

文章编号 2097-1842(2023)03-0587-09

高精度倒装焊机光学对位系统研制及算法研究

韩冰¹, 马洪涛¹, 许洪刚^{1*}, 闫瑛², 鞠德哈¹, 赵纯玉³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国电子科技集团公司第二研究所, 山西 太原 030024;

3. 吉林江机特种工业有限公司, 吉林 吉林 132000)

摘要:针对国内红外焦平面倒装焊机对高精度光学对位系统的迫切需求,对光学对位系统进行了设计及验证,并对该系统用到的平行调整、光学对位及坐标系误差补偿算法进行研究。文章首先对倒装焊接光学对位工艺进行分析;然后对平行性调整及光学对位算法进行介绍,并根据光学对位系统测试流程,提出更加合理的误差补偿算法;最后,以上述算法为理论依据,设计光学对位系统,其包括准直系统、显微成像系统和激光测距三部分。所设计的光学系统可实现平行性粗调,特征点识别及平行性精调功能。试验结果表明,准直系统准直效果较好,显微成像系统分辨率高,成像质量较好,激光测距系统的测距精度为0.084 μm。设计的高精度光学对位系统解决了国内红外焦平面倒装焊机对高精度光学对位系统的迫切需求,已经在国内某型号的倒装焊机中得到应用,对于提高国产高端集成电路的自主研发和生产能力具有重要的意义。

关键词: 红外焦平面倒装焊机; 光学对位系统; 平行调整; 激光测距

中图分类号: TN605 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0101

Development and algorithm research of optical alignment system for a high precision flip chip bonder

HAN Bing¹, MA Hong-tao¹, XU Hong-gang^{1*}, YAN Ying², JU De-han¹, ZHAO Chun-yu³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,*

Changchun 130033, China;

2. *The Second Research Institute of CETC, Taiyuan 030024, China;*

3. *Jilin Jiangji Special Industries Co Ltd, Jilin 132000, China)*

* *Corresponding author, E-mail: nefuxhg@163.com*

Abstract: Aiming at the urgent demand of high-precision optical alignment systems for a domestic infrared focal plane flip chip bonder, an optical alignment system was designed and verified, and the parallel adjustment, optical alignment and coordinate system error compensation algorithms applied to the system were researched. Firstly, this paper analysed the optical alignment process of a flip chip bonder, then introduced the parallelism adjustment and optical alignment algorithm, and proposed a more reasonable error compensation

收稿日期: 2022-05-23; 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(No. 20200401047GX)

Supported by Science and Technology R&D Project of Jilin Province (No. 20200401047GX)

algorithm according to the test process of the optical alignment system. Finally, based on the above calculation algorithm, the optical alignment system was designed including three parts: a collimation system, a microscopic imaging system and a laser ranging system. The functions of parallel coarse adjustment, feature point recognition and parallel fine adjustment were realized. The experimental results show that the collimation system has a good collimation effect, the microscopic imaging system has high resolution and good imaging quality, and the ranging accuracy of the laser ranging system is $0.084 \mu\text{m}$. The designed high-precision optical alignment system solves the urgent need of a domestic infrared focal plane flip chip bonder for high-precision optical alignment systems. It has been applied in a certain types of flip chip bonders, and has very important social significance for improving the independent research and development and production capacity of domestic high-end large-scale integrated circuits.

Key words: infrared focal plane flip chip bonder; optical alignment system; parallel adjustment; laser ranging

1 引言

红外成像技术广泛应用于侦察、精确制导、光电对抗、消防、医疗等领域,其核心器件是红外探测器,随着红外探测器向第三代焦平面方向发展,对其性能提出更高要求^[1-6]。高精度红外焦平面倒装焊机是决定探测器性能的核心设备之一,对探测器最终性能和可靠性起着决定性作用^[7]。相对于传统引线键合,倒装焊接具有互连线短,寄生电容和寄生电感小,可靠性高等优点,是一项具有高发展潜力的芯片互连技术^[8-11]。目前国外倒装焊机已经从手动、半自动发展为今天的全自动^[9],而且平行性测试精度可达 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 。国内倒装焊机则一直受制于高精度光学对位系统限制,精度低,发展慢,同时市场占有率不高,高端产品则一直依赖进口。随着国际形势的变化及倒装焊机需求的不断增长,研发自主可控的高精度光学对位系统,解决倒装焊机核心卡脖子问题,对于提高国产高端集成电路的自主研发和生产能力具有非常重要的意义。

本文基于倒装焊接工艺流程,对平行性调整及光学对位算法进行分析,提出更加合理的误差补偿算法。以此为理论依据,设计了高精度光学对位系统,包括准直系统、显微成像系统和激光测距三部分:基于光学自准直原理设计的准直系统,采用双光路共 CCD 结构,可实现平行性粗调;显微成像系统用于芯片与基板的特征点识别,可实现芯片与基板的光学对位;激光测距系统基于共聚焦原理,测距精度达 $0.084 \mu\text{m}$,用于平行性精调。目前该光学对位系统已经在国内某型号的倒装焊机中得到应用,满足倒装焊机对高精度光学对位系统的需求,同时该系统具有结构紧凑、质量小等优点。

2 倒装焊接工艺

芯片倒装焊接工艺主要包括“芯片、基板上料”、“精密对位”、“芯片、基板键合”3大流程,如图 1 所示。在芯片焊接过程中,受系统误差及随机误差的影响,芯片与基板难以精确对位。通常,对于温度及振动引起的随机误差,可通过恒温

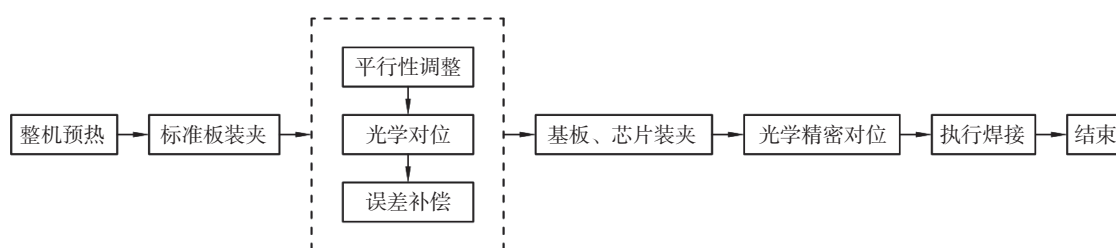


图 1 倒装焊接工艺流程图

Fig. 1 The flow chart of the flip chip bonder process

控制及良好的隔振工艺降低其影响。机械误差为系统误差,可通过光学对位系统进行实际测定,并通过误差补偿进行修正。因此,光学对位系统是倒装焊机误差补偿及精密对位流程中最关键的部分,其涉及到高精度误差测定及多自由度精密对准^[2],其精度将直接决定芯片最终的焊接精度。

3 数据分析处理

在芯片倒装焊接工艺流程中,用到基板安装平台坐标系 $o-xyz$ 、光学对位系统坐标系 $o'-x'y'z'$ 、芯片安装平台坐标系 $o''-x''y''z''$,如图2所示,由于加工、装配误差等客观条件的存在,坐标系之间必然存在空间位置误差,需通过误差补偿对其进行修正。基板安装平台坐标系 $o-xyz$ 具有 x 、 y 、 z 、 θ_x 、 θ_y 四自由度,光学对位系统坐标系 $o'-x'y'z'$ 具有 x' 、 y' 、 θ_x 、 θ_y 四自由度,芯片安装平台坐标系具有 z'' 、 θ_x'' 、 θ_y'' 三自由度^[13-14]。工作时,首先使用标准板作为替代进行误差测定,光学对位系统依次测量面 $o'x'y'$ 与基板安装平台面 oxy 及芯片安装平台面 $o''x''y''$ 的平行性误差,然后依次通过光学对位系统坐标系中 θ_x 、 θ_y 轴及芯片安装平台坐标系中 θ_x'' 、 θ_y'' 轴进行位置修正;接着,进行坐标系误差测定及补偿,补偿基板安装平台 ox 、 oy 轴与光学对位系统 $o'x'$ 、 $o'y'$ 轴以及芯片安装平台 $o''z''$ 轴与基板安装平台 oz 轴的安装误差,至此完成倒装焊接工艺中机械误差的测定与补偿,可进行下一步芯片装夹、精密对位及焊接等工序。由此可见,光学对位系统平行性测试精度直接决定了误差测

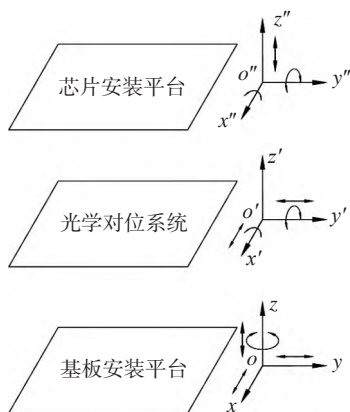


图2 倒装焊机工作坐标系

Fig. 2 The working coordinate system of the flip chip bonder

定及补偿精度,进而决定芯片焊接精度。误差补偿工艺流程与精密光学对位工艺流程中光学对位系统功能相同,仅对误差补偿流程中平行性调整、补偿计算及光学对位过程中的计算算法进行分析研究。

3.1 平行调整分析计算

芯片与基板平行性不仅影响光学对位及误差补偿的精确性,还关系到焊接均匀性,若误差过大将导致焊接受力不均匀,使芯片焊接失效。调整芯片与基板的平行性时,首先通过光学对位系统 θ_x 、 θ_y 轴调整实现面 $o'x'y'$ // 面 oxy , 然后通过 θ_x'' 、 θ_y'' 轴调整实现面 $o'x'y'$ // 面 $o''x''y''$, 从而实现芯片与基板平行,其计算算法相同,本节仅对芯片的 θ_x'' 、 θ_y'' 轴调整算法进行分析。

如图3所示,芯片平面为 γ , 要将 γ 面经 θ_x'' 、 θ_y'' 轴两次旋转,使其平行于面 $o'x'y'$, 首先需精确计算 γ 面的偏转角度。以光学对位系统坐标系 $o'-x'y'z'$ 为基准坐标系, $P_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ 、 $P_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ 、 $P_3(x'_3, y'_3, z'_3)$ 为芯片平面 γ 上3个特征点在光学对位系统成像后的坐标点,其中 z'_1 、 z'_2 、 z'_3 为3个特征点到 $o'x'y'$ 面的相对距离,可通过光学对位系统精确测得,为确保计算精度,在选取3个特征点时,它们之间的距离应尽量大。面 ε 经过点 P_3 且与面 $o'y'z'$ 平行,线 L 经过面 γ 且与面 $o'x'z'$ 平行,线 K 为线 P_1P_3 沿 L 方向在面 ε 上的投影,点 P' 为线 L 与 K 的交点,则 $\angle\alpha$ 为面 γ 与面 $o'x'y'$ 在 $o'y'$ 轴方向的夹角, $\angle\beta$ 为面 γ 与面 $o'x'y'$ 在 $o'x'$ 轴方向的夹角。可得面 γ 法向量 \vec{n} 如式(1):

$$\vec{n} = \overrightarrow{P_1P_3} \times \overrightarrow{P_1P_2} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x'_2 - x'_1 & y'_2 - y'_1 & z'_2 - z'_1 \\ x'_3 - x'_1 & y'_3 - y'_1 & z'_3 - z'_1 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

可得平面 γ 方程

$$\begin{vmatrix} x - x'_1 & y - y'_1 & z - z'_1 \\ x'_2 - x'_1 & y'_2 - y'_1 & z'_2 - z'_1 \\ x'_3 - x'_1 & y'_3 - y'_1 & z'_3 - z'_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

因点 P 坐标为 (x_3, y_1, z_q) , 将 x_3 、 y_1 代入平面方程式(2), 即可求得 z_q , 所以 $\angle\alpha$ 如式(3)所示:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|z'_q - z'_1|}{|y'_3 - y'_1|}\right) \quad (3)$$

同理求得 $\angle\beta$ 如式(4)所示:

$$\beta = \arctan\left(\frac{|z'_q - z'_1|}{|x'_3 - x'_1|}\right) \quad (4)$$

综上所述,芯片首先绕芯片安装平台 $o''x''$ 轴旋转 $\angle\alpha$, 然后绕 $o''y''$ 轴旋转 $\angle\beta$, 这样经两次旋转实现了平行调整。平行性调整精度直接决定了光学对位精度及焊接均匀性。

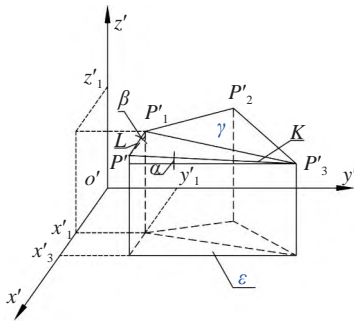


图 3 平面旋转模型

Fig. 3 The plane rotation model

3.2 光学对位分析

当平行性调整完成后进行芯片与基板光学对位, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示, 实线为芯片图像, 其在对位过程中作为基准, 虚线为基板图像, 通过光学对位系统识别芯片及基板上的特征点坐标并计算基板相对于芯片的偏移量, 并进行基板安装平台的 θ_z 轴及 ox, oy 向调整, 使其与芯片上的特征点重合。其中 P_1, P_2 为基板上的特征点, P'_1, P'_2 为芯片上的特征点, 红实线为光学对位系统移动到左下角视场, 并分别识别特征点坐标 $P_1(x_1, y_1), P'_1(x'_1, y'_1)$, 蓝实线为光学对位系统移动到右上角视场, 识别特征点坐标 $P_2(x_2, y_2), P'_2(x'_2, y'_2)$ 。

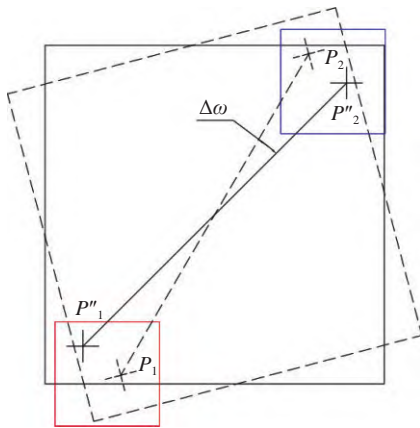


图 4 光学对位模型

Fig. 4 The optical alignment model

$P'_2(x'_2, y'_2)$ 。

由图 4 可得 $P_1P_2, P'_1P'_2$ 两直线夹角 $\Delta\omega$ 计算公式如式(5)所示:

$$\Delta\omega = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) - \arctan\left(\frac{y'_2 - y'_1}{x'_2 - x'_1}\right) \quad (5)$$

当 $\Delta\theta$ 为正时, 基板顺时针旋转 $\Delta\omega$, 当 $\Delta\theta$ 为负时, 则逆时针旋转 $\Delta\omega$ 。旋转完成后, $P_1P_2 // P'_1P'_2$, 再次使用光学对位系统识别特征点坐标 $P_1(x_{12}, y_{12}), P'_1(x'_{12}, y'_{12})$ 或 $P_2(x_{22}, y_{22}), P'_2(x'_{22}, y'_{22})$, 即可通过式(6)计算 ox, oy 向偏差。

$$\begin{cases} \Delta'x = x_{12} - x'_{12} \\ \Delta'y = y_{12} - y'_{12} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\Delta'x, \Delta'y$ 为基板理论运动参数, 但对位算法中的 $\Delta'x, \Delta'y$ 为光学对位系统读出数据, 由于坐标系之间存在空间位置误差, 导致基板安装平台进行对位时, 基板实际运动特征与光学对位系统测量信息不符, 从而使基板与芯片对位不准确, 影响焊接精度, 需对坐标系误差进行补偿, 保证对位精度。

3.3 坐标系误差补偿

通过倒装焊接工艺分析可知基板 ox, oy 向运动误差包括两部分: 第一部分为基板安装平台坐标系与光学对位系统坐标系空间偏差带来的 ox, oy 向误差; 第二部分为芯片安装平台 $o''z''$ 轴与基板安装平台不垂直度引起的 ox, oy 向误差。两部分误差需通过标准板进行标定, 以往通过 3 个特征点求补偿系数的补偿方法, 受随机误差影响较大, 精度较低, 因此, 本文提出基于最小二乘法的算法补偿, 通过多个特征点数据来降低随机误差的影响, 提高补偿精度。

3.3.1 基板平台坐标系与光学对位系统坐标系误差

理想条件下, 当平行性调整完成后, 基板平台坐标系与光学对位系统坐标系平行, 但由于光学系统精度限制, 基板安装平台与光学对位系统间存在非常小的空间角度误差 α , 同时基板运动平台 ox, oy 轴与光学对位系统 $o'x', o'y'$ 轴均存在安装误差, 如图 5 所示, ox 轴与 $o'x'$ 轴误差为 θ_1 , oy 轴与 $o'y'$ 轴误差为 θ_2 , 需对其进行补偿。

$P'(x', y', z')$ 为基板上特征点 P 在光学对位系统的成像坐标点, R_x, R_z 分别为点 P' 绕 $o'x'$ 轴、

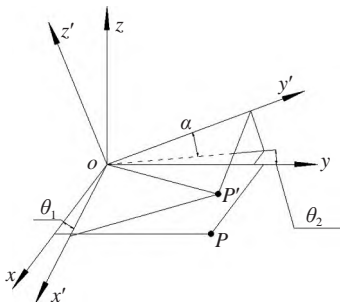


图5 基板平台坐标系与光学对位系统坐标系误差模型

Fig. 5 The error model of the coordinate systems of the substrate platform and the optical alignment system

$o'z'$ 轴旋转的旋转矩阵,可得基板上特征点实际坐标 P 如式(7)所示:

$$P = R_z \times R_x \times P' = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}, \quad (7)$$

整理可得式(8):

$$\begin{cases} x = x' \cdot \cos\theta - \sin\theta \cdot (y' \cdot \cos\alpha - z' \cdot \sin\alpha) \\ y = x' \cdot \sin\theta + \cos\theta \cdot (y' \cdot \cos\alpha - z' \cdot \sin\alpha) \\ z = y' \cdot \sin\alpha + z' \cdot \cos\alpha \end{cases}. \quad (8)$$

通过实际测定即可求得偏转角度 θ_1 及 θ_2 。随意移动基板安装平台 ox 轴、 oy 轴,同时光学对位系统识别基板特征点在光学对位系统坐标系下不同位置的坐标 $P'_1(x'_1, y'_1)$ 、 $P'_2(x'_2, y'_2) \cdots P'_n(x'_n, y'_n)$,并记录基板安装平台在坐标系 $o-xyz$ 下的运动坐标 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2) \cdots P_n(x_n, y_n)$,进而可得式(9):

$$x_i - x_{i-1} = (x'_i - x'_{i-1}) \cdot \cos\theta_1 - (y'_i - y'_{i-1}) \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\alpha, \quad (9)$$

其中: $i = 3, \dots, n$, n 为选取点数量,可将式(9)转换为以下形式:

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 \\ \dots \\ x_i - x_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_2 - x'_1 & y'_1 - y'_2 \\ x'_3 - x'_2 & y'_2 - y'_3 \\ \dots & \dots \\ x'_i - x'_{i-1} & y'_{i-1} - y'_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \cdot \cos\alpha \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由广义逆矩阵理论,可求得 $\cos\theta_1$ 及 $\sin\theta_1 \cdot \cos\alpha$ 的最小二乘解如式(11)所示:

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \cdot \cos\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_2 - x'_1 & y'_1 - y'_2 \\ x'_3 - x'_2 & y'_2 - y'_3 \\ \dots & \dots \\ x'_i - x'_{i-1} & y'_{i-1} - y'_i \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 \\ \dots \\ x_i - x_{i-1} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

同理可得 $\sin\theta_2$ 及 $\cos\theta_2 \cdot \cos\alpha$ 的最小二乘解如式(12)所示:

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_2 \\ \cos\theta_2 \cdot \cos\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_2 - x'_1 & y'_2 - y'_1 \\ x'_3 - x'_2 & y'_3 - y'_2 \\ \dots & \dots \\ x'_i - x'_{i-1} & y'_i - y'_{i-1} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ y_3 - y_2 \\ \dots \\ y_i - y_{i-1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

最终整理可得基板 ox 、 oy 向运动误差如式(13)所示:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x' \cdot \cos\theta_1 - \Delta y' \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\alpha \\ \Delta y = \Delta x' \cdot \sin\theta_2 + \Delta y' \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\alpha \end{cases}. \quad (13)$$

因此芯片与基板在进行光学对位时,首先通过式(6)计算 $\Delta x'$ 及 $\Delta y'$,然后将其代入式(13)即可求得误差补偿值。

在误差标定过程中,主要受光学对位系统图像识别精度及基板运动机构精度影响。其中:光学对位系统图像识别引入误差为 $0.35 \mu\text{m}$,基板运动控制机构采用 $0.01 \mu\text{m}$ 分辨率的光栅尺进行闭环控制,引入误差为 $0.5 \mu\text{m}$ 。将特征点数据误差结合式(11)进行仿真计算,可得角度补偿精度优于 1×10^{-4} 量级。结合常用 $10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的红外芯片(凸点尺寸为 $10 \mu\text{m}$),可得补偿后凸点最大偏移量约为 $1 \mu\text{m}$,焊盘覆盖率为 87% ,优于三级高性能电子产品验收要求。

3.3.2 芯片平台 oz 轴与基板平台不垂直度误差

光学对位完成后,芯片沿 z 向运行与基板焊接,由于芯片安装平台的 $o''z''$ 轴与基板安装平台坐标系存在不垂直度误差,需对其进行修正。采用标准板作为替代完成焊接后,通过光学对位系统对焊接后芯片基板成像,其坐标系误差模型如图6所示。

通过光学对位系统识别焊接后特征点坐标 $P_1(x_{13}, y_{13})$ 、 $P''_1(x''_{13}, y''_{13})$ 或 $P_2(x_{23}, y_{23})$ 、 $P''_2(x''_{23}, y''_{23})$,即可通过式(14)计算由芯片安装平台 $o''z''$ 轴与基板平台不垂直度误差引起的 ox 、 oy 向偏差。

$$\begin{cases} \Delta\delta_x = x_{13} - x'_{13} \\ \Delta\delta_y = y_{13} - y'_{13} \end{cases} \quad (14)$$

最终得到的修正公式如式(15)所示, 这样通过光学对位系统识别及误差补偿算法便实现了坐标系误差的补偿, 确保最终焊接精度, 提高倒装焊接成功率。

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x' \cdot \cos\theta_1 - \Delta y' \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\alpha - \Delta\delta_x \\ \Delta y = \Delta x' \cdot \sin\theta_2 + \Delta y' \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\alpha - \Delta\delta_y \end{cases} \quad (15)$$

通过上述误差分析可得, 误差补偿算法仅可补偿 ox 、 oy 向误差, 若芯片与基板平行性误差较大, 会导致芯片与基板上凸点受力不一致, 可能引起凸点滑移而造成焊接失效, 参考国际先进水平, 当平行性调整精度达到 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 时, 倒装互连成功率可稳定在 99.9% 以上^[15]。通过对平行性调整分析, 为光学对位系统的结构形式提供设计依据, 针对坐标系间的空间位置关系, 提出基于最小二乘法的误差补偿算法, 精度更高, 通过对其误差补偿算法的研究, 为光学对位系统设计提供理论及设计支撑。

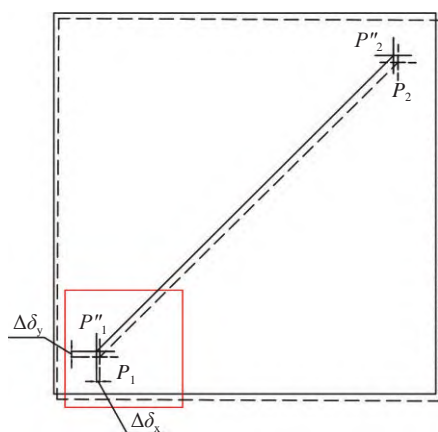


图 6 焊接后坐标系误差模型

Fig. 6 The error model of the coordinate system after bonding

4 光学对位系统

以倒装焊接工艺分析及数据分析作为理论依据, 设计的光学对位系统由准直系统、显微成像系统和激光测距三部分构成, 如图 7 所示。工作时, 首先通过光学对位系统进行坐标系误差测定及补偿, 然后进行芯片及基板的光学对位。

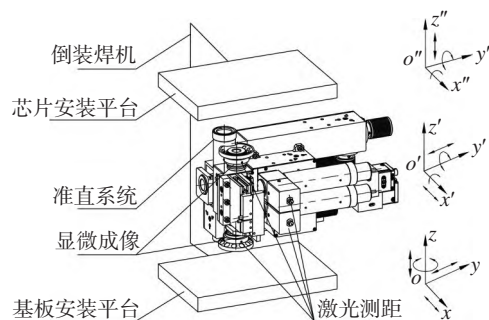


图 7 光学对位系统图

Fig. 7 The optical alignment system

进行误差补偿时, 芯片及基板安装平台中分别安装标准板, 准直系统识别两标准板平行性误差, 通过芯片安装平台对芯片与基板平行性进行粗调; 然后, 利用显微成像系统识别标准板上的特征点, 同时激光测距系统精确测量不同特征点的相对距离, 然后通过 3.1 节中算法进行平行性精调; 最后通过显微成像系统对标准板进行多特征点参数识别, 并按 3.3 节进行坐标系误差测定及补偿。

进行芯片与基板光学对位时, 芯片及基板安装平台中分别安装芯片及基板, 准直系统识别芯片及基板平行性误差, 通过芯片安装平台粗调芯片与基板平行性; 然后, 激光测距系统精确测量芯片及基板上不同特征点的相对距离, 进行平行性精调; 最后显微成像系统识别芯片及基板上的特征点参数, 并根据其参数结合误差补偿算法进行精确对位。

准直系统基于光学自准直原理, 采用双光路共 CCD 结构, 以减少多相机之间的安装误差, 采用分光棱镜实现光路分光及耦合, 结构简单, 可通过式(16)计算准直系统测试精度:

$$\gamma = \frac{a}{2f} \quad (16)$$

其中 CCD 像元大小 a 为 $3.75\mu\text{m}$, 成像物镜焦距 f 设计为 100mm , 可得准直系统测试精度为 $18.75\mu\text{rad}$ 。

显微成像系统同样采用双光路共 CCD 结构, 同时与激光测距系统采用共光路结构; 激光测距系统基于共聚焦原理^[16], 通过焦面后端高灵敏度“探测器”检测反射光聚焦的光强, 进而测得特征点 z 向坐标, 设计测距精度为 $0.05\mu\text{m}$ 。光学对位系统装机如图 8 所示。

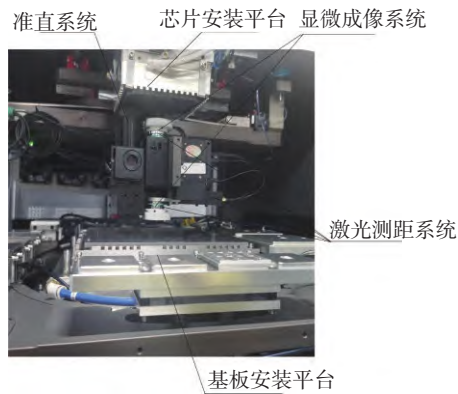


图 8 光学对位系统装机图

Fig. 8 The diagram of the optical alignment system assembly

5 实验结果与验证

5.1 准直系统及显微成像系统验证

通过两平面镜对准直系统粗调平行性功能进行验证。首先使用经纬仪将两平面镜调整平行, 然后将对位系统放置在两平面镜之间, 并开启准直系统, 成像效果如图 9(a) 所示, 此时两十字丝重合; 当平面镜偏转一定角度后, 两十字丝成像效果如图 9(b) 所示; 由图可得准直系统探测良好, 可实现芯片与基板的平行性粗调, 提高平行性调整效率。

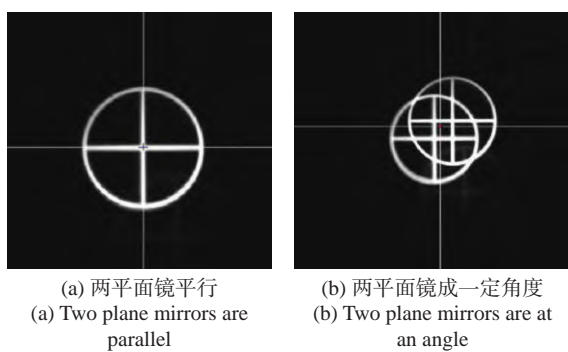
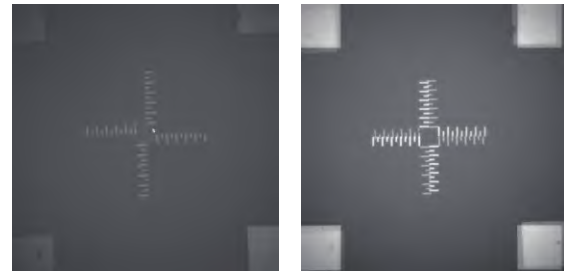


图 9 准直系统测试效果

Fig. 9 Test effects of the collimation system

为验证显微成像系统的图像识别能力, 对芯片及基板进行成像, 如图 10 所示, 其中 10(a) 为对芯片成像效果, 图中高低交错的长方形为芯片上的特征点, 其宽度为 $5\ \mu\text{m}$, 图 10(b) 为芯片与基板同时成像效果, 可见显微成像系统分辨率高, 成像质量较好, 可完全满足特征点的对位要求。



(a) 芯片成像效果
(a) Imaging effect of the chip
(b) 芯片基板对位效果
(b) Alignment effect of the chip and substrate

图 10 显微成像效果

Fig. 10 The effect of microscopic imaging

5.2 激光测距系统验证

为验证激光测距系统的测试精度, 使用标准板对其进行精度验证, 构建如图 11 所示实物测试平台。

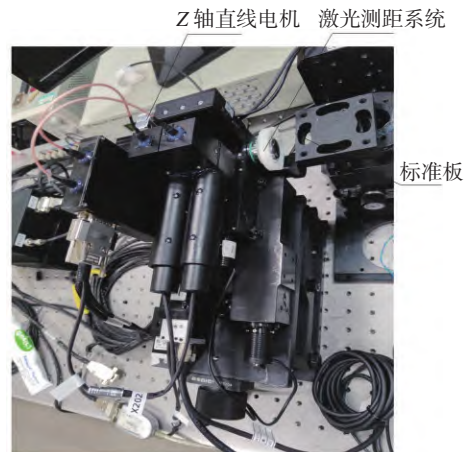


图 11 激光测距验证系统

Fig. 11 The laser ranging verification system

图 11 中, 光学对位系统 z 轴直线电机分辨率为 $10\ \text{nm}$, 通过直线电机控制激光测距系统前端显微物镜以 $2\ \mu\text{m}$ 步长向标准板移动, 并实时读取“探测器”能量反馈值, 进而通过高斯拟合得出能量极值即聚焦点位置, 对标准板同一点进行多次测试, 测试数据如表 1 所示。

表 1 激光测距结果

Tab. 1 Results of laser ranging

位置参数(μm)	激光探测器参数					
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次
0	1.396	1.433	1.417	1.425	1.415	1.402
2	1.622	1.638	1.643	1.639	1.615	1.645
4	1.813	1.858	1.826	1.844	1.832	1.822
6	2.123	2.206	2.143	2.189	2.168	2.202

续表 1

位置参数(μm)	激光探测器参数					
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次
8	2.615	2.704	2.687	2.712	2.667	2.711
10	3.247	3.345	3.316	3.335	3.356	3.268
12	3.858	3.941	3.854	3.903	3.884	3.862
14	4.234	4.404	4.302	4.297	4.483	4.333
16	4.654	4.699	4.684	4.725	4.655	4.708
18	4.613	4.621	4.59	4.625	4.592	4.564
20	4.221	4.585	4.339	4.502	4.458	4.48
22	3.778	3.786	3.623	3.682	3.698	3.631
24	2.402	2.516	2.529	2.515	2.564	2.488
26	1.115	1.116	1.252	1.212	1.203	1.415
聚焦点(μm)	15.55	15.56	15.61	15.57	15.58	15.63

通过表中数据分析可得, 单次测量聚焦点位置标准差为 $0.028 \mu\text{m}$, 其能量反馈值分布满足正态分布, 将置信因子取为 3, 得激光测距系统距离测试精度优于 $0.084 \mu\text{m}$ 的概率为 99.73%。实际测试时通过比对芯片或基板不同位置点的聚焦位

参考文献:

- [1] 丁瑞军, 杨建荣, 何力, 等. 碲镉汞红外焦平面器件技术进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 0103010.
DING R J, YANG J R, HE L, *et al.*. Development of technologies for HgCdTe IRFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103010. (in Chinese)
- [2] 沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 20-29.
SHEN H H, HUANG M, LI J Q, *et al.*. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 20-29. (in Chinese)
- [3] CAULFIELD J, CURZAN J. Small pixel infrared sensor technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10177: 1017725.
- [4] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. $10\mu\text{m}$ 像元间距 1024×1024 中波红外探测器研制进展[J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 915-920.
ZHOU L Q, NING T, ZHANG M, *et al.*. Developments of $10 \mu\text{m}$ pixel pitch 1024×1024 MW infrared detectors[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(8): 915-920. (in Chinese)
- [5] 吕宝林, 佟首峰, 徐伟, 等. 基于配准的机载红外非均匀性校正技术应用[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1124-1137.
LV B L, TONG SH F, XU W, *et al.*. Non-uniformity correction of airborne infrared detection system based on inter-frame registration[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1124-1137. (in Chinese)
- [6] 徐飞, 潘其坤, 陈飞, 等. 中红外 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 458-469.
XU F, PAN Q K, CHEN F, *et al.*. Development progress of $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ lasers[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 458-469. (in Chinese)
- [7] 狄希远. 高精度倒装焊机的研制[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(4): 226-229.
DI X Y. Development of high precision flip chip bonder[J]. *Electronics Process Technology*, 2020, 41(4): 226-229. (in Chinese)
- [8] 耿红艳, 周州, 宋国峰, 等. 红外探测器倒装互连技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 722-726.
GENG H Y, ZHOU ZH, SONG G F, *et al.*. Flip chip bonding technology for IR detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 722-726. (in Chinese)
- [9] NG F C, ABAS M A. Underfill flow in flip-chip encapsulation process: a review[J]. *Journal of Electronic Packaging*,

置信息, 即可得到不同位置点的相对距离, 进而进行平行调整。

6 结 论

针对国内对倒装焊接光学对位系统迫切需求, 设计了高精度光学对位系统, 并进行验证。基于倒装焊接的工艺流程, 对平行性调整及光学对位算法进行分析, 并提出基于最小二乘法的误差补偿算法。以上述算法为理论依据, 设计的光学对位系统包括准直系统、显微成像系统、激光测距三部分, 然后, 分别对其进行实际测试, 结果显示: 准直系统准直效果较好, 满足粗调平行性要求; 显微成像系统分辨率高, 成像质量较好, 满足特征点识别需求; 激光测距系统测距精度为 $0.084 \mu\text{m}$, 满足平行性测试精度要求。目前该光学对位系统已经在国内某型号的倒装焊机中得到应用, 满足倒装焊机对高精度光学对位系统的需求, 对于提高国产高端集成电路的自主研发和生产能力具有非常重要的意义。

- 2022, 144(1): 010803.
- [10] BAISHYA K, HARVEY D M, ZHANG G M, *et al.*. Investigation into how the floor plan layout of a manufactured PCB influences flip-chip susceptibility to vibration[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2020, 10(5): 741-748.
- [11] 王晓奎. 倒装焊接设备精密对位系统的精度设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
WANG X K. Accuracy design for the precision alignment system of flip chip bonding[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [12] 邱彪, 常青青, 黄美发. 倒装芯片键合机键合误差分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(1): 20-23.
QIU B, CHANG Q Q, HUANG M F. Bonding error analysis of flip chip bonding machine[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2016, 44(1): 20-23. (in Chinese)
- [13] 张彩云, 郎鹏, 王晓奎, 等. 倒装焊机视觉定位系统[J]. 电子工艺技术, 2012, 33(1): 41-44, 59.
ZHANG C Y, LANG P, WANG X K, *et al.*. Vision positioning system of flip chip bonder[J]. *Electronics Process Technology*, 2012, 33(1): 41-44, 59. (in Chinese)
- [14] 金忠, 谢锋, 何迎辉, 等. 倒装焊接在压力敏感芯片封装工艺中的研究[J]. 电子与封装, 2012, 12(9): 10-13.
JIN ZH, XIE F, HE Y H, *et al.*. Research of flip-chip bonding in the pressure sensitive Chip's encapsulation processing[J]. *Electronics & Packaging*, 2012, 12(9): 10-13. (in Chinese)
- [15] 刘文波, 刘斌, 凡陈玲, 等. 高德红外640×512中波红外探测器的规模化生产[J]. 红外, 2021, 42(2): 8-14.
LIU L B, LIU B, FAN CH L, *et al.*. Large-scale production of 640×512 middle-wavelength infrared detectors from guide infrared company limited[J]. *Infrared*, 2021, 42(2): 8-14. (in Chinese)
- [16] 张雅丽, 余卿, 尚文键, 等. 斜照明式彩色共聚焦测量系统设计及其实验研究[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 514-524.
ZHANG Y L, YU Q, SHANG W J, *et al.*. Chromatic confocal measurement system and its experimental study based on inclined illumination[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 514-524. (in Chinese)

作者简介:



韩冰(1981—), 男, 吉林长春人, 现任中国科学院长春光学精密机械与物理研究所质检中心副主任, 副研究员, 主要从事光学测试技术研究和检测仪器的开发工作。E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn



许洪刚(1991—), 男, 山东临沂人, 硕士, 助理研究员, 2014年、2018年于东北林业大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事光电测量技术方面的研究。E-mail: nefuxhg@163.com