

光伏组件效率提升技术及其发展趋势

仝晓琴 姜仕兴 黄志强 王跃辉

华能新能源股份有限公司河北分公司, 河北 石家庄 075000

[摘要]随着可再生能源需求的持续增长, 光伏技术作为重要的清洁能源来源, 其效率提升成为研究的重点方向之一。提高光伏组件效率不仅可以增加单位面积的发电量, 还能降低整体成本, 推动其大规模应用。本研究探讨了当前光伏组件效率提升的关键技术, 包括材料改进、结构优化以及先进制造工艺。同时, 对未来光伏组件技术的趋势进行了分析与展望, 以为行业发展提供参考。

[关键词]光伏组件; 效率提升; 材料改进; 结构优化; 发展趋势

DOI: 10.33142/aem.v7i1.15223

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Efficiency Improvement Technology and Development Trend of Photovoltaic Modules

TONG Xiaoqin, JIANG Shixing, HUANG Zhiqiang, WANG Yuehui

Hebei Branch of Huaneng New Energy Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 075000, China

Abstract: With the continuous growth of demand for renewable energy, photovoltaic technology, as an important source of clean energy, has become one of the key research directions for improving its efficiency. Improving the efficiency of photovoltaic modules can not only increase the power generation per unit area, but also reduce overall costs and promote their large-scale application. This study explores the key technologies for improving the efficiency of current photovoltaic modules, including material improvement, structural optimization, and advanced manufacturing processes. At the same time, an analysis and outlook were conducted on the future trends of photovoltaic module technology, in order to provide reference for the development of the industry.

Keywords: photovoltaic modules; efficiency improvement; material improvement; structural optimization; development trends

引言

光伏组件是将太阳能转化为电能的核心部件, 其转换效率直接决定了光伏系统的发电性能和经济性。当前, 随着科技进步和市场需求的推动, 光伏组件效率提升技术正不断涌现, 涵盖了材料、结构和工艺等多个方面的创新。本文从现有技术出发, 分析了提升光伏组件效率的主要途径, 并探讨了未来的技术发展趋势。

1 光伏组件效率提升的关键技术

1.1 材料改进技术

硅基材料是目前光伏组件中最广泛使用的材料, 尤其是晶体硅。晶体硅具有较高的稳定性和优良的转换效率。然而, 传统的晶体硅组件面临着材料纯度和制造工艺等限制, 难以进一步提高效率。通过提高硅片纯度、优化硅片厚度和使用超薄硅片等技术手段, 可以显著改善硅基组件的光电性能。高效晶体硅技术, 如 PERC (钝化发射极和背面电池) 和 TOPCon (隧穿氧化钝化接触) 技术, 已成功提升了光电转换效率, 并成为行业主流技术。

除了硅基材料, 钙钛矿、铜铟镓硒 (CIGS) 薄膜等新型半导体材料在光伏组件中的应用也备受关注。这些材料具有宽光谱吸收和高转换效率的潜力, 尤其是钙钛矿材料, 其制备工艺简单、成本低, 具有极高的光电转换效率提升空间。近年来, 钙钛矿太阳能电池的转换效率已突破

25%, 成为业界重点研发方向之一。此外, CIGS 薄膜具有较强的吸收能力和柔性, 适用于轻薄化和柔性光伏组件, 有望为特定应用场景提供新的解决方案。

在材料改进中, 掺杂技术和杂质控制也是关键环节。掺杂技术通过在半导体材料中加入特定杂质原子, 可以控制材料的导电性和光电特性, 从而提升光伏组件的效率。硅材料中的掺磷和掺硼技术已相当成熟, 未来的研究集中在新型掺杂元素的应用, 以进一步优化光生电流和减少材料缺陷。此外, 杂质控制工艺对于减少载流子的复合损失至关重要。采用高纯度材料、提升制备过程中的清洁度以及优化杂质过滤技术, 能够有效降低光伏材料中的杂质含量, 从而减少电流损失, 提升组件的整体效率。

为了更加直观地呈现材料改进技术在提升光伏组件效率中的作用, 表 1 汇总了不同材料的关键属性、主要改进技术及其在光电性能上的影响。

表 1 展示了常见光伏材料的关键属性、改进技术以及它们对组件性能的实际影响。这些材料通过不同的改进技术, 在提升光电转换效率、降低成本和适应多样化应用场景方面表现出独特的优势。文中将结合这些属性分析不同材料在组件效率提升中的作用, 以更系统地探讨材料改进技术的可行性和发展潜力。

表 1 光伏组件材料属性及改进技术对比

材料类型	关键属性	主要改进技术	技术原理	转换效率提升效果	应用前景
晶体硅	高转换效率, 稳定性强	高纯度提纯, PERC, TOPCon	通过钝化和隧穿氧化减少复合损失	提升约 2%~3%	适用于大规模电站应用
超薄硅片	材料用量少, 轻量化	硅片减薄工艺	减少材料用量, 降低生产成本	提升约 1%~2%	适用于轻量组件应用
钙钛矿	高吸收系数, 低成本	多层钙钛矿涂层	增强吸光能力, 提高载流子生成速率	提升约 4%~5%	适合柔性和便携设备应用
CIGS 薄膜	宽吸光谱, 柔性强	高效蒸镀工艺, 材料配比优化	提高电荷传输, 优化薄膜晶体结构	提升约 3%~4%	应用于建筑集成、车载系统
复合半导体材料	可控光电特性, 柔性优异	新型掺杂技术, 薄膜层叠工艺	提升光捕获, 增加转换效率	提升约 3%~6%	适用于多节太阳能电池
导电高分子	柔性好, 成本低	材料聚合度优化	提高光电转换的均匀性	提升约 1%~2%	可用于穿戴设备光伏组件
超高纯硅	杂质少, 电流损耗低	超高纯提炼工艺	减少载流子复合, 提高电流密度	提升约 1%~1.5%	高效组件和特种应用

材料改进技术通过硅基材料的创新、新型半导体材料的开发以及掺杂与杂质控制等方面的研究, 有效提高了光伏组件的转换效率。这些技术不仅提升了组件的光电性能, 还推动了光伏组件在多样化场景中的应用发展, 为光伏行业的高效化进程奠定了坚实基础。

1.2 结构优化设计

1.2.1 表面纹理化技术

表面纹理化技术是通过在光伏组件表面构建微小的纹理结构, 如微米或纳米级的凹凸图案, 来降低反射率并增加光吸收。传统的平滑表面容易反射入射光, 导致部分光子未被吸收而损失。而经过纹理化处理的表面, 能“捕捉”入射光, 将其引导到组件内部, 增加了光的驻留时间和吸收率。(如图 1 所示)



图 1 表面纹理化技术提升光伏组件吸光效率的流程图

表面纹理化常见的设计包括黑硅和纳米柱阵列。黑硅技术利用化学腐蚀或激光加工技术在硅表面形成凹陷的微结构, 从而降低反射率至 1% 以下, 大大提高了吸光能力。纳米柱阵列则采用纳米级的柱状结构来增强光的散射和入射角度, 使光在组件内部多次反射, 进一步增加了吸收效率。这些纹理化技术不仅增强了组件的光吸收, 还在低成本和量产化方面具有良好的适应性, 适合大规模应用。

1.2.2 光捕获结构

光捕获结构通过改变光在组件中的传播路径, 实现对光的多次反射和吸收, 以最大化光的利用率。具体而言,

光捕获结构通过在光伏材料的内部加入反射层或微小的散射点, 使光在材料中实现“困光”效应, 即使其多次反射而不易逸出, 从而延长光在材料内部的传播路径, 提高吸收率 (如图 2 所示)。

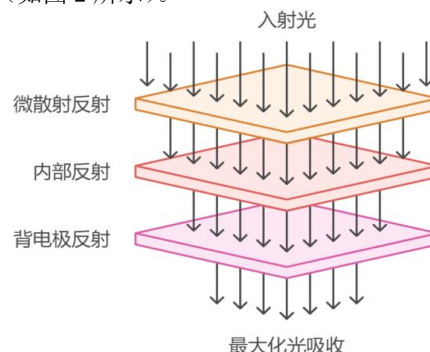


图 2 光伏电池中多层反射结构实现的光吸收示意图

背电极是光捕获结构的重要组成部分, 通过在组件底层增加高反射率材料 (如银或铝), 未被吸收的光子在到达背电极时会被反射回组件中, 重新参与吸收过程。这种背电极设计大大减少了光的损失, 提高了转换效率。此外, 先进的光捕获结构还包括微米级的散射层或多层干涉膜设计, 进一步增强了光的驻留时间和吸收效率, 特别适用于薄膜太阳电池等对光捕获要求较高的组件。表面纹理化技术与光捕获结构通过不同方式增加光的吸收和减少反射损失, 在光伏组件结构优化中扮演了重要角色。这两种技术的联合应用使得光伏组件能够在保持稳定性的同时显著提升光电转换效率, 推动了高效、低成本光伏组件的发展。

2 光伏组件效率提升的未来发展趋势

2.1 高效低成本技术的创新

硅材料在光伏组件中应用广泛, 但其厚度和纯度对成本和效率有直接影响。传统的晶体硅片厚度通常在 150 微米左右, 而超薄硅片技术将厚度缩减至 100 微米甚至更低, 从而减少了硅材料的用量。减少厚度不仅降低了材料成本, 还能够提高光的吸收效率, 因为薄硅片的载流子复合损失较小。但超薄硅片技术面临着机械强度和制造工艺上的挑战。随着切割和处理工艺的改进, 超薄硅片的易碎问题得以缓解, 且可以实现量产化。例如, 东方日升新能源股份有限公司已实现全面采用厚度 110 微米超薄硅片的电池和组件的量产, 并具备采用厚度小于 100 微米硅片的量产能力。这项技术不仅有效降低了生产成本, 同时保持了光伏组件的高效转换性能, 是实现高效低成本光伏组件的关键步骤之一。

钙钛矿材料以其高光电转换效率和低成本的制备工艺成为光伏行业的关注焦点。与传统硅基材料不同, 钙钛矿材料能够在低温条件下制备, 通过溶液处理即可完成薄膜涂层, 显著降低了制造成本。此外, 钙钛矿光伏电池的能带宽度可调, 具有优异的光吸收性能, 能够在较薄的材料层中实现高效转换。钙钛矿光伏材料的主要瓶颈在于其稳定性和耐候性。研究人员通过添加保护层、开发双层或

多层钙钛矿结构等方法,逐步改善了材料的稳定性,使其更适合长期应用。随着技术的成熟,钙钛矿光伏材料有望实现大规模产业化,为光伏组件提供一种高效低成本的替代材料,例如,2024年10月,南京大学谭海仁教授课题组制备的大面积全钙钛矿叠层光伏电池,光电转化效率达28.2%,刷新了该尺寸的世界纪录。

除了硅和钙钛矿材料,其他复合材料在光伏领域也展现出巨大潜力。以铜铟镓硒(CIGS)和铜锌锡硫化物(CZTS)为代表的复合材料,具有较高的光吸收能力和良好的稳定性。这些材料可被制成薄膜电池,减少了材料的用量并简化了生产工艺,从而降低了成本。复合材料在制造过程中采用了更加环保的工艺,减少了对有害化学品的依赖,符合可持续发展的需求。此外,这些材料可以在不同的基底上沉积,适合制备轻质、柔性和可弯曲的光伏组件,能够应用于建筑一体化光伏、车载光伏等新兴场景。复合材料的应用为光伏组件的高效低成本发展提供了更多的选择。高效低成本技术的创新通过超薄硅片技术、钙钛矿材料产业化和复合材料的开发,实现了光伏组件的效率提升和成本下降。这些技术不仅增加了光伏组件在多样化场景中的应用可能性,也为大规模光伏发电提供了经济高效的解决方案。

2.2 制造工艺的智能化与模块化

智能制造的应用为光伏组件生产注入了全新活力。借助物联网、人工智能和大数据分析,智能制造实现了自动化和精准控制。这意味着生产流程不再依赖人工操作,所有环节从原料处理到成品检测均可自动化完成。智能系统监控温度、湿度等关键参数,并根据实时数据自动调整设备状态,确保环境最优。使光伏组件的质量显著提升,良品率提高,而人工成本则显著减少。如隆基绿能科技股份有限公司的生产线已实现24小时不间断自动化生产。这种自动化不仅降低了人工干预,而且通过智能能耗管理系统进一步减少了能源消耗。智能化工艺带来了可观的经济效益,并符合可持续发展要求。生产的智能化还意味着制造过程中的数据可以实时采集和分析,使企业能够迅速识别并排除故障,确保设备稳定运行。

模块化生产体系将光伏组件制造流程划分为若干标准化模块,使每个模块能够独立运行并快速适应不同产品需求。模块化的关键在于其灵活性:面对不同市场的需求,企业可以根据订单情况自由组合生产模块,快速响应。对于建筑一体化光伏(BIPV)和车载光伏等需要特定尺寸和形状的应用场景,模块化生产体系尤其适用。只需调整模块,即可生产出适应特定应用的光伏组件,从而满足个性化定制的需求。模块化还极大简化了运维流程,降低了维护成本。例如,在光伏电站中,若某个模块故障,可以迅速替换该模块,而无须停机整个系统。这种设计不但减少了维修时间,还提升了系统的运行稳定性。随着模块化生产在光伏行业的逐步普及,生产成本降低,响应速度加快,光伏系统的应用前景更加广阔。

智能制造和模块化生产的结合还促进了光储一体化方案的实现,使光伏组件与储能技术集成成为可能。这种集成系统能够有效解决光伏系统在光照不足或电力需求高峰期的供电问题。智能管理系统实时监控并调节电力输出,确保光伏系统和储能单元在不同条件下均保持高效运行。如华为推出的智能光储系统,通过AI算法优化光伏组件和储能电池的工作状态,实现对电力的精准管理。系统根据用电趋势和环境数据,自动分配电力输出和储存,减少对电网的依赖。此方案特别适用于偏远地区、离网环境及家庭等用电需求波动较大的场景,为用户提供可靠、经济的用电方案。光储一体化系统不仅提升了能源利用效率,还能为不同时间段的电力需求提供灵活支持。光伏组件在白天的发电量存储于电池中,夜间供电需求高时释放,为电力系统的稳定性提供保障。光伏和储能的智能集成让光伏系统更加适应多样化场景,拓展了光伏发电的应用边界。

3 结语

光伏组件效率提升的研究集中在材料改进、结构优化和智能化制造等方面,已取得显著成果。材料创新,如硅基和新型半导体材料的应用,显著提高了光伏组件的转换效率;结构优化设计则通过提升光捕获和减少反射率等措施,进一步优化了光电性能。同时智能制造工艺的发展也为高效组件的大规模生产提供了有力支持。整体来看,光伏组件效率提升技术为光伏行业的可持续发展奠定了坚实基础。

【参考文献】

- [1] 刘书强,郭嘉荣,詹佳才. 光伏储能系统中光伏利用率的评估方法[J]. 中国标准化,2024,11(7):1-4.
 - [2] 戴升宝. 风力光伏发电市场春天不远[N]. 济南日报,2024-10-31(5).
 - [3] 刘铁凝,王沁芳,许鸣,等. 半透明光伏组件在BIPV中的优化应用研究[J]. 太阳能,2024(10):42-51.
 - [4] 田相亮,管有祥,陈昌明,等. 从废弃光伏组件中回收银的研究现状[J]. 贵金属,2024,45(1):97-103.
 - [5] 刘强强. 光伏发电柔性钢索构架及组件安装施工关键技术[J]. 安装,2024(10):33-35.
 - [6] 赵云. 水光互补模式下黄藏寺光伏电站主要设备选型[J]. 农村电气化,2024(10):38-40.
 - [7] 叶伟. 技术创新驱动光伏多元化应用[N]. 中国高新技术产业导报,2023-04-24(12).
 - [8] 李宁. 光伏电站效率提升策略研究[J]. 中国设备工程,2023(7):101-103.
 - [9] 谭建斌,欧阳萍,段春艳,等. 基于局部阴影遮挡下的光伏组件效率提升优化控制技术及实验分析[J]. 科学技术创新,2022(24):37-40.
 - [10] 刘灿邦. N型光伏投资进入活跃期 新型电池效率提升[N]. 证券时报,2022-07-01(11).
- 作者简介:全晓岑(1991—),男,汉族,山西大同人,本科,中级工程师,研究方向为新能源发电。