

撒哈拉银蚁仿生结构在光伏组件冷却中的应用

吴万春¹, 黄金华², 魏明明¹, 李 东¹, 徐 华^{1*}, 鲁越晖²

(1. 宁波大学 物理科学与技术学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 对当前晶硅太阳电池的太阳吸收特性进行了太阳光谱分析, 并在此基础上提出一种基于撒哈拉银蚁仿生结构的热管理方法, 该仿生结构由氧化物-金属-氧化物 Oxide-metal-oxide(OMO)和表面具有微纳结构的聚二甲基硅氧烷 Polydimethylsiloxane(PDMS)薄膜共同组成, 可通过热辐射进行表面散热, 同时也能显著地反射近红外波段的太阳光, 进一步降低表面温度. 理论计算结果表明, 将该冷却器应用于光伏组件可使电池温度降低约 7.2 K. 研究结果为光伏组件的热管理提供了一种新方法.

关键词: 太阳电池; 辐射制冷; 热辐射; 辐射热交换; 热管理

中图分类号: O436

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 03-0074-07

目前光伏组件中晶硅太阳电池在世界上占有的市场份额最大, 而近年来太阳电池在工作中温度过高的问题引起了业界的广泛关注. 在室外条件下, 太阳电池的典型工作温度为 323~328 K^[1-2]. 对于晶硅太阳电池, 温度每升高 1 K 效率就会下降约 0.45%^[3], 除了造成转换效率衰减还会导致光伏材料的损坏. 这类问题在空间光伏中更为突出^[4], 当电池片工作温度升高到 473 K 时晶硅电池效率下降约 75%^[5]. 据有关文献报道^[6], 太阳光能量中约有 67.6% 会转变为晶硅电池的热量, 这是因为在半导体中只有等于或大于带隙的光子能量(晶体 Si 为 1.12 eV)才能激发载流子, 低能光子则会使电池发热. 因此, 研究一种可降低太阳电池工作温度的方法很有必要.

为了减少光伏组件的发热, 需要对其进行热管理. 太阳电池热管理的方法主要有主动式和被动式两类. 主动式包括水冷、蒸汽压缩^[7-8]等形式. 被动式有 2 种实现方式: 一种是控制太阳光吸收^[9]; 另一种是热辐射调控, 就是利用 8~13 μm 波长范围的地球大气透明窗口, 将热量辐射至寒冷的深空宇宙空间, 从而降低物体表面温度, 即被动辐射制冷^[10-13]. 与主动式传统制冷方法相比, 被动辐射制

冷不需要额外的能量输入, 对节省能源具有重要意义, 因而引起了科研人员的高度重视^[14-15]. 但是据文献[11,16-18]报道, 在晶硅光伏组件中仅通过被动辐射制冷所获得的降温效果有限, 如何进一步降低吸收寄生热成了进一步研究的重点之一. Zhao 等^[19]设计了 30 层由一维多层结构和二维光子晶体组成的光子结构, 输出功率和辐射冷却功率相对于裸电池分别提高了 6.9% 和 30.5%. Li 等^[20]发明了由 45 层非周期性叠加多层膜的光子冷却器, 应用于封装电池的表面可使电池温度降低 5.7 K.

事实上, 大自然中许多生物经过漫长的进化和自然选择拥有了特殊的本领. 在气候极其恶劣的撒哈拉沙漠中生活着一种名为银蚁(*Cataglyphis bombycina*)的生物^[21], 在阳光直射下显示出银色的外观, 银蚁觅食高峰通常在一天中沙漠温度最高的中午时分, 此时沙漠表面温度可达 333~343 K, 而银蚁的体温却能始终保持在 321~324 K 之间, 不超过 326.6 K. 银蚁具备这种保持低温特性与覆盖在其体表的独特毛发有关. 银蚁身体头部和腹部覆盖有截面为三角形的毛发, 横向尺寸约为 2 μm , 毛发上部有纳米级的褶皱, 毛发和角质层之间有空气层, 其厚度在 300~1 000 nm 之间, 在一定入射

收稿日期: 2019-11-18.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市自然科学基金(2019A610053).

第一作者: 吴万春(1994-), 女, 山东聊城人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 被动辐射制冷. E-mail: 1550111529@qq.com

*通信作者: 徐华(1979-), 女, 江苏无锡人, 博士/副教授, 主要研究方向: 光学. E-mail: xuhua@nbu.edu.cn

角度下, 阳光在毛发和空气层的界面处发生全内反射, 从而有效地反射太阳光, 同时这种微结构还能增强其中红外的热辐射. 因而, 这些特殊的毛发不仅可减少来自环境的热吸收, 而且还能有效地消散多余的热量, 从而降低其体温.

本文提出了一种同时实现被动辐射制冷和抑制寄生热吸收的全新方法, 即在聚二甲基硅氧烷 Polydimethylsiloxane(PDMS)表面模仿银蚁毛发的三角形截面结构, 并引入具有特定色散特性的氧化物-金属-氧化物 Oxide-metal-oxide(OMO)多层膜介质层. 设计并制备的这种复合结构在小于 $1.2\ \mu\text{m}$ 波长处具有较高的透射性, 可为太阳电池提供所需的光学窗口. 同时, 在 $1.2\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 处呈现较高的反射性, 有利于降低寄生吸收. 此外, 三角形截面结构能有效地提高表面中红外发射率. 最后通过实验所获得的光学表征数据, 结合热学理论, 计算分析了该结构对于晶硅光伏组件降温的具体作用.

1 实验部分

1.1 表面具有类银蚁毛发结构 PDMS 的制备

为了获得类似银蚁的毛发结构的特征尺寸, 选择了纳米压印方法, 选用的制绒硅片具有多尺度微纳结构, 由上海晶澳太阳能光伏科技有限公司提供. 根据文献[12]的 SEM 图显示, 该绒面具具有 $2.76\ \mu\text{m}$ 金字塔结构, 有约为 $220\ \text{nm}$ 的刻蚀凹坑分布在金字塔斜面上. 由于该结构与银蚁的毛发结构的微观形貌具有诸多共同处, 因此将其用作仿生结构的压印模板. 将硅片分别在丙酮、异丙醇、乙醇和去离子水中超声清洗 $10\ \text{min}$ 后烘干, 再将硅片浸入含有 $20\ \mu\text{L}$ 三氯(1H, 1H, 2H, 2H-十三氟正辛基)硅烷(上海迈瑞尔化学技术有限公司)和 $20\ \text{mL}$ 正己烷溶液的混合物的氟代辛基三氯硅烷 Fluoro-octyltrichlorosilane(FOTS)溶液中进行 $20\ \text{min}$ 疏水处理, 然后清洁和干燥, 以便后期转印过程中分离硅片和薄膜. 通过将基础硅氧烷原液和固化剂(美国道康宁公司)以 $10:1$ 质量比混合制备 PDMS, 将硅氧烷原液和固化剂的混合溶液置于真空干燥箱中, 在室温下去除气泡 $10\ \text{min}$. 将溶液旋涂在制绒硅片模板上, 待其分布均匀, 在真空 $353\ \text{K}$ 下固化 $4\ \text{h}$, 凝固后将 PDMS 薄膜轻轻地从模板上剥离, 形成柔性薄膜, 即完成了硅片负型结构在 PDMS

薄膜上的转印.

1.2 氧化物-金属-氧化物层的制备

实验采用 JCP-350M2 高真空多靶磁控溅射仪来沉积薄膜, 银靶购于中诺新材(北京)科技有限公司, 直径为 $7.6\ \text{cm}$, 纯度为 99.999% . ZnO 靶为直径 $7.6\ \text{cm}$ 的陶瓷靶(宁波森利电子材料有限公司). 溅射室本底真空为 $5\times 10^{-4}\ \text{Pa}$, 在溅射过程中将纯度为 99.999% 的 Ar($40\ \text{sccm}$)引入腔内, 整个溅射过程在室温下进行, 压力保持在 $0.7\ \text{Pa}$. 溅射银膜采用直流电源, 功率为 $40\ \text{W}$, 溅射速率约为 $0.333\ \text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$, 溅射 ZnO 层采用射频电源功率为 $110\ \text{W}$, 溅射速率约为 $0.053\ \text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$. 薄膜厚度通过改变溅射时间来控制. 为保证薄膜均匀, 溅射相邻两层薄膜时需间断 $15\ \text{min}$, 溅射时基台转速为 $20\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$.

1.3 表征

通过配有积分球的紫外-可见-近红外分光光度计(Lambda 950, PerkinElmer)以 $1\ \text{nm}$ 的光谱分辨率测量玻璃和薄膜贴在玻璃上的总光学透过率谱; 利用傅里叶变换红外光谱(FTIR, Thermo Scientific)测定吸收率; 根据基尔霍夫辐射定律确定发射率; 用扫描电子显微镜(SEM, S-4800, 日立)研究所制备的微纳结构的表面形貌; 用光谱型椭圆偏仪(M-2000DI)测试 OMO 各层膜厚, 并拟合材料折射率和消光系数.

2 数值模拟

为了更好地理解所提出策略对于光伏组件降温特性的影响, 基于光伏组件和仿生复合结构的太阳吸收, 计算吸收的太阳功率和净冷却功率^[20], 计算公式分别为:

$$P_{\text{sun}} = \int_0^{\infty} I_{\text{AM1.5}}(\lambda) \varepsilon(\lambda, \theta) t_{\text{cooler}}(\lambda, \theta) d\lambda, \quad (1)$$

式中: P_{sun} 是吸收的太阳功率; $I_{\text{AM1.5}}(\lambda)$ 是 AM1.5 的太阳光谱; $\varepsilon(\lambda, \theta)$ 是组件的太阳吸收; $t_{\text{cooler}}(\lambda, \theta)$ 是复合结构的太阳光透过率; θ 是太阳辐射角; λ 是波长.

$$P_{\text{cooling}} = P_{\text{rad}}(T_{\text{top}}) - P_{\text{atm}}(T_{\text{amb}}), \quad (2)$$

式中: P_{cooling} 是净冷却功率; P_{rad} 是辐射功率; P_{atm} 是吸收的大气辐射功率, 计算公式为:

$$P_{\text{rad}} = 2\pi \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\text{b}}(\lambda, T_{\text{cooler}}) \varepsilon_{\text{cooler}} \cdot$$

$$(\lambda, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda, \quad (3)$$

$$P_{\text{atm}} = 2\pi \int_0^\infty \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_b(\lambda, T_{\text{amb}}) \varepsilon_{\text{cooler}}(\lambda, \theta) \cdot \varepsilon_{\text{atm}}(\lambda, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda, \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{\text{cooler}}(\lambda, \theta)$ 和 $\varepsilon_{\text{atm}}(\lambda, \theta)$ 分别是复合结构和大气发射率; T_{amb} 和 T_{cooler} 分别是环境和复合结构温度; I_b 是黑体的辐射强度, 计算公式为:

$$I_b(T_{\text{cooler}}, \lambda) = \frac{(2hc^2/\lambda^5)}{(e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1)}, \quad (5)$$

式中: h , c , λ , k_B 和 T 分别是普朗克常数、真空中的光速、波长、玻尔兹曼常数和温度.

$$\varepsilon_{\text{atm}}(\lambda, \theta) = 1 - t(\lambda)^{1/\cos \theta}, \quad (6)$$

式中: $t(\lambda)$ 为天顶方向的大气透过率.

基于上述定义的冷却功率, 利用基于有限元方法的 COMSOL Multiphysics 将由 OMO 和结构化 PDMS 构成的复合结构应用于封装太阳电池表面, 进行热传输分析. 假设各向同性材料的温度变化较小, 采用一维热传输模型在垂直方向上分析光伏组件中的温度分布情况, 通过求解稳态热扩散方程来确定:

$$\frac{d}{dz} \left[k(z) \frac{dT(z)}{dz} \right] + \dot{q}(z) = 0, \quad (7)$$

式中: $T(z)$ 是温度分布; $k(z)$ 是导热系数; 这里玻璃、硅太阳电池、胶黏剂、背板的导热系数分别为 0.98、0.24、148、0.36 W·(m·K)⁻¹ [22], $\dot{q}(z)$ 是与空间相关的发热率.

在光伏组件上表面添加热边界条件为:

$$-k \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{\text{top}} = P_{\text{cooling}}(T_{\text{top}}) + h_1(T_{\text{top}} - T_{\text{amb}}), \quad (8)$$

同时考虑辐射冷却效应和由于传导和对流导致的非辐射热, 在下表面添加边界条件为:

$$k \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{\text{bottom}} = h_2(T_{\text{bottom}} - T_{\text{amb}}), \quad (9)$$

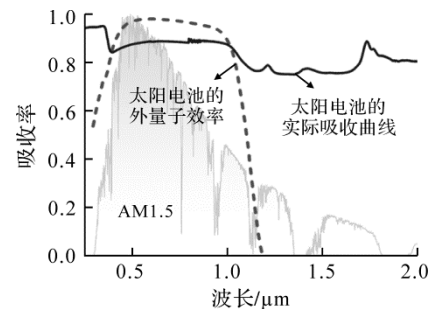
式中非辐射热系数 $h_1 = 10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, $h_2 = 5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 用以模拟典型的室外环境 [23].

3 结果与讨论

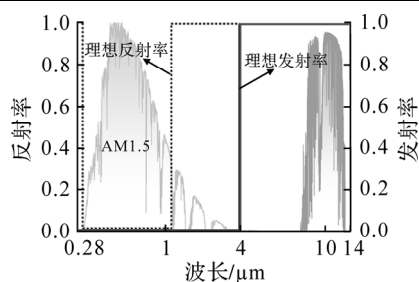
典型的光伏组件能够将入射太阳光约 20% 的能量转换为电能, 因此近 80% 太阳光在光伏模型

中可转化为热量, 导致发电功率下降. 在 AM1.5 的太阳光谱中 (AM1.5 是描述太阳光入射于地面的平均照度, 其太阳总辐照度为 1000 W·m⁻²), 根据晶硅太阳电池实际的太阳吸收曲线 [20] 和外量子效率 (External Quantum Efficiency, EQE) [24] (图 1(a)) 可看出, 只有 0.3~1.2 μm 波长范围内的阳光可被太阳电池利用并发生光电转换, 而处于 1.2~4.0 μm 波长范围内的太阳光被电池吸收后作为寄生热会增加电池的温度, 因此需要反射这部分阳光, 同时提高红外热辐射实现对电池的光热协同管理, 以降低电池的表面温度, 这就需要对从紫外到中红外的超宽带光波具有特定的波长响应特性. 图 1(b) 为作用于晶硅太阳电池的复合结构从紫外到中红外理想光学反射和红外发射的光谱曲线.

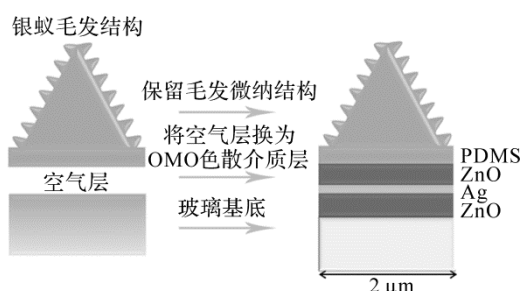
银蚁对阳光具有较强的反射能力, 对中红外电磁波有强的热辐射, 这使得银蚁可在酷热的沙漠中生存. 银蚁这种特殊功能得益于毛发结构 (图 1(c) 左图), 银蚁体表覆盖有截面为三角形的毛发, 其横向尺寸为 2.4~3.5 μm, 带有纳米级褶皱. 毛发和表皮之间有空气间隙层, 在毛发和空气层界面处由于 2 种介质的折射率不同, 入射光从毛发入射到空气介质时属于从光密介质入射到光疏介质, 在入射角满足的情况下, 入射光可以发生全内反射, 所以空气间隙层是实现太阳光反射的关键. 而对晶硅太阳电池仅需要反射 1.2~4.0 μm 波长的太阳光, 因而需要一个具有特定色散特性的间隙层 (图 1(c) 右图), 即在截面为三角形的毛发结构下, 采用 1.2~4.0 μm 波长范围内折射率接近于空气的材料, 即可获得在 1.2~4.0 μm 波长范围内的反射特性. 在此可以采用折射率可调、具有高度色散特性的 OMO 多层结构作为间隙层, 将其用于晶硅太阳电池的表面 (图 1(d)).



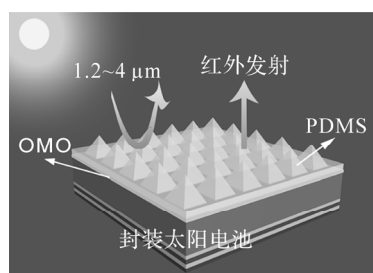
(a) 晶硅电池 EQE 和实际吸收特性



(b) 复合结构从紫外到中红外理想的光学反射和红外发射光谱



(c) 银蚁仿生结构设计示意图



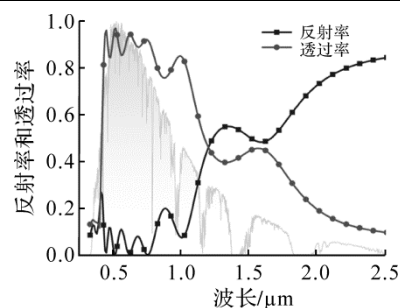
(d) 仿生结构用于光伏组件冷却的原理示意图

图1 根据银蚂蚁毛发结构设计太阳能电池冷却器的相关图例

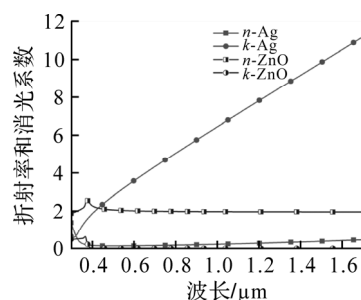
为确定 OMO 多层膜的色散特性, 首先对玻璃基底上的 OMO 结构进行光学模拟(图 2(a)); 再经优化后确定 ZnO 层和超薄 Ag 层的厚度分别为 40、9 nm. 从图 2(a)可看出, 在 0.3~1.2 μm 波长范围透过率较高, 而在更长的波长区域呈现出高反特性. 图 2(b)给出了计算中使用的相对应厚度 9 nm Ag 和 40 nm ZnO 材料的折射率 n 和消光系数 k , 由光谱型椭偏仪(M-2000DI)测试各层膜厚并经拟合得到. 2 种材料均拟合到 1.7 μm, 1.7~2.5 μm 是利用软件线性外推获得.

图 3(a)和(b)展示了在超白玻璃基底上实验制备的 OMO, 并贴附具有微纳结构 PDMS 所构成仿生复合结构的视觉效果. 因 PDMS 上存在微纳结构, 薄膜有光散射现象, 可通过图 3(c)的激光点散射图案得以佐证. 图 3(d)是 PDMS 表面的 SEM 图, 其微结构尺寸约 2.7 μm, 纳米结构在 150~200 nm 之间.

图 4(a)是实验制备的仿生复合结构的光学透



(a) OMO 多层膜在可见-近红外波长的透射和反射谱



(b) 拟合得到相应膜厚 Ag 和 ZnO 的折射率和消光系数

图2 OMO 在可见-近红外光谱区特性



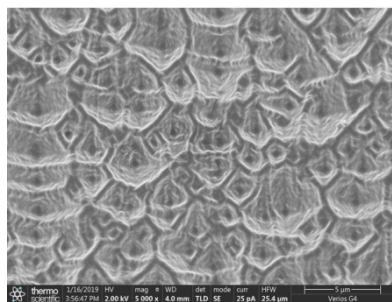
(a) 制备的玻璃基底镀 OMO 并贴敷 PDMS 的样品贴近图案的视觉效果



(b) 制备的玻璃基底镀 OMO 并贴敷 PDMS 的样品距图案 5 cm 的视觉效果



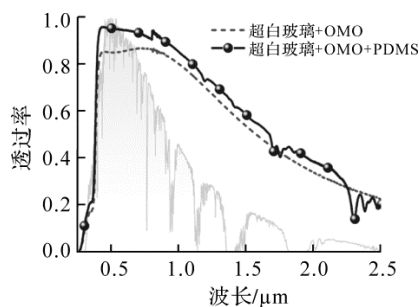
(c) 激光垂直照射样品照片



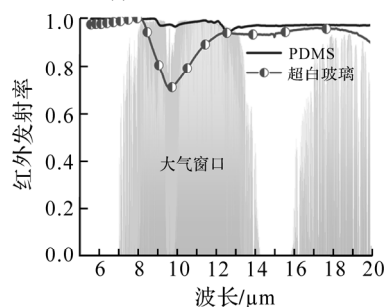
(d) 微纳结构样品表面 SEM 图

图 3 实验制备的 OMO 和 PDMS 样品及视觉效果

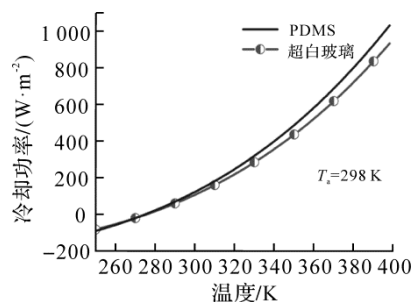
过率谱。从图 4 可看出, 结构化 PDMS 的存在可进一步提高光学透过率, 这是由于微纳结构使入射光方向发生多次改变, 抑制了表面反射^[25]。当把复合结构应用于电池, 在太阳光谱区太阳吸收功率由 $845.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降低到 $727.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图 4(b)为测量的超白玻璃和复合结构薄膜的红外发射特性, 这



(a) 测试样品透过率



(b) 玻璃和 PDMS 薄膜的中红外发射率



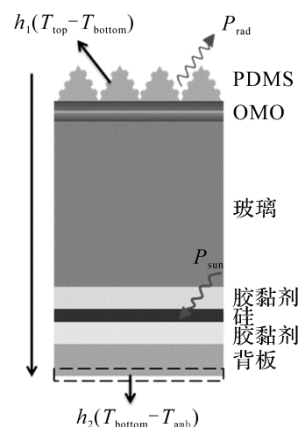
(c) 不同温度下计算的玻璃和 PDMS 薄膜的冷却功率

图 4 制备样品的光学特性表征及其冷却性能模拟

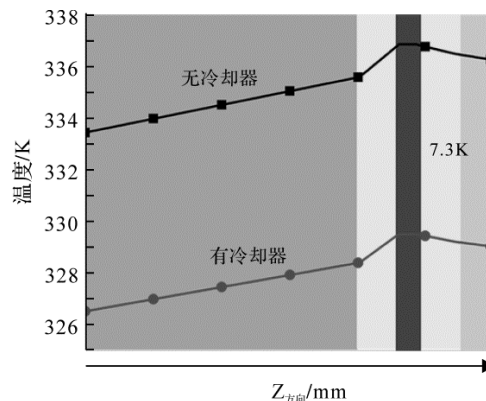
里 PDMS 薄膜在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 的大气窗口内平均发射率约为 0.96, 相对于玻璃在这个波长的红外发射率提升了 11%, 同时弥补了玻璃在 $9 \mu\text{m}$ 处由于声子-极化共振导致的低发射率, 从而增强了辐射制冷效应。在环境温度为 298 K 时, 不同温度下的玻璃和 PDMS 薄膜的冷却功率如图 4(c)所示, 在此基础上可进一步计算光伏组件中的温度分布。

理想情况下, 将具有高度波长选择性的冷却器应用于光伏表面可降温 8.6 K ^[20]。将 OMO 结合 PDMS 复合结构作为冷却器应用于典型晶硅太阳能电池组件, 结构如图 5(a)所示^[23], 其中 h_1 和 h_2 分别是顶部和底部表面的非辐射传热系数。计算结果发现, 将复合结构放置在晶硅太阳能电池表面可以显著降低其温度。采用复合结构设计可以使电池工作温度平均降低 7.2 K (图 5(b))。在计算中非辐射传热系数取 $h_1 = 10 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, $h_2 = 5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。顶部和底部环境温度均为 298 K。

为进一步了解在不同传热系数时的冷却效果,



(a) 热传输计算电池结构示意图



(b) 光伏组件温度分布

图 5 模拟仿生复合结构作为冷却器应用在晶硅太阳能电池表面的降温效果

通过改变上表面或下表面的传热系数研究其温度的变化, 结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 即使在较大传热系数情况下, 这种复合结构仍然具有较为明显的冷却作用, 如当电池板背面传热系数 $h_2=30 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 即对应 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速时, 其温降仍有 $3.35 \text{ K}^{[26]}$, 表明该复合结构具有较好的实际应用潜力.

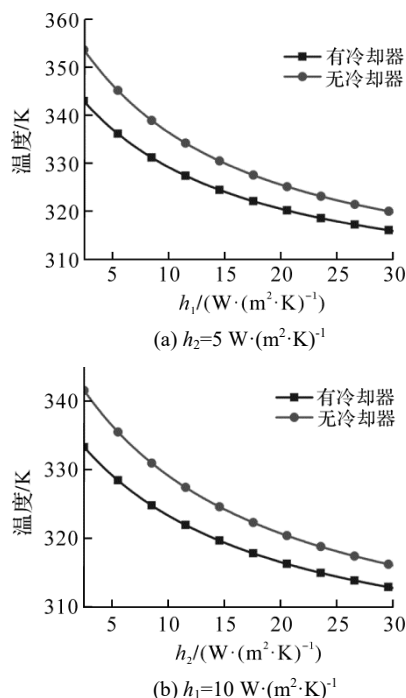


图6 上下表面传热系数对制冷效果的影响

4 结论

(1)提出了一种由 OMO 和微纳 PDMS 共同构成的撒哈拉银蚁仿生复合结构.

(2)将这种复合结构应用于光伏组件发现, 在可见光波段具有较高的透过率, 在近红外波段具有较高的反射率, 而在中红外波段具有较高的发射率.

(3)光学和热学计算结果表明, 该复合结构可以使晶硅太阳能电池降温约 7.2 K , 并具有一定的抗环境影响能力.

参考文献:

[1] Davis M W, Fannery A H, Dougherty B P. Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123(3):200-210.

[2] Jones A D, Underwood C P. A thermal model for photovoltaic systems[J]. Solar Energy, 2001, 70(4):349-359.

[3] Skoplaki E, Palyvos J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations[J]. Solar Energy, 2009, 83(5):614-624.

[4] Safi T S, Munday J N. Improving photovoltaic performance through radiative cooling in both terrestrial and extraterrestrial environments[J]. Optics Express, 2015, 23(19):A1120-A1128.

[5] Singh P, Ravindra N M. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 101:36-45.

[6] Hirst L C, Ekins-Daukes N J. Fundamental losses in solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011, 19(3):286-293.

[7] Zhao D L, Aili A, Zhai Y, et al. Subambient cooling of water: Toward real-world applications of daytime radiative cooling[J]. Joule, 2019, 3(1):111-123.

[8] Zhou Z G, Wang Z, Bermel P. Radiative cooling for low-bandgap photovoltaics under concentrated sunlight[J]. Optics Express, 2019, 27(8):A404-A418.

[9] Yoon H, Joslin D, Law D, et al. Application of infrared reflecting (IRR) coverglass on multijunction III-V solar cells[C]//2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 2006:1861-1864.

[10] Hou F H, Han C, Isabella O, et al. Inverted pyramidally-textured PDMS antireflective foils for perovskite/silicon tandem solar cells with flat top cell[J]. Nano Energy, 2019, 56:234-240.

[11] Zhao B, Hu M K, Ao X Z, et al. Performance analysis of enhanced radiative cooling of solar cells based on a commercial silicon photovoltaic module[J]. Solar Energy, 2018, 176:248-255.

[12] Lin S H, Ai L, Zhang J, et al. Silver ants-inspired flexible photonic architectures with improved transparency and heat radiation for photovoltaic devices[EB/OL]. [2019-09-10]. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110135>.

[13] Manzoor S, Yu Z J, Ali A, et al. Improved light management in planar silicon and perovskite solar cells using PDMS scattering layer[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 173:59-65.

[14] Zhao B, Hu M K, Ao X Z, et al. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects[J]. Applied Energy, 2019, 236:489-513.

[15] Zeyghami M, Goswami D Y, Stefanakos E. A review of clear sky radiative cooling developments and applications

- in renewable power systems and passive building cooling[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 178: 115-128.
- [16] Sun X S, Silverman T J, Zhou Z G, et al. Optics-based approach to thermal management of photovoltaics: Selective-spectral and radiative cooling[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2017, 7(2):566-574.
- [17] Zhu L X, Raman A P, Fan S H. Radiative cooling of solar absorbers using a visibly transparent photonic crystal thermal blackbody[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(40):12282-12287.
- [18] Gentle A R, Smith G B. Is enhanced radiative cooling of solar cell modules worth pursuing?[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 150:39-42.
- [19] Zhao B, Hu M K, Ao X Z, et al. Comprehensive photonic approach for diurnal photovoltaic and nocturnal radiative cooling[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 178:266-272.
- [20] Li W, Shi Y, Chen K F, et al. A comprehensive photonic approach for solar cell cooling[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(4):774-782.
- [21] Shi N N, Tsai C C, Camino F, et al. Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants[J]. *Science*, 2015, 349(6245):298-301.
- [22] Lee B, Liu J Z, Sun B, et al. Thermally conductive and electrically insulating EVA composite encapsulant for solar photovoltaic (PV) cell[J]. *Express Polymer Letters*, 2008, 2(5):357-363.
- [23] Armstrong S, Hurley W G. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(11/12):1488-1495.
- [24] Lu Y H, Chen Z C, Ai L, et al. A universal route to realize radiative cooling and light management in photovoltaic modules[EB/OL]. [2019-09-10]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/solr.201700084>.
- [25] Lotz M R, Petersen C R, Markos C, et al. Direct nano-imprinting of moth-eye structures in chalcogenide glass for broadband antireflection in the mid-infrared[J]. *Optica*, 2018, 5(5):557-563.
- [26] Zhu L X, Raman A, Wang K X, et al. Radiative cooling of solar cells[J]. *Optica*, 2014, 1(1):32-38.

Applications of Saharan silver ants-inspired structures in photovoltaic modules cooling

WU Wanchun¹, HUANG Jinhua², WEI Mingming¹, LI Dong¹, XU Hua^{1*}, LU Yuehui²

(1.School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: Heating in solar cells has significantly negative effects on the conversion efficiency and reliability, resulting in a shortened lifetime. According to the analysis on the solar spectra in which silicon solar cells work, this paper proposes a thermal management strategy inspired by Saharan silver ants. The biomimetic structure is composed of an oxide-metal-oxide (OMO) and a micro/nano-structured polydimethylsiloxane (PDMS) film. It can radiate heat through thermal radiation while reflecting the near-infrared sunlight to cool the surface temperature. Theoretical calculations reveal that the temperature of solar cells can be reduced by about 7.2 K when applying the biomimetic structure to photovoltaic modules, which provides a new method for thermal management of photovoltaic modules.

Key words: solar cells; radiative cooling; thermal radiation; radiative heat transfer; thermal management

(责任编辑 史小丽)