

低介电常数封装材料的等离子体处理工艺优化

何 均

深圳市容微精密电子有限公司 广东深圳

【摘要】聚焦低介电常数封装材料的等离子体处理工艺。阐述等离子体处理对低介电常数材料性能提升的关键作用，详细分析处理过程中如气体选择、功率调节、时间控制等工艺参数对材料介电性能、表面特性及机械性能的影响。通过深入研究与实践探索，提出一系列优化等离子体处理工艺的有效策略，旨在显著改善低介电常数封装材料性能，满足电子封装领域不断提升的性能需求，推动行业发展。

【关键词】低介电常数材料；等离子体处理；工艺参数；材料性能；电子封装

【收稿日期】2025 年 8 月 12 日

【出刊日期】2025 年 9 月 17 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20250041

Optimization of plasma treatment process for low dielectric constant packaging materials

Jun He

Shenzhen Enmicro Precision Electronic Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong

【Abstract】 This paper focuses on optimizing plasma processing techniques for low-dielectric-constant packaging materials. It elucidates the critical role of plasma treatment in enhancing material performance, with detailed analysis of process parameters such as gas selection, power regulation, and time control that influence dielectric properties, surface characteristics, and mechanical properties. Through in-depth research and practical exploration, this study proposes effective strategies to optimize plasma processing techniques. These strategies aim to significantly improve the performance of low-dielectric-constant packaging materials, meet the growing performance demands in the electronic packaging industry, and drive technological advancement.

【Keywords】 Low-dielectric-constant materials; Plasma processing; Process parameters; Material performance; Electronic packaging

引言

在电子设备持续向小型化、高性能化迈进的当下，低介电常数封装材料至关重要。其能有效降低信号传输延迟与功耗，提升设备运行速度与稳定性。传统材料性能在面对日益严苛的要求时渐显不足。等离子体处理工艺作为优化材料性能的有效手段，可精准调控材料表面与内部结构。深入探究其优化策略，对提高低介电常数封装材料性能、突破电子封装技术瓶颈、推动电子产业发展具有重要意义。

1 等离子体处理工艺关键参数剖析

在等离子体处理低介电常数封装材料领域，气体种类的选择作为工艺基础，直接影响材料表面改性的化学反应路径。氧气等离子体凭借其强氧化性，能够与材料表面的有机污染物发生剧烈氧化反应，将碳氢化合物等杂质分解为二氧化碳和水蒸气排出。这种清洁

过程不仅去除表面污染物，还会在材料表面引入羟基、羧基等极性基团，形成具有反应活性的表面状态。相比之下，氩气等离子体利用惰性气体特性，通过离子轰击产生物理溅射效应。高能氩离子撞击材料表面时，会使表层原子获得足够动能脱离晶格，这种原子级别的剥离作用可有效去除表面吸附的气体分子与氧化层，暴露出新鲜、活性的材料表面。

功率与时间的协同调控构成等离子体处理的核心动力学参数。功率的提升直接增加等离子体中的电子与离子能量，高能量粒子具备更强的穿透能力与反应活性。当功率较低时，粒子与材料表面的相互作用以物理溅射和浅层化学反应为主；而功率升高后，高能粒子能够深入材料表面，引发化学键断裂与重组，甚至导致材料表面碳化^[1]。处理时间则决定了这种能量传递与物质转化的累积程度。初期阶段，表面改性效果随时间延

长呈线性增长,材料表面的微观结构逐渐发生变化;但超过一定阈值后,处理效果的提升幅度减缓,过度处理反而会导致表面结构破坏。

真空度作为维持等离子体稳定运行的关键环境参数,与气体放电过程密切相关。在低真空环境下,气体分子密度高,粒子间碰撞频繁,容易导致电子与离子复合,抑制等离子体的产生与维持。高密度气体分子会削弱粒子的平均自由程,降低其到达材料表面的能量与效率^[2]。相反,过高的真空度会使气体分子密度过低,难以形成足够的等离子体密度,并且增加设备的抽气时间与能耗成本。理想的真空度设置需要平衡等离子体产生效率与粒子能量传递,通常需根据气体种类、设备结构与处理材料的特性进行调整。

2 工艺参数对材料性能影响探究

等离子体处理工艺参数的变化对低介电常数封装材料介电性能的影响具有显著的非线性特征。介电常数作为衡量材料储存电能能力的关键指标,与材料内部的极化机制紧密相关。在等离子体处理过程中,合适的功率与时间设置能够诱导材料表面形成纳米级孔隙结构,这些孔隙的引入有效降低了材料的有效介电常数。其作用机理在于,空气的介电常数远低于固体材料,孔隙的存在相当于在材料内部嵌入低介电常数介质,从而减少整体极化损耗。等离子体处理还能改变材料分子链的取向与排列,通过破坏无序的分子堆积结构,减少分子间的偶极子相互作用,进一步降低极化程度。

材料表面特性的改变是等离子体处理最直观的效果体现。气体种类与处理时间的合理选择能够精确调控表面形貌。使用含氟气体进行等离子体处理时,可在材料表面形成纳米级柱状结构,显著增加表面粗糙度;而通过控制氩气等离子体的处理时间,能够实现从轻微抛光到深度刻蚀的不同表面纹理。这种微纳结构的改变不仅提升了材料与其他材料的机械嵌合能力,还通过增加表面积提高了表面能,改善表面润湿性^[3]。等离子体处理引发的表面化学反应会引入新的官能团,如羟基化处理可提高材料亲水性,氨基化处理可赋予材料生物相容性或可键合性。这些表面化学性质的改变为后续的表面涂层、印刷电路制作等工艺提供了理想的预处理条件。

材料机械性能的优化是等离子体处理的另一重要应用方向。合理的工艺参数设置能够在材料表面形成梯度结构改性层。在处理初期,等离子体中的活性粒子与材料表面原子发生化学反应,形成致密的氧化物或碳化物层;随着处理深入,离子轰击产生的压缩应力会

在材料表面形成残余应力层,这种应力状态能够有效阻碍裂纹的萌生与扩展^[4]。在处理环氧树脂基封装材料时,精确控制等离子体能量与处理时间,可使材料表面形成纳米级强化层,显著提高其抗拉伸与抗弯曲性能。过度处理可能导致材料内部产生微裂纹与结构缺陷,降低材料的韧性与疲劳寿命。机械性能优化需要在表面强化与内部损伤之间找到平衡,通过工艺参数的精细调控实现材料力学性能的定向提升。

3 现有工艺问题及优化策略提出

当前等离子体处理工艺在实际应用中面临的均匀性难题,本质上源于反应室内等离子体分布的空间非均匀性。这种非均匀性主要由气体流动特性、电极结构与电场分布共同作用导致。在大面积处理场景下,反应室边缘区域的气体流速与中心区域存在差异,导致等离子体密度分布不均。平行板电极结构中边缘效应的存在,使得电场在边缘区域增强,引发局部等离子体密度升高,造成材料表面处理强度不一致。这种空间差异性在柔性电子封装、大面积显示面板等对材料一致性要求极高的领域尤为突出,严重影响产品良率与性能稳定性。材料本身的形状与放置方式也会影响等离子体的作用效果,如复杂形状的材料表面因遮蔽效应导致部分区域处理不足。

设备运行稳定性问题制约着等离子体处理工艺的工业化推广。等离子体设备的长期运行会受到多种因素干扰,其中功率波动是最常见的不稳定源。高频电源的老化、阻抗匹配器的性能下降以及冷却水温度变化,都会导致输入功率偏离设定值,进而影响等离子体的能量密度与活性。气体流量的不稳定同样不容忽视,气体管路的压力波动、质量流量计的精度误差以及气体混合比例的偏差,都会导致等离子体化学组成与反应活性发生变化^[5]。设备的热管理系统失效会引起反应室温度升高,影响等离子体的物理化学性质。这些不稳定因素的累积效应不仅导致产品质量波动,还增加了工艺控制的难度,使得批次间产品性能一致性难以保证。

针对上述问题,工艺优化需从设备结构与控制策略两方面协同改进。在反应室设计上,采用多孔气体分布板与气体导流装置,能够有效改善气体的初始分布均匀性;引入射频偏压技术或磁约束技术,可增强等离子体的空间均匀性。对于复杂形状材料的处理,可采用行星式旋转样品台或动态扫描装置,确保材料各部位接受均匀的等离子体作用。在设备控制层面,构建多参数闭环控制系统,通过高精度传感器实时监测功率、气体流量、真空度与温度等关键参数,并利用 PID 控制

算法实现参数的动态调节^[6]。采用模块化设计理念,选用高可靠性的电源模块、气体流量控制器与真空系统,降低设备故障率。通过定期维护与预防性保养,建立设备性能监测数据库,实现设备状态的预测性维护,从而提升整体工艺稳定性与生产效率。

4 优化工艺在实际生产中的应用验证

优化后的等离子体处理工艺在电子封装材料生产中展现出显著的技术优势。以某 5G 通信设备的高频 PCB 封装材料为例,传统工艺下材料的介电常数波动大,难以满足高速信号传输需求。采用优化工艺后,通过精确控制氩氧混合气体比例,利用氩气的物理轰击与氧气的化学刻蚀协同作用,在材料表面形成纳米级多孔结构。这种结构不仅降低了材料的介电常数,还通过引入极性基团改善了表面润湿性,为后续的铜箔压合工艺提供了理想的表面条件。在功率与时间参数控制方面,基于前期实验建立的工艺窗口模型,采用分段式处理策略:初期以较低功率进行表面清洁,中期提高功率实现深度改性,后期降低功率进行表面修复,有效避免了材料损伤。

材料表面特性的优化对封装工艺的可靠性提升具有直接贡献。经过处理的材料表面形成均匀的微纳结构,理想的表面粗糙度显著增加了与封装胶粘剂的接触面积,提升了界面结合强度。表面化学性质的改变使得材料表面能提升,极大改善了胶粘剂的浸润性,有效减少了气泡、空洞等封装缺陷^[7]。在某高端芯片封装生产线的应用中,采用优化工艺处理后的材料显著提升了封装良率,降低了生产成本。表面改性层的存在还增强了材料的耐化学腐蚀性,延长了封装器件的使用寿命。

机械性能的提升进一步拓展了低介电常数封装材料的应用边界。优化工艺在材料表面形成的梯度强化层,有效提高了材料的抗弯曲疲劳性能。这种性能提升源于表面残余压应力的引入与内部结构的致密化^[8]。在实际应用中,经处理的封装材料能够更好地适应电子产品小型化、轻薄化带来的机械应力挑战,尤其在可折叠设备、穿戴式电子设备等领域展现出独特优势。通过规模化生产验证,优化工艺的重复性与稳定性良好,提

升了生产效率,为电子封装产业的技术升级提供了可靠的工艺解决方案。

5 结语

对低介电常数封装材料的等离子体处理工艺优化研究,在提升材料性能方面成果显著。通过深入剖析工艺参数,明确其对材料性能的影响规律,提出针对性优化策略并在实际生产中成功验证。未来,随着电子技术不断发展,应持续探索新工艺、新方法,进一步优化等离子体处理工艺,提升材料综合性能,满足电子封装领域更高需求,推动产业迈向新高度。

参考文献

- [1] 冯雨,胡燕娜,乔旭光,等. 低温等离子体处理蒜片减菌工艺优化及品质变化[J/OL].现代食品科技,1-11[2025-08-02].
- [2] 李宛鑫,石大为,张鑫. 低温等离子体工艺对胡麻脱胶工艺的影响[J].上海纺织科技,2024,52(11):60-63.
- [3] 马子涵,王洪艳,袁少飞,等. O₂ 和 N₂ 等离子体处理对 HDPE 表面润湿性的影响研究[J].塑料科技,2024,52(09):20-26.
- [4] 袁青青,李箫波,张正浩,等. 等离子体高温熔融处理工艺实验研究[J].核动力工程,2024,45(S1):203-207.
- [5] 吴家秀,郭雪滢,刘旭,等. 鲜食甘栗冷等离子体杀菌工艺优化及其品质分析[J].食品科技,2024,49(03):25-33.
- [6] 王成勇,唐梓敏,丁峰,等. 铅基非晶合金电解质等离子体抛光工艺及废液处理[J].中国表面工程,2024,37(01):267-279.
- [7] 金霞,韩笑,薛微婷,等. 基片等离子体处理对 PTFE 微波基板性能的影响[J].塑料工业,2024,52(02):54-59+78.
- [8] 丁春奎. 等离子体处理对间位芳纶织物拒水性能的影响[J].江苏丝绸,2023,53(05):16-20.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS