

大功率 IGBT 模块封装中的超声引线键合技术

覃荣震, 张 泉

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 从超声引线键合的机理入手, 对大功率 IGBT 模块引线的材料和键合界面特性进行了分析, 探讨了键合参数对键合强度的影响。最后介绍了几种用于检测键合点强度的方法, 利用检测结果对键合参数进行进一步的调整, 以实现引线键合工艺最佳化。

关键词: 引线键合; 大功率 IGBT; 模块封装

中图分类号: TN605; TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)02-0022-04

Ultrasonic Wire Bonding Technology in High-power IGBT Module Assembly

QIN Rong-zhen, ZHANG Quan

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It introduces the mechanism of ultrasonic wire bonding, analyzes the material properties and the interface characteristics of the bonding for high-power IGBT module, and discusses the effects of bonding parameters on bonding strength. Several detection methods of bonding points' strength are recommended, the parameters are further adjusted through the test results, so that the optimal wire bonding process of high-power IGBT modules can be achieved.

Key words: wire bonding; high-power IGBT; module assembly

0 引言

引线键合是当前最重要的微电子封装技术之一, 目前90%以上的芯片均采用这种技术进行封装^[1]。按照原理的不同, 引线键合可以分为热压键合、超声键合和热压超声键合3种方式^[2-4]; 根据键合点形状, 又可分为球形键合和楔形键合^[5-6]。在功率器件及模块中, 最常见的功率互连方法是引线键合法, 大功率IGBT模块采用了超声引线键合法对IGBT芯片及FRD芯片进行互连。由于需要承载大电流, 故采用楔形劈刀将粗铝线键合到芯片表面或衬板表面, 这种方法也称超声楔键合。

国内目前还没有完全掌握大功率IGBT技术, 相应的模块封装工艺技术研究也相对落后, 对其中的关键

技术, 如超声引线键合技术掌握不足, 缺乏工艺数据积累, 加之国外的技术封锁, 因此有必要研究适合于大功率IGBT模块封装的超声引线键合工艺, 掌握其中的关键参数及规律, 以提高键合质量, 降低次品率。

1 超声键合原理

超声键合系统主要由超声发生器、压电换能器、变幅杆及键合工具等组成(图1)^[7]。其工作原理为: 压电陶瓷(PZT)将超声发生电路产生的正弦功率信号转换成机械振动能, 振动经传输、放大并汇聚后作用在键合工作界面上, 在机械能和键合力的共同作用下, 在常温下利用超声机械振动带动将穿过劈刀的铝线与膜进行摩擦, 使氧化膜破碎, 纯净的金属表面相互接触, 通过摩擦产生的热量使金属之间发生扩散, 从而将铝丝引线分别键合在芯片焊盘和基板引脚上, 实现芯片和基板电路的互连。

收稿日期: 2011-01-10

作者简介: 覃荣震(1982-), 男, 工程师, 主要从事大功率IGBT芯片及模块的研究和开发工作。

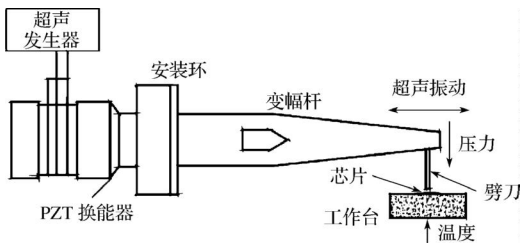


图 1 超声引线键合系统结构

Fig. 1 Structure of ultrasonic wire bonding system

超声引线键合的过程如图 2 所示。引线键合机自动搜索到第一点的位置,对第一点进行键合,形成第一焊点;然后拉弧线形成线弧,再自动搜索第二点的位置,对第二点进行键合,形成第二焊点;此时如果还需拉弧线,则重复上述动作,否则进行切线,完成一根线的键合^[6]。

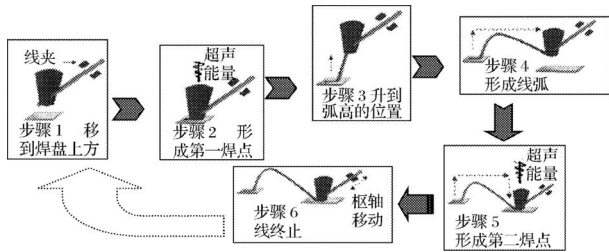


图 2 超声引线键合过程

Fig. 2 Processes of ultrasonic wire bonding

2 引线材料与键合点界面

2.1 引线材料

功率互连材料可采用金(Au)线或铝(Al)线,Al线是功率器件的首选。其原因在于:功率器件需要大量的导线来输送大电流,对同等承载电流,Au线需要的键合能量是Al线的几倍,且Al线的电阻率很低($2.65 \times 10^{-10} \Omega/\text{cm}$);Al线价格远比Au线便宜;功率芯片结温很高,加速了金属间化合物的形成,而Al线与功率芯片Al金属化面的键合没有克氏空孔(Kirkendall voids),因此比Au线键合到相同的表面要更加可靠。大功率IGBT模块封装中引线键合工艺所采用的Al线的线径一般为 $300 \sim 400 \mu\text{m}$ 材质为铝合金(Al/1%Mg或者Al/1%Si)。目前更加倾向于采用Al/1%Mg合金,这是因为Al/1%Mg合金比Al/1%Si合金具有更好的抗疲劳能力和更好的抗高温性能^[8]。

2.2 键合点界面

大功率IGBT模块中的引线键合工艺通常涉及到2种界面:一种为Al线在芯片表面上键合时的Al-Al界面;另外一种为Al线在衬板表面上键合时的Al-Ni界面(图3)。在大功率和高温应用中,Al线键合到镍(Ni)金属化面同样非常可靠。对于功率IGBT模块,采用超声楔

焊(ultrasonic wedge bonding)技术,在IGBT/FRED芯片表面顶部的Al金属化面与陶瓷衬底的Ni金属化面之间粘附大量的Al线。

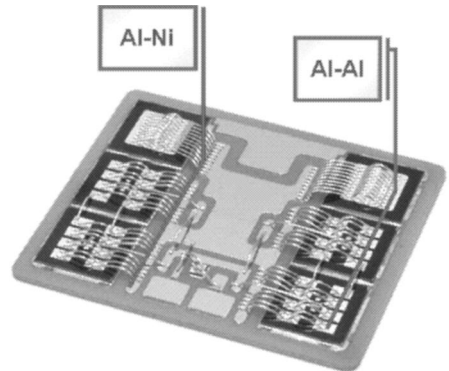


图 3 大功率 IGBT 引线键合工艺所涉及的界面

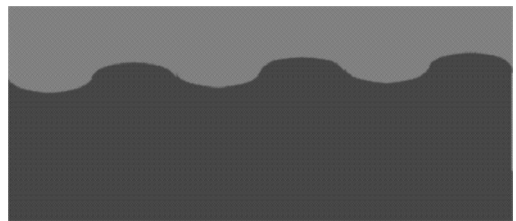
Fig. 3 The relevant interfaces of high power IGBT wire bonding process

大功率IGBT模块所用的衬板表面为Ni金属化面,常见的镀Ni方式有电镀和化学镀。电镀的速度较快,且不平坦的表面经Ni电镀处理后变平坦(图4(b));化学镀的速度较慢,且无法改变衬板表面的平坦度(图4(c))。实际上,先用电镀法对衬板表面进行平坦化处理后再进行化学镀(掺5%~9%的磷)处理,得到的Ni金属化表面比较适合于超声引线键合(图4(d))。



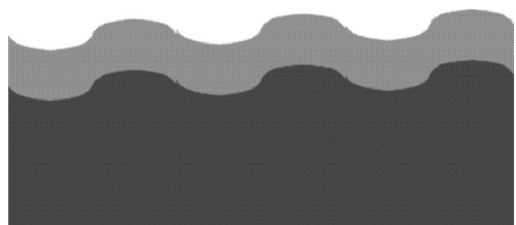
(a) 初始表面

(a)Initial surface



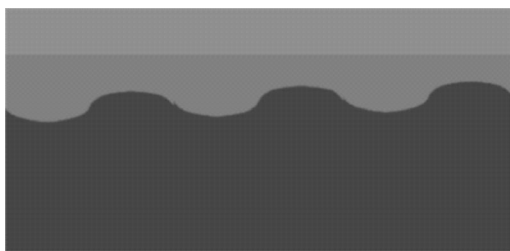
(b) 电镀后表面

(b)Post-electroplating surface



(c) 化学镀后表面

(c)Post-electroless plating surface



(d) 先电镀再化学镀后表面

(d) Surface treated by electroplating first and then electroless plating

图4 表面处理

Fig.4 Surface treatment

为了在键合点处形成可靠的连接,键合时界面的清洁度非常重要。采用气体等离子技术,在引线键合前先进行焊盘清洗是一种十分有效的表面处理方法,它能够显著提高可靠性和成品率^[9]。

3 键合参数

超声引线键合的主要参数有超声频率、键合功率、键合时间和键合压力,其中超声频率是键合机固定的,键合工艺主要是通过调整键合功率、时间和压力来获得理想的键合质量。

3.1 键合功率

键合功率主要影响键合质量和外观,功率过小,会导致键合过窄、未成形或尾丝翘起;过大,则会导致根部断裂、键合塌陷或焊盘破裂。为研究键合功率对键合质量的影响,在实验中将键合功率比分别设置为25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%和70%共10组数据(功率比为键合时设定的功率与键合机最大可调功率的比值)。键合完成后,采用推拉力测试仪对键合点进行剪切力测试,相同条件下,剪切力越大,键合越牢固。图5示出剪切力与键合功率的对应关系,其中“第一点”和“第二点”键合在芯片表面,“第三点”键合在表面镍化衬板上。

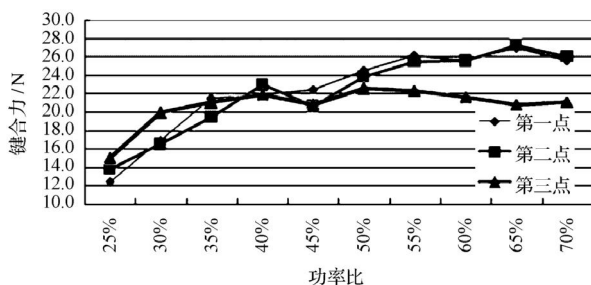


图5 键合点的剪切力与键合强度的关系

Fig.5 Relationship between shear and bonding strength

从图5可以看出,第一点与第二点有着非常相似的变化情况,第三点稍有不同,这是因为第一点和第二点的键合点界面特性(Al-Al)与第三点(Al-Ni)不同所造

成的。且随着键合功率的增加,键合强度先增加后减小,这是因为过大的键合功率会破坏已经键合好的区域,造成过键合,从而降低键合强度。从实验结果来看,35%~45%的功率比较合适,对于Al-Al与Al-Ni界面都适用,且键合强度相似。

3.2 键合压力

键合时所施加的压力越大,引线与界面膜之间越易早形成连接,导致引线与膜相对摩擦、滑动的第一阶段的时间缩短。压力过大,则阻碍键合工具运行、抑制超声能量的传导,导致污染物和氧化物被推至键合中心而形成中心未键合区域。因此,需逐渐增加键合压力,首先施加一个较小的接触力;然后稍微增大,使引线在键合点界面开始进行摩擦;最后再加力,使引线在键合点处形成牢固的键合。对大功率IGBT而言,其引线键合压力一般在10 N到30 N的范围之间。

3.3 键合时间

键合时间要合适,如若过长,则会出现界面已完成键合而超声振动仍然加载在引线上的情况,可能致使引线因内部一定部位的剪切应力过大而发生撕裂。对大功率IGBT而言,引线键合时间最好控制在30~70 μs。

4 键合强度检测方法

键合强度是IGBT模块研制中一个重要的工艺质量参数,对其可靠性具有十分重要的作用。引线键合强度的检测方法有多种,根据检测时间,可分为键合中在线检测和键合后离线检测。

4.1 在线检测

在线检测是通过在线实时监测键合过程中PZT换能器的电信号或阻抗信号的变化,以推测键合情况及大致的键合强度;而利用劈刀末端振动信号的联合时频分析结果同样可以有效地识别键合是否成功。现在的键合机大多包含有键合过程监视器(Bonding Process Monitor,简称BPM)模块,可以对键合参数进行实时监控,一旦时间参数超出设定值,机器会自动报警。另外,键合机也可以进行在线拉力测试,在完成了一根引线的键合后,可以设置拉勾对该引线进行拉力测试,这是一种非破坏性测试,以检测键合强度。

4.2 离线检测

离线检测方法包括目测法、推力法、拉力法、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)扫描方法等,其中某些方法可能会对键合界面造成破坏。在大功率IGBT模块生产中,常用目测法和推力法检测键合质量。

4.2.1 目测法

目测法可以在放大镜下进行,观察键合点是否完全键合、颈部是否断裂、根部是否脱落。图6示出键合效果良好^[10]的键合点的形状,图中 W 表示键合点宽度, L 表示键合点长度, D 表示线径。一般情况下, $1.2D \leq W \leq 3.0D$, $1.5D \leq L \leq 5.0D$;否则,应该检查键合功率是否合适或考虑是否更换剪刀。

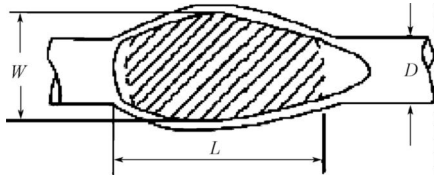


图6 键合点形状
Fig. 6 Pattern of bonding points

4.2.2 推力测试法

在推力破坏性测试中,需要注意推刀的剪切高度。对于385 μm 的粗铝线键合点,剪切高度定为25 μm 较合适(图7)。

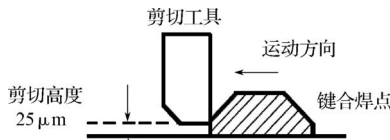


图7 推力测试示意图
Fig.7 Schematic diagram of shear force test

从推刀接触到键合点时开始,键合点即发生形变,所受到的推力近似线性地增大;当形变达到最大时,推力也达到最大;随后键合点被推动,推力迅速从最大值减小到零,其变化规律如图8和图9所示。一般地,芯片上键合点所能承受的推力比衬板上键合点的要大,这是因为芯片表面和衬板表面镀层材料不同所致。此外,

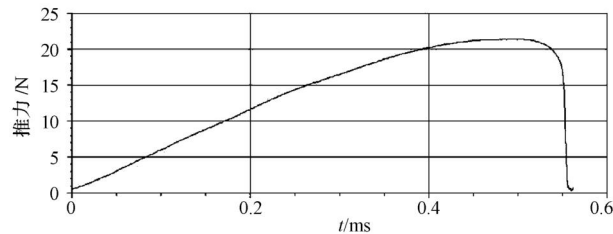


图8 芯片上键合点的推力随时间变化规律
Fig.8 Principle of shear force of the bonding points on the chip with time variation

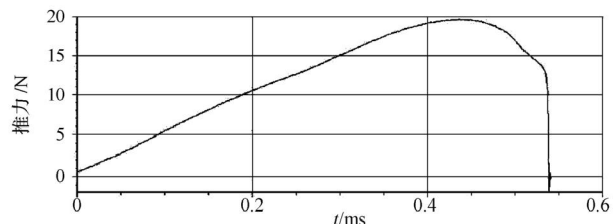


图9 衬板上键合点的推力随时间变化规律
Fig.9 Principle of shear force of the bonding points on the substrate with time variation

表面的粗糙程度、氧化层对键合点的强度也会有一定的影响。图10示出20个衬板所有键合点的测试结果分布曲线(每个衬板有44个键合点),可以看出,90%以上的键合点推力大小分布在15~25 N之间。

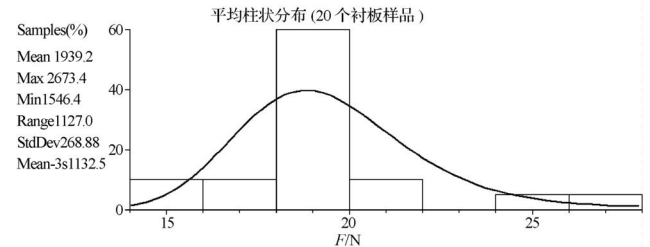


图10 推力测试结果分布曲线
Fig.10 Distribution curve of shear force test results

4.2.3 拉力测试法

在拉力破坏性测试中,引线所能承受的最大拉力 $F_{(ture)}$ 如式(1)所示。引线拉力分布如图11所示,图中, A 和 B 为引线两端的键合点、 C 为拉勾的接触点。值得注意的是,为避免因拉勾过细而导致引线割断的发生,拉勾的直径应设置为线径的3倍以上。

$$F_{(ture)} = \frac{F}{2 \sin \alpha} \tag{1}$$

式中: α ——引线被拉断瞬间所形成的角度; F ——引线被拉断瞬间拉勾的力。

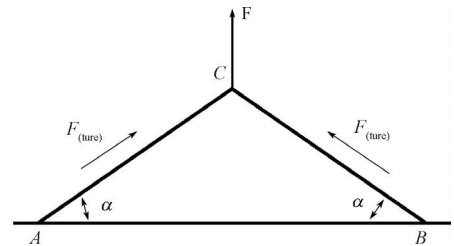


图11 拉力测试示意图
Fig.11 Schematic diagram of pull test

4.2.4 SEM扫描法

SEM扫描方法是对键合点的SEM图(图12)进行分析,从微观上分析看是否存在裂纹、断裂及其他缺陷。

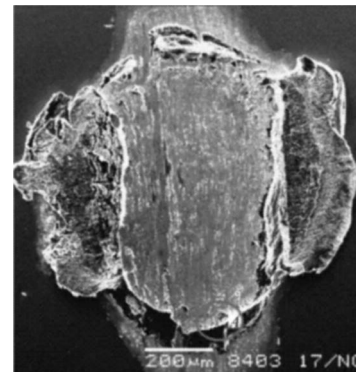


图12 超声键合形成的键合点SEM照片^[11]
Fig.12 SEM picture of the bonding point pattern

```
if(Set_file_map !=NULL )//建立成功
{
    ReadData( );//读风机设置数据
return TRUE;
}
elseif(GetLastError()==ERROR_ALREADY_EXISTS)
{ //映射文件文件存在
    mappingfile=(RecData *)::MapViewOfFile(
        Set_file_map,

        FILE_MAP_ALL_ACCESS,
        0,
        0,
        sizeof(RecData)*Count);
    return TRUE;
}
else return FALSE;//不能建立映射文件
}
```

5 结语

远程监控和风场管理软件既可以C/S方式运行,也可以单机运行和远程方式运行。风场风机管理人员主要采用C/S方式运行,厂家维护人员采用单机运行或远程运行。该软件系统目前已在库伦、通辽、仰天湖等风场投入使用,效果良好,不仅提高了风场的管理能力、使风场管理者随时可以掌控风场风机的运行情况,而且还提升了风场对风机的监控力度,较好地解决了管理中存在的繁琐问题,使管理变得轻松而有序。该软件也为厂商和业主间营造了一座沟通的桥梁,使产品的性能得以不断的改进和提升,推动风力发电行业向更好更快的方向发展。

参考文献：

[1] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京：中国电力出版社,2002.
[2] 宋坤,李伟明,刘锐宁. Visual c++ 数据库系统开发[M]. 北京：人民邮电出版社,2006.
[3] 钱能. C++程序设计教程[M]. 2版. 北京：清华大学出版社,2005.



(上接第25页)

5 结语

目前最先进的塑壳封装IGBT模块中IGBT发射极与二极管阳极的引线连接采用超声键合技术。在一个大的IGBT模块中可能包含上千个键合点,这些焊点的连接费工、费料,且稍有不慎极可能降低成品率。器件使用过程中,不良的引线键合成为可靠性的薄弱环节,模块可能因内部的高能量导致引线熔化而表现出典型的开路状态,这是一种固有的不可预测的失效过程;同时,模块内部积聚的高能量若不能及时耗散,可能导致模块外壳的爆裂,因此键合技术的掌握和键合质量控制非常重要。本文阐明了大功率IGBT模块封装的引线超声键合原理,总结了键合工艺参数对键合强度的影响规律,为高质量IGBT模块的生产提供了一定的参考。

参考文献：

[1] 王福亮,韩雷,钟掘. 超声功率对引线键合强度的影响

[J].机械工程学报,2007,43(3):107-110.
[2] 杨志高. 智能IC引线键合机图像识别系统的研究[D]. 广州：广东工业大学,2005.
[3] 董永谦. 热声焊机的研制及工艺研究[J]. 电子工艺技术,2004,25(2):84-85.
[4] 李元升. 引线键合机工艺技术分析[J]. 电子工业专用设备,2004(3):78-81.
[5] 邱颖霞. 微波多芯片组件中的微连接[J]. 电子工艺技术,2005,26(11):319-322.
[6] 黄玉财,程秀兰,蔡俊荣. 集成电路封装中的引线键合技术[J]. 电子与封装,2006,6(7):16-20.
[7] 隆志力,吴运新,韩雷,等. 引线键合剪刀超声振动信号的时频分析[J]. 2006,26(4):296-299.
[8] Sheng W W, Colino R P. Power Electronic Modules : Design and Manufacture[M]. United States of American : CRC PRESS, 2005.
[9] Zhao Jack, Getty James. 先进封装中引线键合前等离子处理[J]. 电子工业专用设备,2005(11):44-48.
[10]孙以材,宫云梅,贺群,等. 压力传感器引线键合的质量控制及优化工艺条件的实现[J]. 传感器世界,2005(3):24-28.
[11] LI Jun-hui,WANG Fu-liang, HAN Lei,et al. Atomic diffusion properties in wire bonding [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2006,16(2):463-466.