

文章编号: 1003-1480 (2021) 03-0008-04

半导体桥点火器芯片引线键合技术研究

宋婧, 麻翠

(北京空间机电研究所, 北京, 100094)

摘要: 为确保半导体桥点火器芯片引线键合质量, 以引线键合工艺技术研究为出发点, 分析了影响芯片引线键合质量的关键因素。通过正交试验设计、破坏性拉力测试以及显微镜目测相结合的检测方法, 研究了超声功率、键合压力与超声时间对半导体桥点火器引线键合强度的影响。研究表明键合最优工艺参数为超声功率 0.35W、键合压力 0.30N、超声时间 30ms, 经试验验证该工艺方法可靠。

关键词: 半导体桥; 键合强度; 正交试验; 工艺参数

中图分类号: TJ45⁺4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.03.003

Study on Chip Lead Bonding Technology of Semiconductor Bridge Igniter

SONG Jing, MA Cui

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing, 100094)

Abstract: To ensure the best bonding quality between semiconductor bridge chip and pole pin, based on the wire bonding technology research, the key influence factors of bonding quality were analyzed. Through the orthogonal test design, the combination of destructive tensile test and microscopic visual methods, the effects of ultrasonic power, bonding pressure and ultrasonic time on the igniter bonding strength were studied. The study shows that the optimal process parameters are ultrasonic power of 0.35W, bonding pressure of 0.30N and ultrasonic time of 30ms. The bonding verification tests indicate that the process is reliable.

Key words: Semiconductor bridge; Bonding strength; Orthogonal test; Process parameter

半导体桥 (Semiconductor Bridge, 简称 SCB) 火工品是利用微电子制造技术, 以芯片上重掺杂多晶硅桥 (SCB) 作为点火起爆单元的一类新型火工品。它具有发火能量低、安全电流高、作用时间短、可靠性高等优异性能, 能够满足火工品小型化、智能化和数字化的发展要求, 是高新技术火工品的重要发展方向^[1-2]。

半导体桥点火器的典型封装形式为陶瓷封装, 先将芯片用环氧树脂粘接在陶瓷塞上脚线间的凹槽内, 然后用超声波将金属的连接脚线焊接在芯片的焊

接区上^[3]。其中芯片引线超声键合是半导体桥点火器封装过程中的关键技术, 用于实现芯片与电极针之间的电气连接。引线键合作为当今最主要的微电子互联技术, 以其工艺成熟、通用性强和成本低等优点, 在电子封装领域得到广泛应用。

由于芯片引线键合质量的优劣决定着半导体桥点火器发火的可靠性, 本文开展引线键合工艺技术研究, 分析影响引线键合的关键因素, 并通过正交试验设计、破坏性拉力测试及显微镜目测相结合的检测方法, 研究超声功率、键合压力与超声时间对引线

收稿日期: 2021-02-22

作者简介: 宋婧 (1986-), 女, 工程师, 从事火工品研制与工艺技术研究。

键合强度的影响,以确定最优工艺参数组合,为研究半导体桥点火器引线键合提供重要依据。

1 芯片引线键合工艺技术

1.1 引线材料

引线材料是产生键合强度的本体,常用材料主要有金丝和铝丝。航天用半导体桥点火器为了可靠保证键合质量,一个电极针通常焊接 3~5 根引线互为冗余。由于铝丝具有良好的力学性能和导电性,且较金丝有明显的成本优势,因此普遍使用铝丝。实际使用中为了增加铝丝强度,添加 1%Si 成分制成硅铝丝,应满足行业标准 YS/T543 半导体键合用铝-1%硅细丝的使用要求。常用的硅铝丝性能参数见表 1。

表 1 硅铝丝性能参数表

Tab.1 Si-Al wire performance parameter table

序号	直径/ μm	拉断力/ $\times 10^{-2}/\text{N}$	伸长率/%
1	25	11~14	1~4
2	32	16~21	1~4
3	40	21~30	1~4
4	50	40~52	2~6
5	70	70~90	2~6

半导体桥点火器点火时,硅铝丝要承担加电功能,应具有较强的抗电流能力。航天内部的企业标准《半导体桥火工品通用规范》中要求半导体桥火工品在不小于 6A 电流作用下可靠起爆。

国家标准 GJB 597A 半导体集成电路总规范 中对内引线最大允许电流的公式为^[4]:

$$I=Kd^{3/2} \quad (1)$$

式(1)中: d 为键合丝直径,mm; K 为常数,与引线长度有关,半导体桥点火器键合 K 值一般为118。为了保证额定输入电流下引线正常工作,本文设计的点火器共4个电极针,一个电极针焊接3根丝,共键合12根丝,单根硅铝丝要承受约1A电流,通过公式计算,硅铝丝直径至少为40 μm 。

1.2 劈刀结构

劈刀是引线键合过程中的重要工具,其主要作用是负责传递超声能量同时施加纵向压力^[5],在被键合区带动引线运动,迅速摩擦破坏金属表面氧化膜,最终实现牢固键合焊接。对于硅铝丝采用的是楔形劈刀,即刀头外形为楔形。劈刀在工作过程中,穿过劈刀的引线在劈刀刀头与焊盘金属间产生压力与摩擦,

因而需使用具有高硬度与韧度的碳化钨材料(Tungsten Carbide)。

劈刀的结构尺寸决定了产品的键合质量,劈刀头部结构见图1。

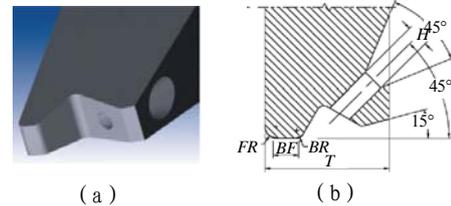


图 1 楔形劈刀头部结构

Fig.1 Wedge tip structure

图1中最为关键的性能参数为劈刀孔径 ΦH 和端面长度 BF ,孔径 ΦH 一般为1~2倍的键合丝直径,过大容易造成硅铝丝在劈刀中晃动,导致硅铝丝偏出劈刀压焊端面引起脱焊,过小容易磨损硅铝丝外表面;端面长度 BF 一般为2~3倍的键合丝直径,过大容易造成压焊点尾丝超出焊盘导致电路短路,过小导致焊点形变长度不合格,影响键合强度。

1.3 键合关键工艺参数

影响半导体桥点火器引线键合质量的因素众多,从设备角度分析,其与超声功率、超声时间、键合压力等有关;从被键合表面分析,其与电极针和芯片表面清洁度、粗糙度、镀金层厚度等有关。通过大量的试验研究发现,影响硅铝丝键合质量的最主要因素可以归结为:超声功率、超声时间、键合压力^[6-7]。

1.3.1 超声功率

超声功率与键合强度的大致关系为:当超声功率小于某一个值时,增大超声功率有利于提高键合强度;当超声功率大于某一个值时,增大超声功率将降低键合强度,并加大键合强度的离散程度。当超声功率达到一定程度时,键合强度就变的毫无规律。因此超声功率处于上述两个值之间时,能够产生比较稳定的具有足够强度的键合。

1.3.2 键合压力

键合压力的作用是使硅铝丝与被键合表面紧密地接触在一起,是键合不可或缺的部分。键合压力的大小将直接影响到超声换能系统的输出。在保证超声功率与时间等因素不变的条件下,在一定的键合压力范围内,键合强度与键合压力的大小成正比,其他范

围则成反比。键合压力的大小还会影响到键合界面是否发生滑移或微滑。

1.3.3 超声时间

超声时间是指在键合点上施加超声功率和键合压力的时间。只有在合适的超声时间范围内,才能形成良好的键合,过短时间会导致材料剥离,过长会导致根切现象,其本质就是控制超声能量的输入。

2 正交试验研究

正交试验是多因子试验中最重要的一种设计方法。它是根据因子设计的分式原理,采用由组合理论推导而成的正交表来设计试验,并对结果进行统计分析。正交试验设计基于一定的规则设计正交表,采用正交试验设计半导体桥点火器键合工艺参数组合,可以减少试验次数和成本,只需在所有可能的键合工艺参数中挑选一小部分因子组合进行试验,即可确保以最少数目的试验获得影响性能参数的全部信息。

2.1 正交试验设计

2.1.1 正交试验设计方案

根据硅铝丝键合实际应用工艺,选取影响键合强度的3个关键因素为:超声功率、超声时间、键合压力。3个因素均选取3个水平确定正交试验表,如表2所示(因素是指影响试验结果的原因,水平是指试验中因素所设定的不同量或质的级别)。

2.1.2 破坏性拉力要求

在半导体桥点火器键合质量评估中,重点考察的是引线键合强度。因此,为了研究键合时间、超声功率以及键合压力对引线键合强度的影响,对每次键合试验,首先进行显微照相,再使用推拉力测试仪进行破坏性拉力测试。本试验使用 $40\mu\text{m}$ 硅铝丝,在半导体桥点火器的芯片和极针上键合,要求键合破坏性拉力不小于 $9 \times 10^{-2}\text{N}$ 。

2.1.3 键合外观合格标准

在超声键合过程中,低功率、低压力及短时间下容易导致欠键合;高功率、高压力和长时间下则容易出现过键合^[8]。在100~200倍的高倍显微镜下检查键合点的长度和宽度,需要满足国军标 GJB 548B 微电

子器件试验方法和程序 方法 2010.1^[9]中,1.2D W 3D和1.5D L 5D的规定,其中D为引线直径;W为键合点宽度;L为键合点长度。合格键合点形状示意图如图2所示。

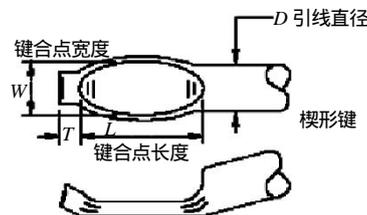


图2 合格键合点形状

Fig.2 Qualified bonding point shape

表2 正交试验设计表

Tab.2 Orthogonal test design

因素	超声功率 P/W	键合压力 F/N	超声时间 t/ms
水平 1	0.25	0.30	20
水平 2	0.35	0.36	30
水平 3	0.45	0.42	40

在每种不同参数组合下键合的12根硅铝丝,先采用显微镜对键合点进行照相,然后进行破坏性拉力测试,对测试数据取平均值,最后采用极差分析的方法以及结合引线键合外观合格标准,寻找出半导体桥点火器键合的最优工艺参数。

2.2 正交试验结果与分析

2.2.1 数据分析

采用正交试验设计进行因素、水平分组组合,得出测试数据并进行极差分析。极差分析是利用数理统计方法计算出正交表中每列的极差值,从而可以得到最佳水平组合以及影响因素的主次顺序。某个因素的极差定义为该因素的最大水平与最小水平之差,极差大表明该因素影响大,是主要因素;极差小说明该因素的影响小,为次要因素。本次正交试验结果及极差分析见表3。

表3 正交试验结果及分析

Tab.3 Orthogonal test results and analysis

水平	超声功率 P/W	键合压力 F/N	超声时间 t/ms	破坏性拉力值 $F \times 10^{-2}/\text{N}$
1	0.25	0.30	20	14.60
2	0.25	0.36	40	14.30
3	0.25	0.42	30	14.00
4	0.35	0.30	40	15.60
5	0.35	0.36	30	15.80
6	0.35	0.42	20	15.30
7	0.45	0.30	30	15.20
8	0.45	0.36	20	14.40
9	0.45	0.42	40	14.60
均值1	14.30	15.14	14.76	-
均值2	15.56	14.83	15.00	-
均值3	14.73	14.63	14.83	-
极差	1.26	0.51	0.24	-

根据 GJB 548B 微电子器件试验方法和程序中关于键合强度失效类别,引线断开点都是在电极针的焊点颈部紧缩处拉断,属于正常失效形式。另外,通过在 200 倍高倍显微镜下测量键合点形变宽度 W 实测值 $60 \sim 80 \mu\text{m}$, 长度 L 实测值 $90 \sim 110 \mu\text{m}$, 焊点形态较好,均符合标准要求。键合失效形式及焊点形状见图 3 所示。

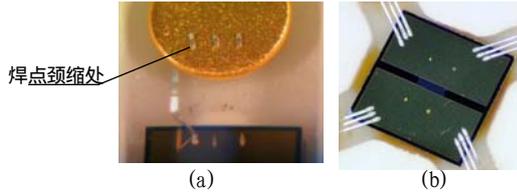


图 3 键合失效形式、焊点形状

Fig.3 Bonding point failure form and bonding point shape

根据极差分析法,从表 3 试验结果中得出各因素对键合强度影响大小排序为: $P > F > t$ 。各因素影响曲线如图 4 所示。由图 4 得出键合强度最高的最佳工艺参数水平组合为超声功率值 0.35W , 键合压力 0.30N , 超声时间 30ms 。

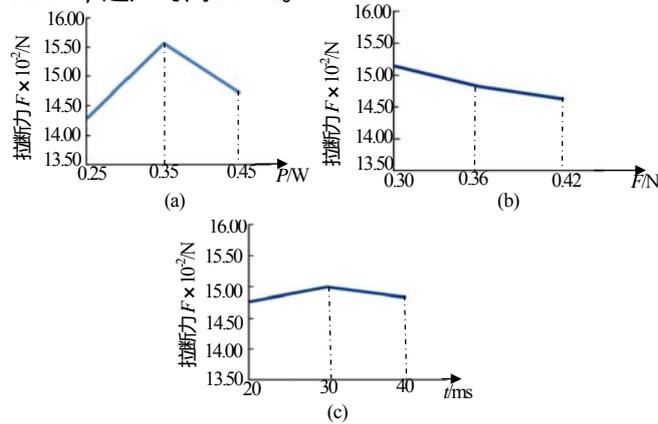


图 4 各因子影响曲线

Fig.4 Impact curves of each factor

2.2.2 验证试验

按照最优键合工艺参数组合重复试验 20 次,测得拉力平均值为 $16.2 \times 10^2\text{N}$, 高于表 3 中的最高拉断力 $15.8 \times 10^2\text{N}$, 验证结果与正交试验基本一致,证明工艺参数稳定可行。

3 结论

(1) 针对半导体桥点火器键合进行了正交试验

设计,并采用了破坏性拉力测试及显微镜目测相结合的检测方法,获得了关键试验数据,最终确定了点火器键合最优工艺参数水平组合为超声功率 0.35W , 键合压力 0.30N , 超声时间 30ms 。

(2) 影响硅铝丝键合强度的最重要因素为超声功率,其次为键合压力,影响最小的为超声时间。

(3) 经试验验证该工艺方法可靠,试验方法及试验结果为研究半导体桥点火器引线键合提供了重要依据。

本次键合研究使用的引线材料为铝丝,由于点火器的电极针和芯片镀层材料均为金,Al-Au 系统异种材料的键合界面一般会有金属间化合物生成,长期高温贮存可能影响键合焊点的可靠性,后续将进一步开展金丝的特性研究及键合工艺对比试验,为半导体桥点火器的引线材料提供最佳选择。

参考文献:

- [1] 任炜. 半导体桥点火器的设计与研究[J]. 火工品, 2007(6): 43-46.
- [2] 乔争光. 结型半导体桥的结构设计及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [3] 祝逢春. 半导体桥火工品研究新进展[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 106-110.
- [4] 曹小鸽. 大电流键合金丝熔断能力模拟分析[J]. 电子与封装, 2017, 17(8): 1-4.
- [5] 杨汝靓. 粗铝丝超声楔形焊工艺参数优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [6] 宋云乾. 基于正交试验的金丝键合工艺参数优化[J]. 电子工艺技术, 2014, 35(2): 74-75.
- [7] 陈文力. 超声功率对引线键合强度的影响[J]. 电子工艺技术, 2017(2): 48-51.
- [8] 姚友谊. SiAl 丝键合技术研究[J]. 电子工艺技术, 2017, 38(4): 203-204.
- [9] GJB 548B-2005 微电子器件试验方法和程序[S]. 中华人民共和国国家军用标准, 2005.