

光伏电池效率提升的关键技术研究

李玫润 范仲昊 赵倍晨 陶凌玥 张桓瑞
华能(甘肃)新能源有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的日益增强,光伏发电作为一种清洁、可再生的能源形式,正受到越来越多的关注。提高光伏电池效率是降低光伏发电成本、增加产出、优化能源结构的关键。本文将从光伏电池的原理出发,分析影响光伏电池效率的因素,并探讨提升光伏电池效率的关键技术,以期为光伏产业的发展提供理论支持和技术指导。

关键词: 光伏电池效率; 关键技术; 制造工艺优化; 结构优化; 温度补偿

引言

光伏电池作为光伏发电系统的核心部件,其效率直接决定了整个系统的发电能力。随着光伏技术的不断发展,光伏电池的效率也在不断提升。然而,目前光伏电池的效率仍存在一定的提升空间,因此,研究光伏电池效率提升的关键技术具有重要意义。

1 光伏电池的原理及影响因素

1.1 光伏电池的原理

光伏电池,作为太阳能发电的核心组件,其工作原理基于半导体材料的光生伏特效应。当太阳光照射到光伏电池的半导体表面时,光子携带的能量会激发半导体中的电子,使其从价带跃迁到能量更高的导带,这一过程中同时产生了相应的空穴,形成了电子-空穴对。这些载流子在半导体内部并不是随机分布的,而是在PN结内建电场的作用下,开始有序地移动。具体来说,N区(负电区)富含电子,而P区(正电区)则富含空穴。在内建电场的作用下,被光子激发出的电子会向N区移动,空穴则会向P区移动。这样,就在PN结两侧形成了电势差,即电压。当外部电路接通时,电子从N区通过外部电路流向P区,与空穴复合,释放出能量,从而形成了电流,实现了光能到电能的转换。

1.2 影响光伏电池效率的因素

光伏电池的效率是衡量其性能的重要指标,它受到多种因素的影响。首先,半导体材料的质量是至关重要的。高质量的半导体材料具有更好的光吸收能力和载流子迁移率,能够更有效地将光能转化为电能。其次,光照条件对光伏电池的效率也有显著影响。光照强度越大,光子激发出的电子-空穴对越多,电池产生的电流也就越大。同时,光照角度和光谱分布也会影响光子的吸收效率,进而影响电池的输出功率^[1]。此外,温度也是影响光伏电池效率的重要因素。随着温度的升高,半导体材料的禁带

宽度会减小,导致电子-空穴对的复合速率增加,从而降低电池的效率。同时,光谱分布也会影响电池对不同波长光子的吸收效率,进而影响其整体性能。

2 光伏电池效率提升的关键技术

2.1 材料创新

2.1.1 高效光吸收材料

在光伏电池中,光吸收材料的选择至关重要。目前,单晶硅和多晶硅是光伏电池的主流材料,但它们的转换效率已接近理论极限。因此,研究者们开始转向其他材料,如薄膜材料(CdTe、CIGS)以及钙钛矿材料等。钙钛矿材料因其高转换效率和低成本而备受瞩目。钙钛矿光伏电池具有制备工艺简单、原料丰富、可控性强等优点。近年来,在实验室条件下,钙钛矿光伏电池的转换效率已经取得了显著的提升,甚至超过了某些商业化的硅基光伏电池。然而,钙钛矿材料的稳定性问题仍是其商业化应用的一大障碍,因此,如何提高钙钛矿材料的稳定性是当前研究的重点。除了钙钛矿材料,其他薄膜材料如CdTe和CIGS也具有良好的光电转换性能。这些材料可以通过溅射、蒸发等物理方法或化学气相沉积等化学方法制备成薄膜,然后与其他材料组合成光伏电池。这些薄膜材料的光伏电池具有成本低、重量轻、易于大规模生产等优点,因此也是未来光伏电池发展的重要方向。

2.1.2 半导体复合材料

随着新材料技术的发展,光伏电池所选用的材料正逐渐向半导体复合材料方向转变。这些新材料不仅具有更高的光电转换效率,还能在更广泛的光照条件下工作。半导体复合材料是由两种或两种以上的半导体材料通过某种方式复合而成的新材料。这种复合材料可以结合各种材料的优点,实现光电转换性能的提升。例如,将硅与某些窄带隙半导体材料复合,可以扩展光伏电池

的光谱响应范围,提高其光电转换效率。此外,半导体复合材料还可以通过调整其组成和结构来优化其光电性能,使其更适应不同的应用环境。

2.2 结构优化

2.2.1 优化电极结构

电极是光伏电池的重要组成部分,其结构直接影响光的吸收和电流的收集。为了减少表面反射损失,提高光的吸收率,研究者们采用了纳米结构或光子晶体等光学结构来优化电极结构。纳米结构电极具有较大的比表面积,可以增加光与电极的接触面积,提高光的吸收效率。同时,纳米结构还可以增强光的散射作用,使光在电池内部多次反射,增加光在材料中的停留时间,从而提高光电转换效率。光子晶体则是一种具有周期性结构的材料,其折射率在空间上呈周期性变化。通过设计合适的光子晶体结构,可以控制光的传播方向和速度,实现光的全反射或透射,从而提高光的吸收效率。

2.2.2 设计更优的太阳能电池结构

除了优化电极结构外,设计更优的太阳能电池结构也是提高光伏电池效率的重要手段。目前,异质结(HJT)、背接触电池、隧道氧化层钝化接触(TOPCon)等新型太阳能电池结构已经得到了广泛的研究和应用。异质结太阳能电池是由两种不同禁带宽度的半导体材料组成的pn结。通过选择合适的材料组合和制备工艺,可以实现异质结太阳能电池的高效光电转换。背接触电池则是一种将电极设置在电池背面的新型结构,这种结构可以减少电极对光的遮挡,提高光的吸收效率^[2]。隧道氧化层钝化接触则是一种通过引入隧道氧化层来减少载流子负荷的新型接触结构,这种结构可以提高光伏电池的开路电压和填充因子,从而提高其光电转换效率。

2.2.3 多层结构和微纳结构

多层结构和微纳结构的设计理念也被广泛应用于光伏电池的结构优化中。通过引入多层结构,可以实现不同材料之间的优势互补,提高光伏电池的光电转换性能。例如,可以将具有不同禁带宽度的半导体材料堆叠在一起,形成多层结构的光伏电池,这样可以扩展电池的光谱响应范围,提高其光电转换效率。微纳结构则是一种通过微加工技术制备的具有纳米尺度结构的材料。这种结构可以增加光与材料的接触面积,提高光的吸收效率。同时,微纳结构还可以增强光的散射作用,使光在电池内部多次反射,增加光在材料中的停留时间,从而提高光电转换效率。

2.3 制造工艺改进

2.3.1 先进制造工艺

原子层沉积(ALD)和化学气相沉积(CVD)等先进制造工艺被广泛应用于光伏电池的制备中。这些工艺可以实现半导体材料的高纯度、高一致性和高均匀性沉积,从而提高光伏电池的光电转换性能。例如,通过ALD工艺可以制备出具有高质量界面的异质结太阳能电池,提高电池的开路电压和填充因子。通过CVD工艺可以制备出具有优异光电性能的薄膜材料,如CdTe和CIGS等。

2.3.2 制程技术优化

除了采用先进制造工艺外,制程技术的优化也是提高光伏电池效率的重要手段。通过优化制程技术,可以减少材料缺陷和非辐射复合,提高载流子的寿命和传输效率。例如,可以通过优化电池的退火工艺来减少材料中的缺陷和应力,提高电池的稳定性和光电转换性能。还可以通过优化电池的刻蚀工艺来控制电池的形貌和结构,从而提高光的吸收效率和电流的收集效率。

2.4 温度管理

2.4.1 设计有效的散热结构

为了控制电池温度,降低温度对转换效率的影响,研究者们设计了各种有效的散热结构。例如,可以采用半导体制冷片来主动冷却光伏电池,通过热电效应将电池产生的热量转移到散热片上,从而降低电池的温度。还可以采用通风或水冷却等方式来被动冷却光伏电池,通过自然对流或强制对流将电池产生的热量带走。

2.4.2 温度补偿措施

除了设计有效的散热结构外,还可以采用温度补偿措施来提高电池在不同温度下的效率稳定性。例如,可以在光伏电池系统中加入加热装置,当电池温度过低时通过加热来提高电池的温度,从而保持其高效工作^[3]。还可以通过优化电池的结构和材料来选择具有较好温度稳定性的材料组合,从而提高电池在不同温度下的效率稳定性。

2.5 智能控制

2.5.1 引入先进控制算法和智能传感器

通过引入先进控制算法和智能传感器,可以实时监测光伏电池的工作状态,自动调整工作参数以提高效率。例如,可以采用最大功率点跟踪(MPPT)算法来实时监测光伏电池的输出功率,并调整工作点以使其始终工作在最大功率点上。还可以采用智能传感器来监测电池的温度、光照强度等参数,并根据这些参数来调整电池的工作状态。

2.5.2 光伏电站管理系统

除了引入先进控制算法和智能传感器外,还可以建

立光伏电站管理系统来实现对光伏电池系统的全面监控和管理。通过光伏电站管理系统,可以实时监控设备运行状态、发电量等信息,并及时发现问题并进行调整。例如,当某块电池出现故障或效率下降时,管理系统可以及时发现并通知维护人员进行检修或更换。

2.6 光照条件优化

2.6.1 使用太阳能跟踪系统

太阳能跟踪系统是一种能够自动调整电池板角度以使其始终面向太阳的设备。通过使用太阳能跟踪系统,可以最大化光照时间和强度,提高光伏电池对光的吸收效果。目前,太阳能跟踪系统已经得到了广泛地应用,并取得了显著的效果。

2.6.2 光学元件应用

除了使用太阳能跟踪系统外,还可以通过反射镜、透镜等光学元件来精确控制光的入射角度和强度,提高光伏电池对光的吸收效果。例如,可以在电池板表面设置反射镜或透镜阵列来增加光的入射角度和强度,从而提高光的吸收效率。还可以通过优化光学元件的形状和位置来进一步提高光的吸收效果。

3 实际应用案例分析

3.1 隆基绿能Hi-MO X10组件

隆基绿能,作为全球领先的光伏产品制造商,近年来在高效电池组件的研发上取得了显著成果。其最新发布的Hi-MO X10组件,不仅刷新了晶硅赛道上的量产效率纪录,更以其卓越的性能和创新能力引领了行业潮流。Hi-MO X10组件的电池量产效率已突破26.6%,组件转换效率高达24.8%,这一成就得益于隆基绿能自研的双极复合钝化技术。该技术通过优化电池表面和内部的电学性质,成功将量产电池的开路电压提升至745mV以上,显著减少了电流损失,从而大幅提升了电池的转换效率。这一技术突破,不仅提高了单个电池的性能,更为组件的整体效率提升奠定了坚实基础^[4]。除了双极复合钝化技术,Hi-MO X10组件还集成了多项创新技术。其中,N型泰睿硅片的采用,进一步提升了电池的光电转换效率和稳定性。N型硅片相较于传统的P型硅片,具有更低的载流子复合速率和更高的电子寿命,从而有利于电池效率的提升。此外,0BB(无焊带)技术的引入,也极大地提高了组件的可靠性和耐久性。传统组件中的焊带易受热应力影响而断裂,导致组件性能下降。而0BB技术则通过直接连接电池片,消除了焊带来的潜在风险,提升了组

件的长期稳定性。

3.2 钙钛矿太阳能电池示范应用项目

钙钛矿太阳能电池作为新一代光伏技术,因其高转换效率、低成本和可调控性强等优点而备受瞩目。国网甘肃省电力公司电力科学研究院与大唐甘肃发电有限公司新能源分公司共同推进的钙钛矿太阳能电池示范应用项目,就是这一技术在实际应用中的一次成功尝试。该项目创新性地将标准钙钛矿太阳能电池改良为半透明结构,这一设计使得钙钛矿电池在保持高转换效率的同时,还能允许部分光线透过,为下方的晶硅太阳能电池提供光照。通过这种“钙钛矿+晶硅”的复合结构设计,不仅综合了两种电池的优点,还实现了光谱的互补吸收。钙钛矿电池主要吸收短波长的光线,而晶硅电池则主要吸收长波长的光线,两者结合使得光伏组件在更宽的光谱范围内都能有效地转换光能,从而提高了整体的光电转换效率。此外,该示范项目还针对钙钛矿电池的稳定性问题进行了深入研究,通过优化材料配方和制备工艺,提高了钙钛矿电池的耐湿性和耐热性,为其商业化应用奠定了坚实基础。这一项目的成功实施,不仅展示了钙钛矿太阳能电池在实际应用中的巨大潜力,也为光伏产业的创新发展提供了新的思路 and 方向。

结语

本文详细探讨了光伏电池效率提升的关键技术,包括制造工艺优化、结构优化、温度补偿等方面。通过实际应用案例分析可以看出,这些关键技术的应用可以显著提高光伏电池的效率和经济性。未来,随着技术的不断进步和应用场景的不断扩展,光伏电池的效率将进一步提升,为光伏发电产业的发展注入新的动力。同时,我们也需要持续关注新技术的发展动态,加强技术研发和创新,推动光伏产业的可持续发展。

参考文献

- [1]刘灿邦.光伏电池转换效率频频“打卡”技术切换即将迎来拐点[N].证券时报,2021-07-16(A06).
- [2]研究人员研发出热电转化效率达40%的热光伏电池[J].环境科学与管理,2023,48(03):168.
- [3]崔勇,徐业,侯剑辉.高效率有机光伏电池及其多功能应用(英文)[J]. Science Bulletin,2022,67(13):1300-1303.
- [4]杨开新.隆基股份光伏电池转换效率创新高[N].经济日报,2022-04-21(011).