

菲涅耳聚光下半导体温差发电组件性能研究

许强强 季旭 李明 刘佳星 李海丽

Performances of thermoelectric module under solar Fresnel concentration

Xu Qiang-Qiang Ji Xu Li Ming Liu Jia-Xing Li Hai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 237201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.237201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.237201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Mn 掺杂后三元黄铜矿结构半导体 CuInTe_2 的缺陷特征与热电性能

Defects and thermoelectric performance of ternary chalcopyrite CuInTe_2 -based semiconductors doped with Mn

物理学报.2016, 65(6): 067201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.067201>

含硫宽禁带 Ga_2Te_3 基热电半导体的声电输运特性

Acoustic charge transport behaviors of sulfur-doped wide gap Ga_2Te_3 -based semiconductors

物理学报.2015, 64(19): 197201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.197201>

高压烧结法制备 Bi_2Te_3 纳米晶块体热电性能的研究

Thermoelectric properties of the Bi_2Te_3 nanocrystalline bulk alloy pressed by the high-pressure sintering

物理学报.2015, 64(4): 047201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.047201>

半导体温差发电过程的模型分析与数值仿真

Analysis and simulation of semiconductor thermoelectric power generation process

物理学报.2014, 63(19): 197201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.197201>

非等电子 Sb 替换 Cu 和 Te 后黄铜矿结构半导体 $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Te}_9$ 的热电性能

Thermoelectric properties of chalcopyrite $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Te}_9$ with Sb non-isoelectronic substitution for Cu and Te

物理学报.2014, 63(5): 057201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.057201>

菲涅耳聚光下半导体温差发电组件性能研究*

许强强 季旭† 李明 刘佳星 李海丽

(云南师范大学能源与环境科学学院, 教育部可再生能源材料制备与先进技术重点实验室, 昆明 650500)

(2016年5月19日收到; 2016年8月29日收到修改稿)

采用菲涅耳透镜汇聚太阳辐射, 提高半导体温差发电组件的热端温度, 冷端利用散热片进行散热. 从热流密度的角度建立了半导体温差发电片理论分析模型, 实验基于稳态的条件下, 忽略冷热端之间以及电臂间的空气对流和辐射, 研究菲涅耳聚光下半导体温差发电组件的性能, 推导出了半导体温差发电片的温度梯度 dT/dx 关系式, 获得了输出电流、输出功率及热电转换效率的表达式. 研究表明: 随着电阻比率 $a(R_L/R)$ 的增大, 半导体温差发电器件的输出电流 I 减小, 输出功率 P 和转换效率 η_{he} 先增大后减小, 且在 $a = 1$ 时, 其输出功率和转换效率最高. 随着温差比率 $b(\Delta T/T_{\text{H2}})$ 的增大, 无论 a 取何值, 其输出功率 P 和转换效率 η_{he} 均增大. 实验研究中, 半导体温差发电片应偏离菲涅耳透镜焦平面一定距离以获得较好输出特性. 通过温差发电片的不同串并联组件可获得相应输出电压.

关键词: 菲涅耳聚光, 温差发电组件, 转换效率, 输出特性

PACS: 72.15.Jf, 73.50.Lw, 88.05.Bc

DOI: 10.7498/aps.65.237201

1 引言

Seebeck效应是由于两种不同电导体或半导体的温度差异而引起两种物质间电压差的热电现象. 随着半导体制备技术的发展, 半导体温差发电受到了研究者的关注^[1-3], 然而转换效率低和输出功率不高是制约半导体温差发电技术广泛应用的重要问题. 对此, 研究者一方面通过研发及优化新型半导体热电材料来提高其转换效率. 蒋明波等^[4]改进了 Bi_2Te_3 基热电材料, 其功率因子在室温附近可达到最大值 $4.7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$. Amatya 和 Ram^[5] 在抛物面聚光下, 利用新型热电材料 N 型 $(\text{InGaAs})_{1-x}(\text{InAlAs})_x$ 和 P 型 $(\text{AgSbTe})_x(\text{PbSnTe})_{1-x}$, 获得的热电转换效率比传统的 Bi_2Te_3 基热电材料^[6-9] 高 2.6%. Yang 等^[10] 分析了 Mg_2Si 纳米结构复合材料的热电性能, 认为纳米结构有助于降低热导率和增加 Seebeck 系数, 从而改进热电性能. 另一方面, 提高半导体温差片冷热端温差也能显著提高转换效率.

在 AM1.5 辐射条件下, 现有的热电材料在有限的尺寸实现较大的温差是非常困难的, 常采用聚光的方法增大辐射能流来实现温差片热端的较高温度. Li 等^[11] 和赵在理等^[12] 通过利用聚光器件对太阳能进行高效地热电转换. Kraemer 等^[13] 将半导体温差发电器的冷端限制在 20°C 左右, 采用太阳能集热法实现较大温差, 其太阳能集热温差发电器的峰值转换效率达到 4.6%.

单个温差发电片的输出功率较低, 将多个温差发电片串并联连接而成组件, 可获得需要的输出电压及输出功率. Wang 等^[14] 搭建了多级温差发电机串并联模型, 利用 Newton-Raphson 数值算法得到了三种连接方式的输出特性. Liang 等^[15] 建立了多个冷源和热源条件下并联连接的半导体温差发电机模型, 分析了接触效应对输出特性的影响. 研究者还对散热外场优化^[16,17]、最佳热电单元参数求解^[18] 以及系统优化^[19] 进行了大量工作, 为温差发电器件的设计和应用提供了理论依据.

本文建立了菲涅耳聚光下半导体温差发电机

* 国家自然科学基金 (批准号: 51106134) 和 2014 年国家级大学生创新创业训练计划 (批准号: 201410681005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jixu@ynnu.edu.cn

件的分析模型,从热流密度的角度,研究了给定条件下电阻比率 a 、温差比率 b 对半导体温差片电输出特性及转换效率的影响.搭建了菲涅耳聚光下半导体温差发电组件实验装置,实验探讨了不同连接方式下温差发电组件的输出特性.

2 理论模型

2.1 菲涅耳聚光下半导体温差发电装置

如图1所示,单个基于菲涅耳聚光的半导体温差发电装置由菲涅耳透镜、半导体温差发电片和散热片等组成.半导体温差片冷端与散热片采用导热胶黏接,置于环境温度中;利用菲涅耳透镜汇聚太阳辐射,热端置于菲涅耳聚光光斑照射下,温差片两端的温差将导致电动势产生.多组菲涅耳聚光半导体温差发电装置通过适当的连接构成组件.

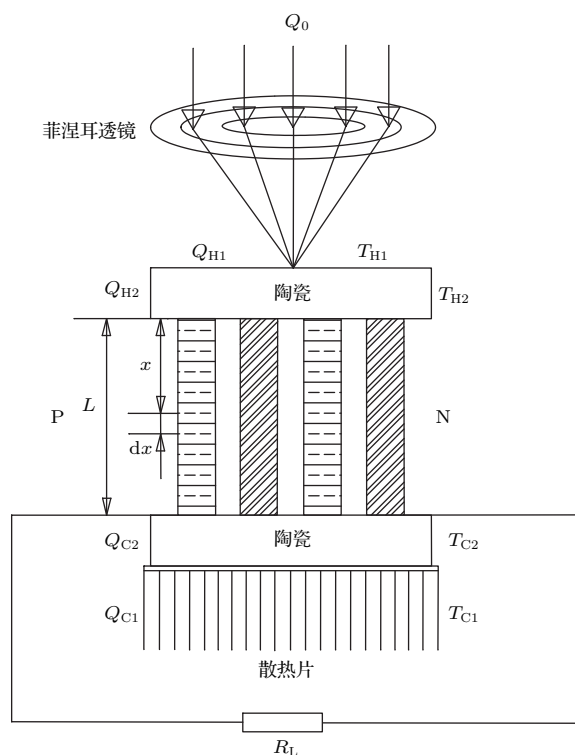


图1 基于菲涅耳聚光的半导体温差发电装置模型
Fig. 1. Fresnel concentrating based semiconductor thermoelectric generator.

2.2 菲涅耳聚光器

菲涅耳透镜是装置的聚光器件,聚光效率 η 是描述其性能的重要指标,可表示为

$$\eta = \frac{E_1}{E_0} = \frac{C_o}{C_g} = \frac{C_o S_{out}}{S_{in}}, \quad (1)$$

式中, E_0 为入射到菲涅耳透镜表面的光能量; E_1 为透射过菲涅耳透镜的总能量; C_g 为几何聚光比; C_o 为光学聚光比; S_{in} 为输入面的面积; S_{out} 为输出面的面积.

菲涅耳透镜在焦点处的几何聚光比最大,相应的聚光效率却有所降低.这是由于焦点处的光斑面积较小,即输出面的面积较小,根据(1)式可知,在 S_{in} 一定的条件下, S_{out} 越小,几何聚光比 C_g 越大, C_o 越大,聚光效率相应有所降低.本文采用的半导体温差发电片的外形尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,其所接收的最大光斑的面积是直径为 40 mm 的圆.在菲涅耳透镜的焦平面,半导体温差发电片所接收的光斑面积是直径为 $12\text{--}15 \text{ mm}$ 的圆,此时光斑均匀度较差,造成热端温度的不均匀,使得热损失较大,并且局部的高温易损坏半导体温差发电片;在长时间实验过程中,半导体温差发电片应偏离焦平面一定距离.

2.3 温差发电片的温度梯度

半导体温差发电的原理是建立在两种不同的半导体材料组成的热电偶在有温度差的条件下所产生的Seebeck效应,其可以近似表述为

$$E_{AB} = \alpha \Delta T, \quad (2)$$

式中, E_{AB} 为热电动势, α 是Seebeck系数, ΔT 为热端与冷端之间的温差.

假定半导体温差发电片的热端温度为 T_{H2} ,冷端温度为 T_{C2} ,其内部P型热电偶和N型热电偶所对应的电阻率为 ρ_1, ρ_2 ,导热系数为 λ_1, λ_2 ,且Seebeck系数 α 不随温度的变化而变化.

由于半导体温差发电片工作时情况较为复杂,包括有多种热电效应^[20,21]、热传导、对流和辐射,同时半导体热电材料具有温度特性^[22,23],如Seebeck系数 α ,电阻率 ρ 都是温度的函数.基于以上讨论,为简化问题,在建立菲涅耳聚光下半导体温差发电模型时做出以下假设:1)稳态条件下,热端提供稳定的热量;2)Seebeck系数不变,不考虑汤姆逊的影响;3)忽略冷热端之间以及电臂之间的空气对流和辐射;4)导热只沿着电臂的臂长方向传递,且导热系数不随电臂的长度而发生改变.

在以上条件的基础之上,取微元段 dx ,其所对应的横截面的面积为 A ,在稳态情况下,单位截面积进入微元段的热流密度、流出微元段的热流密度

以及所产生的焦耳热之间的热平衡关系式为

$$q_{\text{in}} + q_j = q_{\text{out}}, \quad (3)$$

由傅里叶导热定律可知:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} q_{\text{in}} = -\lambda \frac{dT}{dx}, \\ q_{\text{out}} = -\lambda \left[\frac{dT}{dx} + \left(\frac{d}{dx} \right) \left(\frac{dT}{dx} \right) dx \right], \end{cases} \quad (5)$$

而

$$q_j = \frac{I^2 R dx}{A} = \frac{I^2 \left(\rho \frac{dx}{A} \right)}{A} = J^2 \rho dx. \quad (6)$$

由图 1 可知

$$q_{\text{H12}} = \frac{\lambda' (T_{\text{H1}} - T_{\text{H2}})}{\delta}, \quad (7)$$

式中, λ 为热电偶的导热系数, λ' 为陶瓷片的导热系数, δ 为陶瓷片的厚度, I 为通过的电流, R_{dx} 为电阻, J 为单位横截面积通过的电流, 即 $J = I/A$. 联立 (3) 式—(6) 式, 化简可得

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + J^2 \rho = 0. \quad (8)$$

边界条件: 当 $x = 0$ 时, $T = T_{\text{H2}}$; 当 $x = l$ 时, $T = T_{\text{C2}}$.

温度分布关系为

$$\begin{aligned} T = & \left[T_{\text{H2}} - \left(\frac{x}{l} \right) (T_{\text{H2}} - T_{\text{C2}}) \right] \\ & + \left(\frac{J^2 \rho}{2\lambda} \right) x(l-x), \end{aligned} \quad (9)$$

温度梯度关系式为

$$\frac{dT}{dx} = -\left(\frac{T_{\text{H2}} - T_{\text{C2}}}{l} \right) + \left(\frac{J^2 \rho}{2\lambda} \right) (l-2x). \quad (10)$$

2.4 输出电流及输出功率

根据以上半导体温差发电装置模型, 讨论菲涅耳聚光下半导体温差发电组件的性能, 需得出半导体温差发电组件的两个重要参数. 由傅里叶导热定律可知

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (11)$$

将 (10) 式代入 (11) 式可得出对应的热端和冷端热流量的表达式, 即

$$\begin{aligned} \Phi_{\lambda\text{H}} &= -\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} \\ &= \frac{\lambda A}{l} \Delta T - \frac{J^2 \rho A l}{2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\lambda\text{C}} &= -\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=l} \\ &= \frac{\lambda A}{l} \Delta T + \frac{J^2 \rho A l}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

由于电流通过热电偶时, 会产生 Peltier 效应 [24,25], 热端有 Peltier 效应吸入, 冷端有 Peltier 效应放出. Peltier 效应可表示为

$$QP = \pi I = \alpha IT, \quad (13)$$

热端、冷端达到热平衡时有:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{H}} = Q_{\text{PH}} + \Phi_{\lambda\text{HP}} + \Phi_{\lambda\text{HN}}, \\ \Phi_{\text{C}} = Q_{\text{PC}} + \Phi_{\lambda\text{CP}} + \Phi_{\lambda\text{CN}}, \end{cases} \quad (14)$$

式中, π 为 Peltier 系数, T 为相应结点的温度, Φ_{H} 为热端总的所加热的热流量, Φ_{C} 为冷端总的所放出的热流量, Q_{PH} 为热端 Peltier 效应吸入的热量, Q_{PC} 为冷端 Peltier 效应放出的热量, $\Phi_{\lambda\text{H}}$ 为热端导热热流量, $\Phi_{\lambda\text{C}}$ 为冷端导热热流量 (P, N 分别为 P 型热电偶和 N 型热电偶). 联立 (12) 式—(14) 式, 可得:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{H}} &= \alpha IT_{\text{H2}} + \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right) \Delta T \\ &\quad - \frac{I^2}{2} \left(\rho_1 \frac{l_1}{A_1} + \rho_2 \frac{l_2}{A_2} \right), \\ \Phi_{\text{C}} &= \alpha IT_{\text{C2}} + \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right) \Delta T \\ &\quad - \frac{I^2}{2} \left(\rho_1 \frac{l_1}{A_1} + \rho_2 \frac{l_2}{A_2} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

又

$$\begin{aligned} P &= \Phi_{\text{H}} - \Phi_{\text{C}} \\ &= \alpha I (T_{\text{H2}} - T_{\text{C2}}) - I^2 \left(\rho_1 \frac{l_1}{A_1} + \rho_2 \frac{l_2}{A_2} \right), \\ P &= I^2 R_{\text{L}}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} R &= \rho_1 \frac{l_1}{A_1} + \rho_2 \frac{l_2}{A_2}, \\ \lambda &= \lambda_1 \frac{A_1}{l_1} + \lambda_2 \frac{A_2}{l_2}, \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $A_1 = A_2 = A$, $l_1 = l_2 = l$, R_{L} 为负载电阻, R 为内阻, P 为系统的输出功率. 联立 (16) 式和 (17) 式可得, 回路的输出电流为

$$I = \frac{\alpha (T_{\text{H}} - T_{\text{C}})}{R + R_{\text{L}}} = \frac{\alpha \Delta T}{R + R_{\text{L}}}, \quad (18)$$

系统的输出功率为

$$P = \frac{R_{\text{L}} \alpha^2 (\Delta T)^2}{(R + R_{\text{L}})^2}. \quad (19)$$

2.5 温差发电组件的热电转换效率

为了获得最大的热电转换效率, 须使菲涅耳聚光下半导体温差发电组件的输出功率达到最优. 由上述分析可知, 热端的加热热流量为

$$\Phi_H = \frac{\alpha^2 \Delta T T_{H2}}{R + R_L} + \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right) \Delta T - \frac{R \alpha^2 \Delta T^2}{2(R + R_L)^2}, \quad (20)$$

又

$$P = \frac{R_L \alpha^2 (\Delta T)^2}{(R + R_L)^2},$$

温差发电组件的热电转换效率为

$$\eta_{he} = \frac{P}{\Phi_H} = \Delta T R_L \times \left[T_{H2}(R + R_L) + \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right) (R + R_L)^2 - \frac{\Delta T R}{2} \right]^{-1}. \quad (21)$$

用参数 a 来表示负载电阻与内阻间的电阻比率, 参数 b 表示半导体温差发电片热、冷两端的温差与热端温度间的温差比率. 即 $a = R_L/R$, $b = \Delta T/T_{H2}$, 则有

$$\eta_{he} = \frac{ab}{(1+a) + \frac{\left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right) (1+a)^2}{\alpha^2 T_{H2}} - \frac{b}{2}}, \quad (22)$$

$$\eta_{he} = \frac{ab}{(1+a) + \frac{(1+a)^2}{Z T_{H2}} - \frac{b}{2}}, \quad (23)$$

式中,

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right)},$$

则半导体温差发电器件的优值系数为

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{R \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right)}.$$

由于 $\lambda = \lambda_1 A_1/l_1 + \lambda_2 A_2/l_2$, 所以, $ZT = \alpha^2 T/(\lambda R)$. 其中, $T = T_{H2}$. 显然, 当热电材料性能不变时, 输出功率和热电转换效率都随 a 的变化而变化; 分别令 $dP/da = 0$, $d\eta_{he}/da = 0$, 可以得到 $a = 1$, 即负载电阻与发电器件本身的内阻相

匹配时, 可获得最大输出功率 $P_{\max}$:

$$P_{\max} = \frac{\alpha^2 (\Delta T)^2}{4R}, \quad (24)$$

则最大热电转换效率为

$$\eta_{hem} = \frac{b}{2 + \frac{4}{Z T_{H2}} - \frac{b}{2}}. \quad (25)$$

3 实验系统

实验系统由菲涅耳透镜、黏合散热片的温差发电片、辐射仪、红外测温仪和数据采集仪组成. 其中, 菲涅耳透镜的尺寸为 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 其焦距为 131 mm , 环距为 0.3 mm , 厚度为 2 mm , 透光性可达 93% ; 半导体温差发电片的型号为 TEP1-1264, 其外形尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$, 热端可承受 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温, 内部置有 126 对串联半导体热电偶, 每个半导体温差发电片内阻为 $3.4 \text{ } \Omega$, Seebeck 系数为 $3.75 \times 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$, 导热系数为 $0.5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$; 辐射仪为华控兴业所生产的 HSTL-ZFSQ 系列, 其感应元件的直径为 50 mm , 底座直径为 135 mm ; 红外测温仪的型号为 UV380, 其温度测量范围为 $-32 \text{ }^\circ\text{C} \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$; 而数据采集仪为锦州阳光气象科技有限公司生产的 TRM-2 太阳能热水器测试主机.

由于半导体温差发电片的热端可承受的温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 而实验的环境温度为 $300 \text{ K} (27 \text{ }^\circ\text{C})$ 左右. 根据 (15) 式可知:

$$\begin{aligned} \Phi_H &= \alpha I T_{H2} + \left(\frac{\lambda_1 A_1}{l_1} + \frac{\lambda_2 A_2}{l_2} \right) \Delta T \\ &\quad - \frac{I^2}{2} \left(\rho_1 \frac{l_1}{A_1} + \rho_2 \frac{l_2}{A_2} \right) \\ &= \alpha I T_{H2} + \lambda \Delta T - \frac{I^2}{2} R, \\ &\quad \begin{cases} \eta = \frac{E_1}{E_0} = \frac{C_o}{C_g} = \frac{C_o S_{out}}{S_{in}}, \\ E_1 = \Phi_H, \\ C_o = \frac{E_{out}}{E_{in}}, \end{cases} \\ &\Rightarrow S_{in} = \frac{C_o S_{out} E_0}{\Phi_H} = \frac{E_{out} S_{out} E_0}{\Phi_H E_{in}}, \end{aligned}$$

式中, E_{in} 为输入面平均辐照度; E_{out} 为输出面平均辐照度; 二者和 E_0 可用仪器测出, 只要确定半导体温差发电片的尺寸, 便可以从理论上计算出菲涅耳透镜的尺寸.

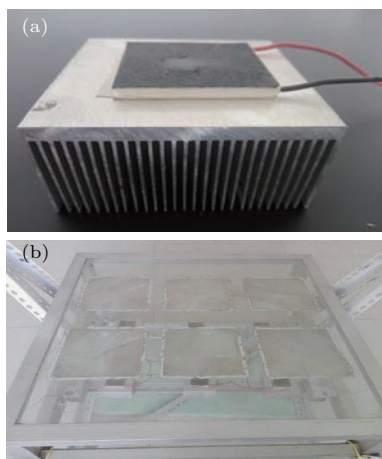


图2 实验装置图 (a)黏合散热片的温差发电片;(b)菲涅耳聚光下温差发电组件

Fig. 2. (a) Single thermoelectric generator with heat sink; (b) the thermoelectric module under solar Fresnel concentration.

4 分析与讨论

4.1 菲涅耳聚光对半导体温差片热端温度的影响

实验中利用菲涅耳透镜对太阳辐射进行汇聚,聚光前后温差片热端的温升曲线如图3所示.图中,利用菲涅耳透镜聚光后,半导体温差片的热端温度得到了较大的提高,且在13时左右,半导体温差片的热端温度最高.

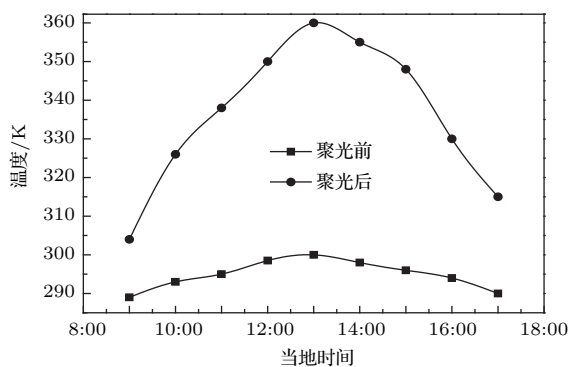


图3 聚光后温升曲线

Fig. 3. Hot-end temperature curve after the Fresnel condensing.

4.2 菲涅耳聚光下温差发电组件不同连接方式的输出特性

将半导体温差发电阵列分成不同的组合(一个温差发电阵列由6个温差片和6个菲涅耳透镜构成),研究菲涅耳聚光下不同连接方式的温差发电组件的输出特性.从图4和图5可以看出,在焦距

变化范围内,光照强度一定时,随着焦距的增加,半导体温差发电片的输出电压和输出电流都是先增大后减小,在焦距为131 mm时,其输出电压和输出电流达到最大值.由于选取的菲涅耳透镜的直径为200 mm,厚度为2 mm,焦距为131 mm,也就是说,温差片在菲涅耳透镜焦点处时,其输出特性最好,但在焦点处的时间不宜过长.

图6所示的是不同连接方式下温差发电组件的输出特性.由图可知,[2, 1],[2, 2],[2, 3]及[3, 1],[3, 2]的电压几乎不变,且[3, 1],[3, 2]的电压约为[2, 1],[2, 2],[2, 3]电压的1.5倍;[2, 1],[2, 2],[2, 3]的电流变化曲线与[3, 1],[3, 2]的变化几乎重合,可见,这两种组合下的电流变化趋势相同.其中,[2, 1]表示两个半导体温差片串联成一行;[2, 2]表示有两行[2, 1],且行与行之间为并联,后面以此类推.

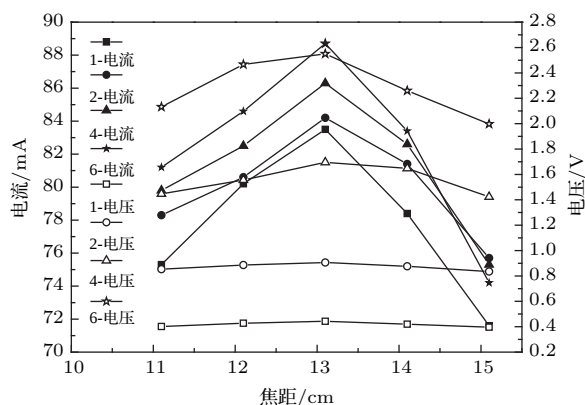


图4 温差片串联时焦距对电输出特性的影响

Fig. 4. Effect of focal length on the electrical output characteristics when the thermoelectric power generation sheet series.

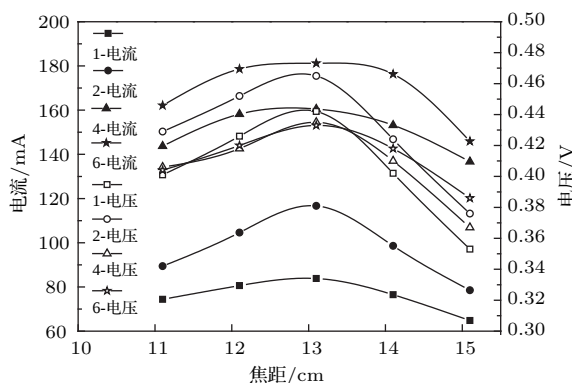


图5 温差片并联时焦距对电输出特性的影响

Fig. 5. Effect of focal length on the electrical output characteristics when the thermoelectric power generation in parallel sheet.

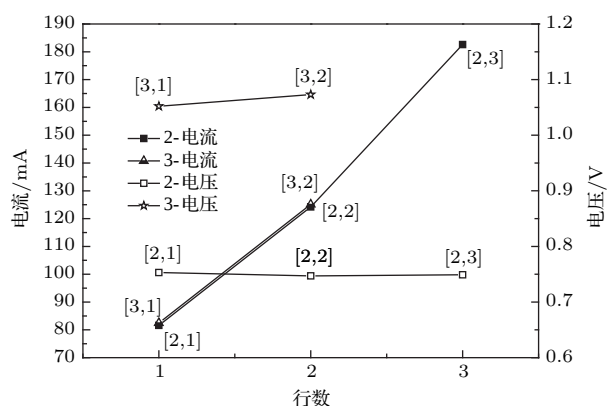


图6 不同连接的温差发电组件的电输出特性

Fig. 6. Electrical output characteristics of thermoelectric module with different connection.

4.3 参数 a , b 对输出特性及转换效率的影响

实验采用TEP1-1264型半导体温差发电片. 在冷端温度为300 K左右时, 在允许的温度范围内, 热端温度依次为320, 340, 360, 380, 400 K. 根据半导体温差发电器件的结构参数及所测量的数据, 依据推导公式进行分析.

由(18)式可知,

$$I = \frac{\alpha(T_H - T_C)}{R + R_L} = \frac{\alpha\Delta T}{R + R_L} = \frac{\alpha\Delta T}{R(1 + a)}.$$

图7给出了 T 不同时, 电阻比率 a 对输出电流 I 的影响. 可以看出, 在热电材料结构参数一定的情况下, 输出电流 I 随着 a 的增大而变小, 也就是说, 要想增大输出电流, 就必须使负载电阻小于热电材料的内阻, 即 $R_L < R$. 同时, 在电阻比率 a 一定的情况下, 温差越大, 其输出电流也就越大.

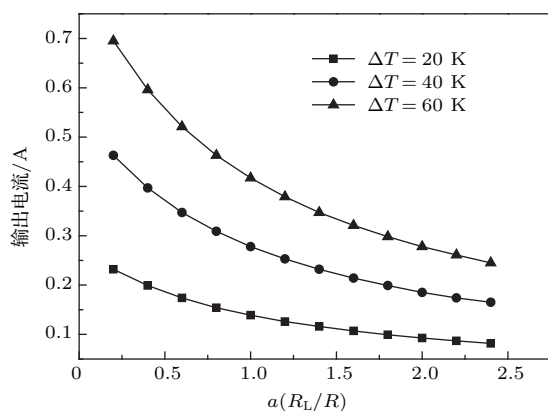

 图7 不同热端温度下电阻比率 a 与输出电流的关系曲线

 Fig. 7. The curves are between a and Output current with different hot-end temperature.

由(19)式可知,

$$P = \frac{R_L \alpha^2 (\Delta T)^2}{(R + R_L)^2} = \frac{a \alpha^2 (\Delta T)^2}{(1 + a)^2 R}.$$

图8是不同温差下电阻比率 a 对输出功率的影响. 随着 a 的增大, 输出功率先增大后减小, 在 a 等于1时, 其输出功率达到最大值. 当 a 较小时, 输出功率随着 a 的增大而迅速增大, 当 a 的值较大时, 输出功率随着 a 的增大而缓慢减小. 在实际的应用中, 外部负载电阻很难与半导体温差发电器件的内阻相匹配, 可使外部的负载电阻略大于温差发电器件的内阻. 由于 a 略大于1的时候, 输出功率变化不大, 可获得相应的较大输出功率. 对于在给定 a 值的情况下, 随着 ΔT 的变化, 输出功率的波动范围比较大. 因此, 通过合理增大温差发电器件冷热端的温差, 可获得所需的输出功率.

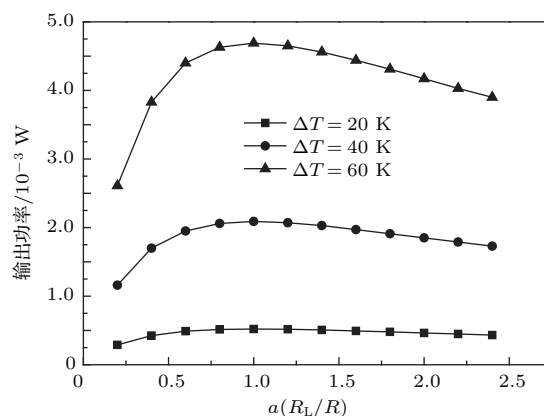

 图8 不同热端温度下电阻比率 a 与输出功率的关系

 Fig. 8. Relation between output power and resistance ratio a with different hot-end temperature.

图9给出了温差比率 b 与输出功率之间的关系. 可以看出, 无论 a 取何值, 随着 b ($b < 1$) 的增大, 其对应的输出功率均增大. 验证了输出功率对温差的敏感性.

由(23)式可知,

$$\eta_{he} = \frac{ab}{(1 + a) + \frac{(1 + a)^2}{ZT_{H2}} - \frac{b}{2}}.$$

图10给出了在温差比率 b 一定的条件下, 电阻比率 a 对 Bi_2Te_3 半导体温差发电器转换效率的影响. 图中, 转换效率随电阻比率 a 的变化趋势与输出功率随 a 的变化趋势是一致的, 符合了上述理论预测. 在 $a = 1$ 时, 其热电转换效率最高. 在实际运用中, 也可使内部的负载电阻略大于温差发电器件的内阻, 从而获得相对较高的转换效率. 图11所示的是

在不同的优值系数 ZT 下, 温差比率 b 对其转换效率的影响. 可见, 在确定了负载电阻与内阻的条件下, 要想获得较高的转换效率, 可通过适当地调整温差比率 b 的方法来实现. 同时, 合理地选择优值系数 $ZT (Z_3 > Z_2 > Z_1)$, 也可以提高其转换效率.

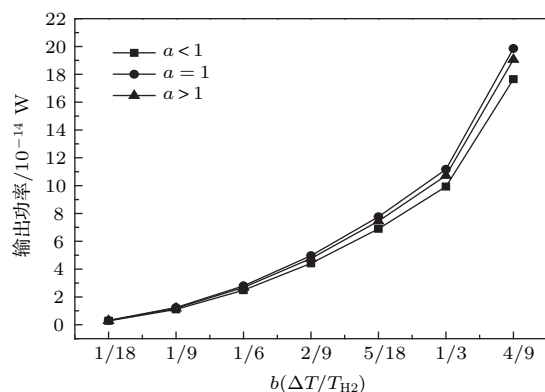


图9 不同 a 值下温差比率 b 与输出功率的关系

Fig. 9. Relations between output power and temperature difference ratio b with different values of a .

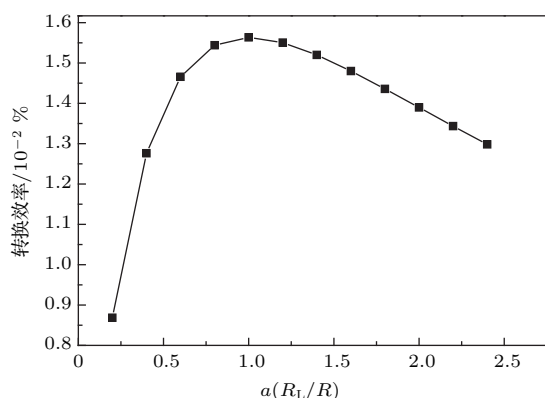


图10 电阻比率 a 对转换效率的影响

Fig. 10. Effect of resistance ratio a on conversion efficiency.

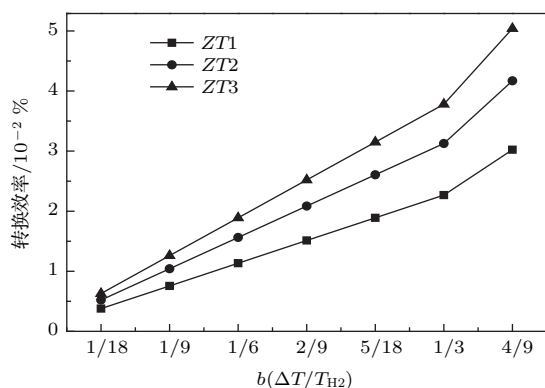


图11 不同 ZT 下温差比率 b 与转换效率的关系曲线

Fig. 11. The curves between b and conversion efficiency under different values of ZT .

5 结 论

本文从热流密度的角度建立了半导体温差发电片理论分析模型, 推导了温差发电片内温度梯度 dT/dx 关系式, 获得了输出电流、输出功率及热电转换效率的表达式. 分析了不同情况下电阻比率 $a(R_L/R)$ 及温差比率 $b(\Delta T/T_{H2})$ 对系统输出电流、输出功率及转换效率的影响, 可得到以下结论. 1) 在热电材料结构参数一定的情况下, 须使负载电阻小于热电材料的内阻, 即 $R_L < R$, 以获得较大输出电流; 随着 a 增大, 输出功率和转换效率均先增大再减小, 在 $a = 1$ 时, 达到最大值. 实际应用中, 很难做到将外部负载电阻与温差发电器件内阻相匹配, 可使外部负载电阻略大于温差发电器件内阻. 由于 a 略大于1的时候, 输出功率变化不大, 可获得相对较大的输出功率, 从而获得较高转换效率. 2) 无论 a 取何值, 随着 $b(b < 1)$ 增大, 对应的输出功率均增大, 验证了输出功率对温差的敏感性. 在一定负载电阻与内阻的条件下, 若要获得较高转换效率, 可通过适当增大温差比率 b , 或合理选择优值系数 ZT 来实现.

实验研究中, 在焦平面处, 半导体温差发电片上的光斑是直径为12—15 mm的圆, 此时光斑均匀性较差, 造成热端温度不均匀, 热损失较大, 且局部高温易损坏半导体温差发电片. 因此, 在长时间的实验过程中, 半导体温差发电片应偏离焦平面一定距离. 当能流强度一定时, 随着半导体温差发电片离焦距的增加, 其输出电压和输出电流都是先增大后减小, 在某一位置时, 输出电压和输出电流达到最大值. 通过温差发电片的不同串并联组件可获得相应输出电压.

参考文献

- [1] Jia H M, Li J Y, Yang M 2015 *J. New Ind.* **5** 34
- [2] Cheng F Q, Hong Y J, Zhu C 2014 *High Vol. Eng.* **40** 1599
- [3] Zhang X D, Du Q G, Jiang X Q 2011 *Power Technol.* **35** 422
- [4] Jiang M B, Wu Z X, Zhou M, Huang R J, Li L F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7314 (in Chinese) [蒋明波, 吴智雄, 周敏, 黄荣进, 李来风 2010 物理学报 **59** 7314]
- [5] Amatya R, Ram R J 2012 *J. Electron. Mater.* **41** 1011
- [6] Ren G S, Zhu Y D, Qiu X T 2010 *Sci. Technol. Consul. Her.* **6** 22
- [7] Mao J N, Jiang S F, Fang Q, Lu J X, Liu D Y, Du J Y 2015 *J. Zhejiang University* **49** 2205

- [8] Liu Y S, Gu M A, Yang J J, Shi Q G, Gao T, Yang J H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7368 (in Chinese) [刘永生, 谷民安, 杨晶晶, 石奇光, 高湜, 杨金焕 2010 物理学报 **59** 7368]
- [9] Wang L S, Liang Q Y, Li L, Ding X Z, Tang L J 2015 *T. Chin. Soc. Agr. Eng.* **31** 64
- [10] Yang M J, Shen Q, Zhang L M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 106202
- [11] Li P, Cai L L, Zhai P C, Tang X, Zhang Q Z, Niino M 2010 *J. Electron. Mater.* **39** 1522
- [12] Zhao Z L, Xu L Z, Yang T Q, Cui Q H 2010 *Acta Energ. Solar Sin.* **31** 620 (in Chinese) [赵在理, 徐林志, 杨天麒, 崔清华 2010 太阳能学报 **31** 620]
- [13] Kraemer D, Poudel B, Feng H P, Caylor J C, Yu B, Yan X, Ma Y, Wang X W, Wang D Z, Muto A, Mcenaney K, Chiesa M, Ren Z F, Chen G 2011 *Nat. Mater.* **10** 532
- [14] Wang C Y, Li Y Z, Z J 2016 *J. Refrig.* **37** 106
- [15] Liang G W, Zhou J M, Huang X Z 2011 *Appl. Energy* **88** 5193
- [16] Xu L Z, Li Y, Yang Z, Chen C H 2010 *J. Tsinghua University* **50** 287 (in Chinese) [徐立珍, 李彦, 杨知, 陈昌和 2010 清华大学学报 **50** 287]
- [17] Wei J T, Xiong L C, Wang H 2012 *Energ. Procedia* **17** 1570
- [18] Rezaia A, Rosendahl L A, Yin H 2014 *J. Power Sources* **255** 151
- [19] He W, Su Y H, Riffat S B, Hou J X, Ji J 2011 *Appl. Energy* **88** 5083
- [20] Najafi H, Woodbury K A 2013 *Sol. Energy* **91** 152
- [21] Rabari R, Mahmud S, Dutta A 2015 *Int. J. Heat Mass Transfer* **91** 190
- [22] Montecucco A, Siviter J, Knox A R 2014 *Appl. Energy* **123** 47
- [23] Kim S 2013 *Appl. Energy* **102** 1458
- [24] Hakimi I, Nikulshin Y, Wolfus S, Yeshurun Y 2016 *Cryogenics* **75** 1
- [25] Ali S A, Mazumder S 2013 *Int. J. Heat Mass Transfer* **62** 373

Performances of thermoelectric module under solar Fresnel concentration*

Xu Qiang-Qiang Ji Xu[†] Li Ming Liu Jia-Xing Li Hai-Li

(Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, School of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

(Received 19 May 2016; revised manuscript received 29 August 2016)

Abstract

Using Fresnel concentration to collect solar irradiation, the hot-end temperature of the semiconductor thermoelectric generator is enhanced, and the cold end is cooled through a radiator in air. For studying the performance of thermoelectric module under solar Fresnel concentration, a theoretical model of thermoelectric generator under steady condition is built from the perspective of energy flux. The model neglects the convection and radiation heat transfer between the cold and hot end and between the arms, and simplifies the heat conduction only along the arm. Utilizing this model, the temperature gradient on thermoelectric generator (dT/dx), the output current (I), the output voltage (V), and the output power (P) of thermoelectric generator are derived, and the influences of the resistance ratio $a (= R_L/R)$ and the temperature difference ratio $b (= T/T_{H2})$ on generator output performance under a certain structure parameters of thermoelectric generator are discussed. The results show that with the increase of resistance ratio (a), the output current (I) decreases, however the output power (P) and the conversion efficiency (η_{he}) first increase, then decreases. When the resistance ratio $a = 1$, the output power (P) and the conversion efficiency (η_{he}) reach their maximum values. When the resistance ratio (a) is smaller, the output power (P) increases rapidly with the increase of the resistance ratio (a). When the resistance ratio (a) is larger, the output power (P) decreases slowly with the increase of the resistance ratio (a). With the increase of temperature difference ratio (b), the output power (P) and the conversion efficiency (η_{he}) increase, no matter what the value of the resistance ratio (a) is. It verifies the sensitivity of the output power (P) to the temperature difference. Therefore, with a certain figure of merit, the appropriate adjustment of temperature difference ratio (b) may improve the output power (P) and the conversion efficiency (η_{he}). Besides, the load residence should be larger than the internal residence for keeping the high output performance. A Fresnel concentration thermoelectric module, including 6 thermoelectric generators, is employed to experimentally explore its output performances. In experiment, the energy flux density on the surface of the thermoelectric generator is not uniform as desired. The uneven hot-end temperature will degrade the conversion efficiency, and even excessive local temperature may damage the semiconductor thermoelectric generator. A deviation of the thermoelectric generator from the focal plane of Fresnel lens will help to improve the energy flux uniformity and achieve an optimized output characteristics. The required output voltage and output power can be obtained through series/parallel connection of these thermoelectric generators. With the series connection of the thermoelectric generators, the output current is increased. With the parallel connection of the thermoelectric generators, the output voltage is increased.

Keywords: Fresnel concentration, thermoelectric module, conversion efficiency, output performance

PACS: 72.15.Jf, 73.50.Lw, 88.05.Bc

DOI: 10.7498/aps.65.237201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51106134) and 2014 National Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program Funded Projects, China (Grant No. 201410681005).

[†] Corresponding author. E-mail: jixu@ynnu.edu.cn