

集成电路的封装与测试技术与工艺

万建民

苏州工业园区职业技术学院

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15732

[摘要] 本文对单晶硅为基层集成电路制造过程中的后道工序的封装与测试过程与工艺进行了较为深入阐述,并根据作者多年的成功的半导体制造培训与实践教学经验,提出了工艺过程中开展质量意识教育的方式,供半导体制造爱好者和相关公司技术人员参考与借鉴。

[关键词] 集成电路; 芯片; 晶圆; 晶元; 质量保证

1947年12月23日,20世纪最有影响的发明之一,晶体管研制成功了,由此揭开了人类电子时代的序幕。此后,人类又经过大约十年的艰苦努力,于1958年研制出了第一块平面集成电路芯片,这标志着芯片时代的到来。由此,集成电路就以迅雷不及掩耳之势,在短短几十年里,半导体芯片促成了人类工业史上最大的奇迹。现在,地球上每个人均拥有约百余块芯片,人们可以在一片指甲大小的晶片上集成数亿甚至几十亿只晶体管。小小的芯片迅速地改变了人类社会,成为信息社会发展的基石。目前,集成电路的发展规模与技术水平已成为衡量一个国家综合实力的重要标志^[1]。

集成电路定义:通过一系列特定的加工工艺,将晶体管、二极管等有源器件和电阻、电容等无源器件,按照一定的电路互连关系,“组装”在一块半导体单晶片(如硅或锗)上,封装在一个外壳内,执行特定的电路或系统功能。习惯上把这种小原器件称作芯片(Chip),又叫集成电路(Integrated Circuit,缩写IC)。

初期的集成电路大多是在锗(Ge)晶体上制造的,现在多采用硅来制造。硅(Si,又称矽)是地球上储量最丰富的元素之一,制造芯片的硅通常是从石英岩中提炼的。经过多次提纯和其它处理过程,得到纯度达99.99999999%的硅单晶体,再切割成厚约0.25~1mm的晶圆薄片(Wafer),供制造集成电路使用。

一般集成芯片内部是由多层不同的材料层组成的,每层

都有自己特定的设计图形和电气性质,这些图形现在主要是通过光刻的方法制作到芯片上的。集成电路的制造工艺十分复杂,从晶圆片到集成电路成品大约需要一个月的时间、数百道工序,但总体可以把集成电路制造过程分为前道工序和后道工序。将工程师设计好的电路电气图形和电气性质主要通过光刻的方法,经过几十到数百道工序转移制作到单晶硅晶圆上,就是半导体制造前道工序;电路被制造在晶圆上后,还需要对其进行一系列的封装与测试过程,最后变成最终的产品(Chip),是半导体制造的后道工序。本文主要对半导体制造的后道工序封装与测试过程与工艺进行阐述。半导体制造封装与测试过程,主要有三个阶段,共18道分工序组成。下面就这三个阶段包含工序进行分述,供半导体制造爱好者和相关公司技术人员参考与借鉴:

一、第一阶段:先进入一段单体加工工序,在一防静电,无尘室内进行:

1.取出晶圆(Wafer mounting):前道工序电路制造检验合格的晶圆,送经到封装与测试相关单位或专业工厂,一般由该单位或工厂经专业培训考核合格的员工开袋,把晶圆从包装成卷(每片晶圆一般间隔一张绝缘纸)晶圆卷桶里一片一片用特制夹持工具小心取出,按正反面(一般晶圆有电路一面朝上)要求,有序放入特制晶圆提篮中。也可由设计的专用机械手按程序从卷桶里取出晶圆,按顺序和方向放入晶圆提篮中。

2. 贴膜 (Taping): 装满晶圆的提篮由贴膜机工作人员放置在贴膜机上固定放置位置, 贴膜机上配置的带真空吸嘴的机械手会按设定的程序把一片晶圆按序取出 (真空吸盘吸出), 放置在贴膜机中间位置的圆形真空吸盘上 (没有电路的晶圆面吸住), 贴膜机在带有电路的晶圆正面贴上一层专用保护膜, 以便晶圆在后续加工时保护上面的电路不受损坏。贴好圆形保护膜后机械手再次把该晶圆吸住, 放回晶圆提篮里原位置, 再有序取出另一片晶圆。重复以上操作, 直到晶圆提篮中所有晶圆都贴好保护膜, 贴膜机信号灯提示该篮晶圆贴膜全部完成。贴膜机工作人员拿走该篮, 换上新的一个晶圆提篮再去进行下一篮贴膜工作。

3. 背面打磨 (Back grinding): 贴好保护膜的晶圆提篮, 由打磨机工作人员放置在贴膜机上固定放置位置, 打磨机上配置的带真空吸嘴的相同类型机械手 (各封装用机械手结构都基本相同) 会按设定的程序把一片晶圆取出 (真空吸盘吸出), 放置在打磨机中间位置的圆形真空吸盘上 (有电路的贴有保护膜的晶圆面吸住), 由打磨机上垂直下来的专用砂轮水平机械打磨, 打磨该片晶圆背面, 并进行实时精密检测, 以便达到所要求的晶片厚度 (通常晶圆厚为 230 μm 、320 μm 、80 μm , 而电路本身基本为 10 μm), 同时喷有打磨液助磨。打磨好后机械手收到电信号会再次把该晶圆吸住, 放回晶圆提篮里原位置, 再有序取出另一片晶圆。重复以上操作, 直到晶圆提篮中所有晶圆都打磨好, 打磨机信号灯提示该篮晶圆打磨全部完成。打磨机工作人员拿走该篮, 换上新的一个晶圆提篮再去进行下一篮打磨工作。

4. 撕膜 (Detaping): 撕膜与贴膜基本相反。晶圆打磨后的提篮由撕膜机工作人员放置在撕膜机上固定放置位置, 撕膜机上配置的带真空吸嘴的机械手会按设定的程序把一片晶圆取出 (真空吸盘吸出), 放置在撕膜机中间位置的圆形真空吸盘上 (打磨后的没有电路的晶圆面吸住), 撕膜机在带有电路保护膜的晶圆正面再贴上一层专门粘度更高粘膜, 用上下运动的气缸向上动作顶起该粘度更高粘膜, 由该粘度更高粘

膜把晶圆圆形保护膜粘牢后撕去。撕去保护膜晶圆由撕膜机机械手按设定的程序放回到晶圆提篮里原位置, 再有序取出另一片晶圆。重复以上操作, 直到晶圆提篮中所有晶圆都已撕去保护膜, 撕膜机信号灯提示该篮晶圆撕膜全部完成。撕膜机工作人员拿走该篮, 换上新的一个晶圆提篮再去进行下一篮撕膜工作^[2]。

5. 晶圆超声波清洗 (Ultrasonic cleaning): 在经过以上几道工序后, 提篮里的晶圆片需进行表面清洗。在特制的浸槽式清洗设备各间清洗槽内, 配有相应温度的清洗药水、清水、和去离子水, 加上一定量超声波振动的洗涤方法, 连篮把篮内晶圆上面的污物清洗去掉。清洗一般采用各清洗槽人工提篮方式进行。

6. 烘干 (Drying): 清洗后沥水并适当电风力吹去滴水, 烘干工作人员把清洗后提篮连篮内晶圆放入智能型烘干炉内烘干, 去除掉提篮和晶圆表面的水分水膜。根据实际烘干设备大小, 一般每次可同时烘干几个提篮产品。

7. 晶圆的切割 (Sawing): 这道工序比较关键, 一不小心可能会导致整块晶圆碎裂形成碎晶元而损失严重。晶圆切割工作人员, 把烘干后的晶圆提篮放置在晶圆切割机上固定放置位置, 切割机上配置的带真空吸嘴的机械手会按设定的程序把一片晶圆有序取出 (真空吸盘吸出), 放置在晶圆切割机中间位置的圆形真空吸盘上 (没有电路的晶圆面吸住), 切割机由电脑数控精密控制, 控制其工作台 X—Y 方向精密行程和 90 等角度精密旋转。晶圆切割机上高速旋转的金刚石切刀 (Blade) 配合该工作台 X—Y 方向精密行程及 90 等角度精密旋转, 切至该晶圆厚度的 95% 左右, 使晶圆上每个晶元 (Die) (每个晶元可最终成为一个独立的芯片) 既相对独立分离出来, 又仍然还连成一块整体晶圆 (厚度的 5% 左右未割开), 但连接已是非常脆弱。切割后的晶圆由晶圆切割机的机械手按设定的程序放回到晶圆提篮里原位置, 再有序取出另一片晶圆。重复以上操作, 直到晶圆提篮中所有晶圆都已切割完, 晶圆切割机信号灯提示该篮晶圆切割全部完成。切割机工作

人员拿走该篮, 换上新的一个晶圆提篮再去进行下一篮切割工作^[3]。

二、第二阶段: 切割好的提篮里晶圆, 如下的4道工序, 将在一防静电, 更加无尘的室内的生产流水线上进行:

1. 封装支架上点胶 (Epoxy): 每片芯片封装支架上一般平行排列着两排多个可预装晶元框体, 由专业厂用合格铜或铝等金属薄片片材自动冲压而成, 也可由封测单位或公司根据自己芯片产品所需自动冲压制造而来。封装支架由专用机械手放入流水生产线上后, 流转到特定位置时, 由该工序的自动点胶机的针式点胶头, 在封装支架每一预装晶元框的中间位置承接处, 点上一点特定胶水, 以便在下一工位的晶元粘贴时, 晶元放置在该承接位置后, 把它打磨过的没有电路的面与该金属支架点胶处的承接位置及时粘合住。

2. 晶元的粘贴 (Die attach): 这道工序比较复杂, 由两个不同的机械手按设定的程序协调配合完成。点胶后的封装支架随生产线继续自动流转到晶片的粘贴特定位置, 自动晶元粘贴机带真空吸嘴的第一个机械手会按设定的程序, 在打磨机工作人员放置在贴膜机上固定放置位置的提篮里有序取出一片晶圆 (真空吸盘吸出), 放置在粘贴机特定位置的圆形真空吸盘上 (没有电路的晶圆面吸住), 另一特制的带真空吸嘴的第二个机械手把自动工作台移送来的晶元从该晶圆上吸出 (晶元因被切割过, 非常脆弱, 很容易被真空吸嘴吸出) 并转移到点有胶水的芯片封装支架承接处, 由前道工序放置的胶水把它及时粘住。所有合格的晶元按设定的顺序都转移到各封装支架点有胶水的位置后, 自动晶元粘贴机第一个机械手会再次从提篮里有序取得一块切割过的晶圆。重复以上操作, 直到晶圆提篮中所有晶圆都用完, 晶元粘贴机信号灯提示该篮晶圆粘贴全部完成。晶元粘贴机工作人员拿走该篮, 换上新的一个切割好的晶圆提篮再去进行下一篮晶元粘贴工作。

3. 胶水烘干 (Solder): 晶元粘贴后的芯片封装支架回到生产流水线上继续前行。封装金属支架每一片单体一般是平

行双排型的, 也就是每一封装支架会相应平行粘贴上两排多个晶元, 带晶元的封装支架在流经该生产线一段较长, 下面有电阻丝通电加热的设备后, 胶水就被烘干, 各晶元更牢固粘合在封装金属支架上。

4. 金线键合 (Wire bonding): 烘干后的带有粘合晶元的芯片封装支架, 其每一独立框体一般都有一套完整的细细的专门引线。在金线键合机上, 这些引线端头都会用高纯度的金线 (一般为高纯度的极细金属铜线或铝线) 与晶元上的极小连接点有序牵引连接起来 (极小的焊接), 也就是用金线把晶元上的连接点 (Pad) 和封装支架独立框体上的端头 (Lead) 连接起来, 使晶元上电路能通过各引线将来与外部电路导通。芯片封装支架上各单元金线键合都完成后, 由金线的键合机配置的机械手吸住装入到一种封装支架提篮内相应位置。重复以上操作, 直到封装支架提篮装满, 金线键合机信号灯提示该篮金线的键合全部完成。工作人员拿走该篮, 换上一个空的封装支架提篮, 再次进行金线的键合工作。

三、第三阶段: 下面又再次进入单体加工工序, 在防静电, 无尘室内进行:

1. 压模 (Molding): 完成金线键合封装支架提篮, 由压模工作人员放到压模机 (一种注塑机) 上固定放置位置, 该压模机配置的机械手会按设定的程序, 把提篮内的封装支架一片一片吸出, 整齐放置到注塑机工作台上 (一次可放多张), 用高温液态的 EMC (热固性树脂) 把晶片及金线及其接头等组件塑封好, 待冷却固化后就起到保护作用, 以防止周遭环境 (如热辐射、机械冲击、化学腐蚀等) 对这些等组件的影响。塑封后的封装支架由压模机机械手按程序重新放回封装支架提篮内原位置。

2. 引脚成型 (Trim/Form): 塑封后的封装支架提篮, 由该工序工作人员放置到一自动冲压机固定放置位置, 自动冲压机的机械手会按设定的程序, 把封装支架提篮内封装支架一片一片吸出, 由自动冲压机及其专门模具, 把塑封好的芯片的裸露部分的金属外引线, 冲压分离并折弯成客户所需的

引脚形状, 芯片个体就真正独立出来(这时可叫 Chip)。该工序工作人员会把独立芯片机械引导装入条状容器中暂存。

3. 电镀 (Plating): 该工序是在引脚成型后的芯片的裸露部分金属引脚 (Lead) 表面镀上一层金属保护膜(一般为银或金等金属保护膜), 以提高芯片引脚的导电性和增加裸露金属抵抗外界环境影响能力, 该工序工作人员会把电镀好的芯片机械引导装入条状容器中暂存。该工序也可外包实现。

4. 印字 (Marking): 该工序工作人员, 一般在专用机电设备上, 用较细的激光发射装置在每一芯片塑封背面雕刻上(能量烧刻原理, 烧刻深度可调节激光强弱旋钮, 但不可烧刻到塑封的晶片和金线及其接头等保护部位), 代表该产品名称、生产日期、商标、生产地等之类的芯片各类信息, 同时也可提高芯片的防伪等级, 激光雕刻成本相对较高, 一般用于较高级或专用芯片; 也可由印刷机器在芯片的塑封背面用丝网印刷方法直接印刷上该芯片的这些信息, 一般用于常见普通芯片, 但防伪等级一般, 成本相对较低。印字后的芯片, 由该工序工作人员机械引导方法装入条状容器中暂存。

5. 测试 (Inspection): 芯片印字后, 下道工序是分排进入自动检验测试机进行其功能测试。由测试机上机械手, 按设定的程序, 在移动工作台上, 把待测芯片排列成设定行和列(多片可同时测试), 进入测试机内部, 测试每一芯片在以上多道加工工序后, 其设计的电气功能是否仍然存在, 同时模拟测试该芯片的机械、电气抵抗外界环境条件的能力(如抵抗高温、超低温、机械振动等恶劣环境能力等), 并分出该芯片所处的相应质量等级(如 A、B、C、D 等分类质量等级), 最后从各等级通道机械引导传出方法装入各自条状容器中暂存。等级之外的测试不合格芯片, 被从该测试机背面退出窗口清退出来, 用废料箱接住等待不合格处理。

6. 芯片包装 (Packing): 功能测试后等级不同的合格芯片条, 按要求送入包装工序进行包装。根据客户需求和要求,

用不同芯片包装机, 一般包装成带状、盘状、管状、散料状等几种形式的一种或几种, 以适应客户所使用的贴片机进行贴片工作或组装成其它电路元器件。

7. 防静电打包 (Boxstock / PD): 芯片包装后, 最后送入打包区进行防静电打包。打包人员一般穿好防静电服, 戴好绝缘手套, 按规定的包装数装入一个防静电的大金铂袋中, 最后用该袋口的铜丝索锁口, 运入仓库。在仓库内也要把所有打包好的金铂袋, 用锁口铜丝索连在一起并与仓库内专用接地线连接, 以防止高于+5 伏静电把生产出来的芯片击穿而造成损坏。金铂袋里芯片, 在给客户送货的运输途中, 也要把所有金铂袋的锁口铜丝索连在一起并与专业运输车内专用接地线连接, 以防运输途中磨擦引起高于+5 伏静电把生产出来的芯片击穿而造成损坏。

以上的 18 道加工工序, 基本包括了芯片的集成电路封装与测试技术过程中所有加工过程。需要说明的是, 每道工序, 都会有专业检测人员的抽检和最终检测。质量是企业的生命, 让每道工序工作人员懂得自己所从事的工作与岗位都会直接影响到产品的质量, 只有做好自己的工作, 遵循标准规范地工作, 才能保证自己范围内的工作不影响产品质量。而且只有每一个员工每一个工作岗位都做好了才会提供出高质量的产品, 才能增强自己企业的市场竞争力与占有率, 才能使自己企业处于不败之地。所以, 集成电路封装与测试技术过程, 也包括每一工序的质量保证过程。

[参考文献]

[1] 林天亮, 刘唐唐. 基于集成电路测试 HexVS 电源的设计方法[J]. 电子质量, 2025, (03): 61-65.

[2] 徐夏凡, 张忠立, 王灿, 等. 集成电路探针测试多物理场耦合数值分析[J]. 国外电子测量技术, 2025, 44 (02): 141-147.

[3] 陈玥. 集成电路设计中的 EDA 仿真技术应用[J]. 集成电路应用, 2025, 42 (02): 32-33.