

Exploration of the Application of Silver Nanowire-Based Flexible Transparent Conductive Films in Automotive Starry Roofs

Haibo Wang

Shenzhen Huake Tek Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

with the development of the automotive industry, the vehicle panoramic sky screen and star top have become the key design elements to improve vehicle comfort and intelligence. In recent years, silver nanowires transparent conductive films have become a research hotspot in this field because of their excellent optical properties, flexibility and conductivity. In this paper, the application of transparent conductive film based on silver nanowires in vehicle borne star dome is discussed. By analyzing its preparation method, photoelectric properties and practical application, the advantages over traditional ITO film and metal grid film are revealed. The research shows that the silver nanowire film has outstanding performance in optical transparency, conductivity and flexibility, which can effectively meet the design requirements of modern automobile star roof, and provide technical support for the future development of intelligent roof system.

Keywords

silver nanowires; Transparent conductive film; Car panoramic sky curtain; Star dome

基于纳米银线的柔性透明导电薄膜在车载星空顶的应用探索

王海波

深圳市华科创智技术股份有限公司，中国·广东深圳 518000

摘要

随着汽车产业的发展，车载全景天幕和星空顶已成为提升车辆舒适性与智能化的关键设计元素。近年来，纳米银线透明导电薄膜因其优异的光学性能、柔性和导电性，成为这一领域的研究热点。本文探讨了基于纳米银线的透明导电薄膜在车载星空顶中的应用，通过分析其制备方法、光电性能及实际应用，揭示了相较于传统ITO膜和金属网格薄膜的优势。研究表明，纳米银线薄膜在光学透明性、导电性和柔性等方面表现突出，能够有效满足现代汽车星空顶的设计需求，为智能车顶系统的未来发展提供了技术支持。

关键词

纳米银线；透明导电膜；汽车全景天幕；星空顶

1 引言

随着全球能源结构转型与“双碳”目标的深入推进，新能源汽车产业正经历着前所未有的高速发展。据国际能源署（IEA）及主要市场数据显示，新能源汽车的市场渗透率正以前所未有的速度攀升，标志着汽车产业已从技术验证阶段迈入规模化普及的新纪元。在这一背景下，汽车不再仅仅是交通工具，更演变为集成了智能化、网联化与情感化交互的“第三生活空间”。智能座舱作为用户体验的核心载体，其技术迭代与功能创新已成为各大主机厂塑造品牌差异化、

提升产品竞争力的关键战场。

在智能座舱的形态演进中，车顶系统正经历一场深刻的变革。传统的硬质金属车顶正逐渐被大面积的玻璃车顶——即“全景天窗”与“全景天幕”所替代。这一设计趋势不仅极大地拓展了车内乘员的视觉空间，增强了通透感与开放性，更将驾驶旅途中与自然环境的连接提升至全新高度，成为现代电动汽车极具代表性的设计语言之一。然而，固定式的全景天幕在提供开阔视野的同时，也带来了隔热、隐私以及功能单一化的挑战。

为克服上述局限并进一步挖掘座舱的智能化潜力，“星空顶”作为一种能够显著提升座舱氛围品质与情感化体验的功能，开始受到产业界的广泛关注。传统的星空顶技术多基于非透明顶棚，通过在其夹层或内表面布设光纤或微型LED灯珠实现星点效果。然而，将此种方案直接应用于全

【作者简介】王海波（1987-），男，蒙古族，中国内蒙古赤峰人，硕士，工程师，从事纳米银线、纳米银线导电膜、纳米银、透明导电材料研究。

景玻璃车顶时，将不可避免地遮蔽玻璃的透光特性，与全景天幕的设计初衷背道而驰。

因此，开发一种既能保留玻璃全景视野，又能实现动态、高清星空显示的技术方案，成为当前智能座舱领域一个亟待解决的技术瓶颈。针对此问题，一种基于“透明导电膜”与“LED直显”的集成化解决方案应运而生，并展现出巨大的应用潜力。该方案通过在夹胶层玻璃内部的高性能的透明导电，形成不可见的导电线路；再将微米级别的 Mini/Micro-LED 芯片以高精度布局直接键合于导电通路之上^[1,2]。由此，在非显示状态下，玻璃保持极高的透光率；在启动显示功能时，LED 芯片被精准点亮，于乘员头顶呈现出逼真璀璨的星空景象。

2 透明导电膜的研究现状

2.1 透明导电膜的分类与特点

依据材料不同，透明导电膜主要分为 ITO 膜、金属网格膜和纳米银线膜。ITO 膜因其高透光率和良好导电性而被广泛采用，但铟资源稀缺、成本高、脆性大且在高温下易退化，限制了其在柔性和大规模应用中的前景。金属网格膜通过在透明基底上构筑微细金属网格，实现金属的高导电性与基底的透光性兼顾，具备柔性优势；然而金属线的遮光导致可见光透射率低于 ITO，需要在网格尺寸与间距上进行精细优化，以平衡导电与透光。纳米银线膜利用银线的极佳导电性和相对较高的透光率，实现了导电透光的更优平衡；其制备工艺灵活，可采用湿法涂布技术实现大面积制备，且具备良好柔性，适用于低功耗柔性电子应用。

2.2 透明导电膜在汽车领域的应用

在车载显示触控系统、智能天窗等场景中，透明导电膜需兼顾高透光、低电阻、柔性、耐高温、耐湿、抗紫外线等多重性能^[3,4]。车载触摸屏对电极的导电均匀性和光学透明度尤为敏感，直接影响显示质量和触控响应。纳米银线膜凭借其优异的电学性能和较高的透光率，已成为车载显示系统的潜在替代材料。智能窗膜通过集成透明导电层实现电致变色、触控及星空效果等多种功能，提升驾驶舒适性和安全性。星空顶对透明导电膜的要求尤为严格，需在保持高透光的同时提供持久、均匀的导电功能，纳米银线膜在此类高要求场景中展现出显著优势。

2.3 各类透明导电膜的优缺点对比

ITO 膜虽具高导电性和透明度，但受成本、脆性及高温不稳定限制；金属网格膜在柔性方面表现突出，但金属线导致透光率下降；纳米银线膜在透光、导电和柔性之间实现较佳平衡，且通过工艺优化可提升抗氧化和机械耐久性。综合评估表明，纳米银线膜在车载星空顶等高性能需求场景中具备更广阔的应用前景。

3 纳米银线透明导电膜的特性及制备方法

3.1 纳米银线透明导电膜的基本特性

纳米银线透明导电膜凭借优异的光学、电学和机械性能，在透明导电材料中具备独特优势。银本身拥有极高的导电率，使得 AgNW 膜能够实现低电阻、高导电性，满足车载星空顶等对导电性要求较高的应用。与传统的 ITO 膜相比，AgNW 膜在保持低电阻的同时，透光率更高，均匀性更好，适用于车载显示屏、智能窗膜等多光学需求场景。在光学方面，银线在紫外至可见光区吸收弱，可见光透过率较高。相较于 ITO 结构，AgNW 膜在提供相同导电性的前提下，保持更佳的透明度，这对需要高透光率的车载星空顶尤为关键。通过优化制备工艺，可调节银线的分布与排列，进一步提升光学均匀性。机械性能上，AgNW 膜相比 ITO 膜表现出良好的柔性和韧性，能够承受弯曲、拉伸而不显著影响导电或透明性能，适合柔性电子设备。其柔性和耐用性使其在汽车领域的大面积应用中具备优势，尤其在长期使用和变形环境下仍能保持性能稳定。

3.2 纳米银线透明导电膜的制备方法

纳米银线作为一种重要的二维纳米材料，实现纳米银线的高质量、规模化与低成本制备，是推动上述产业发展的关键前提。目前，液相化学还原法因其设备要求简单、工艺可控、易于放大生产而成为产业化绝对主流的制备途径。在众多液相法中，多元醇法是目前最成熟、应用最广泛的产业化技术。其基本原理是在高温有机溶剂（通常为乙二醇）中，通过还原银前驱体（如硝酸银，AgNO₃），并在晶体生长调节剂（通常是高分子聚合物或卤化物）的引导下，实现银原子定向生长为一维纳米线结构。未来技术发展将从间歇式釜式反应向连续流反应器转变，以提升产量、一致性和过程安全性。

将纳米银线网络高效、均匀地固定在柔性基底上形成功能性薄膜，是其产业化应用的核心环节。狭缝涂布法通过精确计量，可将材料利用率提升至 90% 以上，精密的涂布头与基材之间形成稳定的流动场，能够实现纳米级别的湿膜厚度控制，从而获得极其均匀的导电网络。在主流狭缝涂布和喷涂工艺成膜技术中，狭缝涂布法展现出其独特的综合优势，被视为实现大规模连续生产的最佳方案。

3.3 纳米银线透明导电膜的优势与挑战

纳米银线透明导电膜虽在光学、电学和机械性能上具备高透光率、低电阻和柔性优势，但实际应用仍面临三大挑战：其一是稳定性不足，银线在空气中易氧化，导致导电性下降和光学性能衰减，因而需通过涂覆保护层、封装工艺来提升抗氧化能力并延长使用寿命；其二是生产工艺需进一步优化，尤其在大规模制造时要保证膜层均匀、银线分布一致并控制成本；其三是机械强度和耐久性问题，尽管膜具柔性，

但多次弯曲或拉伸会导致基材断裂或银线脱落，影响膜的可靠性，研究正通过改进银线结构、优化分布或加入增强材料来提升机械韧性和寿命。

4 基于纳米银线的柔性透明导电膜在车载星空顶中的应用

4.1 车载星空顶的功能需求

车载星空顶兼具美学与实用性，要求提供宽阔视野和良好光学体验，同时支撑调光、触控及星空效果等智能功能。为满足这些需求，透明导电膜必须具备高透光率，保证白天光照充足；低电阻和稳定导电性，以实现可靠的电气控制；良好的机械柔性，适应顶棚的曲面和长期弯曲应力；以及耐候性，能够抵御车内温湿度波动、紫外线照射等环境因素而不衰退^[5]。纳米银线膜凭借其优异的光学、电学和机械特性，能够同时满足上述全部要求，成为星空顶材料的理想选择。

4.2 纳米银线透明导电膜在车载星空顶中的具体应用

纳米银线透明导电膜在车载星空顶中的具体应用包括智能调光膜、触控模组和 LED 星空膜三方面：其低电阻和高导电率可配合 PDLC、EC 等透明电极需求，实现智能调光需求，且柔性基底能够贴合曲面；通过使用纳米银线触控模组，可实现在天窗天幕上的触控操作，提升智能操作体验；在银线导电膜表面嵌入 LED 灯芯，通过联动中控控制可实现不同图案、不同效果的氛围展示，提升智能座舱的高端形象。

4.3 纳米银线透明导电膜在星空顶中应用的优势

纳米银线膜的透光率可达 90% 以上，显著优于 ITO 或金属网格膜，且光学均匀性好，提供宽阔通透的车内视野；在星空顶产品中，当其 LED 灯芯小于 200 微米，观察距离大于 0.3 米时，通过光学处理可做到目视不可见，实现“完整无暇”的高透全景天幕玻璃效果；柔性方面，银线网络在反复弯曲、拉伸后仍能维持光学和电学性能，适配复杂的车

顶曲面设计；耐久性上，通过保护层涂敷及有效封装工艺，使纳米银线导电膜具备良好的抗氧化、抗紫外线和耐候特性，能够在高温、湿度变化及强光照射的车内环境中长期可靠工作。

5 结论与展望

本研究探讨了基于纳米银线的柔性透明导电膜在车载星空顶中的应用，分析了其在光学、电学和机械性能方面的优势。结果表明，纳米银线膜具有较高的透光率、优异的导电性和良好的机械柔性，能够满足车载对透明导电膜的多重功能需求。与传统的 ITO 膜和金属网格膜相比，纳米银线膜在透光率、电阻率和柔性方面表现出了更好的综合性能，且其优异的耐久性和抗氧化性使其能够在车载环境中长期稳定工作。尽管如此，纳米银线膜仍面临银线尺寸控制、膜层均匀性及大规模生产等技术挑战。未来研究可聚焦于提高银线膜的稳定性、优化制备工艺以及降低生产成本，以进一步推动其在车载智能化和其他柔性电子产品中的应用。随着技术的不断进步，基于纳米银线的透明导电膜有望在智能汽车领域，尤其是在车载星空顶的高性能需求中，发挥更加重要的作用，并为智能窗膜、触控显示等其他领域提供广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 胡凯, 陈禹翔, 李青. 透明显示技术的进展[J]. 电子器件, 2012, 35(6):640-646.
- [2] 贾涛, 李培远, 徐雪原等. 基于透明OLED显示技术的车窗在城轨交通中的应用[J]. 2021, 59(2):82-84.
- [3] 钱强. 基于轻量化神经网络的透明导电膜玻璃缺陷检测算法研究[D]. 安徽:安徽师范大学, 2024.
- [4] 李四旺, 冯鸿飞. 全景天幕对于制冷性能的影响研究[J]. 时代汽车, 2022(7):160-161.
- [5] 鹿涛, 刘毅, 宋永乐. 基于天幕车型的顶部抗压结构改善[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(1):42-45.