

钼使太阳能电池板更纤薄

想象一下，在偏远荒野徒步时，背包上装着一块轻便、可弯曲的太阳能电池板为手机充电；或者，飞机依靠太阳能供电，降低对燃油的依赖。使这一切成为可能的轻量级技术，正是名为“铜铟镓硒”（CIGS）的薄膜太阳能技术，它正将太阳能应用拓展到传统硅基技术无法触及的领域。CIGS 技术依赖于以原子级精度涂覆的微米级钼薄层，它让电池板能够在从灾区到深空等各种最恶劣环境中保持良好性能。

这款特种高空飞行器可在平流层持续悬停长达一年，由CIGS太阳能电池板及机载电池为其观测与通信系统供电©Sceye

绝大多数太阳能电池板采用硅晶片技术，通过吸收可见光产生电。硅基组件之所以普及，是因为规模化生产让它们兼具高性价比与高发电效率。但它们也存在体积大、重量重和易碎的缺点。相比之下，薄膜太阳能组件的厚度可减薄至硅片的 1/20，重量也大幅减轻。根据所用基底材料的不同，它们还可以是柔性的，甚至是可弯曲的。此外，在弱光环境下，比如阴天、傍晚时分或是被遮挡的城市环境中，薄膜电池板的表现也优于硅基产品。

这些多功能特性开辟了一系列全新的载体表面发电场景：特种飞行器如无人机、气象气球和卫星、建筑的外围护结构，甚至个人露营装备如帐篷和背包都可以集成发电功能。例如，柏林一家太阳能研究机构，通过在建筑外立面无缝集成 CIGS 电池板，每年可发电超过3 万千瓦时，足以满足多户家庭的用电需求。在灾害救援中，基于 CIGS 技术的可折叠太阳能板，能为照明、通信和冷藏设备提供关键电力。同样，安装在电动汽车车顶的薄膜太阳能板可在车辆行驶过程中充电，从而延长续航里程。在所有这些应用中，那层微米级的钼都起着不可或缺的作用。

涂上钼原子

钼用于两种最常见的薄膜太阳能电池中，铜铟镓硒（CIGS）电池和早期的碲化镉（CdTe）电池。虽然碲

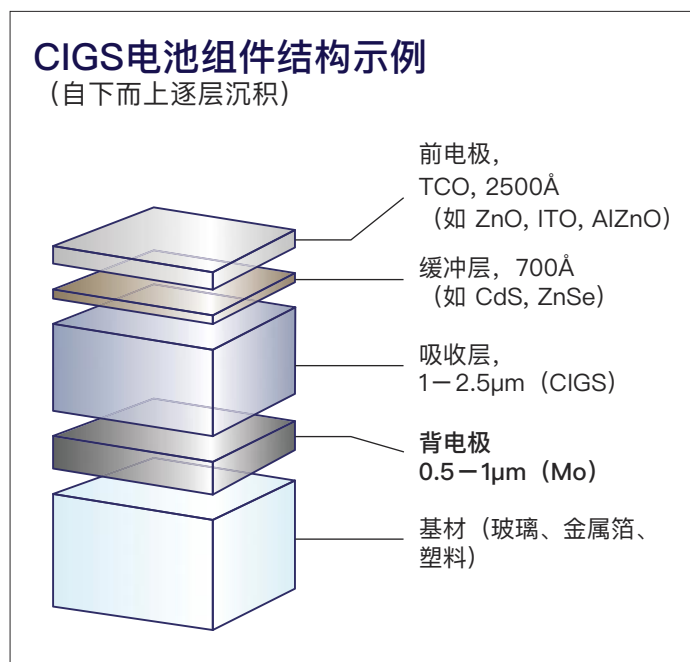


柏林研究机构的建筑外立面集成了定制蓝色的刚性 CIGS 电池板，与金属包覆层相得益彰

化镉电池曾经使用钼材料，但如今许多生产商为了控制成本，已改用其他替代材料。而在 CIGS 电池中，钼至今几乎无可替代。每一块太阳能电池都需要前电极和背电极，用于收集和传输半导体层产生的电。钼在 CIGS 电池中作为背电极，它的热膨胀系数与钠钙玻璃基底高度匹配，防止在高温制造过程中产生应力 and 开裂。钼与玻璃基底、CIGS 吸收层之间都具有很强的附着力，可确保电池在反复热循环和机械操作中保持结构完整。在超过500°C的加工温度下，钼依然保持良好的导电性和化学稳定性。此外，在接触界面会自然形成一层硒化钼（MoSe₂）薄层，从而降低电阻并提升电池性能。

CIGS中的钼层通过溅射技术沉积到基底材料上。在溅射工艺中，将一块固态钼（称为“溅射靶材”）放置在真空室中，真空室内的氩气被激发形成等离子体，等离子体的带电粒子轰击钼靶，将钼原子撞击出来沉积到基底材料上。这种类似喷涂的工艺可形成一层均匀的钼薄层，厚度通常为400至1000 纳米，比人的头发细100倍。

与任何涂层方法一样，均匀性和效率十分重要。传统的平板靶材在使用过程中中心区域容易出现沟槽状不均匀磨损，导致边缘处钼材料被浪费，有时钼靶材仅使用了30—40% 就需要更换。使用旋转圆柱形靶材可确保整个靶材均匀磨损，沉积量能提升至原来的三倍，大幅减少浪费，同时减少更换次数并降低溅射工艺的成本。





工厂中尚未使用的旋转溅射靶材，由单一材料制成的整体式靶材示例



平板溅射靶材经多次生产循环后表面出现明显沟槽磨损，一旦过薄即被回收

旋转式靶材通常由一根钼管与用于支撑和散热的不锈钢或铜制支撑背管粘合而成，但这种复合结构工艺复杂、成本较高，还需要用到钎这类稀有昂贵的钎焊材料。为简化工艺，一些厂商推出了“整体式”靶材，整根靶管完全由钼制成，无需支撑管或粘接层。这种设计使整个管壁厚度几乎都用于溅射沉积，材料利用率更高，还便于回收，减少了生产线的维护和停机时间，从而提高了可持续性和成本效益。

柔性 CIGS 组件采用不锈钢或塑料基底，它们与钠钙玻璃不同，不会自然释放钠元素，而钠是提升电池效率的关键元素。为弥补这一点，已开发了掺钠或掺钾的钼靶材。有益的碱金属元素在加工过程中可扩散进入 CIGS 层，使电池效率提升高达 30%—50%。

除了作为溅射靶材，钼还用于真空蒸发系统，它们在高温环境下沉积 CIGS 或碲化镉吸收层，钼凭借其耐高温、耐恶劣化学环境的特性，成为设备内部的屏蔽罩、坩埚、蒸发舟和结构支架的理想材料。

许多屋顶无法承受硅电池板的重量或形状，而轻质CIGS电池板可轻松安装，也适用于既有建筑





➤ 在欧洲和北美多地的测试表明，长途客车顶部安装CIGS太阳能板可节省可观的燃油

未来展望

2018 至 2023 年间，太阳能电池板的安装量增长了两倍。这一增长态势，部分得益于太阳能技术种类的不断丰富和可及性的提高。展望未来，CIGS 技术有望在下一代叠层太阳能电池中发挥作用，叠层电池通过组合两种材料来提升性能和效率。其中，钙钛矿是最具潜力的搭档之一，这是一种轻质、潜在低成本、高效率且生产方法简单的光伏材料。由于 CIGS 和钙钛矿吸收太阳光谱的不同波段，将二者堆叠可将更多的阳光转化为电能。

尽管全球经济存在不确定性且地缘局势紧张，国际能源署（IEA）预计 2025 年全球能源投资将达到创纪录的 3.3 万亿美元。其中约三分之二（约 2.2 万亿美元）将投向低碳技术，包括可再生能源、核能、储能、能效提升和电气化。太阳能仍是领头羊，屋顶和大型光伏电站的投资预计将达 4500 亿美元。

目前，薄膜太阳能电池在全球光伏市场的占比尚不足 3%。虽然份额不高，但随着整个光伏行业的扩张，薄膜电池的市场需求也在持续上升。在对轻量化、柔性化、美观性要求高的特种应用领域，CIGS 正逐步替代硅，占据稳固的细分市场。无论应用场景是建筑墙面、近地轨道，还是偏远荒野，那层微米厚的钼薄膜，都将在幕后默默发挥着关键作用。（Karlee Williston, Nicole Kinsman）

感谢 Plansee 公司 Christian Linke 和 Thomas Huber 的技术访谈，为本文提供创作基础以及 Midsummer 公司 Valter Pakdeerat 的宝贵意见。

➤ CIGS电池板可制成柔性、耐刮、防水的产品，适用于户外探险和极限运动

