

LED 封装中荧光粉的无机化学特性与应用分析

李玉容

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120028

摘 要： 本文围绕 LED 封装展开，论述荧光粉在其中的关键作用。涉及荧光粉光转换、晶格结构、热稳定性、表面修饰等特性，探讨铝酸盐、氮化物体系荧光粉相关规律，介绍多基质荧光粉配比、封装工艺参数优化等方法，并列举多种应用案例，最后指出基于无机化学特性可提升封装性能。

关 键 词： LED 封装；荧光粉；封装工艺

Analysis of Inorganic Chemical Properties and Applications of Phosphors in LED Packaging

Li Yurong

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article centers on LED packaging, discussing the crucial role of phosphors within it. It delves into the properties of phosphors, including light conversion, lattice structure, thermal stability, and surface modification. The article explores the relevant principles of aluminate and nitride-based phosphors, introduces methods such as the proportioning of multi-substrate phosphors and optimization of packaging process parameters, and provides various application examples. Finally, it highlights that packaging performance can be enhanced based on inorganic chemical properties.

Keywords： LED packaging; phosphor; packaging process

引言

随着《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》于2021年颁布，其中对绿色发展与科技创新的强调，为LED产业发展提供有力政策支持。LED封装结构中，荧光粉在光转换、色域调控等方面作用关键，其晶格结构、热稳定性、表面化学修饰等特性对封装可靠性影响重大。不同体系荧光粉的晶场调控、量子效率、高压合成工艺等方面研究，为提升发光性能提供理论依据。在高显色照明、植物照明等应用领域，荧光粉配比优化、封装工艺参数调整能满足特定需求。相关研究对推动LED封装技术发展，实现产业高效、稳定、节能发展具有重要意义。

一、LED封装技术基础与荧光粉功能定位

（一）LED封装结构对荧光粉的技术需求

LED封装结构中，LED芯片、基板材料与荧光涂覆层协同工作。LED芯片发射蓝光，荧光涂覆层中的荧光粉吸收蓝光并转换为其他颜色光，实现白光发射，这一过程需与基板材料良好适配。封装工艺对荧光粉分布密度有具体要求，因为荧光粉分布直接影响光的转换效率与均匀性^[1]。若分布过密，可能导致自吸收现象，降低光提取效率；分布过疏，则无法充分转换蓝光，影响白光质量。从技术需求看，荧光粉需具备高转换效率，以高效将蓝光转换为所需颜色光；要有良好的热稳定性，因封装过程及工作中会产生热量，热稳定性差会影响发光性能；还需与封装材料有良好兼容性，确保在封装体系中能稳定发挥功能，保障LED长

期稳定工作。

（二）荧光粉在光转换中的核心作用

在LED封装中，荧光粉在光转换里扮演着核心角色。LED芯片发出的光通常为短波长的蓝光或紫外光，无法满足人们对于不同颜色光的需求。荧光粉能够吸收芯片发出的部分光，并将其转换为较长波长的光，从而实现光的颜色转换。其波长转换效率直接影响LED的光效，若转换效率高，更多的原始光被有效利用，光效得以提升^[2]。而色域调控能力则决定了LED所能呈现的颜色范围，对显色指数有着关键影响。优秀的色域调控可使LED呈现出更丰富、逼真的色彩，进而提高显色指数，为人们提供更好的视觉体验。通过对荧光粉在光转换中核心作用的深入理解与优化，能显著提升LED封装产品的性能。

二、荧光粉无机化学特性表征体系

（一）晶格结构与热稳定性分析

在LED封装中，对荧光粉晶格结构与热稳定性的准确分析至关重要。通过XRD技术，能够精确测定荧光粉的晶体结构，确定其晶格参数，进而分析晶体缺陷率。晶体缺陷的存在可能影响荧光粉的发光性能及与封装材料的相容性，进而影响封装可靠性^[3]。同时，利用TG-DSC联用技术可获取荧光粉的相变温度。相变温度反映了荧光粉的热稳定性，若在LED工作过程中温度接近或超过相变温度，荧光粉的结构与性能会发生改变，严重影响LED的发光质量与寿命。因此，精确掌握荧光粉晶格结构与热稳定性的关键参数，对于提升LED封装的可靠性具有重要意义。

（二）表面化学修饰与抗老化机理

在LED封装中，荧光粉的表面化学修饰与抗老化机理至关重要。硅烷偶联剂包覆是常用的表面化学修饰手段，能显著增强荧光粉的耐湿氧腐蚀性能。硅烷偶联剂分子一端可与荧光粉表面的羟基等基团发生化学反应，形成化学键合，另一端则可与周围的有机聚合物相互作用，从而在荧光粉表面构建起一层稳定的保护膜^[4]。这层保护膜能有效阻挡湿氧等侵蚀性物质与荧光粉的直接接触，减缓其化学降解和性能衰退。通过分析荧光粉在不同湿度和氧气浓度环境下的发光性能、结构变化等指标，可实现对耐湿氧腐蚀性能增强机制的量化评价。深入理解表面化学修饰与抗老化机理，有助于优化荧光粉的性能，提升LED封装的可靠性与稳定性。

三、典型荧光粉体系特性对比研究

（一）铝酸盐体系荧光粉

1. YAG:Ce³⁺的晶场调控规律

在LED封装所用的铝酸盐体系荧光粉中，YAG:Ce³⁺的晶场调控规律对其发光性能至关重要。基于Tanabe-Sugano模型，Ce³⁺离子的配位环境会显著影响其发射光谱红移量。Ce³⁺离子周围配位体的种类、数量和排列方式等因素，均能改变晶场强度和对称性。当晶场强度改变时，Ce³⁺离子的能级分裂发生变化，进而导致发射光谱产生红移或蓝移。通过对Ce³⁺离子配位环境与发射光谱红移量进行定量关系分析^[5]，可深入了解晶场调控规律，为精确调控YAG:Ce³⁺荧光粉的发光颜色、提高发光效率提供理论依据，有助于在LED封装中实现更理想的光谱匹配和光学性能。

2. 热猝灭效应机理验证

为验证铝酸盐体系荧光粉热猝灭效应机理，借助Arrhenius方程对其进行拟合计算激活能。温度升高会致使荧光粉发光强度衰减，此过程蕴含物理化学本质变化。通过Arrhenius方程拟合，能精准获取激活能数值，该数值可直观反映热猝灭过程中克服能垒所需能量^[6]。基于此，深入剖析温度与激活能的内在联系，明确温度诱导发光强度衰减的根本原因。从物理化学层面阐释，热猝灭可能源于晶格振动加剧、电子跃迁受阻等因素。激活能的计算结果可作为判断热猝灭程度及分析其机理的关键依据，

从而为优化铝酸盐体系荧光粉在LED封装中的热稳定性提供理论支撑，推动其在实际应用中的性能提升。

（二）氮化物体系荧光粉

1. 晶场调控与量子效率关系

在氮化物体系荧光粉中，晶场调控与量子效率关系密切。晶场对荧光粉中激活离子的电子云分布产生作用，进而影响其能级结构。以Eu²⁺掺杂的氮化物荧光粉为例，不同的晶场环境会导致Eu²⁺离子的5d能级劈裂程度不同^[7]。当晶场强度合适时，5d-4f跃迁概率增大，量子效率得以提高。若晶场调控不当，会引起非辐射跃迁增强，导致量子效率降低。通过精准调控晶场，如改变基质晶格结构或调整阳离子配位环境，可以优化氮化物体系荧光粉的量子效率，为实现高效LED发光提供关键支持，进一步明晰了发光效率非线性变化的化学根源与晶场调控紧密相关的内在联系。

2. 高压合成工艺对缺陷密度的影响

在LED封装中，氮化物体系荧光粉的高压合成工艺对缺陷密度的影响至关重要。不同压力条件下，产物的氧空位浓度会发生变化，进而与发光性能产生紧密关联^[8]。当压力较低时，氮化物晶体结构中的原子排列相对松散，可能导致较多氧空位等缺陷形成，这些缺陷作为非辐射复合中心，会降低荧光粉的发光效率。随着压力升高，原子间距离减小，晶体结构更加致密，氧空位浓度相应降低，有利于提升发光性能。但过高压力也可能引发其他晶格畸变等问题，同样影响缺陷密度与发光特性。深入研究这种关联规律，有助于优化高压合成工艺，精准调控氮化物体系荧光粉的缺陷密度，从而提高LED封装中荧光粉的发光效率与稳定性提供理论依据和技术支持。

四、LED封装应用案例分析

（一）高显色照明器件开发

1. 多基质荧光粉配比优化

在高显色照明器件开发中，多基质荧光粉配比优化至关重要。通过运用响应面法建立荧光粉组合配比与相关色温、色纯度的数学模型^[9]，能够精准调控荧光粉配比。例如在某LED封装应用案例里，研究人员依据此数学模型，调整不同基质荧光粉的比例。经过多次试验，发现当特定两种基质荧光粉以某一精确比例混合时，相关色温可达到理想的高显色照明所需范围，同时色纯度也显著提升。这种优化使得LED照明器件在显色性能上有了质的飞跃，所发出的光更接近自然光，能够真实还原物体颜色，为高显色照明场景如博物馆照明、摄影棚照明等提供了优质的光源解决方案，展现出多基质荧光粉配比优化在LED封装应用于高显色照明器件开发中的关键作用。

2. 封装工艺参数正交实验

在高显色照明器件开发的LED封装应用中，进行封装工艺参数正交实验意义重大。采用DOE方法，研究固化温度、涂覆厚度等参数对光斑均匀性的影响权重。将固化温度设定为多个不同水平，涂覆厚度也划分不同层次，同时结合其他相关参数，构建正

交实验矩阵^[10]。通过对不同实验组的光斑均匀性进行精确测量与分析,可清晰得出各参数的影响程度。比如,可能发现较高的固化温度在一定范围内能提升光斑均匀性,而涂覆厚度过厚或过薄都会导致光斑均匀性下降。这一实验结果为优化 LED 封装工艺、提升高显色照明器件的光斑均匀性提供了科学依据,有助于实现更优质的照明效果。

（二）大功率 LED 散热解决方案

1. 热界面材料导热性能测试

在 LED 封装应用案例分析的大功率 LED 散热解决方案中,热界面材料导热性能测试至关重要。通过采用激光闪射法对不同陶瓷基板的导热系数与热膨胀系数匹配性进行对比。良好的热界面材料,其导热系数高,能高效传递热量,降低 LED 结温,提升发光效率与寿命。热膨胀系数与 LED 芯片及其他组件相匹配,可减少热应力,避免因热胀冷缩导致的结构损坏。例如,某大功率 LED 照明项目,在测试不同陶瓷基板的热界面材料时,发现导热系数高且热膨胀系数匹配度好的基板,能让 LED 灯具在长时间工作下保持稳定的发光性能,降低光衰,为大功率 LED 散热提供了有效参考,推动了 LED 封装技术在实际应用中的发展。

2. 荧光层热应力仿真分析

在 LED 封装应用案例分析的大功率 LED 散热解决方案中,荧光层热应力仿真分析十分关键。应用有限元方法,能有效模拟因温度梯度所导致的应力分布对发光稳定性产生的影响。在大功率 LED 工作时,会产生大量热量,引发温度梯度,进而在荧光层产生热应力。通过有限元模拟,可直观呈现应力在荧光层的分布情况。若应力集中于某些区域,可能致使荧光粉结构改变,影响发光稳定性。例如,当热应力超过一定阈值,荧光粉可能出现裂纹或晶格畸变,降低发光效率。因此,利用有限元模拟的结果,能够优化荧光层的设计与封装工艺,降低热应力影响,提升大功率 LED 的发光性能与稳定性。

（三）特种 LED 器件开发

1. 植物照明光谱定制

在植物照明光谱定制中,LED 封装荧光粉组合对 650nm 红光波段的精准调控及光子通量密度优化至关重要。植物光合作用对

650nm 附近的红光吸收效率高,精准调控此波段光谱,可满足植物特定生长阶段的需求。通过优化荧光粉组合,能实现对 650nm 红光波段光谱功率分布的精确调整,提高光子通量密度。例如,在温室生菜种植中,采用优化后的荧光粉组合封装的 LED 光源,相比传统光源,生菜在光合作用关键指标上表现更优,生长速度加快、生物量增加。这表明合理设计荧光粉组合,精准调控 650nm 红光波段及光子通量密度,能为植物照明提供更有效的光谱,助力农业生产效率提升与品质改善。

2. 紫外激发器件封装工艺

在 LED 封装应用案例中,以紫外激发器件为例,由于其工作在紫外光环境下,荧光粉易受 UV 辐射影响而降解,因此开发防止 UV 辐射降解的二次封装工艺至关重要。可选用能有效阻挡 UV 辐射的无机材料作为二次封装层,如特定的玻璃材料或陶瓷材料,它们凭借自身稳定的化学结构,可降低 UV 对荧光粉的破坏。同时,制定可靠性加速老化测试方案,模拟极端 UV 辐射条件,如提高紫外光强度、延长照射时间等,对封装后的器件进行测试。通过监测荧光粉性能指标,如发光强度、颜色坐标等在老化过程中的变化,评估二次封装工艺的有效性,确保紫外激发器件在实际应用中有稳定的发光性能和长使用寿命。

五、总结

LED 封装中荧光粉的无机化学特性对其封装应用起着关键作用。提炼出的构效关系,清晰呈现出荧光粉特性与封装效果间的内在联系,为优化封装技术提供坚实理论支撑。基于界面化学修饰和晶体场工程的技术发展方向,为 LED 封装技术的突破指明方向,有望解决当前面临的诸多问题,实现封装性能的提升。新型荧光粉设计理论与可靠性评价体系的构建路径的提出,将推动 LED 封装领域向更高水平发展,不仅能开发出性能更优的荧光粉,还能确保其在实际应用中的可靠性与稳定性,为 LED 产业的持续创新发展奠定基础,促进该产业朝着更高效、更稳定、更节能的方向迈进。

参考文献

- [1] 陈继伟. 量子点在 LED 封装中应用的研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [2] 王恒鹏. 深紫外 LED 封装技术与应用研究 [D]. 上海应用技术大学, 2022.
- [3] 黎双. 高性能热电制冷器制备及其 LED 封装应用 [D]. 华中科技大学, 2022.
- [4] 何友屹. 暖白光 LED 用荧光粉的制备及其发光特性调控研究 [D]. 广西师范大学, 2021.
- [5] 龙顺. 苯并环丁烯荧光树脂的制备及 LED 封装应用 [D]. 西南科技大学, 2023.
- [6] 宿文志, 钱靖, 吴义云, 等. 基于 LED 不同封装类型散热分析 [J]. 中国照明电器, 2021, (09): 9-14.
- [7] 魏亚河. RGB LED 封装工艺及其异常状况分析 [J]. 光源与照明, 2023, (04): 59-61.
- [8] 李秋玲, 任艳艳, 龚伟斌, 等. 含氟化物荧光粉白光 LED 封装应用高温高湿失效机理及解决方案研究 [J]. 中国照明电器, 2023, (04): 6-12.
- [9] 刘珠, 肖定书, 刘国聪, 等. 光固化 MT 硅树脂的制备及其在 LED 封装中的应用 [J]. 有机硅材料, 2021, 35(01): 1-10+23.
- [10] 丁文超, 陈美玲, 庞世卿, 等. 荧光粉封装工艺对白光 LED 的性能调控 [J]. 中国照明电器, 2023, (03): 8-11.