

文章编号 1004-924X(2019)01-0137-09

MEMS 热电堆芯片固晶工艺参数的优化

陈立国¹, 姜勇涛^{1*}, 倪灯塔², 王敏锐³, 孙立宁¹

- (1. 苏州大学 机电工程学院 江苏省机器人重点实验室 & 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021;
2. 海军驻贵阳地区航空军事代表室, 贵州 贵阳 550000;
3. 苏州工业园区纳米产业技术研究院微纳制造分公司, 江苏 苏州 215021)

摘要: MEMS 热电堆传感器能够实现对温度的精确测量, 固晶工艺是其中关键一环, 但目前尚缺乏有效方法精确优化 MEMS 热电堆固晶工艺参数。本文介绍了热电堆传感器的工作原理, 提出了对固晶工艺参数(固晶厚度和爬胶高度)的要求。以固晶工艺要求为导向, 初步探究了压力参数对固晶工艺的影响并进行了压力参数的优化。在优化的压力参数下, 实验探究了点胶高度和贴片高度对固晶工艺的影响, 并缩小了两参数的选择范围。在此基础上, 通过有限元 ANSYS 软件, 分析在相同温度下, 不同固晶厚度的银浆与芯片接触处的热应力分布, 找出最佳的固晶厚度参数, 并精确优化了点胶高度和贴片高度。最后, 通过实验验证的方式, 对此参数下的 MEMS 热电堆固晶强度给出了检测结果。结果表明: 压力参数为 0.3 MPa、点胶高度为 140 μm 、贴片高度为 460 μm 时, 固晶推力均值为 43.14 N。其固晶质量最好, 能够满足固晶强度要求, 有助于提高 MEMS 热电堆芯片封装的可靠性与成品率。

关键词: MEMS 热电堆芯片; 温度检测; 压力参数; 点胶高度; 贴片高度

中图分类号: TG494; TP24 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0137

Optimization of die bond process parameters of MEMS thermopile chip

CHEN Li-guo¹, JIANG Yong-tao^{1*}, NI Deng-ta², WANG Min-rui³, SUN Li-ning¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering & Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Robotics & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology Soochow University, Suzhou 215021, China;

2. Naval air force representative office in Guiyang, Guiyang 550000, China;

3. Suzhou Technology Institute for Nanotech Industry/MEMSRIGHT, Suzhou 215021, China)

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

Abstract: The die-bonding process is one of the key steps to ensure accurate temperature measurement by MEMS thermopile sensors. However, there remains no effective method to accurately optimize the process parameters of MEMS thermopile die-bonding. In this paper, the working principle of the thermopile sensor was introduced, and the requirements of the die-bonding process parameters—thickness and fillet height were proposed. Guided by the die-bonding process requirements, the influence of the pressure parameters on the process was initially explored, and the pressure parameters were optimized. Under optimized pressure parameters, the influence of the dispensing height and patch height

收稿日期: 2018-05-03; **修订日期:** 2018-07-16.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20171215); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目资助 (No. 17KJA460008)

on the die-bonding process was explored, and the range of choices for the two parameters was narrowed. On this basis, the finite element software package ANSYS was used to analyze the thermal stress distribution of different silver paste and chip thicknesses at the same temperature to determine the optimal die-bonding thickness and accurately optimize the dispensing height and patch height. Finally, through the experimental verification method, the test results were given for the die-bonding strength of MEMS thermopiles under these parameters. The experimental results indicate that when the pressure is 0.3 MPa, the patch height is 460 μm , and the dispensing height is 140 μm , the MEMS thermopile chip achieves average solid crystal thrust of 43.14 N. These parameters ensure the highest quality of the solid crystal, satisfy the die-bonding strength requirements, and help improve the reliability and yield of MEMS thermopile chip packages.

Key words: Micro Electro Mechanical System(MEMS) thermopile chip; temperature detection; pressure parameters; dispensing height; patch height

1 引言

MEMS(Micro Electro Mechanical System)热电堆传感器以其体积小、质量轻、功耗低等优点在工业、信息、国防及生物工程等领域有着巨大的应用前景^[1]。它是一种基于微机电系统技术将红外辐射转变为电能的电子器件。MEMS 热电堆单元探测器主要用在非接触测温、气体分析以及入侵报警等方面^[2],而 MEMS 热电堆探测器阵列主要用于红外成像、姿态控制等方面。MEMS 热电堆传感器是传感探测领域的一种典型温度检测器件,具有不需要致冷就可以常温工作,对较大范围内的红外光响应均匀,成本较低且可以大批量生产等优点^[3]。

MEMS 热电堆芯片是结合传统芯片的电气和机械可动结构两种特性,在微小尺度上实现与外界电、热、光、声、磁信号相互作用的器件^[4]。它与微电子器件不同,一种 MEMS 器件中应用成功的制造工艺和封装工艺很难简单地移植到 MEMS 热电堆器件开发研究中,这就极大增加了 MEMS 热电堆器件开发的难度与成本^[5]。一般来说, MEMS 热电堆芯片需要经过晶圆划片、热电堆芯片固晶、热敏电阻贴片、烘烤、超声压焊—引线、盖帽、测试等封装工艺才能成为合格的 MEMS 热电堆传感器。由于 MEMS 热电堆芯片底部中空的结构和其特殊的工作原理,使 MEMS 热电堆的固晶工艺不同于一般的 IC(Integrated Circuit)固晶要求,它需要中间留有空隙,方便进行排气。目前,研究机构已经开展了针对 MEMS

芯片固晶工艺的相关研究工作,但成果较少^[6]。现阶段常用的固晶工艺研究依然是单一地人为设定固晶工艺参数以及通过仿真软件进行固晶工艺参数模拟分析。这些工艺研究方法,只能大致确定固晶参数区间,无法精确确定固晶参数的取值,在实际应用过程中, MEMS 热电堆芯片的固晶质量难以得到可靠保证,芯片的封装可靠性与成品率还有待进一步提高。

本文以优化 MEMS 热电堆芯片固晶工艺参数,提高 MEMS 热电堆芯片固晶质量为目标。首先从 MEMS 热电堆传感器工作原理入手,提出对固晶工艺参数(固晶厚度和爬胶高度)的要求。然后以固晶工艺要求为导向,实验探究和规律分析压力参数、贴片高度、点胶高度对 MEMS 热电堆芯片固晶工艺的影响。接着通过有限元软件 ANSYS 分析相同温度下,不同固晶厚度的银浆与芯片接触处的热应力分布,找出最佳的固晶厚度参数,并进一步优化点胶高度和贴片高度。最后,通过实验验证的方式,对此参数下的 MEMS 热电堆固晶强度,给出了检测结果。

2 MEMS 热电堆工作原理及对固晶工艺的要求

2.1 封闭膜结构 MEMS 热电堆工作原理

MEMS 热电堆传感器的工作原理是基于塞贝克效应:两个不同的导体 a 和 b 两端相接,组成一个闭合环路,如果两个端点热结和冷结具有不同的温度,则线路中会产生温差电流,这个环路组成了温差电偶,其产生的电压即温差电动势^[7]。

如图 1 所示,当芯片受到红外辐射激励时,由塞贝克效应可知热结的封闭膜和冷结的硅基体会通过焊盘向外输出温差电动势,即热结与冷结的温度差为 ΔT 。固晶底座上的热敏电阻,对外输出底座的温度为 T_1 。作为冷结的硅基体通过固晶工艺中的两条银浆,贴装在了 MEMS 固晶底座上,底座的温度 T_1 也为冷结硅基体的温度 T_1 。这样,热结封闭膜的温度即为 $(T_1 + \Delta T)^{[8]}$ 。

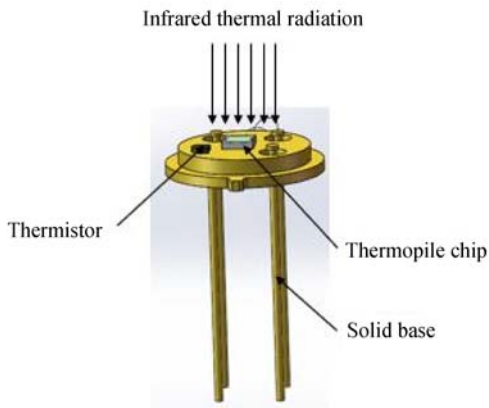


图 1 MEMS 热电堆芯片测温原理图

Fig. 1 Diagram of temperature measurement for MEMS thermopile chip

2.2 固晶工艺要求

从 MEMS 热电堆工作原理可知,固晶工艺需经过如下步骤:MEMS 固晶底座点上两条银浆;MEMS 热电堆芯片贴片到 MEMS 底座上。MEMS 热电堆芯片固晶示意,如图 2 所示。MEMS 热电堆传感器实现温度的精确测量,保证贴片工艺质量和可靠性需遵循以下要求:

(1)MEMS 热电堆芯片与底座有很好的黏结强度,以保证 MEMS 芯片与底座不发生相对移动。在不同的温度环境下,芯片与底座连接牢固,不会发生过大的热应力。当爬胶高度过小,黏结强度过小,会造成芯片与底座的相对移动;当爬胶高度过大,银浆会渗入封闭膜结构,造成芯片短路。因此,爬胶高度必须控制在合理的参数范围内。

(2)MEMS 热电堆芯片和底座之间有良好的热通道,使 MEMS 芯片产生的热量顺利地由热电堆芯片传导到热电堆底座,以保证芯片工作在额定温度范围内。当固晶厚度过小,红外辐射照射到封闭膜时,热气难以排出,容易使封闭膜膨胀,

损坏芯片结构;当固晶厚度过大,银浆形成的热阻过大,测温的准确性会下降。因此,固晶厚度必须控制在合理的参数范围内。

(3)MEMS 热电堆芯片和底座黏结的材料要求具有很好的稳定性与可靠性。它取决于对 MEMS 热电堆芯片和热电堆底座的热膨胀系数 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 差别所产生机械应力的承受能力。

因此,通过优化固晶工艺的压力参数、贴片高度、点胶高度来控制固晶厚度、爬胶高度在合理的参数范围内,对于提高 MEMS 热电堆芯片固晶质量,保证器件封装的可靠性有着至关重要的作用。

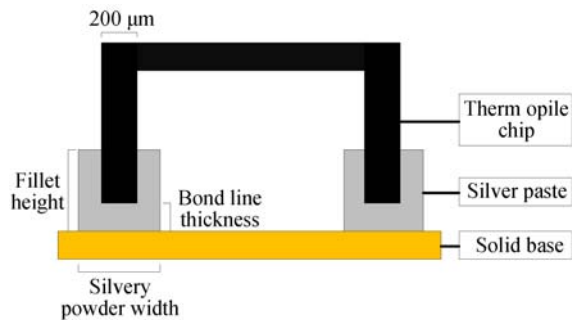


图 2 MEMS 热电堆芯片固晶示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MEMS thermopile chip die bonding

3 MEMS 热电堆芯片固晶工艺参数优化

3.1 MEMS 热电堆自动化固晶系统

MEMS 热电堆芯片固晶系统如图 3 所示。固晶系统主要由 XY 运动平台,双 Z 轴运动平台,点胶模块,贴片模块,视觉识别模块组成。MEMS 热电堆芯片的尺寸为 $1.8 \times 1.8 \times 0.4$ mm,芯片的中心为封闭膜结构。通过视觉识别,能实现精确点胶和贴片。

3.2 压力参数优化

通过 MUSASHI-ML-500 点胶控制器对压力参数进行相关设置,固晶系统进气口的最大压力在 0.5 MPa,使点胶控制器极限压力为 0.5 MPa 左右,且通过实验发现压力参数为 0.1 MPa 时极难出胶。因此,探究设定的压力参数从 0.2 MPa 开始逐渐递增直至 0.4 MPa。系统采用 MEMS 热电堆固晶系统,点胶针头选用市面上常见的直径为

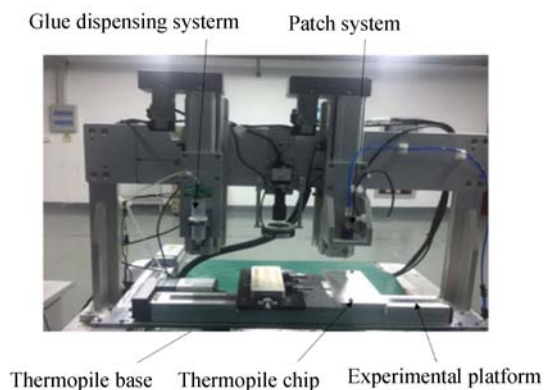


图 3 MEMS 热电堆芯片固晶系统平台

Fig. 3 Die bonding system platform for MEMS thermopile chip

160 μm 的针头,银浆选用 G160 导电银浆,导热系数为 $25 \text{ w/m} \cdot \text{k}$,热膨胀系数为 $34.5 \mu\text{m/m} \cdot \text{k}$ 。在控制点胶高度和贴片高度相同的情况下,

对 MEMS 热电堆底座划两条长度为 $2\,200 \mu\text{m}$,间距为 $1\,800 \mu\text{m}$ 的银浆。将划好的银浆送到电子显微镜下,对银浆的实际长度,宽度进行测量,同时观察并记录银浆的表面形貌。

根据对实验中银浆的点胶形貌和实际宽度的结果分析可知:压力参数在 0.2 MPa 时,出胶量较少,点出银浆的宽度较细,实际银浆宽度范围在 $220 \sim 280 \mu\text{m}$,点胶的平均宽度为 $240 \mu\text{m}$,与 MEMS 热电堆芯片两侧宽度的差值小于芯片高度的 15% ,即银浆宽度太小,爬胶高度过小,会造成器件黏结强度过低;当压力参数在 0.3 MPa 和 0.4 MPa 时,出胶量较大,与 MEMS 热电堆芯片两侧宽度的差值大于芯片高度的 15% ,符合要求;点胶压力是固晶系统给点胶针头胶筒施加的压力,来保证足够的胶水挤出点胶针头。点胶压力越大,挤出的银浆越多,银浆覆盖的体积越大,银浆实际宽度越大。可参见图 4 和图 5。

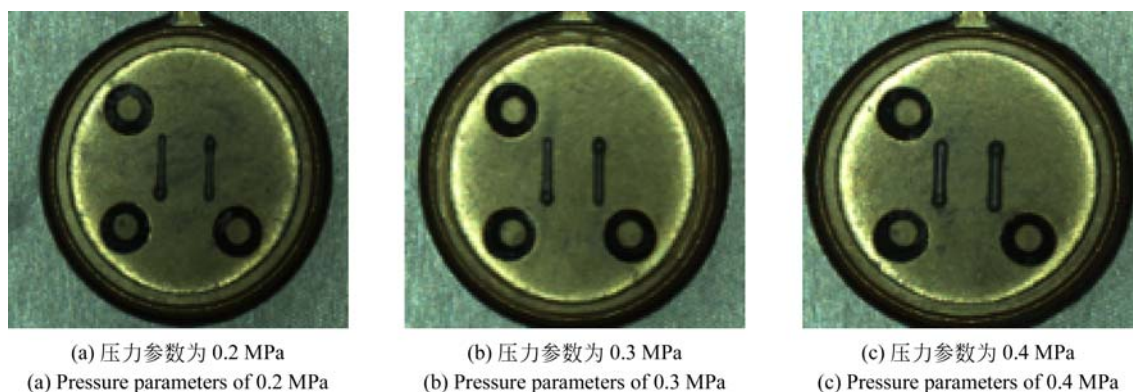


图 4 不同压力参数下 MEMS 热电堆底座点胶形貌

Fig. 4 Dispensing morphology of MEMS thermopile base under different pressure parameters

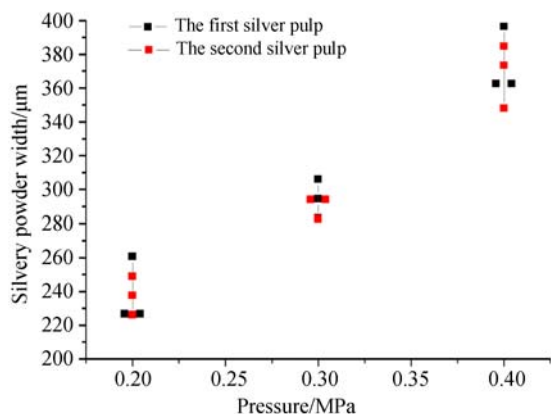


图 5 不同压力参数下 MEMS 热电堆点胶宽度

Fig. 5 Dispensing width of MEMS thermopile under different pressure parameters

压力参数需控制合理的爬胶高度,使 MEMS 芯片与底座不发生相对移动,还得控制出合理的固晶厚度,保持 MEMS 热电堆芯片与底座之间良好的热通道。在压力参数为 0.3 MPa 和 0.4 MPa 时,引入点胶高度和贴片高度两个变量,点胶高度每 $30 \mu\text{m}$ 为一个实验间隔,取值范围为 $80 \sim 170 \mu\text{m}$ 。贴片高度每 $30 \mu\text{m}$ 为一个实验间隔,取值范围为 $430 \sim 520 \mu\text{m}$ 。

在压力参数为 0.3 MPa 和 0.4 MPa 时,选取参数不同的点胶高度和贴片高度,进行 MEMS 底座固晶,并用显微镜测出固晶厚度。根据对实验中不同压力参数下的固晶厚度的数据分析,如图 6 所示可知:

(1)压力参数相对于点胶高度和贴片高度,它对固晶厚度的影响是强影响因素。无论点胶高度和贴片高度如何变化,它对于固晶厚度的影响都是小范围的。

(2)压力参数增大,挤出的银浆越多,银浆覆盖的体积越大,银浆固晶厚度越大。压力参数

为 0.3 MPa,固晶厚度平均值在 50 μm 。压力参数为 0.4 MPa,固晶厚度平均值在 100 μm ,固晶厚度过大,热阻过大,测温的准确性会降低。因此,当压力参数为 0.3 MPa 时,爬胶高度在合理范围内,固晶厚度也在合理范围内,符合相应要求。

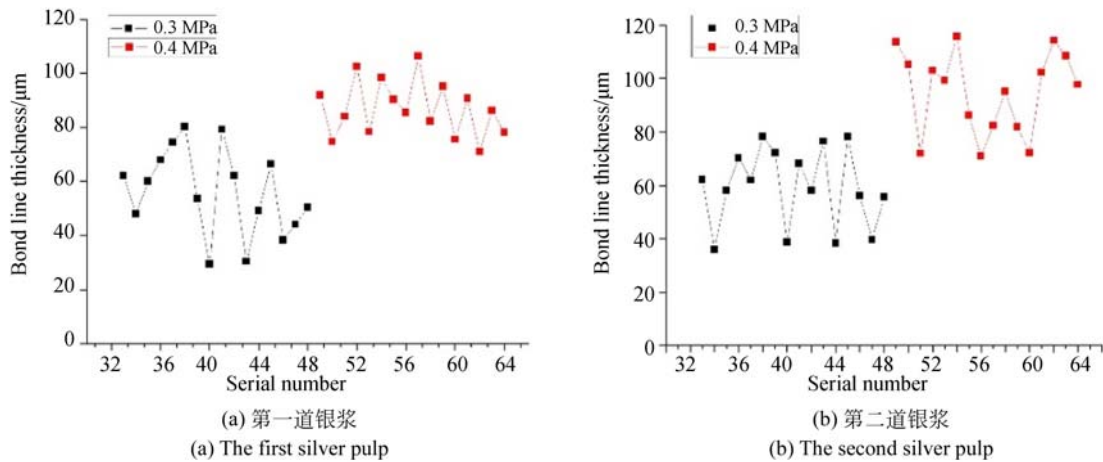


图 6 压力参数对固晶厚度的影响

Fig. 6 Effect of pressure parameters on the thickness of die bonding

3.3 贴片高度和点胶高度参数优化

点胶高度是固晶系统中点胶针头的针尖与 MEMS 热电堆底座的垂直距离,贴片高度是固晶系统中吸嘴与 MEMS 热电堆底座的垂直距离^[9]。合理的点胶高度和贴片高度,控制出合理的爬胶高度,使 MEMS 芯片与底座不发生相对移动。也能控制出合理的固晶厚度,保持 MEMS 热电堆芯片与底座之间良好的热通道。将固晶结束的样品进行冷镶样,粗磨至观察截面,再砂纸细磨,用显微镜观察截面形貌并测量 MEMS 热电堆样品的固晶厚度与爬胶高度。如图 7 和图 8 所示,固晶厚度是中间镂空的 MEMS 热电堆芯片侧壁底面与底座之间固晶层的厚度。爬胶高度是银浆在 MEMS 热电堆芯片贴片过程中受到一定程度的挤压,爬到 MEMS 热电堆芯片侧壁的高度。根据对不同点胶高度下贴片高度与爬胶高度的数据分析,如图 9 和图 10 所示可知:

(1)在不同的点胶高度下,贴片高度与爬胶高度之间总存在一种确定的关系趋势,即随着贴片高度的增加,爬胶高度在不断减小。在不同的点胶高度下,贴片高度与固晶厚度之间也存在一种

确定的关系趋势,即随着贴片高度的增加,固晶厚度在不断增加,到达极值点后,随即减小。

(2)在点胶高度为 80 μm 和 170 μm 的情况下,爬胶高度随贴片高度减小的趋势陡峭,波动幅度较大,固晶器件的稳定性较差。在点胶高度为 110 μm 和 140 μm 时,爬胶高度随贴片高度减小趋势平缓,波动值较小,固晶器件的稳定性较高且

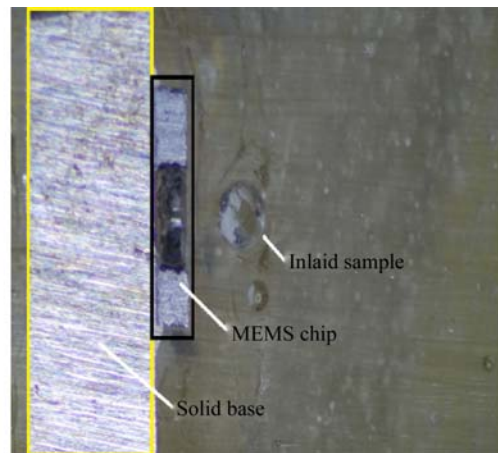


图 7 固晶样品截面形貌

Fig. 7 Cross section morphology of die-bonding sample

贴片高度随固晶厚度变化的趋势比较平缓,波动值较小,固晶器件的稳定性较高,符合要求。

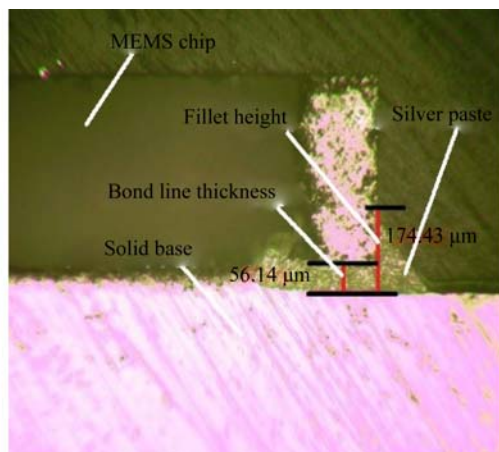


图 8 样品固晶厚度与爬胶高度的测量图

Fig. 8 Diagram of thickness of die bonding and fillet height

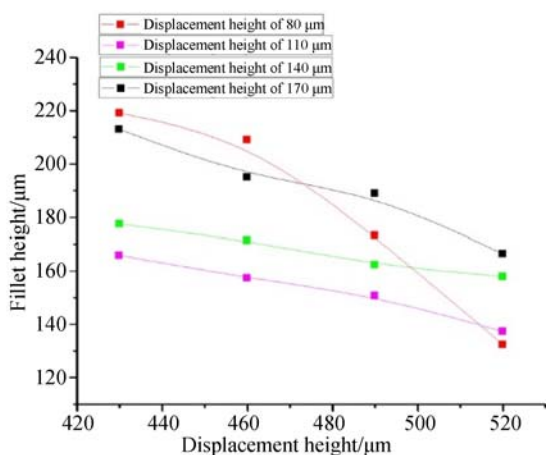


图 9 不同点胶高度下贴片高度与爬胶高度的关系
Fig. 9 Relationship between patch height and fillet height under different dispensing heights

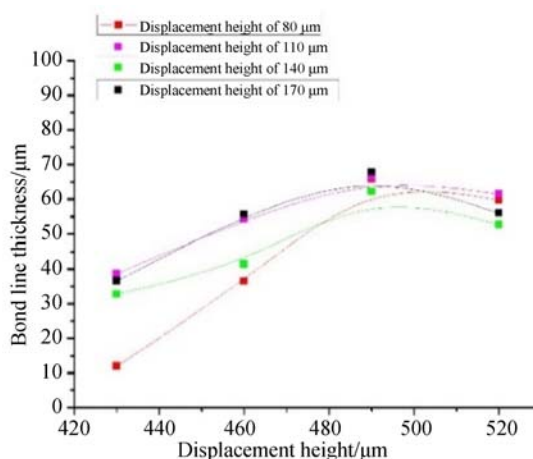


图 10 不同点胶高度下贴片高度与固晶厚度的关系
Fig. 10 Relationship between patch height and die-bonding thickness under different dispensing heights

3.4 热应力仿真分析

压力参数确定后, MEMS 热电堆系统挤出的银浆量是固定的, 即银浆的实际体积是固定的, 在固晶过程中, 银浆的表面形貌会改变, 但银浆的体积量是不变的^[10]。银浆的总体积即为:

$$V = H_1 \times d \times L - 200 \times (H_1 - h) \times L - 2 \times \frac{d - 200}{2} \times (H_1 - h) \times 200, \quad (1)$$

其中:爬胶高度为 H_1 , 固晶厚度为 h , 银浆宽度为 d , 银浆长度为 L 。

由上节分析可知, 在点胶高度设置为 $110 \mu\text{m}$ 和 $140 \mu\text{m}$ 的情况下, 贴片高度随固晶厚度变化的趋势较平缓, 且确定的点胶高度和固晶高度对应着图 10 和图 11 中唯一的爬胶高度和固晶厚度。在缩小点胶高度和固晶高度选择范围并结合式(1)后, 可得出不同银浆的三维模型如表 1 所示。

表 1 点胶高度 $110 \mu\text{m}$ 和 $140 \mu\text{m}$ 时银浆三维模型数据

Tab. 1 3D model data of silver paste under dispensing height with $110 \mu\text{m}$ and $140 \mu\text{m}$ (μm)

序号	点胶高度 D_1	固晶高度 h_1	固晶厚度 h_1	爬胶高度 H_2	胶体宽度 ω
1	110	430	40	165	d_1
2	110	460	55	160	$d_1 = 1.02 d_1 - 24$
3	110	490	65	155	$d_2 = 1.04 d_2 - 43$
4	140	430	30	180	$d_5 = 0.93 d_2 + 27.21$
5	140	460	40	170	$d_5 = 0.91 d_2 + 5.33$
6	140	490	60	165	$d_7 = 0.985 d_2 - 23.53$

MEMS 热电堆传感器作为测温传感器,一般工作温度范围需保持在常温下。在仿真实验中,当常温为 30 °C 时,模拟了 MEMS 热电堆芯片固晶的过程。根据对不同固晶厚度和爬胶高度下,银浆的热应力分布结果如下图 11 所示,可知:在常温 30

°C 下,固晶厚度为 40 μm、爬胶高度为 170 μm 对应的最大热应力值是最低的。对列表一可知:点胶高度在 140 μm,贴片高度在 460 μm 时, MEMS 热电堆芯片和底座之间的热应力值最低,芯片与底座连接牢固且有良好的热通道进行传热。

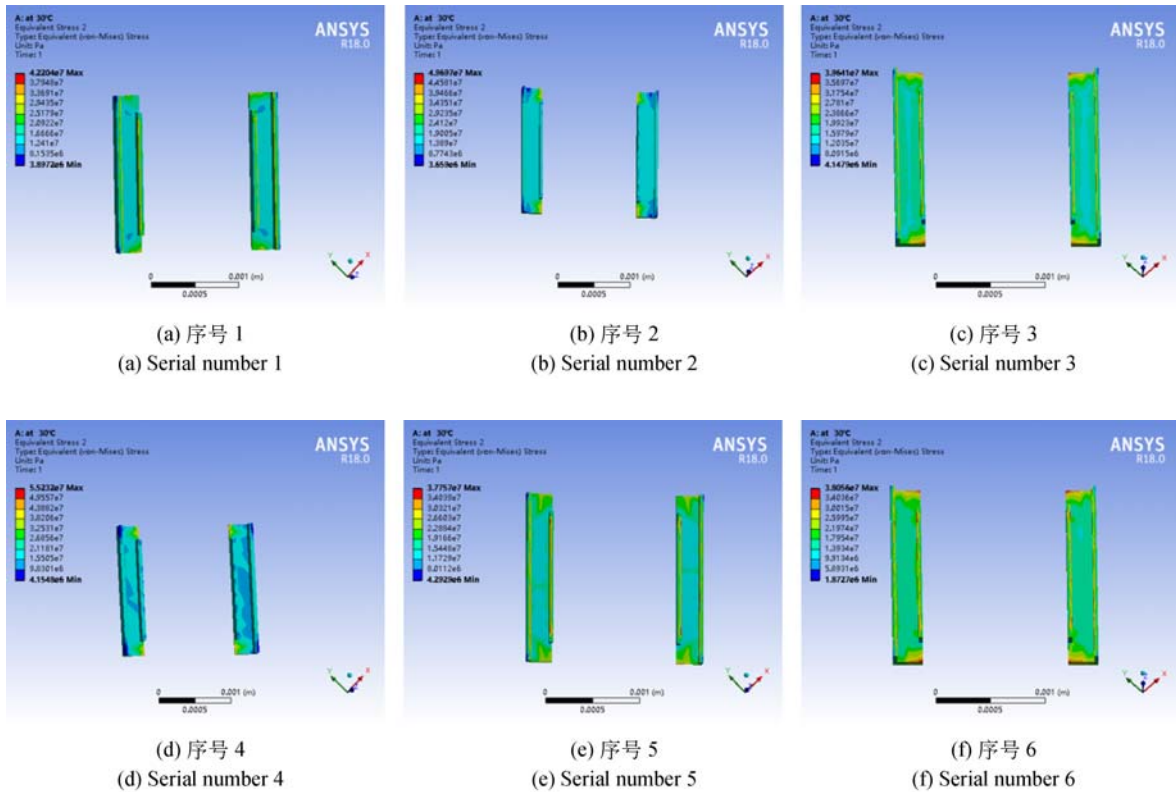


图 11 常温 30 °C 下银浆热应力分布

Fig. 11 Thermal stress distribution of silver paste at normal temperature 30 °C

4 MEMS 热电堆芯片固晶强度测试

与一般的半导体贴片工艺一样,在 MEMS 热电堆固晶工艺中,芯片剪切强度是衡量芯片固晶工艺性能的重要指标^[11]。在压力参数为 0.3 MPa 情况下,对 MEMS 热电堆芯片进行了不同点胶高度和贴片高度下的贴片操作,并在加热盘加热 60 min 以后,在常温下进行了冷却固化。

实验所用芯片是基于封闭膜结构的 MEMS 热电堆芯片,尺寸为 1.8 × 1.8 × 0.4 mm。强度实验平台是基于视觉识别的 MEMS 热电堆芯片固晶系统,强度测试用的是 Nordson DAGE 4000 推拉力测试仪。

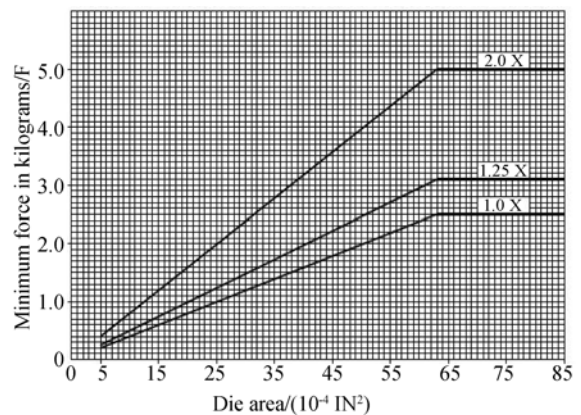


图 12 MIL-STD-883 芯片最小切应力标准

Fig. 12 Minimum shear stress standard for chips of MIL-STD-883

目前 IC 电子厂商在固晶强度验证时,普遍采用 MIL-STD-883 的美国军标技术规范,如图 12 所示。

从图中可以看出:在固晶面积小于 $65 \times 10^{-4} \text{IN}^2$ 时,固晶面积与 MEMS 芯片最小切应力之间,存在着线性关系且当贴片强度小于图 1.0X 所对应的数值时,会出现失效。

MEMS 热电堆芯片固晶面积表达式:

$$S_1 = S_{\text{bottom}} + S_{\text{side}}, \quad (2)$$

$$S_1 = 2 \times [d_{\text{chip}} \times L + L \times (H_1 - h)] + 2 \times (L - 2d_{\text{chip}}) \times (H_1 - h), \quad (3)$$

由公式(2)、(3)可得 MEMS 热电堆芯片固晶面积为 $21.07 \times 10^{-4} \text{IN}^2$,对照最小切应力与贴片面积的关系如图 13 所示:MEMS 热电堆芯片最小推力值为 9.8 N,即符合相关检测要求。

通过比较不同贴片高度与点胶高度下的固晶推力数据如表 2 所示,可知:点胶高度为 $140 \mu\text{m}$,贴片高度为 $460 \mu\text{m}$ 时,固晶推力值为 43.14 N,固晶强度符合 MIL-STD-883 美国军标要求且固晶强度值最大。

表 2 点胶高度 $110 \mu\text{m}$ 和 $140 \mu\text{m}$ 时固晶推力测试数据

Tab. 2 Test data of solid crystal thrust under dispensing height with $110 \mu\text{m}$ and $140 \mu\text{m}$

点胶高度 $D_2/\mu\text{m}$	固晶高度 $D_2/\mu\text{m}$	固晶厚度 $h_2/\mu\text{m}$	爬胶高度 $H_2/\mu\text{m}$	推力测试值 1 T_2/N	推力测试值 2 T_2/N	推力平均值 T_{AV}/N
110	430	40	165	12.21	19.02	15.60
110	460	55	160	17.33	10.89	14.11
110	490	65	155	13.82	18.51	16.16
140	430	30	180	12.26	18.02	15.14
140	460	40	170	42.12	44.16	43.14
140	490	60	165	31.31	34.65	32.98

5 结 论

本文通过大量实验,对 MEMS 热电堆固晶主要工艺参数:压力参数、贴片高度、点胶高度进行了分析和实验优化,在结合实验数据基础上,通过有限元 ANSYS 软件,模拟相同温度下,不同固晶厚度的银浆与芯片接触处的热应力分布,找出了

最佳的固晶厚度参数,精确优化了点胶高度和贴片高度。最后,对所优化的固晶工艺参数进行了 MEMS 热电堆芯片固晶强度测试与验证。结果证明:压力参数为 0.3 MPa、点胶高度为 $140 \mu\text{m}$ 、贴片高度为 $460 \mu\text{m}$ 时,固晶推力均值为 43.14 N。它的固晶强度最大,固晶质量最好。它能够满足固晶强度要求,有助于提高 MEMS 热电堆芯片封装可靠性与成品率。

参考文献:

- [1] 余东生,王晓东,张习文,等. 低温环境下 MEMS 微构件的动态特性及测试系统[J]. 光学精密工程, 2010,18(10): 2178-2184.
SHE D SH, WANG X D, ZHANG X W, *et al.*. Dynamic characteristics and testing system of MEMS micro components under low temperature environment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (10): 2178-2184. (in Chinese)
- [2] 邹令敏. 基于 MEMS 热电堆的表面高温测试技术研究[D]. 山西太原:中北大学,2009.

- ZOU L M. *Research on surface high temperature testing technology based on MEMS thermopile* [D]. Taiyuan, Shanxi: North Central University, 2009. (in Chinese)
- [3] 杨恒昭,熊斌,李铁,等. CMOS 工艺兼容的热电堆红外探测器[J]. 半导体技术,2008,33(9):759-761.
YANG H ZH, XIONG B, LI T, *et al.*. CMOS technology compatible thermopile infrared detector [J]. *Semiconductor Technology*, 2008,33 (9):759-761. (in Chinese)
- [4] 林忠华,胡国清,刘文艳,等. 微机电系统的发展及其应用[J]. 纳米技术与精密工程,2004,2(2):117-123.

- LIN ZH H, HU G Q, LIU W Y, *et al.*. Development and Application of MEMS [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, 2(2): 117-123. (in Chinese)
- [5] 朱福龙. 基于工艺力学的 MEMS 封装若干基础问题研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
ZHU F L. *Research on some basic problems of MEMS packaging based on process mechanics* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 杨凯骏,王学军,井文丽,等. MEMS 器件真空封装工艺研究[J]. 电子工业专用设备,2010,39(10):5-7.
YANG K J, WANG X J, JING W L, *et al.*. Research on vacuum packaging process of MEMS devices [J]. *Special Equipment for Electronic Industry*, 2010, 39(10):5-7. (in Chinese)
- [7] 王会强,郝丽娜,郝晓剑,等. MEMS 热电堆高温测试系统中的 MEMS 传感器动态性能测试[J]. 计量与测试技术,2010, 37(5):44-46.
WANG H Q, HAO L N, HAO X J, *et al.*. The dynamic performance test of MEMS sensor in the high temperature test system of MEMS thermoelectric reactor [J]. *Measurement and Testing Technology*, 2010, 37(5):44-46. (in Chinese)
- [8] SCHIEFERDECKER J, QUAD R, HOLZENKAMPFER E, *et al.*. Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 47(1): 422-427.
- [9] 熊志武,李文龙. RFID 设备点胶高度补偿算法研究实现[J]. 制造业自动化,2013,35(8):33-37.
XIONG ZH W, LI W L. Research and implementation of the height compensation algorithm for RFID equipment [J]. *Manufacturing Automation*, 2013, 35(8):33-37. (in Chinese)
- [10] 张青青. 微小器件精密点胶控制与设备研制[D]. 大连:大连理工大学,2017.
ZHANG Q Q. *Precision dispensing control and equipment development of Micro Devices* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 宣翔,宋夏,林文海. 砷化镓裸芯片环氧导电胶自动贴片技术[J]. 电子工艺技术,2016, 37(4): 198-200.
XUAN X, SONG X, LIN W H. GaAs Nude Chip Epoxy conductive adhesive automatic patch technology [J]. *Electronic Technology*, 2016, 37(4): 198-200. (in Chinese)

作者简介:



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,博士生导师,教授。1997年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微操作,微驱机器人等方面的研究。E-mail:chenliguo@suda.edu.cn

通讯作者:



姜勇涛(1994—),男,江苏南通人,硕士研究生,2016年于淮海工学院获得工学学士学位,主要从事芯片封装工艺等方面的研究。E-mail:jiang_YTao@163.com