



环境温度下晶硅光伏组件的直冷背板散热分析

朱静燕 邹帅 孙华 苏晓东

Analyses of heat dissipation of direct-cooling backsheets of crystalline silicon photovoltaic modules at ambient temperatures

Zhu Jing-Yan Zou Shuai Sun Hua Su Xiao-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 098802 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201741

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201741>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁电体的光伏效应

Photovoltaic effect in ferroelectrics

物理学报. 2018, 67(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180979>

反式卤素钙钛矿太阳能电池光伏性能的理论研究

Theoretical study of photovoltaic performance for inverted halide perovskite solar cells

物理学报. 2020, 69(11): 118801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200089>

金纳米四面体增强有机太阳能电池光吸收及光伏性能研究

Enhanced light absorption and device performances of organic photovoltaic devices with Au tetrahedra nanoparticles

物理学报. 2018, 67(24): 247201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181502>

载流子选择性接触:高效硅太阳能电池的选择

Carrier selective contacts:a selection of high efficiency silicon solar cells

物理学报. 2017, 66(15): 158801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.158801>

硅异质结太阳能电池的物理机制和优化设计

Physical mechanism and optimal design of silicon heterojunction solar cells

物理学报. 2017, 66(10): 108801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.108801>

基于棱镜二次聚光的高倍聚光模组聚光特性与三结电池光谱响应匹配与优化

Concentrating characteristics of Fresnel lens with prism secondary concentrator and optimization of high concentrating photovoltaic module with triple-junction cell

物理学报. 2018, 67(10): 108801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172778>

环境温度下晶硅光伏组件的直冷背板散热分析*

朱静燕¹⁾ 邹帅¹⁾²⁾ 孙华^{1)†} 苏晓东^{1)‡}

1) (苏州大学物理科学与技术学院, 江苏省薄膜材料重点实验室, 苏州 215006)

2) (苏州阿特斯阳光电力科技有限公司, 苏州 215129)

(2020年10月20日收到; 2020年12月6日收到修改稿)

晶硅光伏组件的工作温度严重制约着电池效率及组件寿命的提升, 因此光伏冷却研究具有重要意义. 通过将纳米结构引入主流光伏组件的高分子背板, 从而获得具有增强热传导及热辐射特性的直冷背板, 已成为新一代光伏冷却技术的发展趋势. 本文聚焦于组件背面的散热特性研究, 联合能量平衡方程及光学模拟, 分别计算了三种典型环境温度下标准背板与直冷背板的热学功率及降温效果. 计算中采用主流商用硅电池的结构参数及封装方式, 详细讨论了背板的传热系数与发射率增强对光伏组件热学过程及工作温度的影响. 以期对光伏组件直冷背板的设计与制备提供方向.

关键词: 晶硅太阳能电池, 光电效率, 光伏热效应, 光伏组件

PACS: 88.40.jj, 44.20.+b, 81.70.Pg

DOI: 10.7498/aps.70.20201741

1 引言

晶硅太阳能电池具有优异的光电性能及相对较低的制备成本, 在当今光伏产业中成为商用主流. 通过不断引入新的物理效应与制备技术, 晶硅电池的产线效率得以逐年提升^[1,2]. 从基本机制上看, 晶硅电池的光电效率是电池的光、电、热等性能的综合体现. 其中, 电池的温度效应对其工作效率及寿命具有着不可忽略的影响. 理想条件下, 每升高 1 K 温度, 晶硅太阳能电池的最大输出功率将下降 0.4%; 若计及更多实际因素 (例如热斑效应), 则其温衰特性可达到 0.65%/K^[3]. 同时, 温度升高也会加快封装层老化速度, 缩短电池寿命. 因此, 如何实现有效的冷却降温是晶硅太阳能电池研究及应用领域中广受关注的问题.

实际应用中, 晶硅电池的组件封装对其工作温

度的影响显著. 封装后的组件温度取决于光电转换过程中的热量生成、环境的红外辐射吸收以及组件热量耗散这三种过程的相互平衡. 传统的降温手段主要通过安装通风装置、吸热材料、热管系统等设备改善电池热量的耗散效率. 此类冷却技术可有效降低光伏组件温度, 但需要额外添加装置 (管道或容器) 来储存和运输散热介质, 令安装和维护成本上升. 近年来, 随着纳米技术的发展, 基于组件纳米结构的温控技术已成为新一代光伏冷却技术的发展趋势. 例如, Azizi 等^[4] 在光伏封装用 EVA 中添加了 15% 质量分数的石墨烯纳米材料, 制备得到的 EVA 复合材料热导率提高了 22%. Kim 等^[5] 将 70% 质量分数的 AlN/BN 导热填料以 8:2 比例混合进 PVDF 背板中, 制备出最大热导率达 $5.85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的复合背板, 其导热性是原来的 31 倍. 除了提高导热性, 通过在材料表面制备微结构来实现辐射冷却也是晶硅电池的有效降温手段.

* 江苏省重点大学科研项目 (批准号: 16KJA140002)、江苏省研究生研究与实践创新项目 (批准号: KYCX19_1967) 和江苏省高校优势学科建设工程项目 (PAPD) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hsun@suda.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xdsu@suda.edu.cn

Zhu 等^[6]在 Si 吸收体表面设计了 SiO₂ 光子晶体结构层, 其温度比硅基降低了 13 °C. Li 等^[7]设计了 SiO₂/Al₂O₃ 等多层冷却介质膜, 并将其置于晶硅光伏组件的正面. 模拟结果显示组件温度降低了 5.7 °C. Lu 等^[8]制备了微米尺度的 SiO₂ 绒面作为晶硅太阳能电池的封装层, 其在大气窗口 (8—13 μm) 具有接近 1 的发射率, 最终使得组件相对效率提升了 3.13%. 另外还有其他结构, 如 SiO₂ 绒毛绒面^[9]、SiO₂ 颗粒膜^[10] 等, 都在维持或提升光学性质的前提下进一步提高了组件的辐射表现.

需要注意的是, 电池正面作为太阳光的入射面, 在引入纳米结构时, 必须保证不削弱太阳光谱范围内的电池光学特性. 而太阳能电池背面则不受此条件限制, 因此其冷却微结构的设计与实现具有更大的自由度. 本文聚焦于此类新型背板, 即无需添加额外散热装置、通过自身良好的热学特性直接产生冷却效果的“直冷背板”. 此类基于纳米结构的背板, 其热学特性取决于有效传热系数及有效发射率. 前者反映了背板与环境之间的非辐射热交换效率 (热传导及热对流), 后者反映了背板与环境间以辐射形式进行热交换的能力. 然而, 目前对直冷背板热学特性的研究仍十分有限. 事实上, 由于目前主流晶硅电池的背板大多以高分子材料制成, 其导热性远不如正面的玻璃封装^[11–13], 导致人们对背板冷却的研究兴趣以改善导热性能为主. 在某些研究过程中, 如 Li 等^[7]构建的晶硅组件热学模型, 甚至完全忽略了背面的热辐射交换, 导致计算得到的工作温度明显高于组件的实际工作温度.

为了系统讨论光伏组件直冷背板的散热特性, 通过联合能量平衡方程及光学模拟, 计算了在不同的背板传热系数及发射率条件下组件的热学过程及工作温度. 考虑了分别代表低温、常温及高温的三种典型温度. 计算结果表明: 背板的热辐射交换对组件工作温度的影响不可忽略. 相比忽略背板热辐射的情况, 组件工作温度降低约 20 K. 另一方面, 在任何环境温度下, 背板的热学改良均以非辐射特性的贡献为主, 辐射改良在理想条件下的降温效果不超过 1 °C, 远弱于正面玻璃辐射改良带来的降温效果. 环境温度的影响主要体现在背板的非辐射降温方面. 一般地, 低温环境更有利于背板的非辐射降温. 但高传热系数背板的降温效果对环境温度的依赖较小, 并在传热系数大于 20 W·m⁻²·K⁻¹ 时趋于稳定.

2 晶硅光伏组件的热学特性分析

如图 1 所示, 晶硅光伏组件的基本结构包含玻璃、EVA、硅电池 (由金字塔绒面、硅衬底和铝背极构成) 以及高分子背板. 组件的封装顺序和各部分的常见厚度已在图中给出. 组件工作时, 一方面从入射阳光和环境吸收能量, 另一方面通过光伏效应和热交换过程 (包括热传导、热对流和热辐射三种方式) 释放能量. 根据能量守恒定律, 当组件温度达到稳定时, 其吸收和释放的能量形成平衡, 即

$$P_{\text{sun}} + P_{\text{atm}} = P_{\text{rad}} + P_{\text{con}} + P_{\text{PV}}, \quad (1)$$

式中各项分别为单位面积组件对太阳辐射的吸收功率 P_{sun} 、对环境辐射的吸收功率 P_{atm} 、辐射散热功率 P_{rad} 、非辐射散热功率 P_{con} (包括热传导和热对流) 以及光电输出功率 P_{PV} , 并对应如下物理过程.

1) $P_{\text{sun}}, P_{\text{PV}}$ ——光电转换过程

组件对太阳辐射的吸收功率 P_{sun} 表达式为

$$P_{\text{sun}} = \int I_{\text{sun}}(\lambda) \epsilon_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

其中 $I_{\text{sun}}(\lambda)$ 为波长 λ 对应的太阳光谱强度, $\epsilon_{\text{sun}}(\lambda)$ 为光伏组件对太阳光的吸收率. 我们采用 AM1.5G 太阳光谱^[14], 并利用硅太阳能电池专业模拟软件 SunSolve^[15] 计算组件吸收率. 计算中采用主流商用硅电池的结构参数: 硅衬底厚度设置为 180 μm, 绒面设置为 3 μm 高度的随机分布的正金字塔绒面, 抗反层为 80 nm 厚度的 SiN_x. 组件其他部分厚度如图 1 所示. 当太阳光垂直入射到组件正面时, 计算得到的组件吸收率 $\epsilon_{\text{sun}}(\lambda)$ 及吸收功率 $dP_{\text{sun}}/d\lambda$ 如图 2(a) 所示. 对吸收功率积分, 得到 $P_{\text{sun}} = 777 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 该结果与文献^[16]相符合. 在吸收的太阳辐射中, 波长大于 1200 nm 的辐射被组件封装材料吸收变为热量, 300—1200 nm 内的辐射则大部分通过硅的光伏反应转换为电能, 其对应的光电输出功率 P_{PV} 随组件温度 T_{PV} 的升高而降低^[3,17]:

$$P_{\text{PV}}(T_{\text{PV}}) = \eta_{300 \text{ K}} P_{\text{solar}} [1 + \beta (T_{\text{PV}} - 300 \text{ K})], \quad (3)$$

其中 $\eta_{300 \text{ K}} = 20\%$, $P_{\text{solar}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $\beta = -0.45\%$ 为组件的温度系数^[17]. (3) 式中为简便起见将组件温度视为均匀. 实际工作时组件各部分的温差很小, 可近似忽略^[18].

2) P_{con} ——组件和环境的非辐射热交换过程 (热传导及热对流)

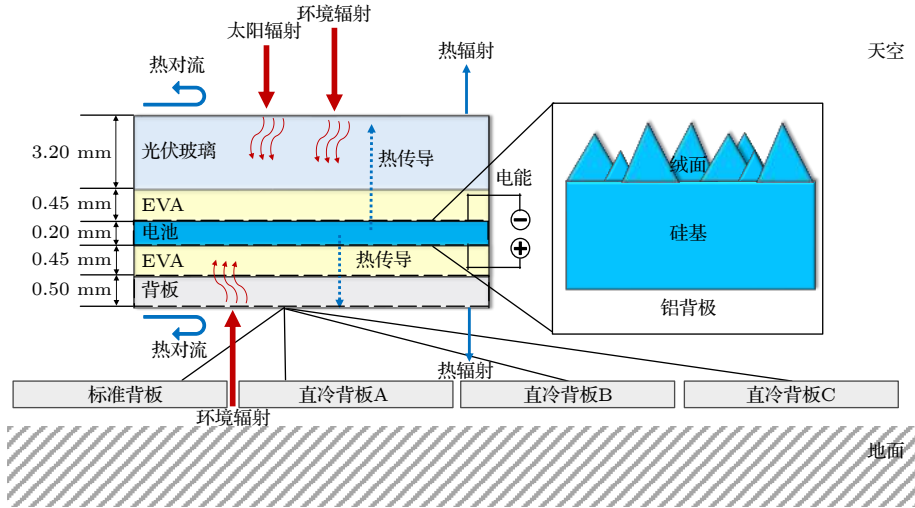


图 1 晶硅光伏组件结构和工作时的能量输入与输出

Fig. 1. Structure and energy input and release of crystalline silicon photovoltaic modules at work.

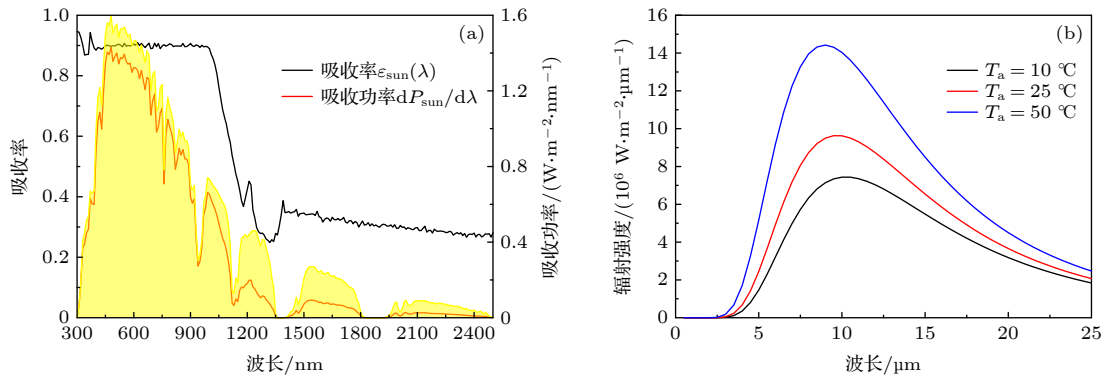


图 2 (a) 组件吸收谱和吸收功率谱 (黄色背景为 AM1.5G 太阳光谱); (b) 黑体辐射谱

Fig. 2. (a) Absorption spectrum and absorption power spectrum of the module (AM1.5G solar spectrum is marked as yellow background); (b) blackbody radiation spectrum.

组件和环境的非辐射热交换主要取决于组件正面和背面的热传导与热对流过程. 这些过程既与正背两面的材料热学性质有关, 也受到组件所在环境因素的显著影响. 相关环境因素中尤以组件温度与所处环境的温度差 ($T_{PV} - T_a$) 及组件表面处的风速大小最为关键 [19,20]. 考虑到正面玻璃及背面高分子背板的热学性质差异及风速的不同, 可令

$$P_{con} = P_{con}^{front} + P_{con}^{back},$$

式中, 等号右边两项分别来自于正面玻璃板和背面高分子背板的贡献,

$$P_{con}^{front}(T_{PV}, T_a) = h_1(T_{PV} - T_a), \quad (4a)$$

$$P_{con}^{back}(T_{PV}, T_a) = h_2(T_{PV} - T_a), \quad (4b)$$

其中, h_1 和 h_2 定义为正面及背面传热系数, 其取值综合考虑了热传导与热对流过程. 在标准组

件中, 根据玻璃及高分子背板的典型热学性质及风速条件 [21], 可取 $h_1 = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $h_2 = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [7].

实际应用时, 组件正面与背面的环境温度仅有微小差异, 故计算中通常可忽略 [3,17]. 在 (4a) 式和 (4b) 式中取 $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 分别代表组件在低温、常温和高温下的三种工作环境. 需要注意的是, 环境温度的高低不仅影响非辐射热交换过程, 同时也是下节讨论的辐射性热交换中的重要因素. 从图 2(b) 可看出, 在理想黑体近似下, $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时环境的辐射强度集中分布于 $2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 以上的红外区. 下节将详细讨论这 3 个环境温度下组件正面与背面的热辐射吸收与发射效率.

3) P_{atm} , P_{rad} ——组件和环境的辐射热交换过程

材料表面的辐射吸收及发射能力分别用吸收率 ϵ 和发射率 ϵ 衡量. 根据基尔霍夫热辐射定律 [22], 热平衡物体的发射率 ϵ 与吸收率 ϵ 在数值上相等. 这里采用文献 [23] 中的玻璃红外折射率参数计算组件正面封装玻璃的吸收率

$$\epsilon_{\text{front}}(\lambda, \theta) = (1-R) \left(1 - e^{-\frac{4\pi kW}{\lambda \cos\theta}} \right) = \epsilon_{\text{front}}(\lambda, \theta), \quad (5)$$

其中, W 为玻璃厚度, θ 为入射角, k 为玻璃折射率虚部, R 为由菲涅尔定律计算得到的玻璃反射率. 从计算结果可以观察到玻璃红外吸收谱的典型特征 [8]. 图 3 所示为垂直入射时组件正面的玻璃吸收谱, 在 8—13 μm 以及 20—25 μm 处出现明显的低谷, 反映出 SiO_2 在此波段具有强烈的声子极化激元响应. 组件正面所在环境大气的发射率可表示为 $\epsilon_{\text{atm}}(\lambda, \theta) = 1 - t_{\text{atm}}(\lambda) \frac{1}{\cos\theta}$. 其中, $t_{\text{atm}}(\lambda)$ 为大气透射率 (如图 3 粉色背景所示) [24,25].

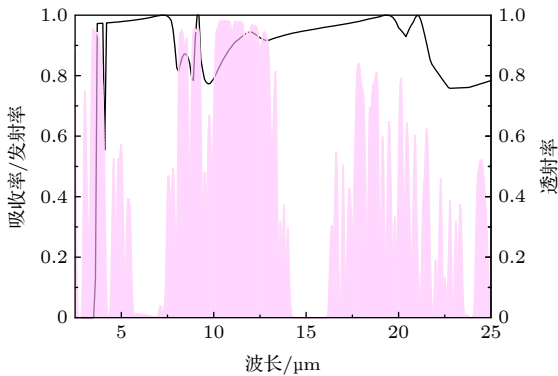


图 3 玻璃吸收谱 (垂直入射时) 及大气透射谱 (粉色背景)
Fig. 3. Absorption spectrum and atmospheric transmission spectrum (pink background) of the glass.

在我们的计算中将讨论四种背板, 他们的辐射特性分为两类: 1) 标准背板辐射, 此类背板可近似为一个具有漫反射表面的灰体, 即 $\bar{\epsilon}_{\text{back}} = \bar{\epsilon}_{\text{back}} = 0.85$ [26]; 2) 理想背板辐射, 以理想辐射冷却体为背板时, 其吸收率 (发射率) 为与波长和角度均无关的常数 [10]: $\epsilon_{\text{back}}^* = \epsilon_{\text{back}}^* = \begin{cases} 1, & \lambda > 2.5 \mu\text{m} \\ 0, & \lambda < 2.5 \mu\text{m} \end{cases}$, 此时可令背板的辐射散热效果达到最佳.

玻璃和背板对环境辐射的吸收功率分别表示为

$$P_{\text{atm}}^{\text{front}}(T_a) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Omega \cos\theta \int_0^{\infty} I_{\text{atm}}(T_a) \epsilon_{\text{front}}(\lambda, \theta) d\lambda, \quad (6a)$$

$$P_{\text{atm}}^{\text{back}}(T_a) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Omega \cos\theta \int_0^{\infty} I_{\text{BB}}(T_a) \epsilon_{\text{back}} d\lambda, \quad (6b)$$

其中 $I_{\text{atm}}(T_a) = I_{\text{BB}}(T_a, \lambda) \epsilon_{\text{atm}}(\lambda, \theta)$ 为大气辐射功率, $I_{\text{BB}}(T_a, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_a}} - 1}$ 为单色黑体辐射强度. 组件的辐射散热功率同样分为正面和背面两部分, 其表达式为

$$P_{\text{rad}}^{\text{front}}(T_{\text{PV}}) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Omega \cos\theta \int_0^{\infty} I_{\text{BB}}(T_{\text{PV}}, \lambda) \epsilon_{\text{front}}(\lambda, \theta) d\lambda, \quad (7a)$$

$$P_{\text{rad}}^{\text{back}}(T_{\text{PV}}) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Omega \cos\theta \int_0^{\infty} I_{\text{BB}}(T_{\text{PV}}, \lambda) \epsilon_{\text{back}} d\lambda. \quad (7b)$$

把 (2)—(7) 式代入 (1) 式中, 即可得到关于组件工作温度 T_{PV} 的方程.

3 标准背板与直冷背板的降温效果对比

我们讨论了四种组件, 其中各自包含了具有不同热传导系数及发射率的背板, 并计算了相应的热学过程及工作温度. 背板的热学参数见表 1. 这里, 标准背板的发射率和传热系数的取值参照组件的测量结果 ($\bar{\epsilon}_{\text{back}} = 0.85$, $h_2^s = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) [21,26]. 三种直冷背板分别以三种方式从标准背板改善而来: 1) 直冷背板 A, 增强非辐射散热 (h_2^*), 保持背板发射率 $\bar{\epsilon}_{\text{back}}$ 不变; 2) 直冷背板 B, 增强辐射散热 (ϵ_{back}^*), 保持背板传热系数 h_2^s 不变; 3) 直冷背板 C, 同时增强辐射与非辐射散热 (h_2^* , ϵ_{back}^*).

表 1 标准背板与直冷背板的热学参数

Table 1. Thermal parameters of the standard backsheet and direct-cooling backsheets.

名称	发射率 ϵ_{back}	传热系数 $h_2 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
标准背板 O	$\bar{\epsilon}_{\text{back}}$	h_2^s
直冷背板 A	$\bar{\epsilon}_{\text{back}}$	h_2^*
直冷背板 B	ϵ_{back}^*	h_2^s
直冷背板 C	ϵ_{back}^*	h_2^*

计算中采用三种典型的环境温度: $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (低温), $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (常温) 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (高温). 图 4—6 给出了计算得到的在不同环境温度下各组件的吸收、散热及光电输出功率, 并分别列出组件正面/背面与环境的各项热交换功率. 为方便对比, 在不同的环

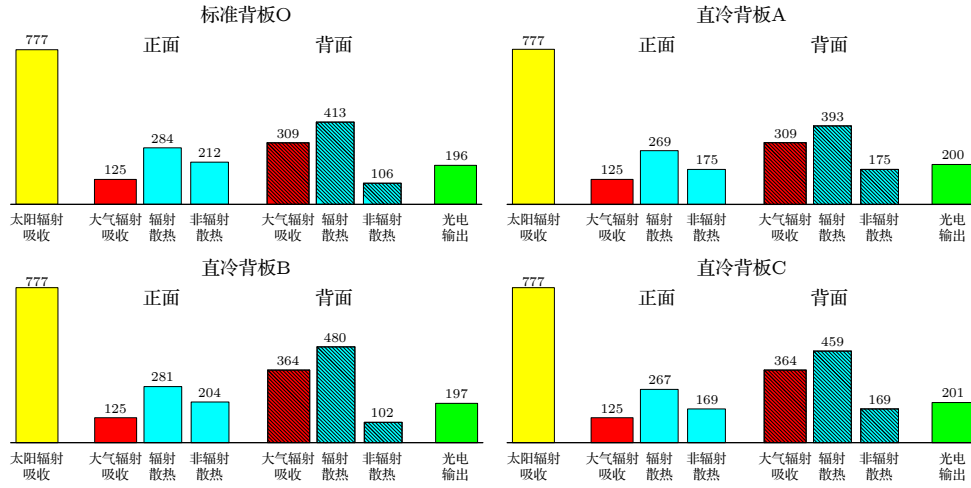


图 4 $T_a = 10\text{ }^\circ\text{C}$ 时各组件的吸收、散热及光电输出功率 (单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 4. Absorption power, heat dissipation power and PV output power for each module at $T_a = 10\text{ }^\circ\text{C}$ (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

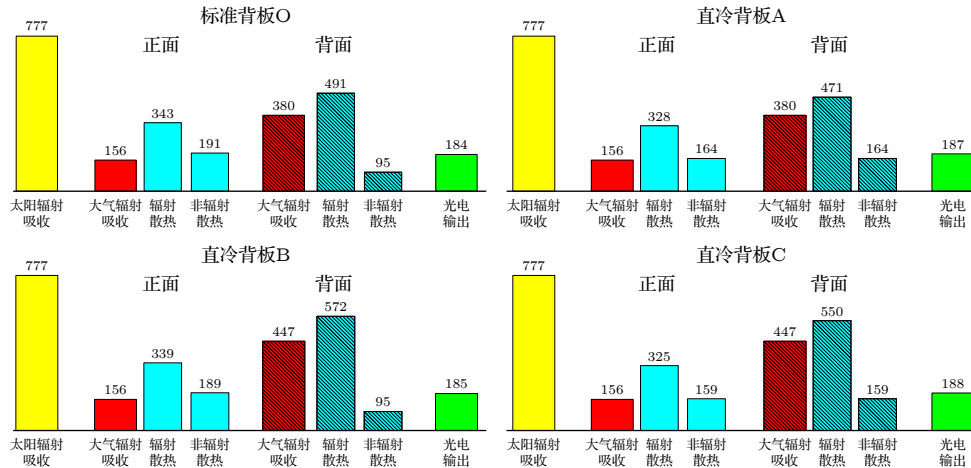


图 5 $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 时各组件的吸收、散热及光电输出功率 (单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 5. Absorption power, heat dissipation power and PV output power for each module at $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

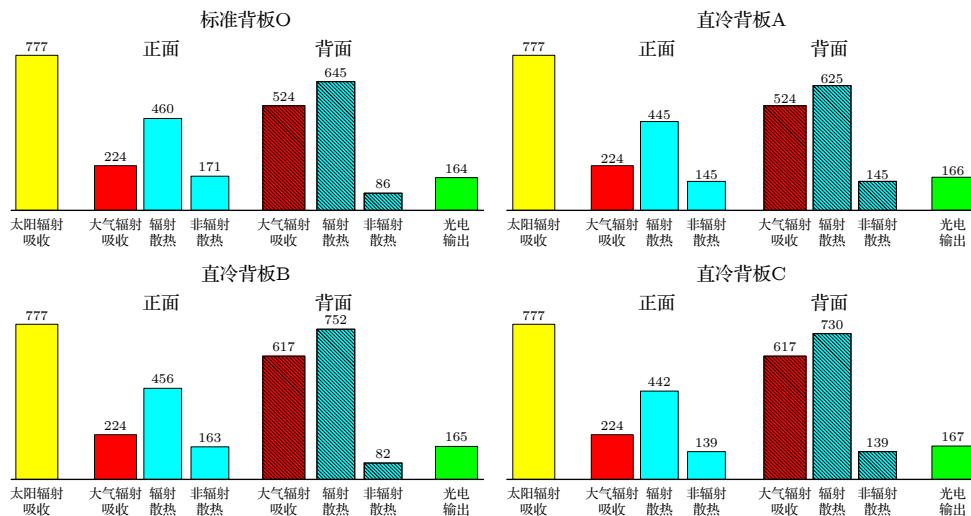


图 6 $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时各组件的吸收、散热及光电输出功率 (单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 6. Absorption power, heat dissipation power and PV output power for each module at $T_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

境温度下采用了同一太阳光谱. 故图 4—6 中组件从太阳辐射中吸收的功率统一为 $777 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 从计算结果可以明显看出, 相对于标准组件, 采用了直冷背板后光电输出功率都有所提升, 说明相应的工作温度都有所下降. 然而, 仅通过增强背板的辐射特性所导致的降温效果及光电输出增强十分有限. 即使当背板具有理想热发射率 ϵ_{back}^* 时, 其光电输出功率相对于标准发射率 $\bar{\epsilon}_{\text{back}}$ 的结果仅增加了 $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 此效果不随环境温度变化 (参见图 4—6 中标准背板 O 与直冷背板 B 的光电输出功率对比, 以及直冷背板 A 和直冷背板 C 的光电输出功率对比). 相对地, 组件光电输出功率的提升在背板非辐射热学特性增强时更明显, 且与环境温度密切相关. 当 $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (低温), $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (常温) 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (高温) 时, 由 h_2 的提升导致的光电输出功率增加分别为 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (参见图 4—6 中标准背板 O 与直冷背板 A 的光电输出功率对比).

各组件在不同环境温度下的工作温度及光电转换效率如表 2 所列. 计算结果表明, 标准组件的工作温度比环境温度高约 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 其光电效率受环境温度影响明显: 由低温 ($T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$) 时的 19.62% 迅速下降到高温 ($T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$) 时的 16.39%. 组件的最高效率出现在低温时的直冷背板 C 中: $\eta = 20.01\%$. 图 7 给出了不同环境温度下各直冷背板的降温效果及对应的相对效率提升. 相对于标准组件, 以非辐射增强为单一改良方式的直冷背板 A 在不同环境温度下降温效果分别为 $3.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$), $3.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$); 以辐射增强为单一改良方式的直冷背板 B 降温效果仅为 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$), $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$). 可以看到, 直冷背板 A 的降温效果明显高于直冷背板 B, 这与图 4—6 所示的光电输出功率结果一致. 而非辐射联合辐射增强时, 温度分别降低了 $4.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$), $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$), 相对效率则分别提升了 1.99% ($T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$), 1.85% ($T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), 1.77% ($T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$).

需要注意的是, 在上述结果中, 直冷背板 B 的辐射增强已达到理想极限, 即在最佳的背板辐射增强下, 降温效果不到 $1 \text{ }^\circ\text{C}$. 相反地, 背板传热系数仅为标准背板传热系数的 2 倍, 代表着非辐射增强效果还有很大提升空间. 图 8 给出了背板发射率分

别为 $\bar{\epsilon}_{\text{back}}$ 和 ϵ_{back}^* 时组件的工作温度随背板传热系数 h_2^* 的变化. $h_2^* = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时对应的工作温度即为标准组件的工作温度. 随着 h_2^* 的增加, 组件的工作温度单调下降. 当 $h_2^* = 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的工作温度分别降低至 $20.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $34.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $58.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 与环境温度的温差约为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$. 背板的辐射增强带来的额外降温效

表 2 不同环境温度下组件的工作温度及光电转换效率

Table 2. Module temperatures and PV conversion efficiencies under different ambient temperatures.

背板类型	$T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$T_{\text{PV}} / \text{ }^\circ\text{C}$	$\eta / \%$	$T_{\text{PV}} / \text{ }^\circ\text{C}$	$\eta / \%$	$T_{\text{PV}} / \text{ }^\circ\text{C}$	$\eta / \%$
标准背板 O	31.2	19.62	44.7	18.41	67.1	16.39
直冷背板 A	27.5	19.96	41.4	18.71	64.4	16.63
直冷背板 B	30.4	19.63	43.9	18.48	66.4	16.45
直冷背板 C	26.9	20.01	40.9	18.75	63.9	16.68

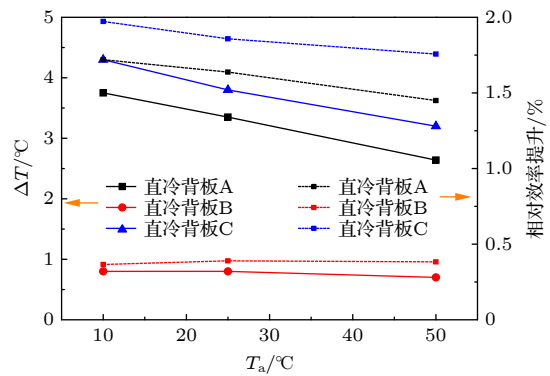


图 7 不同环境温度下各直冷背板的降温效果及相对效率提升

Fig. 7. Temperature decrease and the relative efficiency improvement for each direct-cooling backsheet under different ambient temperatures.

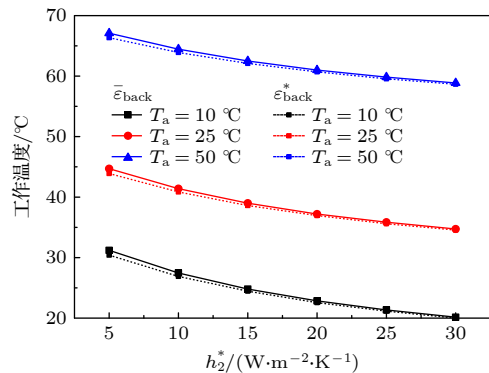


图 8 背板发射率为 $\bar{\epsilon}_{\text{back}}$ 和 ϵ_{back}^* 时组件工作温度随背板传热系数 h_2^* 的变化

Fig. 8. Relationship between the module temperature and h_2^* when the backsheet emissivity is $\bar{\epsilon}_{\text{back}}$ and ϵ_{back}^* .

果在 h_2^* 增大时则进一步减弱, 这与文献 [7] 中组件正面的降温趋势一致. 当 $h_2^* > 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 直冷背板 A 与直冷背板 C 的工作温度几乎重合, 并近似以 $\Delta T_{\text{PV}}/\Delta h_2^* = -0.27$ ($T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C}$), -0.25 ($T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), -0.21 ($T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$) 的速度随 h_2^* 线性下降.

如图 8 所示, 工作温度随背板传热系数 h_2^* 的变化曲线特征与实验结果定性一致. 文献 [27] 测试了电池工作温度随风速的下降曲线, 室温及标准光照下, 当风速从零增加到 2 m/s 时, 强制对流引起的传热系数从零增加到约 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ (总对流传热系数大约从 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), 对应的工作温度则下降了 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 与我们的计算结果基本一致. 随着风速进一步增大, 实验测试数据的误差开始扩大, 但曲线趋势明显: 在强制对流传热系数保持稳定持续增长的同时, 温度下降速度变缓, 温度曲线渐趋平坦. 类似的温度变化趋势在以热传导为背板主要散热方式的光伏组件中亦有报道. 如文献 [11] 中对比了热导性质显著的三种背板 (高分子材料 TPT、玻璃、Al 合金) 厚度对多晶硅光伏组件工作温度的影响. 虽然背板热阻总是与其厚度成正比, 但当背板采用 Al 合金这类良导热材料时, 背板厚度增加导致的工作温度上升曲线亦呈现出明显的平坦化, 反映出高传热条件下背板降温效果的稳定性.

4 讨论与结论

综上, 本文基于能量平衡方程对晶硅光伏组件的热学特性进行了计算与分析, 并着重讨论了在不同的背板散热条件下组件的各项热学功率、光电输出及工作温度的变化. 通过对比标准背板与三种直冷背板的降温效果, 分析背板与环境发生热交换的两种方式 (辐射热交换与非辐射热交换) 在降温过程中的作用, 得到如下结论.

1) 首先, 计算结果表明, 当背板的辐射传热和非辐射传热均处于标准条件时, 组件的工作温度比环境温度高出约 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [17,18,28]. 这一结果可与文献 [7] 的计算结果对比. 文献 [7] 中未考虑背板的热辐射效果, 导致计算得到的组件温度远高于环境温度: 在正面未做特殊冷却处理时, 工作温度比环境温度高 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右; 即使当正面玻璃具有理想辐射特性时, 组件温度仍比环境温度高 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右.

可见, 背板的热辐射交换过程对光伏组件工作温度的影响不可忽略.

2) 通过改良标准背板的辐射特性来实现降温的效果十分有限. 本文计算了三种不同的环境温度来展示低温、常温和高温下组件的工作状态. 发现在任何环境温度中, 背板的辐射改良带来的降温效果不超过 $1 \text{ }^\circ\text{C}$. 这一结果远弱于正面玻璃辐射改良带来的降温效果. 原因在于, 正面玻璃处于大气环境当中, 大气辐射的窗口区令正面玻璃的辐射冷却功率会随玻璃发射率的增加而明显提升. 而背板主要与可近似为黑体的地面进行热辐射交换, 当背板的发射率增加时, 背板与地面之间的热辐射吸收功率和散热功率几乎同步增加 (参见图 4—6), 导致背板的冷却功率未得到有效提升. 这意味着在背板的热学特性改良设计中, 应集中于背板的非辐射热学特性 (如热导率) 的增强.

3) 背板的非辐射热学特性可以其传热系数 h_2^* 描述. 计算表明, 当 h_2^* 温和增加时 ($h_2^* = 2h_2^*$), 环境温度对非辐射增强的降温效果产生较为明显的影响, 低温环境更利于背板的非辐射降温. 而对于具有高传热系数的背板 ($h_2^* > 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), 同一背板在不同环境温度下的降温程度十分接近, 且由辐射改良引起的额外降温效果几乎可以忽略, 即高传热系数背板的降温效果趋于稳定.

以上结果可为光伏组件直冷背板的设计与制备提供明确的方向. 本文在计算中忽略了部分影响组件温度的次要因素, 如组件内部的热传导过程、地面环境与大气环境的温差等, 这些因素的影响可在以后的工作中通过建立更全面的热光电耦合模型加以讨论.

参考文献

- [1] Zou S, Ye X Y, Wu C K, Cheng K X, Fang L, Tang R J, Shen M R, Wang X S, Su X D 2019 *Prog. Photovoltaics* **27** 511
- [2] Ye X Y, Zou S, Chen K X, Li J J, Huang J, Cao F, Wang X S, Zhang L J, Wang X F, Shen M R, Su X D 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 6708
- [3] Radziemska E, Klugmann E 2002 *Energy Convers. Manage.* **43** 1889
- [4] Azizi S, David E, Fr chet M F, Nguyen-Tri P, Ouellet-Plamondon C M 2018 *Polym. Test.* **72** 24
- [5] Kim K, Yoo M, Ahn K, Kim J 2015 *Ceram. Int.* **41** 179
- [6] Zhu L X, Raman A P, Fan S H 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **112** 12282
- [7] Li W, Shi Y, Chen K F, Zhu L X, Fan S H 2017 *ACS Photonics* **4** 774

- [8] Lu Y H, Chen Z C, Ai L, Zhang X P, Zhang J, Li J, Wang W Y, Tan R Q, Dai N, Song W J 2017 *Sol. RRL* **1** 1700084
- [9] Lin S H, Ai L, Zhang J, Bu T L, Li H J, Huang F Z, Zhang J, Lu Y H, Song W J 2019 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **203** 110135
- [10] Jaramillo-Fernandez J, Whitworth G L, Pariente J A, Blanco A, Garcia P D, Lopez C, Sotomayor-Torres C M 2019 *Small* **15** 1905290
- [11] Zhou J C, Zhang Z, Liu H J, Yi Q 2017 *Appl. Therm. Eng.* **111** 1296
- [12] Dai X 2015 *M. S. Thesis* (Shanghai: Donghua University) (in Chinese) [戴协 2015 硕士学位论文 (上海: 东华大学)]
- [13] Kim Y, Morita K 2017 *J. Non-Cryst. Solids* **471** 187
- [14] Spectrum Library, Gueymard C A <https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/optics/spectrum%20library/spectrum%20library.aspx> [2020-6-5]
- [15] SunSolve Ray Tracer, PV Lighthouse Pty. Ltd. <https://www.pvlighthouse.com.au/sunsolve> [2020-6-5]
- [16] Kumar A, Chowdhury A 2020 *Sol. Energy* **201** 751
- [17] Sun X S, Silverman T J, Zhou Z G, Khan M R, Bermel P, Alam M A 2017 *IEEE J. Photovoltaics* **7** 566
- [18] An Y D, Sheng C X, Li X F 2019 *Nanoscale* **11** 17073
- [19] Goldstein E A, Raman A P, Fan S H 2017 *Nat. Energy* **2** 17143
- [20] Teo H G, Lee P S, Hawlader M N A 2012 *Appl. Energy* **90** 309
- [21] Armstrong S, Hurley W G 2010 *Appl. Therm. Eng.* **30** 1488
- [22] Kirchhoff G 1860 *Nuovo Cimento* **11** 341
- [23] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (Vol. 1) (Salt Lake City: Academic Press) pp760–763
- [24] NASA Technical Memorandum 103957, Lord S D <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930010877> [2020-6-5]
- [25] IR Transmission Spectra, Gemini Observatory <https://www.gemini.edu/observing/telescopes-and-sites/sites#Transmission> [2020-6-5]
- [26] Bazilian M D, Kamalanathan H, Prasad D K 2002 *Renew. Energy* **26** 449
- [27] Kaplani E, Kaplanis S 2014 *Sol. Energy* **107** 443
- [28] Kurnik J, Jankovec M, Brecl K, Topic M 2016 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 373

Analyses of heat dissipation of direct-cooling backsheets of crystalline silicon photovoltaic modules at ambient temperatures*

Zhu Jing-Yan¹⁾ Zou Shuai¹⁾²⁾ Sun Hua^{1)†} Su Xiao-Dong^{1)‡}

1) (*Jiangsu Key Laboratory of Thin Films, School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

2) (*Research & Development Department, Canadian Solar Inc., Suzhou 215129, China*)

(Received 20 October 2020; revised manuscript received 6 December 2020)

Abstract

The working temperature of the crystalline silicon photovoltaic (PV) module seriously restricts the cell efficiency and the module lifetime. Therefore, it is of great significance to investigate the cooling effects of PV modules. Recently, introducing nanostructures into polymer backsheets to obtain direct-cooling effects due to enhanced heat conduction and radiation characteristics, has become a new trend for PV cooling technology. In this paper, we study the backside thermal properties of the PV module by combining the energy balance equation and optical simulations. The thermal power and cooling effect are calculated and compared between the standard backsheet and three types of direct-cooling backsheets for three typical ambient temperatures. The structure parameters and encapsulating mode of mainstream commercial silicon cells are adopted in the simulations and calculations. The influences of thermal parameters, i.e, the heat transfer coefficient and the emissivity, on the thermal process and the operating temperature are discussed in detail. We hope that this study may provide a certain reference for the future design of PV-direct-cooling backsheets.

Keywords: crystalline silicon solar cell, photovoltaic efficiency, photovoltaic thermal effects, photovoltaic module

PACS: 88.40.jj, 44.20.+b, 81.70.Pg

DOI: 10.7498/aps.70.20201741

* Project supported by the Key University Science Research Project of Jiangsu Province, China (Grant No. 16KJA140002), the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant No. KYCX19_1967), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), China.

† Corresponding author. E-mail: hsun@suda.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xdsu@suda.edu.cn