

微波电路互联用金丝键合界面空间高低温特性演化研究

孔 静¹ 李 岩¹ 高 鸿¹ 刘媛萍² 张 磊¹ 阎晓蕾³
朱旭斌⁴

(1 中国空间技术研究院宇航物资保障事业部, 北京 100094)

(2 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

(3 战略支援部队航天系统部装备部项目管理中心, 北京 100074)

(4 中国航天科技集团有限公司航天标准化技术研究院, 北京 100074)

文 摘 金丝材料应用于航天器小型化微波模块等产品的电路封装中, 金丝键合界面受高低温环境影响易产生性能变化从而影响服役可靠性。本文对金丝界面高低温特性的演化规律进行了研究, 包括空间温度环境模拟试验后的界面与成分迁移、界面层厚度变化、键合金丝拉伸剪切力与失效模式演变, 得出不同温度条件处理后的金铝键合界面微观组织变化规律。结果表明高低温循环试验后金丝界面仍保持较高的结合强度, 一定程度的金属间化合物生长提高了键合界面强度。高温贮存试验中, 随着贮存时间的增加, 金丝界面层IMC (Intermetallic Compound) 厚度和金属间化合物不断增长, 失效破坏位置越来越多地出现在键合界面处, 铝金属化层附近的金含量因扩散而增高, 金铝键合界面处IMC界面层厚度的增加降低了界面结合强度。

关键词 微波电路, 金丝, 界面特性, 高低温, 金属间化合物

中图分类号: TG422.3

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.011

Research on the Evolution of Gold Wire Bonding Interface Used for Microwave Circuit Interconnection in High and Low Space Temperature

KONG Jing¹ LI Yan¹ GAO Hong¹ LIU Yuanping² ZHANG Lei¹ YAN Xiaolei³
ZHU Xubin⁴

(1 China Aerospace Components Engineering Center, China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(2 China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000)

(3 Project Management Center of Equipment Department and Space System Department of Strategic Support Force, Beijing 100074)

(4 Aerospace Standardization Technology Research Institute, Beijing 100071)

Abstract The gold wire was used in the circuit packaging interconnection of spacecraft miniaturized microwave module and other products. The performance of gold wire bonding interface was easy to change because of the influence of space high and low temperature environment, thus affecting the service reliability. In this paper, the evolution of high and low temperature characteristics of the gold wire interface was studied, including the composition and interfacial migration, interfacial layer thickness change, tensile shear force and failure mode evolution of gold wire bonding after space environmental simulation tests, and the change rule of microstructure of Au-Al bonding interface under different temperature environment was obtained. The results show that the gold interface still maintain high bonding strength after the high and low temperature cycle test. A certain degree of intermetallic compound growth can improve the strength of bonding interface. But in the high temperature storage test, as time increases, the gold IMC (Intermetallic Compound) interface layer and the intermetallic compound increase rapidly, and failure damage positions increasingly appear in the bonding interface. The gold content near the aluminum metallized layer increases as a result of diffusion, the interface bonding strength reduces with the increase of the thickness of IMC interface layer at the Au/Al bonding interface.

收稿日期: 2023-01-08

第一作者简介: 孔静, 1986年出生, 硕士, 工程师, 主要从事航天器用电子材料及材料质量保证技术研究工作。E-mail: kongjing2009@163.com

通信作者: 高鸿, 1980年出生, 博士, 研究员, 主要从事高分子材料及应用验证技术的研究工作。E-mail: gaohong_cast@sina.com

0 引言

金丝应用于集成电路和半导体分立器件的引线键合封装,由于该工艺制造成本低且具有较高的通用性,成为电子产品封装互联的关键技术^[1-2]。新一代高密度互联用金丝材料越来越多地应用于小型化微电子产品中,如基于一体化MCM(多芯片组件)技术的射频链模块多芯片组件,其封装可靠性直接关系到微波信号传输质量。电子产品小型化、模块化以及高集成化的发展趋势,要求键合金丝具有更加优异的键合稳定性和可靠性。键合金丝的焊接工艺一般基于热超声键合,金丝与芯片之间的金属化层之间通过原子间的扩散形成键合界面,键合界面的牢固性对微波电路互联可靠性起着至关重要的作用,界面层金属间化合物的过度生长会使接触电阻和热阻增大,并且降低键合点机械性能^[3-4]。

微波电路在航天器中应用广泛,对键合金丝的耐高低温特性具有较高要求。金丝在微波电路中使用数量多,键合界面复杂,界面多为金-金金属化、铝-金金属化层。航天器在发射和在轨运行过程中服役温度范围达到 $-65\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,所产生的热载荷对微波电路互联用金丝界面组织性能产生较大的影响。在高温条件下,键合金丝和各类不同基板构成的多芯片组件产品在金-铝键合界面中会生成 Kirkendall 空洞,或产生脆性相金属间化合物,键合强度降低,甚至脱焊^[5-6]。国内外研究表明高温贮存产生的热应力和金属间化合物脆性相容易造成键合焊点的脱落或断裂^[7-8],但对金丝界面空间高低温特性演化的规律仍缺乏系统性研究,为提升金丝材料长期空间服役可靠性,本文通过键合金丝的高低温界面显微组织变化分析、成分和界面层迁移分析、界面结合性能表征,对金丝及其键合样件的机械特性以及键合界面高低温特性演变规律进行研究,获取金铝键合界面性能退化规律,拟为微波电路互联用键合金丝的封装可靠性评价提供技术支持。

1 实验

1.1 材料

金丝材料采用纯度99.99%以上的金,经过熔铸、拉拔和退火工艺形成用于键合的金丝。熔铸过程中适当添加微量元素以增加其力学性能与应用可靠性,微量元素总和 $<0.01\%$ 的前提下,采用拉丝工艺和退火工艺以保证金丝的焊接强度、热稳定性,并提高丝材的耐热性和成球性。

采用金丝球焊设备在硅芯片铝焊盘上键合高密度金丝形成金铝键合的试验样件,其键合位置如图1所示。

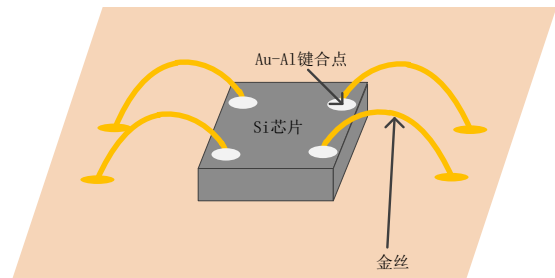


图1 Si芯片金铝键合试验样件

Fig. 1 Gold wire ball bonding samples on Si chip

1.2 试验过程

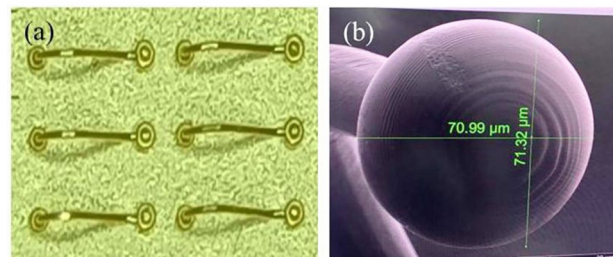
金丝键合界面微观组织结构分别采用金相显微镜和JSM-6360LV扫描电子显微镜(SEM)观察,采用扫描电子显微镜能谱仪(EDS)分析键合点金属间化合物成分与界面迁移、元素扩散情况,参照GB/T 34895—2017、GB/T 17359—2012、GB/T 16594—2008中的方法进行测试。采用CMT5105微机控制电子万能试验机测试键合前丝材拉力,采用Series 4000-0拉力剪切力测试仪测试金丝键合后拉力。

高低温交变循环试验采用CY-0瑞莱冲击试验箱进行测试,采用低温 $(-65\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到高温 $(150\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的温度转换,高、低温之间转换时间间隔小于5s,达到最高最低温度后保温10min,温度循环次数分别为100次、300次、500次。高温贮存试验箱采用电热鼓风干燥箱,加热温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,样件分别贮存100、500、1000h后取出,样品取出后分别对金丝单丝在不同贮存时间点的拉伸性能、键合金丝样件的键合拉力和Si芯片金铝键合试验样件界面组织结构的变化进行测试。

2 结果与讨论

2.1 球焊工艺成球质量

为评价球焊工艺成球质量,在薄膜陶瓷镀金基板上焊接金丝,采用45倍金相显微镜观察焊点外观,如图2(a)所示,金丝键合焊点均无起翘、脱落现象。抽样10个焊点在光学显微镜下进行焊点尺寸测量,



(a) 金丝键合外观 (b) 金丝球扫描电镜图

图2 金丝成球质量

Fig. 2 The quality of the golden ball

球焊键合点直径在2~5倍金丝直径之间。将球焊过程中烧成的金丝球取下来,采用扫描电镜观察金丝球的外观质量,如图2(b)所示,金丝球成规则的球形,表面光滑,无沾污、凹坑等缺陷,金丝球两个方向上的直径分别为71.32和70.99 μm ,对10个烧成金丝球直径进行统计,其平均直径为71.1 μm 。

2.2 高低温交变环境后的界面组织演变

对金铝(AuAl)键合样件进行高低温交变循环试验并进行试验后的界面性能分析,得到的AuAl键合界面微观组织结构如图3所示。图3(a)为试验前键合界面金相图,从图中没有观察到明显的界面金属间化合物(IMC)层;图3(b)~(d)分别为高低温交变循环试验100次、300次、500次后的金丝键合界面金相图,可以看出AuAl界面层呈点状或条带状分布,厚度不均匀,且随循环次数的增多而逐渐变得明显。

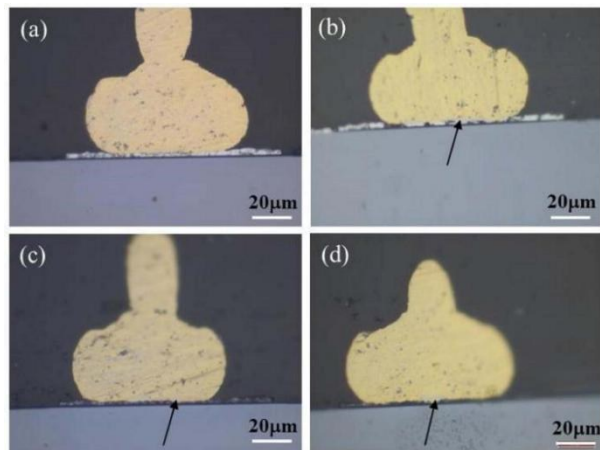


图3 AuAl键合界面金相图

Fig. 3 Metallographic figure of AuAl interface layer

SEM对高低温交变循环试验后键合点界面层厚度、成分与界面迁移、元素扩散情况分析结果如图4所示。温度交变试验100次后,AuAl键合界面已经形成了金属间化合物层,从图4(b)可以看出,界面分为两层,分别进行EDX能谱分析得到,靠近金丝球的A点Au和Al原子比约为4:1,靠近Al金属化层的B点Au和Al原子比约为5:2,由原子体积分数百分比推出靠近金丝球的主要成分为 Au_4Al ,靠近Al金属化层的主要成分为 Au_5Al_2 。温度交变循环试验300次后,界面层C部位的主要成分接近于 Au_4Al 。温度交变循环试验500次后,界面层D部位的成分主要为 Au_4Al 。具体情况见表1。

由于AuAl键合不同温度交变循环次数后的界面层在电镜中观察并不呈连续排布,对厚度测量数值进行统计,其分布情况如图5所示。100次温度循环后的IMC层厚度分布在1.3~2.2 μm ,且IMC层厚

度多在低厚度值范围内分布;300次温度循环后的IMC层厚度约为1.7~2.3 μm ;500次温度循环后的IMC层厚度约为2.1~3.3 μm 。可见随循环次数增加,焊接界面微观组织结构中IMC界面层逐渐变厚。Au-Al界面层厚度和金属间化合物种类随着元素、晶界、空位等的扩散而变化^[9],随着高低温循环次数的增加,键合点靠近Si芯片Al金属化层附近的金属间化合物由于Au元素的扩散由最初生成的 Au_5Al_2 逐渐转化成Au含量较高的 Au_4Al ,同时靠近金丝球的界面逐渐出现了Kirkendall孔洞,因Au向Al中扩散速率比Al向Au中扩散速率大,从而使得靠近界面的金球附近逐渐出现空位聚集并出现孔洞。

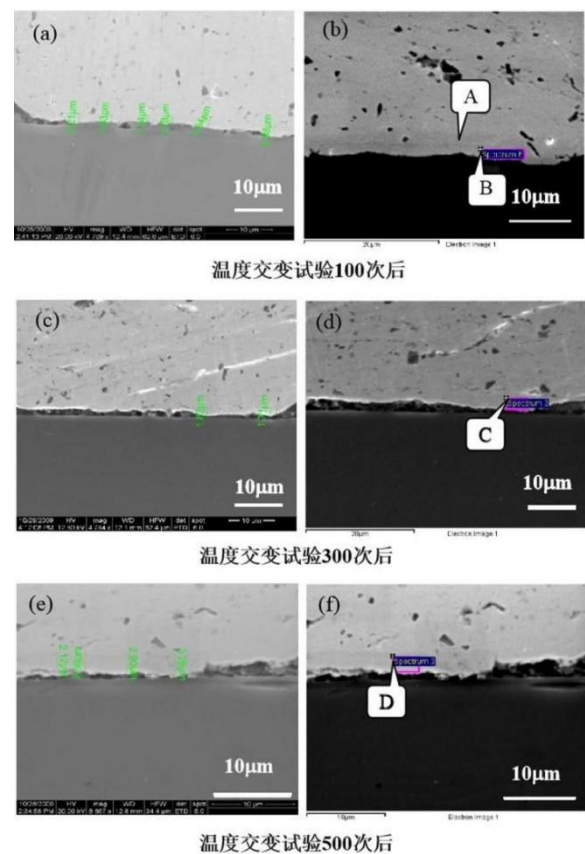


图4 温度交变试验后 AuAl 键合界面扫描电镜图

Fig. 4 SEM pictures of AuAl interface layers after different high and low temperature cycles

表1 温度交变循环试验后的不同界面元素成分

Tab. 1 Composition of different interface elements after high and low temperature cycles

测试位置	Au 含量/(%)	Al 含量/(%)
A	79.14	20.86
B	71.93	28.07
C	79.75	20.25
D	80.08	19.92

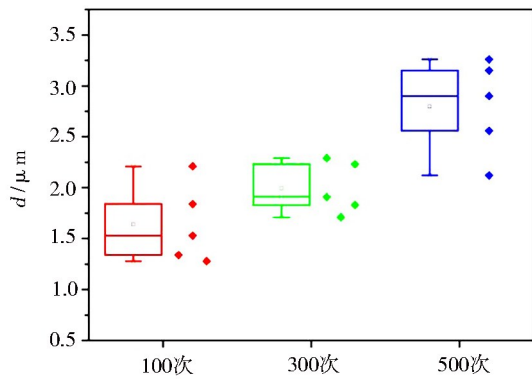
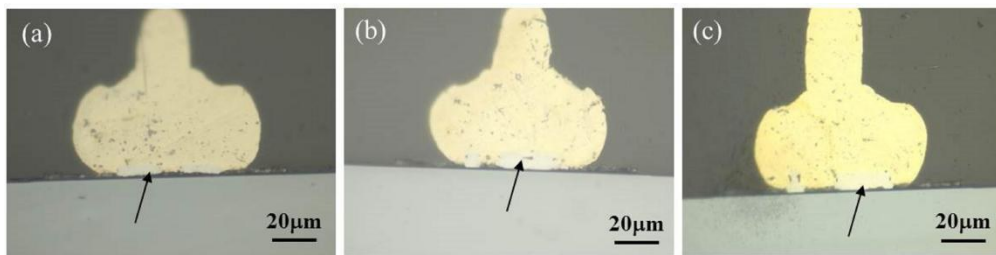


图5 不同温度交变循环次数后的 AuAl 界面层厚度分布
Fig. 5 Different thickness of AuAl interface layer after different high and low temperature cycle

2.3 高温贮存后的界面组织演变

将金铝(AuAl)键合样件在 150 °C(允许+5 °C正偏差)环境温度下保持 1 000 h,设置中间检查点 100、500 h,试验后分别利用金相显微镜和扫描电镜进行 AuAl 键合界面形貌分析,并得到焊接界面微观组织结构和界面迁移、元素扩散演变情况。图 6(a)~(c)分别为高温贮存 100、500、1 000 h 后的金丝键合界面金相图,高温贮存 100 h 后, AuAl 键合界面已经形成,界面层厚度不均匀且随高温贮存时间的增加而逐渐变厚。利用扫描电子显微镜对高温贮存试验后键合点界面金属间化合物层的厚度、成分与界面迁移、元素扩散情况进行分析,如图 7 所示。



(a) 100 h (b) 500 h (c) 1 000 h

图6 AuAl键合界面金相图

Fig. 6 Metallographic figure of AuAl interface layer

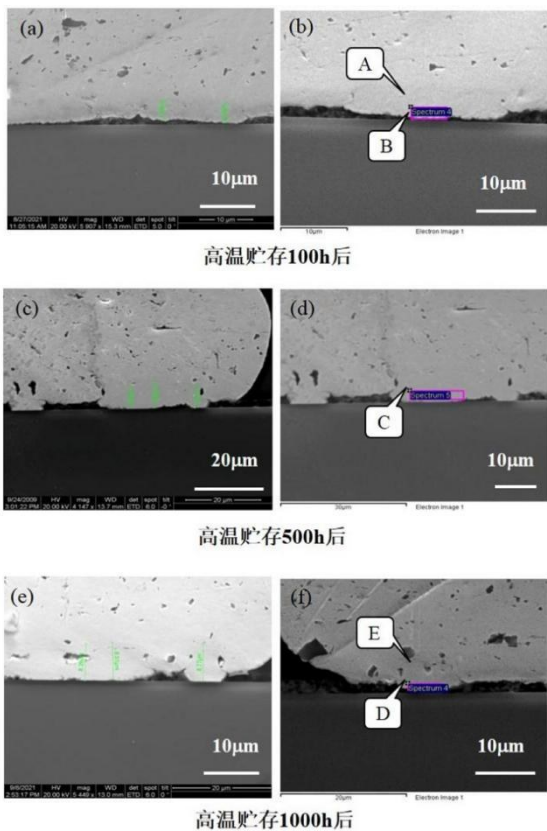


图7 不同高温贮存时间后 AuAl 键合界面扫描电镜图
Fig. 7 SEM pictures of AuAl bonding interface after different high temperature storage time

高温贮存 100 h 后,图 7(b)中靠近金丝球的 A 点 Au 和 Al 原子比约为 5:2,靠近 Al 金属化层的 B 点 Au 和 Al 原子比约为 2:1,表明靠近金丝球的金属间化合物主要成分为 Au_5Al_2 ,靠近 Al 金属化层的金属间化合物主要成分为 Au_2Al 。高温贮存 500 h 后,图 7(d)界面层 C 点的成分接近于金属间化合物 Au_5Al_2 。高温贮存 1 000 h 后,图 7(f)中靠近金丝球的 E 点 Au 和 Al 原子比约为 77:23,靠近 Al 金属化层 D 点的 Au 和 Al 原子比约为 74:25。与图 7(d)相比,Au 元素随高温贮存时间的延长,逐渐向靠近 Si 芯片的 Al 金属化层附近扩散。具体情况见表 2。

表 2 不同高温贮存时间后的界面元素成分

Tab. 2 Composition of interface elements after different high temperature storage time

测试位置	Au 含量/(%) ^(a)	Al 含量/(%) ^(a)
A	72.62	27.38
B	67.15	32.85
C	71.72	28.28
D	74.04	25.96
E	77.32	22.68

对不同高温贮存时间后的 AuAl 键合 IMC 界面层厚度值进行统计,其分布情况如图 8 所示。高温贮存 100 h 后 IMC 层厚度为 2.2~3.6 μm;高温贮存 500 h

后的IMC层厚度为6.7~7.2 μm;高温贮存1 000 h后的IMC层厚度为8.3~9.8 μm。随着高温贮存时间的增加,焊接界面微观组织结构中IMC界面层厚度增长较明显,说明在150 °C温度条件下AuAl金属间化合物的生长较快。

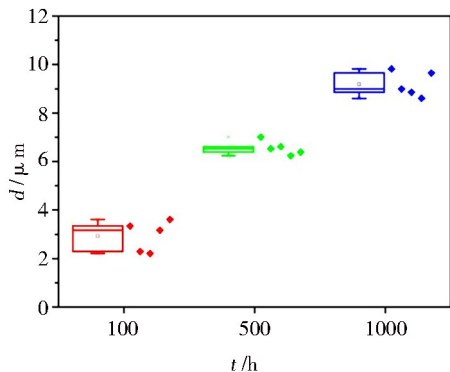


图8 不同高温贮存时间后的AuAl界面层厚度分布
Fig. 8 Different thickness of AuAl interface layer after different high temperature storage time

Au-Al金属间化合物生长厚度一般满足以下经验公式^[9]:

$$\delta = (Kt)^{1/n} \quad (1)$$

式中, δ 为金属间化合物厚度, K 为金属间化合物的生长常数, t 为老化时间, n 为时间指数。

根据普遍研究认为:当 $n=1$ 时,金属间化合物的生长为界面反应控制,此阶段属于初步反应阶段;当 $n=2$ 时,金属间化合物的生长为扩散控制,Au原子通过Al金属化层的孔隙和晶界扩散与Al结合形成金属间化合物;当 $n \geq 3$ 时,金属间化合物的生长为选择扩散控制,一种金属原子无法通过金属间化合物介质层与另一种原子结合,只能从金属间化合物的晶界扩散到另一种金属中,随着反应时间的增加, n 值逐渐增大,反应速率不断减小。

图9为150 °C的条件下,Au-Al金属间化合物的IMC层平均厚度随高温贮存时间变化的曲线图,对IMC厚度与老化时间的关系进行非线性拟合,由拟合

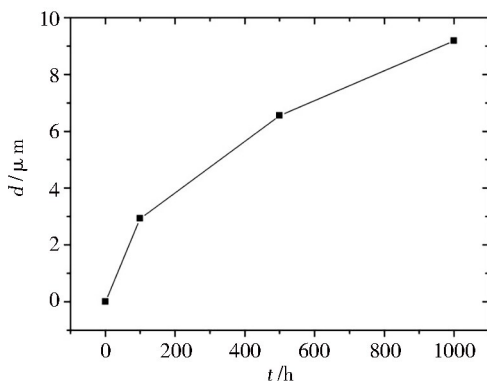


图9 IMC厚度与老化时间的关系

Fig. 9 Relationship between IMC thickness and aging time

结果得出,当 $n=2$ 时,拟合的匹配度为 $R^2=0.9905$,Au-Al金属间化合物的生长符合抛物线的拟合。因此,高温贮存条件下,金属间化合物的生长为扩散控制,说明AuAl键合IMC界面层的反应机理为Au、Al金属的相互扩散并结合成金属间化合物为主,与图7中焊接界面微观组织结构中不同高温贮存时间后AuAl键合界面金属间化合物层的成分与界面迁移、元素扩散情况的分析结果相符。

2.4 金丝键合拉力及失效模式演化

图10显示AuAl键合拉伸断裂载荷随不同交变温度循环次数变化不大,温度循环后键合拉力略有升高,其中300次温度循环后,键合拉力升高,一定程度的金属间化合物生长可以提高键合界面的硬度和强度,但随着金属间化合物的继续生长,键合点机械性能降低。如表3所示,金丝键合失效模式以键合点(AuAl键合界面处)失效和中间引线断裂为主,15个抽样测试点中,100次和500次温度循环后分别出现一次键合点失效。与温度循环试验前相比,温度循环后金丝键合拉力的离散性减小,说明温度循环对拉拔后金丝的力学性能均匀性起到促进作用,这可能与拉拔后金丝残余应力的降低有关^[10]。

表3 不同交变温度循环次数后金丝的键合拉力和失效模式
Tab. 3 Bonding force and failure modes of gold wire after different high and low temperature cycles

循环次数/次	键合拉力 平均值/gf	中间引线 断裂/个	第一键合点 失效/个
0	11.32	15	0
100	11.48	14	1
300	12.17	15	0
500	11.72	14	1

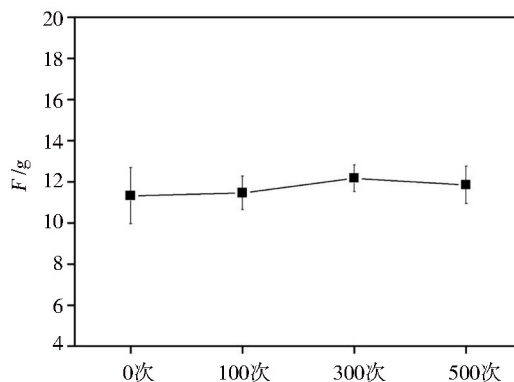


图10 金丝AuAl键合拉力随高低温循环次数的变化
Fig. 10 Variation of Au-Al bonding force of gold wire with different high and low temperature cycles

图11显示随高温贮存时间的延长,金丝AuAl键合拉力呈现逐渐下降的变化规律。高温稳定性试验中在贮存不同时间后,对金丝丝材的拉断力进行测

试并与金丝键合后的拉力进行对比,说明随着高温贮存时间的增加,金丝键合拉力破坏位置越来越多地出现在键合焊点界面处,键合界面因产生越来越多的金属间化合物脆性相且界面IMC层厚度不断增大,引发键合界面强度的降低。但经过150℃条件下1000h贮存试验后,金丝键合拉力仍高于2gf,符合航天器微波电路组件的设计使用要求。

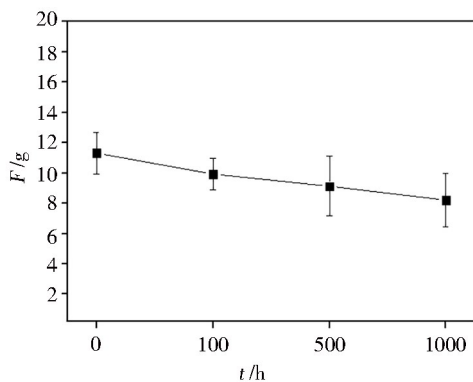


图11 Au-Al键合拉力随高温贮存时间的变化

Fig. 11 Variation of Au-Al bonding force of gold wire with different high temperature storage time

表4 不同高温贮存时间后金丝的键合拉力和失效模式

Tab. 4 Bonding force and failure modes of gold wire after different high temperature storage time

高温贮存时间/h	丝材拉断力/gf	键合拉力平均值/gf	中间引线断裂/个	第一键合点失效/个
0	11.33	11.32	15	0
100	11.20	9.93	14	1
500	11.72	9.13	10	5
1000	11.76	8.21	5	10

金丝与Al焊盘反应形成的金属间化合物IMC在一定程度上能够使焊接接头更加牢固,起到键合作用,焊点界面处形成弥散分布的微小金属间化合物可以改善焊料的抗疲劳能力或连接强度,但是由于金属间化合物通常为脆硬相,延性较差,较多的金属间化合物会导致键合拉力的降低。如表4所示,高温贮存500h后的IMC层厚度与100h相比,增长了约2.2倍,键合点失效个数明显增加,导致键合拉力的降低。高温贮存1000h后,失效主要发生在AuAl键合界面处,界面强度成为影响引线材料互联封装可靠性的主要因素,而较厚的IMC界面层在外力作用下容易在界面处产生应力集中^[11-12],降低了界面结合强度。

3 结论

(1)通过金丝球焊工艺成球质量分析,发现金丝键合焊点均无起翘、脱落现象,球焊键合点直径在2~5倍金丝直径之间,焊合良好。球焊过程中烧成金丝

球呈规则的球形,表面光滑,无沾污、凹坑等缺陷,金丝球的平均直径为71.1μm。

(2)随高低温交变试验循环次数的增加,AuAl键合界面层厚度逐渐增加,且随着Au、Al化学元素的迁移在界面处生成金属间化合物,随着高低温循环次数的增加,键合点靠近Si芯片Al金属化层附近的金属间化合物由于Au元素的扩散由最初生成的Au₅Al₂逐渐转化成Au含量较高的Au₄Al。300次温度循环后,键合拉力略有升高且离散性减小,一定程度的金属间化合物生长提高了键合点的可靠性,此外,温度循环对拉拔后金丝的力学性能均匀性起到促进作用。

(3)高温贮存试验后的键合界面层厚度随贮存时间增长较快,由于Au元素的扩散Al金属化层附近的界面组成由Al含量较高的相逐渐向Au含量较高的相转变,键合界面因产生越来越多的金属间化合物使界面IMC层厚度不断增大。

(4)通过金丝键合拉力及失效模式演化分析,获取了金铝键合界面金属间化合物生长与键合拉力和键合点失效模式的变化关系,随着高温贮存时间的增加,因界面层IMC层厚度的增大,金丝键合拉力破坏位置越来越多地出现在键合焊点界面处,引发键合界面强度的降低。当金丝在高温环境中长期使用时,应注意界面特性变化对微波电路互联金铝界面结合强度的影响,在金丝材料的选用与产品设计过程中,应充分考虑温度对键合界面结合性能的影响,根据试验结果确立金丝高温应用边界条件。

通过对金丝界面空间高低温特性演化规律研究,可为微波电路及其他集成电路的设计研制、失效分析及材料应用验证等工作提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] DUBIN V M. Electrochemical aspects of new materials and technologies in microelectronics [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 70(2): 461-469.
- [2] 彭成,梁爽,黄福祥. 键合丝键合界面研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(72): 501-504.
PENG C, LIANG S, HUANG F X. Research progress on bonding interface of bonded wire [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(72): 501-504.
- [3] 杨建伟,梁大钟,施保球,等. 芯片铝焊盘上不同金属丝键合质量研究[J]. *电子与封装*, 2019, 19(1): 4-8.
YANG J W, LIANG D Z, SHI B Q, et al. Study of bonding performance and reliability for different bond wires [J]. *Electronics & Packaging*, 2019, 19(1): 4-8.
- [4] XU H, LIU C Q, SILBERSCHMIDT V, et al. Intermetallic phase transformations in Au-Al wire bonds [J]. *Intermetallic*, 2011, 19(12): 1808-1816.
- [5] XU H, LIU C Q, SILBERSCHMIDT V, et al. New

mechanisms of void growth in Au-Al wire bonds: volumetric shrinkage and intermetallic oxidation [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(7): 642-645.

[6] 王越飞, 顾春燕, 崔凯, 等. 金铝键合体系服役寿命评价方法研究[J]. *电子机械工程*, 2020, 36(1): 38-41.

WANG Y F, GU C Y, CUI K, et al. Evaluation method for functioning life of gold-aluminum bonding [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2020, 36(1): 38-41.

[7] PARK J W, CHA H J, KIM B S, et al. Interfacial degradation mechanism of Au/Al and alloy/Al bonds under high temperature storage test: contamination, epoxy molding compound, wire and bonding strength [J]. *IEEE Transactions on Components & Pack Aging Technologies*, 2007, 30(4): 731-744.

[8] 文惠东, 黄颖卓, 林鹏荣, 等. 高温存储对 Sn-PbNi 凸点界面金属间化合物生长的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(增刊): 33-37.

WEN H D, HUANG Y Z, LIN P R, et al. IMC formation of Sn-Pb-Ni bumps in high temperature storage [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51

(S): 33-37.

[9] 徐慧. 铜及金丝与铝合金焊盘键合的金属间化合物生长和可靠性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 5-6.

XU H. Intermetallic compounds formation and reliability on bonding joints of copper wire and gold wire with aluminum alloy pad [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 5-6.

[10] YANG F, JIANG J Q, FANG F. Microstructure and residual stress of cold drawn pearlitic wires [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(Z1): 491-495.

[11] 刘丽君, 赵修臣, 李红. 热超声金丝键合工艺及其可靠性研究[J]. *新技术新工艺*, 2018(3): 27-31.

LIU L J, ZHAO X C, LI H. Investigation on the thermal ultrasonic gold wire bonding technology and reliability of interface [J]. *New Technology and New Technique*, 2018(3): 27-31.

[12] XIAO J, LIAO J Y, LIN Y, et al. Impact from IMC thickness on the reliability of wire bonding [C]// *Electronic Materials and Packaging*, 2012 14th International Conference, IEEE, Hong Kong, China, 2012: 1-5.