

基于国产金锡焊料的功率芯片焊接工艺及可靠性研究

冯晓晶¹ 夏维娟¹ 赵晋敏¹ 贾旭洲¹ 赵 炜²

(1 西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

(2 中国空间技术研究院, 北京 100010)

文 摘 金锡焊料具有强度高、抗氧化性好、抗疲劳、蠕变性能优良等优点,在混合集成电路中得到越来越多的应用,尤其是在大功率高可靠集成电路中通过共晶焊接来降低封装热阻和提高芯片焊接可靠性。本文分析了国产金锡焊料的基础特性,基于国产金锡焊料采用手动方式进行功率芯片摩擦共晶焊接关键控制参数焊接工艺研究;对功率芯片金锡焊接宇航应用可靠性进行验证。结果表明,经历系列严苛的宇航环境热力学试验,剪切强度满足相关标准要求并保持强度稳定,显示了焊接的高可靠性。

关键词 国产焊料,功率器件,金锡焊接,可靠性

中图分类号:TF124

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.012

Study on the Welding Process and Application Reliability of Power Chips Based on Domestic Gold-tin Solder

FENG Xiaojing¹ XIA Weijuan¹ ZHAO Jinmin¹ JIA Xuzhou¹ ZHAO Wei²

(1 Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000)

(2 China Academy of Space Technology, Beijing 100010)

Abstract Gold-tin solder had the advantages of high strength, good oxidation resistance, fatigue resistance, excellent screw performance and so on. It was more and more used in hybrid integrated circuits, especially in high power and high reliability integrated circuits to reduce package thermal resistance and improve the reliability of chip welding through eutectic welding. The foundational characteristics of the domestic gold-tin solder was analyzed, the key parameters of friction eutectic welding for power chip were studied by manual method based on domestic gold-tin solder. The reliability of gold-tin solder of power chip in space application was verified. The results show the shear strength meets the requirements of administrator and remains stable after a series of rigorous thermodynamics tests in aerospace environment, which shows the high reliability of welding.

Key words Domestic solder, Power devices, Au80Sn20 Eutectic soldering, Application reliability

0 引言

随着单片微波集成电路技术与第三代半导体技术发展,星载固态功率放大器朝着高效率、小尺寸、轻量化的方向发展^[1-5]。雷达T/R组件的关键部件中用到大量功率器件,如GaAs/GaN大功率芯片。该类型功率芯片一般为宽禁带半导体芯片,其芯片尺寸较小、热流密度大,在工作中热耗高达30W。受产品空间尺寸限制与材料自身导热能力差的影响,为了将热量快速散发出去,防止芯片工作时开裂烧毁等失效,一般选择金属作为互联材料,将芯片安装在钨铜或铜金刚石等高导热载体上形成快速传热通道,降低工作温度,降低失效风险。

金锡(Au80Sn20)共晶合金焊料熔点为280℃,文献[1-3]中报道的热导率为57W/(m·K)。具有许多优秀的物理特性,如钎焊温度适中、导热性能好、无需助焊剂、良好润湿性、低黏滞性、钎焊强度高、抗氧化性能优良等,能够耐受热冲击、热疲劳。基于共晶特点,很小的过热度就可使焊料熔融并润湿器件。且该合金凝固过程也很快,可大大缩短整个焊接周期、避免芯片高温停留时间。对于后道选用导电胶粘接的产品,留有足够裕度的温度梯度,非常适合作为功率器件的焊接互联材料,在高可靠气密封装中应用广泛^[2-6]。

本文基于国产金锡焊料,对其关键特性化学成分、熔点、热导率进行分析,并采用手动方式进行功

收稿日期:2022-07-09

第一作者简介:冯晓晶,1992年出生,硕士,工程师,主要从事电子装联工艺方面相关工作。E-mail:fxj921223@163.com

率芯片摩擦共晶焊接工艺研究,对功率芯片金锡焊接宇航应用可靠性进行验证。

1 金锡焊料基础特性

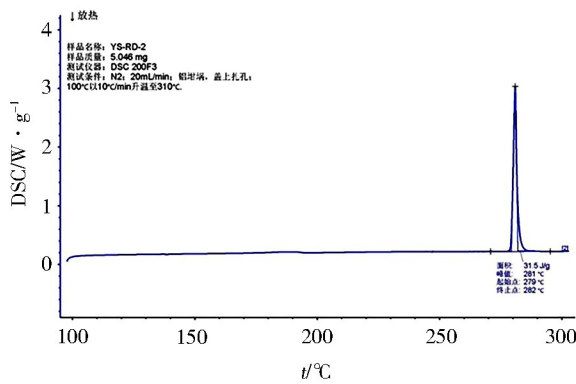
1.1 化学成分

化学成分是金锡焊料最重要的一个性能指标,杂质含量过高对焊料的抗氧化能力及焊接性能有着

表1 焊带化学成分检测结果

Tab. 1 The results of chemical composition of solder strip

元素	国产/(%) <i>w</i>			进口/(%) <i>w</i>
	批次1	批次2	批次3	
Au	79.88	79.62	79.52	79.81
Sn	20.11	20.37	20.47	20.18
Fe	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cu	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Pb	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Pd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Zn	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

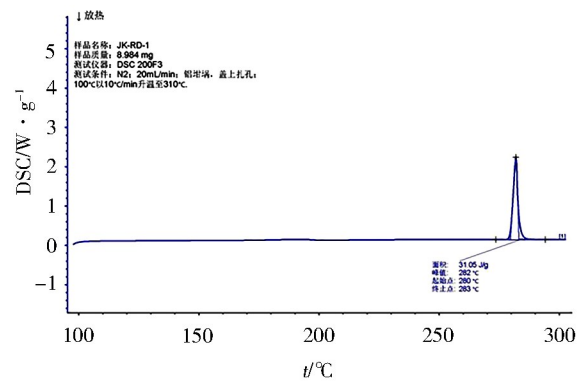


(a) 国产焊带

不利的影响^[7];金和锡比例偏差过大将导致焊料熔化温度大幅偏离标称值。利用元素分析仪、电感耦合等离子质谱仪,参照YS/T 1120—2016^[8]金锡焊料的化学成分进行检测,结果详见表1。结果显示3个批次化学成分中Sn元素含量为20.11%~20.47%,Au元素含量为79.52%~79.88%,杂质元素含量上限为0.0085%~0.0086%,符合相关标准“Sn: 20.0%±0.5%, Au: 80.0%±1%,其他杂质的总量不大于0.15%”的要求,国产与进口焊带各杂质元素含量均<0.001%。

1.2 熔点

金锡焊料熔点是金和锡原料配比的一个反映,熔点直接影响焊接工艺参数的选择。利用差式扫描量热仪,参照GB/T 1425—1996^[9]进行熔点检测,检测结果表明3个批次焊料熔点均为281°C,与文献[1-3]报道的相差不大。与进口焊料[图1(b)]的熔点相差1°C。在焊接过程中选择适当的焊接温度,可保证焊料熔化和润湿充分。



(b) 进口焊带

图1 不同焊带的DSC测试结果

Fig. 1 The results of DSC test for different solder strips

1.3 热导率

焊料在大功率器件焊接中不仅起连接作用,还起到优良的导热作用,热导率是很重要的一个性能指标。采用机械加工成 $\Phi 9.8 \text{ mm} \times \delta 2.2 \text{ mm}$ 的金锡测试样件,使用DSC参照ASTM E1269—2011^[10]方法进行25°C比热容试验,检测结果表明室温下焊料的比热容平均值为0.153 J/(g·K)。使用闪射法导热仪,参照GB/T 22588—2008^[11]进行热扩散系数检测,得到25°C下热扩散系数平均值为17.305 mm²/s。

根据公式 $\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho$ 计算,式中, λ 为热导率, a 为热扩散系数, c_p 为比热容, ρ 为密度。计算得到室温下焊料的热导率平均值为38.4 W/(m·K)。

2 功率芯片金锡焊接工艺

常见的功率芯片金锡焊接工艺主要包括手动摩擦共晶焊接、设备全自动摩擦共晶焊接、真空共晶焊

接。优缺点对比情况见表2。

手动摩擦焊接灵活性高、贴装设备全自动摩擦焊接位置精度高、真空共晶焊接更适合批量生产。

表2 三种共晶焊接技术的优缺点对比

Tab. 2 Comparison of advantages and disadvantages of three eutectic welding techniques

焊接方法	优点	缺点
手动摩擦共晶焊接	装置简单,操作方便,灵活性大、适用不同尺寸芯片	不能满足大批量生产,且易损伤器件,对人员技能要求高
全自动摩擦共晶焊接	焊接位置精度高,不损伤芯片	设备成本高,对物料一致性要求高,不适用复杂热沉组件
真空共晶焊接	焊接位置精度高,焊透率高,操作较简便,人员技能要求低,满足批量生产	焊接工装设计与加工要求高,存在多传热界面传热效率较低的问题

由于三种焊接方法选用的焊接载体和焊接界面均相同,焊接效果均满足要求,基于此,可靠性试验对其焊接质量的影响应相同,选用手动摩擦方式进行共晶焊接可靠性研究。

高质量的焊接可保证功率芯片良好的散热,其焊接效果评价包括焊接外观、孔洞率和剪切强度。基于国产焊料进行手动摩擦焊接工艺研究,外观要求为“焊料不能延伸或飞溅到芯片顶部表面,焊料溢出应大于贴装件周长的75%,焊料不能出现剥落、起皮、裂纹”;孔洞率要求为“总孔洞率不大于10%,单个空洞不大于3%”;剪切强度满足相关标准芯片剪切强度要求。

手动摩擦共晶焊接是传统的成熟焊接工艺。摩擦共晶焊接过程中,使芯片对载体做相对运动。一方面,摩擦使熔融焊料在载体表面润湿继而铺展,镀层中的金扩散至焊料中发生共晶反应,冷却后会形成互连接头;另一方面,摩擦使焊料受压沿着焊接面间隙往外作溢出运动,挤出气体的同时,也去除了接触面氧化物而实现低孔洞率焊接。根据手动摩擦的特点,主要控制的参数包括焊接温度、焊料量与摩擦次数。

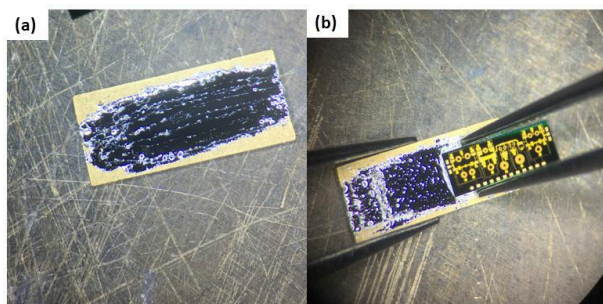


图2 手动摩擦焊接示意图

Fig. 2 The diagram of manual friction welding

GaAs基毫米波功率芯片最高耐受温度一般不超过320℃。设置不同的焊接温度进行焊接试验,结果见表3。

当热台温度设置在300~305℃,焊料熔融迅速、焊接效果良好。采用宽度为1.0mm、厚度为30μm

表3 焊接温度对焊接质量的影响

Tab. 3 The influence of welding temperature on quality

焊接热台温度/℃	焊料熔融及焊接效果
290	焊料熔融困难;焊料融化时间长、产生氧化物多
295	焊料熔融迅速;摩擦过程焊料易凝固,影响焊料与镀金面的扩散
300	焊料熔融迅速;芯片焊接效果良好
305	焊料熔融迅速;焊接过程中焊料氧化速度较300℃时高
310	温度过高,导致焊料易氧化;焊接后存在较多氧化孔洞

的焊片进行焊料量对焊接效果的影响实验,结果见表4。当焊料量铺展后面积为芯片面积80%时,可保证良好焊接效果。

表4 焊料量对焊接质量的影响结果

Tab. 4 The influence of solder quantity on welding quality

焊料量/% (占芯片面积百分比)	焊料熔融及焊接效果
30	焊料未铺满芯片焊接面;焊料量过少,焊接过程中摩擦芯片时芯片无法移动
50	焊料铺展和芯片焊接效果良好,孔洞率10%~20%
80	焊料铺展和芯片焊接效果良好,焊料氧化很少,孔洞率小于10%
110	焊料易氧化,芯片焊接氧化物多,空洞大于20%,焊料易上芯片

同时,通过反复试验,焊接摩擦次数为8~10次,在摩擦过程中可确保焊接面光亮平整、有利于实现低孔洞率的焊接质量。当摩擦次数超过10次时,孔洞率几乎保持不变,且由于焊接摩擦次数增加,焊接过程中氧化物增多,不利于实现低孔洞率。

3 宇航可靠性验证

3.1 可靠性试验设计

对尺寸规格为3.5mm×4.0mm×0.08mm的GaAs芯片分别与4.6mm×3.7mm×0.25mm可伐热沉、4.6mm×4.0mm×0.25mm钨铜热沉、4.7mm×3.7mm×0.30mm铜金刚石热沉,采用手工摩擦方式、使用国产金锡焊料进行热耗18W芯片样件制作[图3(a)],热沉组件粘接在硅铝管壳[图3(b)]便于进行后续可靠性试验。其中,芯片选用背金砷化镓芯片;对器件(包括载体、热沉)表面镀Ni-Au, Ni层厚度2.5~5.0μm, Au层厚度1.3~4.0μm。

3.2 可靠性试验结果

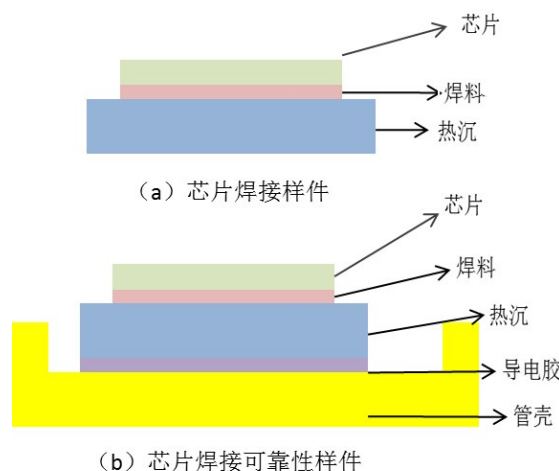


图3 样件制作示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the samples

从图4焊接样件外观看,表5的环境试验前后焊接件外观均符合检验规范要求。3种样件的X光检测结果见图5,不同样件总体孔洞率最大值仅为1.5%,满足小于10%、单个孔洞小于3%的要求。

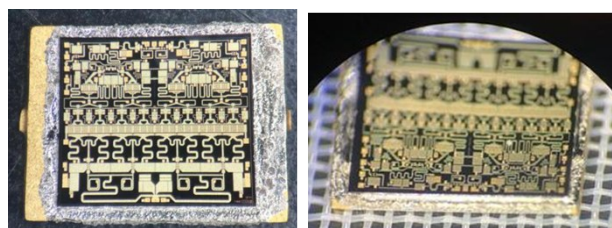


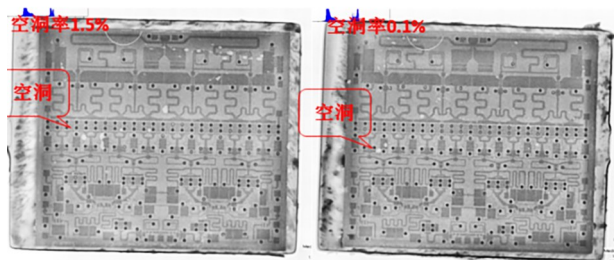
图4 焊接样件

Fig. 4 The results of the welding specimen

表5 可靠性环境试验

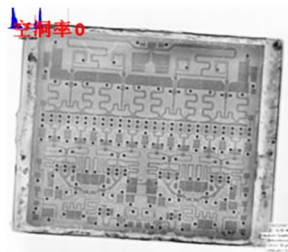
Tab. 5 Reliability environment test

试验项目	试验条件
温度循环	-65~150 °C, 温度转换1 min, 极值保持30 min, 循环110次
恒定加速度	$4.9 \times 10^4 \text{ m/s}^2$, y方向, 1 min
力学振动	正弦振动最小量级保持时间4~200 Hz一个循环; 随机振动每轴向保持5 min, 3个方向
热冲击	-65~150 °C, 温度转换<10 s, 循环次数不小于15次



(a) 芯片-可伐

(b) 芯片-钨铜



(c) 芯片-铜金刚石

图5 不同组合样件的孔洞率检测结果

Fig. 5 The hole rate results of various welding samples

采用Dage4000Pluse进行剪切强度测试,采用X光机进行孔洞率检测。环境试验见表6,按顺序依次进行环境试验。从表6剪切力测试结果看出,可靠性试验后焊接件剪切强度均满足规范要求,焊接件在剪切时失效模式均为芯片被推碎、芯片残留面积均大于50%,芯片-可伐焊接件剪切最小力为42.04 N、平均为58.21 N;芯片-钨铜焊接件剪切最小力为64.48 N、平均为75.4 N;芯片-铜金刚石焊接件剪切

最小力为71.74 N、平均为93.84 N,满足相关标准要求。

表6 环境试验后焊接样件剪切强度¹⁾

Tab. 6 The shear strength of the welding specimen after the environmental tests¹⁾

样件编号	剪切强度/N	
芯片-可伐	1	44.59
	2	58.60
	3	77.32
	4	68.50
	5	42.04
芯片-钨铜	1	73.21
	2	84.57
	3	64.48
	4	72.42
	5	82.52
芯片-铜金刚石	1	91.80
	2	90.26
	3	112.20
	4	71.74
	5	103.19

注:1)失效模式均为芯片被推碎,芯片残留面积大于50%。

不同组合随机选择一个样件进行制样,并进行电镜扫描,典型结果见图6。对比文献[7]中报道的,所检焊点除微小孔洞外,焊料状态及合金层形态无异常。进一步表明Au80Sn20焊料在母材表面的润湿性良好,保证了高质量焊接。对合金层厚度进行测量,不同样件芯片侧的IMC(即金属间化合物)厚度不明显,热沉侧IMC在0.29~1.26 μm,说明芯片和热沉之间通过金锡焊料形成有效的合金层。

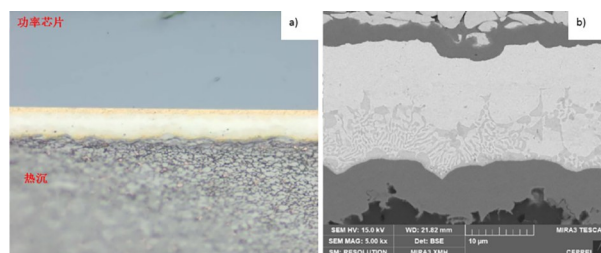


图6 样件的SEM结果

Fig. 6 The SEM results of the specimen

4 结论

(1)国产金锡焊带化学成分中Sn元素含量为20.11%~20.47%,Au元素含量为79.52%~79.88%,符合相关标准的指标要求。3个批次焊料熔点均为281 °C,与进口相差不大。室温下焊料热导率平均值为38.4 W/(m·K)。

(2)基于国产焊料、采用手动摩擦方式进行共晶焊接工艺研究,得到关键影响参数:焊接温度设300~305 °C、焊料焊料量铺展后面积为芯片面积80%、焊接摩擦次数为8~10次。

(3)功率器件金锡摩擦焊接后,总孔洞率小于10.0%、单个孔洞率小于3.0%。经历一系列严苛的环境热力学试验,剪切强度满足要求,SEM结果显示焊接界面为典型的金锡焊接结果、焊点无异常。

参考文献

- [1] 梁佩,魏斌,黄益军. GaAs 功率芯片微组装关键技术研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2021,39(2):69-71.
- LIANG P, WEI B, HUANG Y J. Study on the key technology of GaAs power chip micro assembly [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(2): 69-71.
- [2] 冯晓晶,夏维娟,孙鹏,等. 微波芯片 Au80Sn20 全自动共晶焊接工艺技术研究[J]. 电子工艺技术,2020,41(6):346-349.
- FENG X J, XIA W J, SUN P, et al. Fully automatic Au80Sn20 eutectic soldering process for microwave chip [J]. 2020,41(6):346-349.
- [3] 任卫朋,刘凯,罗燕,等. GaAs 功率芯片 AuSn20 共晶焊接技术研究[J]. 科技创新与应用,2019,25:106-113.
- REN W P, LIU K, LUO Y, et al. Au80Sn20 eutectic soldering process for GaAs power chip[J]. Technology Innovation and Application, 2019, 25: 106-113.
- [4] 高逸晖,陈帅,赵文忠. 功率芯片共晶阵列化工装设计方法[J]. 电子工艺技术,2021,42(3):166-169.
- GAO Y H, CHEN S, ZHAO W Z. Array fixture design technology for power chip vacuum eutectic soldering [J]. Electronics Process Technology, 2021, 42(3): 166-169.
- [5] 陈家平,夏维娟,周虹,等. 浅议多芯片焊接工装设计[J]. 空间电子信息技术,2019(4):22-26.
- CHEN J P, XIA W J, ZHOU H, et al. More than extraction chip welding equipment design[J]. Space Electronic Technology, 2019(4):22-26.
- [6] 吴娜,胡永芳,严伟,等. 微波 GaAs 功率芯片 AuSn 共晶焊接微观组织结构研究[J]. 电子机械工程,2016. 32(4):50-53.
- WU N, HU Y F, YAN W, et al. Microstructure characterization analysis of eutectic brazed micro-wave GaAs power chip using AuSn filler metal [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(4): 50
- [7] GUAN Z M. Kinetics of interface reaction in 40Sn - Bi/Cu and 40Sn-Bi-2Ag/Cu systems during aging in solid state[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000, 23 (4) : 737-742.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. YS/T 1120—2016 第1部分:金量的测定火试金重量[S]. 北京:中国标准出版社,2017:1-4.
- Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. YS/T 1120-2016 Part 1: Determination of gold content Fire test Gold Weight[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-4.
- [9] 中国有色金属工业协会. GB/T 1423—1996 贵金属及其合金密度的测试方法[S]. 北京:中国标准出版社,1997:1-12.
- China Non-Ferrous Metal Industry Association. GB/T 1423—1996 Test Method for Density of Precious Metals and Their Alloys[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997: 1-12.
- [10] 美国材料与试验协会. ASTM E1269-11 用差式扫描量热法测定比热容量的标准试验方法[S]. 美国:2011.
- Ameriacn Society for Materials Testing. ASTM E1269-11 Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry[S]. America, 2011.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22588—2008 闪光法测量扩散系数或导热系数[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-10.
- Standardization Administration of China. GB/T 22588-2008 Maessurement of diffusion coefficent or thermal conductivity by flash method[S]. Beijing:Standards Press of China, 2008:1-10.