

太阳能光伏发电效率提升方法研究

陈玉松

国家电投集团贵州金元集团威宁能源股份有限公司, 贵州 威宁 553100

DOI:10.61369/EPTSM.2025010006

摘要： 随着全球能源需求增长和环保意识增强，太阳能光伏发电作为清洁能源日益重要。但当前面临光吸收效率有限、转换效率低及阴影效应等挑战。本文旨在研究提升光伏发电效率的方法，通过优化半导体材料选择、表面纳米结构化、多层膜设计和光学共振技术等提高光吸收效率；并探索电池结构优化、载流子收集效率提升及新型电池技术，以期提高转换效率。研究成果将为太阳能光伏发电技术的进一步发展提供理论和实践支持。

关键词： 太阳能光伏发电效率；光伏电池转换效率；材料与结构设计优化

Research on Methods to Improve the Efficiency of Solar Photovoltaic Power Generation

Chen Yusong

State Power Investment Group Guizhou Jinyuan Group Weining Energy Co., LTD. Weining, Guizhou 553100

Abstract： With the increasing global energy demand and environmental awareness, solar photovoltaic power generation is becoming increasingly important as a clean energy source. But currently facing challenges such as limited light absorption efficiency, low conversion efficiency, and shadow effects. This article aims to study methods to improve the efficiency of photovoltaic power generation, including optimizing semiconductor material selection, surface nanostructuring, multilayer film design, and optical resonance technology to enhance light absorption efficiency; And explore battery structure optimization, carrier collection efficiency improvement, and new battery technologies to enhance conversion efficiency. The research results will provide theoretical and practical support for the further development of solar photovoltaic power generation technology.

Keywords： solar photovoltaic power generation efficiency; photovoltaic cell conversion efficiency; material and structural design optimization

引言

在全球能源转型与环保的双重驱动下，太阳能光伏发电作为清洁、可持续的能源备受关注，对缓解化石能源危机和实现碳中和目标至关重要^[1]。然而，太阳能光伏发电效率的提升仍面临诸多挑战，如材料光吸收效率、电池转换效率不高，以及阴影效应、温度变化等环境因素对系统效率的负面影响，这影响了其成本效益和大规模应用。因此，深入研究太阳能光伏发电效率提升方法具有重要意义。尽管国内外已取得显著成果，但仍存在材料成本高、技术成熟度不足等问题。基于此背景，本文从材料选择、电池结构优化、系统设计等方面入手，旨在探索提高光伏电池转换效率的有效途径。本研究不仅具有理论价值，而且对推动太阳能光伏发电技术的进一步发展，实现太阳能大规模应用具有重要的实践意义。

一、太阳能光伏发电技术原理及瓶颈

（一）太阳能光伏发电技术原理

太阳能光伏发电技术是一种将太阳能直接转换为电能的技术，其核心在于光伏效应。光伏效应是指当光照射到半导体材料表面时，光子能量激发半导体中的电子从价带跃迁到导带，从而

产生光生电流和光生电压。这一过程中，光能转化为电能，实现了太阳能的直接利用^[2]。光伏电池是太阳能光伏发电技术的核心组件。根据材料类型，光伏电池可分为硅基光伏电池、薄膜光伏电池、染料敏化光伏电池等。硅基光伏电池是目前应用最广泛、技术最成熟的光伏电池，其转换效率较高，但成本也相对较高。薄膜光伏电池则采用较薄的半导体材料，降低了材料成本，但转

转换效率相对较低。染料敏化光伏电池则利用染料分子吸收光能，通过电子传递过程产生电流，具有成本低、易于制备等优点，但转换效率仍有待提高。

（二）太阳能光伏发电技术的瓶颈分析

尽管太阳能光伏发电技术取得了长足的进步，但在实际应用中仍面临诸多瓶颈。光伏电池的转换效率是影响发电量的关键因素^[3]。目前，尽管硅基光伏电池的转换效率已接近理论极限，但薄膜光伏电池和染料敏化光伏电池的转换效率仍有较大提升空间。提高光伏电池的转换效率，不仅可以增加发电量，还可以降低光伏发电的成本。太阳能光伏发电技术的稳定性和可靠性也是制约其大规模应用的重要因素。光伏电池在长期使用过程中，会受到光照、温度、湿度等环境因素的影响，导致性能下降。此外，光伏系统的维护和保养也需要投入大量的人力和物力。因此，提高光伏电池的稳定性和可靠性，延长其使用寿命，对于推动太阳能光伏发电技术的进一步发展具有重要意义。

（三）太阳能光伏发电技术的未来发展方向

针对太阳能光伏发电技术面临的瓶颈，未来的发展方向主要包括以下几个方面。一是继续深入研究光伏效应的物理机制，探索新型半导体材料，提高光伏电池的转换效率^[4]。二是加强光伏电池的稳定性和可靠性研究，开发具有抗老化、耐腐蚀等性能的光伏电池材料。三是优化光伏系统的设计，提高系统的整体性能和发电效率。例如，通过优化电池布局、应用最大功率点跟踪算法等手段，进一步提高光伏系统的发电效率。四是推动太阳能光伏发电技术与智能电网、储能技术等相结合，实现太阳能的高效利用和智能化管理。

二、提高材料吸收效率的方法

（一）材料选择与改性策略

在太阳能光伏发电领域，材料的选择与改性是提高光吸收效率的关键。从基础材料的选择来看，硅因其良好的半导体性能和相对成熟的生产工艺，长期以来一直是光伏电池的主流材料。然而，随着技术的不断进步，人们开始探索其他具有更高光吸收效率和更低成本的新型半导体材料，如铜铟镓硒、碲化镉以及钙钛矿材料等^[5]。这些新型材料在光吸收范围、转换效率和稳定性方面展现出巨大的潜力。除了基础材料的选择，材料的改性也是提高光吸收效率的重要手段。通过对材料进行掺杂、合金化或表面处理，可以有效调整其能带结构，拓宽光吸收范围，从而提高光电转换效率。例如，通过向硅材料中掺入磷或硼等元素，可以形成N型或P型半导体，从而改变其导电性能和光吸收特性。此外，利用纳米技术和表面工程技术对材料进行改性，如构建纳米结构、引入表面缺陷等，也可以显著提高材料的光吸收效率和光电转换性能。

（二）光学设计与多层膜结构应用

光学设计是提高材料光吸收效率的另一个重要方面。通过合理设计光伏电池的光学结构，可以优化光在材料内部的传播路径，减少反射和透射损失，从而提高光吸收效率^[6]。例如，采用

抗反射涂层或陷光结构，可以有效减少入射光在电池表面的反射，使更多的光线进入材料内部被吸收。同时，通过调整材料的折射率和厚度，可以进一步优化光在材料内部的传播路径，提高光吸收效率。多层膜结构的应用也是提高光吸收效率的有效手段。通过在光伏电池中引入多层膜结构，可以形成光捕获效应，使光线在多层膜之间多次反射和散射，从而延长光线在材料内部的传播路径，提高光吸收效率。多层膜结构的设计需要考虑材料的折射率、厚度和层数等因素，以实现最佳的光吸收效果。此外，通过引入具有不同能带结构的材料构成多层膜结构，还可以实现光子的逐级吸收和转换，进一步提高光电转换效率。

（三）表面等离子体共振与量子点技术的应用

表面等离子体共振和量子点技术是近年来在提高材料光吸收效率方面崭露头角的新技术。表面等离子体共振是指在金属纳米结构表面产生的电子集体振荡现象，通过调整金属纳米结构的形状、尺寸和排列方式，可以实现对特定波长光线的强烈吸收和散射^[7]。将SPR效应引入光伏电池中，可以显著提高材料对特定波长光线的吸收效率，从而提高光电转换性能。量子点技术则是利用量子尺寸效应和量子限域效应，通过调控量子点的尺寸和形状，实现对光线的精准调控和吸收。量子点具有优异的光学性能和电学性能，可以作为光伏电池中的光吸收层或电子传输层，显著提高材料的光吸收效率和光电转换效率。此外，量子点还具有可调谐的发光性能，可以实现对光伏电池光谱响应的精确调控，进一步提高光电转换性能。

三、提高光伏电池转换效率的方法

（一）电池结构创新与优化

光伏电池的转换效率是衡量其性能的重要指标，而电池结构的创新与优化是提高转换效率的关键途径之一。传统的光伏电池结构，如单晶硅和多晶硅电池，虽然技术成熟，但在转换效率方面已逐渐接近其物理极限。因此，开发新型电池结构成为提高转换效率的重要方向。一种有效的结构创新是采用叠层电池设计^[8]。叠层电池由多个不同带隙的半导体材料层组成，每层材料吸收不同波长的光线，从而实现光谱的有效利用。这种设计可以显著提高光伏电池的转换效率，因为不同波长的光线都能被有效利用，减少了光损失。此外，钙钛矿/硅叠层电池等新型结构也展现出极高的转换效率潜力，成为当前研究的热点。除了叠层电池，微纳结构的应用也是提高转换效率的重要手段。通过在光伏电池表面或内部引入微纳结构，如纳米线、纳米孔和光子晶体等，可以有效增加光与材料的相互作用面积，增强光的吸收和散射，从而提高转换效率。这些微纳结构还可以引导光线在电池内部多次反射和散射，延长光程，进一步提高光吸收效率。

（二）界面工程与载流子管理

界面工程是提高光伏电池转换效率的另一个关键方面。光伏电池中的界面包括电池表面、材料界面以及电极界面等。这些界面的性质直接影响载流子的传输、复合和收集效率，从而对电池转换效率产生重要影响^[9]。优化界面性质的方法包括表面钝化、

界面修饰和电极设计等。表面钝化可以减少表面态密度，降低载流子的复合速率，从而提高开路电压和填充因子。界面修饰则通过引入缓冲层、隧穿层或反射层等结构，改善界面处的能级匹配和载流子传输特性。电极设计则关注于提高电极的导电性和与电池的接触性能，以减少接触电阻和载流子损失。载流子管理是提高光伏电池转换效率的另一个重要策略。载流子的传输、分离和收集效率直接影响电池的短路电流和填充因子。通过优化电池内部的电场分布、调整掺杂浓度和引入载流子传输层等手段，可以有效提高载流子的传输效率和收集效率，从而提高电池转换效率。此外，采用载流子选择性接触和载流子倍增效应等技术，也可以进一步提高光伏电池的转换性能。

（三）新型材料与工艺探索

除了电池结构和界面工程的优化，新型材料与工艺的探索也是提高光伏电池转换效率的重要途径。随着材料科学的发展，越来越多的新型半导体材料被应用于光伏电池中，如钙钛矿材料、有机-无机杂化材料、二维材料等。这些新型材料具有优异的光电性能和可调性，为光伏电池的性能提升提供了新的可能。钙钛矿材料因其高转换效率、低成本和可调谐的光学性能而成为当前研究的热点^[10]。通过优化钙钛矿材料的组成、结构和制备工艺，可以进一步提高其稳定性和转换效率。有机-无机杂化材料则结合了有机材料的灵活性和无机材料的稳定性，展现出良好的光电性能和可加工性。二维材料如过渡金属硫化物等，因其独特的电子结构和光学性质，在光伏电池中也展现出巨大的应用潜力。在工艺方面，采用先进的制备技术和工艺优化也是提高光伏电池转换效率的重要手段。

四、解决阴影效应及其他环境因素的影响

（一）阴影效应的分析与建模

阴影效应主要由大型障碍物（如建筑物、树木等）引起，这些障碍物会阻挡或吸收部分无线信号，导致信号强度在接收端出现衰减。为了准确描述这一现象，需建立阴影效应的数学模型。

常用的模型包括对数正态阴影模型，该模型假设信号强度的衰减服从对数正态分布，能够较好地反映实际环境中的阴影效应。通过对模型参数的研究，可以预测不同环境下的信号衰减情况，为系统设计和优化提供依据。

（二）多径传播与信号增强技术

除了阴影效应，多径传播也是影响无线通信质量的重要因素。信号在传播过程中会经过多条路径到达接收端，这些路径上的信号可能相互叠加或抵消，导致信号强度的波动。为了克服这一问题，可以采用信号增强技术，如分集接收、波束成形等。分集接收通过多个天线接收同一信号，利用信号在不同路径上的独立性来提高接收质量。波束成形则通过调整天线阵列的权重，使信号在特定方向上得到增强，从而抑制多径干扰。

（三）环境适应性传输策略

针对复杂多变的环境因素，设计环境适应性传输策略是提高无线通信系统性能的有效途径。这包括根据环境变化动态调整发射功率、调制编码方式等参数，以适应不同的传播条件。例如，在阴影效应严重的区域，可以适当增加发射功率或采用更稳健的调制编码方式，以确保信号的可靠传输。同时，利用机器学习等先进技术对环境进行预测和分类，可以进一步提高传输策略的适应性和准确性。

五、结束语

综上所述，太阳能光伏发电效率的提升是实现全球能源转型和碳中和目标的关键。本文通过深入研究材料选择、电池结构优化以及系统设计等方面的内容，探索了提高光伏电池转换效率的有效途径。虽然面临诸多挑战，但随着科技的不断进步和研究的深入，相信太阳能光伏发电技术将会取得更加显著的进展，为实现清洁能源的广泛应用和可持续发展作出更大贡献。未来，我们将继续关注这一领域的发展动态，为推动太阳能光伏发电技术的进一步发展贡献自己的力量。

参考文献

- [1] 李冰. 太阳能光伏发电技术的效率提升与优化 [J]. 中国高科技, 2024, (13): 91-93.
- [2] 马磊. 光伏太阳能发电系统的设计与优化 [J]. 建筑与施工, 2024, 3(7): 22-23.
- [3] 陈恩. 光伏电池组件性能评估及效率提升技术研究 [J]. 电力设备管理, 2024(8): 111-113.
- [4] 张光龙. 光伏系统发电效率提升方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2021, (04): 143-146.
- [5] 刘志刚, 王刚, 李国华, 等. 太阳能光伏电站发电效率提升策略研究 [J]. 中国新通信, 2020, 22(08): 240.
- [6] 李研. 太阳能光伏发电的现状与发展 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (15): 100-102.
- [7] 徐凡. 太阳能光伏发电系统的效率优化与性能监测研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (19): 115-117.
- [8] 李明臻, 张月靖. 太阳能光伏电站节能技术的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (12): 123-125.
- [9] 姚亚军. 太阳能光伏发电技术的应用研究 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(36): 181-184.
- [10] 于晓旭. 太阳能光伏发电并网技术的应用探究 [J]. 装备维修技术, 2020, (02): 183.