MEMS 加速度计硅摆微区感应加热 键合技术研究



刘鑫¹,张依依¹,陈卓¹,陈亮²,叶坤²,王凌云¹,吴德志¹ 1.厦门大学,福建 厦门 361005

2.航空工业西安飞行自动控制研究所 惯性技术航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘 要:以微机械陀螺、光电加速度计为典型代表的高精度微机电系统(MEMS)导航器件因其微型化、智能化、高集成度以 及可规模化制造等优点在航空航天等领域起着非常重要的作用。而光电加速度计的摆性对系统特性(如静态偏值和标度因 素),甚至系统整体动态性能影响巨大。针对光电加速度计中硅摆由于胶黏结形变、材料匹配失衡所导致的静态偏值和温度 滞环等问题,本文提出采用低温金属焊料的微区感应加热键合技术替代传统胶黏结,实现硅摆与基底的低温、高强度键合, 克服胶黏结引入的蠕变迟滞和连接不稳定性缺陷。同时,研究了微区感应加热技术的尺度效应行为,明确了键合层的结构 设计以及制造工艺,考察了键合工艺参数对焊料回流温度的影响。键合试验结果表明,硅摆与基底键合强度大于12MPa,大 幅提升了硅摆连接稳定性,为加速度计硅摆高可靠稳定工作奠定了基础,提高了航空航天惯性导航及惯性制导系统的精度 和工作寿命。

关键词:微区感应加热键合;加速度计;连接稳定性;键合工艺

中图分类号:V241.4+5

文献标识码:A

微机电系统(MEMS)加速度计作为惯性导航系统和稳 定平台的核心部件,广泛应用于航空、航天、航海、兵器、资 源勘探、生物医疗和智能电子等军民领域,其精度水平直接 决定了导航制导系统、对地侦察平台的精度,是惯性导航与 稳定性平台中的关键装备。

而MEMS加速度计中硅摆与基底的连接可靠性程度 以及二者间的装配误差,直接影响加速度计工作的精度的 稳定性^[1]。由摆组件的装配误差造成的摆性变化是影响加 速度计工作精度的主要诱因。摆组件由挡光板、三角架、线 圈、挠性杆和陶瓷通过胶黏结而成,因此为保证光电速度计 在贮存期间和使用过程中摆性不发生变化,需要两个挠性 关节处的装配完全一致,才能保证摆组件的质心落在力矩 器磁钢的中心轴线上。当装配误差中挠性杆关节面共面误 差绝对值达到9μm时,偏移量达到0.139μm。而当固化温 度从90℃上升到120℃时,胶层内应力从20.08MPa上升到 27.3MPa,静态偏值从2.265μm增加到3.283μm^[2]。

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.01.011

然而,目前尚无成熟点胶技术可用于光电加速度计的 装配,胶黏剂在固化中会产生很大内应力,使摆组件产生形 变,改变了挡光板的光通量,产生静态偏值。另外,由于胶 与陶瓷、挠性杆等在热膨胀系数、比热容等材料参数上的不 匹配,也会影响加速度计的温度滞环。

为了解决上述问题,采用低温键合技术或局部加热键 合技术已经被证实是行之有效的方法。感应加热封装思想 最早由加州大学伯克利分校林立伟^[3]提出,发展至今已有 很多成功案例。Thompson等^[4]采用射频感应加热硅片,在 预加热温度250°C、感应频率13.56MHz、功率1000W条件 下,数秒钟内实现了硅-硅直接键合,键合强度达176MPa。 Sosnowchik等^[5]通过局部感应加热硅背面上沉积的Ti/Ni/ Au 金属键合层和不锈钢基座上的Sn3Ag0.5Cu焊料,9s内 可升温至220°C,实现了双端音叉(DETF)谐振应变计与不 锈钢基座的键合;在静态负载测试中,键合硅层可承受 1000με应变。陈明祥^[6]采用金锡焊料进行局部感应加热封

收稿日期:2024-04-07;退修日期:2024-08-07;录用日期:2024-10-30 基金项目:国家自然科学基金(52075464);航空科学基金(20180868002)

引用格式: Liu Xin, Zhang Yiyi, Chen Zhuo, et al.Research on MEMS accelerometer silicon pendulum micro-zone induction heating bonding technology[J].Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(01):95-102. 刘鑫,张依依,陈卓,等.MEMS 加速度计硅摆微区感应加 热键合技术研究[J].航空科学技术, 2025, 36(01):95-102.

装键合,实现了对陶瓷管壳与玻璃盖帽的键合。在频率 13.56MHz、功率1000W的感应加热电源下,5s内完成键合, 平均键合强度达9.53MPa。杨学安等^{□7}将硅衬底上制备Ni/ Co合金磁性材料层感应加热,1min内完成键合,键合强度 达18.3MPa,且键合过程中红外器件区温度仅为110℃。

为此,本文提出在底座焊盘上电镀/印刷重熔焊料层, 采用微区感应加热方法感应加热焊盘,后焊盘传热给焊料 熔融,以期实现与硅摆焊接键合。试验结果表明,采用该方 法可将硅摆与基座的键合强度提高到12MPa以上,大大增 强了连接稳定性。实现MEMS器件与金属/硅底座的高可 靠连接,从根本上解决目前MEMS加速度传感器黏结装配 过程固有的问题^[8],降低键合封装工艺的残余应力和低蠕 变特征以保证器件良好的性能,为高精度、长寿命导航提供 技术保证。

1 微区感应加热基本原理

电磁感应加热是一种利用电磁感应原理产生交变电流 (即涡流)、将电能转化为热能的加热技术,广泛应用于冶 金、热处理、密封与电子等传统工业领域^[9-11]。作为电磁感 应加热的拓展性应用,微区感应加热(MIH)重点关注局部 的选择性加热,目前在微纳材料^[12-15]、电子器件封装^[16-19]、 细胞芯片^[20-23]等微纳系统领域被广泛应用。相对于一般的 微波^[24]、微光^[25]加热技术,该方法具有更好的温度可控性、 更高的电热效率转化,实现微区快速升温,大幅度降低高温 器件性能的影响,在保证器件性能的同时提高了器件设计 的灵活性,推动器件的微型化与集成化发展。

如图1(a)所示,当外部施加交变磁场时,由于电磁感应 作用,磁性材料层会瞬间产生感应电动势和感应电流,产生 的焦耳热导致该层快速升温。上部的焊料层(铅锡合金等) 在受到磁性材料层热传递的作用下便会迅速熔化,从而达 到快速封装的效果,而且在封装过程中热量只集中于焊料 这一微小区域,加热时间仅为秒级,其他位置仍可处于低温 状态,这有效解决了无法耐高温结构或电路的封装难题,大 幅减小了器件封装所产生的热应力。

以MIH模型开展结构设计分析,如图1(b)所示,其中, 待加热件半径、厚度分别为r和T,交变磁场作用下产生涡 流,感应线圈电流为I,螺旋线圈的高度为L,匝数为n。根 据电磁感应原理可知¹²⁰待加热件上所产生的感应电动势为

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = -\pi r^2 \times \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中, ϵ 为感应电动势, φ 为磁通量,B磁感应强度,t为时间。







假定待加热件的电阻率是ρ,可得其电阻为

$$dR = \frac{2\pi r}{T \cdot dr} \rho \tag{2}$$

因此,感应电动势在待加热件上产生的涡电流可表 示为

$$di = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\pi r^2 \cdot T \cdot dr}{2\pi r \cdot \rho} \times \frac{dB}{dt} = \frac{r \cdot T \cdot dr}{2\rho} \times \frac{dB}{dt}$$
(3)

假定感应线圈高度为L,共n匝,而通过的交变电流为 $I_m \cdot \cos(2\pi ft)$,其中f是交流电的频率,则有

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{n \cdot \left[I_m \cdot \cos\left(2\pi ft\right) \right]}{L} \tag{4}$$

将式(4)对时间t微分得

$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = -2\pi f \mu_0 \mu_r \frac{n \cdot \left[I_m \cdot \sin\left(2\pi f t\right)\right]}{L} \tag{5}$$

将式(5)代入式(3)得

$$di = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\pi r \cdot T \cdot dr}{\rho} \times \frac{dB}{dt} = \frac{\pi \mu_0 \mu_r \cdot n \cdot I_m \cdot f \cdot T \cdot r dr}{L \cdot \rho} \cdot \sin(2\pi f t)$$
(6)

因此,涡电流的有效值可表示为

$$dI = \frac{\pi \mu_0 \mu_r \cdot n \cdot I_m \cdot f \cdot T \cdot r dr}{\sqrt{2} L \cdot \rho}$$
(7)

将式(7)代入 $W=I^2Rt$,得

$$dW = \frac{\pi^2 \mu_0^2 \mu_r^2 \cdot n^2 \cdot I_m^2 \cdot f^2 \cdot T \cdot t}{\rho^2 \cdot L^2} \cdot r^3 dr$$
 (8)

通过体积分可得涡电流通过焦耳热所做的功为

$$W = \frac{\pi^3 \mu_0^2 \mu_r^2 \cdot n^2 \cdot I_m^2 \cdot f^2 \cdot T \cdot t \cdot r^4}{4\rho \cdot L^2}$$
(9)

假设所产生的功率都转换为热能,且根据比热容关系 *Q*=*c*_n*m*Δ*T*,可得

$$\Delta T = \frac{\pi^3 \mu_0^2 \mu_r^2 \cdot n^2 \cdot I_m^2 \cdot f^2 \cdot T \cdot t \cdot r^4}{4\rho \cdot L^2 \cdot c_p \cdot m}$$
(10)

由式(10)可知,电磁感应加热的升温速率与磁性材料 的磁导率、螺旋线圈匝数、感应电流、交流电频率、被加热器 件半径、材料厚度、线圈高度及其电阻率等密切相关。

2 微区感应加热参数选择及总体方案

2.1 感应加热相关参数选择

(1)趋肤深度

根据趋肤效应^[27],感应电源工作频率决定了趋肤深度 大小,因此。趋肤深度尺寸必须小于或等于键合层尺寸,其 表达公式^[28]如下

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\mu_r f}} \tag{11}$$

式中, *ρ*为导体材料的电阻率, *f*为感应电流的频率。由此可 根据电源频率和材料确定趋肤深度, 进而确定所加热结构 的最小厚度。

(2)电源频率

感应加热效率与电源工作频率密切相关。若电源频率 f过低则趋肤深度增大,键合层中会存在涡流冲销效应,导 致电热转换效率降低。反之,若电源频率f过高,趋肤深度 降低,则出现键合层外延过热的不利情况,造成键合层内部 热分布不均匀。因此,针对特定键合层结构和确定的键合 材料而言,有如下最优电源频率^[29]

$$f_0 = k \frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r d} , \ k = 2 \sim 10 \tag{12}$$

式中,d为目标加热深度。通过式(10)~式(12)可知,选择 高的感应电源频率,可产生更高的功率密度以及更快的升 温速率,实现键合层内热量的快速聚集。因此,选择频率 13.56MHz的射频电源。

(3)临界尺寸

如果键合层的金属厚度不变,感应发热的强弱主要由 金属层宽度 a 与趋肤深度的比值确定,但键合层宽度存在 一个临界值 a_{cr}

$$a_{\rm cr} = 1.5\delta = 1.5\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \tag{13}$$

当键合层宽度大于*a*_{er},可实现加热键合的目的。故键 合层设计中键合微结构的线宽要超过临界值,同时降低电 极和导线等导电结构宽度至临界值以下。

(4)键合层形貌

为明确键合结构的临界尺寸,需要建立微区加热仿真 模型,分析不同结构形状尺寸和位置等对温度场分布的作 用规律。

试验前使用某有限元仿真软件对加热过程进行模拟。 本次试验拟选用焊料为Sn₄Bi₃₅Ag₁,其熔点在172℃左右, 抗蠕变性较好,为无铅焊料,无污染。以Ni为加热层,其导 热性佳、升温快^[30]。仿真时加载频率和电流分别为 13.56MHz和20A。分4组试验分别对加热层放置位置、形 状大小、厚度、线宽对加热速度和加热最高温度的影响进行 了研究。仿真结果如图2~图5所示。图2中x代表放置位 置与线圈中心的距离。可以看到,加热结构离线圈中心距 越远,温度越高,温升速度越快;升温速度和最高温度随结 构面积和厚度增大而不断升高。在其他条件相同的情况 下,厚度越大最高温度越高。其他仿真表明[31],当结构大小 尺寸相当时,随着线宽的增大,其最终达到的温度更高,而 升温速率会下降,但达到最高温度的时间基本相当。另一 方面当线宽过小时,瞬时加热速率太快,将导致加热层瞬间 熔断,大大影响了封装的可靠性。相较而言,环形结构相对 于实心图形升温较快,圆形又较方形升温较快。本文硅摆 键合中受限于键合面积,应该满足足够大的键合面积以提 高键合强度,故选用方形实心图形。



Fig.2 Temperature map of Ni films in various locations

2.2 硅摆与金属底座键合技术总体方案

综合考虑硅摆耐受压力、焊盘加热层趋肤深度、感应 加热临界宽度等因素,最终选择感应加热的方法在底座



图 3 不同形状和大小Ni片温度图 Fig.3 Temperature map of Ni films with various shapes and sizes



图4 不同厚度圆形Ni片温度图





图5 不同线宽圆形Ni片温度图



焊盘上电镀/印刷重熔焊料层,通过感应加热焊盘,焊盘 传热给焊料熔融,进而与硅摆焊接键合。使用丝网印刷 重熔成形工艺形成焊点,成形工艺如图6所示。焊盘设 计结构为依次电镀加热层Cu/Ni/Au,整体厚度约32µm, 尺寸为1mm×0.8mm,焊接之前在经过酸洗和超声清洗处 理过的焊盘表面,可通过模板印刷或者直接涂覆少量均 匀的助焊剂,然后以丝网印刷方式将无铅钎焊料置于焊 盘中心,此时基板和钎料都位于线圈的中心,在交变磁场 下,整个系统便会被感应加热熔融,在焊盘上的钎料迅速 升温重熔,最终让其在室温下自然冷却形成所需的焊接 凸台,以备后续硅摆的键合,也可直接与硅摆组合键合。 其中感应加热设备选择DDCGP-06-III型分体式感应加热 设备,加热功率为0.7MHz,电流为0~25A;感应螺旋线圈 匝数为2,是中间空心的紫铜导管,中间镂空是为了能够 通入冷却水进行冷却,螺旋线圈外径3.0mm,内径 1.8mm,而线圈总体直径35mm;综合考虑钎焊金属蠕变 性能、热疲劳性能、接头强度、钎焊熔点、氧化等因素,确 定 SnAg3.0Cu0.5 (SAC305,熔点 217℃)和 SnAgBi(熔点 172℃)作为键合焊料。



图6 钎料凸台成形工艺



3 微区感应加热键合层制作及测试

3.1 键合层制作

由上述可知,选用无铅焊料SAC和Sn-Ag-Bi,抗蠕变 性较好、无污染。如图7所示,以铜加热层、SAC305焊料层 为例,键合层图案制作工艺流程如下:首先对硅衬底进行清 洗去除氧化层,然后在衬底上溅射30nm过渡层金属Ti改善 硅表面润湿条件,增加金属黏附性,再溅射Cu加热层,电镀



Fig.7 Design and manufacturing process of bonding layers

厚度大于2μm的Ni为连接层,最后通过丝网印刷SAC305 焊锡膏。

3.2 微区感应加热键合层测试与分析

(1)感应加热温度测试

键合试验前,利用红外温度计对两种钎料回流温度进 行测试对比,可以得出SnAgCu焊料需要的回流温度大于 SnAgBi,再利用恒温加热台和红外测温仪对材料为4J36的 金属底座辐射率进行校正,如图8、图9所示。可以发现,在 不同辐射率金属底座的温度下,辐射率越低,温度越高,越 接近环境真实温度,最终测试得到底座辐射率约0.1~0.3, 硅片的辐射率约0.7,焊料的辐射率约0.8~0.9。在频率 0.7MHz、3A电流下感应加热观察金属底座升温特性,可以 发现底座整体被加热,10s左右可达190~210°C,满足焊料回 流温度且小于220°C。

(2)键合强度测试

利用薄膜强度测试仪对键合强度进行拉伸测试,结果









s T=47℃ t=6s T=126℃ t=10s T=213℃ 图 9 感应加热金属底座 10s 红外温度图

Fig.9 Infrared temperature map of induction heating metal base for 10s

表明键合强度最高为12.4MPa,满足键合强度要求。

(3)材料界面反应动力学及其键合机理以及相互匹配 关系

由杨学安^[7]、徐鸿博^[32]、杨明^[33]等的研究可知,不同感应 加热温度和加热时间将对键合强度影响巨大。

如图10所示,利用扫描电镜(SEM)能谱观察Si及金属 底座表面焊料在不同加热时间下的形貌演化发现,硅(Si)、 铁(Fe)、锡(Sn)元素皆未发生大规模的相互扩散,Si表面电 镀的金属Ni逐渐向焊料层扩散,表面Sn和Ni基体发生界 面反应,铜(Cu)在焊料层上下表面较密集,存在着Sn-Cu化 合物。这表明Cu、Sn、镍(Ni)元素发生的界面反应是感应 加热焊料键合的主要原因^[34],但是由于感应加热升温快,键 合时间短,对于金属界面化合物的形成不利,因此存在键合 时间短、强度较低的缺陷。



图10 截面元素分布的能谱分析(EDS)



(4)键合样品断裂面形貌

为了研究感应加热强度与键合层的关系,揭示不同的 拉伸失效形式,利用SEM观察经过拉伸测试后的样品断面 形貌,如图11所示,拉伸断面可见失效界面有三种情况: (1)Si界面,此时呈现硅被拉伸破坏,属于结合强度最高的 界面;(2)钛/铜(Ti/Cu)键合界面,此界面表现为溅射的Ti-



图 11 拉伸样品断裂面形貌 Fig.11 Stretching sample cross-sectional morphology

Cu金属薄膜附着力差;(3)Ni-焊料界面,Ni属于电镀金属,厚度较溅射材料Ti-Cu更大,出现此界面原因为焊料涂覆不均匀,焊料较薄或存在气隙。

4 结束语

本文针对目前加速度计中硅摆胶黏结存在的蠕变、迟 滞等连接稳定性问题,提出微区感应加热键合技术代替胶 黏结技术实现硅摆的高稳定性固定。仿真与试验均表明, 在相同的感应加热结构下,当距离感应加热线圈的中心位 置越远,温升速率越快,且达到的最高温度越高。当感应加 热结构面积、厚度、线宽越大,感应加热所能达到的最高温 度越高。同时对比了不同的感应加热结构,圆形结构较方 形结构的感应升温速率更大;空心环形结构又相较实心结 构的感应加热速率更大。最终选取 SAC305 和 SnAgBi 为 键合焊料,在加热频率0.7MHz、电流 3A 条件下,10s 可达温 度 190~210℃,最大键合强度达到 12.4MPa,保证了加速度 计的长期稳定性。

参考文献

[1] 张培源,孙斌,刘海斌,等.精密微小组件球面碟簧等效解析 模型构建方法[J].航空科学技术,2020,31(4):74-80.

Zhang Peiyuan, Sun Bin, Liu Haibin, et al. Equivalent modeling approach of spherical disc springs for precision miniature components[J].Aeronautical Science & Technology, 2020,31(4): 74-80. (in Chinese)

[2] 张景铭.装配因素对光电加速度计偏值的影响研究[D].大 连:大连理工大学,2016.

Zhang Jingming. Research on the assembly factors on photoelectric accelerometer's bias [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

- [3] Lin Liwei. MEMS post-packaging by localized heating and bonding[J]. IEEE Transaction on Advanced Packaging, 2000, 23(4): 608-616.
- Thompson K, Gianchandani Y, Booske J, et al. Direct siliconsilicon bonding by electromagnetic induction heating[J]. Journal of Microelectro Mechanical Systems, 2002, 11: 285-292.
- [5] Sosnowchik B, Azevedo R, Myers D, et al. Rapid silicon-tosteel bonding by induction heating for MEMS strain sensors[J].
 Journal of Micro Electro Mechanical Systems, 2012, 21(2): 497-506.
- [6] 陈明祥. 基于感应加热的 MEMS 封装技术与应用研究[D]. 武 汉:华中科技大学, 2005.

Chen Mingxiang. Research on packaging technology and application based on induction heating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.(in Chinese)

- Yang Xuean, Wu Mingqing, Fang Weilun. Localized induction heating solder bonding for wafer level MEMS packaging[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15: 394-39.
- [8] 王文娟,薛景锋,张梦杰,等.基于光纤传感的结构变形实时监测技术研究[J].航空科学技术,2022, 33(12):97-104.
 Wang Wenjuan, Xue Jingfeng, Zhang Mengjie, et al. Research on real-time structural deformation monitoring technology based on optical fibre sensing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12):97-104.(in Chinese)
- [9] 孙宁,施建华.感应加热工艺与设备的发展状况及趋势(上)
 [J].金属加工(热加工), 2009(3): 27-29.
 Sun Ning, Shi Jianhua. Development status and trend of induction heating process and equipment (Part I) [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2009(3): 27-

29. (in Chinese)

- [10] Thompson K, Booske J H, Gianchandani Y, et al. Electromagnetic induction heating for cold wall rapid thermal processing
 [C]. Advanced Thermal Processing of Semiconductors International Conference on RTP, 2001: 190-196.
- [11] Protsenko A, Tanaev A, Makarova I. Induction heating during hardening of the balls bearings[C]. 2019 21st International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems, 2019: 242-244.

- [12] Chen Qisheng, Lu Jing, Zhang Zibing, et al. Growth of silicon carbide bulk crystals by physical vapor transport method and modeling efforts in the process optimization[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 292(2): 197-200.
- [13] Yoshikawa T, Kawanishi S, Tanaka T. Solution growth of silicon carbide using Fe-Si solvent[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49: 311-333.
- [14] Sosnowchik B D, Lin Liwei. Rapid synthesis of carbon nanotubes by bulk and localized inductive heating[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2007: 835-838.
- Song Yanfei, Yang Zhengchun, Liao Zhenyu, et al. One-step rapid preparation of CuO nanosheets by high frequency induction heating and the application as excellent electrochemical sensor based on CuO/MWCNTs for the detection of glucose[J]. Materials Research Express, IOP Publishing, 2019, 6(10): 1050b3.
- [16] Oh T S, Lee K Y, Lee Y H, et al. Flip-chip process using heat transfer from an induction-heating film[J]. Metals and Materials International, 2009, 15(3): 479-485.
- [17] Li Mingyu, Xu Hongbo, Lee S R, et al. Eddy current induced heating for the solder reflow of area array packages[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2008, 31(2): 399-403.
- [18] Xu Hongbo, Li Mingyu, Fu Yonggao. Geometry control of solder interconnects via induction heating[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2009, 1: 25-30.
- [19] Xu Hongbo, Li Mingyu, Fu Yonggao. Local melt process of solder bumping by induction heating reflow[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2009, 4: 45-54.
- [20] Nan Lang, Jiang Zhuangde, Wei Xueyong. Emerging microfluidic devices for cell lysis: A review[J]. Lab on a Chip, 2014, 14(6):1060-1073.
- [21] Baek S, Min J, Park J. Wireless induction heating in a microfluidic device for cell lysis[J]. Lab on a Chip, 2010, 10 (7): 909-917.
- [22] Almassian D R, Cockrell L M, Nelson W M. Portable nucleic acid thermocyclers[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42 (22): 8769-8798.
- [23] Pal D, Venkataraman V. A portable battery operated chip thermocycler based on induction heating[J]. Sensors and

Actuators, A: Physical, 2002, 102(1-2):151-156.

- [24] Clendenin J, Tung S, Budraa N, et al. Microwave bonding of silicon dies with thin metal films for MEMS applications[C].
 53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003: 18-23.
- [25] Wild M J, Gillner A, Poprawe R, et al. Locally selective bonding of silicon and glass with laser[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 93(1): 63-69.
- [26] Xi Yanyan, Luo Xiaobing, Liu Wenming, et al. Study on localized induction heating for wafer level packaging[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(3): 800-806.
- [27] 刘文明. 感应局部加热封装技术及其应用研究[D]. 武汉:华 中科技大学,2010.
 Liu Wenming. Localized induction heating packaging and its applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [28] Hofmann C, Fröhlich A, Kimme J, et al. A novel method for mems wafer-level packaging: Selective and rapid induction heating for copper-tin slid bonding[C]. 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors, 2019: 277-280.
- [29] 蔺常勇.圆片级感应局部加热封装技术研究[D].武汉:华中 科技大学,2009.

Lin Changyong, Research on wafer bonding technology by localized induction heating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

 [30] 董宝昆,张宇航,行登海,等.超声冲击强化工艺对钛合金表 面质量及磨损性能影响研究[J].航空科学技术,2023,34(12):
 43-58.

Dong Baokun, Zhang Yuhang, Xing Denghai, et al. Study on the effect of ultrasonic impact strengthening process on the surface quality and wear performance of titanium alloy [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023,34(12):43-58.(in Chinese)

[31] 席炎炎. MEMS 感应局部加热封装研究[D]. 武汉:华中科技 大学,2009.

Xi Yanyan. Research on induction local heating for MEMS packaging[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[32] Xu Hongbo, Li Mingyu, Kim Jongmyung, et al. Lead-free soldering technique by using medium-frequency electromagnetic field[C]. 2008 10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008.

[33] 杨明.感应加热重熔焊点界面反应及可靠性研究[D].哈尔 滨:哈尔滨工业大学,2009.

Yang Ming. Study on interfacial reaction and reliability of solder bumps reflowed by induction heating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)

[34] 郭广达, 成来飞, 叶昉. 航空发动机热结构部件的 RMI工艺研究进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(8):1-8.
Guo Guangda, Cheng Laifei, Ye Fang. Research progress on RMI process for aero-engine thermal structure components[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(8): 1-8. (in Chinese)

Research on MEMS Accelerometer Silicon Pendulum Micro-zone Induction Heating Bonding Technology

Liu Xin¹, Zhang Yiyi¹, Chen Zhuo¹, Chen Liang², Ye Kun², Wang Lingyun¹, Wu Dezhi¹

1. Xiamen University, Xiamen 361005, China

2. Aeronautical Key Laboratory of Inertia Technology, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: High-precision micro-electro-mechanical system (MEMS) navigation devices, such as micro-machined gyroscopes and photoelectric accelerometers, play a very important role in various fields including aerospace due to their advantages of miniaturization, intelligence, high integration and capabilities of large-scale manufacturing. The pendulosity of the photoelectric accelerometer has a great influence on the system characteristics (such as static bias and scale factor) and even the overall dynamic performance of the system. Aiming at the problems of static deviation and temperature hysteresis caused by adhesive bonding deformation and material mismatch imbalance in silicon pendulum in photoelectric accelerometer, this paper proposes a micro-area induction heating bonding technology using low-temperature metal solder instead of traditional adhesive bonding to realize low-temperature and highstrength bonding between silicon pendulum and substrate, and overcome the defects of creep hysteresis and connection instability introduced by adhesive bonding. At the same time, the scale effect behavior of micro-area induction heating technology was studied, the structural design and manufacturing process of the bonding layer were clarified, and the influence of bonding process parameters on the solder reflow temperature was also investigated. The bonding test results show that the bonding strength between the silicon pendulum and the substrate is greater than 12 MPa, which greatly improves the stability of the silicon pendulum connection, lays a foundation for the high reliability and stable operation of the accelerometer silicon pendulum, and improves the accuracy and working life of the aerospace inertial navigation and inertial guidance systems.

Key Words: micro-zone induction heating bonding; accelerometer; connection stability; bonding technology

Received: 2024-04-07; Revised: 2024-08-07; Accepted: 2024-10-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(52075464); Aeronautical Science Foundation of China(20180868002)