

超声功率对引线键合强度的影响*

王福亮 韩 雷 钟 掘
(中南大学机电工程学院 长沙 410083)

摘要: 采集键合试验的 PZT 驱动功率及对应键合点的剪切测试力数据, 作为超声功率和引线键合强度的表征。试验中的键合力、温度和时间分别设置为 4.7 N、室温和 100 ms。在这种典型的工业工艺键合参数下, 通过改变超声功率比(设定超声功率与最大可调功率之比)来改变超声功率, 研究了超声功率对引线键合强度的影响规律。试验中超声功率比在 15%~100%之间做了 20 种设置, 共进行了 20 组 1 000 次键合试验。结果表明: 超声功率小于 3.5 W 时, 键合强度受超声功率的影响规律明显, 即当超声功率小于 1.0 W 时, 增加超声功率将增加键合强度, 并减少剪切测试力为 0 的情况; 大于 1.6 W 后则反之; 而在 1.0~1.6 W 之间则可获得稳定可靠的键合强度, 也就是在上述试验条件下的键合窗口; 超声功率超过 3.5 W 后, 规律不明显。此外, 超声功率除受超声功率比这一可控因素影响外, 还受基板质量不均匀、劈刀与铝丝间约束不确定等随机因素影响, 超声引线键合是一个敏感的过程。

关键词: 引线键合强度 超声功率 楔键合

中图分类号: TG453⁺.9

0 前言

微电子封装已成为当今微电子制造中影响生产效率和器件性能的关键技术。超声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。它是一种通过超声振动和键合力的共同作用, 在低温加热或无加热情况下, 将引线(一般是金丝或铝丝)分别键合到芯片焊盘和基板引脚上, 以实现芯片与基板电路间物理互连的方法^[1]。虽然超声引线键合应用始于 20 世纪 60 年代末期, 但由于涉及到材料、力学、物理、化学、摩擦学等多学科领域, 且键合点的面积小、键合过程时间短而难以观测, 因此到目前为止其机理依然没有确切的说法, 从而严重制约了这一技术的进一步发展。一般认为影响超声引线键合强度的因素众多: 从设备角度看, 它与超声功率、键合力和键合时间有关^[2-5]; 从被键合表面(即焊盘或引脚表面)看, 它与被键合表面清洁度、材料性质、处理工艺等有关^[6-7]。研究各种因素对键合强度的影响以及各种因素间的相互作用关系, 是了解超声引线键合技术机理、设计制造新一代键合设备的基础。本文试图通过在镀镍基板上进行粗铝丝楔键合试验来研究超声功率对引线键合强度的影响规律。

1 试验过程

根据劈刀的形式及引线的种类, 超声引线键合可分为两种: 热超声金丝球引线键合和超声楔键合。前者是在键合力、热和超声振动的作用下, 采用管状劈刀将直径为 0.025~0.050 mm 的金丝键合到焊盘或引脚上; 后者是在常温条件下, 通过键合力和超声, 采用楔形劈刀将直径为 0.1~0.5 mm 的铝硅合金丝键合到焊盘或引脚上。由于粗铝丝能承载大电流, 因此超声楔键合主要应用于大功率微电子器件的封装, 如大功率三极管、大功率 IGBT(Insulated gate bipolar transistor)器件等。本文的研究将针对超声楔键合展开。

1.1 超声楔键合试验设备

本文试验所采用设备为改装试验平台(母体为深圳微讯自动化设备有限公司生产的 U3000 粗铝丝超声引线键合机), 试验过程中采用由标准碳化钨硬质合金钢制作的 LW300 楔形劈刀, 将直径为 300 μm 的高纯度铝硅合金丝(天津市有色金属研究所生产, 拉断力为 3~4 N)键合到表面镀镍(镀镍厚度为 3 μm)基板上。试验台的超声功率、键合力和键合时间均可调节。

试验台的核心部分是换能器系统, 它由 PZT (Pb(Zr0.53Ti0.47)O₃)、变幅杆、劈刀等几部分组成, 如图 1 所示。换能器系统的工作原理为: 具有锁相功能的超声发生电路产生 60 kHz \pm 2 kHz 的正弦电功率信号驱动 PZT; PZT 将电功率信号转换成机械

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2003CB716202)和国家自然科学基金(50390064, 50575230)资助项目。20060523 收到初稿, 20061222 收到修改稿

振动(压电逆效应); 振动经变幅杆和劈刀传输、放大、汇聚后作用在键合工作界面上, 在键合力的共同作用下, 将穿过劈刀的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, 完成引线键合的功能。

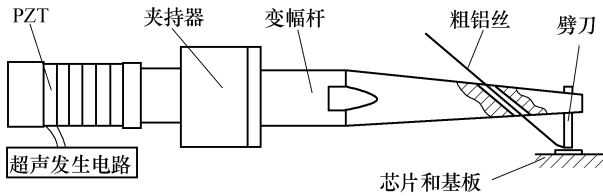
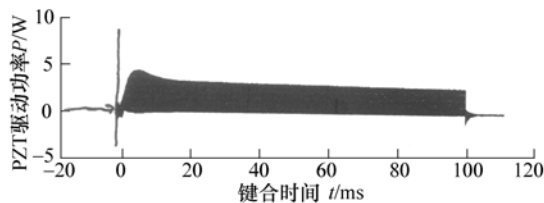


图1 试验台换能器系统结构

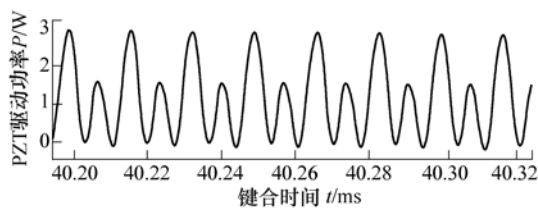
1.2 试验数据采集及处理

为了研究超声功率对超声引线键合强度的影响, 试验过程中采集了每一次键合的 PZT 驱动功率信号及对应的每一个键合点的剪切测试力值, 前者是超声功率的表征, 后者是键合强度的表征^[9]。

PZT 驱动功率信号的采集方法为: 超声发生电路产生的 PZT 驱动电流和电压信号经 NI 公司的 PCI6111 数据采集卡数字化后进入计算机, 然后通过基于 Matlab 编写的程序计算得到功率信号。经实测可知超声功率信号频率为 60 kHz, 根据研究需要, 将数据采集卡的采样频率设为 1 200 kHz, 可获得详尽可靠的试验数据。图 2a 是按上述方法获得的典型超声键合过程功率信号, 细节展开后如图 2b 所示。



(a) 键合过程中 PZT 驱动功率信号的变化



(b) PZT 驱动功率信号细节

图2 典型键合过程的超声功率信号

图2中所示的键合过程在 0 ms 时刻开启超声功率, 在 101.15 ms 时刻关闭, 这部分被称为超声键合阶段。由图 2a 知: 在整个超声键合阶段功率不恒定。在键合前期超声功率消耗较大; 此后超声功率有所下降; 然后超声功率进入相对稳定的阶段, 直到键合结束超声功率关闭; 此后系统能量在阻尼作用下逐渐衰减到 0 为止。研究中取超声键合阶段的

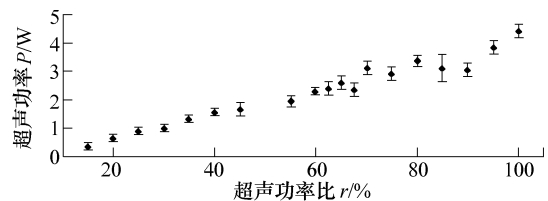
平均超声功率有效值作为超声功率的表征。

2 试验结果及讨论

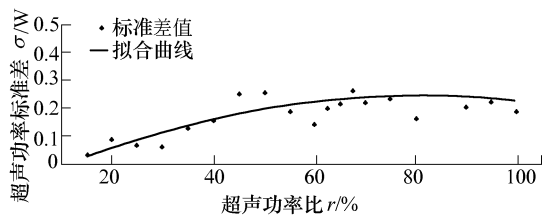
根据工业生产中键合机的典型参数设置, 试验中的键合力、温度和时间分别设置为 4.7 N、室温和 100 ms。在这种键合参数下, 通过改变超声功率比来改变超声功率(超声功率比是指键合时所设定超声功率与最大可调功率的比值), 试验中的超声功率比分别设置为: 15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、62.5%、65%、67.5%、70%、75%、80%、85%、90%、95%、100%。按上述试验设置进行了 20 组共 1 000 次键合试验。值得一提的是, 虽然工业生产中的超声功率比设置很少大于 60%, 但是在这种功率情况下的键合点状态对于键合机理的研究依然是有意义的。

2.1 超声功率的分布特性

由试验数据可发现: 即使在相同的试验参数设置下, 每次键合的超声功率消耗都不一样, 且在不同参数设置情况下, 超声功率的离散程度也不同。对每种超声功率比设置下进行的 50 次重复试验进行统计, 可得到不同超声功率比条件下的超声功率分布特性如图 3 所示。



(a) 不同超声功率比条件下的超声功率



(b) 不同超声功率比条件下的超声功率标准差

图3 不同超声功率比条件下的超声功率分布特性

由图3可知: 随着超声功率比的提高, 平均超声功率亦随之提高, 是因为输入的 PZT 功率也增加了。同时还可发现: 超声功率的标准差也有增加的趋势。经分析, 产生这种现象的原因有以下几点。

(1) 基板质量不均匀: 在不同键合位置上铝丝与基板的约束不同, 即阻抗不同, 而 PZT 驱动电源为恒压源, 阻抗不同导致超声功率不同。

(2) 劈刀与铝丝间的约束不确定: 铝丝并不是

绝对地处于劈刀V形槽的中间，在键合过程中也会有所改变，因此每次键合的约束都不确定，使得不同键合过程所输入的功率不一致；研究中还发现这种不确定性随超声功率(即劈刀的振幅)增大而增大。

(3) 超声发生电路的输出功率不稳定。

由此可知，引线键合是一个敏感的过程，超声功率除受超声功率比这一可控因素影响外，还受其他随机因素的影响。在进行“超声功率对引线键合强度的影响”分析时，要设法消除这些随机因素的影响。

2.2 超声功率与键合强度的关系

在不同超声功率条件下，共进行了1 000次引线键合试验，采集了键合过程中的PZT驱动功率信号及对应的键合点剪切测试力值作为超声功率和键合强度的表征，可得图4所示的超声输入功率与键合点剪切测试力关系。

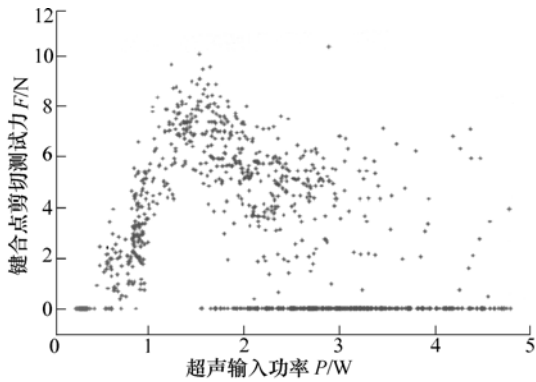


图4 超声输入功率与键合点剪切测试力关系

由于试验中采用的铝硅合金丝直径都一样，故键合点剪切测试力也就表征了键合强度。由图4可知以下几方面。

(1) 在相同超声功率情况下，键合强度依然是有差别的。在超声功率较小情况下，这种差别小且稳定；在超声功率较大情况下，差别随着超声功率增加而增加，其原因尚待进一步研究。

(2) 键合强度与超声功率间的关系大致为开口向下的抛物线形式：超声功率小于1.0 W左右时，增大超声功率有利于提高键合强度；超声功率大于1.6 W左右时，增加超声功率将降低键合强度，并增加键合强度的离散程度。

(3) 超声功率在1.0~1.6 W范围时，不存在键合点剪切测试力为0的情况，表明在这种参数条件下键合的可靠性较高；而在这个范围之外均有键合点剪切测试力为0的情况。产生这些结果的原因为：

(1) 过小的超声功率不能为键合强度的形成提

供足够的能量，来去除键合表面的氧化物及污染物，而导致欠键合，表现为键合强度较小，因此适当增加超声功率将有助于提高键合强度。

(2) 过大的超声功率将破坏已经形成的键合区域而导致键合强度下降，造成过键合，因此增加超声功率反而降低了键合强度。

2.3 键合结果分类及其统计规律

为了进一步揭示超声功率和键合强度的关系，有必要研究键合结果的分类及其统计规律，进而了解键合强度的生成和破坏原因。图5表示了键合结果分类。

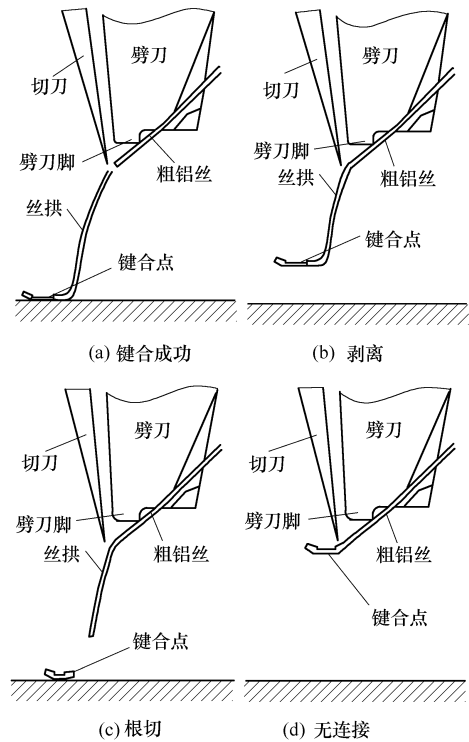
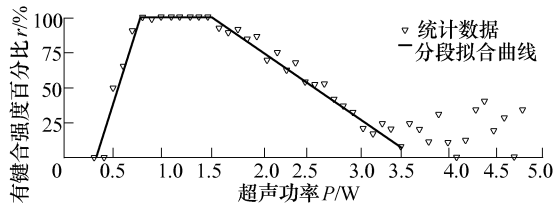


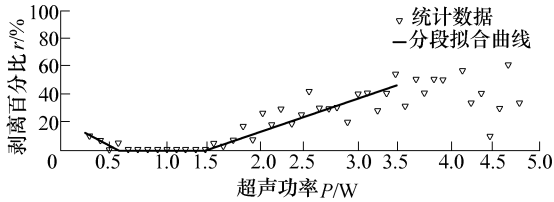
图5 键合结果分类

图5a表示了期待的结果，不仅产生了足够的键合强度，而且根部没有过度变形；图5b是由于键合强度不够以致在拉丝成拱过程中被剥离；图5c说明键合点强度已形成，但由于键合区域的引线在键合过程中变形过大甚至产生了裂缝，使得键合点根部区域引线的抗拉强度下降，以致在拉丝成拱过程中被拉断；图5d表明键合没有成功，键合点没有形成强度。

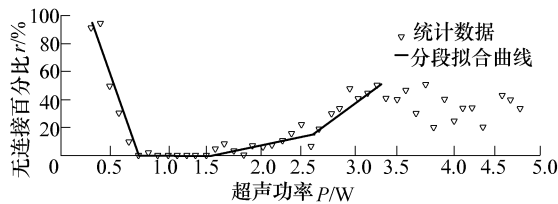
上述四种键合结果中，图5a和5c均生成了键合强度，可归纳为一类情况：有键合强度。因此所有的键合结果可分为三类，图6表示了各种键合结果的分类统计。



(a) 不同超声功率下有键合强度百分比



(b) 不同超声功率下剥离百分比



(c) 不同超声功率下无连接百分比

图 6 各种键合结果分类统计

由图 6 可知：当超声功率小于 3.5 W 时，键合结果的统计规律明显，即在 0.3~1.0 W 之间，低的超声功率不能产生足够的键合强度，出现了剥离和无连接；在 1.0~1.6 W 之间，合适的超声功率产生了足够的键合强度，消除了剥离和无连接的发生；在 1.6~3.5 W 之间，过大的超声功率将已经形成的键合强度破坏，又出现了剥离和无连接。超声功率超过 3.5 W 后，总体规律显得不规则，原因尚待进一步的研究。

综上所述，形成剥离和无连接的情况有两种：

①超声功率过小不能形成足够的键合强度；②超声功率过大使得键合成功后形成的键合强度被破坏。因此，在超声引线键合中，过大或过小的超声功率输入都将导致键合失败，只有恰当的功率输入才能形成稳定可靠的键合强度。

3 结论

(1) 超声功率小于 3.5 W 时，键合强度受超声功率的影响规律明显，即在 1.0~1.6 W 之间，合适的超声功率产生了足够的键合强度，消除了剥离和无连接的发生；在这范围外，过大或过小的超声功率都将导致剥离和无连接。超声功率超过 3.5 W 后，规律不明显，其原因尚待进一步研究。

(2) 超声功率除受超声功率比这一可控因素影

响外，还受基板质量不均匀、劈刀与铝丝间约束不确定等随机因素影响，表明引线键合是一个敏感的过程。

参 考 文 献

- [1] CHIU S S, CHAN H L W, OR S W, et al. Effect of electrode pattern on the outputs of piezosensors for wire bonding process control[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 99(2): 121-126.
- [2] CARRASS A, JAECKLIN V P. Analytical methods to characterize the interconnection quality of gold ball bonds [C]//Proc. The 2nd Euro. Conf. Elect. Packag. Technol. EuPac'96, Essen, Germany, 1996: 135-139.
- [3] MAYER M. Microelectronic bonding process monitoring by integrated sensors[M]. Konstanz: Hartung-Gorre Verlag, 2000.
- [4] MAYER M, PAUL O, BOLLIGER D, et al. Integrated temperature microsensors for characterization and optimization of thermosonic ball bonding process[J]. *IEEE Transaction on Components and Packaging Technology*, 2000, 23(2): 393-398.
- [5] RAMMINGER S, SELIGER N, WACHUTKA G. Reliability model for Al wire bonds subjected to heel crack failures[J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40(10): 1 521-1 525.
- [6] WEINER J A, CLATTERBAUGH G V, CHARLES H K J, et al. Gold ball bond shear strength-Effects of cleaning, metallization and bonding parameters[C]//Proc. The 33rd Elect. Comp. Conf. ECC'83, Orlando, USA, 1983: 208-220.
- [7] AGUILA M T, FELIPE R C, VELARD A F, et al. Ball bond characterization: An intensive analysis on ball size and shear experiment results and applicability to existing standards[C]//Proc. The 1st Elect. Package. Technol. Conf. EPTC'97, Singapore, 1997: 46-51.
- [8] CHU P W, LI H L, CHAN H L W, et al. Smart ultrasonic transducer for wire-bonding applications[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, 75(2): 95-100.
- [9] 王福亮, 韩雷, 钟掘. 超声引线键合 PZT 驱动信号采集分析系统[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 1-5.

EFFECT OF ULTRASONIC POWER ON THE WIRE BONDING STRENGTH

WANG Fuliang HAN Lei ZHONG Jue
(College of Mechanical and Electronical Engineering,
Central South University, Changsha 410083)

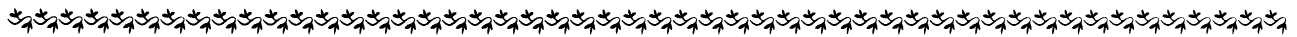
Abstract: The PZT driver signal during bonding process and the shear test force of the corresponding wire bonding point are acquired as the indicator of ultrasonic power and bonding strength respectively in the large aluminum wire wedge bonding experiments. The bonding force, temperature and time are 4.7 N, room temperature and 100 ms respectively, which are selected according to industrial practice. The effect of ultrasonic power on large aluminum wire wedge bonding strength is studied by changing the ultrasonic power rate, which is defined as the rate between set and maximum ultrasonic power. 1 000 times bonding experiments in 20 groups are done, with 20 kinds ultrasonic power rate set between 15%~100%. Correlation between the ultrasonic power and the bonding strength is found. When ultrasonic power is less than 1.0 W, the bonding strength

will increase with the power increase while the fail bonding will decrease, and the opposite will happen when ultrasonic power is larger than 1.6 W. Only when ultrasonic power is between 1.0 W and 1.6 W, can stable and high yield bonding be reached. And when larger than 3.5 W, there are no obvious rules. Moreover, ultrasonic power is effect by ultrasonic power ratio and other uncontrolled factors such substrate quality, restricts between tool and wire, and so on.

Key words: Wire bonding strength
Ultrasonic power
Wedge bonding

作者简介: 王福亮, 男, 1979 年出生, 博士研究生。主要研究方向为微电子封装技术与装备。

E-mail: wangfuliang@mail.csu.edu.cn



(上接第 106 页)

and the analysis of the influences of magnetic forces to the nutation and the precession of the rotor, the effects of the magnetic forces to the rotor are divided into four basic supporting components. Their different influences to the stability of the nutation and the precession are discussed respectively. The proportion of the four components can be adjusted by a controller to change the damping characters of the nutation and the precession, and achieve a high speed operation. Based on the study, the principles of controller designs for flywheel systems sup-

ported by active magnetic bearings are summarized, and they provide a direction for designing effective controllers for the systems at high rotation speeds.

Key words: Active magnetic bearing Flywheel
Gyroscopic dynamics Control principles

作者简介: 张凯, 男, 1977 年出生, 博士后。主要从事电磁轴承及相关技术的研究。

E-mail: zhangkai@mail.tsinghua.edu.cn