

集成电路键合工艺研究

陆成

(江苏省启东中学, 江苏南通 226200)

摘要: 键合工艺作为集成电路封装的关键工序已近被广泛的运用于现代半导体工业领域。该工艺主要目的是实现晶体管裸片和外部电路, 芯片与芯片之间的电气连接。随着集成电路产业的不断发展, 芯片的尺寸正在逐年缩小。遗憾的是, 我国的集成电路制造业在国际上仍处于相对落后地位。国外技术的封锁使得封装工艺数据匮乏, 国内类似研究的关键技术并不完善。本文从集成电路键合工艺出发, 结合实际键合材料, 键合工具等硬件部分以及键合工艺温度、时间、压力等软件参数展开讨论, 并探究键合工艺参数对它的影响。

关键词: 键合工艺; 小尺寸芯片; 工艺参数; 分析

半导体器件工艺的原材料是便宜的沙子, 经过一系列的半导体工艺实现后, 沙子中的硅成为我们所熟知的芯片裸片。键合工艺从本质上讲, 就是将加工成型的裸片安装在封装体上的工艺技术。这一工艺是集成电路实现的关键环节。因为单独的裸片既不具备防尘的能力, 也不能正常工作。通过键合工艺, 将裸片上的输入输出端口与封装体相应端口相连接。外部的封装体可以成为裸片的保护壳和“供电站”。可以说, 没有外部的封装体, 内部的芯片将无法实现其既定功能。而充当这个过程的帮手或者说桥梁的便是本文要介绍的键合工艺。

需要强调的是, 芯片组装由一套复杂的工艺流程实现。由表 1 可得, 在芯片组装过程中, 由键合工艺失效导致的芯片失效占比为 24.3%, 在所有失效产生原因中占据第二位。这主要是由于键合工艺较为繁复, 任意一个金丝失效都会导致整个芯片故障, 甚至系统性瘫痪。

表 1 芯片失效的产生原因及其占比

芯片失效的产生原因	占据比例
有源器件	32.3%
键合	24.3%
污染	20.4%
基片	7.8%
封装	5.4%
芯片贴装	2.7%
其他	7.1%

集成电路发展至今, 已经衍生出了众多键合工艺的方法。本文介绍引线键合连接工艺是目前半导体引线键合封装工艺中的重要工艺设计和连接环节信息处理技术之一。其实现目的主要是用它来保证金属芯片和引线的两端连接部件能够分别与金属芯片和半导体的管脚进行焊接, 从而构成一个与电气设施相连接的衔接桥梁。随着半导体制造业的发展, 引线键合技术在各层次的封装形式中凸显出愈加重要的地位, 逐渐成为主流的半导体封装内

部连接方式。引线键合优点较多, 成本低廉、工艺实现简易、封装形式适用性高, 百分之九十以上的封装管脚都使用引线键合来链接。所以, 讨论引线键合显然是更为合适的、也更有现实意义。

一、引线键合技术

(一) 引线键合概述

引线键合, 又称打线键合。英文名称 Wire Bonding。其本质就是将一条金属线架设在芯片与封装体的焊盘 (PAD) 之间。通过实现两者互连, 为芯片提供保护支持的作用。

1. 键合材料

金属线的材料可以是 Au、Cu、Al 等, 其中 Au 是最为常用的金属线材料, 在引线键合工艺中被广为采用。一般要求 Au 的纯度为 99.99%, 也就是 4 个 N。但由于纯度太高的 Au 自身的固有缺点, 工业制造上往往会采用 3N 或 2N 级别的 Au-X (其他种金属) 的合金产品。这种掺杂改善性能的手法在半导体工艺制造中可谓是俯拾皆是。



图 1 Cu 基板上的 Au 丝球焊点



图 2 自动键合机上装载的 25um Au 线

2. 键合条件

谈到工艺, 自然就不能不谈到工艺的操作环境或者说操作条件。当前, 由于键合条件的不同, 引线键合工艺主要分为三个方面:

(1) 以热压为主要能量来源的热压焊接法

热压焊接法的实现较为简单。该方法通过对金属引线和焊盘同时加热加压（温度一般为 350 ~ 400℃，压力为 8 ~ 20 千克力/平方毫米），达到键合的目的。热压焊接法的原理是，金属经过高温和压制后将产生一定的塑性变形。两种塑性变形金属丝的原始键合界面几乎完全接近于原子力范围。热压焊接法正是通过两个塑性变形金属丝之间的原子相互扩散达到键合目的。

（2）以超声波为能量来源的超声波焊接法

超声波的接合，无需加热，通常在室温下即可操作。该方法是通过直接施加压力，在两个焊接件中产生高频弹性超声波的一种高频率的超声波弹性高频振动从而直接破坏两个焊接件之间的金属氧化物层，达到一个具有界面性的破坏，并且直接释放出非常大的热量，从而使两个焊接件的固体牢固地直接结合成纯净金属。这种特殊的固相超声波焊接的方法可简单地将其描述和定义为：在超声波焊接过程刚刚开始时，在摩擦力相互影响的作用下，金属结构材料原子之间具有强烈的金属塑性分析和流动，使得纯净的金属直接进行了表面间的金属塑性接触。而由于金属接头区的温度升高以及高频超声波的振动，从而直接导致在金属晶格过程中的金属原子进入了受激活状态。所以，当物理上具有共价键结合性质的两种金属材料原子之间互相接近到以纳米为质量量级的物理距离时，就这样还有一个原因可能就是可以通过利用社会公共的管理电子形成了连接金属原子间的第一个电子连接桥。需要强调的是，在此过程中被焊元器件的物理化学和性能没有太大的影响，也不会直接形成任何的化合物影响超声波焊接的强度。因此超声波焊接具有对焊接参数调整灵活，焊接范围广的优点。

但遗憾的是以上两种方法依然存在不少问题，目前来说均未占据引线键合技术领域的主要地位。相对应的，综合以上两种方法优点的热压超声焊接法能够取长补短，成为如今广为采用的键合方法。

（3）热压超声键合

超声波的热压接方法由超声波热压接和两种形式的超声波引线相接合的一种组方法构成。换句话说，就是在传统的超声波热压接键合方法的基础上，利用对加热台和金属劈刀同时通过超声波加热的方式。加热系统的温度相对较低（甚至低于 tc 系统温度的平均值，大约 150℃），金属的键合扩散在整个金属管理系统交界面上的进行。其实现方法促进了金属线的持续高质量发展和焊接。

表 2 超声键合、热压键合和热超声键合的优缺点比较

键合方式	优点	缺点
超声键合	焊点小且需要温度低 基本无空洞和虚焊发生 对待键合表面的洁净程度要求不高	控制方法比较复杂 易产生脆裂 键合方法比较单一 对待键合范围的表面光滑度要求比较严格
热压键合	键合强度很可靠 工艺较简单 对待键合表面光滑度的要求不高	对需键合的表面干净程度要求高 温度可能会对键合器件有影响 键合压力大，对焊具磨损较大

热超声键合	可键合不能承受高温的器件 低温低压力下可以实现键合，延长了键合点寿命 键合的金属间形成化合物均匀	工艺控制比较复杂，有较多影响因素 键合表面清洁度要求较高
-------	--	---------------------------------

（三）键合工具

楔形劈刀和球形劈刀是两种常见的引线键合工具。它们的形制不同决定了金丝的键合方式也不一样。楔形焊接相比较于球形焊接更为直接。但是传统的楔形焊接仅能在一个平行的角度内完成焊接。据资料显示，即使是到目前为止，楔形焊接机也仅能实现旋转 30° 左右进行键合。毫无疑问，这一程度上限制了楔形键合的应用。故而，相对而言球形焊接的优势更为明显。这主要是因为球形焊接不受焊接角度制约的原因。

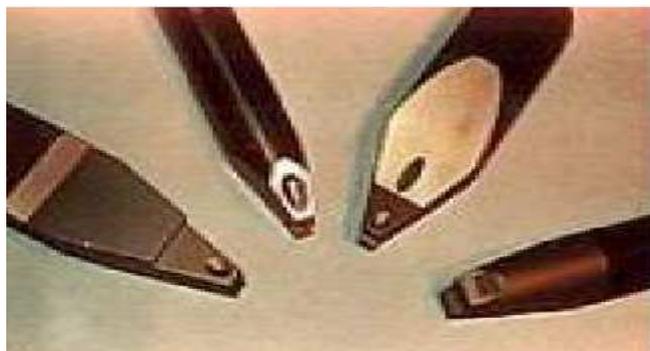


图 3 常见的楔形键合劈刀



图 4 常见的球形键合劈刀

综上所述，本文讨论的键合工艺将局限于热压超声金丝键合技术这样一个相对小的范畴。

（二）引线键合过程

如图 6 所示，引线键合的过程如下：

1. 烧球。利用电火花放电法放出一个电弧，将劈刀嘴部金属丝末端融化。受表面张力作用，融化的金属丝呈现球形。
2. 二焊点植球劈刀。将形成的液态小球带到二焊点键合位置上，在键合压力作用下，劈刀带动金属球作用于焊盘上，金属球

受力变形，焊机启动超声振动，一段时间后，将金属球键合在焊盘上。

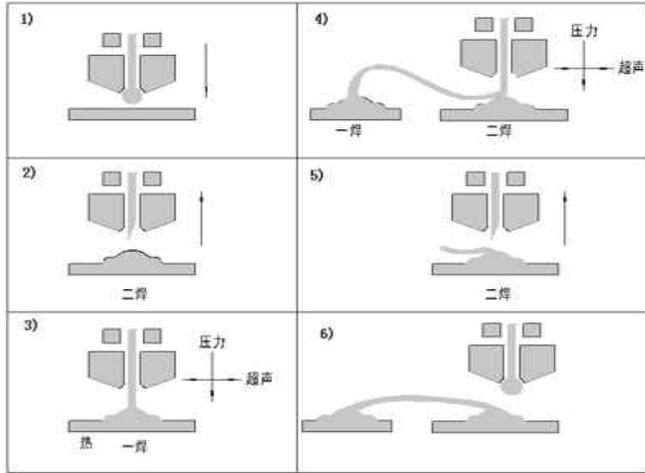


图5引线键合工艺流程

3. 一焊点植球再次烧球后，劈刀带动金属球移动到二焊点键合位置上，在键合压力作用下，劈刀带动金属球作用于焊盘上，焊机启动超声振动，金属球键合在焊盘上。

4. 二焊点键合劈刀抬起，金属丝穿过劈刀孔，随劈刀移动到二焊点上方，穿出劈刀孔的金属丝将形成具有特定轨迹的丝弧。

5. 键合完成后，劈刀抬到一定高度，线夹关闭并夹住金线，随后劈刀开始上升，金线与焊点断开。

6. 烧球。劈刀上升至指定位置后，放电烧球。

(三) 引线键合的工艺参数分析

键合实际上就是将引线搭建在焊盘与基板上完成电气联通，这一过程涉及到第一焊点和第二焊点的固定，而固定是需要靠能量提供才能完成的。根据能量守恒定律可知：

$$E = E_1 + E_2 \quad (\text{公式 1})$$

其中，E代表键合吸收的总能量，加热时产生的我们用E1表示，E2表示超声波以及压力产生的能量之和。E1和键合前后的温差T有关系，设定影响系数为k，则：

$$E_1 = k\Delta T^2 \quad (\text{公式 2})$$

而根据摩擦学的公式有：

$$E_2 = uFAft \quad (\text{公式 3})$$

上述公式里，u是摩擦系数；F是压力；A是超声振幅；f是超声频率；t是时间。因此：

$$E = k\Delta T^2 + uFAft \quad (\text{公式 4})$$

从上边的推导过程中，我们不难看出，现代金属线键合工艺有如下重要参数：键合压力、超声功率、键合时间及温度。下面我们就针对这几个重要参数进行分析。

三、键合工艺参数的分析

(一) 键合温度

键合温度是最重要的参数之一，很大程度上决定了键合成功率。高温对键合点的产生有促进作用，对清洁键合面污染物层也有帮助，而且可以给键合过程提供能量。温度的变化来源于两个方面：一是键合前设定工作台温度，二是在发生键合过程时摩擦释放出的热量。但通常，我们在谈论键合温度时总是指所谓的外部温度。

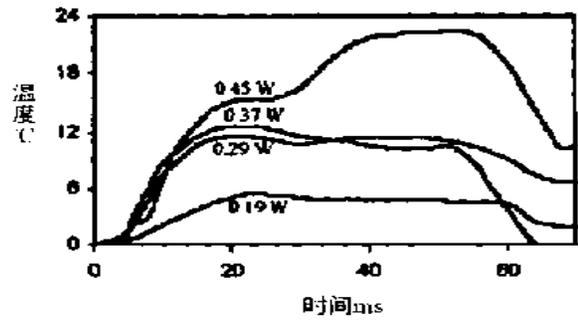


图6金线键合界面温度升高曲线

在实际键合过程中，超声振动带来的能量及接触界面摩擦带来的热量将导致键合温度升高。亦即，键合界面的温度将高于键合温度。如图6所示，在金丝键合过程中，键合界面的温度升高范围约在10~30℃之间。随着温度的进一步提升，键合强度随之增大。温度升高至240℃左右时，键合强度达到了最大剪切力强度15gf (gram force)。之后，随着温度的进一步升高，剪切力强度下降。造成之一现象的原因是，金线和焊盘随着温度的升高变软，降低了金属间的结合。

加热能增加金属分子、原子的能量，加快两种紧密接触金属间的分子、原子相互扩散结合的速度。特别对于一些材料本身对应力敏感的芯片，可以适当降低超声功率和键合压力的情况下，增加温度以保证键合工艺的可靠性。

(二) 键合时间

键合时间通常都是毫秒级。需要强调的是，对应于不同的键合点，键合时间也不一样。一般情况下，键合时间越长，引线球吸收的能量越多，键合点的直径就越大。界面强度会相应增加而颈部强度会降低。遗憾的是，过长的键合时间可能会导致键合点尺寸过大。一旦键合点尺寸超出焊盘边界，将导致空洞产生的概率增大。工艺实验表明，温度升高会使颈部区域发生再结晶，导致颈部强度降低，增大了颈部断裂的可能。因此选择合适的键合时间成为集成电路键合工艺成败的关键因素。

(三) 键合压力

键合压力 (Bond Force) 的作用是维持劈刀与引线相互接触而不滑动的作用力。键合压力将金球或金线固定于键合位置以便使金线与焊接表面能够紧密压合。在此过程中，金线将延伸变形。当压力达到一定程度，金线表面破裂，露出内部纯金。进而，金线的纯金表面与键合表面相互接触，发生金属间的分子键合。需要强调的是，需要键合压力的强度，如果压力过大会导致引线或键合焊盘严重变形。

键合压力通常分为两个阶段，每个阶段都有特定的控制参数，第一个阶段称为冲击力，第二个阶段称为键合压力。键合压力用来在超声的作用过程里确保金属线合焊盘的紧密接触。

1. 键合冲击力研究

第一代焊线机多采用位移控制，通过对焊球最终变形尺寸的分析，进而控制接触速度来获得适当的接触力。一般设定的接触比例为30%，即发生碰撞接触后，焊头的速度降低到搜索速度的30%时，可作出判断，焊头已经接触到焊盘，接触比例过大或过小都容易导致误判。

2. 键合压力研究

键合压力的大小是进行超声波焊的必要条件。这里超声波所指的键合压力是引线与焊点处的电极垂直静键合压力。劈刀施加压力的目的主要是为了更好地使劈刀的引线与焊点处的电极金属化层紧密地互相接触。

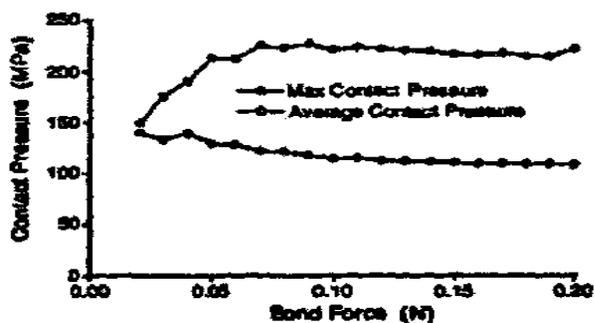


图7 最大压强平均压强曲线

由于存在两个焊点，因此必须分开讨论：

表3 球焊第一点处不同键合压力取值对应拉力强度

键合压力/g	实验次数	失效引线根数/根	平均拉断力/g	Range
24	10	4	3.679	3.014
28		1	5.932	2.754
32		0	7.709	3.841
36		0	8.572	2.350
40		1	8.110	2.291
44		2	6.342	1.998
48		3	4.027	1.792

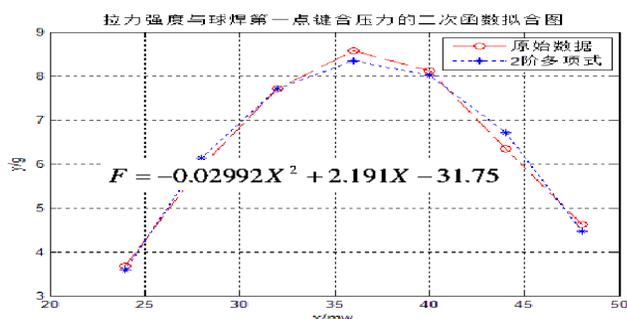


图8 拉力强度与球焊第一点处键合压力的二次函数拟合图

根据二次函数拟合图得出球焊第一焊点键合压力和拉断力的二次函数关系式：

$$F = -0.02992X^2 + 2.191X - 31.75 \quad (公式5)$$

F指拉力强度，X是球焊第一焊点键合压力参数取值。

在球形键合方式下，第一焊点的良好超声功率取值范围应为80mW-100mW。良好的键合压力取值范围为32g-40g；第二焊点处好的超声功率范围为100mW-120mW，良好的键合压力取值范围为40g-48g，第二焊点处所需要的超声功率和键合压力也都比第一点处要大些。

表4 不同二焊键合压力参数下的键合拉力强度

键合压力/mW	实验次数	失效引线根数/根	平均拉力强度/g	Range
32	10	3	4.014	1.721
36		2	5.173	2.032
40		0	6.921	2.644
44		0	8.572	2.350
48		0	7.631	2.485
52		1	5.640	3.124
56		2	3.873	1.976

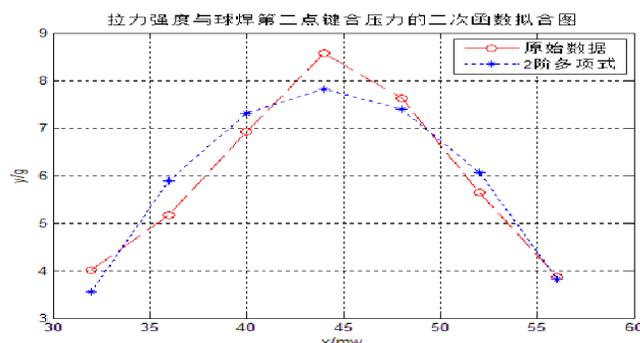


图9 拉力强度与球焊第二点键合压力的二次函数拟合图

采用二次函数对实验结果进行拟合，得到如下的二次函数关系式：

$$F = -0.02865X^2 + 2.532X - 48.14 \quad (公式6)$$

F是拉力强度，X是球焊第二焊点键合压力参数取值。

四、结束语

本文通过对键合工艺的机理进行了分析，并通过公式的推导得出了可能影响热超声引线键合质量的因素有如键合时间、超声功率、键合压力和温度等等，每一个参数的不合理都有可能对整个键合过程失败。金丝引线键合是在超声振动和键合力的共同作用下，将金丝键合在芯片和焊盘上的物理连接过程。在研究这一技术的过程中，本人深刻感受到半导体器件工艺是一门机器精密的工艺设计。它的高标准、严要求对于集成电路设计制造来说既是挑战，也是机遇。

通过对文献的查阅，本文也发现了当前较为热门和前沿的一部分工艺发展方向。如：

- (1) Cu线键合；
- (2) 在引线键合工艺中，用更好的绝缘材料来消除金属互连线之间的串扰。采用具有绝缘表面的金属线同时可以提高集成度，一举多得；
- (3) 发展极细间距丝球键合。

参考文献：

[1]Thorsen T, Maerkl S J, Qualce S R.Microfluidic large-scale integration[J].Sciences, 2002, 298 (5593) : 580-584.
 [2]M.T.Guo, A.Rotem, J.A.Heyman and D.A.Weitz.Droplet micro fluidics for high-throughput biological assays[J].Lab Chip, 2012, 12 (12) : 2146-2155.
 [3]Skeggs L T.An automatic method for colorimetric analysis[J]. American journal of clinical pathology, 1957, 28 (3) : 311-322.