

# 一种提高芯片与基板对准精度的方法

韩雷, 张丽娜, 王福亮, 李军辉, 张亚楠

(中南大学 机电工程学院, 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 设计一套吹气装置, 并分别采用相位相关法和二元二次曲面拟合亚像素法计算未启用吹气装置和启用吹气装置后图像间的平移, 采用梯度函数对图像清晰度进行评价。研究表明: 未启用吹气装置时, 图像抖动与模糊现象严重; 随着温度升高, 图像间的平移与平移标准差增大, 在键合温度为 160 °C 左右时, 最大抖动可达 7~8 个像素, 达不到对准精度的要求; 启用吹气装置后, 图像间整像素级的抖动明显消除, 在键合温度下最大抖动量不超过 0.3 个像素, 能满足对准精度要求; 启用吹气装置后, 图像梯度明显增大, 消除了图像模糊现象。

**关键词:** 热超声倒装键合; 图像抖动; 相关函数; 亚像素; 曲面拟合; 梯度函数

中图分类号: TP391.41; TP274<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)01-0184-06

## A method for improving alignment precision of chip and substrate

HAN Lei, ZHANG Li-na, WANG Fu-liang, LI Jun-hui, ZHANG Ya-nan

(Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing, Ministry of Education, School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A set of pneumatic device was designed. The phase correlation algorithm was adopted to compute the translation between images which were captured without the pneumatic device and the sub-pixel method based on binary-quadratic curved surface fitting was adopted to compute the translation between images which were captured with the pneumatic device. Gradient function was adopted to evaluate image definition. The results show that without the pneumatic device, the phenomenon of image dithering and blurring is intense. The translation and its standard deviation increase with the increase of temperature. The dithering can reach 7-8 pixels at the working temperature, which can not meet the requirement of precision alignment. With the pneumatic device, the integral pixel image dithering disappears. The maximal dithering is less than 0.3 pixel at the working temperature, which can meet the requirement of precision alignment. The gradient function value of these images becomes bigger and the image blurring is eliminated after using the pneumatic device.

**Key words:** thermosonic flip-chip bonding; image dithering; correlation function; sub-pixel; curved surface fitting; gradient function

随着电子制造工艺的进步以及元件的微型化、组装的高密化, 微电子行业对制造设备的运动速度和精度的要求越来越高。在现代电子封装设备中, 芯片及其上焊盘在工作台上的精确位置只能通过视觉系统实

测予以确定<sup>[1-3]</sup>。在热超声倒装键合过程中, 芯片凸点和基板焊盘定位以及对准精度误差要求小于 5  $\mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>。键合前首先要寻找基板或芯片, 实现芯片与基板的对准。此过程在视觉系统的引导下, 通过驱动运动平台

收稿日期: 2009-01-10; 修回日期: 2009-03-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(“973”计划)项目(2009CB724203); 国家 02 重大专项基金资助项目(2009ZX02038)

通信作者: 韩雷(1955-), 男, 福建厦门人, 教授, 博士生导师, 从事微电子封装及其可靠性、数字图像处理等研究; 电话: 0731-88877350; E-mail: leihanxyz@yahoo.com.cn

的移动来完成。在倒装键合工艺中,加热台上的温度可达 150~160 °C,会导致空气湍流运动,造成空气折射率的随机变化而导致光波振幅和相位随机起伏,成像焦平面像点强度分布扩散,点扩展函数增大,峰值降低,图像模糊和像素位置偏移及抖动等,给目标识别、定位带来很大困难<sup>[5]</sup>。这种现象与高速飞行导弹导引头成像时的气动光学效应和天文学中因大气湍流所导致的湍流退化成像类似,只是湍流退化程度不同。由于湍流退化数学模型难以确切描述,因此,对湍流退化图像复原相当困难<sup>[6-7]</sup>。为研究温度对目标识别、定位的影响,提高芯片与基板的对准精度,本文作者通过在加热条件下采集大量图片,发现图像间最显著的现象是抖动与模糊,这给芯片与基板的对准带来了困难。考虑到键合时因加热将导致加热台附近空气湍流运动,影响成像质量,提出通过吹稳定气流的方式以层流代替湍流,冷却周围空气的方法来提高视觉系统的识别能力,提高基板与芯片对准精度。

## 1 图像平移运动的计算

### 1.1 整像素级图像平移运动的计算

#### 1.1.1 相位相关法

相位相关法是一种非线性、基于傅里叶变换的频域相关技术,用于检测 2 幅图像之间的平移。相位相关法对噪声不敏感,且不受帧间光照变化的影响,是一种鲁棒性强的图像匹配方法,因此,在用相位相关法求平移量之前不需要将亮度均一化。

在图像处理过程中,图像可以用二维数组来表示,数组中元素值表示对应像素的灰度。设数组  $f_1$  表征参考图像,数组  $f_2$  表征待配准图像, $f_2$  相对  $f_1$  的平移点坐标为  $(x_0, y_0)$ , 即

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

其傅里叶变换关系为

$$F_2(\omega_x, \omega_y) = F_1(\omega_x, \omega_y) \exp[-i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)] \quad (2)$$

指数相位偏移因子可以通过  $f_1$  和  $f_2$  的互功率谱计算:

$$\frac{F_1(\omega_x, \omega_y) F_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|F_1(\omega_x, \omega_y) F_2(\omega_x, \omega_y)|} = \exp[i(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)] \quad (3)$$

对(3)式进行傅里叶逆变换,有

$$p(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (4)$$

式中:  $p(x, y)$  为图像间相关函数;  $\delta(x - x_0, y - y_0)$  为偏移后的  $\delta$  函数。进行逆变换之后,相位相关法结合图像插值也可以用于亚像素计算,但精度只能达 0.1 个像素,且计算较复杂<sup>[8]</sup>。

#### 1.1.2 相关函数法

在源图像中,取以所求位移点  $(x, y)$  为中心的  $(2M+1) \times (2M+1)$  矩形计算子区(又称模板)在变形后的目标图像中移动,并按某一相关函数进行计算,寻找与模板的相关系数为最大值且以  $(x', y')$  为中心的  $(2M+1) \times (2M+1)$  矩形区域,以确定目标的整像素位移。目前,常用的效果较好相关函数有以下 3 种。

(1) 标准互相关函数:

$$C_0 = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y)g(x+u, y+v)]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f^2(x, y)} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M g^2(x+u, y+v)}} \quad (5)$$

其取值范围为  $[0, 1]$ 。

(2) 标准化协方差相关函数:

$$C_1 = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - h_m][g(x+u, y+v) - g_m]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - h_m]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x+u, y+v) - g_m]^2}} \quad (6)$$

其取值范围为  $[-1, 1]$ 。

(3) 最小平方距离相关函数(SSDA):

$$C_2 = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - g(x+u, y+v)]^2 \quad (7)$$

其取值范围为  $[0, +\infty]$ 。其中:  $C$  为相关函数;  $f(x, y)$  表征目标所在的源图像;  $g(x+u, y+v)$  表征模板图像;  $h_m$  和  $g_m$  为其计算窗口的平均灰度;  $u$  和  $v$  为模板中心的整像素位移。通过确定相关函数的最大值位置就可以确定目标的位置。其中标准化协方差相关函数是利用 2 个相关函数的均方差来对协方差相关函数进行归一化。这种相关法能起到突出特征变换的效果,使得相关系数矩阵呈明显的单峰分布,并且峰顶形状更尖锐,在实际中应用较多<sup>[9]</sup>。

由于数字图像记录的是离散灰度信息,利用式(5)~(7)来进行相关搜索时所获得的是整像素位移,要得到亚像素位移需要通过其他方法来实现。

## 1.2 亚像素级图像平移运动的计算

### 1.2.1 曲面拟合亚像素法

目前,亚像素位移测量算法主要有亚像素灰度插值法<sup>[9]</sup>、曲面拟合法<sup>[10]</sup>、多项式插值法<sup>[10]</sup>、梯度法<sup>[11-12]</sup>、频域相关法<sup>[13]</sup>、坐标轮换法(十字搜索法)<sup>[14]</sup>、牛顿-拉普森方法<sup>[15-16]</sup>、拟牛顿方法<sup>[17]</sup>等,这些算法所能达到的定位精度为0.005~0.100个像素。其中,以曲面拟合法与梯度法因计算量小、精度较高而较常用。一般常用的拟合方法有高斯函数拟合法和二维多项式拟合法。对于相关函数曲面比较平缓的情况,高斯拟合法不仅需要较大的拟合窗口,而且可能产生较大的误差,因此,在实际中多采用二元二次多项式来拟合相关函数曲面。相关函数的计算可以采用式(5)~(7),不同的相关函数对亚像素计算精度的影响可以忽略<sup>[10]</sup>。为保证计算精度,图像的点扩展函数应尽可能小,以减小图像的模糊效应。

通过前面的相关函数搜索到整像素,找到整像素匹配点 $(x, y)$ 。假设其周围各点的相关系数可用下面的二元二次函数表示:

$$G(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (8)$$

对于 $n \times n$ 的拟合窗口有 $n \times n$ 个方程,可用最小二乘法求解待定系数 $a_0 \sim a_5$ 。曲面的极值点位置为:

$$x' = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, \quad y' = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}$$

$(x', y')$ 即为所求的亚像素位移坐标。

在用曲面拟合计算亚像素时,计算窗口与拟合窗口的选择很关键。一般计算窗口越大,精度越高,但窗口达到一定值后,精度提高不明显,而计算量增加。所以,并不是计算窗口越大越好,拟合窗口一般选择 $3 \times 3$ 为最佳<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 曲面拟合亚像素法验证

图像A与图像B均在水平及垂直方向分别存在 $D_x$ 及 $D_y$ 像素的相对位移,2幅图像原窗口有 $M \times N$ 个像素。通过缩小图像来产生亚像素位移,缩小后图像窗口为 $M_i \times N_i$ ,则缩小后2幅图像水平与垂直位移分别为 $d_x = D_x M_i / M$ 和 $d_y = D_y N_i / N$ 个像素。本文中图像A与图像B原始窗口有 $900 \times 900$ 个像素,相对位移分别为: $D_x = 8$ ,  $D_y = 10$ 。计算时,采用3种不同计算窗口进行比较,结果如表1和表2所示。

通过比较不同的计算窗口发现:以 $41 \times 41$ 个像素为计算窗口时,计算误差较大;当计算窗口为 $61 \times 61$

表1 沿 $x$ 方向位移理论值与模拟值比较

Table 1 Comparison of the displacements along  $x$  direction between theoretical value and simulated value

位移理论值 $d_x$	单位: 像素		
	窗口为 $41 \times 41$ 的位移 计算值 $d_x$	窗口为 $61 \times 61$ 的位移 计算值 $d_x$	窗口为 $81 \times 81$ 的位移 计算值 $d_x$
7.556	8.043	7.606	7.526
6.667	6.975	6.675	6.659
5.778	5.813	5.804	5.804
4.889	4.936	4.914	4.913
4.000	4.003	4.002	4.002

表2 沿 $y$ 方向位移理论值与模拟值比较

Table 2 Comparison of displacements along  $y$  direction between theoretical value and simulated value

位移理论值 $d_y$	单位: 像素		
	窗口为 $41 \times 41$ 的位移 计算值 $d_y$	窗口为 $61 \times 61$ 的位移 计算值 $d_y$	窗口为 $81 \times 81$ 的位移 计算值 $d_y$
9.444	9.652	9.474	9.464
8.333	8.422	8.308	8.313
7.222	7.171	7.189	7.198
6.111	6.097	6.097	6.084
5.000	5.012	5.001	4.999

个和 $81 \times 81$ 个像素时,计算精度较高,两者之间在计算精度上的差别并不明显。从计算结果可以看出:曲面拟合求亚像素位移精度较高,其精度可以达到0.005~0.100个像素,满足要求。

## 2 图像采集与处理

### 2.1 实验装置及图像采集

在热超声倒装键合机上分别采集A和B2组芯片图像,其中A组采集时没有启用吹气装置,B组采集时启用吹气装置,所设计的气流方案示意图如图1所示。图中 $X$ 轴方向为通气管方向, $Y$ 轴方向为气流方向, $Z$ 轴方向为竖直方向。实验吹气装置的气源为1个空气压缩机,最大压力为0.4 MPa,通过1个稳压阀可以维持稳定压力,外接1个直径为8 mm的软管,软管末端被封住,在接近软管末端的一侧有5个针孔,间距相等,呈直线排列。从小孔中吹出的压缩空气形成一层较强的气流,沿 $Y$ 轴方向吹向倒装键合台上的芯片,所形成的气流面与芯片平行。

实验光学系统为1个1倍定焦物镜, 将来自目标的光线聚焦到 CCD(电荷耦合器件)传感器光敏器件上, 照明系统为1组环形排列的 LED(发光二极管)。图像数据采集使用黑白图像采集卡 Matrox Meteor-II/Standard, 物像比为 1:40, 实际芯片面积为 1 mm×1 mm。经换算发现: 若要对准精度小于 5 μm, 则所采集的图像间抖动量应控制在 0.6 个像素以下。由于摄像头光轴与芯片所在的水平面不是完全垂直, 摄像头光轴与 Z 轴间存在 1 个很小的夹角, 造成芯片的长宽比并不是 1:1。

芯片图像示意图如图 2 所示。像空间芯片图像与物空间中顺时针旋转 90°后的芯片相对应, 即物空间(图 1)中的轴与像空间(图 2)中的 Y' 轴对应。

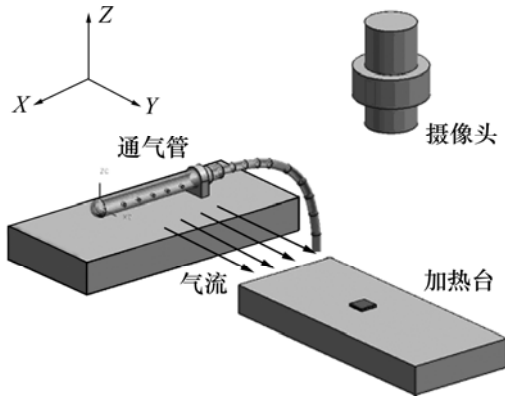


图 1 气流方案示意图

Fig.1 Draught scheme sketch map

图像采集时的温度为室温(20 °C), 实验过程如下:

(1) 加热台未加热时, A 和 B 组各采集图像 300 张。

(2) 加热台加热温度分别为 80, 120 和 160 °C, 在每种温度下, A 和 B 组各采集图像 300 张。

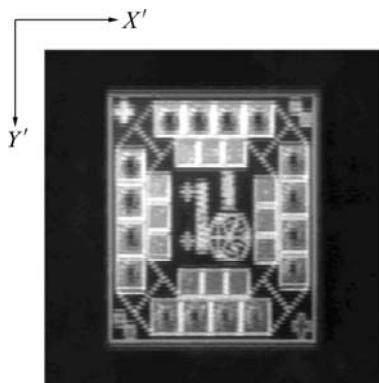


图 2 芯片图像

Fig.2 Image of die

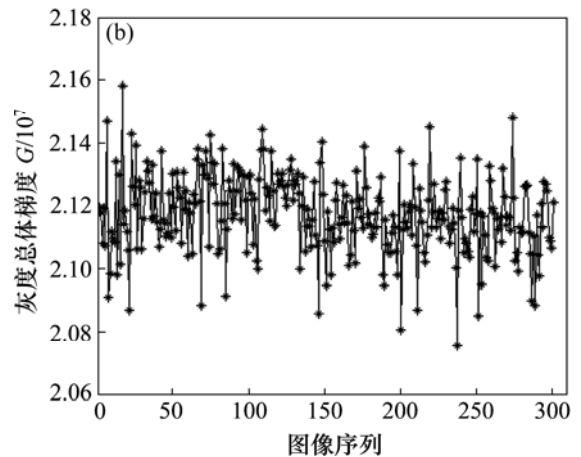
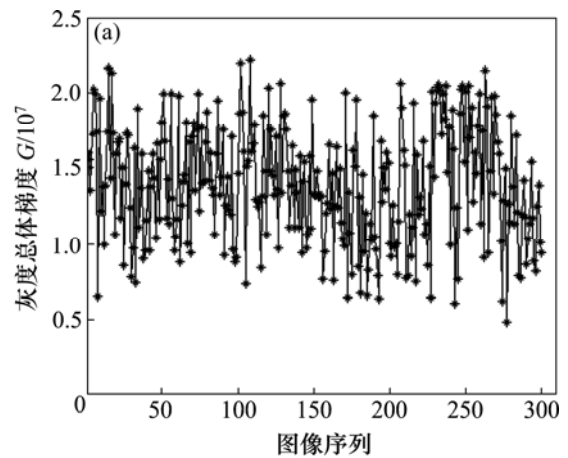
## 2.2 图像清晰度评价

通过实验发现: 温度越高, 模糊图像越多, 这类类似于离焦所引起的图像模糊。本文采用梯度函数对图像清晰度进行评价。梯度函数表达式为:

$$G = \sum_x \sum_y [I_x^2(x,y) + I_y^2(x,y)] \quad (9)$$

其中:  $I_x$  和  $I_y$  分别表示图像水平和垂直方向的梯度。对于梯度函数, 对焦良好的图像便有更尖锐的边缘, 其灰度总体梯度应更大<sup>[18]</sup>。

在进行图像清晰度评价时, 应先对图像进行预处理, 消除帧间光照差别的影响。分别计算 160 °C 时 A 和 B 2 组图像的梯度函数, 结果如图 3 所示。若将灰度总体梯度  $G$  小于  $1.400 \times 10^7$  的图像判为模糊图像, 则这样的图像有 155 张。可见: 在 160 °C, A 组模糊图像占 1/2 左右, 且 A 组图像灰度总体梯度波动范围大, 最小灰度总体梯度仅为  $0.482 \times 10^7$ 。B 组图像灰度总体梯度明显高于 A 组灰度总体梯度, 其波动范围也比 A 组的小, 最小灰度总体梯度达  $2.076 \times 10^7$ 。可见: 采用吹气装置后, 可以消除因加热所带来的图像模糊效应, 为亚像素计算提供了精度保证。



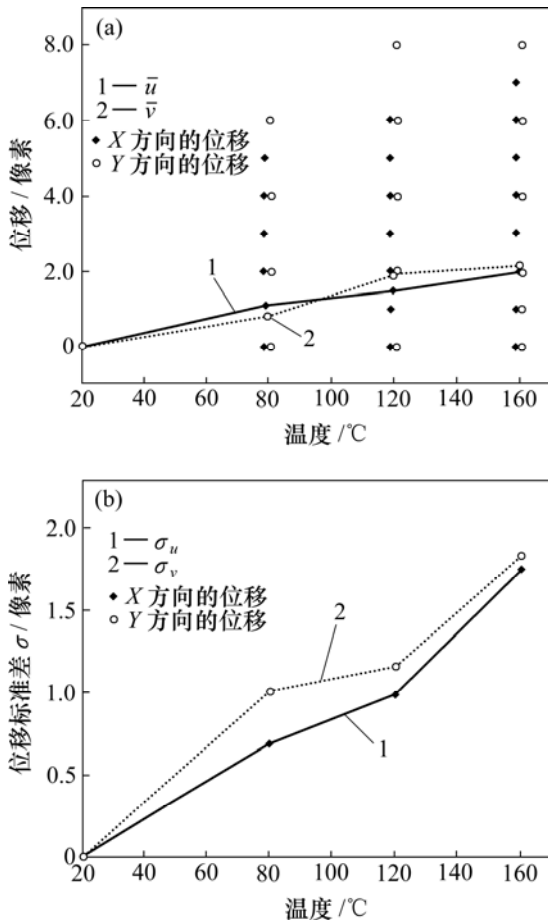
(a) A 组; (b) B 组

图 3 160 °C 时 A 组和 B 组图像梯度

Fig.3 Gradient function values of Group A and B at 160 °C

### 2.3 图像平移分析

对于没有启用吹气装置的 A 组实验图片, 图像间的抖动明显, 有一定的模糊图像, 同组图片之间存在灰度畸变。其原因为: 传感器引入的整个图像其信号均匀变化, 加热时, 导致目标反射率或辐射率发生变化, 所以, 采用不受光照影响的相位相关法求其整像素位移。计算时, 以每一温度下第 1 张图像为参考图像, 分别计算同组其他图像相对于它的位移。由于抖动方向对于对准精度并不重要, 所以, 计算时取绝对位移。图 4 所示为 4 次 A 组实验的平均位移和平均位移标准差。其中: 图 4(a)所示为图像的平均位移趋势与位移分布, 图 4(b)所示为 4 次位移标准差平均结果;  $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  分别为图像 X 方向和 Y 方向的平均位移;  $\sigma_u$  和  $\sigma_v$  分别为图像 X 方向和 Y 方向的位移标准差。从图 4 可以看出: 在未加热的条件下, 所拍摄的 300 张图像间整像素级位移为 0; 随着温度的升高, 图像间的抖动增大, 在键合温度为 160 °C 时平移量达到了 7~8 个像素, 其标准差也随着温度升高而增大; 在同一温度



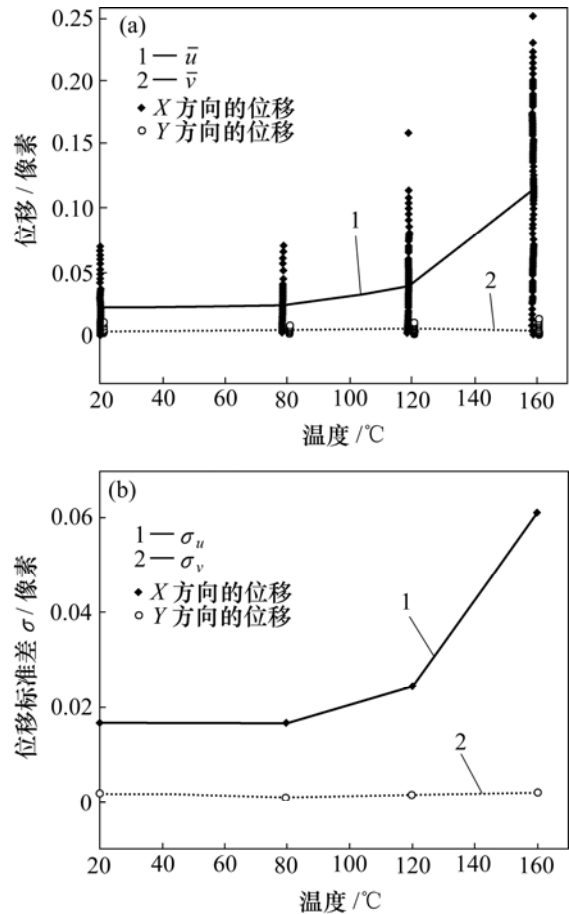
(a) 位移与温度的关系; (b) 位移标准差与温度的关系

图 4 A 组位移和位移标准差与温度的关系

Fig.4 Relationship among displacement and its standard deviation and temperature of experiment A

下, Y 方向的最大抖动值比 X 方向的大, 其标准差均比 X 方向的略大。这可能与摄像头的偏角有关, 导致 Y 方向的抖动量比实际的抖动量略大(注: 由于整像素计算时相同位移较多, 导致在图 4(a)中的位移分布散点重合)。

启用吹气装置后, 图像抖动与模糊消除效果明显, 保证了用曲面拟合亚像素法计算图像间亚像素位移的准确性。图 5 所示为采用 4 次 B 组实验的平均位移和平均位移标准差。从图 5 可以看出: 图像 X 方向的位移与位移标准差仍随温度增大而增大; 而 Y 方向位移分布和标准差与温度之间的关系并不明显, 其标准差不再随温度升高而增大, 且明显小于 X 方向的位移标准差。这与气流方向有关, 其方向与图像 Y 方向一致, 使气流沿 Y 方向的扰动减弱。从图 5(a)可以看出: 即使在 160 °C 的高温下, 最大抖动量也不超过 0.30 个像素, 而在 20 °C 和 80 °C 时, X 方向的抖动量都小于 0.10 个像素; X 方向的位移平均值从 80 °C 开始显著上升, 因加热引起的图像抖动效应随着温度的上升更加明显。



(a) 位移与温度的关系; (b) 位移标准差与温度的关系

图 5 B 组位移和位移标准差与温度的关系

Fig.5 Relationship among displacement and its standard deviation and temperature of experiment B

### 3 结论

(1)在未启用吹气装置时,随着温度升高,图像间的位移与位移标准差增大,在高温下图像间的抖动明显,模糊图像较多。在工作温度为 160 °C 左右时,抖动可达 7~8 个像素,如不采取措施,将不能满足热超声倒装键合中基板与芯片的对准精度要求。

(2)通过缩小图像尺寸的方法产生图像间亚像素位移,证明了采用不同计算窗口计算窗口在曲面拟合亚像素法中的重要性。

(3)在实验方案中,通过启用吹气装置,消除了图像模糊与图像间整像素级的抖动,把图像的绝对抖动量控制在了 0~0.3 个像素内,可以满足基板与芯片凸点的对准精度要求。

#### 参考文献:

- [1] 曹长江, 张琛, 李振波, 等. 微装配系统中精密地位装置的研制[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(11): 1482-1485.  
CAO Chang-jiang, ZHANG Chen, LI Zheng-bo, et al. Design of precise position instrument for micro-assemble system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(11): 1483-1485.
- [2] 雷源中, 雒建斌, 丁汉, 等. 先进电子制造中的重要科学问题[J]. 中国科学基金, 2002, 16(4): 204-209.  
LEI Yuan-zhong, LUO Jian-bin, DING Han, et al. Important academic problem in advanced electronic manufacturing[J]. Bulletin of National Science Foundation of China, 2002, 16(4): 204-209.
- [3] Naren V. Application of microcomputer in submicron level measurements and control of a positioning device[J]. Journal of Microcomputer Applications, 1995, 18(2): 149-164.
- [4] 李建平, 邹中升, 王福亮. 热超声倒装键合机视觉系统的设计与实现[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(1): 116-121.  
LI Jian-ping, ZOU Zhong-sheng, WANG Fu-liang. Design and realization of machine vision system in thermosonic flip-chip bonder[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(1): 116-121.
- [5] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.  
YIN Xing-liang. Air-optic principle[M]. Beijing: Astronautical Press, 2003.
- [6] 谢盛华, 张启衡, 宿丁. 基于APEX方法的湍流退化图像复原算法[J]. 光电工程, 2007, 34(2): 88-92.  
XIE Shen-hua, ZHANG Qi-heng, SU Ding. Restoration method for turbulence-degraded image based on APEX method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(2): 88-92.
- [7] 陶青川, 邓宏彬. 基于小波变换的高点扩展函数估计[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 284-288.  
TAO Qing-chuan, DENG Hong-bin. Wavelet transform based Gaussian point spread function estimation[J]. Optical Technique, 2004, 30(3): 284-288.
- [8] 刘卫光, 崔江涛, 周利华. 插值和相位相关的图像亚像素配准方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(6): 1273-1277.  
LIU Wei-guang, CUI Jiang-tao, ZHOU Li-hua. Subpixel registration based on interpolation and extension phase correlation[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(6): 1273-1277.
- [9] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
YU Qi-feng. Precise measurement and motion measurement based image[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] 潘兵, 续伯钦. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. 计量学报, 2005, 26(2): 128-134.  
PAN Bing, XU Bo-qin. Subpixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2): 128-134.
- [11] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. Opt Eng, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [12] Zhang J, Jin G C. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35: 533-542.
- [13] Chen D J, Chiang F P, Tan Y S, et al. Digital speckle displacement measurement using a complex spectrum method[J]. Appl Opt, 1993, 32: 1839-1849.
- [14] 芮嘉白, 金观昌. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, 26(5): 599-607.  
RUI Jia-bai, JIN Guan-chang. A new digital speckle correlation and its application[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(5): 599-607.
- [15] Bruck H A, McNeil S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. Experimental Mechanics, 1989, 29(3): 261-267.
- [16] Lu H, Cary P D. Deformation measurement by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(4): 393-400.
- [17] Wang H W, Kang Y L. Improved digital speckle correlation method and its application in fracture analysis of metallic foil[J]. Opt Eng, 2002, 41(11): 2793-2798.
- [18] 曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 离焦模糊图像清晰度评价函数的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 259-261.  
CAO Mao-yong, SUN Nong-liang, YU Dao-yin. Study on clarity-evaluation-function of out-of-focus blurred image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(3): 259-261.

(编辑 陈灿华)