

光伏电池与分光耦合系统的热学与电学特性

廖天军^{1*}, 张辉²

¹重庆理工大学物理与能源系, 重庆 400054;

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 根据光伏电池与环境之间的牛顿传热以及禁带宽度对温度的依赖特性, 获得光伏电池的热学与电学特性。实验研究结果表明, 光伏电池的温度高于环境温度, 并随着输出电压的增加呈先减小后增加的趋势, 与辐射强度呈线性递增的关系; 短路电流随着辐射强度的增加而升高, 而开路电压随着辐射强度的增加呈先增加后减小的趋势; 优化光伏电池输出电压和太阳能辐射强度可以获得最大效率。在 AM 1.5G 标况下, 将部分辐射能输入至集热系统, 构造一个分光型光伏-热耦合系统, 而该系统可以提高太阳能的利用率。

关键词 探测器; 光伏电池; 不可逆过程; 热力学特性; 耦合系统

中图分类号 O59 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.190401

Thermal and Electrical Properties of Photovoltaic Cell and Spectrum Splitting Coupled System

Liao Tianjun^{1*}, Zhang Hui²

¹Department of Physics and Energy, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract The thermal and electrical characteristics of a photovoltaic cell are obtained according to the Newton heat transfer between photovoltaic cell and environment, and dependence of band-gap width. This research experimental results show that the temperature of the photovoltaic cell is higher than the ambient temperature, and it first decreases and then increases, which is linearly increasing with the radiation intensity. The short-circuit current increases with the increase of radiation intensity while the open-circuit voltage increases first and then decreases with the increase of radiation intensity. Maximum efficiency can be obtained by optimizing the output voltage of the photovoltaic cells and solar radiation intensity. A spectrum splitting photovoltaic-thermal coupled system is constructed to improve the utilization rate of solar energy by inputting part of the radiant energy under the AM 1.5G standard condition into the thermal collection system.

Key words detectors; photovoltaic cell; irreversible process; thermodynamic properties; coupled system

OCIS codes 040.5350; 040.6040; 000.6850

1 引言

太阳能光伏发电技术致力于解决全球能源危机的问题,其能够提供一种更方便、更简洁的能源获取方式^[1-2],而硅基光伏电池现已投入商业使用。半导体硅材料的禁带宽度为 1.12 eV,在 AM 1.5G 标准辐射条件下,能量低于禁带宽度的光子不能被光

伏电池有效吸收,为此全部转化为热能;能量高于禁带宽度的光子能够被光伏电池吸收,将光子的部分能量转化为电能,同时产生一定的热能,使得硅基光伏电池的工作温度高出环境温度几十摄氏度,影响其使用寿命,导致输出功率和光电转换效率低于理想条件下的性能,从而制约太阳能光伏技术的应用^[3]。探寻降低光伏电池热损失的途径和提高器

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-02-06; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201901144)、重庆理工大学科研启动项目(2019ZD22)

* E-mail: liaotianjun@cqut.edu.cn

件的转换效率,这是光伏电池研究的重要课题之一。目前,提高光伏电池的转换效率有构建的光伏-热耦合系统^[4]和光伏-温差耦合系统^[5-8]以及发展新型的太阳能电池如量子点太阳能电池^[2]、中间带太阳能电池^[9]和叠层太阳能电池^[10]等重要途径。在光伏-热和光伏-温差的两个耦合系统中,尽管产生了额外的功率输出,但传热具有不可逆性,若光伏电池在较高的温度下运行,则其使用寿命会受到影响。因此,开发可同时降低光伏电池温度和提高光电转换效率的新型系统是极为迫切的。

传统的研究主要从微观角度来分析,利用数值仿真软件来全面揭示光伏电池的损失(光学损失、电学损失和热学损失)来源^[11-12]。但是,从宏观角度来分析,基于热力学基本方程和伏安特性方程对光伏电池优化特性研究相对较少。本文首先从伏安特性方程出发,研究光伏电池与环境之间的不可逆传热损失对电池温度、禁带宽度、功率和光电转换效率的影响,探究关键参数如电压、温度、电流和辐射强度的优化设计。其次,构造一种新型的光伏-热耦合系统模型,以提高太阳能的利用率。

2 光伏电池的热学与电学特性

图1为光伏电池的不可逆热力学模型^[13],其中PV cell为光伏电池。当太阳光照射到光伏电池的表面时,根据光生伏特效应,光伏电池产生电压输出,当光伏电池的两端连接一个负载即可产生电能输出。由于传热具有不可逆性,则光伏电池的温度高于环境温度,使光伏电池向环境释放热能。假设光伏电池与环境之间的不可逆遵循牛顿冷却定律,可得到能量平衡方程^[5],表达式为

$$GA_p - P = UA(T_p - T_a), \quad (1)$$

式中: G 为太阳光的辐射强度; A_p 为光伏电池接收太阳光的面积,此时 $A_p = 1.64 \text{ m}^2$; T_p 为光伏电池的工作温度; T_a 为环境温度; P 为光伏电池的输出功率; A 为传热面积,值是 A_p 值的2倍; U 为自然对流系数,值为 $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,空气中的自然对流系数为 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,通过增强强制对流等方式可提高 U 值。实验所用的光伏电池由60个太阳能电池串联组成, P 和光电转换效率 η 分别表示为

$$P = VI, \quad (2)$$

$$\eta = P/GA_p = VI/GA_p, \quad (3)$$

式中: V 为输出电压; I 为电流。从(2)式和(3)式可以看到, P 和 η 依赖于 T_p 、 I 和 V 。基于文献^[12],

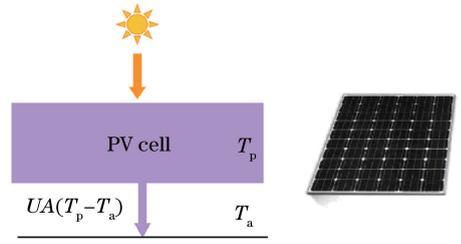


图1 光伏电池的不可逆热力学模型^[13]

Fig. 1 Irreversible thermodynamic model of PV cells^[13]
 T_p 与 T_a 和 G 的关系^[14]可近似表示为

$$T_p = T_a + CG, \quad (4)$$

式中: C 为温度系数。

光生电流 I_{ph} 和温度与 G 的关系^[5],可表示为

$$I_{ph} = G[I_{ph,Ref} + \mu(T_p - T_{Ref})]/G_{Ref}, \quad (5)$$

式中: G_{Ref} 为参考辐射强度, $G_{Ref} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; T_{Ref} 为参考温度, $T_{Ref} = 300 \text{ K}$; $I_{ph,Ref}$ 为标准辐射条件下的光生电流, $I_{ph,Ref} = 9.43 \text{ A}$; μ 为电流温度系数, $\mu = 0.00047 \text{ A} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

基于光伏电池的二极管电路模型,可给出伏安特性方程^[15-19],表达式为

$$I_F = I_{ph} - I_0 \{ \exp[(V + IR_s)/aV_T] - 1 \}, \quad (6)$$

式中: I_0 为二极管逆向饱和电流; a 为理想因子, $a = 1$; R_s 为串联内阻; V_T 为串联光伏组件的热电压, $V_T = N_s k_B T_p / q$,其中 N_s 为太阳能电池的串联个数, $N_s = 60$, q 为一个单位正电荷的电量, $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, k_B 为波尔兹曼常量, $k_B = 1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。 I_0 与半导体硅的禁带宽度 E_g 和 T_p 的依赖关系^[15-19]可表示为

$$I_0/I_{0,Ref} =$$

$$(T_p/T_{Ref})^3 \exp[qE_g(1/T_{Ref} - 1/T_p)/k_B], \quad (7)$$

式中: $I_{0,Ref}$ 为 $T_{Ref} = 300 \text{ K}$ 下的 I_0 , $I_{0,Ref} = 1.25 \text{ nA}$ 。 E_g 与 T_p 的关系^[20]可表为

$$E_g(T_p) = E_g(0) - \alpha_g T_p^2 / (T_p + \beta_g), \quad (8)$$

式中: $E_g(0)$ 为绝对零度的禁带宽度, $E_g(0) = 1.170 \text{ eV}$; α_g 和 β_g 为系数, $\alpha_g = 4.73 \times 10^{-4} \text{ eV}$, $\beta_g = 636 \text{ K}$ 。由(8)式可知, E_g 随着 T_p 值的增加而减小。

令(6)式中 $I = 0 \text{ A}$,可得开路电压 $V_{OC} = aV_T \cdot \ln(I_{ph}/I_0 + 1)$;令(5)式中 $V = 0 \text{ V}$,短路电流 I_{SC} 的表达式为

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 [\exp(I_{SC}R_s/aV_T) - 1]. \quad (9)$$

通过数值求解(9)式可得到 I_{SC} 。 V_{OC} 和 I_{SC} 是决定太阳能电池性能特性的两个关键参数。根据(1)~(9)式,可研究光伏电池的热力学特性、电学

特性和参数优化的设计。

给定三个不同的辐射强度, T_p 与 V 的变化曲线如图 2(a)所示。从图 2(a)可以看到, T_p 随着 V 值的增加呈先减小后增大的趋势, G 值越大, 则 T_p 值越大; 在同一条温度曲线上, 存在一分界电压 V_D , 当 $V=V_D$ 时, T_p 为最小值, 并输出最大功率; 当 $G=1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, T_p 在 320 K 附近波动, 可近似等于 47°C , 厂商提供的数据为在标准辐射下光伏电板的平均工作温度, 值为 $48 \pm 2^\circ\text{C}$ ^[13], 由此可以看到建立的模型得到的数据与实验结果基本吻合。由于给定辐射强度, 光伏电池基本维持在某一温度, 因此利用(4)式可以评估光伏电池的温度特性, C 值近似等于 $0.02 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{K}$ 。当短路 $V=0 \text{ V}$ 和开路 $I=$

0 A 时, 光伏电池无功率输出 ($P=0 \text{ W}$), 此时光伏电池相当于一个集热器, 则(1)式可改写为

$$GA_p = UA(T_p - T_a). \quad (10)$$

此时, 电池在两个特殊状态下的工作温度相等, 如图 2(a)所示。利用(5)~(7)式、热平衡方程和开路电压方程, 可绘制 V_{OC} 随 G 的变化曲线, 如图 2(b)所示。从图 2(b)可看到, G 对 V_{OC} 有较大影响, V_{OC} 随着 G 值的增加呈先增大后减小的趋势, 且存在一辐射强度使开路电压取得最大值。另外, 利用(9)式可绘制 I_{SC} 随 G 的变化曲线, 如图 2(c)所示。从图 2(c)可以看到, 增加辐射强度可以提高短路电流值。结合图 2(b)和图 2(c)可以看到, 可以优化辐射强度来优化光伏电池的性能。

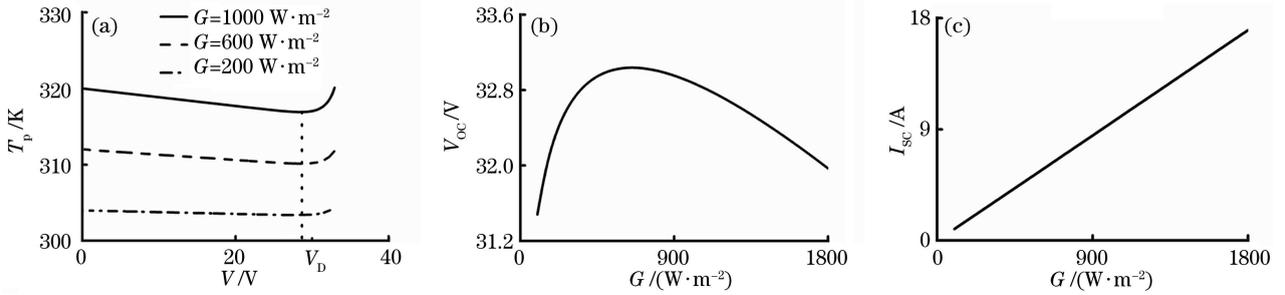


图 2 不同的性能曲线。(a)不同的辐射强度下 T_p 与 V 的关系曲线;(b) V_{OC} 与 G 的关系曲线;(c) I_{SC} 与 G 的关系曲线
Fig. 2 Different performance curves. (a) Relationship between T_p and V under different radiation intensities; (b) relationship between V_{OC} and G ; (c) relationship between I_{SC} and G

给定三个不同的太阳辐射强度, 则 η 与 V 的关系曲线, 如图 3 所示。从图 3 可以看到, η 随着 V 值的增加呈先增大后减小的趋势, 且在输出电压较小的情况下, 三个不同辐射强度的 η 值基本一致, 当输出电压较大时, 三个不同辐射强度所对应的效率有所不同。从图 3 可以看到, 并非 G 值越大, 其所对应的 η 值越大, 在三个不同的辐射强度下, $G=600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 所对应的 η 反而大于 $G=1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这是 T_p 与 G 的依赖关系所导致。

利用(2)式和(3)式可绘制 P 和 η 随 G 和 V 变化的三维曲面, 如图 4 所示。从图 4(a)可以看到, G 值越大, 则 P 值越大, 而 P 随着 V 值的增加呈先增大后减小的趋势, 这由光伏电池的伏安特性所决定。从图 4(b)可以看到, η 值随着 G 和 V 的增加均呈现先增大后减小的趋势, 因此可同时优化 G 和 V 两个器件参数来获得最大效率 η_{max} 。

同时优化 V 和 I , 可绘制光伏电池的优化效率 η_{opt} 和优化功率 P_{opt} 与 G 的关系曲线, 如图 5 所示。从图 5 可以看到, P_{opt} 随着 G 值的增加呈单调

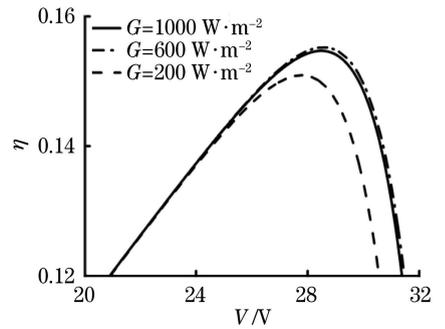


图 3 不同的辐射强度下 η 与 V 的关系曲线
Fig. 3 Relationship between η and V under different radiation intensities

递增, 而 η_{opt} 随着 G 值的增加呈先增大后减小的趋势, 当 $G=G_M=694 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 效率达到最大值, 此时 $\eta_M=0.155$, 相应的输出功率 $P_\eta=107.8 \text{ W}$ 。当在 $G \geq G_M$ 的范围内时, 增加 G 值可以提高 P 值, 且光伏电池的温度相应升高, 而 P 值的增加幅度小于太阳能辐射能流 GA_p 的增加幅度, 因此导致 η_{opt} 值下降。尽管如此, 光伏电池具有较高的功率输出, 因此当光伏电池运行时, 应使 G

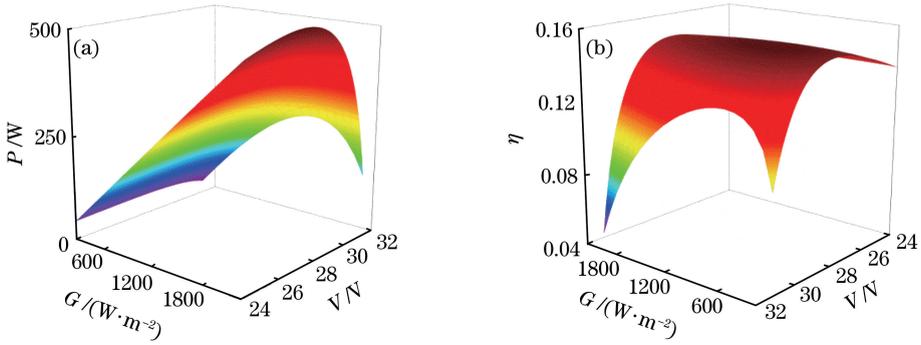


图4 不同情况下的三维曲面图。(a) P ; (b) η

Fig. 4 Three-dimensional surface graphs in different situations. (a) P ; (b) η

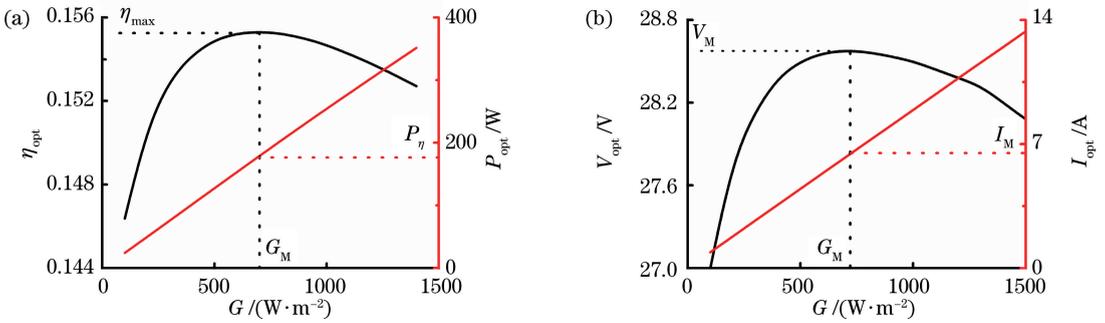


图5 优化 V 和 I 后在不同的辐射强度下的性能曲线。(a) η_{opt} 和 P_{opt} ; (b) V_{opt} 和 I_{opt}

Fig. 5 Performance under different radiation intensities after optimizing V and I . (a) η_{opt}

and P_{opt} ; (b) V_{opt} and I_{opt}

处于 $G \geq G_M$ 的区间内,在该区域内 η 和 P 值均较大。根据一个地区的平均辐射强度 \bar{G} 来设计太阳能系统,当 $\bar{G} < G_M$ 时,可以通过太阳能聚光器增加 G 值来提升光伏电池的性能。从图 5(b) 可以看到,随着 G 值的增加, V_{opt} 呈先增大后减小的趋势, I_{opt} 呈单调递增的趋势。当 $G = G_M$ 时, $V_{opt} = V_M$ 和 $I_{opt} = I_M$ 。根据 G_M 值可以确定 T_p 、 V 和 I 在 $\eta = \eta_M$ 处的最佳值,分别为 $T_{p,M} = 311$ K、 $V_M = 28.6$ V 和 $I_M = 6.20$ A。

3 光伏-热耦合系统的效率

由第 2 节可知,光伏电池的光电转换效率在 $G_M = 694 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 处 $\eta_M = 0.155$,则在标准辐射 $G = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的情况下,可以采用光学滤波器将能量 $(G - G_M)$ 输入太阳能集热器中,用来提升太阳能的利用率,光伏-热耦合系统如图 6 所示。设集热器的面积和热效率分别为 A_T 和 η_t ,则耦合系统的总效率为

$$\eta_{total} = \frac{P_\eta + (G - G_M)A_T\eta_t}{GMA_p + (G - G_M)A_T} \quad (11)$$

给定参数 $A_T = 0.5 \text{ m}^2$ 和 $\eta_t = 0.5$,利用(11)式可以确定耦合系统的最大效率为 0.191,相比于光伏电池单系统,太阳能的利用率得到一定的提升。若将光伏电池的余热引入集热系统中,还可以进一步提升性能。

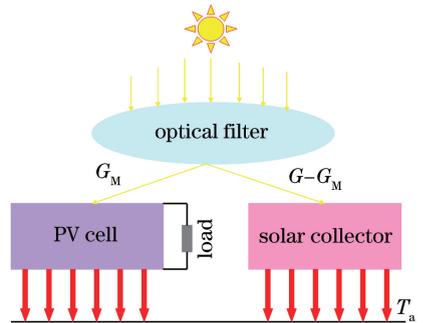


图6 光伏-热耦合系统的示意图

Fig. 6 Schematic of PV-thermal coupling system

4 结 论

光伏电池的热学与电学特性受到关键参数如电压、电流和太阳辐射强度的影响,可通过优化参数来获得最大效率。针对光伏电池过高的工作温度的

问题, 提出一个光伏-热耦合能源系统, 用来提高太阳能的利用率。实验结果表明, 当考虑光伏电池不可逆的热力学特性时, 实际工作温度高于环境温度, 辐射强度对开路电压和短路电流具有重要影响; 当 $G_M = 694 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $T_{p,m} = 311 \text{ K}$ 、 $V_M = 28.6 \text{ V}$ 和 $I_M = 6.20 \text{ A}$ 时, 光伏电池最大的光电转换效率为 0.155; 通过引入滤光系统可以设计新型的光伏-热耦合系统, 太阳能的利用率得到一定的提升。

参 考 文 献

- [1] Wang R, Zhang H Y, Wang W G, et al. Improvement of dye-sensitized solar cells with TiO_2 nanoarray- TiO_2 /graphene nanocrystal composite film as photoanode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1216001.
王蓉, 张海燕, 王文广, 等. 二氧化钛阵列二氧化钛/石墨烯颗粒复合结构光阳极对染料敏化太阳能电池的改善[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1216001.
- [2] Zhang J, Zhang J, Geng J J, et al. Application of PbS quantum dots in luminescent solar concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123003.
张俊, 张军, 耿俊杰, 等. PbS 量子点在荧光集光太阳能光伏器件上的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0123003.
- [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] Rosell J I, Vallverdú X, Lechón M A, et al. Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(18/19): 3034-3046.
- [5] Liao T J, Lin B H, Yang Z M. Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation device [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 77: 158-164.
- [6] Yin E S, Li Q, Xuan Y M. Feasibility analysis of a concentrating photovoltaic-thermoelectric-thermal cogeneration [J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 560-573.
- [7] Rodrigo P M, Valera A, Fernández E F, et al. Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules [J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 1150-1162.
- [8] Babu C, Ponnambalam P. The theoretical performance evaluation of hybrid PV-TEG system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 173: 450-460.
- [9] Jiang J H, Wu K P, Lu K L, et al. Effect of intermediate-band on the ZnO/ZnTe photovoltaic solar cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0916003.
蒋建慧, 吴孔平, 鲁开林, 等. 中间带对 ZnO/ZnTe 光伏太阳能电池性能的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0916003.
- [10] Tian B T, Wang X D, Niu Y Y, et al. Sol-gel preparation of graded-refractive-index antireflective coatings for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0831001.
田冰涛, 王晓栋, 牛彦彦, 等. 溶胶-凝胶法制备 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池梯度折射率减反膜[J]. *光子学报*, 2016, 45(8): 0831001.
- [11] Shang A X, Zhai X F, Zhang C, et al. Nanowire and nanohole silicon solar cells: a thorough optoelectronic evaluation [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2015, 23(12): 1734-1741.
- [12] Shen L, Li Z P, Ma T. Analysis of the power loss and quantification of the energy distribution in PV module [J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114333.
- [13] Suniva. Series monocrystalline solar modules [EB/OL]. [2020-01-18]. <https://www.wholesalesolar.com/cms/suniva-opt285-60-4-100-silver-mono-solar-panel-specs-2917622048.pdf>.
- [14] Yang Z M, Zhang G P, Lin B H. Performance evaluation and optimum analysis of a photovoltaic-driven electrolyzer system for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(8): 3170-3179.
- [15] Liao T J, Lin B H, Yang Z M. Temperature monitoring for concentrated photovoltaic power system based on optical fiber temperature sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050602.
廖天军, 林比宏, 杨智敏. 基于光纤温度传感器监测的聚光光伏发电系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050602.
- [16] Ishaque K, Salam Z, Taheri H. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(2): 586-594.

- [17] Orioli A, di Gangi A. A procedure to evaluate the seven parameters of the two-diode model for photovoltaic modules[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 582-599.
- [18] Chin V J, Salam Z. A new three-point-based approach for the parameter extraction of photovoltaic cells[J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 519-533.
- [19] Wu L J, Chen Z C, Long C, et al. Parameter extraction of photovoltaic models from measured I-V characteristics curves using a hybrid trust-region reflective algorithm[J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 36-53.
- [20] Varpula A, Prunnila M. Diffusion-emission theory of photon enhanced thermionic emission solar energy harvesters[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112 (4): 044506.