

文章编号 1004-924X(2023)13-1890-10

基于白光三角法的芯片封装凸点高度测量

林贤锦, 吴祖伟, 叶瑞乾, 王 磊*
(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 为了实现芯片封装凸点(Bump)高度的测量,建立了基于白光三角法的测量系统,并提出了一种复杂背景下 Bump 高度的测量方法。根据提出的测量模型搭建了 Bump 高度测量系统,利用 U-Net 深度学习模型进行光条图像的分割并结合灰度重心法和插值法提取完整的光条中心,以克服复杂背景的干扰。然后,对测量系统进行标定以确定像素值与实际高度值的对应关系。最后,通过函数拟合的方式确定 Bump 的高度。实验结果表明:Bump 高度的测量重复性平均值为 $0.21\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.095\ \mu\text{m}$;测量平均误差为 $-0.04\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.408\ \mu\text{m}$ 。该方法在复杂背景下对 Bump 高度的测量精准度高、稳定性好,可满足芯片封装中晶圆 Bump 共面性在线检测的要求。

关键词: 芯片检测;深度学习;光条中心;凸点测量

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233113.1890

Bump height measurement of chip packaging based on white light triangulation

LIN Xianjin, WU Zuwei, YE Ruiqian, WANG Lei*

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

* Corresponding author, E-mail: wanglei33@xmu.edu.cn

Abstract: To measure the bump height of chip packaging, a measurement system based on white-light triangulation was established, and a method for measuring the bump height in a complex background was proposed. First, the bump-height measurement system was built according to the proposed measurement model. Next, the U-Net deep learning model was used to segment the light stripe image, and the gray-scale barycenter method and interpolation method were combined for extracting the complete light stripe center to overcome the interference of the complex background. Subsequently, the measurement system was calibrated to determine the corresponding relationship between the pixel value and the actual height value. Finally, the height of the bump was determined via function fitting. The experimental results indicate that the average repeatability of bump-height measurement is $0.21\ \mu\text{m}$, with a standard deviation of $0.095\ \mu\text{m}$; the average measurement error is $-0.04\ \mu\text{m}$, with a standard deviation is $0.408\ \mu\text{m}$. In this study, bump-height measurement with high accuracy and robustness in a complex background was realized, which can satisfy the requirements of online detection of wafer bump coplanarity in chip packaging.

Key words: chip detection; deep learning; light stripe center; bump measurement

收稿日期:2022-11-02;修订日期:2022-12-21.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2006700)

1 引言

集成电路封装检测可以及时发现芯片制造工艺过程中的缺陷,提高成品率。芯片封装中焊料变形导致的断路、短路问题日益突出,凸点(Bump)的高度测量,以及芯片封装 Bump 共面性三维缺陷检测的需求也更加迫切。随着工艺技术的发展,Bump 的尺寸越来越小,其高度在 10~200 μm ^[1]。Bump 具有尺寸微小、排布密度高的特性,而芯片封装检测有高吞吐量、高自动化的要求,因此 Bump 高度无法采用人工检测。光学检测具有检测效率高、可靠性高,无损检测的优点,在 Bump 高度测量中应用广泛。

Hyun-Ju 等^[2]利用莫尔干涉法测量 Bump 高度,莫尔干涉法虽然精确,但是测量时间长、费用高。Tay 等^[3]通过对 Bump 的阴影进行建模从而测量其高度值,但该方法不适用于小尺寸和排布紧密的 Bump。共焦法测量一般用于离线测量,需要移动成像焦面的位置以构建 Bump 的三维形貌,一般用于提供 Bump 高度测量的参考值^[4]。He 等^[5]使用激光三角法测量 Bump,但激光三角法存在激光散斑的问题,激光散斑会影响图像处理的精度。白光三角法可以克服散斑噪声问题^[4,6-7],具有结构简单、测试速度快、精度高以及使用灵活方便等优点,因此在 Bump 高度的在线测量中有着较大的优势。

基于光学三角法的 Bump 高度测量研究已有报道。Ben-Levi 等^[8]提出了一种高度测量系统与方法,该系统在光条长度和宽度方向上具有不同的数值孔径角,通过光条像素移动计算 Bump 高度。Joo 等^[9]基于白光三角法开发系统和算法,主要将白光投影光束通过狭缝扩宽以照亮整个 Bump,通过 Bump 图像的强度和测量高度之间的关系找到最佳测量点。Meng^[4]、王棚^[10]等基于白光三角法,采用矩形截面的准直光带,通过建模推导了 Bump 实际高度的计算公式。He 等^[5]利用激光三角法获取 3D 数据点进行 Bump 高度的测量。Ye 等^[7]以会聚光投影光条,充分挖掘 Bump 扫描过程中光条变化情况的相关信息,设计了基于神经网络的智能误差补偿算法。以上研究均只考虑了底面无金属布线及缺陷的芯片样品,测量的重复性与准确性有待进一步提高。

针对现有 Bump 高度测量研究中存在的不足,本文基于白光三角法提出了一种复杂背景下 Bump 高度的测量方法。该方法采用会聚光条,利用 U-Net 深度学习模型进行光条图像分割,然后提取光条中心并拟合出扫描过程中 Bump 最大光斑的位置,实现了 Bump 高度的高准确性、高重复性测量。

2 原理

2.1 芯片凸点高度测量模型

Bump 高度为其最顶部到芯片底面的距离,其最顶部的切线方向为水平,基于此本文从斜入式光学三角法的基本原理出发,构建芯片 Bump 高度测量模型。光学三角法测量系统将高亮窄带光条投影在芯片样品上,在扫描过程中,当光条中心与 Bump 最顶部重合时,产生的光斑最大,可通过该位置确定 Bump 的高度。

如图 1 所示,Bump 高度的计算公式为:

$$h = d \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

式中: d 为最大光斑中心到光条中心的距离; θ 为光条中心处入射光线、反射光线相对于芯片底面法线的夹角。

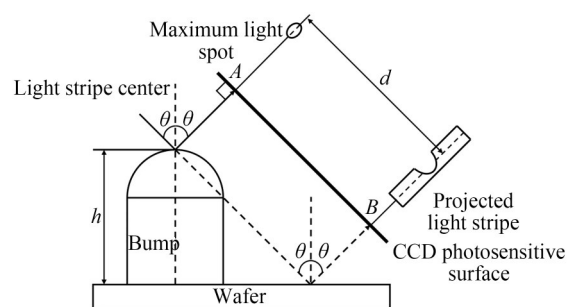


图1 Bump测量模型原理

Fig. 1 Schematic diagram of Bump measurement model

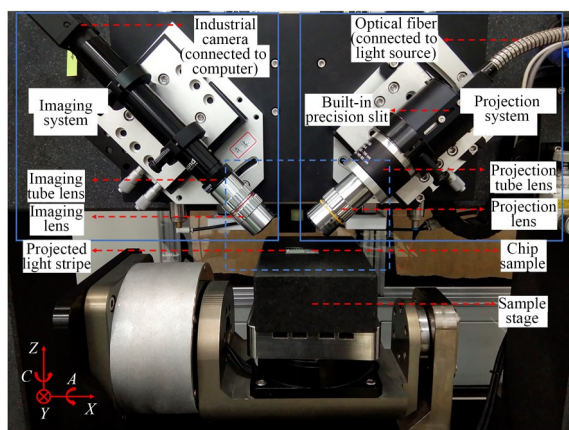
考虑成像放大倍数 β ,式(1)变为:

$$h = \frac{d \cdot \cos \theta}{\beta}. \quad (2)$$

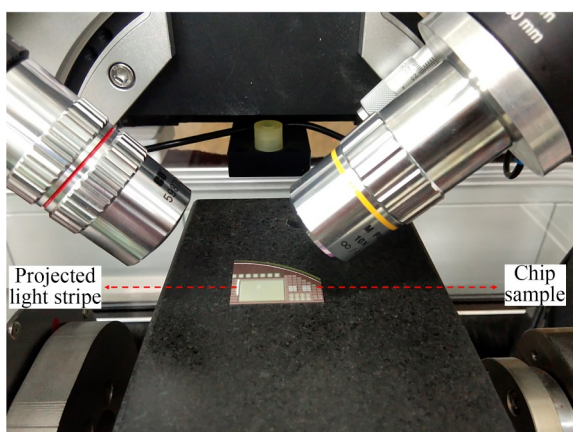
2.2 白光三角法测量系统搭建

本文搭建了基于白光三角法的芯片封装凸点高度测量系统。测量系统主要包括精密五轴气浮动平台、光学系统及数据采集软件,如图2所示。其中,光学系统主要由投影系统和成像系统

组成。强白光由光源(灯箱)通过光纤传入投影系统,投影会聚成光条;投影与成像系统对称分布,放大倍率均为5。



(a) 测量系统的组成
(a) Composition of measurement system



(b) 测量系统局部图
(b) Partial drawing of measurement system

图 2 基于白光三角法的芯片封装凸点高度测量系统
Fig. 2 Measurement system of chip package bump height based on white light triangulation

工业相机获得的原始图像宽度为 5 472 pixel,对应光条的实际长度约为 2.6 mm;图像高度根据不同高度级别的 Bump 进行设置,光条的实际宽度与精密狭缝的宽度有关。调整测量系统,使光条投影、成像同时对焦,通过气浮动平台的运动可完成芯片样品的扫描。图 3 为扫描过程中图像的有效信息部分。

如图 4 所示,强光、过曝条件下的细节丢失在一定程度上可以将芯片样品上的微小缺陷过滤



图 3 芯片样品的扫描过程示例
Fig. 3 Example of scanning process for chip samples

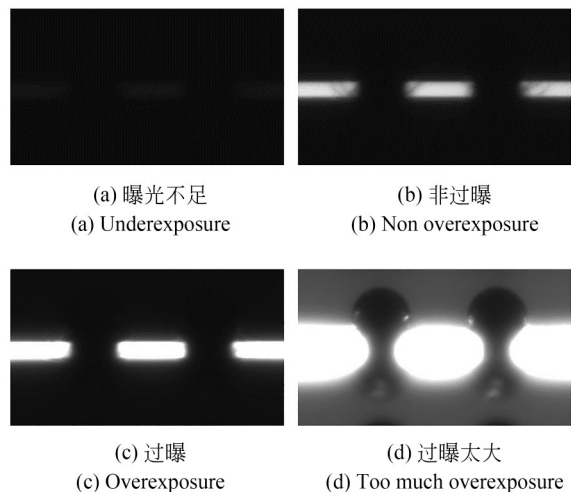


图 4 不同曝光时间下的成像效果
Fig. 4 Imaging effect under different exposure time

掉;同时,光强足够大可以缩短曝光时间,提高检测的效率。因此,本文测量系统中采用强白光来投影高亮光条,经测试,投影光条对焦时,照度可达 1.23×10^7 lux。

3 Bump 高度测量算法

本文算法的主要流程如图 5 所示,首先采用基于深度学习的图像分割算法提取光条图像的高质量部分,然后采用灰度重心法和插值法提取光条中心并完成光条的连接,基于上述结果对系统进行标定,最后依据扫描过程中 Bump 顶部光斑的变化规律确定其高度。

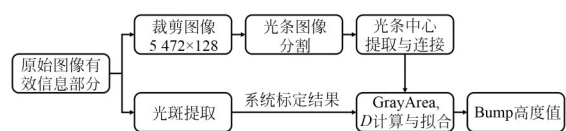


图 5 Bump 高度测量算法流程
Fig. 5 Flow chart of bump height measurement algorithm

3.1 光条图像分割算法

在光条扫描芯片样品测量 Bump 高度的过程中,由于背景复杂,成像在图像上的光条往往不是完好无损的,如图 6 所示。光条上的局部缺陷

会导致光条中心提取不准确,因此,需要将光条中完整且高质量的区域分割出来,排除各种有缺陷的区域,这样才能为后续光条中心的准确提取提供保障。

Ronneberger O 等^[11]的研究结果表明,U-Net 模型(见图 7)可以在多样化的背景下完成图像分割,其运算速度也可以满足芯片检测中高速处理

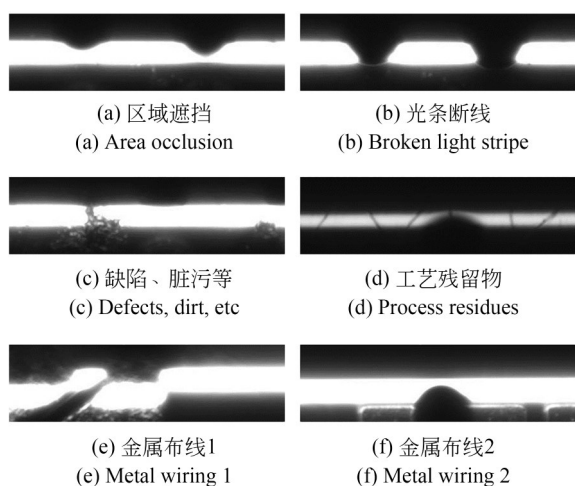


图 6 光条图像复杂背景示例((a)(b)(c)(d):底面没有金属布线;(e)(f):底面具有金属布线)

Fig. 6 Example of complex background of light stripe image ((a) (b) (c) (d): there is no metal wiring on the bottom surface; (e) (f): metal wiring on the bottom)

的需求。因此,本文引入 U-Net 模型来提取光条的高质量部分,以克服光条图像的各种复杂情况。

本文从实验采集的图片中随机抽取部分有代表性的图片构建光条数据集,使用 Labelme 软件^[12]进行标注,将一张光条图像定义为两部分:光条高质量区域和其余区域,掩码区域(见图 8(b))即为所要提取的高质量区域。为了让模型更关注图像上的细节,去除冗余信息,突出光条区域,减小计算量,本文将图像裁剪为 5472×128 pixel,并按照训练集:验证集:测试集 = 70%:15%:15% 的比例随机划分数据集。在模型训练过程中,对训练图像应用数据增强技术,模拟测量过程中可能出现的多种情况。

U-Net 模型使用 TensorFlow2 深度学习框架构建,损失函数为 Sigmoid 函数与二元交叉熵的组合,网络权重使用 He initialization 进行初始化,并根据 Adam 规则更新,调整超参数,进行模型训练。训练完成后,光条图像高质量部分提取的效果如图 8(c)所示。经实验,在 NVIDIA GeForce RTX3090 24GB 显卡上,使用 TensorRT 进行部署,模型的 GPU 计算耗时为 1.20 ms/张,可满足实时检测的需求。

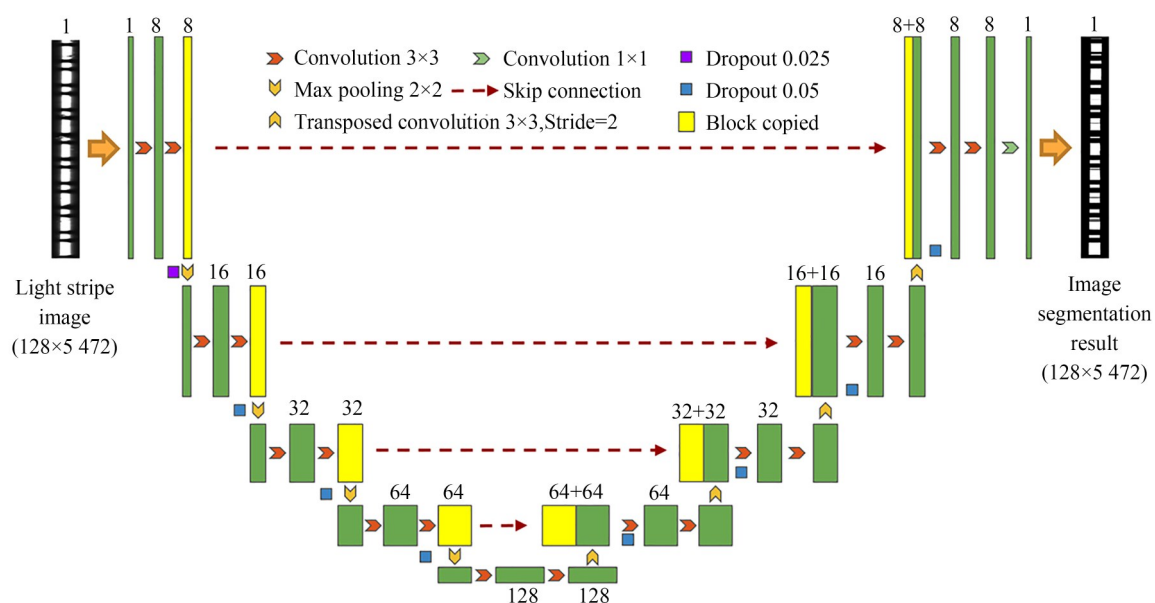


图 7 U-Net 模型及优化后的结构参数

Fig. 7 U-Net model and optimized structural parameters

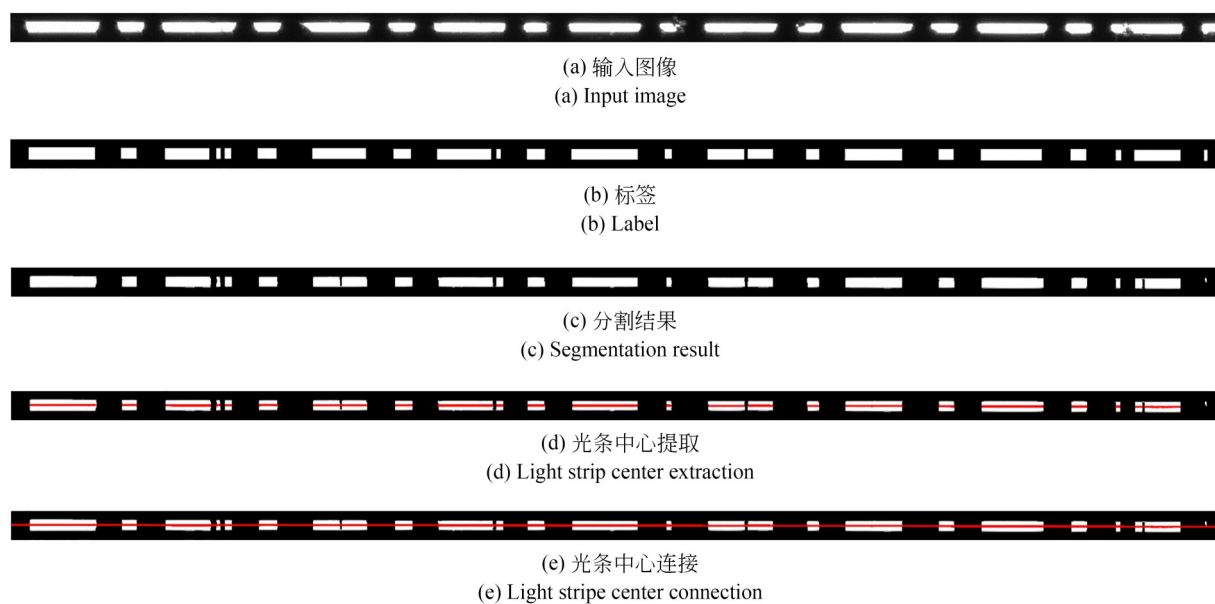


图 8 光条中心的完整提取流程

Fig. 8 Complete extraction process of light stripe center

二元交叉熵的公式如下:

$$l_{\text{oss}} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cdot \log(p(y_i)) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - p(y_i)), \quad (3)$$

式中: y 为二元标签 0 或者 1; $p(y)$ 为输出属于 y 标签的概率。

3.2 光条中心提取与连接

光条中心是 Bump 高度测量的基准, 光条中心提取的准确性会直接影响到 Bump 高度的测量结果。本文测量系统投影光条的成像过程可描述为强白光依次经过高斯函数(光源)、矩形窗函数(精密狭缝)、点扩散函数(成像光学系统)和限幅环节(过曝, CCD 像素饱和)。根据整个光路的传播, 光条横截面的光强分布形式理论上为高斯函数与矩形窗函数卷积之后得到的函数。

投影光条经过工业相机成像, 原本的连续信号被采样为离散信号, 即图像灰度, 其范围为 0~255 的整数。根据实际光强、曝光时间的不同, 最终的光条图像分为非过曝和过曝两种状态。由于像素饱和, 过曝状态的光条顶部被“削平”。

极值法、阈值法、灰度重心法、曲线拟合法(如高斯曲线拟合等)和基于 Hessian 矩阵的 Steger 算法等是十分经典的光条中心线提取算法^[13]。综合考虑时效性与光条中心提取的准确性、抖动程度, 针对非过曝、过曝状态下的光条中

心提取, 本文均选用灰度重心法。

在光条高质量部分提取的基础上进行光条中心提取, 保证光条中心的位置信息均来自于光条的高质量部分。然后, 利用线性插值与最近邻插值相结合的算法对空缺部分的光条中心进行插值, 完成光条中心的连接, 即基底光条中心的完整提取。

综上所述, 光条中心的完整提取过程如图 8 所示。具体步骤为: (1) 原始图像裁剪 (5472×128 pixel); (2) 基于 U-Net 的光条高质量部分分割; (3) 基于灰度重心法的光条中心提取; (4) 线性插值与最近邻插值相结合, 完成光条的连接。

3.3 测量系统标定

目前, 针对线结构光的标定主要分为两类^[14]: 一类是基于相机投影模型与光平面方程的传感器标定方法; 另外一类是基于黑盒模型的直接标定。直接标定在线结构光测量系统^[15]和白光干涉测量系统^[16]等上都有相关的应用。考虑到显微系统的成像景深较小, 本文采用模型简单、精度高的直接标定法, 通过直接拟合像素移动与真实高度的关系获得相关系数。

将光条对焦在标准平面或芯片样品的无 Bump 区域, 移动气浮动平台 Z 轴 (Z 轴以精度为 100 nm 的光栅尺反馈读数), 使光学系统从相对于对焦位置的 0 μm 移动到 200 μm , 隔 10 μm 拍

一张图像,计算每个位置相对于对焦位置的光条中心所有点的距离平均值,重复上述过程 5 次取平均。然后,分别取光条长度方向从左到右 5 个位置的局部区域,计算实际高度值与像素值的直线拟合关系。

由表 1 可以看出,系统成像无明显畸变,5 个位置的 a 、 b 值变化无明显规律,数值略微有差异是由噪声导致的。取平均值得 $y=0.339x+0.253$,即 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的实际高度差对应图像上 0.339 pixel 的行方向像素值变化。

3.4 Bump 高度的确定

实际扫描过程中,光条不可能都刚好处在最大光斑的位置。经多次实验及数据处理发现:Bump 顶部所产生光斑的灰度面积或面积与光斑灰度重心(或中心)到光条中心的距离(D)的变化

表 1 五个位置直线拟合系数(以某一次标定实验为例)
Tab.1 Linear fitting coefficient of 5 positions (Take a calibration experiment as an example)

位置 (±100 pixel)	$y=ax+b$		
	a	b	R^2
336	0.339	0.232	1.000
1 536	0.339	0.311	1.000
2 736	0.339	0.290	1.000
3 936	0.339	0.238	1.000
5 136	0.339	0.195	1.000
平均	0.339	0.253	1.000

关系可拟合为一维高斯函数关系,高斯函数拟合后参数 b 可作为 Bump 的高度测量值,并且该关系在不同尺寸级别的 Bump 上均成立,如图 9 所示。

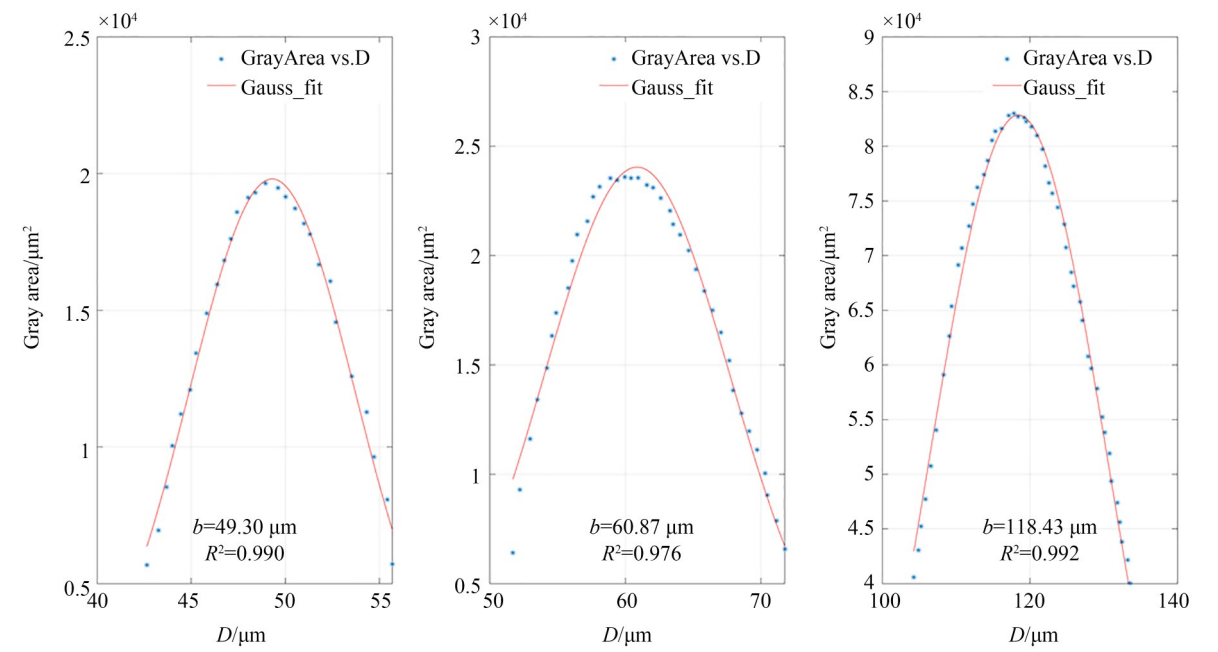


图 9 光斑的灰度面积与光斑灰度重心到光条中心的距离的关系
Fig. 9 Relationship of grayscale area with distance between grayscale gravity and stripe center

一维高斯函数公式如下：
$$f(x)=a\cdot\exp\left(-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right).$$
 (4)
考虑芯片样品局部区域的细节,对于分布于光条长度方向上不同位置的 Bump,本文以局部区域的光条中心拟合直线后来计算 D 值。计算出 Bump 高度的像素值后,利用系统标定结果就

可以获得 Bump 的实际高度。

4 测量实验及结果分析

4.1 Bump 测量重复性

分别在非过曝、过曝情况下测量某一芯片样品同一区域的 Bump(8×16 个),重复扫描测量 5

次,计算每个 Bump 的测量值极差,对两种情况下的测量效果进行对比,如图 10 所示。

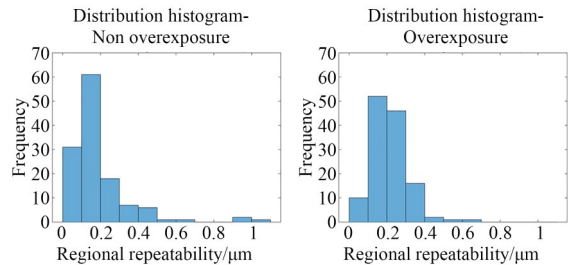


图 10 非过曝、过曝情况下区域重复性分布

Fig. 10 Regional repeatability distribution under non overexposure and overexposure

非过曝情况下,重复性的平均值为 $0.19\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.163\ \mu\text{m}$;过曝情况下,重复性的平均值为 $0.21\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.095\ \mu\text{m}$ 。从结果可以看出,过曝情况下的测量重复性比非过曝情况下的好,分布也更加集中,非过曝情况下的测量会出现不稳定的情况。

4.2 Bump 测量准确性

使用奥林巴斯 3D 激光共聚焦显微镜(型号: LEXT OLS5000)测量 16 个 Bump 的高度值作为参考。然后,分别在非过曝、过曝情况下采用白光三角法进行测量实验,取 5 次重复扫描的测量平均值作为最后结果。

非过曝情况下,测量平均误差为 $0.13\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.810\ \mu\text{m}$;过曝情况下,测量平均误差为 $-0.04\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.408\ \mu\text{m}$ 。从结果可以看出,本文 Bump 高度测量达到了较高的准确性,进一步地,过曝情况下的测量准确性优于非过曝情况下的,误差更小,分布总体上更集中。

如图 11 所示,测量值的最大偏差为 $-1.30\ \mu\text{m}$,原因在于该 Bump 顶部存在缺陷,成像时产生了异常光斑,如图 12 所示。这也进一步说明了本文的测量系统及方法在一定程度上有助于检测 Bump 结构的完整性。

4.3 扫描步距对重复性、准确性的影响

芯片封装工业检测有着大吞吐量的需求,更大的扫描步距可以成倍地提高检测效率。以高度为 $55\ \mu\text{m}$ 级,直径为 $45\ \mu\text{m}$ 级的 Bump 测量为例,实验时是以 $1\ \text{张}/1\ \mu\text{m}$ 的步距进行测量的,这里通过设置不同的采样间隔,模拟实验中的不同

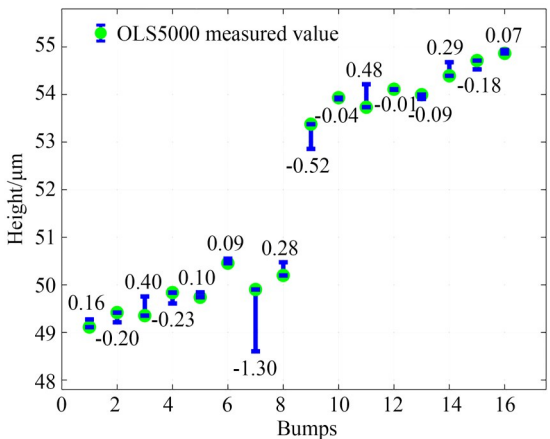


图 11 Bump 高度测量误差(过曝)

Fig. 11 Height measurement error of Bumps (overexposure)

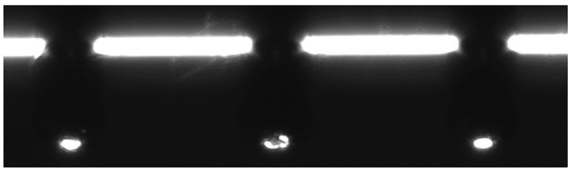


图 12 测量误差较大的 Bump(第二个光斑)

Fig. 12 Bump with large measurement error (the second light spot)

扫描步距,得到结果如表 2 所示。

当扫描步距为 $9\ \mu\text{m}$ 时,本文所提算法仍然能在保证较好测量效果的情况下稳健地进行 Bump 高度测量。进一步加大扫描步距时,部分 Bump 无法获得足够的信息,导致算法失效。尽

表 2 扫描步距对重复性、准确性的影响(过曝状态)
Tab. 2 Effect of scanning step on repeatability and accuracy (overexposure state)

扫描步距/ μm	区域重复性/ μm		准确性/ μm	
	平均值	标准差	平均值	标准差
1	0.21	0.095	-0.04	0.408
3	0.26	0.097	-0.03	0.411
5	0.36	0.133	-0.03	0.414
7	0.41	0.152	-0.03	0.424
9	0.48	0.184	-0.05	0.406
10	0.97	4.770	-0.07	0.413
11	0.95	4.766	-0.11	0.405
12	7.25	17.661	-1.45	3.653

管如此,相对于 Bump 直径约为 20% 的扫描步距,可以极大地提高 Bump 高度的测量效率。

4.4 测量算法验证

为验证本文所提算法的鲁棒性以及适用性,在过曝情况下,分别进行不同类型、不同尺寸级别(以高度级别标识)芯片样品的重复性测量实验(对同一排 Bump 重复测量 5 次),如图 13 所示。如表 3 所示,实验结果说明本文所提算法可以适用于不同类型、不同尺寸的芯片样品,并可以达到较好的测量效果。

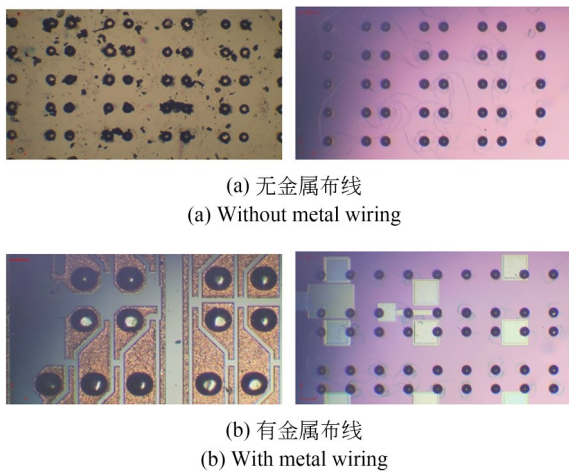


图 13 芯片样品的复杂背景示例

Fig. 13 Examples of complex backgrounds for chip samples

为验证本文所提算法的有效性,在过曝情况下进行如下 3 组对比实验:(1)本文所提算法(U-Net 分割+函数拟合);(2)U-Net 分割,仅取扫描过程中获取的最大光斑;(3)Otsu(大津阈值法)分割^[17-20],仅取扫描过程中获取的最大光斑。实验结果表明,本文所提算法可以实现重复性更好、准确性更高的 Bump 高度测量。

5 结 论

本文基于白光三角法搭建了 Bump 测量系统,训练了 U-Net 模型进行复杂背景下的光条分

表 3 不同类型、不同尺寸级别芯片样品的重复性测量结果

Tab. 3 Repeatability measurement results of chip samples with different types and sizes

区域编号	金属布线	高度级别/ μm	平均极差/ μm	最大极差/ μm
1	无	45	0.11	0.17
2	无	55	0.07	0.13
3	无	60	0.12	0.18
4	无	60	0.08	0.16
5	无	60	0.11	0.16
6	有	60	0.12	0.18
7	有	60	0.10	0.14
8	有	60	0.07	0.17
9	有	120	0.16	0.38
10	有	120	0.11	0.26

表 4 不同算法的对比实验

Tab. 4 Comparison experiment of different algorithms

算法组合	区域重复性/ μm		准确性/ μm	
	平均值	标准差	平均值	标准差
U-Net 分割+函数拟合	0.21	0.095	-0.04	0.408
U-Net 分割	0.73	0.271	-2.59	1.736
Otsu 分割	0.58	0.226	-2.12	1.942

割,并通过将 Bump 顶部光斑的灰度面积与光斑灰度重心到光条中心的距离关系拟合为一维高斯函数的方法,实现了 Bump 高度的精确测量。实验结果表明:过曝情况下,Bump 的测量重复性平均值为 $0.21 \mu\text{m}$,标准差为 $0.095 \mu\text{m}$,测量平均误差为 $-0.04 \mu\text{m}$,标准差为 $0.408 \mu\text{m}$;最大可实现在相对于 Bump 直径 20% 左右的扫描步距下稳健地测量。所提方法实现了复杂背景下 Bump 高度精准度高、鲁棒性好的测量,可满足芯片封装检测中晶圆 Bump 共面性在线检测的要求。在后续的研究中,将进一步完善光条处理及其中心提取的算法,并分析有缺陷 Bump 所产生的异常光斑。

参考文献:

[1] TIM S. *NanoResolution MRS Sensor Delivers Fast, Precise 3D Inspection and Measurement for*

Advanced Semiconductor Packaging Applications [DB/OL]. 2022. <http://www.cyberoptics.com/>.
[2] KIM H J, YOON D H, KIM H I. 3D precision mea-

- surement of scanning moire using line scan camera[J]. *Hankook Kwanghak Hoeji*, 2008, 19(5): 376-380.
- [3] TAY C J. Measurement of a micro-solderball height using a laser projection method[J]. *Optics Communications*, 2004, 234(1/2/3/4/5/6): 77-86.
- [4] MENG F C, ZHANG Z L, KANG Y H, *et al.* Height measurement of microbumps using a white-light triangulation method [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(8): 2036-2044.
- [5] HE Z H, SCHAEFER J. High speed 3D inspection of advanced package interconnect uniformity [C]. 2018 *International Wafer Level Packaging Conference (IWLPC)*. October 23-25, 2018, San Jose, CA, USA. IEEE, 2018: 1-6.
- [6] 叶瑞乾, 郑鹏, 王磊, 等. 基于白光三角法的凸点封装高度测量仿真研究[J]. *光学与光电技术*, 2022, 20(1): 43-49.
- YE R Q, ZHENG P, WANG L, *et al.* Simulation research on height measurement of bump package based on white light triangulation method[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2022, 20(1): 43-49. (in Chinese)
- [7] YE R Q, ZHENG P, GAO Y, *et al.* An intelligent error compensation method for height measurement of bump package [C]. 2021 *IEEE 15th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)*. October 29-31, 2021, Xiamen, China. IEEE, 2021: 74-78.
- [8] BEN-LEVI M, HAIFA I L. System and method for height triangulation measurement: US8363229B2[P]. 2010-09-02.
- [9] JOO B G, DONG CHO T. 3D accuracy enhancement of BGA shiny round ball using optical triangulation method [J]. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2015, 32(9): 799-805.
- [10] 王棚, 孟繁昌, 张滋黎, 等. 基于光学三角法的芯片凸点高度测量[J]. *光子学报*, 2022, 51(5): 0512001.
- WANG P, MENG F CH, ZHANG Z L, *et al.* A bump height measurement method based on optical triangulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(5): 0512001. (in Chinese)
- [11] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. *U-net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*[M]. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2015: 234-241.
- [12] WADA K. Labelme: image polygonal annotation with python [Z/OL]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5711226>.
- [13] 冀振燕, 宋晓军, 付文杰, 等. 激光光条中心线提取研究综述[J]. *测控技术*, 2021, 40: (6)1-8.
- JI ZH Y, SONG X J, FU W J, *et al.* Review on centerline extraction for laser stripe [J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(6): 1-8. (in Chinese)
- [14] 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020001.
- ZHANG X, ZHANG J. Summary of line structure cursor calibration methods[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020001. (in Chinese)
- [15] 邹媛媛, 赵明扬, 张雷. 基于量块的线结构光视觉传感器直接标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1108002.
- ZOU Y Y, ZHAO M Y, ZHANG L. Direct calibration method of linear structured light vision sensor based on gauge block[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1108002. (in Chinese)
- [16] 崔长彩, 杨成, 李子清, 等. 蓝宝石衬底表面形貌检测和评价系统[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2556-2566.
- CUI CH C, YANG CH, LI Z Q, *et al.* Measuring and evaluating system for surface morphology of sapphire substrates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(11): 2556-2566. (in Chinese)
- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [18] 周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1204004.
- ZHOU Y, MENG X Q, JIANG D B, *et al.* Extraction method of structured light stripe center under complex interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204004. (in Chinese)
- [19] 万卓仁, 赖磊捷. 基于自适应窗口的线结构光条中心提取方法[J]. *自动化仪表*, 2020, 41(10): 43-46, 50.
- WAN ZH R, LAI L J. Method for extracting the center of line structured light stripe based on adaptive window [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(10): 43-46, 50. (in Chinese)

- [20] 孙传富,彭涛,陆永刚,等. 连铸坯三维测量多线结构光的中心条纹快速提取[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 380-392.
- SUN CH F, PENG T, LU Y G, *et al.* Fast ex-

traction center stripe of multi-line-structured light for three-dimensional measurement of casting slab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(3): 380-392. (in Chinese)

作者简介:



林贤锦(2000—),男,福建泉州人,硕士研究生,2022年于厦门大学获得学士学位,主要从事机器视觉及人工智能技术的研究。E-mail: linxianjin@stu.xmu.edu.cn

通讯作者:



王磊(1977-),男,安徽合肥人,博士,教授,1997年、2002年于厦门大学分别获得学士、硕士学位,2007年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为机器视觉、智能制造、图像处理和光谱仪器。E-mail: wanglei33@xmu.edu.cn