

文章编号: 1672-8785(2025)03-0008-08

红外探测器杜瓦窗口钎焊工艺优化

李云龙¹ 沈星^{2*} 吴丰顺¹ 周龙早¹ 宋立志² 洪晓麦²

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉高德红外股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘要: 杜瓦窗口是红外探测器的核心部件之一, 其焊接质量对探测器的真空维持时长以及长期运行的稳定性具有决定性影响。本试验通过引入两种预成型焊料环进行真空钎焊, 替代传统的手工 SAC305 焊膏软钎焊工艺, 并对杜瓦窗口的外观质量、气密性能、空洞率以及焊接强度进行了研究。试验结果表明, 当使用具有中间层 Ni 骨架结构的 SnAgCu 复合焊料环进行真空钎焊时, 杜瓦窗口漏率可以达到小于 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的高气密性要求, 空洞率可降低至 1%。对杜瓦窗口进行了抗拉强度测试。结果表明, 当工艺参数为 250 °C、5 min、0.32 MPa 时, 抗拉强度达到最大值 66.73 MPa; 与传统手工 SAC305 焊膏软钎焊接头相比, 增加了 10.19%。同时, 该方法可以改善工艺的一致性, 大幅提升生产效率, 对杜瓦窗口量产工艺具有一定的指导意义。

关键词: 杜瓦窗口; 焊接空洞; 工艺优化

中图分类号: TN305 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.002

Optimization of Brazing Process for Dewar Windows in Infrared Detectors

LI Yun-long¹, SHEN Xing^{2*}, WU Feng-shun¹, ZHOU Long-zao¹, SONG Li-zhi², HONG Xiao-mai²

(1. School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: Dewar window is one of the core components of infrared detectors. Its welding quality has a decisive influence on the vacuum maintenance time and long-term operation stability of the detector. In this experiment, two preformed solder rings are introduced for vacuum brazing to replace the traditional manual SAC305 solder paste soft soldering process, and the appearance quality, airtightness, void rate and welding strength of the dewar window are studied. The experimental results show that when the SnAgCu composite solder ring with an intermediate layer of Ni skeleton structure is used for vacuum brazing, the leakage rate of the dewar window can reach a high airtightness requirement of less than $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, and the void rate can be reduced to 1%. The tensile strength of the dewar window is tested. The results show that when the process parameters are 250 °C, 5 min, and 0.32 MPa, the tensile strength reaches a maximum value of 66.73 MPa; compared with the traditional manual SAC305 solder paste soft soldering joint, it increases by 10.19%. At the

收稿日期: 2024-11-12

作者简介: 李云龙(2000-), 男, 安徽肥东人, 硕士研究生, 主要研究方向为红外探测器组件封装工艺及可靠性。

*通讯作者: E-mail: xingshen1987@163.com

same time, this method can improve the consistency of the process and greatly improve the production efficiency, which has a certain guiding significance for the mass production process of the dewar windows.

Key words: dewar window; solder void; process optimization

0 引言

作为红外探测器的外壳部件之一, 杜瓦窗口不仅起到了重要的机械防护和环境隔离作用, 而且还是探测器必不可少的光学信号传输通道。硅窗片与可伐窗座之间的封接是探测器低漏率、高气密性的前提。此部分的封接质量直接影响探测器的真空寿命和长期可靠性^[1-2]。

作为电子封装领域广泛采用的焊料之一, SAC305 (Sn3.0Ag0.5Cu) 无铅焊料被认为是锡铅焊料的理想替代品。该焊料不仅展现出卓越的综合性能, 而且其可靠性也得到了充分验证^[3-4]。鉴于 Sn 基焊料的低熔点特性, 它能够满足窗片表面增透膜耐受温度的要求; 与 AuSn 焊料相比, 其成本十分低廉。因此, 在窗片焊接过程中, SAC305 焊料成为首选材料。

焊接空洞是焊接过程中普遍存在的一种缺陷。它的存在对产品的电气性能、热性能和机械性能等产生了显著的负面影响。随着产品服役时间的延长, 焊接空洞逐渐成为器件漏气、芯片裂片的主要原因之一^[5-6]。对于具有气密性要求的器件, 焊接空洞的存在可能会导致真空度降低、真空失效, 严重影响产品的可靠性。因此, 焊接空洞成为窗口焊接工艺中的重点研究对象。焊接空洞的形成原因主要包括助焊剂中有机气体在挥发过程中未能从熔融焊料中有效排出、焊料与母材表面未能完全润湿以及不同元素之间的扩散速率存在差异(产生柯肯达尔空洞)^[4]。目前, 降低焊点空洞率主要有两种方式: 一是通过真空焊接设备抽真空产生负压环境, 促进焊接过程中的气泡及时排出; 二是通过外加焊接压力, 促进助焊剂中挥发的有机气体排出, 并增加焊料的铺展面积。

施加的较大焊接压力会使焊料流动至焊接区域以外, 产生多余物。该现象被称为焊料溢

出。当焊料溢出至窗片表面时, 严重影响光学信号的传输, 也会导致粒子碰撞噪声检测 (Particle Impact Noise Detection, PINN) 失效, 进而对器件的可靠性造成严重影响^[7]。因此, 焊料溢出现象也成为评判窗片焊接工艺质量的重要标准之一。

采用预涂覆助焊剂的 SAC305 合金焊料和具有中间层 Ni 骨架结构的 SnAgCu 复合焊料进行窗口焊接, 研究不同工艺参数对窗口焊接质量和性能的影响, 从而确定最佳工艺参数组合。本文旨在开发一种适用于红外探测器杜瓦窗口的新焊接工艺, 改善焊接一致性, 提高生产效率。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本试验采用武汉高芯科技股份有限公司生产的某型号探测器杜瓦窗座和窗片。如图 1 所示, 窗座材料为可伐合金, 表面镀镍; 窗片材料为硅, 表面镀有 Cr/Ni/Au 金属化层。通过钎焊工艺实现可伐合金与硅窗片之间的高气密性连接。使用的焊接材料为 SAC305 焊膏、预涂覆 SAC305 焊环和 Ni 骨架 SnAgCu 焊环。

预涂覆焊环是指在焊片加工过程中, 将助焊剂均匀涂覆在预成型焊片表面并烘干, 得到一种低残留、高钎透率焊接材料。该材料常用

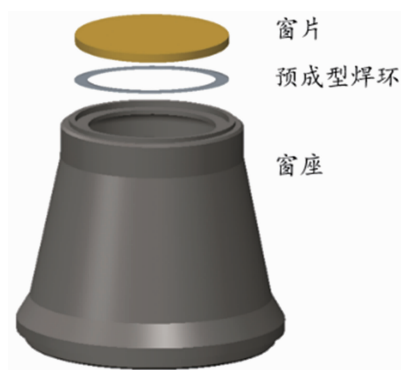


图 1 杜瓦窗口的结构图

于表面贴装技术(Surface Mount Technology, SMT)和插件焊接等工艺,可大大提高钎焊封装效率^[8]。

Ni 骨架 SnAgCu 复合焊料环是以 Ni 网作为中间层,通过真空负压浸渗工艺将 SAC305 合金焊料填充到 Ni 骨架当中制备得到,最后通过轧制和冲裁工艺制成厚度为 90 μm 、外径为 18.1 mm、内径为 15.1 mm 的焊料环^[9]。图 2 所示为 Ni 骨架 SnAgCu 复合焊料的显微形貌:中间层的黑色区域为网状的金属 Ni,白色区域为 SAC305 合金焊料。

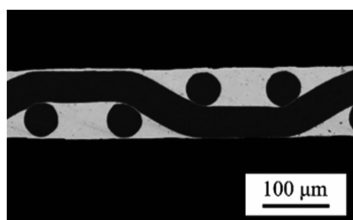


图 2 Ni 骨架 SnAgCu 复合焊料的显微形貌

1.2 试验方法

传统的 SAC305 焊膏软钎焊工艺是通过手工涂覆焊膏后加热到一定温度进行回流焊接,冷却后对窗口进行清洗并完成漏率、倾斜度、透过率等性能测试。

预涂覆 SAC305 焊环焊接试验和 Ni 骨架 SnAgCu 焊环焊接试验在真空共晶炉中进行,回流工艺曲线如图 3 所示。

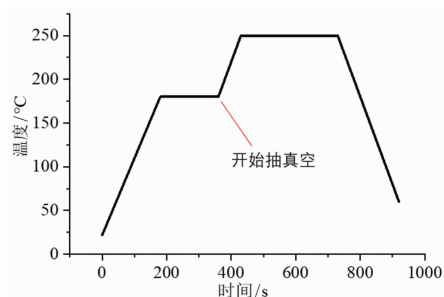


图 3 回流工艺曲线

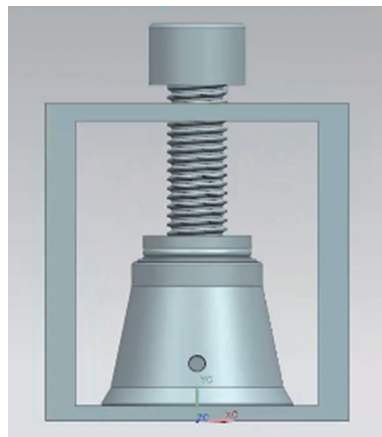


图 4 工装夹具

使用预涂覆 SAC305 焊环焊接窗口时,将窗片、预涂覆焊环和窗座清洗后,如图 1 所示叠放,放入真空共晶炉中按照设定程序进行焊接。使用 Ni 骨架 SnAgCu 焊料环焊接窗口时,基于图 4 所示的工装夹具,通过扭力扳手定量施加焊接压力。焊接过程中炉内的真空度小于 30 Pa,冷却过程采用水板冷却,冷却速率为 1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。冷却结束后取出窗口,通过氦质谱检漏仪进行漏率检测,利用 X 射线检测设备观察窗口焊接空洞,并用万能试验机对窗口进行抗拉强度测试。

为了确定最优工艺参数组合,使用 Ni 骨架 SnAgCu 焊环对窗口进行正交试验(见表 1)。探究多因素对抗拉强度的影响,并观察窗口断面形貌,分析界面结合情况。

2 结果与讨论

2.1 传统 SAC305 焊膏软钎焊工艺

传统 SAC305 焊膏软钎焊工艺的窗口结果如图 5 所示,漏率满足小于 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的高气密性要求。X 射线检测结果表明,有少量空洞存在,但是对操作人员的技术要求较高,而且窗口内壁有助焊剂残留,需要及时清

表 1 基于 Ni 骨架 SnAgCu 焊环的窗口焊接正交试验设计

水平	因素		
	焊接温度/ $^{\circ}\text{C}$	焊接时间/ min	焊接压力/ MPa
1	240	5	0.24
2	250	10	0.32
3	260	15	0.40

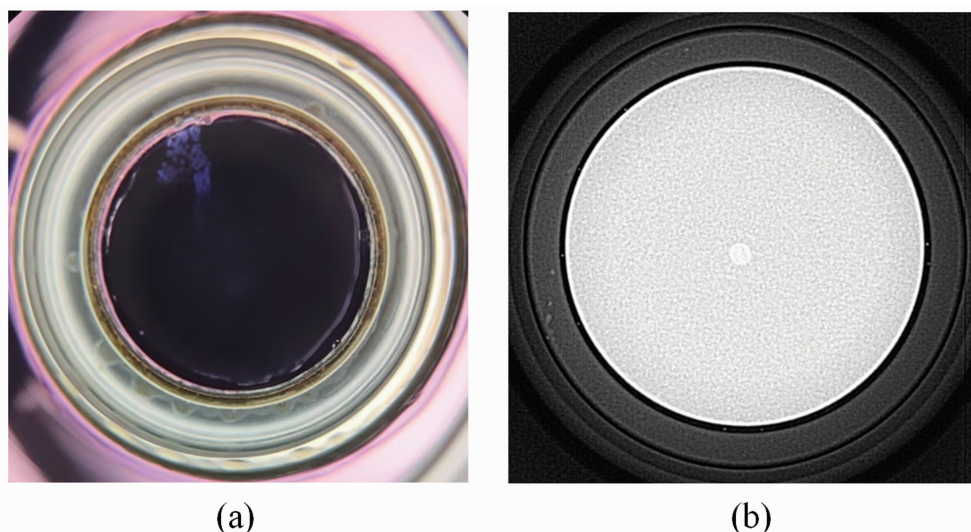


图 5 传统 SAC305 焊膏软钎焊工艺的结果图: (a)焊后窗口内壁外观; (b)X 射线检测照片

洗,增加了生产工序,降低了生产效率。因此,亟需一种新的焊接工艺,在保证焊接质量的同时,提高产品的一致性和生产效率。

2.2 预涂覆 SAC305 焊环焊接工艺

在杜瓦窗口焊接工艺中,由于焊环表面涂覆的助焊剂成分在高温下分解,且与焊盘表面的氧化物作用后形成的气体无法及时排出,在接头中形成焊接空洞,导致接头的焊接质量下降。在真空共晶焊接过程中,真空度、焊接温度、压力、助焊剂或者其他变量发生变化,均会对焊点空洞率造成影响^[10]。

2.2.1 真空度对焊接空洞的影响

假设助焊剂受热分解后挥发产生的气体为理想气体,抽真空之前气泡温度为 T_1 ,共晶炉内气压为 P_1 (与气泡压强一致),气泡的体积为 V_1 。短时间抽真空之后气体温度为 T_2 ,共晶炉内气压降至 P_2 ,此时气泡的体积为 V_2 ,则

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} \cdot V_1 \quad (2)$$

由式(2)可知,抽真空时,温度变化忽略不计, P_1 会迅速降低至 P_2 ,内部的气泡体积会迅速增大并排出^[11]。

在不同真空度条件下,由于共晶炉腔内气压与焊接气泡内部气压存在压力差,随着真空

度降低,压力差逐渐增大,气泡向外部排出的作用力增大。当真空共晶炉腔内气压为 1×10^5 Pa 时,窗口 X 射线照片如图 6 所示。使用 ImageJ 软件对图像进行处理,根据空洞所占像素点与焊接面所占像素点的比值进行计算,得到焊点空洞率为 35.2%;当真空度降低至 1×10^2 Pa 时,焊点空洞率降为 5.1%。由此可见,通过抽真空产生的负压作用可以有效地降低焊接空洞率。

2.2.2 焊接压力对焊接空洞的影响

在窗口焊接过程中,对窗片施加向下的作用力。当焊料熔化后,窗片向下运动,可以使液态焊料和内部的气泡产生水平方向的运动,影响气泡在液态焊料中的运动行为,进而影响焊料层的空洞率、空洞大小和分布^[12]。

图 7 为在窗片自重和 4 gf 垂直压力下窗口焊接后的 X 射线图像。将图像按焊接区域等宽分为 A、B、C 三个区域。可以看出,气泡主要集中在焊接中心区域 B 中,形成一种环状空洞^[7]。对于这种环状空洞的形成机理,目前有两种猜测:一是由于焊料在降温阶段存在温度梯度,焊料 A 区域和 C 区域优先结晶凝固,焊料的润湿平衡被打破,空洞在 B 区域长大。二是气泡在压力作用下逐渐合并长大,位于焊料层边缘处的气泡在水平方向的运动作用下更容易从焊料中逸出。气泡逸出后,焊料在压力

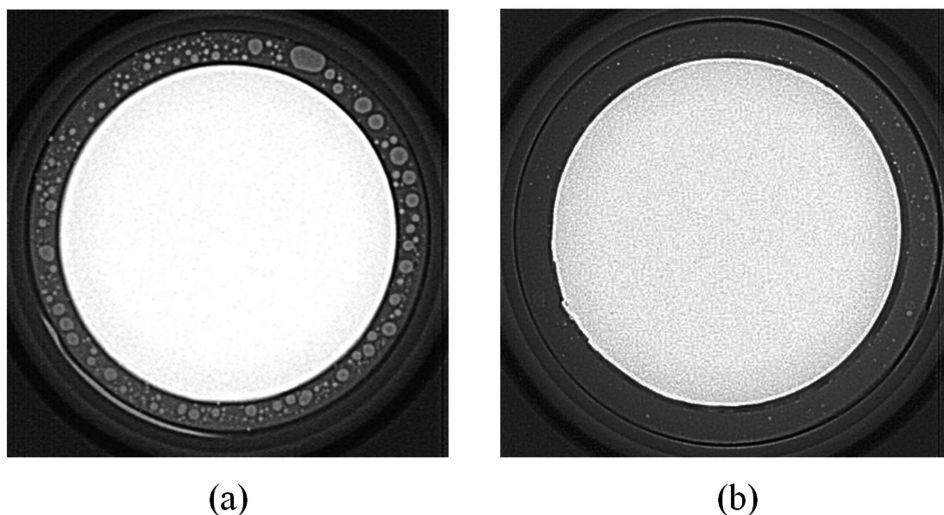


图 6 预涂覆 SAC305 焊环在不同真空度下焊接窗口的 X 射线图像：(a) 100000 Pa；(b) 100 Pa



图 7 预涂覆 SAC305 焊环在 4 gf 焊接压力下的窗口 X 射线图像

作用下会填充该区域，以避免窗片局部塌陷，使得倾斜度增大^[12]。但随着垂直压力的增大，对比 16 gf 和 20 gf 垂直压力下窗口焊接后的 X 射线图像，可以看出，焊点中心区域的气泡仍然难以逸出，焊点的空洞率变化不明显，而且当垂直压力增大到 20 gf 这个阈值时，液态焊料会被挤出焊接区域。如图 8(b) 中的区域 D 所示，产生焊料内溢现象，影响产品的可靠性。

2.2.3 焊料用量对焊接空洞的影响

由于杜瓦窗口结构的特殊性，使用焊膏进行窗口手工焊接时，难以精准控制其用量，工艺的一致性有待改善。当使用焊片进行窗口焊

接时，可以通过控制焊片的厚度和形状尺寸来精准控制焊料用量，工艺一致性大大提高。图 9 所示为采用厚度为 0.05 mm、0.1 mm 和 0.2 mm 的预涂覆焊料环进行试验的 X 射线结果。空洞率如表 2 所示。由图 9(a) 可以看出，当焊料用量不足时，焊料层中会出现大面积的贯穿型空洞；焊接时气泡运动所受阻力增大，难以逸出，而且在焊料边缘处会出现严重的焊料缺失，无法铺展完全，焊接面积减小，焊接质量下降。对于厚度为 0.2 mm 的焊片，焊料铺展均匀，几乎不存在边缘空洞，而且焊接空洞的形状尺寸较小，多为圆形或椭圆形空洞，焊后空洞率为 4.2%。

表 2 使用不同厚度预涂覆 SAC305 焊环焊接窗口的空洞率

焊环厚度	0.05 mm	0.1 mm	0.2 mm
空洞率	32.2%	11.5%	4.2%

2.3 Ni 骨架 SnAgCu 焊环焊接工艺

由图 8(b) 可以看出，当使用 SAC305 焊环进行焊接、压力载荷超过 20 gf 时，液态焊料会被挤到焊接区域之外，对产品可靠性造成影响。因此，使用一种具有 Ni 骨架中间层的 SnAgCu 焊环进行窗口焊接。如图 10(a) 所示，中间层的黑色区域为网状的金属 Ni 骨架，灰色区域为 SnAgCu 合金焊料。焊后窗口内壁不会出现焊料溢出。这是因为该骨架结构对焊缝

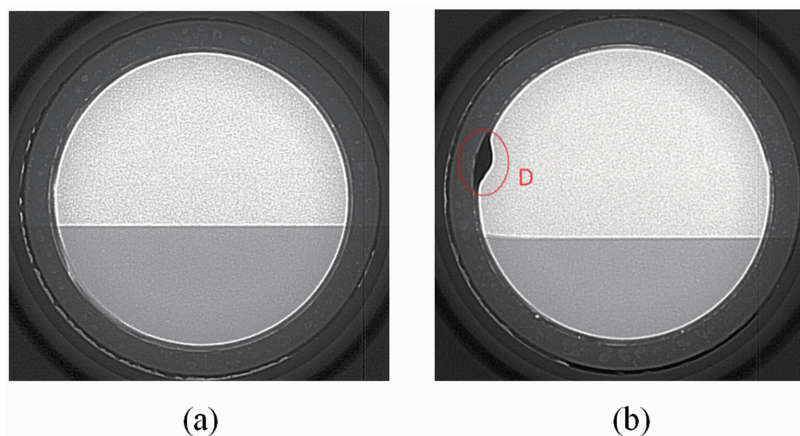


图 8 预涂覆 SAC305 焊环在不同压力载荷下的窗口 X 射线图像: (a) 16 gf; (b) 20 gf

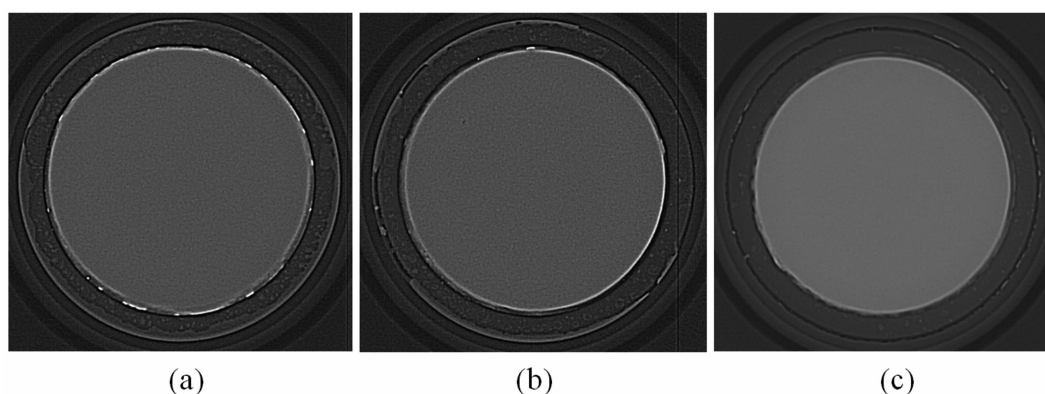


图 9 使用不同厚度预涂覆 SAC305 焊环焊接窗口的 X 射线图像: (a) 0.05 mm; (b) 0.1 mm; (c) 0.2 mm

起支撑作用, 在压力载荷下也可以精准控制焊缝高度, 液态焊料不会被挤出焊接区域。焊后窗口漏率满足小于 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的要求, X 射线照片如图 10(b) 所示。在螺栓加压和真空共晶炉负压的共同作用下, 焊接空洞率小于 1%。分析其主要原因如下: 随着真空共晶炉加热, 温度升高, 当达到助焊剂受热分解反应的温度时会产生一定的气体; 由于该工装通过螺栓加压, 对窗片施加了约 0.3 MPa 的压力, 导致气体会及时排出; 此时温度还未达到焊料的熔点, 气体不会进入到熔融的焊料中, 不会在焊后产生焊接空洞。

为了确定最优焊接工艺参数, 使用 Ni 骨架 SnAgCu 焊料进行三因素三水平正交试验 (结果见表 3)。可以看出, 最大抗拉强度为 66.73 MPa。对正交试验进行极差分析。表 4 中, $k_i (i=1, 2, 3)$ 为 3 组水平 i 的抗拉强度平均值, 极差为 k_i 的最大值与最小值之差。根

据三项工艺的极差可知, 在该工艺区间内, 焊接温度的影响 > 焊接压力的影响 > 焊接时间的影响。由 k_i 值的对比可得出, 最优焊接温度为 250 °C, 焊接时间为 5 min, 焊接压力为 0.32 MPa。

图 11(a)~图 11(c) 分别为 L1、L4、L5 三组抗拉强度测试后的断口显微形貌图。如图 11(a) 所示, 当温度为 240 °C 时, 温度较低, 界面反应不充分, 窗口断面发生在焊料与硅片的界面处; 随着温度升高, 保温时间延长, 界面充分结合后, 断面发生在硅片内部, 抗拉强度由 29.02 MPa 提高到 49.58 MPa; 随着保温时间的继续延长, 界面金属间化合物 (Intermetallic Compound, IMC) 厚度增大, 接头强度降低, 窗口断面区域为硅片内部以及焊料与硅片界面处共同存在, 此时接头抗拉强度降至 28.23 MPa。

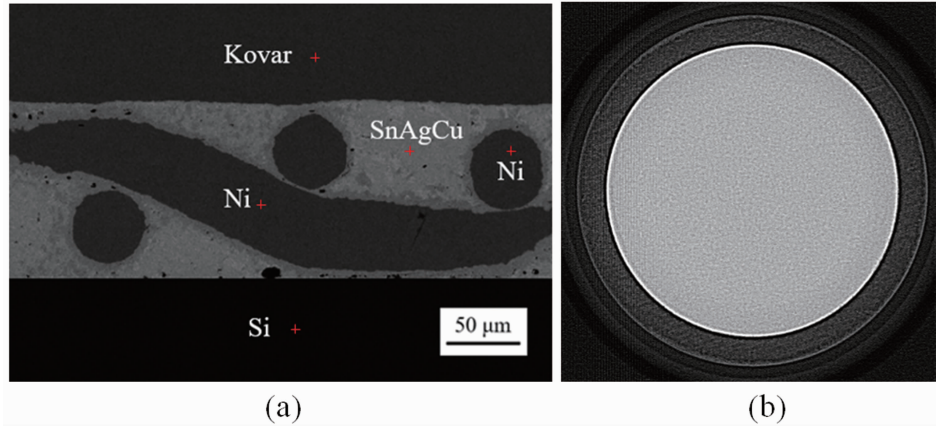


图 10 Ni 骨架 SnAgCu 焊环焊接工艺的结果图：(a)接头显微形貌图；(b)焊后 X 射线检测照片

表 3 Ni 骨架 SnAgCu 焊环窗口焊接正交试验结果

组号	焊接温度	焊接时间	焊接压力	抗拉强度
L1	1 (240 °C)	1 (5 min)	1 (0.24 MPa)	29.02 MPa
L2	1	2 (10 min)	2 (0.32 MPa)	19.06 MPa
L3	1	3 (15 min)	3 (0.40 MPa)	9.44 MPa
L4	2 (250 °C)	1	2	66.73 MPa
L5	2	2	3	49.58 MPa
L6	2	3	1	38.23 MPa
L7	3 (260 °C)	1	3	40.19 MPa
L8	3	2	1	59.02 MPa
L9	3	3	2	55.07 MPa

表 4 Ni 骨架 SnAgCu 焊环窗口焊接正交试验极差分析

极差分析数据	焊接温度列平均抗拉强度	焊接时间列平均抗拉强度	焊接压力列平均抗拉强度
k_1/N	19.18 MPa	45.31 MPa	42.08 MPa
k_2/N	51.51 MPa	42.56 MPa	46.96 MPa
k_3/N	51.43 MPa	34.25 MPa	33.07 MPa
极差/N	32.33 MPa	11.06 MPa	13.89 MPa
主次顺序	温度 > 压力 > 时间		
优水平	2 (250 °C)	1 (5 min)	2 (0.32 MPa)
优组合	250 °C / 5 min / 0.32 MPa		

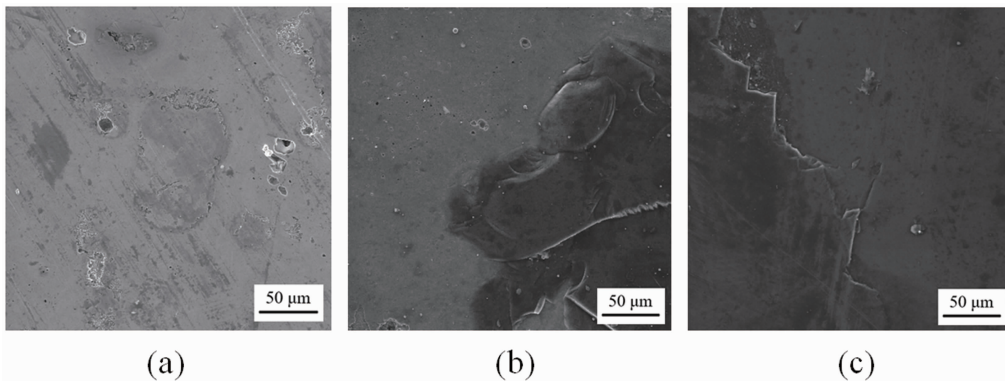


图 11 断口形貌：(a) L1 组；(b) L4 组；(c) L5 组

3 结束语

本文采用两种新型焊料环进行杜瓦窗口焊接, 以替代传统手工焊膏焊接工艺。结果表明, 当使用预涂覆助焊剂 SAC305 焊料环、真空度为 100 Pa、焊料环厚度为 0.2 mm 时, 窗口焊接空洞率可以降至 4.2%, 实现了窗口漏率小于 1×10^{-12} Pa·m³/s 的低漏率高气密性要求。当使用具有中间层 Ni 骨架结构的 SnAgCu 焊料环时, 在 0.32 MPa 的焊接压力下进行焊接, 窗口焊接空洞率可以降低至 1%。通过正交试验确定, 在 250 °C、5 min、0.32 MPa 的工艺参数下, 接头抗拉强度最大值达到 66.73 Mpa; 与传统手工 SAC305 焊膏软钎焊接头相比, 增加了 10.19%。同时, 该方法可以改善工艺一致性问题, 大幅提高生产效率, 对杜瓦窗口量产工艺具有一定的指导意义。此外, 使用具有中间层 Ni 骨架结构的 SnAgCu 焊料环进行窗口焊接时, 可以考虑对焊料中锡与镍的比例进行调控, 以实现更高的焊接质量。

参考文献

- [1] 黄立. 制冷红外焦平面探测器技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.
- [2] 仰叶, 朱魁章, 刘婷, 等. 红外探测器封装技术 [J]. 低温与超导, 2010, 38(12): 4-8.
- [3] 陶业卿. 保护气氛回流 SAC305 无铅焊点的可焊性与温度循环可靠性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [4] 沈练, 陈正超, 任海, 等. 光学窗口真空钎焊技术研究现状 [J]. 红外技术, 2023, 45(8): 808-813.
- [5] Katsis D C, VanWyk J D. Thermal, Mechanical, and Electrical Study of Voiding in the Solder Die-attach of Power MOSFETs [J]. *Transactions on Components and Packaging on Technologies*, 2006, 29(1): 127-136.
- [6] Lin W C. The Void-free Reflow Soldering of BGA With Vacuum [C]. Hefei: 8th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2007.
- [7] 肖汉武, 陈婷, 颜炎洪, 等. 金锡合金熔封中的焊料内溢控制 [J]. 电子与封装, 2023, 23(5): 17-23.
- [8] 王禾, 潘旷, 钟海锋, 等. 新型预涂覆焊片封装工艺的研究 [J]. 电子工艺技术, 2020, 41(1): 48-51.
- [9] 宋立志, 李佳琪, 徐幸, 等. Sn 基活性焊料低温钎焊 5A06 Al 合金接头的组织及力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2024, 53(21): 73-77.
- [10] Xu P, Wang B, Wang Y, et al. Analysis of Void Formation Mechanism in the Vacuum Reflow Soldering Process of Semiconductor Laser Diode [J]. *TechRxiv*, 2021, 14528163: 10.36227/techrxiv.14528163.v1.
- [11] 杨亮亮, 陈容, 秦文龙, 等. 功率 IC 芯片真空回流焊工艺缺陷研究 [J]. 微电子学, 2019, 49(4): 574-577.
- [12] 王铮铎. 功率芯片互连空洞的形成机理及其对互连可靠性的影响 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.