

# 引线键合概述

引线键合是微电子封装中最重要、应用最广泛的一种芯片互连技术，是集成电路内部功能与外部世界的“电连接”桥梁。其核心目标是将半导体芯片 (Die) 上的微型金属焊盘与封装基板 (Substrate)、引线框架 (Lead Frame) 或其他电子元件上的对应键合点之间，通过细金属导线 (键合线) 精准、可靠地实现电气和物理连接。

## 核心概念

1. **定义:** 使用精细的金属导线 (通常直径在  $15\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$ , 甚至更细) 作为媒介, 在半导体芯片的输入/输出焊盘和封装载体之间建立电气通道的工艺。
2. **目的:**
  - **电气连接:** 传导芯片与外部电路之间的信号和电源。
  - **物理固定:** 将芯片相对固定在其载体上 (虽不如底部填充胶固定效果好, 但在某些应用中提供初步定位)。
  - **热传导路径 (辅助):** 金属线能在一定程度上协助传导芯片产生的热量。

## 工作原理与过程 (简化步骤)

一个典型的引线键合循环 (Bonding Cycle) 主要包括以下步骤:

1. **键合准备:**
  - 芯片被精确地安装 (粘贴/焊接) 到封装底座 (如引线框架、基板) 上。
  - 芯片焊盘和对应的底座/框架键合区 (Finger) 进行适当的清洁和表面处理 (常通过等离子清洗) 以确保可键合性。
2. **第一点键合 (楔形键合或球形键合):**
  - 键合工具 (劈刀/Capillary) 将金属线穿过并夹持住。
  - 在精确的位置 (通常是芯片焊盘) 上, 通过施加特定的力 (压力)、能量 (超声波振动) 和/或热量, 使导线的一端牢固地连接到焊盘表面。
    - **球形键合:** (最常见, 主要用于第一点) - 导线末端通过高压电子打火形成自由空气球 (FAB), 然后压到芯片焊盘上, 同时施加超声波和/或热量实现连接。材料主要是**金线**。
    - **楔形键合:** - 劈刀直接将线挤压到焊盘表面 (无球形), 利用超声波和压力形成连接。常适用于**铝线**和空间受限情况 (如第二点), 也用于硅基板键合。
3. **线弧形成:**
  - 在第一个键合点完成后, 劈刀带着线按照设定的路径精确地向上 (Z 轴) 和/或横向 (X/Y 轴) 移动到第二个目标键合点位置。这个过程中, 导线被精确地送出并形成特定的空间曲线形状 (线弧), 如低弧度、高弧度、带环弧等。线弧设计对避免短路、确保可靠性至关重要。
4. **第二点键合 (楔形键合):**

- 在第二个目标位置（通常是基板/框架引脚）上，劈刀再次通过施加压力、超声波振动和/或热量，将导线的另一端牢固键合。
5. **尾线切断:**
- 在第二点键合完成后，劈刀略微抬起，并关闭夹持爪夹紧线。同时劈刀会有一个小的回抽动作 (**Clamp Open**)。在第二点上方的导线会由尾线切断机构（通常是电子火焰）熔化切断或利用劈刀特殊设计拉断，形成一个小线尾。
  - 劈刀移动到下一个第一点位置（此时夹持着形成的短尾巴），为下一次键合循环做好准备。
6. **循环重复:** 这个过程以极高的速度（每秒数个到十几个键合点）自动重复，直到完成芯片所有焊盘所需的互连布线。

## 主要键合方法（按能量输入方式）

1. **热压键合:** 主要用于早期。在高温和高压下促使金属塑性变形和相互扩散形成连接。所需温度高（~300°C 以上），应用较少。
2. **超声键合:** 主要依靠高频超声波振动能量（平行于焊盘表面）产生摩擦，去除表面氧化层，促进金属原子间摩擦焊接。通常在室温下进行，或在较低温度下辅以加热。广泛应用于铝线键合（无需球形成）。
3. **热超声键合:** (当今主流，尤其球焊)
  - 结合了适度的加热（~120°C - 200°C，加速扩散）、超声波振动能量（摩擦、软化）和压力。
  - 所需能量（热和超声）更低，键合速度快，对器件损伤小。
  - 是金球键合的标准工艺。
  - 铜键合也必须使用此法（通常还需要一定的键合氛围控制如甲酸氛围），以避免铜高温氧化。

## 关键技术材料 - 键合线

1. **金线:** 应用最广泛，尤其是球键合（热超声）。优点：导电性好、抗氧化、延展性好、易于键合、可靠性高。缺点：成本较高。
2. **铝线:** 主要用于需要楔-楔键合或成本敏感应用。可以是纯铝或铝合金（常含 1% Si 或 Mg 以提高强度）。优点：成本低，导电性好（次于金），强度高（合金）。缺点：相对较硬，线弧成型受限，易氧化导致键合难度增加。
3. **铜线:** 日益普及（尤其在高密度封装中）。优点：导电/导热性好（优于金），成本远低于金，机械强度高，可支持更细线径或更细间距。缺点：易氧化（需氛围或保护层/合金化），键合难度和复杂度增加，对设备要求高，可能存在腐蚀和界面金属化合物可靠性问题（需材料/工艺优化）。

## 关键参数与影响因素

- **线径选择:** 影响载流能力和物理强度，需在成本和性能间平衡（1.0mil / 25μm 常用，高密度封装趋向更细）。

- **线弧高度与形状:** 影响避免碰撞、短路风险、应力和信号完整性。
- **键合参数:** 力 (Force)、超声波功率 (USG)、时间 (Time)、温度 (Temperature)。需要针对具体材料、焊盘、设备 and 应用精确优化。参数不当会导致虚焊、焊点脱落 (Lift-off)、焊点破裂 (Cratering)、根部断裂等问题。
- **焊盘尺寸与间距:** 决定能使用的线径上限和键合精度要求。
- **洁净度与表面状态:** 污染或氧化会严重影响键合质量和可靠性。

## 优势与局限性

- **优势:**
  - **成熟可靠:** 技术高度成熟稳定, 设备产能高 (尤其是球焊), 成本相对较低 (尤其非金线)。
  - **灵活性高:** 对不同封装形式 (DIP, QFP, BGA, CSP 等)、器件尺寸、间距适应性强。
  - **高精度定位:** 现代键合机定位精度可达 $\pm 1\mu\text{m}$ , 适用于微小焊盘和细间距键合。
  - **高产量:** 单颗芯片的键合速度快。
- **局限性:**
  - **最大互连距离受限:** 主要适用于芯片级和器件级短距离互连, 长线弧稳定性差。
  - **寄生效应:** 较长的、卷曲的引线会增加寄生电感、电阻和电容, 影响高频/高速信号性能。
  - **热/机械可靠性问题:** 线弧结构在温度循环、振动等条件下可能存在疲劳断裂、弧垂、短路等风险。
  - **良率挑战:** 工艺参数敏感, 需要精密控制和质量检测。
  - **间距限制:** 随着焊盘间距不断缩小 ( $< 50\text{-}60\mu\text{m}$ ), 键合难度增加, 线短路风险增大。

## 应用场景

引线键合几乎存在于所有类型的微电子封装中:

- 消费类电子产品 (手机、电脑主板芯片等)
- 汽车电子
- 工业控制
- 通讯设备
- 医疗电子
- 航空、航天和军事电子中大量采用

在高性能计算芯片封装中, 它也常作为倒装芯片封装 (用于处理电源或非关键信号连接) 的补充互连技术使用。

## 发展趋势

- **更细线径、更小间距：**满足高密度封装需求（如铜线应用）。
- **提高键合精度与速度：**采用更高精度传感器、马达和控制系统。
- **先进线弧控制：**优化线弧形状以减少寄生效应、提高可靠性（如低弧度、恒弧度控制）。
- **新材料：**探索铜合金、钎包铜线、银线等以兼顾性能、可靠性和成本。
- **工艺自动化与智能化：**集成更多过程监控（PM - Process Monitoring）、机器学习和自适应控制技术提高良率和稳定性。
- **与新型互连技术并存：**虽然面临倒装芯片（Flip Chip）、硅通孔（TSV）、硅中介层（Interposer）、扇外型封装（Fan-Out）等技术的竞争，引线键合凭借其经济性、灵活性和在特定应用中的优势，预计在可预见的未来仍将是主流互连技术之一，尤其在成本和复杂度敏感的中端应用。

## 总结

引线键合是微电子工业中不可或缺的基石技术。它通过精确引导、键合微米级的金属导线，构建了芯片与外部封装世界之间复杂而精密的电连接网络。尽管存在一定的物理和电气性能局限，但其成熟、灵活、经济的特点使其在众多领域持续发挥着核心作用。随着技术的不断演进，引线键合正朝着更细、更密、更智能、更可靠的方向发展，与其他先进互连技术共同推动着电子封装持续进步。它是确保现代电子产品得以正常运作的关键“神经系统”。