

# 无机非金属材料在叠层光伏器件中的应用及稳定性提升策略

薛路

安徽南玻新能源材料科技有限公司 安徽滁州

**【摘要】**无机非金属材料因其优异的光电性能和热稳定性，在叠层光伏器件中展现出广泛的应用前景。界面缺陷、材料降解及能带不匹配等问题仍制约其长期稳定性与效率提升。本文系统分析了常见无机非金属材料如氧化物、氮化物及硫族化合物在叠层光伏结构中的功能定位与性能表现，探讨了其在光吸收、载流子传输及环境保护等方面的关键作用。围绕材料选择、界面工程与封装技术等维度，提出多种提升稳定性的策略，旨在为高效稳定的叠层光伏器件设计提供理论支持与实践路径。

**【关键词】**无机非金属材料；叠层光伏器件；稳定性；界面工程；能带匹配

**【收稿日期】**2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250128

## Application and stability enhancement strategies of inorganic non-metallic materials in tandem photovoltaic devices

Lu Xue

Anhui Nanbo New Energy Materials Technology Co., Ltd, Chuzhou, Anhui

**【Abstract】**Inorganic non-metallic materials exhibit broad application prospects in tandem photovoltaic devices due to their excellent optoelectronic properties and thermal stability. However, issues such as interfacial defects, material degradation, and energy band mismatch still restrict their long-term stability and efficiency improvement. This paper systematically analyzes the functional positioning and performance of common inorganic non-metallic materials (e.g., oxides, nitrides, and chalcogenides) in tandem photovoltaic structures, and discusses their key roles in light absorption, carrier transport, and environmental protection. Focusing on material selection, interfacial engineering, and packaging technology, multiple strategies for enhancing stability are proposed, aiming to provide theoretical support and practical approaches for the design of high-efficiency and stable tandem photovoltaic devices.

**【Keywords】**Inorganic non-metallic materials; Tandem photovoltaic devices; Stability; Interfacial engineering; Energy band matching

### 引言

太阳能作为最具潜力的可再生能源之一，推动了光伏技术的快速发展。叠层光伏器件通过组合不同带隙的吸光层，能够更有效地利用太阳光谱，从而显著提高能量转换效率。在此背景下，无机非金属材料因其良好的化学稳定性、高温耐受性及可控的电学特性，成为构建高性能叠层电池的重要候选材料。然而，实际应用过程中，这些材料在复杂环境下的稳定性问题逐渐显现，尤其在界面复合、湿热老化及光照衰减方面表现突出，严重限制了器件寿命与效率。深入研究无机非金属材料在叠层结构中

的失效机制，并探索有效的稳定性提升路径，已成为当前光伏领域亟待解决的核心课题。本文将从材料特性出发，结合界面优化与封装策略，系统探讨如何实现高效且稳定的叠层光伏器件。

### 1 无机非金属材料在叠层光伏器件中的功能与挑战

无机非金属材料在叠层光伏器件中扮演着多重关键角色，涵盖光吸收、载流子传输、界面钝化及环境保护等多个功能层面。其中，透明导电氧化物如 ITO（氧化铟锡）和 ZnO（氧化锌）常用于前电极或电子传输层，其高透光率与低电阻特性有助于提升

器件整体的光电转换效率；而在宽带隙子电池中，诸如  $\text{CuInSe}_2$ （铜铟硒）或  $\text{SnO}_2$ （氧化锡）等材料则可作为缓冲层或空穴传输材料，有效调节能带结构并抑制非辐射复合损失<sup>[1]</sup>。部分氮化硅（ $\text{SiN}_x$ ）和氧化铝（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）等钝化层材料也被广泛应用于界面修饰，以减少缺陷态密度并增强载流子提取效率。

尽管无机非金属材料具备良好的热稳定性与化学惰性，但在复杂工况下仍面临诸多挑战。在长期光照、湿度侵袭或温度循环作用下，某些氧化物材料易发生氧空位迁移或晶格畸变，进而引发电学性能退化；不同功能层之间的热膨胀系数差异也可能导致界面剥离或微裂纹生成，影响器件的机械完整性与工作寿命。特别是在叠层结构中，各子电池之间的能带匹配要求更为严格，若材料选择不当，将导致载流子传输受阻或复合增强，降低整体效率并加速老化过程。

为应对上述问题，研究者正从材料本征性能调控与界面工程优化两个方向寻求突破。一方面，通过元素掺杂、晶体结构调控或纳米尺度设计，提升材料的抗湿热能力与电学稳定性；另一方面，引入多层复合钝化结构或自组装单分子层（SAMs），改善界面接触质量并抑制离子迁移行为。这些策略不仅有助于维持器件在苛刻环境下的稳定运行，也为未来高效叠层光伏系统的商业化应用提供了技术支持。

## 2 影响叠层光伏器件稳定性的关键因素分析

叠层光伏器件的稳定性受多种因素共同影响，其中材料本征特性与器件界面行为尤为关键。无机非金属材料在长期运行过程中可能因光照、湿度或温度变化而发生结构退化，例如氧化锌类材料在湿热环境下易出现水解反应，导致电导率下降和光散射增强；而硫族化合物如  $\text{CuInSe}_2$  则可能因氧扩散引发相分离或氧化失效。某些宽禁带半导体在强紫外光照射下会发生光致衰减现象，造成载流子迁移率降低和缺陷态密度上升，进而影响器件效率输出的稳定性。

在多层异质结构中，不同功能层之间的界面兼容性对器件寿命具有决定性作用。由于各子电池所用材料体系不同，界面处往往存在晶格失配、能带不连续或化学反应活性差异等问题，容易形成非辐射复合中心并加剧界面缺陷累积。特别是在高温工作或冷热循环条件下，材料间热膨胀系数不匹配将引发机械应力集中，从而导致微裂纹扩展或层间剥离。离子迁移现象在部分氧化物/硫化物界面上亦较为显著，如钠离子从玻璃基板向吸收层迁移，会改

变局部掺杂状态并诱发性能衰退。

环境因素同样是影响叠层光伏器件稳定性的不可忽视环节。实际应用中，器件需长期暴露于户外复杂气候条件之下，湿热、盐雾及紫外线辐照等均可能加速材料老化进程<sup>[2-6]</sup>。在高湿度环境中，封装材料若未能有效阻隔水汽渗透，将促使电极腐蚀与内部短路的发生；而在昼夜温差剧烈地区，周期性热胀冷缩会使封装结构产生疲劳损伤，降低密封性能。深入理解材料响应机制、优化界面设计并提升封装防护等级，成为保障叠层光伏器件长期稳定运行的重要研究方向。

## 3 基于材料与界面设计的稳定性增强策略

为提升叠层光伏器件在复杂环境下的长期稳定性，研究者从材料本征性能优化与界面工程设计两个维度出发，探索出一系列行之有效的增强策略。其中，材料改性主要通过元素掺杂、晶格调控及纳米结构设计等方式实现性能提升。在氧化锌基电子传输层中引入铝或镓元素，不仅可有效提高其电导率，还能增强材料在湿热条件下的化学稳定性；而在硫族化合物吸收层中采用合金化手段（如将硒部分替换为硫或碲），有助于调节带隙宽度并抑制氧诱导的相分离现象。采用高纯度、低缺陷密度的晶体生长技术，如分子束外延（MBE）或金属有机化学气相沉积（MOCVD），也能够显著减少材料内部非辐射复合中心的数量，从而延长载流子寿命并提升器件整体效率保持率。

在界面工程方面，研究重点聚焦于降低界面缺陷密度、改善能带匹配以及增强层间结合力。针对异质结界面处常见的能带不连续问题，可通过引入梯度带隙缓冲层或超薄钝化膜来缓解载流子势垒效应，如在硅/钙钛矿叠层结构中使用  $\text{SnO}_2$  作为电子选择接触层，以减少界面态密度并提升电荷提取效率<sup>[7]</sup>。利用原子层沉积（ALD）技术制备高质量的介电层（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiO}_2$ ），不仅可实现对界面缺陷的有效钝化，还具备优异的水汽阻隔能力，从而提升器件抗老化性能。近年来，自组装单分子层（SAMs）在界面修饰中的应用也受到广泛关注，其能够在极低厚度下实现高效能带调控和表面态修复，为构建高性能稳定界面提供了新思路。

除了材料与界面本身的优化，多尺度协同设计理念也为稳定性提升提供了系统解决方案。在器件结构层面，采用倒置结构或柔性衬底设计可缓解热应力集

中问题,降低因热膨胀系数差异引发的机械失效风险;在工艺集成方面,控制各功能层的沉积温度与气氛环境,有助于减少界面副反应与杂质污染;而在材料体系选择上,优先采用具有相近热膨胀系数与化学稳定性的组合,有助于提升整体结构兼容性。上述策略已在多种无机非金属材料体系中得到验证,并逐步应用于商业化叠层光伏器件的研发中,为实现高效且持久运行的光伏系统奠定了坚实基础。

#### 4 封装技术对提升器件环境适应性的贡献

封装技术在提升叠层光伏器件环境适应性方面发挥着至关重要的作用,尤其是在抵御湿热、氧气侵蚀、紫外线辐射及机械应力等外部环境因素方面具有不可替代的功能。对于采用无机非金属材料构建的叠层光伏结构而言,尽管这些材料本身具备较高的化学稳定性和热稳定性,但在长期户外运行过程中,仍不可避免地受到水汽渗透、离子迁移及界面氧化等影响,导致电学性能下降甚至器件失效。通过引入高效封装体系,如多层复合阻隔膜、玻璃-胶粘剂-背板封装结构或柔性封装材料,能够有效隔离外界环境对器件内部各功能层的侵蚀,延长其使用寿命。

当前主流封装策略主要围绕高阻隔性材料的选择与封装工艺的优化展开。采用具有低水汽透过率(WVTR)的聚乙烯醇缩丁醛(PVB)、乙烯醋酸乙酯(EVA)或聚烯烃弹性体作为封装胶膜,可在高温高压条件下实现对器件活性区域的有效密封,防止水氧侵入;在顶部钝化层与电极之间引入原子层沉积(ALD)制备的氮化硅或氧化铝超薄致密膜,可进一步增强界面抗湿热能力并抑制缺陷态再生。针对柔性叠层器件的应用需求,研究者还开发了基于聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)或聚酰亚胺(PI)基底的透明阻隔涂层,结合低温激光焊接或热压封边技术,以实现在弯曲和振动环境下仍保持良好的气密性与机械完整性。

从系统集成角度看,封装不仅承担物理防护功能,还应与器件整体设计形成协同效应。在双面叠层电池中,前后面板均需配置高效阻隔结构,并确保边缘密封区域无微孔缺陷,以避免局部腐蚀引发短路;而在大面积组件中,还需考虑热膨胀匹配问题,选择与基材热膨胀系数相近的封装材料,以减少因温差循环造成的层间剥离或裂纹扩展<sup>[8]</sup>。近年来,智能封装材料的研发也成为热点方向之一,如光稳定剂掺杂胶膜、自修复聚合物及湿度响应型指

示材料等,不仅能主动抵御环境劣化因子,还可实时监测封装状态,为器件健康管理和寿命预测提供数据支持。综上所述,先进封装技术已成为保障无机非金属材料在复杂环境中稳定服役的关键环节,是推动叠层光伏器件走向规模化应用的重要支撑。

#### 5 结语

无机非金属材料在叠层光伏器件中具有优异的光电性能和环境稳定性,为实现高效、长寿命光伏系统提供了重要支撑。然而,界面缺陷、材料老化及封装失效等问题仍制约其实际应用。通过材料优化设计、界面工程调控及先进封装技术的应用,可有效提升器件在复杂环境下的稳定性和可靠性。未来,随着新型钝化策略与智能封装材料的发展,无机非金属材料在叠层光伏中的应用前景将更加广阔,对推动清洁能源技术进步具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 谭业强,郝亚楠,路大治,等.2024年度无机非金属材料学科基金管理工作综述[J].硅酸盐学报,2025,53(05):1031-1036.
- [2] 郝亚楠,张茜,路大治,等.无机非金属材料领域女性科技人才资助与发展[J/OL].硅酸盐学报,1-7[2025-06-23].
- [3] 本刊讯.新一批生物医用材料揭榜挂帅任务聚焦无机非金属材料技术突破[J].中国建材,2025,(03):28.
- [4] 黄起飞.无机非金属材料力学性能试验机的技术要求及设计试制[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2024,23(04):30-34.
- [5] 欧丽珍,吴国林,林琪洪,等.建筑无机非金属材料放射性测量时间的分析[J].广东建材,2024,40(11):48-52.
- [6] 费顺鑫,冒爱琴,柳东明.无机非金属材料工程专业英语教学改革探究[J].安徽工业大学学报(社会科学版),2024,41(05):67-68.
- [7] 王倩倩,于竹青,胡秀兰.无机非金属材料工学课程科产教融合教学改革探索[J].高教学刊,2024,10(29):152-155.
- [8] 周永生,刘有,魏开远,等.新工科背景下无机非金属材料工程专业课程体系构建研究——以玻璃热工设备为例[J].天津化工,2025,39(03):184-186.

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