

# 利用热力学模型研究光伏-热电复合系统效率提升机制

张宇锋<sup>1</sup>, 林伟清<sup>1</sup>, 潘华清<sup>1,2</sup>, 孙振宁<sup>3</sup>, 刘向鑫<sup>4</sup>, 施天谟<sup>1</sup>, 郑金成<sup>1</sup>

1. 厦门大学物理学系, 福建厦门 361005
2. 上饶职业技术学院机械工程系, 江西上饶 334109
3. 厦门大学电子科学系, 福建厦门 361005
4. 中国科学院电工研究所, 北京 100190

**摘要** 太阳能电池和热电模块组成的复合系统有望获得较高的太阳能到电能的转换效率。本文利用热力学方法分析了由商业化太阳能电池构成的复合系统, 并根据一维模型下能流输运特性计算了系统内各模块温度及其对转换效率的影响, 发现低温度系数和低效率的太阳能电池可以通过构建复合系统获得更大的性能提升。同时, 由于太阳辐照的有限性导致流经热电模块的热流受到限制, 因此热电模块效率无法达到理想条件下的最优值。这表明复合系统的优化并非各个模块优化后结果的简单线性叠加, 而需要考虑构成复合系统的各个模块间的约束条件进行整体计算和优化, 即复合系统效率不仅与材料本征特性(如电导率、热导率等)有关, 也和其工作状态(如入射太阳辐照强度、热电模块构成及几何尺寸、模块之间热学特性等)有关。上述模型与结果对于类似复合系统的设计有着指导作用。

**关键词** 光伏; 热电; 复合系统; 能量转换效率

中图分类号 O59

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.001

## Thermodynamic Analysis of the Efficiency Improvement of a Photovoltaic-thermoelectric Hybrid System

ZHANG Yufeng<sup>1</sup>, LIN Weiqing<sup>1</sup>, PAN Huaqing<sup>1,2</sup>, SUN Zhenning<sup>3</sup>, LIU Xiangxin<sup>4</sup>, SHI Tianmo<sup>1</sup>, ZHENG Jincheng<sup>1</sup>

1. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China
2. Department of Mechanic Engineering, Shangrao Vocational & Technical College, Shangrao 334109, Jiangxi Province, China
3. Department of Electronic Science, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China
4. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** A hybrid system formed by a photovoltaic module and a thermoelectric module has a great potential to enhance the solar-to-electricity efficiency. A mathematical model based on the first law of thermodynamics and the heat transfer analyses of the hybrid system is built, where the overall efficiency of the system is enhanced by optimizing the system as a whole. The model is used to study hybrid systems formed by commercially available photovoltaic modules and thermoelectric modules. It is found that, due to a limited incoming heat flux for the thermoelectric module, the overall performance of the hybrid system depends not only on the intrinsic properties of the materials forming such a hybrid system, but also on their working conditions, such as incoming solar radiation, geometry of each module, and interfacial properties. The results indicate that only photovoltaic modules with low temperature coefficient and low efficiency can truly benefit from forming such hybrid system, and the optimization of a hybrid system must be done as a whole.

**Keywords** photovoltaic; thermoelectric; hybrid system; energy conversion efficiency

收稿日期: 2013-03-27; 修回日期: 2013-05-09

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金新教师项目(20090121120028); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金博导类项目(20120121110021); 国家自然科学基金项目(U1232110)

作者简介: 张宇锋, 博士, 助理教授, 研究方向为凝聚态物理, 电子信箱: yufengzhang@xmu.edu.cn; 郑金成(通信作者), 教授, 研究方向为能源材料和同步辐射分析, 电子信箱: jczheng@xmu.edu.cn

## 0 引言

目前投入大规模商业化应用的太阳能光伏系统以硅基太阳能电池为主,同时新型薄膜太阳能电池的发展亦相当迅速。然而太阳能光伏的大范围应用仍然面临着瓶颈,即太阳能转换到电能的效率较低、成本较高。通常太阳能电池只能利用太阳光谱中波长较短的部分生成光生载流子。这些载流子所携带的大部分能量在输运过程中以热能的形式损耗掉了。同时,太阳光谱中长波部分能量亦转化为热能。因此入射的太阳辐照,仅有不足 5%~20% 的能量转化为电能(对于单 PN 结电池而言),而近 60%~70% 的能量转化为热能<sup>[1]</sup>,这些热损耗导致太阳能电池温度升高,进一步降低了太阳能电池的输出功率和效率。Guiavarch 和 Peuportier<sup>[2]</sup>研究发现,多晶硅平板太阳能电池在未有效冷却时的效率只有 14%,而采用空气冷却时效率可达到 20%。

若不仅仅利用散热机制冷却太阳能电池,而是利用上述光伏过程中的热能,可以进一步提高太阳能的综合利用率。Kern 和 Russel 在 1978 年提出利用光伏发电单元和热收集单元组成电热联产系统,不仅利用太阳能发电,还利用太阳能产热<sup>[3]</sup>。Huang 等<sup>[4]</sup>采用由聚碳酸酯构成的集热板和多晶硅光伏电池制成光伏-热 (PV/T) 收集器,日平均热效率达到 38%,光电光热综合性能效率达到 60% 左右。

热电器件是一种能够把热能直接转换成电能的新型能源转换器件,最近几年成为国际研究的热点<sup>[5-7]</sup>。若将光伏和热电模块组成光伏-热电 (PV-TE) 复合系统,可以利用热电模块将太阳辐照产生的热能直接转换为电能,有望提高太阳能到电能的转换效率。此复合系统不需要复杂的管路以及蒸汽发电设施,易于小型化,可极大地降低维护成本。van Sark<sup>[8]</sup>认为,应用新型热电材料有望将 PV-TE 复合系统总光电转换效率提升到 50%。Yang<sup>[9]</sup>在 PV-TE 复合系统基础上提出了光伏-热电-热水 (PV-TE-HW) 系统,可进一步提高总输出功率。

目前光伏-热电复合发电系统还面临着许多技术难题,例如,如何获得较高热电优值的材料以提升热电转换效率等。而这些难题中最关键的是如何优化两个模块使得系统总效率最大化。太阳能电池的温度升高会导致其效率下降,而热电转换效率的提升却要求热电模块冷热端温差较大,因此在复合系统设计中需要优化各个部件上的温度分布。由于不同光伏系统的温度特性、光电转换效率等都有所不同,是否任意的光伏系统都适于通过 PV-TE 复合化来提升其性能亦有待商榷。本文根据热力学原理、能流/热流在器件内的输运机制,建立了复合系统的整体优化模型。结合现有商业化太阳能电池和热电模块的热学、电学数据,本文研究了 PV-TE 复合系统在不同工况下的效率,分析了系统效率提升的机制,探讨了最佳的 PV 和 TE 组合模式,有望为此类系统设计提供理论指导。

## 1 理论模型

本文研究的光伏-热电复合系统包括太阳能电池、热电

模块和散热器 3 个部分,其几何模型如图 1 所示。图中最上面蓝色部分为光伏 (PV) 系统,中间绿色部分为热电 (TE) 系统,下面灰色部分为散热器。 $T_{pv}$ 、 $T_h$ 、 $T_c$ 、 $T_s$ 、 $T_a$  分别为 PV 系统、TE 系统热端和冷端、散热器、环境的温度。热电模块的高温端与太阳能电池相连(两者间热传导系数为  $K_0$ ),热电模块的低温端与散热片相连。

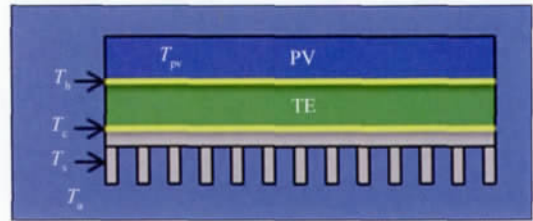


图 1 光伏-热电 (PV-TE) 复合系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the photovoltaic-thermoelectric (PV-TE) hybrid system

为了分析此复合系统的效率,做如下假设:入射太阳辐照为  $E_p$  ( $W \cdot m^{-2}$ ),太阳能电池的温度为  $T_{pv}$ ,热电模块高低温端的温度分别为  $T_h$  和  $T_c$ 。若散热器的散热性能极佳,则散热器温度  $T_s$  近似等于环境温度  $T_a$ 。不同季节或不同气候条件下, $T_a$  都有所不同。为了便于讨论,本文中假设环境温度与商用光伏组件测试时的标准温度相同,即  $T_a=298K$ 。

假理想情况下(不考虑热辐射和空气对流产生的热损失),入射到太阳能电池的太阳辐射能一部分转换为电能,其余的全部转换成热量并且流经 TE 系统。则复合系统总效率  $\eta_{tot}$  可表示为

$$\eta_{tot} = \eta_{pv} + (1 - \eta_{pv})\eta_{te} \quad (1)$$

式中, $\eta_{pv}$  为太阳能电池的效率, $\eta_{te}$  为热电模块的效率。这一理想模型所得结果与实际情况偏差较大,这是因为:

(1) 太阳能电池的效率并不是固定不变的,而是随温度的上升近似线性变小。文献[8]建立了一个简单的模型

$$\eta_{pv} = \eta_0 + \beta(T_{pv} - T_{ref}) \quad (2)$$

式中, $\eta_0$  为标准测试条件下 ( $AM1.5, E_i=1000W \cdot m^{-2}, T_{ref}=298K$ ) 测量的太阳能电池效率, $\beta$  为太阳能电池的效率绝对温度系数,量纲为  $K^{-1}$ 。

(2) 系统存在热损失,主要来源于反射、热辐射以及热对流。

大部分太阳能电池表面采用玻璃封装,会反射太阳辐射,导致反射热损失; $Q_r = \rho E_i$ ,其中  $\rho$  为玻璃的反射率为,可表示为

$$\rho = \left( \frac{n_g - n_{air}}{n_g + n_{air}} \right)^2 = \left( \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right)^2 = 4\% \quad (3)$$

式中, $n_g$  为玻璃的折射率, $n_g=1.5$ ;  $n_{air}$  为空气的折射率, $n_{air}=1$ 。

同时,器件表面也会以辐射方式产生热损失<sup>[10]</sup>

$$Q_R = \varepsilon \sigma (T_{pv}^4 - T_a^4) \quad (4)$$

式中  $\varepsilon$  为材料的发射率。由于多数太阳能电池采用玻璃封装(石英玻璃  $\varepsilon=0.93$ <sup>[11]</sup>),因此本文中  $\varepsilon=0.93$ 。 $\sigma$  为斯忒藩-玻耳

兹曼常数,其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

此外,对流方式产生的热损失为  $Q_c$ ,与风速  $v$  有关<sup>[10]</sup>:

$$Q_c = h_w(T_p - T_a) \quad (5)$$

式中,  $h_w$  为风力传热率,  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 并有  $h_w = 2.8 + 3v^{[10]}$ 。本文假定风速  $v$  为 0, 即热对流所损失能量最小。

因此,从太阳能电池传至热电模块的热流需要修正为

$$Q_H = E_i - E_i \eta_{pv} - E_i \rho - Q_R - Q_C \quad (6)$$

这说明太阳能电池温度不仅与入射太阳辐照、光电转换效率、反射率、辐射散热、对流散热有关,亦与通过太阳能电池向热电模块传导的热流有关。根据珀耳帖效应、焦耳热效应、牛顿传热定律,对于热电模块而言,流进模块的热流满足以下公式<sup>[12]</sup>:

$$Q_H = \alpha I T_h - \frac{1}{2} r I^2 + K(T_h - T_C) \quad (7)$$

式中,  $I$  为热电模块通过的电流,  $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ , 而  $\alpha_p$  和  $\alpha_n$  分别为  $p$  型和  $n$  型半导体的塞贝克系数,  $r$  为热电模块的总电阻:  $r = l_p / (\sigma_p A_p) + l_n / (\sigma_n A_n)$ ,  $K$  为热电模块总热传导系数:  $K = \lambda_p A_p / l_p + \lambda_n A_n / l_n$ , 其中  $\lambda_n, \lambda_p, A_n, A_p, l_n, l_p, \sigma_n$  和  $\sigma_p$  分别为  $n$  型和  $p$  型半导体材料的热导率、横截面积、厚度、电导率。由此可见,流入热电模块的热流、热电模块产生的电流和其冷热端温度是相互关联耦合的。同时,流入热电模块的热流又与太阳辐照和太阳能电池温度等有关,因此复合系统各个模块的能量转换效率其实是相互影响的。

许多文献在研究这类复合系统的性能时未考虑到上述关联特性,常常将各个模块分别进行优化并计算其最优效率,然后简单地将各模块的最优效率相加,得出系统的总效率。例如,在理论计算中,不考虑流入热电模块的热流的有限性,认为热电模块的效率就是其最优效率<sup>[8,9,13]</sup>

$$\eta_w = \frac{T_h - T_C}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT_{avg}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{avg}} + T_C/T_h} \quad (8)$$

其中,  $ZT_{avg}$  为材料的平均热电优值。并由此计算复合系统的总效率,即直接将式(8)代入式(1)。这样的复合系统效率计算方法存在瑕疵,因为计算中所采用的热电模块效率是以流入热电模块的热流不受限制为前提推导出的最优效率。然而,一个工作于真实环境中的复合系统,通过式(6)计算出的热流是有限的,例如,标准测试条件下不可能超过  $1000 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

陈金灿等<sup>[14,15]</sup>在多年前研究热电系统时就发现,热电系统效率不仅取决于其冷热端温度,还与流进和流出系统的电流和热流等因素有关。这说明复合系统的总体效率不能简单地将各个模块的最优效率相加,而需要考虑各模块之间能量流的守恒条件所给出的约束对整个系统的影响,即系统效率受模块间的耦合条件影响。陈金灿等的研究表明,在有限的能流密度下,热电模块的发电功率和效率分别为

$$P_{ic} = K \frac{Z(T_h - T_C)i - [BZ^2(T_h + T_C) + (1 + 2B)Z]i^2}{2B + (1 + BZi)(1 - BZi)} \quad (9)$$

$$\eta_{ic} = \frac{(T_h - T_C)i - [1 + 2B + BZ(T_h + T_C)]i^2}{\frac{1}{2}BZi^3 - (\frac{1}{2} + B + BZT_h)i^2 + T_h i + (T_h + T_C)/Z} \quad (10)$$

其中  $i = Ir/\alpha$ ,  $Z = \alpha^2/(Kr)$ ,  $B = K/K_0$ 。从式(7)可以看出,电流  $I$  与流入热电模块的能流有关,因此热电模块的效率不仅取决于其冷热端温度,更依赖于其可能获得的热流。

因此,光伏-热电复合系统的总发电功率密度为

$$P = E_i \eta_{pv} + P_{ic} \quad (11)$$

总效率为

$$\eta_{tot} = \frac{P}{E_i} = \eta_{pv} + \frac{P_{ic}}{Q_H} \frac{Q_H}{E_i} = \eta_{pv} + \left[ 1 - \eta_{pv} - \rho - \frac{(Q_R + Q_C)}{E_i} \right] \eta_{ic} \quad (12)$$

通常情况下,太阳能电池与热电模块间的热导率有限,因此太阳能电池的温度与热电模块热端温度有所不同。本文为了简化模型,不考虑界面间的热损失,假设  $K_0$  趋于无穷大 ( $B$  趋于零),此时  $T_p = T_h$ , 则可建立复合系统的整体优化模型。系统总的太阳能到电能的转换效率公式为

$$\eta_{tot} = \eta_{pv} + \left[ 1 - \eta_{pv} - \rho - \frac{(Q_R + Q_C)}{E_i} \right] \frac{(T_h - T_C)i - i^2}{-i^2/2 + T_h i + (T_h - T_C)/Z} \quad (13)$$

由此可知,复合系统效率取决于热电模块冷热端温度、太阳能电池温度(此时等于热电模块热端温度)、工作电流(取决于太阳辐照和流入热电模块的能流密度)及材料的本征特性(如热电优值)。复合系统中各个模块的温度分布对系统效率有很大影响。热电模块冷热端温度是一个给定的量,而太阳能电池温度和工作电流不是 2 个独立的变量,由式(6)和式(7)消去其中 1 个,留下一个可以优化的变量。

在上述模型中,假设系统所采用散热器的热导率极大、散热效果极佳,则热电模块冷端温度与散热器温度相同,近似等于环境温度。同时,从文献中可知,目前在室温区间热电性能最佳商业化材料分别是:  $n$  型  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  和  $p$  型  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 。前者电导率、塞贝克系数和热导率分别为  $0.77 \times 10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $-228 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $2.0 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 而后者电导率、塞贝克系数和热导率分别为  $0.32 \times 10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $185 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $1.0 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[16-18]</sup>。将上述数据代入复合系统总效率计算公式,通过整体优化模型式(13),则可以获得总效率与太阳能电池温度的函数关系。以此为基础,本文考查了各类商业化太阳能电池所组成的复合系统的性能。

## 2 结果与讨论

本文集中研究了目前具有代表性的几类太阳能电池:普通单晶硅<sup>[19]</sup>、高效单晶硅<sup>[20]</sup>、冶金级多晶硅<sup>[21]</sup>、氢化非晶硅<sup>[22]</sup>、砷化镓( $\text{GaAs}$ )<sup>[23]</sup>、铜铟镓硒( $\text{CIGS}$ )<sup>[24]</sup>、碲化镉( $\text{CdTe}$ )<sup>[25]</sup>,并对它们的实测效率和温度关系<sup>[19-25]</sup>进行了线性拟合,结果如图 2 所示。同时,它们的效率及效率的绝对温度系数  $\beta$  在表 1 中列出,以便比较。

从图 2 和表 1 可以看出,这几种太阳能电池的温度系数均为负值,即太阳能电池效率随温度上升而下降。不同电池的温度系数的绝对值有所不同,如单晶硅太阳能电池的温度

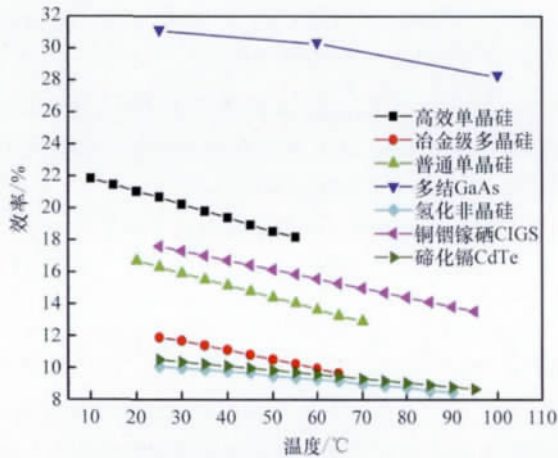


图2 常见商业化太阳能电池效率随温度的变化曲线  
Fig. 2 Temperature dependence of the efficiency of the commercialized solar cells

表1 常见太阳能电池在标准条件下的效率和温度系数

Table 1 Efficiency and temperature coefficient of the solar cells under standard testing conditions

材料	温度系数/ $K^{-1}$	25°C时的效率/%
高效单晶硅	-0.00080	20.7
冶金级多晶硅	-0.00056	11.9
普通单晶硅	-0.00075	16.3
氢化非晶硅	-0.00025	10.1
多结 GaAs	-0.00038	31.2
CIGS	-0.00058	17.6
CdTe	-0.00026	10.5

系数绝对值普遍较高,说明其光电转换效率对温度较敏感;碲化镉与氢化非晶硅太阳能电池的温度系数绝对值较小,其效率受温度上升影响较小。

假设热电模块中 n 和 p 型材料覆盖面积都是太阳能电池的 50%,长度都为 0.01m,利用式(13)计算出复合系统的效率随太阳能电池温度(即热电模块热端温度)变化曲线,如图 3 所示。由于复合系统效率需要高于单一太阳能电池效率才有意义,因此图中不同太阳能电池选取的温度区间有所不同。总体而言,复合系统的效率较单一太阳能电池的效率有所提升。然而,不同太阳能电池所构成的复合系统性能提升的幅度有所不同。以相对效率提升而言:普通单晶硅(0.58%),高效单晶硅(0.41%),冶金级多晶硅(0.88%),氢化非晶硅(1.1%),碲化镉(0.12%),铜铟镓硒(0.51%),碲化镉(1.0%)。可见,较低温度系数的氢化非晶硅和碲化镉太阳能电池可从组成复合系统中获得较大的性能提升。同样具有较低温度系数绝对值(-0.038%/K)的碲化镉太阳能电池,由于具有较高的光电转换效率,组成复合系统后相对效率提升反而远低于具有最高温度系数绝对值(-0.080%/K)的高效单晶硅太阳能电池。这表明要从这一复合系统中获益,太阳能电池不仅需要具有较低温度系数,还需要具有较低效率。

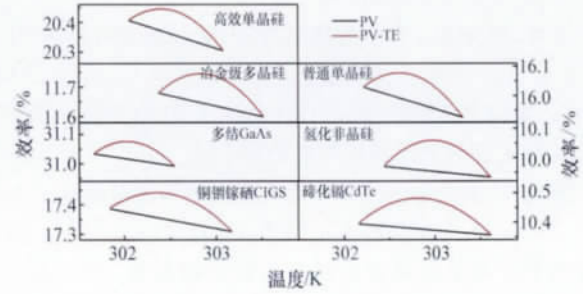


图3 固定热电模块冷端温度为 25°C 时 PV-TE 复合系统效率随光伏电池温度变化曲线

Fig. 3 Efficiency of the hybrid system and PV cell as a function of the temperature of the PV cell, calculated according to the complex model. Here, the temperature of the cold-end of the thermoelectric system is fixed at 25°C

从目前的结果看,复合系统总效率虽然较单一太阳能电池有所提升,不过增加的幅度均不显著。这是由于入射能流密度有限(标准测试条件下为  $1000W \cdot m^{-2}$ ),导致能够进入热电模块的热流密度较低,同时受限于器件几何尺寸(如半导体元件的长度较小,仅 0.01m)和物理特性(如热电模块热导率较高),热电模块冷热端温差只能处于一个较小的区间内(多数仅有 1~2K),从而影响了复合系统总体效率的提升。根据理论分析,TE 冷热端温差越大,其发电效率越高,因此基于现有材料采用恰当的集热设计:减小热电模块中半导体材料的横截面积<sup>[6]</sup>,增加热电模块中半导体材料的厚度,有助于增加热电模块冷热端温差。

以 CdTe 太阳能电池为例进行一些探讨。当固定热电模块 n 和 p 型半导体材料横截面积均为 50%和入射太阳辐照为 AM1.5 时,复合系统的有效工作温度区间会随着半导体材料厚度的增加而增加,如图 4(a)所示。虽然复合系统绝对效率增加不显著,但是相对效率提升有所增加,这主要是由于单一太阳能电池的效率随着温度上升而下降。值得注意的是,若半导体材料厚度超过特定值后,复合系统的效率反而会减低。

固定热电模块中半导体材料的厚度(0.01m)和入射太阳辐照(AM1.5),复合系统的效率随半导体材料横截面积  $A_n$  变化的曲线,如图 4(b)所示。复合系统中太阳能电池(即热电模块高温端)的温度与半导体材料横截面积呈现双曲线变化的关系,即温度随横截面积的减小而增加。虽然此时通过半导体的热流也随之增大,但复合系统的效率并没有提升太多,甚至还降低了。这主要是由于此计算模型是一维模型,其中太阳能电池的温度始终与热电模块热端温度一致,使得热电模块的效率提升无法补偿太阳能电池效率因温度升高而导致的下降。实际情况中,温度将在热电与太阳能电池界面上呈现二维分布。若能构建复合系统的二维模型,能够更好地模拟器件真实工作状态,有可能获得较高的复合系统效率。

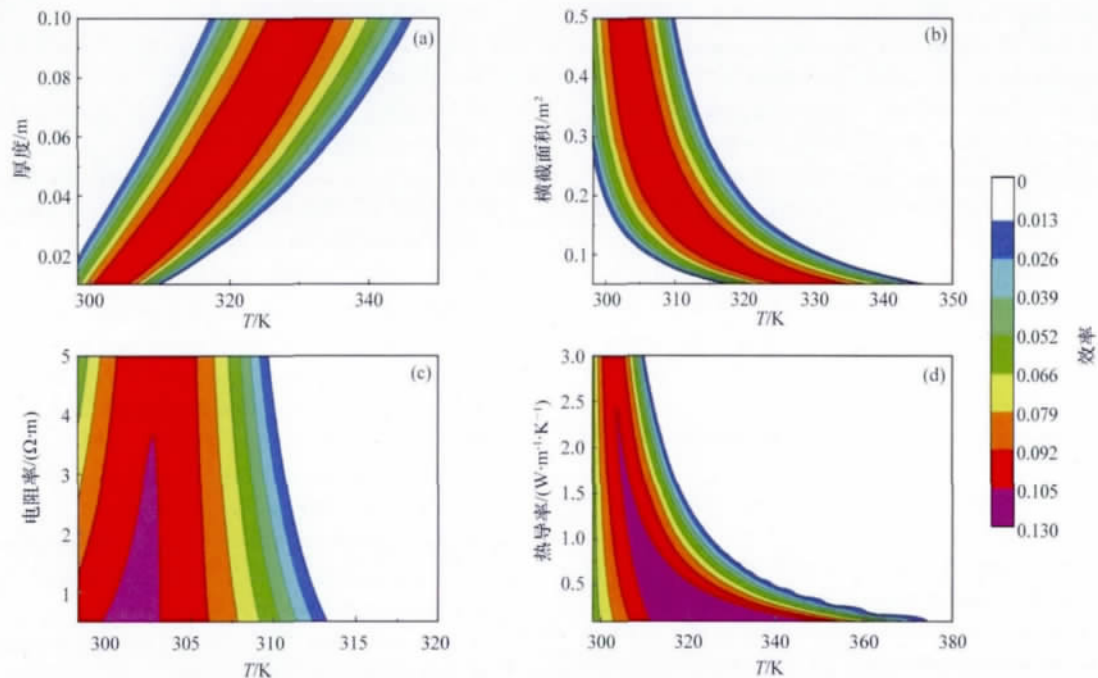


图4 基于CdTe太阳能电池的复合系统效率随热电模块中半导体材料的厚度(a)、横截面积(b)、电阻率(c)和热导率(d)参数的变化

Fig. 4 Efficiency of hybrid system (CdTe PV cell+TE module) as a function of various parameters of the TE module (i.e., thickness(a), cross section(b), electric resistivity(c) and thermal conductivity(d))

进一步的理论计算正在进行中,将在后续文章中讨论。

由上述讨论可知,改变热电系统的几何尺寸(即热电模块中半导体材料的厚度 $l_p$ 、 $l_n$ 及横截面积 $A_p$ 、 $A_n$ )来实现复合系统效率的提升并不理想,如图4(a)和图4(b)所示。而半导体材料的物理特性,如电阻率或者热导率,对复合系统的效率影响更大。如图4(c)所示,当固定热电模块中半导体材料的几何尺寸、总热导率、复合系统的效率随着材料电阻率的减小而增加时,其效率甚至可以超过单一CdTe太阳能电池在25℃的效率。而固定热电模块中半导体材料的电阻率和几何尺寸、复合系统的效率也会随着材料热导率的减小而大幅度的提升,如图4(d)所示。因此,要提升复合系统的性能,还需要对相关材料(特别是热电材料)进行更为深入细致的研究,以期提高其导电率和塞贝克系数,降低其热导率。

### 3 结论

综上所述,本文通过分析太阳能和热电模块复合系统的热力学特性,构建了包含反射、辐射和对流等热损耗的理论模型。根据各模块间的耦合特点,建立了复合系统的整体优化模型,并研究了几类商业化太阳能电池和热电材料所构成的复合系统。虽然多数复合系统的最优性能未能超过标准状态下单一太阳能电池的性能,然而在一定的温度区间内复合系统有效利用太阳能电池所不能利用的热能提高了太阳能到电能的总体转换效率以及系统的输出功率,减小了复合系统对温度的敏感性,这有助于保持太阳能发电系统(不同季

节/不同时间段)的稳定性。对比模型计算结果发现,具有低温系数和低效率的太阳能电池,如非晶硅和碲化镉太阳能电池,可从复合系统中获得较大的性能提升。本文中建立的整体优化模型考虑了各模块作为一个统一体时其总效率与能流、电流、材料本征特性间的关联,较其他文献所用的简单分别优化模型更加符合实际器件工作情况。而改变热电模块的几何尺寸(如覆盖面积、厚度等),提高热电材料的物理特性(如导电率、导热率、热电优值等),都有利于提高复合系统性能。这些结果和模型可为复合系统的设计与优化提供指导。

### 参考文献 (References)

- [1] Charalambous P G, Maidment G G, Kalogirou S A, et al. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2-3): 275-286.
- [2] Guiavarch A, Peuportier B. Photovoltaic collectors efficiency according to their integration in buildings [J]. Solar Energy, 2006, 80(1): 65-77.
- [3] Kern E C Jr, Russell M C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems [C]//The 13th IEEE photovoltaic specialists conference. Washington DC, USA, June 5-8, 1978: 1153-1157.
- [4] Huang B J, Lin T H, Hung W C, et al. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems [J]. Solar Energy, 2001, 70(5): 443-448.
- [5] Snyder G J, Toberer E S. Complex thermoelectric materials [J]. Nature Materials, 2008(7): 105-114.
- [6] Kraemer D, Poudel B, Feng H P, et al. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration [J]. Nature Materials, 2011(10): 532-538.
- [7] Zheng J C. Recent advances on thermoelectric materials [J]. Frontiers of

- Physics in China, 2008, 3(3): 269-279.
- [8] van Sark W G J H M. Feasibility of photovoltaic-thermoelectric hybrid modules[J]. Applied Energy, 2011, 88(8): 2785-2790.
- [9] Yang D J, Yin H M. Energy conversion efficiency of a novel hybrid solar system for photovoltaic, thermoelectric, and heat utilization [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 662-670.
- [10] 罗斌, 代彦军. 太阳能半导体冰箱的性能分析[J]. 制冷学报, 2006, 27(5): 7-10.  
Luo Bin, Dai Yanjun. Journal of Refrigeration, 2006, 27(5): 7-10.
- [11] Cole-Parmer Inc. Emissivity of specific material[EB/OL]. [2006-08-25]. <http://www.coleparmer.com/TechLibraryArticle/254#anchor52>.
- [12] 陈金灿, 严子浚. 半导体温差发电器性能的优化分析[J]. 半导体学报, 1994, 15(2): 123-129.  
Chen Jincan, Yan Zijun. Chinese Journal of Semiconductors, 1994, 15(2): 123-129.
- [13] Rowe D M, CRC handbook of thermoelectrics[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.
- [14] Chen J. Thermodynamic analysis of a solar-driven thermoelectric generator[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(5): 2717-2721.
- [15] Chen X, Pan Y, Chen J. Performance and evaluation of a fuel cell-thermoelectric generator hybrid system [J]. Fuel Cells, 2010, 10(6): 1164-1170.
- [16] Zou H, Rowe D M, Min G. Growth of p-and n-type bismuth telluride thin films by co-evaporation [J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 222(1-2): 82-87.
- [17] Dirmyer M R, Martin J, Nolas G S, et al. Thermal and electrical conductivity of size-tuned bismuth telluride nanoparticles [J]. Small, 2009, 5(8): 933-937.
- [18] Wang W Z, Yan X, Poudel B, et al. Chemical synthesis of anisotropic nanocrystalline  $Sb_2Te_3$  and low thermal conductivity of the compacted dense bulk [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2008, 8(1): 452-456.
- [19] 金井升, 舒碧芬, 沈辉, 等. 单晶硅太阳能电池的温度和光强特性[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 498-502.  
Jin Jingsheng, Shu Bifen, Shen Hui, et al. Materials Research and Application, 2008, 2(4): 498-502.
- [20] 秦红, 沈辉, 张仁元, 等. 温度对太阳能电池效率的影响及改善方法分析[C]//第八届全国光伏会议暨中日光伏论坛论文集. 深圳: 中国太阳能学会, 2004: 603-607.  
Qin Hong, Shen Hui, Zhang Renyuan, et al. The analysis and amended measures of efficiency of solar cell influence by temperature [C]//The National Solar Conference and Proceedings of the Japan Photovoltaic Forum. Shenzhen: Chinese Solar Energy Society, 2004: 603-607.
- [21] 贺炜, 郭爱娟, 孟凡英, 等. 温度对多晶硅太阳能电池性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(4): 454-457.  
He Wei, Guo Aijuan, Meng Fanying, et al. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(4): 454-457.
- [22] Keppner H, Meier J, Fischer D, et al. Microcrystalline silicon and micromorph tandem solar cells [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1999, 69(2): 169-177.
- [23] 王艳, 康志龙, 刘赫, 等. 光强和温度对多结太阳能电池的影响研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(5): 57-59.  
Wang Yan, Kang Zhilong, Liu He, et al. Electronic Design Engineering, 2011, 19(5): 57-59.
- [24] Pudov A O. Impact of secondary barriers on  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  solar-cell operation[D]. Fort Collins, CO: Colorado State University, 2005.
- [25] Mohring H D, Stellbogen D. Annual energy harvest of PV systems-advantages and drawbacks of different PV technologies [C]//The 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, September 1-5, 2008: 2781-2785.

(责任编辑 侯澄芝)

## ·学术动态·



## 2013 年度中国科协三峡科技出版资助计划开始申报

2013 年 6 月 20 日,中国科协办公厅发布“关于申报 2013 年度中国科协三峡科技出版资助计划的通知”。

申报中国科协三峡科技出版资助计划的基本条件:中文版原创科技著作、中文版翻译科技著作;中文版原创作品须已完成初稿,中文版翻译著作须提供原著及不少于原著 1/3 的译稿;科技著作版面字数原则上不得超过 300 千字,且内容遵守《中华人民共和国著作权法》及相关法律法规。

申报截止日期:2013 年 10 月 15 日。

联系人:郭秋霞,高立波,赵晖

电话:010-62103166,62103126

传真:010-62103166

电子邮箱:kxsxcb@cast.org.cn

通信地址:100081,北京海淀区中关村南大街 16 号中国科学技术出版社西 704 房间

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/14802474.html>。