

半导体：铜线键合技术的进步

概括

每一代新产品的出现，电子设备都有望在更小的空间内提供更高的性能。这种持续的趋势需要组件的不断小型化和结构的精细化。引线键合的引入彻底改变了半导体行业中集成电路和其他器件的组装和封装。本文全面探讨了引线键合的历史背景，包括其发展、进步以及与其实施相关的经济效益和考虑因素。此外，还讨论了合成气体对铜线质量的重要性以及过程中氧含量的影响。气体混合器和气体分析仪不仅使该工艺特别经济，而且还为改进整个引线键合工艺做出了重大贡献。

内容：

- 1. 简介 3
- 2. 历史、技术和方法、优缺点 4
 - 2.1. 引线键合的历史 4
 - 2.2. 打线技术 5
 - 2.2.1. 热压焊 5
 - 2.2.2. 超声波焊接 5
 - 2.2.3. 热超声焊接 5
 - 2.3. 引线键合的分类 6
 - 2.3.1. 球楔装订 6
 - 2.3.2. 楔形装订 6
 - 2.4. 金线和铜线的优缺点 8
- 3. O₂ 含量的影响 10
- 4. 自由球质量的影响因素 12
 - 4.1. 保护气体（成型气体） 13
 - 4.2. 合成气体流量 14
 - 4.3. EFO 16的流量 16的间隙长度 17

1. 简介

引线键合是微电子行业的一项重要技术，因为它有利于集成电路（IC）及其封装的连接。金（Au）线使用数十年之后，引线键合技术的进步使得铜（Cu）线取代金线成为可能。然而，这种变化带来了有关连接过程质量的一些挑战。为了克服上述挑战，对连接和合成气体的使用进行了修改。气体混合器和气体分析仪在实现高质量保护气体方面的关键作用是不可否认的。本文档的第 2 部分到第 6 部分研究了铜线接合的各个方面。

第 2

部分全面概述了铜线键合技术。他深入研究了它们的历史发展，并追溯了它们从引线键合开始到现在的起源，其中铜已成为传统金线的流行替代品。解释了各种键合方法，并展示了工艺的发展以及塑造现代铜线键合的技术创新。此外，本节研究了最近开发的新方法，并强调了它们的潜在好处及其对微电子学未来的影响。

第 3 部分重点介绍铜线键合过程中氧气 (O₂) 水平的有效性。

O₂含量会显著影响键合工艺的结果并影响铜线键合的性能。这部分研究重点介绍了 O₂含量对粘合质量的影响。

第 4 部分研究了影响实现坚固且完整的自由空气球 (FAB)

以创建可靠连接的因素。保护气体 (合成气体) 的使用、合成气体流量的控制、电点火装置 (EFO) 流量的控制以及EFO的间隙长度被认为是提到的影响因素。

第 5

部分研究了气体混合器、气体分析仪和一些相关设备在铜线键合工艺中的实际应用和效用。这些设备对于控制退火中使用的合成气体的成分和纯度至关重要。了解它们的实用性和优点可以实现更高效、更准确的键合工艺，从而有助于提高产量和提高制造可靠性。

第 6

部分通过介绍改进气体混合器和相关配件的潜在创新和研究领域，深入了解铜线键合技术的未来发展。这些新技术为未来更可靠、更高效的微电子封装铺平了道路。

2. 历史、技术和方法、优缺点

2.1. 引线键合的历史

开始时间：

20 世纪 50 年代初期：引入引线键合来连接 IC 芯片。

使用金线手动引线键合技术。

进步：

1960 年代至 1970 年代：开发用于大规模生产的自动焊线机。

广泛使用金线作为首选连接材料。

铜线键合的起源：

20 世纪 90 年代末至 2000 年代：由于金价上涨，寻找替代材料。

引入铜线作为金线的可能替代品。

验收与验收：

2000 年代初：在某些应用中首次使用铜线接合。

铜线的成本效益和卓越性能等优点已得到认可。

主流用法：

2010 年代：铜线键合的接受度和实施率不断提高。

广泛应用于各种半导体封装中。

正在进行的研究：

当前：持续研发以改进铜线键合技术。

研究新材料和先进连接技术。

2.2.打线技术

引线键合是一种在两种金属材料之间建立电连接的方法，例如电线和焊盘表面之间或电线和端子表面之间。引线键合使用细线以及热、压力和/或超声波能量的组合。根据导线和焊盘的材料，可以在连接表面上形成固溶体或金属间化合物（IMC）等合金[1]。引线键合有三种技术，即热压键合、超声波键合和热声键合。表 1 [2] 显示了这三种引线键合技术的比较。

2.2.1.热压焊

热压焊接是一种利用温度和压力的工艺。此过程需要超过 300 °C 的温度和大约 0.147-0.245 N 的粘合力。这些值太高，可能会损坏子结构 [2]。

2.2.2.超声波焊接

超声波焊接使用力和超声波能量。与热压焊相反，这不需要高温。该技术在室温下进行，因为超声波能量引起的形态变化与热引起的形态变化相当，因此造成的损害较小[2]。

2.2.3.热超声粘合

热超声接合技术利用超声波能量、压力和热量来形成冶金接合。超声波和热超声接合的接合力和时间低于热压接合。热超声接合工艺通过将封装放置在加热台上或使用热接合工具来产生热量。通过将连接工具压入电线中，将连接力施加到连接表面。工具力控制将导线焊接到焊盘表面所需的重量。线材被热和超声波能量软化，并在焊盘金属化处变形，形成冶金结合 [2]。

表 1. 引线键合技术

	热压缩	热超声	超声波
超声波功率	不	是的	是的
结合力	高的	低的	低的
温度	高 (>300 °C)	介质 (120-220 °C)	低 (室温)

粘合时间	长的	短的	短的
线材材质	噢	噢	金、铝
内饰材质	金、铝	金、铝	金、铝
污染	受到严重影响	中心	中心

2.3. 引线键合的分类

引线键合可分为两种类型：球-楔键合和楔-楔键合。

2.3.1. 球楔装订

球楔接合过程需要三个运动轴（X、Y 和 Z

方向）。该工艺用于形成电气外壳中的大多数电线，并且通常用于金线和铜线 [2]。

2.3.2. 楔-楔装订

楔形键合是深接入、细间距、低环路和短环路应用的首选，包括微波和光电子学。它需要四个运动轴（X、Y 和 Z 方向以及 θ ）。这种类型的接合使用铝线 (Al) [2]。

在引线键合技术中，热超声键合是半导体封装最常用的引线键合技术。此外，球楔接合比楔形引线接合更常用，因为它速度更快。 [2]。球焊和楔焊的比较如表 II [2] 所示。

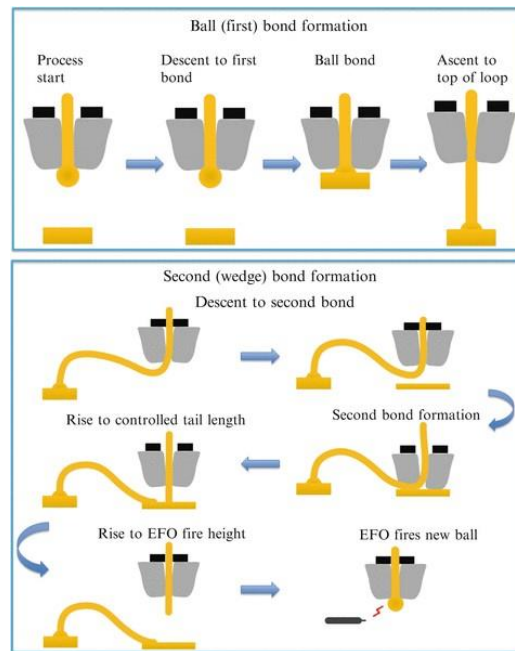
表 2. 不同粘合剂应用的比较

	球装订	楔形涂胶
粘合技术	热压 (T/C)	热超声 (T/S)
	热超声 (T/S)	超声波 (美国)
温度	温度—>300°C	铝线 – U/S, 室温
	温度/温度--120-220°C	金线 - T/S 120-220°C

线材粗细	小 (<75 μm)	任何尺寸的电线或带状
焊盘尺寸	大 (3-5倍线径)	焊盘尺寸比 Ballbond 连接更小。适合微波应用。焊盘尺寸为线径的 2 至 3 倍 (也是带宽的 1.2 倍)。
内饰材质	金、铝	金、铝
线材材质	铜	金、铝
速度	快速 (10 线/秒)	相对较慢 (4 线/秒)

在球楔接合过程中，热超声接合用于通常在芯片焊盘上进行第一次连接（称为球接合），然后进行第二次连接（称为楔接合）到另一种金属。首先，导线的自由端分为三部分：自由空气球（FAB）、热影响区（HAZ）和电耀斑拉丝（EFO）。EFO 工艺通过电离气隙形成 FAB。图 1 [2] 显示了球楔接合工艺的示意图。根据图 1，焊接工具（称为毛细管）移动到第一个连接的位置。在步骤 3 中，热能和超声波能通过将球形球连接到焊盘来创建第一个连接。在步骤 4、5 和 6 中，环路移动到另一种金属以进行第二次连接。环的运动被编程以实现所需的环高度和形状。步骤 7 是进行第二连接以将线环的相对端连接到基板的金属的级别。在步骤 8、9 和 10 中，焊接工具上升以折断导线末端。然后，键合工具的高度继续增加，直到球形成并再次进行第一次连接 [2]。

图 1. 球楔引线键合



2.4.金线和铜线的优缺点

Au 线是将 IC 芯片上的 Al

焊盘连接到引线框架的最常用电线。由于具有机械和电气性能、高可靠性和易于组装等多种优点，金线已被使用超过 55 年

[3]。然而，这种线材的高成本和市场价格的不断上涨导致人们对替代冶金技术的探索[2]。

更低的成本、更高的机械强度、更低的电阻、铝焊盘上金属间化合物生长更慢以及更高的导热率都是使铜成为有趣替代品的原因。然而，用金线替代铜线带来了许多挑战，包括高氧化率、腐蚀和高硬度[3]。表2[4]显示了金线和铜线的性能比较。由于铜线比金线硬度高且抗氧化性低，因此需要控制连接过程中的许多因素和参数，包括连接力。

Cu的高硬度和高结合力会导致加工过程中对Al焊盘的损坏。为了降低铝焊盘被铜线损坏的风险，业界正在使用比金线键合中使用的更厚的铝焊盘以及镍 (Ni)

基表面。为了防止氧化，在键合过程中还必须使用惰性气体。在某些情况下，电线制造商使用镀钯铜 (PdCu) 电线来增加抗氧化性。然而，Cu的低成本促进了从Au线向Cu线的过渡[2]。

表 3. 金线和铜线的材料特性

财产	非盟	铜
导热系数 (W/mK)	320	400
电阻 (Ω m)	2.20	1.72
杨氏模量 (GPa)	60	130
泊松比	0.44	0.34
屈服强度 (MPa)	32.70	200
热膨胀系数 (ppm/°C)	下午 2.40	16.50
维氏硬度(MPa)	216	第369章

如今，全球已采用铜线键合部署集成电路 (IC)

的方法。金价的上涨和全球电子设备需求的增长是推动这一趋势的主要因素。

Amkor、德州仪器

(TI)、Heraeus、Altera、Carsem、飞思卡尔、英飞凌和几家日本公司已在各自的工厂中采用了这种方法。然而，许多公司尚未准备好在其行业中使用铜线，因为开发铜线键合工艺的成本、设备和专业知识太高[3]。

O₂ 含量的影响

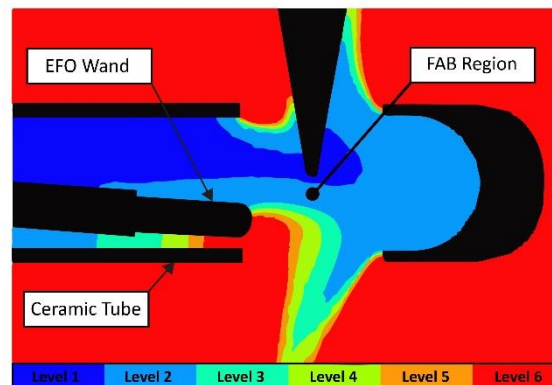
在 John Foley 等人的研究中 [5]，使用计算流体动力学 (CFD)

研究内部几何形状和气体流动行为。

CFD预测的参数之一是FAB形成环境中的氧含量。仔细检查受控环境，同时使用氧气传感器监测氧气水平。铜线键合中 O₂

含量的重要性在于确保工艺过程中发生的氧化最小化，因为氧化会影响键合性、键合强度和连接质量。图 2 [5] 显示了内部几何形状和气流行为的 CFD 模型。

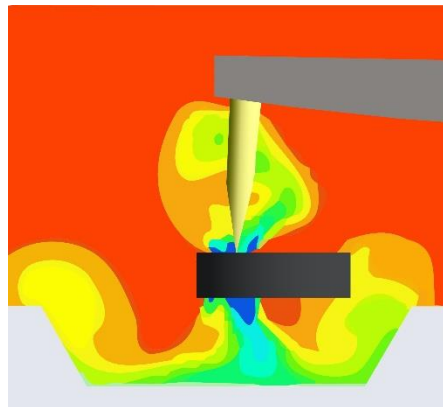
图 2. CFD 模型分析



如果氧含量超过一定值，FAB就会变形并氧化。引线键合过程中的氧含量已成为气体输送系统设计的可量化要求。图3[6]显示了氧浓度的CFD模型。随着EFO电流增大，铜线熔化引起的温度升高。这会导致 FAB

周围形成的气体体积快速膨胀。如果气体流量不够高，无法在铜FAB熔化过程中提供完全的惰性气体覆盖，则熔化的铜FAB的表层可能会因环境空气中存在的氧气而发生氧化，最终导致铜FAB熔化。尖FAB的形成[7]。

图 3. 保护气流头周围氧气浓度 (红色 = 高, 蓝色 = 低) 的数值流体动力学模型



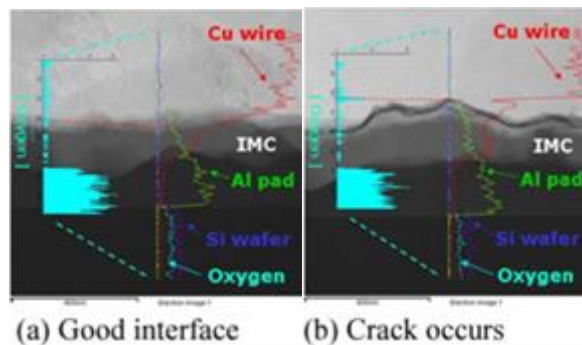
根据艾维等人的说法。

[8], 通过开发更精细的成形气体供应系统可以在更大的范围内实现更低的氧含量。经过多年的创新, 现代成形气体输送系统现在可以将 FAB 周围的氧气含量限制在 1%

以下。图4[9]显示了连接界面处氧含量的比较。铜与潮湿条件接触会导致其容易氧化。另外, Cu-Al体系在高湿度下性能较差, 因为Cu-

Al体系容易腐蚀, 导致Al焊盘和Cu线之间出现裂纹。一般来说, 在良好的连接中, 在包括连接接口在内的铜线或铝焊盘部分检测到的氧气非常少[9]。当高含量的氧气进入外部环境时, 会引起腐蚀, 可以通过减少吸湿材料来防止氧气流入来控制腐蚀, 这样可以增加工艺的可靠性并避免开裂。具有较少卤素和大量金属间化合物 (IMC) 的干燥环境是确保铝焊盘上铜线连接的理想选择[10]。

图4. 粘合表面氧含量比较



ZWzhong的研究[11]还表明，铜线的氧化导致针脚键合的键合能力变弱，从而导致抗粘性能提高。如果铜线线圈在键合机上放置很长时间，氧化层就会增加并妨碍形成良好的楔形键合。为了解决由于表面氧化导致的针脚粘合性差的问题，开发了一种具有新表面形态的新型毛细管。简而言之，FAB

的氧化会导致球形形状和尺寸不一致，这给控制键合参数带来了挑战。由氧化层产生的较硬的FAB

需要更大的力和超声波能量来键合，并且增加了键合焊盘损坏的风险。另外，氧化层影响FAB与焊盘之间纯金属的接触，有助于不粘键合，特别是在第二次键合中，多为楔形键合。

4 自由球质量的影响因素

尽管上述规格使铜线接合成为合适的替代方案，但不建议将纯铜线直接用于半导体行业，因为它很容易氧化。为了在整个EFO过程中形成尺寸精确的对称球形球，FAB

在其形成过程中不得氧化。当铜氧化时，氧化物会在球表面形成，使键合过程复杂化，甚至可能导致焊盘损坏和键合弱。保护铜线不被氧化的解决方案包括使用保护气体（合成气体）、控制保护气体的流量、控制EFO的流量和EFO的间隙长度[2]。

4.1. 保护气体 (成型气体)

为了减少氧化，气体在实现可靠连接方面发挥着重要作用。各种比例的 H₂ 和 N₂

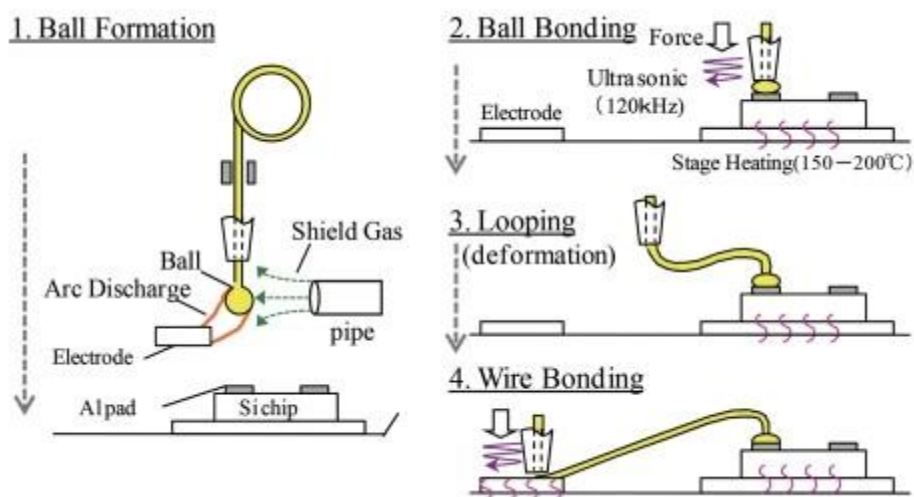
合成气体 (通常为 5% H₂ 和 95%

N₂) 是在键合过程中注入的保护气体。图5[12]显示了FAB形成过程中引线键合和注入合成气体的过程。合成气所用的氮气和氧气的纯度通常为5级，其中含有约3ppm的氧气和3ppm的水分。基于 Chauhan 等人的研究。

[2]，N₂最初用于在FAB周围创造惰性气氛，但一段时间后发现N₂和H₂的混合物比纯N₂更能有效地防止氧化。然而，在 Pd-Cu 线中，仅使用 N₂ 气体就足以防止氧化

[3]。形成气体中氢气的存在对于球体的形成起着重要作用。添加这种气体的优点包括在 FAB 形成过程中具有额外的导热性、生产更大的 FAB、形成球形 FAB 的趋势以及减少氧化 [13]。

图 5. 引线键合工艺



根据T.

Uno的研究[13]，氢气的影晌是基于两个特性来讨论的：加热功率和电弧收缩。与其他类型的气体相比，H₂由于原子量较低，因此具有较高的电弧电压。电弧电压和热流密度越高，H₂保护电弧的加热输出越大。最后，合成气体中的 H₂ 预计会比纯 N₂

为铜丝提供更多的热能，从而导致 N₂+H₂ 混合物的 FAB 尺寸更大。另一方面，正如已经提到的，H₂ 具有较低的原子量和较低的结合能。因此，在电弧放电中它比氮气更容易向外膨胀，导致氢气的冷却作用更强。热传递导致电弧边缘的温度下降，并且电弧等离子体会从其处散发出来。氢气冷却的最终效果是产生电弧收缩。这种效应就是焊接技术中的“热收缩效应”，这对于合成气体中的 H₂ 非常重要。表4[13]显示了涂层铜线(EX1)和裸线在纯N₂和N₂+H₂中的FAB尺寸。然而，在FAB工艺中注入合成气体时的一个重要问题是H₂含量的增加。氢气除了给FAB工艺带来的优点外，由于氢气是一种易燃气体，它也会带来成本较高和安全性问题等缺点[13]。H₂ 是一种高度易燃气体，属于抗冲击等级 (IIC) 和温度等级 T1 的气体组，这使其成为最热和最危险的气体之一 [14]。氢气的可燃性范围（从4%到77%），加上需要工程控制的点火特性和浮力，需要建立一个系统来确保其安全使用[15]。

表 4. 铜线尺寸

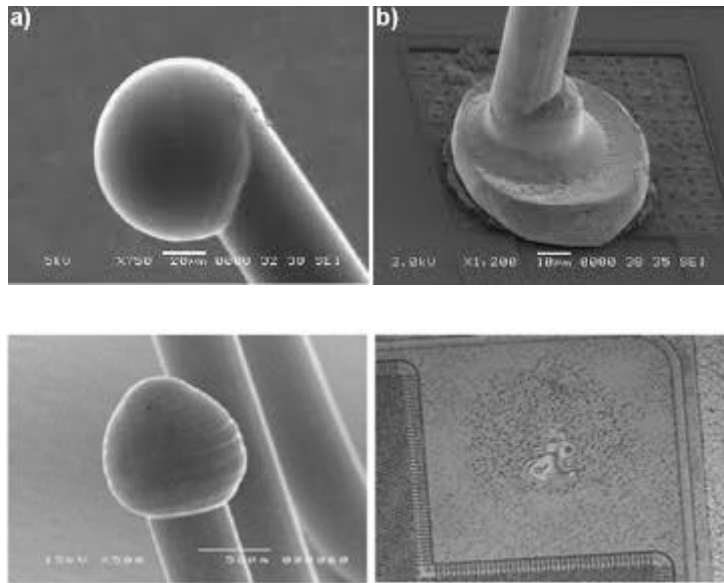
合成气体	EX1	裸铜
氮气	48.7	48.4
氮气+5%氢气	51.5	50.9

4.2.成型气体流量

FAB 的质量可以通过合成气体流量来控制。Pequegnat、Mayer、Persic 和 Zhou [16] 认为，由于流动从层流到湍流的变化以及 EFO 过程的变化，高流速会导致 FAB 的形状误差。图6[17]显示，海湾键是由于输入能量过多或保护气体流速过快而导致FAB倾斜而引起的。

图 6. 由倾斜的 FAB 形成的高尔夫球绑定

输入能量过高或惰性气体流速过快



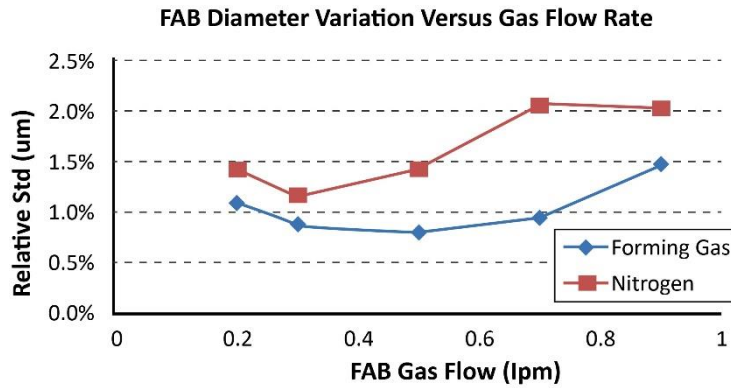
相反，如果合成气体供应不足，FAB就会被氧化，因为氧气通过毛细管穿过的开口流入玻璃管[2]。因此，必须控制FAB形成过程中的气体流速以产生完美的FAB。江等人。

[7]针对特定直径的铜FAB进行了优化成形气体流量和EFO设置的实验。他们报告说，低于最佳水平的流速会导致 FAB

部分氧化和变形。然而，高于最佳水平的流速会导致强烈的对流效应并形成尖球。 Chylak 等人还报道了气体流速对 FAB 形成的影响。 [6] 证明了 FAB

直径的一致性在气体流速范围的高端和低端都变得更差。图7[6]显示了FAB直径与合成气体和氮气的FAB保护气体流量相比的变化。综上所述，合成气体的流量影响着氧化的防止和FAB的形状，因为合成气体的流量低不能防止FAB的氧化，而流量大则会导致形成尖球。

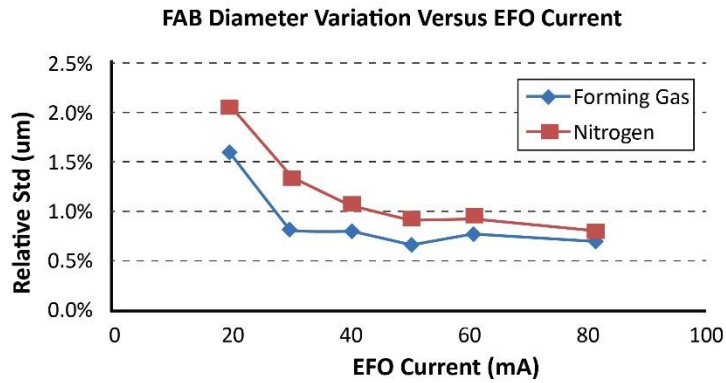
图 7. FAB 直径变化与 FAB 覆盖层相比
 μm Pd-Cu 丝的成型气体和氮气的气体流量



4.3. EFO 流量

EFO 电流会根据导线类型而变化，对 FAB 形成有显著影响。例如，铜线比金线需要更高的 EFO 电流。EFO 电流和 EFO 燃烧时间最终是相关的。EFO 电流越低，产生相同 FAB 直径的 EFO 燃烧时间必须越长。当 EFO 电流增加时，更容易形成棒状球体 [6]。图 8 [6] 说明了合成气体和氮气在不同 EFO 流量下 FAB 直径的变化。线径的变化会影响 FAB 直径，但在铜线键合中仍然不受控制。根据焊丝直径、EFO 电流和燃烧时间，FAB 直径与焊丝直径之比应在 1.6 至 3 之间。因此，EFO 电流和气体流速应根据导线类型和直径进行优化 [2]。

图8. FAB 直径变化与 EFO 电流的关系
用于 15 μm 镀钯铜丝的形成气体和氮气



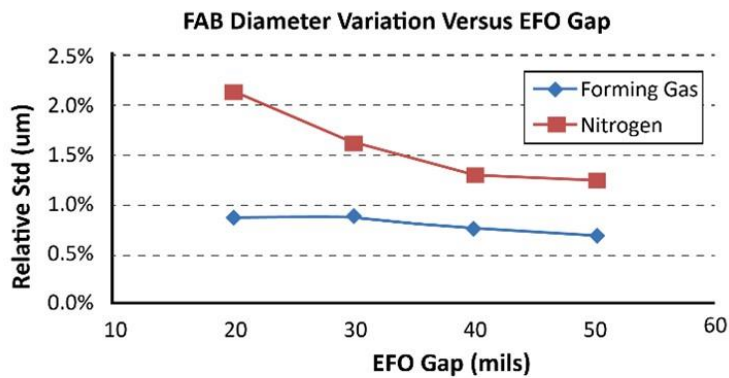
4.4. EFO 的间隙长度

此外，在连接铜线时，FAB 形成之前 EFO

棒的尖端与线端部之间的垂直距离是一个重要的考虑因素。图 9 [6] 显示了合成气体和 N2 在不同 EFO 间隙设置下 FAB 直径的变化。根据 Chylak 等人的说法。

[6]，EFO 间隙越短，FAB 直径的一致性越高。

图 9. 15 μm Pd-Cu 焊丝的 FAB 直径变化与成形气体和氮气的 EFO 间隙设置的关系



综上所述，作为保护气体的气体类型有两种选择：纯N₂气体和95%N₂和5%H₂的混合气体（形成气体）。Pd-Cu 线可使用纯 N₂ 气体，裸铜线建议使用 N₂+H₂

混合气体。除了保护气体外，FAB

形成过程中还需要考虑其他几个参数，包括气体流速、温度、FAB 形成前 EFO

棒尖端与焊丝末端之间的垂直距离以及振幅EFO 电流。

5. 气体混合器及其在铜线键合工艺中的有价值的应用

正如已经提到的，在FAB形成过程中必须避免氧化，以获得对称的FAB，没有尺寸偏差和可靠的连接。通过在接合过程中使用合成气体可以防止Cu的氧化。应该考虑到，如果合成气体的流量控制不当，也会发生氧化。合成气体为氢气和氮气的混合物；氮气是一种惰性气体，可以保护环境中的氧气，而氢气则可以促进焊接过程

[2]。尽管预制的标准气体组合很常见，但现场气体混合具有显著的优势，特别是在高消耗场景、需要特定气体成分或频繁调整气体混合的情况下[18]。创建两种或多种技术气体的高质量且均匀的混合物的最佳方法是使用气体混合器。它们提供具有可调容量的可定制组合，以满足高达 2180 Nm³/h

的可变流量的特定项目要求。对于更高的流量，可以通过集成开关装置同时操作多个混合器。这些设备不仅提高了高峰生产期间的操作灵活性，而且还可以在发生故障或出于校准目的时实现混合器之间的无缝过渡。

5.1. EN 型气体混合器

气体混合器有多种类型，包括机械混合阀、电子混合阀和质量流量控制器（MFC）等流量控制器[19]。

5.1.1.带机械混合阀的气体混合器

该类型有两种版本：计量阀和比例阀。具有两个气体入口和一个气体出口的比例阀非常适合两种气体混合物。对于三种或多种气体，可以使用更简单的机械计量阀，每种气体使用一个阀门[19]。

5.1.2.带流量控制器的气体混合器（质量流量控制器或 MFC）

采用 MFC

技术的气体混合器在混合气体时具有最高的精度。这些系统通过控制各种气体的质量流量来调节气体混合物的生产。气体的体积流量记录在相应的质量流量控制器中，该控制器使用热导率进行调节。然后将各种气体的体积流量组合起来产生所需的混合物[19]。

图 10. 不同类型的气体混合器



5.2. 提高质量的气体混合器配件

5.2.1 分析仪

气体分析仪用途极其广泛，可以快速、精确地测定气体混合物中的气体浓度。通过监测混合物，他们可以向混合器发送反馈，以将浓度保持在设定范围内。这些设备配备了各种高精度传感器，简化了分析仪的操作，使整个过程更加可靠。通过确保过程中的高质量和安全性，分析仪可以集成到需要连续分析（在线）气体浓度的气体混合器中。这些设备可以分析气体混合物中的 H₂ 含量，这会影 响 FAB 工艺的质量。分析仪选项包括以太网接口、USB 接口、远程设置、监控软件、全自动校准、数据记录、数字打印机和电子邮件服务 [19]。

图 11. 集成分析仪（内联）



5.2.2. 监测入口压力

入口压力监测是另一个有助于提高气体混合器质量的附件。通过同时监测多达五种气体的压力，这些设备可确保生产过程的质量和生产率。压力监视器具有视觉和听觉警报，在发生燃气故障时会激活。它们还具有用于潜在爆炸区域的防爆系统 [19]。

图 12. 入口压力监测



5.2.3. 自动切换

连续供气是许多行业的基本要求之一，尤其是半导体行业。并联安装两个自动切换供气源，可实现不间断供气。该设备是高峰需求期间的合适解决方案，并且有助于气体混合器的维护。开关站通过接收来自集成分析仪和压力变送器的数据来监控供气性能。当发生压降时，开关装置切断第一系统的流量并启动第二系统。这一过程确保了通过系统之间的过渡不间断的气体供应和连续生产。此外，在维护或维修期间，可以将其中一台混合机切换到另一系统，而无需中断生产过程。这些操作可以通过触摸屏方便地执行[19]。

图 13. 自动切换



6. 可推动气体混合和气体分析仪进步的潜在创新领域

如前所述，气体混合器在半导体行业中发挥着至关重要的作用，因为它们是铜线键合技术的生命线。然而，为了改进粘合工艺，需要为气体混合器配备最新技术。如上所述，FAB 周围的氧含量对 FAB 的质量以及结合具有显著影响。配有流量控制系统和氧气分析仪的气体混合器可以连续测量氧气含量并相应地控制合成气体的流量。该方法可以显著提高键合工艺的质量并优化合成气体的消耗。另一个问题是气体的纯度，它会影响粘合的可靠性。未来将研究其中一个要素，即气体纯度对FAB形成质量的影响。在这方面需要进一步改进的一个领域是提高通信和设备监控能力。在物联网（IoT）领域，真实事件被识别和处理以产生相关反应。值得注意的是，任何使用软件生成对触发事件的响应的物联网应用程序都可以被视为人工智能（AI）的第一种形式。因此，人工智能在使物联网发挥最佳功能方面发挥着至关重要的作用。随着物联网的进步以及人工智能的不断使用，气体混合器的通信和控制很可能无需人工干预即可实现，并提高效率。

七、结论

鉴于技术的快速发展和半导体行业进步的关键作用，本文概述了引线键合工艺的历史发展及其后续改进。结果发现，黄金成本的上涨导致该行业被铜线替代。本文讨论了使用铜线所面临的挑战以及为改进半导体行业中的键合工艺而采用的技术。在研究铜线键合方法时，球楔键合成为首选方法。然而，对于这种方法，氧化带来了重大挑战，导致成型过程后焊盘损坏和部件连接薄弱。合成气体（氮气和氢气的混合物）已被研究为防止 FAB 工艺过程中氧化的有效解决方案。这种保护气体可以使用最先进的气体混合器产生，并由高科技气体分析仪连续分析和控制。气体混合器可以通过流量控制系统和连续氧气分析仪进行

增强，以提高粘合过程的质量，同时优化流量。此外，这些设备可能配备人工智能功能，实现内置通信和监控功能。

我们特别感谢以下专业支持：Dr. Sepideh Yazdani、Mina Koochaki 和 Setayesh Salarpour

参考

1. C. Marvin Jiawei, "Reliability study of copper wire bonding and through silicon via. Doctoral thesis," Nanyang Technological University Singapore, 2020, doi: 10.32657/10356/142271.IEEE Std 1234™-2020,
2. P. S. Chauhan, A. Choubey, Z. Zhong, and M. G. Pecht, Copper Wire Bonding. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-1-4614-5761-9.
3. P. Chauhan, Z. Zhong, and M. Pecht, "Copper Wire bonding concerns and best practices," Journal of Electronic Materials, vol. 42, no. 8, pp. 2415–2434, May 2013, doi: 10.1007/s11664-013-2576-1.
4. G. Hu, "Comparison of copper, silver and gold wire bonding on interconnect metallization," In Electronic Packaging Technology and High-Density Packaging (ICEPT-HDP), Aug. 2012, doi: 10.1109/icept-hdp.2012.6474674.
5. J. Foley, H. Clauberg, and B. Chylak, "Enabling high volume fine pitch copper wire bonding: Enhancements to process and equipment capability," 3rd Electronics System Integration Technology Conference ESTC, Sep. 2010, doi: 10.1109/estc.2010.5643003.
6. B. Chylak, H. Clauberg, J. Foley, and I. Qin, "Copper Wire Bonding: R&D to High Volume Manufacturing," IMAPS Symposia and Conferences, vol. 2012, no. 1, pp. 000638–000649, Jan. 2012, doi: 10.4071/isom-2012-wa41.
7. Y. Jiang, R. Sun, S. Wang, D. Min, and W. Chen, "Study of a practicable wire bonding method for applying copper wire bond to large-scale integrated circuits," in Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010 Proceedings 60th, 2010.
8. I. Qin, A. Shah, H. Xu, B. Chylak, and N. Wong, "Advances in wire bonding technology for different bonding wire material," IMAPS Symposia and Conferences, vol. 2015, no. 1, pp. 000406–000412, Oct. 2015, doi: 10.4071/isom-2015-wp33.
9. S. H. Kim, J. W. Park, S. J. Hong, and J. T. Moon, "The interface behavior of the Cu-Al bond system in high humidity conditions," 12th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, Dec. 2010, doi: 10.1109/eptc.2010.5702699.

10. Liu, H., Zhao, Z., Chen, Q., Zhou, J., Du, M., Kim, S., Chae, J., & Chung, M. (2011). Reliability of copper wire bonding in humidity environment. 2011 13th Electronics Packaging Technology Conference. <https://doi.org/10.1109/eptc.2011.6184385>
11. Z. Zhong, “Overview of wire bonding using copper wire or insulated wire,” *Microelectronics Reliability*, vol. 51, no. 1, pp. 4–12, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.microrel.2010.06.003.
12. T. Uno, T. Yamada, T. Oyamada, and T. Oda, “High-performance bonding wires for semiconductor packaging,” UDC 621 . 3 . 049 . 77 : 621 . 792 . 042, 2017.
13. T. Uno, “Enhancing bondability with coated copper bonding wire” *Microelectronics Reliability*, 2011, 51(1), 88–96.
14. “ATEX Certified Fans - for Gas Group IIC: Hydrogen,” Axair Fans. <https://www.axair-fans.co.uk/wp-content/uploads/2022/10/ATEX-Certified-Fans-Hydrogen-IIC.pdf>
15. “Hydrogen seen in the light of the ATEX Directives,” Gexcon certification, Dec. 15, 2015. <https://www.gexconcertification.com/2022/12/15/hydrogen/>
16. A. Pequegnat, M. Mayer, J. Persic, Zhou, “Accelerated characterization of bonding wire materials”, in *Proceedings International Symposium on Microelectronics, IMAPS*, pp. 367-373, 2009.
17. H. Xu, C. Liu, V. Silber Schmidt, H. Wang, “Effects of Process Parameters on Bond ability in Thermosonic Copper Ball Bonding”, in *proceedings of Electronic Components and Technology Conference (2008)*, pp. 1424-1430.
18. Witt, “气体混配器”, <https://www.wittgas.cn/consulting-service/white-papers/gas-mixers/>

缩写

- IC 集成电路
- O₂ 氧气
- Cu 铜 铜
- Au 噢金
- IMC金属间化合物
- FAB 自由空气球
- HAZ 热影响区 区域
- EFO 电火焰燃烧器
- Al 铝铝
- Ag 银
- Pd 钯钯
- Pd-Cu 钯铜
- EX1 涂层铜线
- Ni 镍镍
- TI 德州仪器
- N₂氮气
- H₂ 氢气
- FG 形成气体
- IIC 防震等级
- CFD 计算流体动力学
- MFC 质量流量控制器
- IoT 物联网 物联网
- AI 人工智能