太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的优化性能

廖天军¹, 陈渝¹, 杨智敏^{2*}

1. 重庆理工大学物理与能源系, 重庆 400054;

2. 延安大学物理与电子信息学院, 延安 716000

* E-mail: yzm@yau.edu.cn

收稿日期: 2020-06-08; 接受日期: 2020-07-03; 网络版发表日期: 2020-11-13

国家自然科学基金(批准号: 11675132)、重庆市科委基础与前沿研究项目(编号: cstc2020jcyj-msxmX0001)、重庆市教委科学技术项目(编号: KJQN201901144)、重庆理工大学科研启动项目(编号: 2019ZD22)和延安大学博士科研启动项目(编号: YDBK2019-54)资助

摘要 基于真空热电子和热辐射器件模型, 构建一类太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的理论模型. 应用有限时间热力学、热电子发射和普朗克辐射理论, 导出耦合器件的热平衡方程和能量转换效率表达式. 首先, 讨论热电子器件短路、热辐射器件开路、两子器件串联时的热学和电学性能, 分析系统在最大效率时的参数特性. 其次, 确定两子器件独立运行时的系统最大效率和优化条件, 揭示阳极板功函数、聚光器的聚光因子和光学效率对优化性能的影响. 研究结果表明耦合系统在两子器件独立产生电能时的性能最优, 可为聚光太阳能驱动热电转换系统的设计提供理论指导.

关键词 热电子器件, 热辐射器件, 有限时间热力学, 功函数, 禁带宽度

1 引言

真空热电子器件是利用金属表面热电子发射实现热能到电能的转换, 它核心部件是阴极和阳极两个极板, 阴极板经高温热源加热使温度升高, 一部分获得能量的电子克服功函数束缚而发射至真空, 然后被阳极板收集, 再通过负载回到阴极, 完成一个循环过程^[1,2]. 热电子器件可以被核能^[2,3]、燃料电池^[4]、太阳能^[5~7]等多种形式的热源驱动, 在新能源开发领域具有重要应用. 为了提高热电子器件的性能, 有研究者提出一类基于半导体材料的光子增强热电子器件的物理模型, 它能同时利用光和热激发电子, 因此具有较高的效

率^[8], 研究表明对电子亲和势和阳极板功函数优化, 转换效率还可进一步提高^[9]. 也有研究者基于二维石墨烯材料, 提出一类新型热电子器件^[10], 探究热源温度和极板功函数对热电转换效率的影响^[11]. 尽管热电子器件的性能较高, 但器件内部的电子传输和辐射换热导致阳极板温度过高, 因而产生余热排放的问题^[1]. 国内外研究者将半导体温差发电器件置于热电子器件的低温端, 实现对能源的梯级利用, 运用有限时间热力学和热电子发射理论, 研究耦合器件的热学与电学性能, 提供参数的优化设计准则^[12~15]. 有研究者提出了太阳能驱动热电子-半导体温差耦合器件的模型, 探究了最大效率时的参数特性^[16]. 然而, 受多种不可逆损失的

引用格式: 廖天军, 陈渝, 杨智敏. 太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的优化性能. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 46–54

Liao T J, Chen Y, Yang Z M. Optimal performance of solar-driven thermo-electric-radiative coupled devices (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 46–54, doi: 10.1360/SST-2020-0230

影响, 半导体温差器件余热回收的效率较低. 值得注意的是, 有学者提出了热辐射能量转换器件的物理模型^[17~21], 此类器件的III-V族半导体p-n结与高温热源接触, 价带中电子获得能量而被激发到导带, 若电子与空穴的辐射复合率大于产生率, 将导致电子的准费米能级低于空穴的费米能级, 连接外部负载可实现热能到电能的转换. 基于热辐射器件的物理模型, Zhang等人建立了石墨烯热电子-热辐射^[22]和燃料电池-热辐射^[23]耦合器件的理论模型, 考虑了有限速率传热、辐射复合、非辐射复合、极化过电势等多种不可逆损失, 利用子系统之间的能量平衡方程, 研究了耦合器件的整体最佳性能, 提供了参数优化判据, 所获结果有利于热能开发和能源梯级利用. 由于热辐射器件近年来才被提出, 有关太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的研究较少, 开展这方面工作可为太阳能发电提供新方案.

本文应用有限时间热力学、热电子发射和普朗克辐射理论, 导出太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的热平衡方程和能量转换效率表达式. 讨论热电子器件短路、热辐射器件开路、两子器件串联时的热学与电学特性, 分析在最大效率时的参数特性. 预测系统在两子器件独立产生电能时的最大效率和优化运行条件, 讨论阳极板功函数和聚光率等参数对优化性能的影响, 为太阳能的开发提供理论依据.

2 理论模型

图1为太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的结构与能带示意图, 系统包括太阳能聚光器、热吸收器、导热材料、热电子器件和热辐射器件. 热吸收器表面单位面积吸收的能量为 $CG\eta_{oe}$, η_{oe} 是聚光器的光学效率, C 是聚光器的聚焦因子, G 为太阳直射辐照强度. 热电子器件阴极和阳极板的工作温度分别为 T_C 和 T_A . q_C 和 q_A 分别是单位时间离开阴极和流入阳极的热量. q_T 是热电子器件两极板之间的辐射热损失. 耦合器件的工作原理是太阳光聚焦在热吸收器的表面, 其中一部分以辐射热漏 q_{loss} 释放至环境, 热吸收器单位时间传递给阴极板的热量为 q_H , 阴极板获得高温后部分电子将摆脱功函数的束缚, 从极板表面激发至真空, 然后被阳极板吸收, 最后通过负载回到阴极, 构成回路并实现电能输出. 阳极板将热流 q_L 传递给热辐射器件, 导致其温度 T_R 高于环境温度 T_E , 从而将一部分辐射热流 q_R 转化为输出功率. 图1(b)为耦合器件的能带示意图, 其中, ψ_C 和 ψ_A 分别是阴极和阳极的功函数, V_1 是热电子器件的输出电压, 热辐射器件由p型和n型半导体构成, E_c 和 E_v 分别是导带底和价带顶的能级, $(E_c - E_v)$ 为半导体的禁带宽度 E_g , E_{fe} 和 E_{fh} 分别是电子和空穴的准费米能级, 热辐射器件的输出电压的 V_2 与单位正电子电量 e 乘积为能级之差为 $(E_{fe} - E_{fh})$ ^[17~21]. 由于载流

图1 (网络版彩图)太阳能驱动热电子-热辐射耦合器件的示意图(a)和能带示意图(b)

Figure 1 (Color online) (a) The schematic diagram and (b) the band diagram of solar-driven thermo-electric-radiative coupled devices.

子的辐射复合率高于产生率, 将导致 $E_{\text{fc}} - E_{\text{fh}} < 0$, 即 $V_2 < 0$, 若连接负载, 电子流入n区, 而空穴进入p区, 产生电流密度 J_2 和功率^[17-21].

3 耦合器件的效率

在热电子器件的两极板表面喷涂负电子亲和势材料, 使其功函数 ψ_C 和 ψ_A 降低, 以产生电能. 基于热电子发射理论, 热流率 q_C 和 q_A 可以分别表示为^[24]

$$q_C = [J_C(\psi_C + 2K_B T_C) - J_A(\psi_C + 2K_B T_A)] / e, \quad (1)$$

和

$$q_A = [J_C(\psi_A + 2K_B T_C) - J_A(\psi_A + 2K_B T_A)] / e, \quad (2)$$

其中, K_B 是Boltzmann常数, $(\psi_C + 2K_B T_C)$ 和 $(\psi_A + 2K_B T_A)$ 分别是阴极和阳极表面逸出的每个电子所携带的热流率^[11], $(\psi_C + 2K_B T_A)$ 是从阳极表面逸出的电子到达阴极所携带的热流率^[11], $(\psi_A + 2K_B T_C)$ 是离开阴极的电子到达阳极所携带的热流率^[11], $2K_B T_C$ 和 $2K_B T_A$ 分别是阴极和阳极中电子越过势垒后的平均热动能^[11], 阴极电流密度 J_C 和阳极电流密度 J_A 由Richardson-Dushman (RD)方程决定, 它们可以表示为^[1,2]

$$J_C = AT_C^2 \exp[-\psi_C / (K_B T_C)], \quad (3)$$

和

$$J_A = AT_A^2 \exp[-\psi_A / (K_B T_A)], \quad (4)$$

其中, $A = 120 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ 是RD常数.

当输出电压 V_1 与平带电压 $(\psi_C - \psi_A) / e$ 相等时, 热电子器件的性能最优, 则功率密度 P_1 可以表示为

$$P_1 = (\psi_C - \psi_A)(J_C - J_A) / e, \quad (5)$$

其中, $J_1 = J_C - J_A$ 是净输出电流密度.

假设热吸收器和阴极板的温度与面积均相等, 根据热力学第一定律和有限时间热力学, 可以给出以下三个热平衡方程^[5]:

$$q_H = \bar{\alpha} C G \eta_{\text{oe}} - q_{\text{Loss}} = q_C + q_T, \quad (6)$$

$$q_L = q_A + q_T = U(T_A - T_R), \quad (7)$$

和

$$U(T_A - T_R) = q_R + P_2, \quad (8)$$

其中, $q_{\text{Loss}} = \bar{\epsilon} \sigma (T_C^4 - T_E^4)$ 是热吸收器与环境之间的辐射热漏, $q_T = \bar{\epsilon}_{\text{CA}} \sigma (T_C^4 - T_A^4)$ 是热电子器件两个极板之间的辐射热漏, σ 是Stefan-Boltzmann常数, $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\epsilon}$ 分别是热吸收器表面的平均吸收效率和热发射率, $\bar{\epsilon}_{\text{CA}}$ 是两个极板的有效热发射率, $U = \kappa / L$ 为热电子器件的阳极板与热辐射器件之间的换热系数, κ 和 L 分别是导热材料的导热系数和厚度. 根据基尔霍夫热力学定律, 平衡热辐射条件下的吸收效率 $\bar{\alpha}$ 等于热发射率 $\bar{\epsilon}$ ^[25].

基于普朗克辐射理论, 热辐射器件的电流密度 J_2 表示为^[17]

$$J_2 = \frac{2\pi e}{h^3 c^2} \left[\int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2 dE}{\exp[E / (K_B T_E)] - 1} - \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2 dE}{\exp[(E - eV_2) / (K_B T_R)] - 1} \right], \quad (9)$$

其中, E 为光子能量, h 为普朗克常数, c 为真空光速.

基于(9)式, 热辐射器件的功率密度 P_2 可以表示为^[17]

$$P_2 = V_2 J_2 = \frac{V_2 2\pi e}{h^3 c^2} \left[\int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2 dE}{\exp[E / (K_B T_E)] - 1} - \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2 dE}{\exp[(E - eV_2) / (K_B T_R)] - 1} \right]. \quad (10)$$

热辐射器件与环境之间辐射交换热流 q_R 表示为^[17]

$$q_R = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \left[\int_0^{\infty} \frac{E^3 dE}{\exp[(E - E_0) / (K_B T_R)] - 1} - \int_0^{\infty} \frac{E^3 dE}{\exp[E / (K_B T_E)] - 1} \right], \quad (11)$$

其中, 当 E 处于 $0 \leq E \leq E_g$ 区间, $E_0 = 0$; 当 E 处于 $E_g \leq E \leq \infty$ 区间, $E_0 = eV_2$. 给定相关参数如 C, G, V_1, V_2 ,

联立(1)~(11)式可以求解热平衡方程(6)~(8), 进而确定极板的温度 V_C 和 V_A 以及热辐射器件的温度 V_R .

根据(5)和(10)式, 耦合器件的总功率密度和效率分别表示为

$$P = P_1 + P_2 = V_1 J_1 + V_2 J_2, \quad (12)$$

和

$$\eta = \frac{P}{CG} = \frac{V_1 J_1 + V_2 J_2}{CG}. \quad (13)$$

耦合器件的相关参数的取值, 如表1所示. 结合表1参数和(1)~(13)式可以研究热辐射器开路、两子器件串联、热电子器件短路、子器件独立工作时的光-热-电特性, 确定最佳工作状态.

4 优化性能

4.1 热辐射器件开路

当热辐射器件开路时 $J_2=0$, 它作为散热器向环境释放热流, 降低热电子器件的阳极板温度. 热电子器件的电流密度 J_1 、极板温度 T_C 和 T_A 、热辐射器件温度 T_R 和开路电压 $V_{2,oc}$ 随热电子器件电压 V_1 的变化曲线图, 如图2所示. 图2(a)显示热电子器件的电流密度 J_1 随电压 V_1 的增加而减小, 在伏安特性曲线中存在一对优化值($J_{1,\eta}$, $V_{1,\eta}$)使效率 η 达到最大值 η_{max} . 图2(b)显示随着电压 V_1 的增加, 热电子器件的阴极板温度 T_C 升高, 而阳极板 T_A 的温度降低. 图2(b)还显示当热电子器件短路 $V_1=0$ 时, 两极板温度相等, 即 $T_C=T_A$. 根据电压 V_1 的优化取值 $V_{1,\eta}$, 可以确定两个极板温度的优化值 $T_{C,\eta}$ 和 $T_{A,\eta}$. 图2(c)显示随着电压 V_1 的增加, 热辐射器件的温度 T_R 升高, 而开路电压 $|V_{2,oc}|$ 降低. 由于热辐射器件

图2 (网络版彩图) (a) 热电子器件的电流密度 J_1 和效率 η ; (b) 极板温度 T_C 和 T_A ; (c) 热辐射器件温度 T_R 和开路电压 $V_{2,oc}$ 随热电子器件电压 V_1 的变化曲线图

Figure 2 (Color online) The curves of (a) the thermoelectric device's current density J_1 and efficiency η ; (b) the electrodes' temperatures T_C and T_A ; (c) the thermoradiative device's temperature T_R and open-circuit voltage $V_{2,oc}$ varying with V_1 .

的温度 T_R 由牛顿热传导方程决定, 导致它与阳极板温度随电压 V_1 的变化趋势一致. 相关研究表明热辐射器件的开路电压 $|V_{2,oc}|$ 近似表示为 $|V_{2,oc}| \approx \left(\frac{T_R}{T_E} - 1 \right) \frac{E_g}{e}$. 因此, $|V_{2,oc}|$ 随电压 V_1 的变化趋势由温度 T_R 决定.

4.2 热电子器件-热辐射器件串联

当热电子器件与热辐射器件串联时, 它们的电流密度相等($J_1 = |J_2| \equiv J$), 而电压之和($V_1 + |V_2|$)为系统总输出电压 V . 联立方程 $J_1 = |J_2|$ 和(6)~(11), 可以求解出 T_C , T_A , T_R , V_2 与 V_1 之间的依赖关系, 进而可以绘制

表1 耦合器件相关参数的取值

Table 1 Parametric selection of the coupled devices

参数	取值
聚光器的光学效率 η_{oc} ^[21]	1
阳极板的功函数 ψ_A ^[16,26]	1.50 eV
III-V族半导体的禁带宽度 E_g ^[21]	0.15 eV
聚光太阳能辐照强度 CG ^[26]	100 W cm ⁻²
吸收器的平均热发射率 ε	1.00
吸收器平均热吸收率 α	1.00
两个极板之间的有效热发射率 ε_{CA}	0.20
换热系数 U ^[5]	0.1 W cm ⁻² K ⁻¹

J_1-V_1 , $J_2-|V_2|$, $J-V$ 等伏安特性曲线, 如图3(a)所示. 图3(a)显示热辐射器件的电压 $|V_2|$ 随电流密度 J 的增加而增加, 串联器件的电压 V 和热电子器件的电压 V_1 随电流密度 J 的增加而减小, 串联器件的伏安特性决定于热电子器件的电学性能. 将 T_C , T_A , T_R , V_1 , V_2 代入(13)式, 可以绘制串联器件的效率随总输出电压的变化曲线, 如图3(b)所示. 从图3(b)还可以看出存在一优化值 V_η 使效率 η 达到最大值 $\eta_{\max}$, 串联器件的 $\eta_{\max}$ 高于热电子器件单系统的 $\eta_{\max}$. 对比图2(b)和3(c), 两个极板温度随电压变化趋势基本一致, 这是由于热电子器件在串联器件中占主导作用. 根据 V_η , 可以确定串联器件的优化电流密度 J_η , 以及两个极板的优化运行温度 $T_{C,\eta}$ 和 $T_{A,\eta}$.

图3 (a) 子器件和串联器件的伏安特性曲线; (b) 串联器件的效率 η ; (c) 极板温度 T_C 和 T_A 随总输出电压 V 的变化曲线

Figure 3 (a) The volt-ampere curves of the sub-cells and the tandem cells; (b) the tandem cells' curve of η ; (c) the electrodes' temperature curves of T_C and T_A varying with total voltage V .

4.3 热电子器件短路

当热电子器件短路时 $V_1=0$, 它作为集热器驱动热辐射器件工作. 热辐射器件的效率 η 和热电子器件的短路电流密度 $J_{1,sc}$ 、热电子器件的极板温度 T_C 和 T_A 随热辐射器件电压 V_2 变化的曲线图, 如图4所示. 图4(a)显示热电子器件的短路电流密度 $J_{1,sc}$ 随电压 $|V_2|$ 的增加而减小. 热辐射器件的效率 η 随电压 V_2 不是单调的, 可以获得最大效率 $\eta_{\max}$ 和电压的优化取值 $V_{2,\eta}$. 由于两个极板短接, 其内部以辐射进行换热, 导致阴极板温度 T_C 靠近于阳极板温度 T_A , 如图4(b)所示. 图4(b)还显示随着 $|V_2|$ 的增加, 热电子器件的极板温度 T_C 和 T_A 升高, 这是由能量平衡方程所约束的变化趋势.

4.4 耦合器件的优化性能预测

以上讨论了耦合器件处于三种电路状态时的性能与参数优化设计, 本部分将讨论两个子器件独立运行时的优化性能. 利用(1)-(13)式, 可绘制出阴极板温度 T_C 、阳极板温度 T_A 、热电子器件的电流密度 J_1 、热辐

图4 (网络版彩图) (a) 热辐射器件的效率 η 和热电子器件的短路电流密度 $J_{1,sc}$; (b) 极板温度 T_C 和 T_A 随热辐射器件电压 V_2 变化的曲线图

Figure 4 (Color online) The curves of (a) the thermoradiative device's efficiency η and the thermoelectric device's short-circuit current density $J_{1,sc}$; (b) the electrodes' temperatures T_C and T_A varying with thermoradiative device' voltage V_2 .

射器件的电流密度 J_2 以及耦合器件的效率 η 随电压 V_1 和 V_2 变化的三维曲面图,如图5所示.图5(a)和(b)显示的热电子器件两个极板温度的变化情况与图2(b)和图4(b)一致.电流密度 J_1 和 J_2 由子器件的热学与电学特性所决定,如图5(c)和(d)所示.图5(e)显示可以获得耦合器件的最大效率 $\eta_{\max}$ 及电压的优化值 $V_{1,\eta}$ 和 $V_{2,\eta}$.根据 $V_{1,\eta}$ 和 $V_{2,\eta}$,可以确定电流密度和温度的优化值: $J_{1,\eta}$, $J_{2,\eta}$, $T_{C,\eta}$, $T_{A,\eta}$.利用 $V_{1,\eta}$ 可确定阴极板的功函数在最大效率时的优化值: $\psi_{C,\eta} = eV_{1,\eta} + \psi_A$.利用 $J_{1,\eta}$, $J_{2,\eta}$, $V_{1,\eta}$ 和 $V_{2,\eta}$ 可以确定子器件的匹配负载.从图5(d)可以看出子器件独立运行时的效率优于其他三种状态的效率.

聚光器的聚焦因子对耦合器件的优化性能的影响,如图6所示.图6(a)显示当 $CG = (CG)_M$ 时,可获得系统整体的最高效率 η_M ,降低阳极板功函数 ψ_A ,可以进一步提高 η_M .图6(a)还显示阳极板功函数 ψ_A 越高, $(CG)_M$ 的取值就越大,这是因为阳极板的功函数影响系统的热平衡方程,随着功函数 ψ_A 的增加,需要提高太阳能的输入,才能获得效率 η_M .图6(b)显示优化温度 $T_{C,\eta}$ 和 $T_{A,\eta}$ 随 CG 的增加而升高,随阳极板功函数 ψ_A 的降低而升高.图6(c)显示优化温度 $V_{1,\eta}$ 和 $V_{2,\eta}$ 随 CG 的增加而升高,随阳极板功函数 ψ_A 的降低而增加.当前真空热电子器件的主要挑战是阳极材料功函数的降低,

图5 (网络版彩图) (a) 阴极板温度 T_C ; (b) 阳极板温度 T_A ; (c) 热电子器件电流密度 J_1 ; (d) 热辐射器件电流密度 J_2 ; (e) 耦合器件效率 η 随电压 V_1 和 V_2 变化的三维曲面图

Figure 5 (Color online) The 3D graphs of (a) the cathode's temperature T_C ; (b) the anode's temperature T_A ; (c) the thermoelectric device's current density J_1 ; (d) the thermoradiative device's current density J_2 ; (e) the efficiency η of coupled devices varying with V_1 and V_2 .

图6 (网络版彩图) (a) 耦合器件的最大效率 $\eta_{\max}$; (b) 优化温度 $T_{C,\eta}$ 和 $T_{A,\eta}$; (c) 电压优化值 $V_{1,\eta}$ 和 $V_{2,\eta}$ 随CG的变化曲线图
Figure 6 (Color online) The curves of (a) the coupled devices' maximum efficiency $\eta_{\max}$; (b) the optimum temperatures $T_{C,\eta}$ and $T_{A,\eta}$; (c) the optimum voltages $V_{1,\eta}$ and $V_{2,\eta}$ varying with CG.

表2 功函数 ψ_A 对 η_M 和相关参数优化取值的影响, 其中 $\eta_{oc}=1$

Table 2 The effects of work function ψ_A on η_M and the related parameters' optimum values where $\eta_{oc}=1$

ψ_A (eV)	η_M	$(CG)_M$ (W cm ⁻²)	$V_{1,M}$ (V)	$ V_{2,M} $ (V)	$J_{1,M}$ (A cm ⁻²)	$J_{2,M}$ (A cm ⁻²)	$T_{C,M}$ (K)	$T_{A,M}$ (K)
1.50	0.203	123	0.851	0.0513	25.3	64.5	1695	1060
1.40	0.216	111	0.856	0.0470	24.7	58.6	1630	990
1.30	0.230	98.0	0.856	0.0430	23.7	52.4	1561	925

表3 光学效率 η_{oc} 对耦合器件的最高效率 η_M 和相关参数优化取值的影响, 其中 $\psi_A=1.30$ eV

Table 3 The effects of η_{oc} on η_M and the related parameters' optimum values where $\psi_A=1.30$ eV

η_{oc}	η_M	$(CG)_M$ (W cm ⁻²)	$V_{1,M}$ (V)	$ V_{2,M} $ (V)	$J_{1,M}$ (A cm ⁻²)	$J_{2,M}$ (A cm ⁻²)	$T_{C,M}$ (K)	$T_{A,M}$ (K)
1.00	0.230	98.0	0.856	0.0430	23.7	52.4	1561	925
0.80	0.230	122	0.857	0.0430	23.7	52.4	1561	925
0.60	0.230	164	0.857	0.0430	23.7	52.4	1561	925

当前掺磷钻石阳极板的功函数可降至0.9 eV^[8], 但成本较高。相关研究表明在极板表面喷涂负电子亲和势材料可使 ψ_A 降至1.50 eV^[26]。采用以上同样数值模拟方法, 可以得到阳极板功函数 ψ_A 对耦合器件的最高效率 $\eta_{\max}$ 和相关参数优化取值的影响, 如表2所示。表2显示减小功函数 ψ_A 对 $V_{1,M}$ 的影响不显著, 而使优化值 $(CG)_M$, $|V_{2,M}|$, $J_{1,M}$, $J_{2,M}$, $T_{C,M}$ 和 $T_{A,M}$ 均降低。

光学效率 η_{oc} 对耦合器件的最高效率 η_M 和相关参数优化取值的影响, 如表3所示。表3显示 $(CG)_M$ 随光学效率 η_{oc} 的减小而增加, 而最高效率 η_M 和其他参数优化值保持不变。表3说明减小光学效率时, 增加聚光系统参数 $(CG)_M$ 可以维持耦合器件的热平衡和优化性能。表2和3显示耦合器件的最高效率仅为23.0%, 采用以下方案可以进一步提高效率:

- (1) 减小热电子器件的极板间距, 借助电子隧穿效应提高耦合器件的效率^[27];
- (2) 减小热吸收器的面积, 降低表面辐射热损失, 提高太阳能集热系统的热效率, 进而提高系统效率^[5];
- (3) 基于近场热辐射器件模型^[28,29], 构建新型耦合器件, 通过增强子系统的性能提高系统效率;
- (4) 开发光子增强热电子-热辐射耦合器件新模型, 通过减小不可逆损失提高系统效率^[8,9]。

5 结论

本文建立了一类包含多种不可逆热损失的耦合器

件模型, 所获的主要结论如下:

(1) 当热辐射器件开路时, 它作为散热器降低低热电子器件阳极板温度, 系统仅有热电子器件产生电能, 可以获得的最大效率为16.6%;

(2) 两个子器件串联时, 串联器件的伏安特性决定于热电子器件的电学性能, 系统最大效率为18.9%;

(3) 当热电子器件短路时, 它作为集热器驱动热辐

射器件工作, 系统仅有热辐射器件产生电能, 可以获得的最高效率为6.36%;

(4) 当两子器件独立产生功率时, 调节两子器件的电压、阳极板功函数、聚光因子可以获得系统的整体最高效率23.0%, 讨论了光学效率对优化性能的影响, 给出了进一步提高系统效率的方案. 本文所获结果可为太阳能驱动热电耦合能源器件的设计与开发提供理论依据.

参考文献

- Chen L, Ding Z, Zhou J, et al. Thermodynamic performance optimization for an irreversible vacuum thermionic generator. *Eur Phys J Plus*, 2017, 132: 293
- Deng Y, Qiu B, Lu K, et al. Performance evaluation and efficiency enhancement of a space thermionic fuel element for thermal energy conversion and utilization. *Appl Thermal Eng*, 2020, 173: 115237
- Zhou Y, Zhang S X, Li G P. A review of radioisotope batteries (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 1831–1845 [周毅, 张世旭, 李公平. 放射性同位素电池的研究进展. 科学通报, 2017, 62: 1831–1845]
- Xu H, Chen B, Tan P, et al. A feasible way to handle the heat management of direct carbon solid oxide fuel cells. *Appl Energy*, 2018, 226: 881–890
- Liao T, Chen X, Lin B, et al. Performance evaluation and parametric optimum design of a vacuum thermionic solar cell. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 033901
- Olawole O C, De D K. Theoretical studies of thermionic conversion of solar energy with graphene as emitter and collector. *J Photon Energy*, 2018, 8: 1
- Post A D, King B V, Kisi E H. Computational model and optimisation of a vacuum diode thermionic generator for application in concentrating solar thermal power. *Appl Thermal Eng*, 2017, 117: 245–253
- Schwede J W, Bargatin I, Riley D C, et al. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems. *Nat Mater*, 2010, 9: 762–767
- Liao T J, Lin B H. Investigation on the performance of a photon-enhanced thermionic emission solar cell (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 873–879 [廖天军, 林比宏. 光子增强热离子太阳能电池的性能研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 873–879]
- Liang S J, Ang L K. Electron thermionic emission from graphene and a thermionic energy converter. *Phys Rev Appl*, 2015, 3: 014002
- Liao T J, Lin B H, Wang Y H. Performance characteristics of a novel high-efficient graphene thermionic power device (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 187901 [廖天军, 林比宏, 王宇琿. 新型高效热离子功率器件的性能特性研究. 物理学报, 2019, 68: 187901]
- Rahman E, Nojeh A. Harvesting solar thermal energy with a micro-gap thermionic-thermoelectric hybrid energy converter: Model development, energy exchange analysis, and performance optimization. *Energy*, 2020, 204: 117947
- Liao T J, Yang Z M, Lin B H. Investigation on the optimal performance of the thermionic-thermoelectric hybrid power generation device (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 125–133 [廖天军, 杨智敏, 林比宏. 热离子-温差热电混合发电模块的优化性能研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 125–133]
- Ding Z, Chen L, Ge Y, et al. Performance analysis for an irreversible combined thermionic-thermoelectric generator with finite rate heat transfer. *Environ Eng Manag J*, 2015, 14: 97–108
- Lin J, Yang Z M, Lin B H, et al. Parametric optimum design of an irreversible photon-enhanced thermionic emission solar cell hybrid system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2016, 46: 225–234 [林健, 杨智敏, 林比宏, 等. 光子增强热离子发射太阳能电池混合功率系统参数的优化设计. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 225–234]
- Xiao L, Wu S Y, Yang S L. Parametric study on the thermoelectric conversion performance of a concentrated solar-driven thermionic-thermoelectric hybrid generator. *Int J Energy Res*, 2018, 42: 656–672
- Strandberg R. Theoretical efficiency limits for thermoradiative energy conversion. *J Appl Phys*, 2015, 117: 055105
- Santhanam P, Fan S. Thermal-to-electrical energy conversion by diodes under negative illumination. *Phys Rev B*, 2016, 93: 161410
- Lin C, Wang B, Teo K H, et al. Performance comparison between photovoltaic and thermoradiative devices. *J Appl Phys*, 2017, 122: 243103

- 20 Fernández J J. Thermoradiative energy conversion with quasi-Fermi level variations. *IEEE Trans Electron Devices*, 2017, 64: 250–255
- 21 Liao T, Zhang X, Chen X, et al. Negative illumination thermoradiative solar cell. *Opt Lett*, 2017, 42: 3236
- 22 Zhang X, Ye Z, Su S, et al. Thermionic-thermoradiative converters. *IEEE Electron Device Lett*, 2018, 39: 1429–1432
- 23 Zhang X, Du J, Ang Y S, et al. Hybrid direct carbon fuel cell-thermoradiative systems for high-efficiency waste-heat recovery. *Energy Convers Manage*, 2019, 198: 111842
- 24 Chen L, Ding Z, Sun F. Performance analysis of a vacuum thermionic refrigerator with external heat transfer. *J Appl Phys*, 2010, 107: 104507
- 25 Liao T, Yang Z, Peng W, et al. Parametric characteristics and optimum criteria of a near-field solar thermophotovoltaic system at the maximum efficiency. *Energy Convers Manage*, 2017, 152: 214–220
- 26 Lee J H, Bargatin I, Melosh N A, et al. Optimal emitter-collector gap for thermionic energy converters. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 173904
- 27 Lee J I, Jeong Y H, No H C, et al. Size effect of nanometer vacuum gap thermionic power conversion device with CsI coated graphite electrodes. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 223107
- 28 Liao T, Zhang X, Yang Z, et al. Near-field thermoradiative electron device. *IEEE Trans Electron Devices*, 2019, 66: 3099–3102
- 29 Wang B, Lin C, Teo K H, et al. Thermoradiative device enhanced by near-field coupled structures. *J Quant Spectr Rad Transfer*, 2017, 196: 10–16

Optimal performance of solar-driven thermo-electric-radiative coupled devices

LIAO TianJun¹, CHEN Yu¹ & YANG ZhiMin²

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

² College of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China

Based on the models of vacuum thermoelectric and thermoradiative devices, we established a theoretical model of solar-driven thermo-electric-radiative coupled devices. Using theories of the finite-time thermodynamics, thermionic emission, and Planck radiation, we derived the thermal equilibrium equations and the expression for energy conversion efficiency of the coupled devices. First, we discussed the thermal and electrical properties of the short circuit of the thermoelectric device, open circuit of the thermoradiative device, and two sub-devices in series and analyzed the parametric characteristics at maximum efficiency. Then, we predicted the maximum efficiency and optimized operating conditions of the system when two sub-devices independently generate electricity and analyzed the effects of the anode's work function, concentrator's factor, and optical efficiency on the optimum performance. The results show that the optimum performance of the coupled system is better than that of the other three work states, which can provide theoretical guidance for the design of concentrated solar thermal-to-electricity energy conversion systems.

thermoelectric devices, thermoradiative devices, finite-time thermodynamics, work function, band-gap

doi: [10.1360/SST-2020-0230](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0230)