

## 等离子体及其在印刷电路制造领域的应用

JACK ZHAO, JAMES GETTY, LOU FIERRO  
MARCH PLASMA SYSTEMS  
2470-A Batea Avenue, Concord, CA 94520, USA  
公司网址: <http://www.u-effort.com>

### 摘要

从远程通讯, 军事, 航空和航天, 到普通商业市场, 不断提高的功能和要求正驱动对复杂的高性能电路板的需求. 高I/O 和快速要求高密度的相互连接, 导致了高密度的多层板结构. 从6层到64层或更多, 这些高级板结构寻求高的纵横比和更小的孔径. 钻孔和孔中除污的传统方法受到很大的限制. 传统的化学处理工艺方法不再有效. 射频, 低压等离子体工艺对表面处理有效, 经济, 及有利环境. 本文将讨论等离子体的原理及其它在PCB制造过程中的应用.

关键词: 等离子体, 印刷电路板

### 引言

市场的需求和集成电路技术的发展使得集成电路装置越来越小, 但功能却越来越好. 同时, 对印刷电路板(PCB)的功能要求也在上升. 导致它的制造工艺更复杂和更具有挑战性. PCB材料技术的改善和更小结构的使用和由于**传统湿法**工艺的限制, 导致了对PCB板制造过程中对等离子体工艺日益增加的需求. 具有高密度连接点的多层PCB板要求细微节距, 微孔, 和具有高玻璃转化温度(T<sub>g</sub>)和低损失因子的新材料的使用. 当这些材料解决了热膨胀系数(CTE)和速度问题, 由于**传统湿法**工艺的限制, 在PCB制造工艺中却形成了新的困难.

由于液体不能渗透到**非标准**多层板的微孔中, 传统的高锰酸盐化学处理工艺具有其局限性. 另外, 高锰酸盐化学处理工艺不能有效清洁激光制成的位于内层的盲孔中的碳. 其它湿式化学法, 象酸蚀, 对刻蚀化学惰性的介电材料有困难.

射频, 低压等离子体工艺克服了上述缺点因为等离子体本身具有良好的渗透性能和其工艺能够被精确控制的能力. 等离子体工艺增加了包括聚四氟乙烯(Teflon)在内的高级材料的表面能, 提供了优秀的层压复合和敷镀通孔必需的润湿性能. 通过去除钻孔工艺中产生的树脂污染物和来自于激光成孔中的碳副产品, 等离子体允许金属敷镀到内层, 等离子体工艺能够刻蚀具有高纵横比的通孔和微孔. 它是有效, 经济, 及有利环境的工艺.

随着层数和电路密度的增加, 复杂和精制的电路板需要等离子体工艺完成去污/凹蚀, 除碳, Teflon表面活化, 和表面准备. 例如: 有6层到64层的多层板; 具有高纵横比孔的板, 具有微孔, 埋孔, 盲孔和激光成孔的PCB板; 哪些制造过程中使用新类型树脂, 以Teflon为基本材料和化学惰性材料的PCB板, 和具有树脂和Teflon混合材料的混合电路板.

### 等离子体介绍

等离子体被称为固态, 液态, 气态以外的第四态. 它是部分电离的气体, 由电子, 离子, 自由基, 中性粒子, 及光子组成. 等离子体本身是含有物理和化学活泼粒子的电中性混合物. 这些活泼自由基粒子能够做化学功, 而带电原子和分子通过溅射能够做物理功, 结果, 通过物理轰击和 化学反应, 等离子工艺能够完成各种材料表面改性, 包括表面活化, 污染物去除, 交叉链接和刻蚀[1, 4].

等离子体的表面改性是气相与固体表面相互反应的结果。等离子体物理反应是指等离子体中的带电粒子在电场中获得能量去撞击表面。通过能量转换，表面分子片段和原子从表面溅射出来，因而使污染物从表面清除。物理溅射能够改变表面的微观形态，在分子级范围内增加表面粗糙度。从而改善表面的黏结性能。

典型的等离子体物理清洗工艺是氩气等离子体工艺。因为氩气本身是惰性气体，因此等离子态的氩气并不和表面发生反应，而是通过物理溅射使表面清洁。

等离子体化学反应是等离子体自由基通过化学氧化和还原反应完成表面改性。因为等离子体中的自由基非常活泼而能降低化学反应中的活化能 [2]，从而有利于化学反应的进行。这种化学反应在通常条件下是不能进行的。通过真空泵，化学反应中产生的易挥发产物会从基板表面和真空腔中去除。通过等离子体工艺，表面污染物被清除和表面被清洗。

等离子体化学反应的例子是氧气或氢气等离子体表面清洗工艺。氧气等离子体中的氧自由基非常活泼而容易与有机污染物中的碳和氢发生反应，产生二氧化碳，一氧化碳和水。这些易挥发物被抽提出真空腔使基板表面清洁。氢自由基则易于同金属氧化物中的氧结合，产生水而使金属氧化物被去除和金属表面被还原。

典型的等离子体系统由五大部分组成：真空腔，气源，真空泵系统，射频电源和电极。真空腔是等离子体处理的工作室。气源供给等离子体工艺所需的工作气体。供PCB板处理的常见气体是氧气(O<sub>2</sub>)，氮气(N<sub>2</sub>)，氢气(H<sub>2</sub>)，四氟化碳(CF<sub>4</sub>)和氩气(Ar)。真空泵系统提供等离子体处理所需的低压和去除表面上和真空腔中的挥发性副产物。射频电源提供气体电离，产生等离子体所需的能量。电极则转移射频能量给真空腔中的气体。整个等离子体处理装置的示意图见图一。

等离子体工艺具有诸多优点。主要表现为：

1. 符合环保的工艺  
在等离子体清洗工艺中没有使用任何化学溶剂。因此，等离子工艺没有污染物排放
2. 等离子清洗工艺成本较低，容易使用。可以处理各种材料
3. 具有优良的均匀性和重复性。
4. 维护及保养费用较低。
5. 适合于高级PCB制造和化学惰性材料的表面改性。
6. 较小的占地面积。

印刷电路板制造中的等离子体工艺

PCB制造过程中面临许多挑战，诸如钻孔污染物，表面残余物，表面微弱的黏结力，和表面活化。等离子体工艺能够解决PCB制造过程中的这些问题。主要的等离子体应用包括微孔中污染物清除和凹蚀，表面活化，光刻胶残余物清除，及碳残余物清除。

等离子体通常用于钻孔后的钻污清除。多层PCB板上的机械钻孔创造了树脂残余物，这种残余物黏附在微孔壁上，阻碍了用于电路连接的金属敷镀。钻孔以后，为了确保可靠的电接触，去除在内层孔壁上的树脂污染物和凹蚀是必需的(见图二，图三)。对今天的多层板结构，由于湿法化学工艺中的毛细管效应的存在以及受限于高性能材料的使用，传统的化学方法并不有效。相反，等离子体工艺有效地去除了具有一般和高纵横比通孔的PCB板上的环氧树脂，聚亚XIAN胺，高Tg混合物，混合材料和其它树脂残余物。

双面和多层聚四氟乙烯通孔板的表面活化对增加表面的润湿性是必需的。化学工艺不能适合处理混合在同一块面板中的Teflon和其它树脂。然而在相同的工艺中等离子体却能处理。等离子体处理增加了Teflon的表面能,它提供了优秀的层压复合和敷镀通孔所需的润湿性。所有纯的或有填料的Teflon材料需要等离子体活化,从而改变表面能,提高无电镀铜黏结能力。

在PCB板制造过程中,等离子体工艺被用来去除光刻胶残余物。它可能会残留在成形后的微间距电路和内层上。如果此残余物在刻蚀前未被去除,电路板会形成短路。等离子体工艺能有效地从内层和面板去除光刻胶残余物而没有影响电路图形。它也能去除阻焊剂在焊盘上的残留物,提高键合能力和可焊性。

等离子体技术也可用于挠性材料的内层准备。等离子体处理改变了具有无支撑聚亚XIAN胺的挠性材料的表面构形和润湿性。典型的聚亚XIAN胺挠性材料的表面光滑难以层压复合。因为难以控制去除材料的量,以及无支撑聚亚XIAN胺对很多化学物品是惰性的,因此化学工艺并不有效。等离子体工艺不仅使表面变粗糙,促进了层压,而且活化了表面,改善了黏结能力。

制造盲孔需要使用激光钻孔技术。激光钻孔后的副产品碳阻碍了无电电镀的黏着性能而必须在下一步工艺以前被去除。等离子体工艺能够去除孔壁和俘获盘上残余的碳和树脂。

等离子体处理也可应用于树脂阻焊剂表面改性,改善字符在表面的黏结能力。等离子体改变了阻焊剂的表面能和润湿性,产生了良好的黏结能力

#### 等离子体参数

等离子工艺的选择取决于PCB材料类型和后继工艺对材料表面的要求,并由等离子体参数控制。等离子体参数包括二部分:一部分是与设备结构相关的,象电源,真空系统,腔体结构;电极组合和气体进出口设计。另一部分是等离子体工艺参数,包括输入功率,压力,气体,气流流量和工艺时间。二者都对等离子体的性能和有效性扮演了重要角色。

随着PCB制造行业的技术进步,等离子体处理设备也随之改进。等离子体处理均匀性是一个关键的应用参数。如果孔壁没有被均匀地处理,钻污会存在而阻碍敷镀金属及电连接。PCB板上孤立点的过度刻蚀会引起敷镀折叠和空隙。影响处理均匀性的关键参数包括电极结构,气流和排气。新的等离子体设备设计确保了均匀性,为批量生产提供可重复的结果。

电极: 在决定处理工艺均匀性时,电极结构扮演了重要的角色。电极转换电源发生器的射频能量到作业气体,引起气体被部分电离。平行板电极具有接地和接电源两极或新型的180度相位差的两极,PCB板被放置在电极之间,暴露在主要等离子区。主要等离子区含有最高浓度的由等离子体产生的活性粒子。多组平行电极被安装在真空腔中使适应多块板的同时处理。为了均匀地分配功率到每个电极板上,射频耦合连接非常关键。汇流排连接通常是交叉的,从电极的一端到另一端,从而在电极上产生一个均匀的电流。

PCB板被悬置在电极中间以确保每一面被均匀地处理,并给予通孔一个快速和均匀的刻蚀速度。取决于真空腔的尺寸,成对电极的数目能允许同时处理多达32块或更多的标准板(18英寸X24英寸或是457X610毫米)。

气体: 通过气体流量控制器,气体被引入真空腔。每个工作气体流量的精确控制是成功处理PCB板的关键。气体比例和流量的控制是成功工艺必需的。因为活化的气体粒子消耗和被抽出真空腔,接近气体进口的产品会处理得较快。由于这个原因,气体分布的控制必须保持以确保真空腔中所

有PCB板的均匀处理。 变换的气体进口和出口允许气体流向反转。 处理过程中的气体流向反转确保每块板暴露在相似的反应环境，导致均匀地刻蚀。

抽空： 当抽空阀打开时，真空泵抽空腔体中的气体至操作压力。 真空泵连续地去除被消耗的气体及允许新的活泼粒子进入腔体。 抽空阀必须适当地按置在远离气体进口处。 如果抽空口位置太接近气体进口处，在到达PCB板以前，活泼粒子会从腔体中移去。

除了设备设计本身，在等离子体刻蚀过程中等离子体工艺参数也扮演了重要的角色。 重要的等离子体工艺参数包括气体的选择，压力，功率及处理时间。

工艺气体： 工艺气体决定了表面上哪一类反应(化学或物理反应)的发生。 表面污染物和后续的工艺决定了气体的选择。 通常氧气等离子体或四氟化碳和氧气，氮气混合的等离子体被用来去除有机残余物，象光刻胶残余物和钻污。 表面活化可以通过氩气，氧气或其它混合气等离子体来实现。

压力： 通常等离子体物理工艺比化学工艺需要较低的操作压力。 物理的等离子体清洗需要带电粒子在通过碰撞失去活性以前撞击表面。 如果工艺压力很高，在到达基板表面之前，带电粒子与其它粒子经历了大量的碰撞，因而降低了它的清洗能力。 带电粒子碰撞之间移动的平均距离称为粒子的平均自由程，它与压力成反比。 物理工艺要求低压扩大平均自由程，从而增加轰击力。 通常物理等离子体工艺的操作压力大约在80到200毫托(1000毫托=1毫米汞柱)。

化学工艺依赖等离子体产生的气相自由基与基板表面发生反应。 化学等离子体工艺中高压的使用是由于在基板表面需要高的反应粒子浓度。 由于较高的气压，较高反应粒子浓度在腔体中形成，因而化学反应工艺有较快的清洗速度。 通常，等离子体化学工艺的压力是从200到400毫托。

功率： 通过增加等离子体中的离子密度和离子能量，高输入功率增强了表面清洗速度。 离子密度是单位体积中离子的数量。 由于相对高的反应粒子浓度，提高离子密度将增强清洗速度。 离子能量决定了离子做物理功的能力。

时间： 通常减少处理时间和增强产量我们的目标。 处理时间必须与输入功率，压力和气体类型统筹考虑。 提高输入功率将减少处理时间。

温度控制： 工艺温度控制是板与板和批与批之间重复性的关键参数。 系统温度需要控制因为等离子体刻蚀速度是温度的函数。 随着系统温度的增加，刻蚀速度呈指数增长。 如果系统没有温度控制，随着工艺时间的增加真空腔温度趋向增加。 结果，对每一批产品其刻蚀速度是不一样的，系统的重复性很差。

在等离子处理过程中，电极和被处理板的温度会升高。 通过冷却电极，在刻蚀过程中板的温度能基本保持恒定。 这将允许被处理板达到适当的温度，从而获得合理的刻蚀速度而保持过程控制和可重复性。

## 工艺举例

去除钻污： 为保证可靠的电接触，从钻孔中去除钻污是必须的。 钻污的去除要求使用三种气体：氧气(O<sub>2</sub>)，氮气(N<sub>2</sub>)，和四氟化碳(CF<sub>4</sub>)。 三阶段等离子体工艺被用于完成去除钻污[3]。

阶段一： PCB板预热阶段。 为了达到对线路板材料足够的化学反应速度，根据不同的树脂，线路板必须被加热到80至100度。 O<sub>2</sub> 和N<sub>2</sub>混合气等离子体被用于加热线路板。 高射频

输入功率会加快加热过程.

阶段二： 去除钻污/回蚀阶段. O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, 和CF<sub>4</sub>混合气等离子体创造了化学反应去除通孔中的树脂. 射频输入功率被降低到能提供足够的能量保持合适的线路板温度和刻蚀均匀度. 根据去除钻污的量, 典型的去除钻污操作过程大约需要15分钟. 如果回蚀是必需的, 工艺时间需要增加.

阶段三： 利用O<sub>2</sub>等离子体去除第二阶段工艺遗留下来的灰化副产品和氟副产品.

Teflon活化： 在线路板设计中, Teflon材料越来越流行. 然而由于它的憎水特性, 无电镀铜或直接敷镀金属是困难的. 因此, Teflon表面活化是必须的. 纯的和含有填料的Teflon材料要求不同的处理工艺.

纯Teflon材料： 一级等离子体处理活化通孔. 最常用的气体是氢气(H<sub>2</sub>)和氮气(N<sub>2</sub>)的混合气. 因为只活化Teflon表面和增加表面润湿性, 线路板预热是不需要的. 只要真空腔达到操作压力, 操作气体和射频功率就被输入. 许多纯Teflon板需要处理20分钟. 因为Teflon材料的还原特性(返回到不可润湿的表面), 无电镀或金属敷镀工艺应该在等离子体处理以后的48小时内进行.

含有填料的Teflon材料： Teflon材料中的填料包括不规则的玻璃纤维, 织网玻璃增强物和陶瓷材料. 含有填料的Teflon PCB板需要二级处理. 第一级是清除和刻蚀填料. 第一级典型的工作气体是CF<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, 和N<sub>2</sub>的混合气. 第二级和处理纯Teflon材料完全相同.

光刻胶残余物去除和挠性覆盖层刻蚀： 相同的工艺参数被用于清除光刻胶残余物和刻蚀挠性覆盖层表面. 用氧气作为工作气体的一级等离子体工艺满足这二个应用. 通常刻蚀挠性内层需要花费15分钟改变表面外形, 增强层压复合. 15到30分钟足够去除各种厚度的光刻胶残余物, 为下道刻蚀工艺留下一个清洁的节距.

碳去除： 技术驱动更小的孔的利用, 激光制孔的使用越来越普通. 除去需要氩气(Ar)外, 激光钻孔后碳的去除的工艺与去除钻污工艺很相似. 取决于激光形成的孔的质量, 从微孔和盲孔成功地去除碳和树脂, 一级或二级等离子体工艺是需要的.

某些激光工艺遗留大量的烧焦的树脂和碳在孔口周围和基座上. 这需要二级等离子体工艺处理.

第一级： CF<sub>4</sub>和O<sub>2</sub>混合形成的等离子体去除位于孔边和孔中的树脂. 处理时间是15到30分钟.

第二级： 这一级是去除孔边和孔中的碳, 为敷镀作准备. 混有少量氧气的氩气等离子体可去除碳和残留的树脂. 处理时间是10到20分钟.

如果激光形成的孔很干净, 只有极少量树脂, 一级等离子体处理已经足够. 在这种情况下就使用Ar, CF<sub>4</sub>, 和O<sub>2</sub>混合气等离子体.

混合多层板(具有不同材料以适应温度和信号要求的印刷电路板)： 等离子体可用于去除混合材料的除污. 具有树脂和Teflon的层压板需要去污和Teflon表面活化.

由于混合板部分地由制刚性板的树脂制成, 钻污必需被去除. Teflon材料不形成钻污. 但是它的

孔壁必须被活化以增加润湿性。 相同等离子体工艺中的去污和Teflon活化使用四种气体和四个阶段：

阶段一： O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>等离子体用于板加热。

阶段二： CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>等离子体用于去除钻污。

阶段三： O<sub>2</sub>等离子体用于去除灰化副产品和氟副产品。

阶段四： H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>等离子体用于活化Teflon表面。

等离子体工艺有很大的处理范围，这允许在PCB制造过程中有灵活性。 等离子体处理结果与输入功率，气流，压力，处理时间及线路板表面积直接相关。

## 结论

去除孔中残余物的传统制造方法正在失去它的有效性。 新技术中，高性能板需要等离子体的使用。 典型的等离子体工艺包括去除钻污，Teflon活化，光刻胶残余物去除和碳去除。 等离子体工艺具有可塑性满足当前PCB制造的挑战。