

科技研究

浅谈氮化铝陶瓷及其表面金属化

李生

杭州淮瓷科技有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i6.8125

[摘要] 现代电子设备朝着微型化、高频化方向发展，传统封装材料在此情况下已难以满足高密度热管理方面的需求，于是氮化铝陶瓷表面金属化技术便成为了连接陶瓷基板与金属电路的关键。该技术通过构建起稳定且可靠的金属-陶瓷界面，能实现电信号传输以及热量耗散这双重功能。但是其有着复杂的工艺过程，在这过程中存在的界面结合强度与热匹配方面的问题，依旧是制约其产业化应用的瓶颈。本文针对氮化铝陶瓷的特性及其表面金属化技术体系展开系统性梳理，目的在于为优化金属化工艺给予理论层面的支撑。

[关键词] 氮化铝陶瓷；表面金属化；材料科学；应用研究

A brief discussion on aluminum nitride ceramics and their surface metallization

Li Sheng

Hangzhou Huai porcelain Technology Co., LTD.

[Abstract] Modern electronic devices are evolving towards miniaturization and high-frequency operation. Traditional packaging materials can no longer meet the demands of high-density thermal management in this context, making aluminum nitride ceramic surface metallization technology a critical link between ceramic substrates and metal circuits. This technology establishes a stable and reliable metal-ceramic interface, enabling both electrical signal transmission and heat dissipation. However, it involves complex processes, with issues such as interface bonding strength and thermal mismatch remaining bottlenecks for its industrial application. This paper systematically reviews the characteristics of aluminum nitride ceramics and their surface metallization technology systems, aiming to provide theoretical support for optimizing metallization processes.

[Key words] aluminum nitride ceramic; surface metallization; materials science; applied research

一、引言

氮化铝陶瓷的产业化应用始终与其表面金属化进程紧密关联，而这种关联的根源在于现代电子器件对材料综合性能的严苛要求。高热导特性使氮化铝成为大功率芯片基板的理想选择，不过要实现电路互联功能就必须借助表面金属化来克服陶瓷固有的绝缘特性。聚焦于当前研究的主要是物理气相沉积和化学镀这两种主流技术路径，物理气相沉积依赖高真空环境下的薄膜沉积工艺，而化学镀则是利用化学还原反应来形成金属

镀层。不管选取哪一种方法，决定封装可靠性的核心要素始终是对界面扩散层厚度的控制以及金属层晶体取向的优化。深入理解氮化铝表面活化机制与金属成膜动力学，对于突破现有技术局限具有重要指导意义。

二、氮化铝陶瓷的特性与应用

(一) 氮化铝陶瓷的组成

氮化铝陶瓷 (Aluminum Nitride Ceramic) 是以氮化铝 (AlN) 为主晶相的陶瓷。AlN 晶体以 (AlN₄) 四面体为结构单

元共价键化合物,具有纤锌矿型结构,属六方晶系。化学组成 Al 65.81%, N 34.19%, 比重 3.261g/cm³, 白色或灰白色, 单晶无色透明, 常压下的升华分解温度为 2450℃。为一种高温耐热材料。热膨胀系数 (4.0-6.0) ×10⁻⁶/℃。多晶 AlN 热导率达 260W/(m·k), 比氧化铝高 5-8 倍, 所以耐热冲击好, 能耐 2200℃ 的极热。在制备过程中, 原料粉末的纯度直接影响最终产物品质, 工业级氮化铝粉末常含有微量氧杂质, 这些氧原子可能以固溶形式存在于晶格间隙或形成氧化铝第二相。为优化烧结性能, 部分配方会引入微量氧化物添加剂, 这些添加剂在高温下与表面氧化铝反应形成液相, 最终以非晶态物质分布于晶界区域。致密化烧结后的陶瓷体呈现出由主晶相与少量晶界相组成的复合结构, 其中连续的三维网络状氮化铝晶粒构成材料骨架, 而晶间玻璃相则作为结构粘合剂存在。氮化铝晶体本身具备优异的化学惰性, 其共价键特性使得材料在常规酸碱环境中保持稳定, 但晶界相的成分差异可能导致局部区域耐蚀性波动。不同工艺路线形成的显微结构特征直接影响着材料对后续加工工序的适应性, 这种内在关联性成为调控陶瓷性能的重要切入点^[1]。

(二) 氮化铝陶瓷的物理与化学特性

氮化铝陶瓷由共价键主导的六方纤锌矿结构赋予其独特性能组合, 晶格中铝原子与氮原子通过强键合形成三维网络骨架, 这种致密排列使其在室温下即表现出接近金属铝的热导率, 同时维持了陶瓷材料固有的电绝缘特性。材料内部声子散射机制的抑制使得热量传递效率显著优于氧化铝等传统陶瓷, 而低介电常数特性源于氮化铝晶体中电子极化效应的弱化。化学稳定性方面, 氮化铝在常温下对多数酸碱介质呈现惰性, 但在高温熔融盐或强氧化性环境中可能发生表面氮元素的部分解离, 其抗热震性得益于适中的热膨胀系数与高断裂韧性的协同作用, 微观裂纹扩展在晶界处受到氮化铝晶粒的钉扎效应限制, 宏观表现为断裂前的塑性变形能力优于典型脆性陶瓷。

三、氮化铝陶瓷表面金属化的必要性与挑战

(一) 表面金属化的目的与意义

氮化铝陶瓷表面金属化的核心诉求源于其作为电子基板材料时功能需求的矛盾性, 陶瓷本体有着优异的绝缘特性, 然而电子器件却对导电互联功能有着硬性要求, 二者形成了不可调和的冲突, 所以必须借助金属化工艺在绝缘基底上构建起可控的导电通路。氮化铝因具有高热导率而拥有承载大功率芯片

的能力, 在封装环节中, 金属引线与陶瓷基板进行物理结合时需要有金属化层充当界面过渡媒介, 此过渡层一方面要满足导电导热的功能需求, 另一方面还需在热循环载荷下维持界面结构的机械稳定性。金属化工艺的本质是要在原子尺度对陶瓷表面状态进行重构, 通过化学键合或者物理锚定的方式形成金属-陶瓷复合界面, 该复合界面需同时兼顾电信号传输效率以及长期服役可靠性, 其质量对功率模块在高频振动、温度骤变等极端工况下的性能衰减速率有着直接决定作用。现代电子封装对金属化层有了超薄化与高精度图形化的新需求, 传统厚膜技术难以达到微米级线路的加工精度, 薄膜沉积工艺则面临着台阶覆盖性与结合强度的双重考验, 正是这种矛盾促使着金属化技术朝着多尺度复合工艺的方向去发展。

(二) 氮化铝陶瓷表面金属化面临的挑战

氮化铝陶瓷表面金属化过程中, 界面结合强度的提升受限于陶瓷与金属材料间的本征物理差异, 两者热膨胀系数的不匹配容易在温度循环中引发界面应力集中, 导致金属层剥离或微裂纹扩展。陶瓷表面残留的微量氧杂质在高温处理时可能形成非化学计量比的过渡层, 这种亚稳态界面相的生成会削弱金属镀层与基体的电子传输效率, 同时晶界处富集的玻璃相与金属原子间的扩散速率差异可能形成局部成分偏析。金属化工艺对陶瓷表面状态的高度敏感性也构成现实矛盾, 原始基材的晶粒尺寸分布与表面粗糙度直接影响着镀层形核的均匀性, 而高温烧结或等离子体处理等活化手段可能改变陶瓷近表面区域的显微结构, 进而影响后续金属沉积的连续性^[2]。工艺参数调控需在镀层致密性与基体热稳定性之间建立动态平衡, 这对设备精度与工艺窗口的协同优化提出了多维度的技术要求。

四、氮化铝陶瓷表面金属化技术

(一) 金属化方法分类

氮化铝陶瓷表面金属化技术的多样性源于不同应用场景对界面性能的差异化需求, 化学镀工艺借助自催化还原反应在非导电基体的表面去构建金属层, 这一过程无需外接电源就能实现镍、铜等金属的均匀沉积, 这种方式特别适用于复杂三维结构的全包裹式镀覆。而电镀技术与之不同, 它主要依赖已经导电化的表面来进行电解沉积, 通过对电流密度以及电解液组分加以控制, 便可精准地调控镀层的厚度与晶体的取向。物理气相沉积是利用高能粒子对靶材进行轰击, 使得金属原子以气相的形式迁移到陶瓷表面。其中, 溅射镀膜或者蒸镀工艺所形

成的金属层有着纳米级的致密性,这种特性使其适用于制备超薄功能镀层。至于化学气相沉积,它是借助气态先驱体在高温基体表面发生热分解或者化学反应,如此生成的金属膜和基体之间会存在化学键合,虽然这样能让镀层结合强度得到显著提升,但也受到沉积温度对陶瓷热稳定性影响的限制。直接覆铜法将高纯度铜箔与预处理后的氮化铝基板在高温保护气氛中键合,铜层与陶瓷界面的共晶反应形成冶金结合,但铜箔高温氧化问题需通过精确控氧解决,活性金属钎焊则采用含钛、锆的活性钎料在真空环境中实现陶瓷与金属的连接,钎料中活性元素与陶瓷表面的化学作用可有效破除界面能垒,不过钎焊温度窗口与残余应力控制仍是工艺优化的关键参数。

(二) 关键工艺参数

氮化铝陶瓷表面金属化工艺的核心在于构建稳定且高强度的金属-陶瓷界面,其中表面预处理环节通过物理或化学手段调控陶瓷表面微观形貌与化学活性,直接影响后续金属沉积的均匀性和结合强度。物理粗化方法利用机械喷砂或激光刻蚀在陶瓷表面形成微纳米级沟壑,这种三维拓扑结构能够增大金属层与基底的机械嵌合面积,而化学粗化则依靠酸碱溶液选择性腐蚀晶界区域,暴露出更多活性位点以增强界面化学键合能力。活化处理通常采用贵金属胶体吸附或离子注入技术,在陶瓷表面形成具有催化活性的纳米粒子层,为化学镀或电镀提供均匀的金属成核点,避免金属层因局部成核密度差异产生针孔或裂纹缺陷。金属层材料选择需综合考虑导电性、热匹配性及界面反应趋势,铜因其优异导电导热特性成为功率器件金属化的首选,但铜与氮化铝界面在高温下易发生铝元素向铜层的扩散迁移,形成金属间化合物导致界面电阻率上升;银镀层虽能抑制界面反应却面临成本与银迁移问题的制约,金层虽化学稳定性最佳但受限于高昂成本难以大规模应用^[3]。界面反应机理的研究揭示金属沉积初期存在原子级互扩散现象,金属原子沿氮化铝晶界渗入形成扩散阻挡层的深度控制,成为平衡界面结合力与电性能的关键要素,而沉积过程中氧元素在界面处的偏聚行为可能引发金属氧化,需通过工艺参数优化抑制氧分压波动对界面化学组成的影响。

(三) 性能评价指标

氮化铝陶瓷表面金属化技术的性能评价应聚焦于材料服役场景的核心诉求,作为界面可靠性直接表征指标的结合强度,其评价要考量金属层与陶瓷基体间的化学键合强度以及机

械互锁效应。研究人员常通过拉伸剪切试验对断裂路径在界面或镀层内部的扩展模式进行观察,界面反应层的成分梯度与厚度分布对结合强度产生非线性影响。在评估导热与导电性能时,需同步追踪金属镀层载流子迁移率和陶瓷基体声子传输的协同效率,电子输运能力直接受到金属层晶粒取向与晶界杂质浓度的影响,而陶瓷表面处理工艺所引入的缺陷有可能形成热传导散射中心,工程师要在镀层厚度优化和界面热阻控制之间建立起动态平衡。耐热循环性能的验证需模拟实际工况中的温度波动频率与幅度,金属与陶瓷热膨胀系数的差异在交变温度场中引发界面应力积累,镀层蠕变行为与陶瓷基体弹性模量的匹配度决定界面裂纹萌生的临界条件,长期热暴露下金属镀层的氧化倾向与陶瓷晶界相的稳定性进一步增加了评价体系的复杂度。多维度性能指标间的耦合关系要求评价方案必须整合微观结构表征、力学测试与热学模拟的综合数据链。

结语

氮化铝陶瓷表面金属化技术的突破,实质上是对材料界面科学的深度探索。金属镀层与陶瓷基体的热膨胀系数匹配度对器件的使用寿命起着直接影响作用,这使得金属化工艺对界面过渡区的梯度结构进行精确调控成为必然要求。引入纳米级过渡层的方式能够有效实现对热应力集中状况的缓解,而借助表面预处理来进行微纳结构改性,则可显著提升金属层附着力。未来技术发展进程中应着重关注材料体系与工艺参数的协同优化情况,尤其是开发低温金属化技术,以此来满足柔性电子封装方面的需求。

[参考文献]

- [1]徐志刚,夏熠.董青石/氮化铝陶瓷的组成、结构及力学性能[J].佛山陶瓷,2024,34(04):27-28+32.
- [2]徐帅,赵兴科,赵增磊.工艺参数对氮化铝陶瓷表面激光金属化层电阻的影响[J].表面技术,2023,52(05):398-404.
- [3]李奕杉,刘帅.陶瓷基板用氮化铝粉体专利解析[J].中国科技信息,2024,(04):14-16.

作者简介:李生;出生年月:1986.12,性别:男,民族:汉,籍贯:河南、信阳,学历:硕士,职称:中级工程师,职务:科技部副总,公司研究方向:集成电路陶瓷封装外壳,氧化铝、氮化铝 HTCC 基板/外壳/器件。产品:陶瓷双列直插式外壳、陶瓷针栅阵列外壳、陶瓷扁平外壳、陶瓷焊盘阵列外壳等。关于陶瓷封。