

# 光子增强热电子发射太阳能电池研究现状

罗晟昊, 刘雨辰, 陈进, 魏佳乐, 刘应豪, 杨逸超

湖北航天力源科技有限公司, 湖北 襄阳

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘要

光子增强热电子发射(PETE)能量转换器是将光伏发电和热电子发射发电结合到一个单一的物理过程的能量转换器, PETE太阳能电池理论上具有较高的光电转换效率。本文简要介绍了PETE太阳能电池的结构、工作原理及研究现状, 并对未来PETE太阳能电池的发展前景进行了展望, 以期能为发展PETE太阳能电池提供参考。

## 关键词

光子增强热电子发射, 太阳能电池, 光电转换

# Research Status of Photon-Enhanced Thermionic Emission Solar Cells

Shenghao Luo, Yuchen Liu, Jin Chen, Jiale Wei, Yinghao Liu, Yichao Yang

Hubei Aerospace Liyuan Technology Co., Ltd., Xiangyang Hubei

Received: April 25, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

## Abstract

Photon-enhanced thermionic emission (PETE) energy converter is an energy converter that combines photovoltaic power generation and thermionic emission power generation into a single physical process. Theoretically, PETE solar cells have high photoelectric conversion efficiency. This paper briefly introduces the structure, working principle and research status of PETE solar cells, and prospects the future development of PETE solar cells, so as to provide reference for the development of PETE solar cells.

## Keywords

Photon-Enhanced Thermionic Emission, Solar Cell, Photoelectric Conversion



## 1. 引言

随着全球工业的迅速发展和全球人口的急剧增加，人类对煤、石油、天然气等传统化石能源的需求正在不断攀升。然而，这种过度依赖传统能源的模式已经引发了严重的环境问题和能源危机，太阳能因其无污染、可再生、可存储等多重优势备受瞩目。近年来，太阳能发电技术取得了显著进展，虽然仍存在一些挑战，如光电转换效率不足，但通过持续的研究和创新，新型太阳能发电技术不断涌现。相信随着技术的不断进步，太阳能发电将成为更为可靠和高效的能源之一。因此，对太阳能高效的开发利用成为了解决当前能源问题和环境问题的关键措施[1]，所以，提高太阳能光电转换效率和开发新的太阳能发电技术仍然是我们重要的研究方向，为构建可持续发展的未来奠定坚实基础。本文主要介绍了 PETE 太阳能电池的由来、原理及研究现状。

## 2. 太阳能发电技术

太阳能发电技术是利用光能转化成电能的发电技术，是太阳能的主要利用方式，太阳能发电技术主要包括光伏发电、光热发电以及光伏/光热复合等发电技术[2]。

### 2.1. 光伏发电技术

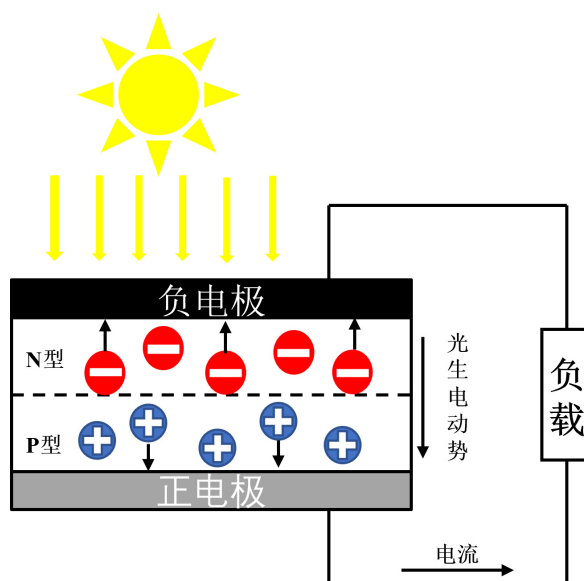


Figure 1. Schematic diagram of a P-N junction photovoltaic cell

图 1. P-N 结光伏电池示意图

光伏发电是一种利用半导体材料中的光生伏特效应，直接将太阳光能转化为电能的技术[3]。P-N 结太阳能电池是最常见的光伏电池，结构示意图如图 1 所示，光伏发电的核心在于光生伏特效应，传统太阳能电池只能吸收能量大于带隙的光子，并将其转化为电能，但是这部分能量并不会全部被利用，会以热损失的形式损耗，对于能量低于带隙的光子吸收率为 0，进而造成非常大的损失，这些是导致传统光伏

电池光电转换效率低的主要原因[4]-[6]。单结 Si 太阳能电池由于 Shockley-Queisser 极限，其理论光电转换效率约为 31% [7]，而实际中其光电转换效率远远低于理论值[8]。

## 2.2. 光热发电技术

光热发电是一种利用太阳能将光能转化为热能，再将热能转化为电能的发电技术。其基本原理是通过聚光器将太阳光聚焦到一个点或一条线上，提高这一区域的温度来加热某种流体，将其加热至高温状态，随后，高温流体被导入至热交换器中，与水蒸汽进行热交换，使水蒸汽被加热并产生高温高压的蒸汽，通过高温高压蒸汽来驱动涡轮机或发电机，最终产生电能[9]。太阳能光热发电技术根据转换方式分为热机发电技术、温差发电技术和热电子发电技术。

热机发电技术主要是光热间接发电，主要通过塔式、碟式、槽式和线性菲涅尔式聚光形式，其中塔式光热发电在大型光热发电领域效率最高、成本最低，具有极好的发展前景[10]。目前热机发电系统每年可实现转换效率约为 10%~20%，转换效率相对较低[11]。

温差发电主要是利用材料的热电效应来进行光热发电。图 2 是温差发电示意图，由两种不同类型的热电材料连接在一起，通过太阳光照射一端，使这一端处于高温，另一端处于低温，这样两端就产生温度差，由于塞贝克效应材料内部电子因温度差使电荷分布不均，在温差作用下，半导体材料中的载流子(主要是 p 型半导体中的空穴和 n 型半导体中的电子)从热端向冷端漂移，导致在材料间产生电压差，从而形成电势差[12]。尽管研究者们对温差发电技术研究很多，但是温差发电技术光电转换效率依旧低于 10% [13]。

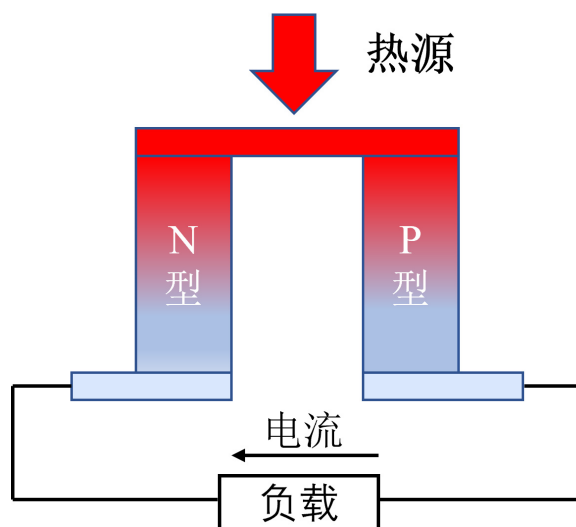


Figure 2. Schematic diagram of power generation with temperature difference  
图 2. 温差发电示意图

热电子发电是利用材料的热电子发射效应来进行光热发电的，图 3 是热电子发射结构示意图。主要由发射极(金属阴极)和接收极(阳极)组成，不同于其他光热发电转换器是两极之间为真空环境[14]。通过聚光系统，将太阳光聚焦于发射极，使其温度升高，当阴极温度达到一定值以后，阴极材料内部的热运动使得电子获得足够动能以克服势垒，从而从材料表面逸出到达真空中，从而被阳极接收[14]。目前研究表明，热电子发电想要得到更高的转换效率，对材料和制备工艺要求极高，并且其转换效率较低大约为 10% [15]。

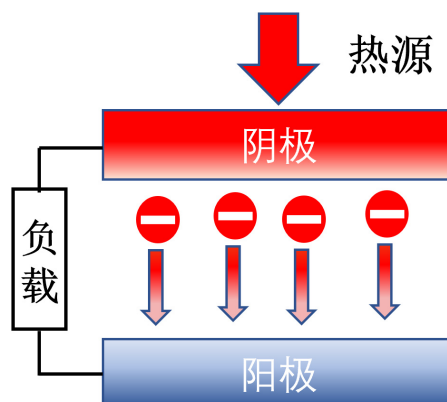


Figure 3. Schematic diagram of thermionic power generation  
图 3. 热电子发电示意图

### 2.3. 太阳能光伏/光热复合发电技术

当光子能量接近太阳能电池带隙能量时，几个太阳能电池的光谱响应通常更有效，因此，能量小于或大于太阳能电池带隙能量的光子只能被部分利用。为了解决这一问题，人们开发了分光太阳能光伏/光热复合发电技术(Photovoltaic-Thermoelectric, PV-TE)系统，因为它可以在非常宽的太阳光谱波长范围内利用全部太阳能。PV-TE 结合了光电发电和光热发电两种技术，其核心是利用利用光伏发电的同时将产生的热能进行二次利用，旨在更全面、高效地利用太阳能能量。太阳能光/热复合发电结构一般由太阳能聚光器、分光装置、光伏组件、TE 组件和冷却系统组成，太阳能光/热复合发电技术可以充分利用光伏和光热的不同发电原理。近年来，PV-TE 技术越来越受到研究人员的关注，并不断得到改进。PV-TE 系统成本的降低和转换效率的提高使其有可能在全球节能和减少污染物的努力中发挥重要作用。并对今后的研究方向进行了展望。采用高质量加工技术的新系统设计也将提高 PV-TE 的成本效益，这将使其在现有材料的基础上获得广泛的应用。此外，纳米流体作为一种替代冷却介质，与水相比具有更好的性能，因此可以考虑取代传统的冷却方式[16][17]。但是，实际中复合系统无法实现理想的结果，温差大会导致热电子发电效率高，但也会导致光伏发电系统温度升高，从而降低其效率，无法实现高的转换效率[17]。

综上，光伏发电依赖光电效应直接转换但高温易损耗效率，光热发电通过热能转化却难以利用高能光子，近些年来研究表明 PETE 可同时捕获光能与热能，在高温下协同激发电子逸出，既弥补了光伏高温衰减的短板，又突破了传统光热的转换效率限制，实现光电耦合的高效能量利用。

## 3. 光子增强热电子发射能量转换器

光子增强热电子发射太阳能电池代表着一种先进的太阳能转换技术，它是将光伏发电和热电子发电结合到单一的物理过程的能量转换器，并通过引入光子增强结构来提高光电转换效率。

### 3.1. 光子增强热电子发射能量转换器原理

光子增强热电子发射能量转换器的原理具体包括三个关键步骤，如图 4 所示，主要包括激发、运输和逸出三个过程[18]-[20]：

(1) 当太阳光照射到光子增强热电子发射太阳能电池表面时，光子与材料内的电子发生相互作用。大于带隙的电子会被激发电子到导带底部，由于太阳光的照射导致发射电子的材料温度升高，小于带隙的电子被热化迅速到导带底部。

(2) 随着电子被不断激发到导带底部，导带底部电子浓度迅速增大，此时导带中出现电子浓度梯度，在电子浓度的驱使下电子向发射极表面扩散。

(3) 当扩散到阴极表面的电子能量可以克服材料的电子亲和势时，就可以发射到真空，从而被阳极收集，在阴阳极之间形成电势差。

PETE 太阳能电池在原理上具有双重机制增强效率、光谱响应更广泛、热稳定性好以及抗光热降解等优势，使得其在太阳能转换领域具有较大的潜力和应用前景。

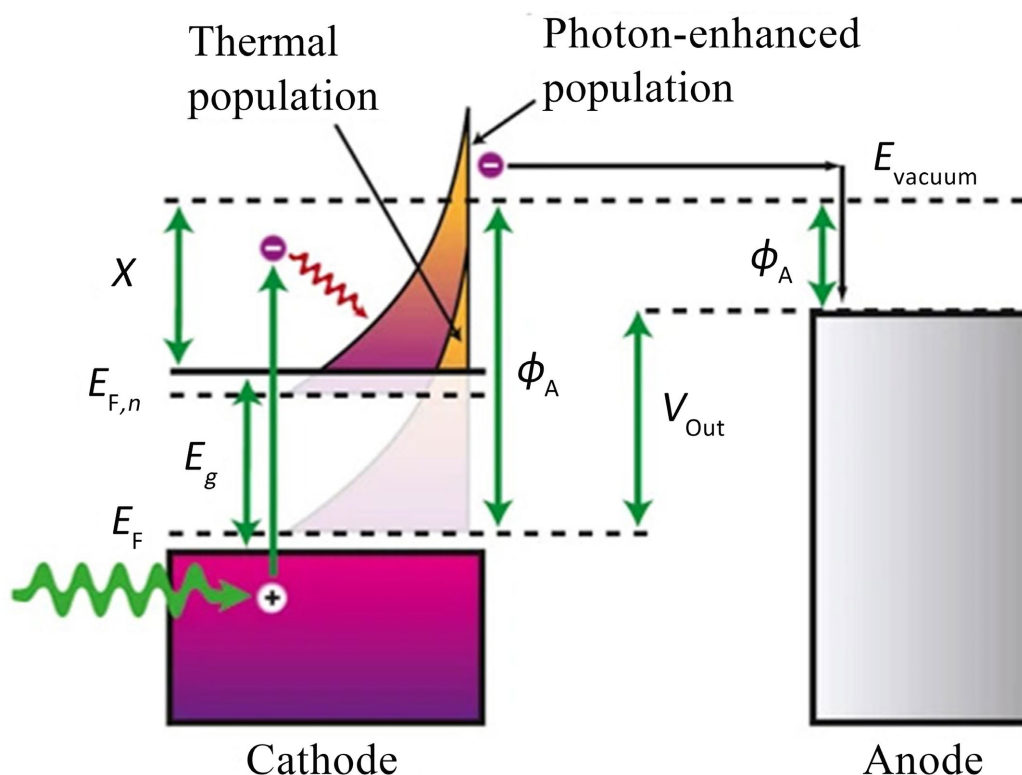


Figure 4. Schematic diagram of photon-enhanced thermionic emission energy converter [18]

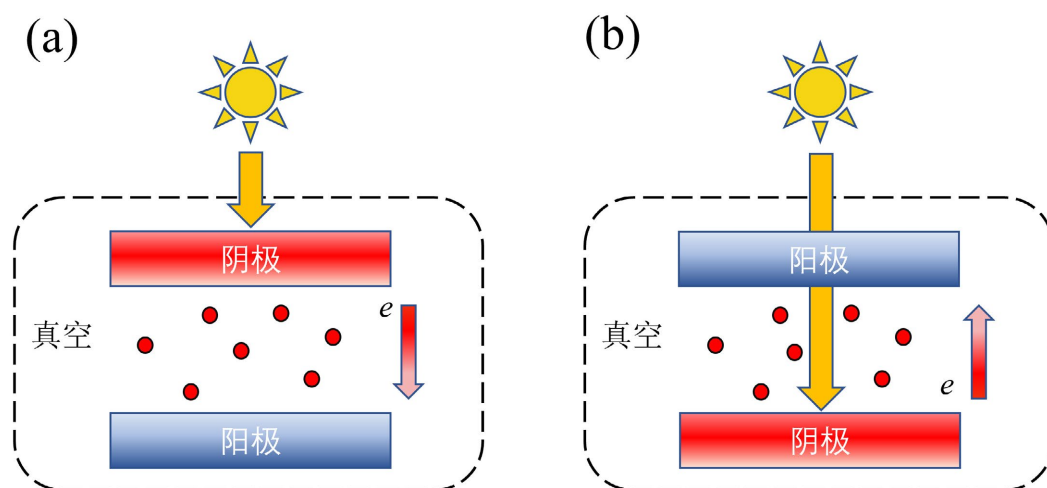
图 4. 光子增强热电子发射能量转换器原理图[18]

### 3.2. 光子增强热电子发射器件类型

光子增强热电子发射太阳能电池可以分为透射式光子增强热电子发射太阳能电池和反射式光子增强热电子发射太阳能电池，如图 5 所示。

图 5(a)是透射式光子增强热电子发射太阳能电池结构示意图，透射式光子增强热电子发射太阳能电池的关键在于光子增强效应，当太阳光照射到阴极(光吸收层)时，大于带隙的电子会被光子激发到真空中，部分光子被吸收并转化为热能，从而增加了局部温度，这使得热电子能够通过热电子发射效应逸出材料表面到达真空中，随后被阳极吸收形成电流[21]。

图 5(b)是反射式光子增强热电子发射太阳能电池结构示意图，反射式光子增强热电子发射太阳能电池通常选择透明或半透明阳极材料，反射式光子增强热电子发射太阳能电池的关键在于利用高反射率的材料来增加入射太阳光的光强度和局部温度，从而提高热电子发射效应，太阳光通过阳极照射到阴极表面，大于带隙的电子被光子反向激发到真空中，部分光子被吸收并转化为热能，从而增加了局部温度，这使得热电子能够通过热电子发射效应逸出材料表面到达真空中，随后被阳极吸收形成电流[22]。



**Figure 5.** (a) Transmission photon-enhanced thermionic emission solar cells; (b) Reflective photon-enhanced thermionic emission solar cells

**图 5.** (a) 透射式光子增强热电子发射太阳能电池；(b) 反射式光子增强热电子发射太阳能电池

### 3.3. 光子增强热电子发射能量转换器国内外研究现状

2010年, Schwede 等人[18]提出了一种新的太阳能发电概念, 光子增强热电子发射太阳能电池, 它将量子机制和热机制结合为一个单一的物理过程。并通过氮化镓光电发射产率测量证明了光子增强热电子发射效应, 并且理想化器件的计算效率可以超过单结光伏电池的理论极限。

2012年, Ito 等人[23]通过粒子在电池中的模拟证明了克服空间电荷的一种可能的解决方案是添加铯填充并通过连续激光激发铯共振能级产生空间电荷中和等离子体, 来提高其转换效率; 同年, Segev 等人[24]分析了之前对 PETE 转换效率的处理中遗漏的两个主要方面: 阴极导带载流子浓度随电流的变化和热平衡时阴极温度, 结果表明, 转换效率是温度的单调递增函数, 转换效率是阴极电子亲和力的单调递减函数。

2013年, Schwede 等人[25]研究 PETE, 提出了以 GaAs/AlGaAs 异质结作为 PETE 的阴极材料, GaAs 作为吸收层, AlGaAs 作为发射层, 研究异质结如何对 PETE 性能的提升, 结果表明异质结可以降低发射层表面的复合, 优化阴极结构以提升 PETE 特性。

2014年, 唐伟东等人[26]利用有机金属化学气相沉积法生长的高质量 p 型 GaAs 薄膜在改进的电场发射系统中, 使用波长为 650 nm 的红光 LED 阵列和加热电阻分别模拟太阳光电和热电子效应, 并施加电场代替 Cs/Cs-O 涂层来降低表面势垒。证明 Cs/Cs-O 涂层有望调节作为 PETE 太阳能器件阴极的 GaAs 薄膜的表面电子亲和力, 但其温度依赖稳定性必须进一步研究和改进。几何场增强是一种很有前途的表面涂层的替代方法。

2015年, Segev 等人[27]分析了等温和双带隙的理想 PETE 太阳能电池的效率上限, 并与理想光伏电池和理想太阳能热转换器进行了比较。等温 PETE 转换器显示被限制在小于 SQ 限制, 但非等温装置可以超过这个限制。效率的极限随着通量浓度的增加而增加。在 1000 个太阳浓度下, 二次热循环的增加提高了所有 PETE 配置的效率极限, 等温 PETE 和双带隙 PETE 系统的效率极限分别为 69.8%和 70.4%。Varpula 等人[28]模拟研究了硅、砷化镓和磷化铟作为阴极材料在 PETE 太阳能电池中的应用。模拟了光子吸收系数的温度依赖性和电子迁移率的温度和掺杂依赖性, 给出了模拟器件的特性, 并讨论了影响器件效率的因素, 研究表明, Si、GaAs 和 InP 都是很有前途的 PETE 太阳能电池材料, 如果这些材料的表面复合、有效电子亲和力和热稳定性可以得到优化。尽管 GaAs 和 InP 具有强烈的辐射复合, 但由于它们的强

吸收, 它们的效率(20%~25%)高于 Si (10%~15%), 特别是 InP, 由于其更强的光子吸收特性, 它比 GaAs 具有更高的效率, 是 PETE 阴极有希望的候选者。

2016 年, Sandovsky 等人[29]研究了硅阴极上的两种前后电触点配置, 以及器件效率与接触面积的关系, 使用了二维详细模拟。在中高温下, 接触面积对效率的影响是不同的, 这是由于接触处从电子复合到电子注入的变化。当接触足够小时, 局部电位梯度就会形成一个有效的电子复合屏障。与前触点相比, 后触点在所有温度下都具有更高的效率, 并且允许更大的接触面积, 这可能有助于减少欧姆损耗和吸收红外辐射。

2017 年, Girolami 等人[30]通过飞秒激光处理制备了石墨柱阵列作为 PETE 阴极材料, 使用多次激光扫描可以最大限度地提高 sp<sup>2</sup> 含量, 降低电阻率, 这避免了可能影响金刚石基 PETE 太阳能电池转换效率的电流瓶颈的形成。

2018 年, Zhuravlev 等人[31]利用光反射率和光发射量子产率光谱对不同 Cs 覆盖的 Cs/GaAs 表面的直接光发射、光子增强热电子发射(PETE)、表面能带弯曲和光电压、有效电子亲和、电子逃逸到真空中的概率等弛豫现象进行了实验研究。解释了 Cs 的作用, 并且说明了 Cs 覆盖区域对 PETE 性能的影响。浙江大学肖刚等人[32]提出了太阳能 PETE 转化系统热力学分析的理论框架。建立了包含能量平衡、作用平衡和熵平衡的太阳能 PETE 转换热力学模型。介绍了系统参数, 即电极的浓度比、功函数和温度对 PETE 性能的影响。此外, 还讨论了常规热电子转换和光子增强热电子转换的电子传输路线和理论效率比较。当聚光通量为 500 kW/m<sup>2</sup>、阴极带隙为 1.2 eV、电子亲和势为 1.2 eV 时, PETE 器件与卡诺发动机相结合, 总的太阳能发电效率和焓效率分别为 54.32%和 58.42%。光激发和热化的结合使得电子发射焓比达到 62.36%, 比普通的热电子转换高出 10.92%。

2019 年, Wang 等人[33]提出了一种新的具有微尺度电极间空间的 PETE 太阳能电池模型, 该模型与热辐射的特征波长相当。载流子浓度和阴极温度都由平衡方程决定。揭示了间隙对热电子发射和热损失机理的影响。通过近场辐射和空间电荷效应的相互作用, 优化电极间空间, 揭示 PETE 太阳能电池的最佳性能。

2021 年, Elahi 等人[34]报道了一种用于聚光太阳能发电(CSP)的光子增强热电子发射(PETE)装置的能量守恒分析模型, 由掺硼的硅为阴极和掺磷金刚石为阳极组成。并考虑了在太阳照射下装置中发生的所有主要能量损失机制。为了找到一个最佳的设计点, 以提供最佳的 PETE 功率输出和能量转换效率, 研究了 Si 发射极厚度、电极间真空间隙、聚光倍数和阳极温度对转换效率的影响。所得的结果可以更好地用于理解光子增强热电子能量转换过程, 更好地推进 PETE 技术的发展。

2022 年, Yang 等人[35]将由 ZnO 纳米线阵列组成的光电阴极作为光子增强热电子发射(PETE)太阳能转换器的阴极, 并且将具有声子瓶颈效应的 InN 应用于 PETE 转换器中, 通过一维连续方程和边界条件的基础上, 建立了该复合光电阴极 PETE 转换的理论模型。他们模拟并分析了转换效率与工作温度、太阳能浓度、表面电子亲和力和工作电压的关系, 通过不同温度下 InN 光电阴极的电流 - 电压特性实验验证了所提出阴极的可行性。模拟和实验结果表明, InN 是一种很有前途的光电阴极材料, 可以实现高性能的 PETE 太阳能电池。同年, Guo 等人[36]采用水热还原氧化石墨烯制备了多孔三维石墨烯气凝胶作为阴极材料, 用自制装置测试了样品的 PETE 性能, 结果表明石墨烯气凝胶具有显著和稳定的热电子发射特性, 石墨烯气凝胶是一种很有前途的 PETE 太阳能转换器阴极材料。

2023 年, Qiu 等人[37]提出了光子增强热电子发射转换器和光伏(PET-PV)太阳能电池的概念, 并明确了三种类型的 PET-PV 太阳能电池的工作原理, 此外, 开发了 PETE 原型转换器, 光线通过透明阳极, 即硼硅酸盐玻璃上的铟锡氧化物(ITO)膜照射到阴极(P 型硅片)表面。实验结果表明, 在光照下阴极饱和电流比纯热电子发射模式大 300 倍, 阴极功函数降低 0.6 eV。这个研究为 PET-PV 太阳能电池的进一步开

发和应用奠定了坚实的基础。

2025年, Qiu 等人[38]总结, 在结构上, PETE 与热电子发射转换器并联, 包括阴极、阳极和真空间隙。但 PETE 的 p 型阴极具有独特的特性。该技术适用于大型电厂建设和分布式能源系统。此外, 它还能与热能储存结合运行, 有望成为突破光伏波动瓶颈、为高效稳定太阳能发电提供有力支持的关键技术。

#### 4. 结论

传统光伏发电光谱利用率低、高温易衰减, 光热及复合发电转换效率受限, 而 PETE 技术通过光电协同耦合, 可同时利用光能与热能, 兼具宽光谱响应、高温稳定性好、理论效率突破单结光伏极限等突出优势, 为高效太阳能转换提供了新方向。未来可通过优化阴极材料(使用 p 型半导体)、调控表面电子亲和势、设计真空间隙结构等具体措施, 进一步提升器件性能, 推动其在聚光发电与分布式能源系统中的实际应用。

#### 参考文献

- [1] Ashraf, M., Ayaz, M., Khan, M., Adil, S.F., Farooq, W., Ullah, N., *et al.* (2023) Recent Trends in Sustainable Solar Energy Conversion Technologies: Mechanisms, Prospects, and Challenges. *Energy & Fuels*, **37**, 6283-6301. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c04077>
- [2] 高宇, 张杰. 关于太阳能光热发电的技术特点与应用分析[J]. 中国设备工程, 2023(14): 205-207.
- [3] 鲁方莹, 权乃承, 林雪. 提高转换效率的双 PN 结太阳能电池结构[J]. 中国新技术新产品, 2020(17): 8-10.
- [4] Durganjali, C.S., Avinash, G., Megha, K., Ponnalagu, R.N., Goel, S. and Radhika, S. (2023) Prediction of PV Cell Parameters at Different Temperatures via ML Algorithms and Comparative Performance Analysis in Multiphysics Environment. *Energy Conversion and Management*, **282**, Article 116881. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116881>
- [5] Wang, A. and Xuan, Y. (2018) A Detailed Study on Loss Processes in Solar Cells. *Energy*, **144**, 490-500. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.058>
- [6] Hirst, L.C. and Ekins-Daukes, N.J. (2010) Fundamental Losses in Solar Cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **19**, 286-293. <https://doi.org/10.1002/pip.1024>
- [7] Shockley, W. and Queisser, H.J. (1961) Detailed Balance Limit of Efficiency of p-N Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, **32**, 510-519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- [8] Arai, Y., Ishii, M., Shinohara, H. and Yamazaki, S. (1991) A Single P-I-N Junction Amorphous-Silicon Solar Cell with Conversion Efficiency of 12.65%. *IEEE Electron Device Letters*, **12**, 460-461. <https://doi.org/10.1109/55.119165>
- [9] 胡国武, 陈维铅. 太阳能光热发电技术及其发展现状研究[J]. 甘肃科技纵横, 2023, 52(11): 20-25.
- [10] Rezk, H., Mukhametzyanov, I.Z., Abdelkareem, M.A., Salameh, T., Sayed, E.T., Maghrabie, H.M., *et al.* (2022) Multi-criteria Decision Making for Different Concentrated Solar Thermal Power Technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **52**, Article 102118. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102118>
- [11] 全向, 孙兴业, 王超. 太阳能光热发电技术前景展望[J]. 中国高新科技, 2023(14): 26-29.
- [12] Li, S., Liu, Q., Chen, S., Wu, Y., Zhou, X., Chen, X., *et al.* (2023) Application Analysis of ZnSb/InSe -Based Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials*, **52**, 6654-6666. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10604-6>
- [13] 冯倩倩, 杨浩钦, 韩娅钟, 等. 半导体温差发电转换效率研究[J]. 无线互联科技, 2021, 18(4): 108-109+114.
- [14] Jensen, D., Taufiq Elahi, A.N.M., Ghashami, M. and Park, K. (2021) Submicrometer-Gap Thermionic Power Generation Based on Comprehensive Modeling of Charge and Thermal Transport. *Physical Review Applied*, **15**, Article 024062. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.15.024062>
- [15] He, J. and Tritt, T.M. (2017) Advances in Thermoelectric Materials Research: Looking Back and Moving Forward. *Science*, **357**, eaak9997. <https://doi.org/10.1126/science.aak9997>
- [16] Luo, B., Deng, Y., Wang, Y., Gao, M., Zhu, W., Hashim, H.T., *et al.* (2016) Synergistic Photovoltaic-Thermoelectric Effect in a Nanostructured CdTe/Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Heterojunction for Hybrid Energy Harvesting. *RSC Advances*, **6**, 114046-114051. <https://doi.org/10.1039/c6ra20149k>
- [17] Li, G., Shittu, S., Diallo, T.M.O., Yu, M., Zhao, X. and Ji, J. (2018) A Review of Solar Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid System for Electricity Generation. *Energy*, **158**, 41-58. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>
- [18] Schwede, J.W., Bargatin, I., Riley, D.C., Hardin, B.E., Rosenthal, S.J., Sun, Y., *et al.* (2010) Photon-Enhanced Thermionic

- Emission for Solar Concentrator Systems. *Nature Materials*, **9**, 762-767. <https://doi.org/10.1038/nmat2814>
- [19] 唐伟东. 基于光子增强热电子发射(PETE)机理太阳能电池器件研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.
- [20] 赵琦, 沈晓明, 符跃春, 等. 光子增强热电子发射(PETE)太阳能电池的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(S1): 1-6.
- [21] 段赐琛. 基于 PETE 的透射式 NEA GaAs 阴极的理论研究和性能分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [22] 谢柳兵. 反射式光子增强热电子发射器件的研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [23] Ito, T. and Cappelli, M.A. (2012) Optically Pumped Cesium Plasma Neutralization of Space Charge in Photon-Enhanced Thermionic Energy Converters. *Applied Physics Letters*, **101**, Article 213901. <https://doi.org/10.1063/1.4767349>
- [24] Segev, G., Rosenwaks, Y. and Kribus, A. (2012) Efficiency of Photon Enhanced Thermionic Emission Solar Converters. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **107**, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.08.006>
- [25] Schwede, J.W., Sarmiento, T., Narasimhan, V.K., Rosenthal, S.J., Riley, D.C., Schmitt, F., *et al.* (2013) Photon-Enhanced Thermionic Emission from Heterostructures with Low Interface Recombination. *Nature Communications*, **4**, Article No. 1576. <https://doi.org/10.1038/ncomms2577>
- [26] Tang, W., Yang, W., Yang, Y., Sun, C. and Cai, Z. (2014) Gaas Film for Photon-Enhanced Thermionic Emission Solar Harvesters. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **25**, 143-147. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.10.009>
- [27] Segev, G., Rosenwaks, Y. and Kribus, A. (2015) Limit of Efficiency for Photon-Enhanced Thermionic Emission vs. Photovoltaic and Thermal Conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **140**, 464-476. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.001>
- [28] Varpula, A., Tappura, K. and Prunnila, M. (2015) Si, Gaas, and InP as Cathode Materials for Photon-Enhanced Thermionic Emission Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **134**, 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.12.021>
- [29] Sandovsky, R., Segev, G. and Kribus, A. (2016) Investigation of Contact Grid Geometry for Photon-Enhanced Thermionic Emission (PETE) Silicon Based Solar Converters. *Solar Energy*, **133**, 259-273. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.066>
- [30] Girolami, M., Criante, L., Di Fonzo, F., Lo Turco, S., Mezzetti, A., Notargiacomo, A., *et al.* (2017) Graphite Distributed Electrodes for Diamond-Based Photon-Enhanced Thermionic Emission Solar Cells. *Carbon*, **111**, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.061>
- [31] Zhuravlev, A.G. and Alperovich, V.L. (2018) Relaxational Kinetics of Photoemission and Photon-Enhanced Thermionic Emission from P-Gaas Surface with Nonequilibrium Cs Overlayers. *Applied Surface Science*, **461**, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.157>
- [32] Xiao, G., Zheng, G., Ni, D., Li, Q., Qiu, M. and Ni, M. (2018) Thermodynamic Assessment of Solar Photon-Enhanced Thermionic Conversion. *Applied Energy*, **223**, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.044>
- [33] Wang, Y., Li, H., Hao, H., Chen, J. and Su, S. (2019) Optimal Design of the Interelectrode Space in a Photon-Enhanced Thermionic Emission Solar Cell. *Applied Thermal Engineering*, **157**, Article 113758. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113758>
- [34] Elahi, A.N.M.T., Jensen, D., Ghashami, M. and Park, K. (2021) Comprehensive Energy Balance Analysis of Photon-Enhanced Thermionic Power Generation Considering Concentrated Solar Absorption Distribution. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **226**, Article 111067. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111067>
- [35] Yang, N., Xie, L., Wang, P., Xu, Y., Li, S., Shen, X., *et al.* (2022) Theoretical Analysis and Experimental Research of Photon-Enhanced Thermionic Emission Solar Energy Converters with Inn Photocathode. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **242**, Article 111766. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111766>
- [36] Guo, S., Zhao, H., Xu, Y., Pei, X., Li, S., Fu, Y., *et al.* (2022) Preparation of Graphene Aerogel and Application in Photon-Enhanced Thermionic Emission. *RSC Advances*, **12**, 11113-11118. <https://doi.org/10.1039/d2ra01219g>
- [37] Qiu, H., Xu, H. and Xiao, G. (2023) Hybrid Photon-Enhanced Thermionic Emission and Photovoltaic Converter with Concentrated Solar Power. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **254**, Article 112279. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112279>
- [38] Qiu, H., Hao, M., Meng, B., Sun, A. and Xiao, G. (2026) Theories, Advances, Challenges, and Innovations in Photon-Enhanced Thermionic Emission Technology for Concentrating Solar Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **227**, Article 116558. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116558>