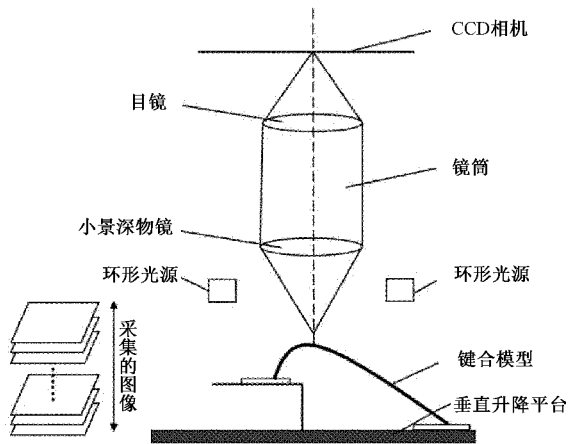


图 1 变焦显微测量技术原理

根据光学成像原理, 只有处于聚焦平面上的物体能够在图像传感器上清晰成像, 处于非聚焦平面上的物体则以弥散圆的形式呈现。将物体在聚焦平面前后移动一定范围, 物体在 CCD 相机上的图像仍然是清晰的, 这个范围称为图像采集设备的景深。变焦显微测量技术使用小景深物镜, 通过垂直升降平台将键合模型等间距升高, 并采集图

像, 从而获取到不同高度对应的键合金丝的图像。

1.2 图像采集平台设计

根据变焦显微测量技术原理, 本文搭建的图像采集平台如图 2 所示。

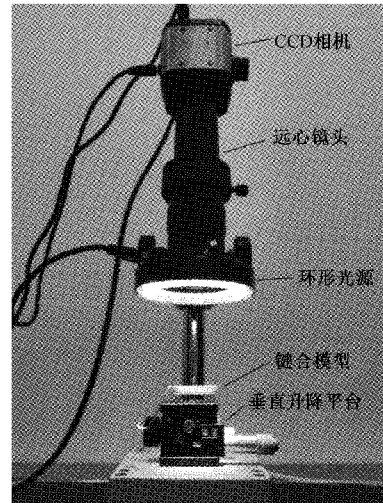


图 2 图像采集平台

该图像采集平台可将被测物体放大 270 倍。其中图像采集传感器为 200 万像素高清高速 CCD 相机; 目镜的放大倍率为 0.5 倍; 物镜为 0.7~4.5 倍连变镜头。光源采用亮度可调的 LED 环形电源。被测键合模型放置于下方的垂直升降平台上。垂直升降平台最小刻度为 0.01 mm, 精度为 0.02 mm。

图 3 为通过图像采集平台采集到的一组图像的部分图像。可以看出, 不同序号图片的聚焦位置存在差异。

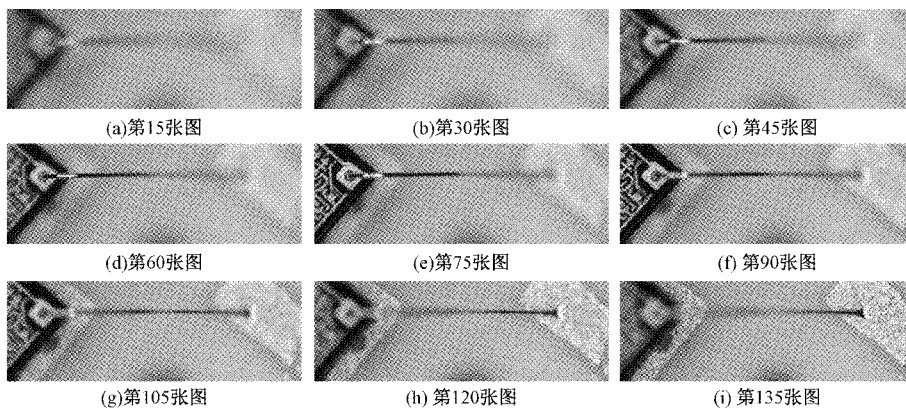


图 3 采集到的一组键合金丝图像中的部分图像

2 键合金丝拱高测量

2.1 模板匹配

如图 4 所示, 使用环形光源时, 当聚焦平面位于键合金丝的顶部, 键合金丝顶部呈现亮斑。由于采集的键合金丝多聚焦图像由远至近进行采集编号, 因此当采集到的图像中首次出现亮斑时, 该图像对应聚焦平面高度即键合金丝顶点高度。

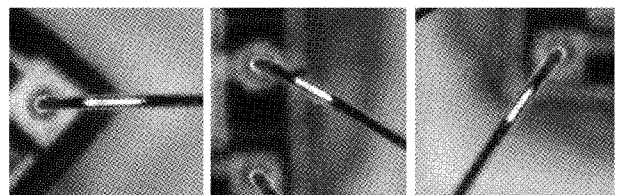


图 4 聚焦平面位于键合金丝顶部时呈现的亮斑

根据上述特性,采集一组亮斑的图像,形成亮斑模板库,如图 5 所示。

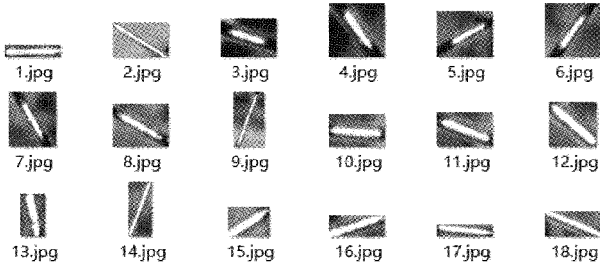


图 5 亮斑模板库

亮斑模板库中的模板依次与多聚焦图像进行模板匹配^[13],当二者相似度较高时,输出当前多聚焦图像编号,键合金丝的顶点位置确定。

“模板匹配”是一种常用的目标识别方法。模板匹配法可分为系数匹配法、相关系数匹配法、相关匹配法、归一化相关匹配法、平方差匹配法、归一化平方差匹配法,以及在此基础上进行改进的其他方法。本文使用的是相关系数匹配法。匹配过程中将模板 $T(m, n)$ 叠放在被搜索图 $S(W, H)$ 上平移,被模板覆盖的区域定义为子图 S_{ij} , i, j 为子图右下角在被搜索图 S 上的坐标,则每个区域的相似度计算表达式如式(1)所示。

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S_{ij}(m, n) - T(m, n)]^2 \quad (1)$$

为了便于数据处理,将 $D(i, j)$ 归一化后得到模板匹配系数如式(2)所示。

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{ij}(m, n) \times T(m, n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S_{ij}(m, n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n)]^2}} \quad (2)$$

当模板与子图完全相同时, $R(i, j) = 1$ 。由于即使键合金丝的规格相同,采集到的图像仍可能存在细微差别,因此实际应用中需将阈值设置略低于 1。两根不同规格键合金丝的模板匹配结果如图 6 所示。

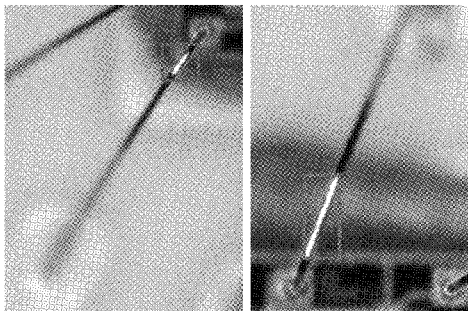


图 6 两根不同规格键合金丝的模板匹配结果

2.2 清晰度评价

键合金丝最低点的识别,同样可以使用模板匹配法,

但为了提高检测速率,本文借助清晰度评价函数^[14]来实现这一功能。

本文使用拉普拉斯函数实现清晰度评价。图像越清晰,则图像中的高频分量越多,拉普拉斯函数计算出的清晰度越高。依次对多组多聚焦图像进行清晰度评价后,得到的清晰度走势图基本形态均如图 7 所示。且通过模板匹配得到的最低点位置,与清晰度走势图中清晰度最高点所对应位置相同。根据这一结论可以通过清晰度评价的方法,定位键合金丝最低点位置。例如根据图 8 即可推断出编号为 88 的图片所对应的位置即该键合金丝最低点位置。

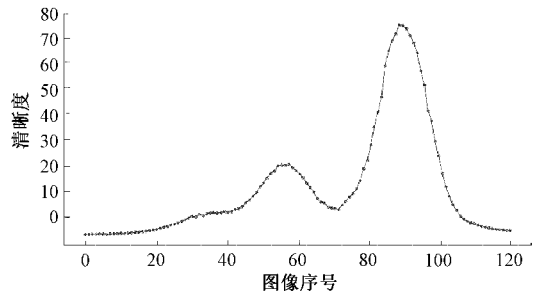


图 7 清晰度走势图

2.3 拱高计算

通过模板匹配和清晰度评价的方法,计算出键合金丝顶点和最低点图像序号,从而计算出两张图片间隔的图片数量 M 。由于图像采集过程中垂直升降平台是等间距移动的,假设移动间距为 d ,则拱高 $h_w = dM$ 。

3 键合金丝跨度测量

3.1 多聚焦图像融合

进行跨度测量,首先确定键合金丝两端焊点的位置,然后计算出两端焊点的欧氏距离。由于采集到的图像中,键合金丝两端焊点无法同时出现在同一图像上,如图 8 所示。本文使用多聚焦图像融合算法^[15],将一组图像中的聚焦点融合到一张图像中。如图 9 所示,融合结果图像中两侧焊点均清晰呈现。

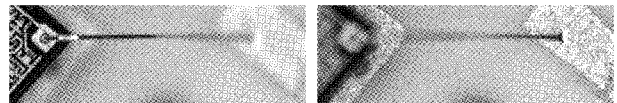


图 8 两端焊点清晰呈现的状态

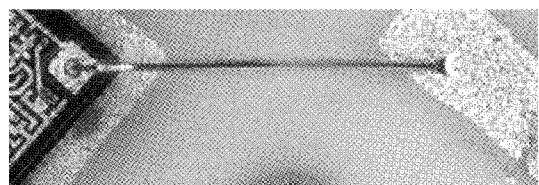


图 9 多聚焦图像融合结果

多聚焦图像融合算法流程如图 10 所示,其基本原理为小波变换^[16],图像融合过程中低频分量与高频分量分别采用以下两种融合方式。

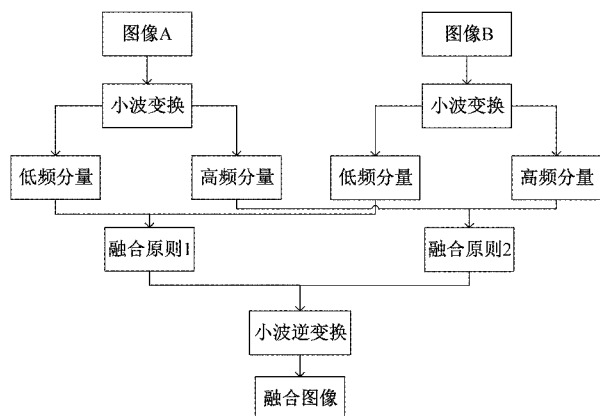


图 10 小波变换实现图像融合流程

低频分量融合方式为,分别计算出两张图低频分量 L_A 、 L_B 的标准偏差 σ_A 、 σ_B , 然后根据式(3)和(4)计算出权重 Val_A 和 Val_B , 则低频分量融合结果 $R_L = Val_A \times L_A + Val_B \times L_B$ 。

$$Val_A = \frac{\sigma_B}{\sigma_A + \sigma_B} \quad (3)$$

$$Val_B = \frac{\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_B} \quad (4)$$

高频分量融合方法为,提取两张图第 i 层高频分量 H_{Ai} 和 H_{Bi} , 计算上面每个点的标准偏差 $\sigma_{A_{ij}}$ 、 $\sigma_{B_{ij}}$, 并保留最大值,从而得到第 i 层融合后的高频分量。

将低频分量和高频分量融合后,进行小波逆变换,即可得到两张图的融合图像,即全聚焦图像。

3.2 计算比例尺

将像素距离转化为实际距离首先需要确定比例尺。

将测微尺置于图像采集设备下,采集到的图像如图 11 所示的。测微尺上每一格为 $1\ 000\ \mu\text{m}$, 对应 $272.70\ \text{pixel}$, 则比例尺 $M=1:3.67$ 。

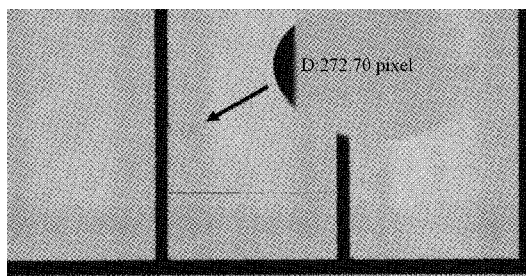


图 11 测微尺在图像采集设备下的图像

3.3 跨度计算

使用模板匹配法确定融合图像上焊点位置如图 12 所示。得到焊点位置后计算出焊点间的像素距离,再根据比例尺计算出实际距离,即键合金丝的跨度值。

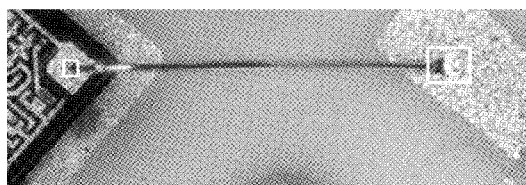


图 12 通过模板匹配确定焊点位置

4 测量结果及误差分析

本文选用 8 根不同的键合金丝进行测量精度的分析。通过人工测量得到键合金丝的跨度、拱高的精确值,与机器测量值进行对比,得到跨度、拱高测量相对误差表,如表 1、2 所示。根据表格可知,通过本文的方法进行跨度测量,相对误差在 0.7% 以内,基本达到手工测量的精度。

表 1 跨度测量相对误差

键合金丝编号	1	2	3	4	5	6	7	8
机器测量值/ μm	2 846.20	2 256.92	2 351.23	2 347.46	2 554.70	2 220.94	3 309.08	2 573.27
人工测量值/ μm	2 860.00	2 242.60	2 340.92	2 345.99	2 562.79	2 232.71	3 307.33	2 582.79
误差/ μm	13.80	-14.32	-10.31	-1.47	8.09	11.77	-1.75	9.52
相对误差/%	0.48	0.63	0.44	0.06	0.32	0.52	0.05	0.37

表 2 拱高测量相对误差

键合金丝编号	1	2	3	4	5	6	7	8
机器测量值/ μm	790	850	810	800	780	800	780	820
人工测量值/ μm	785.65	846.50	821.43	796.29	791.55	799.61	780.34	827.65
误差/ μm	-4.35	-3.50	11.43	-3.71	11.55	-0.39	0.34	7.65
相对误差/%	0.55	0.41	1.39	0.47	1.46	0.05	0.04	0.92

测量误差存在的原因,一方面,进行模板匹配时,按由上至下、由左至右的滑窗顺序进行模板匹配,且确定位置

的算法中涉及到相似度判断,进行相似度判断使用到的阈值如果偏小,则会出现匹配结果偏上、偏左的状况;另一方

面,手动测量位置与模板匹配确定的位置不一致,也有可能导致实验结果误差。

5 结 论

本文基于变焦显微测量技术,搭建了键合金丝图像采集平台,并结合图像匹配、多聚焦图像融合、清晰度评价等图像处理技术,实现了 X 波段 T/R 组件键合金丝拱高、跨度参数的测量,且测量精度较高,相对误差小于 0.7%。上述功能的实现,为 X 波段 T/R 组件中键合金丝的自动化检测,提供了一套可行性方案。该方案有利于提高 X 波段 T/R 组件质量的检测效率,促进集成电路产业的进一步发展。该检测方法中涉及的模板匹配、清晰度评价等过程对检测速率影响较大,若应用场景对检测速率要求较高,则需要对这些过程进行优化。同时,后续研究中可通过算法优化和使用更高精度的测量器件对测量精度进一步提升。

参考文献

- [1] 刘波. 微波组件自动化装配工艺技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [2] 严伟, 符鹏, 洪伟. LTCC 微波多芯片组件中键合互连的微波特性[J]. 微波学报, 2003(3): 30-34.
- [3] 杜丽军. 键合互连对微波多芯片组件相位特性的影响[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(7): 54-56.
- [4] 王晨苑, 何怡刚, 王传坤, 等. 高压多芯片并联 IGBT 模块故障监测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 98-106.
- [5] KO K W, DONG H K, LEE J, et al. 3D measurement system of wire for automatic pull test of wire bonding [J]. Journal of Institute of Control, 2015, 21(12): 1130-1135.
- [6] 李孝轩, 许立讲, 纪乐, 等. 3D 模块金丝键合在线检测技术研究[J]. 电子工业专用设备, 2010(12): 31-34.
- [7] 姚芳, 马静, 唐圣学, 等. IGBT 模块键合损伤机理、演化规律及状态监测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 88-99.
- [8] 荆晓冬, 刘晨, 吴爱华, 等. 基于 CT 技术的金属键合引线三维测量专用夹具[J]. 宇航计测技术, 2018,

38(1): 63-67.

- [9] 刘亮. 键合金丝线弧形轮廓离线检测技术研究[D]. 四川: 西华大学, 2014.
- [10] DANZI R, HELMLI F, SCHERER S. Focus variation a robust technology for high resolution optical 3d surface metrology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(3): 245-256.
- [11] XIE H, RONG W, SUN L. Wavelet-based focus measure and 3-d surface reconstruction method for microscopy images [C]. Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 2006: 229-234.
- [12] PERTUZ S, PUIG D, GARCIA M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus [J]. Pattern Recognition, 2013, 46(5): 1415-1432.
- [13] LIANG D, DING J, ZHANG Y. Efficient multi-source remote sensing image matching using dominant orientation of gradient[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 2194-2205.
- [14] 李成超, 于占江, 李一全, 等. 微小零件显微检测图像的清晰度评价[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 103-107, 113.
- [15] YANG B, LI S. Multifocus image fusion and restoration with sparse representation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2010, 59(4): 884-892.
- [16] 王瑞, 姚爱琴, 杨瑞, 等. 基于小波变换模板大的多尺度图像边缘检测在烟雾图像中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 63-67.

作者简介

马美铭, 硕士生, 主要研究方向为键合金丝参数测量、图像处理技术等。

E-mail: 1097521943@qq.com

禹胜林(通信作者), 研究员级高级工程师, 教授, 主要研究方向为光电检测技术、传感器技术等。

E-mail: yslhz112@163.com