太阳能驱动单级异质结热离子发电装置性能优化

邱肃肃³, 陈林根^{1,2,4*}, 丁泽民^{3*}, 戈延林^{1,2,4}

1. 武汉工程大学热科学与动力工程研究所, 武汉 430205;

2. 湖北省绿色化工装备工程技术研究中心, 武汉 430205;

3. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033;

4. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205

* E-mail: lingenchen@hotmail.com; zeminding@hotmail.com

收稿日期: 2021-06-30; 接受日期: 2021-08-23; 网络版发表日期: 2021-11-18

国家自然科学基金(批准号: 51779262)和湖北省自然科学基金(编号: 2017CFB498)资助项目

摘要 异质结热离子装置具有较高的理论转换效率, 在高效太阳能利用领域具有广阔应用前景. 然而实际异质结热离子装置往往存在多种不可逆因素, 从而使装置性能降低. 本文建立太阳能驱动单级热离子发电装置的有限时间热力学模型, 模型包括聚光模块、固态热离子发电模块和散热模块. 依据电荷守恒定律和热力学第一定律, 求解光吸收器和电极的温度. 研究了输出电压、Schottky势垒和聚光度等参数对最优性能的影响. 结果表明: 存在最优的输出电压和Schottky势垒可以使能量转换效率达到极大值; 聚光度增大时, 功率和效率均先增大后减小, 存在最优聚光度 $C_{\eta, \max} \approx 1700$ 和 $C_{P, \max} \approx 2250$ 使得效率和功率分别达到局部极大值. 所得结果可为实际太阳能驱动热离子装置的优化设计提供一定理论依据.

关键词 有限时间热力学, 太阳能, 热离子发电机, van der Waals异质结, 热力学优化

1 前言

电极材料受热时, 部分能量较高的“热电子”会逃逸出材料表面, 此过程称为热离子发射^[1]. 电子转移往往伴随能量的转移, 基于热电子发射设计成的能量转换装置为热离子能量转换装置^[2]. 热离子装置具有较高的理论转换效率, 根据净电子流向的不同, 可以分为热离子发电装置^[3-6]和热离子制冷装置^[7-10]. 而太阳能驱动热离子发电装置是未来发展趋势之一^[11].

不可逆性可以引起装置性能的显著降低, 实际热离子发电装置在工作过程中存在多种不可逆性, 如极

板与环境之间的传热不可逆性、装置内部的传热不可逆性(极板间的辐射或导热)等. 有限时间热力学^[12-38]是研究各种不可逆性对装置性能影响的有力工具. Wu^[39]考虑太阳和高温电极、环境和低温电极之间的有限速率传热(辐射传热), 研究装置的最大输出功率特性. Wang等人^[40]研究了考虑多种传热不可逆性的热离子发电机模型, 给出了装置关键技术参数的优化判据. Liao等人^[41]建立了不可逆真空热离子太阳电池装置模型, 讨论了装置的最大效率特性. Wang等人^[42]分析了光子增强型热离子装置的最优性能, 研究表明采用纳米间距能够显著增大装置的效率. Chen等人^[6]对

引用格式: 邱肃肃, 陈林根, 丁泽民, 等. 太阳能驱动单级异质结热离子发电装置性能优化. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1901–1911

Qiu S S, Chen L G, Ding Z M, et al. Performance optimization of a solar-driven single-stage heterostructure-based thermionic generator (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1901–1911, doi: [10.1360/SST-2021-0260](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0260)

真空热离子发电机的性能进行了优化设计, 讨论了不同优化目标下的性能特性. 程笑宇^[43]研究了电极温度、电极间距和功函数对最优性能的影响, 讨论了功函数和电极温度的最优值. Qiu等人^[44]研究了基于van der Waals异质结(vdWH)的不可逆热离子发电机模型. 研究了装置的最优性能与输出电压、Schottky势垒和热阻等参数之间的关系, 得到了相应的性能优化区域. 杨智敏^[45]建立了基于ABA型和ABC型多层石墨烯发射极的不可逆真空热离子发电机模型, 讨论了发射极和集电极的功函数、石墨烯层数和聚光度对聚光热离子发电装置最优性能的影响. 杨智敏等人^[46]考虑燃料电池中电化学反应、等效内阻、热漏以及真空热离子装置中的有限速率传热等不可逆因素的影响, 建立了由燃料电池和真空热离子装置组成的联合发电装置模型, 分析了各种参数对装置最优性能的影响. 廖天军和林比宏^[47]在光子增强型热离子太阳能电池的基础上, 进一步考虑半导体禁带宽度对温度的依赖关系, 建立了更加完善的不可逆光子增强型热离子太阳能电池模型, 研究了装置的最优性能. 廖天军等人^[48]进一步建立了太阳能驱动的热电子-热辐射联合发电机模型. Liao等人^[49]建立了基于Schottky异质结的热光伏-热离子联合装置模型, 考虑了空间电荷效应和辐射复合对装置性能的影响. Liao等人^[50,51]进一步建立了余热驱动的石墨烯基热离子-热光伏联合发电装置^[50]和固态

氧化物燃料电池-石墨烯基热离子联合发电装置^[51]. Li等人^[52]建立了不可逆热离子-热光伏联合发电机模型.

本文在文献^[44,45]的基础上, 考虑多种不可逆因素, 提出一种太阳能驱动的单级异质结热离子发电机模型. 分别建立聚光模块、固态热离子模块和散热模块的物理和数学模型, 结合实际材料和具体传热规律, 分模块进行能量平衡分析, 推导装置的功率和效率一般表达式. 通过数值计算求解电极温度, 分析装置的最优性能与输出电压、Schottky势垒和聚光度等参数的关系, 讨论与聚光度相对应的性能优化区域.

2 太阳能驱动单级热离子发电装置模型

2.1 模型描述

图1给出了太阳能驱动单级热离子发电装置示意图. 装置由聚光模块、固态热离子发电模块和散热模块三部分组成. 聚光模块包括聚光器和光吸收器, 其功能是聚焦太阳辐射并将其转换为高温热能. 固态热离子模块由一个基于vdWH的固态热离子发电机和可调负载组成. 散热模块采用肋片式散热结构, 该装置与固态热离子模块的底部紧密连接以带走无法利用的余热. 固态热离子模块的发射极和集电极分别记为电极1和电极2; 光吸收器与电极1和2的温度分别记为 T_{ab} , T_1 , T_2 ; 电极1和2的发射电流密度分别记为 J_1 和 J_2 ; 固态热

图1 (网络版彩图)太阳能驱动单级热离子发电装置示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of a solar driven single-stage thermionic generator.

离子模块的输出电压和输出电流密度分别记为 V 和 J_{12} ; 光吸收器和与热离子装置的电极极板面积分别为 A_{ab} 和 A_1 ; 太阳辐照强度和聚光度分别记为 G 和 C ; 环境温度为 T_0 并假设具有无限大的热容(即温度保持恒定). 图2给出了装置中能量流动示意图. 图中标出了主要的能量运输过程. 光吸收器和各极板的温度满足 $T_{ab} > T_1 > T_2 > T_0$.

为了简化模型, 对其进行如下假设:

- (1) 光吸收器和集电极紧密贴合, 传热服从线性传热规律;
- (2) 光吸收器和极板均为理想灰体, 满足基尔霍夫定律;
- (3) 忽略外电路导线上的导热和焦耳热损失;
- (4) 忽略极板间的近场辐射和空间电荷效应;
- (5) 忽略有效Schottky势垒、发射率随温度的变化.

为了更接近实际, 本模型考虑了多种有限速率传热. 表1给出了热离子装置模型中考虑的主要传热过程.

2.2 聚光模块

辐照强度为 G 的太阳光, 通过聚光度为 C 的聚光器后, 辐射强度增加到 CG . 投射到光吸收器表面的太阳

辐射热流率 Q_{ab} 为

$$Q_{ab} = CGA_{ab}\eta_{op}, \quad (1)$$

式中, η_{op} 表示聚光器的光学效率, 下标ab和op分别表示光吸收器(absorber)和光学(optical).

光投射到物体表面时, 会发生光的吸收、反射和透射. 根据热力学第一定律, 此过程满足

$$Q(\lambda) = Q_a(\lambda) + Q_\rho(\lambda) + Q_\tau(\lambda), \quad (2)$$

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1, \quad (3)$$

式中, Q_a , Q_ρ , Q_τ 分别表示光的吸收、反射和透射的热流率; λ 为入射光的波长, α , ρ , τ 分别表示吸收率(谱)、反射率(谱)和透射率(谱). 通过聚光器的辐射光谱分布与太阳辐射类似, 其中, 高于光吸收器特征频率(由材料能隙 E_g 大小决定)的波段转化为热能, 而低频部分则被反射. 光吸收器材料通常为难熔金属材料或石墨, 具有高熔点、高光谱吸收率、低光谱发射率以及高导热率的特点, 并且一般不考虑其透射率($\tau_{ab}=0$). 光吸收器的吸收率和反射率满足

$$\alpha_{ab} + \rho_{ab} = 1. \quad (4)$$

由式(4)可知, 在对于光吸收器进行能量平衡分析时, 只需确定光吸收器的吸收率 α_{ab} 或反射率 ρ_{ab} 即可. 在式(4)的基础上, 光吸收器吸收的辐射热流率 $Q_{ab,\alpha}$ 和

图2 (网络版彩图)模型中的能量流动示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of energy flow in the model.

表 1 模型中考虑的主要有限速率传热过程**Table 1** Main finite-rate heat transfer processes considered in the model

传热过程	传热性质	计算方法
光吸收器和环境之间	辐射	$Q_{\text{rad}, \text{ab} \rightarrow 0} \propto (T_{\text{ab}}^4 - T_0^4)$
光吸收器和极板1	导热	$Q_{\text{cond}, \text{ab} \rightarrow 1} \propto (T_{\text{ab}} - T_1)$
极板1和环境之间	辐射	$Q_{\text{rad}, 1 \rightarrow 0} \propto (T_1^4 - T_0^4)$
极板1和极板2之间	导热	$Q_{\text{rad}, 1 \rightarrow 2} \propto (T_1 - T_2)$
极板2和环境之间	自然/强迫对流	$Q_{\text{conv}, 2 \rightarrow 0} \propto (T_2 - T_0)$

反射的辐射热流率 $Q_{\text{ab}, \tau}$ 分别表示为

$$Q_{\text{ab}, \alpha} = \alpha_{\text{ab}} CGA_{\text{ab}} \eta_{\text{op}}, \quad (5)$$

$$Q_{\text{ab}, \rho} = (1 - \alpha_{\text{ab}}) CGA_{\text{ab}} \eta_{\text{op}}. \quad (6)$$

光吸收器除了光的吸收和反射之外, 由于自身温度很高, 还会通过辐射方式向环境散热. 高温条件下, 与辐射换热相比, 对流换热可忽略不计. 光吸收器与环境之间的辐射满足斯忒藩-玻尔兹曼定律, 即

$$Q_{\text{rad}, \text{ab} \rightarrow 0} = \varepsilon_{\text{ab}} A_{\text{ab}} \sigma (T_{\text{ab}}^4 - T_0^4), \quad (7)$$

式中, 下标rad表示辐射(radiative), $\text{ab} \rightarrow 0$ 表示从光吸收器到环境的传热过程, ε_{ab} 表示光吸收器的发射率, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数.

光吸收器表面通常具有漫射特性, 在热平衡状态下, 光吸收器的吸收率和发射率满足经典的基尔霍夫定律^[53], 即

$$\alpha_{\text{ab}} = \varepsilon_{\text{ab}}. \quad (8)$$

稳态条件下且光吸收器和极板1面积相等时, 其间的导热热流率为

$$Q_{\text{cond}, \text{ab} \rightarrow 1} = A_{\text{ab}} (T_{\text{ab}} - T_1) / R_{\text{ab} \rightarrow 1}, \quad (9)$$

式中, 下标cond表示导热(conductive), $\text{ab} \rightarrow 1$ 表示从光吸收器到极板1的传热过程, $R_{\text{ab} \rightarrow 1}$ 为导热过程的有效热阻.

由式(5), (7), (9)可得到光吸收器的能量守恒方程为

$$Q_{\text{ab}, \alpha} - Q_{\text{rad}, \text{ab} \rightarrow 0} - Q_{\text{cond}, \text{ab} \rightarrow 1} = 0. \quad (10)$$

2.3 固态热离子模块

石墨烯电极热电子发射引起的电流密度可以表述为^[54,55]

$$J_1 = \beta T_1^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_1}\right) \exp\left(-\frac{eV}{k_B T_1}\right), \quad (11)$$

$$J_2 = \beta T_2^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_2}\right), \quad (12)$$

式中, $\beta = ek_B^3 / (\pi \hbar^3 v_f^2) = 1.158 \times 10^2 (\text{A m}^{-2} \text{ K}^{-3})$; ϕ' 是有效Schottky势垒; V 表示该模块的输出电压; k_B 为玻尔兹曼常数; v_f 为石墨烯的费米速率; $\hbar$ 为约化普朗克常数. 石墨烯电极间的导热热流率为

$$Q_{\text{cond}, 1 \rightarrow 2} = A_1 (T_1 - T_2) / R_{1 \rightarrow 2}, \quad (13)$$

式中, $R_{1 \rightarrow 2}$ 表示极板1和2之间过渡金属二硫族化合物层(TMDs)的有效热阻. 极板1和极板2由热电子发射引起的热流率 Q_1 和 Q_2 分别为

$$Q_1 = (\phi' + V + 3k_B T_1 / e) A_1 J_1 - (\phi' + V + 3k_B T_2 / e) A_1 J_2, \quad (14)$$

$$Q_2 = (\phi' + 3k_B T_1 / e) A_1 J_1 - (\phi' + 3k_B T_2 / e) A_1 J_2. \quad (15)$$

根据热力学第一定律, 极板1稳态下满足

$$Q_{\text{cond}, \text{ab} \rightarrow 1} - Q_1 - Q_{\text{cond}, 1 \rightarrow 2} = 0. \quad (16)$$

2.4 散热模块

固态热离子模块的余热通过散热器释放到环境中. 极板2工作温度较低, 与环境之间的传热满足牛顿传热规律. 根据热力学第一定律, 传热过程满足

$$Q_{\text{conv}, 2 \rightarrow 0} = A_1 U_0 (T_2 - T_0), \quad (17)$$

式中, U_0 表示散热模块与环境之间的平均换热系数.

极板2的能量平衡方程为

$$Q_{\text{conv}, 2 \rightarrow 0} - Q_2 - Q_{\text{cond}, 1 \rightarrow 2} = 0. \quad (18)$$

2.5 基本性能参数

式(10), (16), (18)给出了光吸收器和极板1和2的能量平衡方程. 在给定系统的结构参数、物性参数、聚光度、太阳辐照强度、输出电压等参数的条件下, 通过联立上述方程可以确定光吸收器和极板1和2的温度(T_{ab} , T_1 , T_2), 进而确定装置的输出功率和效率.

装置的净输出电流密度 J_{12} 、输出功率 P 、效率 η 分别为

$$J_{12} = J_1 - J_2 = \beta \left[T_1^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_1}\right) \exp\left(-\frac{eV}{k_B T_1}\right) - T_2^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_2}\right) \right] \quad (19)$$

$$P = A_1 V J_{12} = A_1 V \beta \left[T_1^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_1}\right) \exp\left(-\frac{eV}{k_B T_1}\right) - T_2^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_2}\right) \right] \quad (20)$$

$$\eta = P / (CGA_{ab}) = \frac{V\beta}{CG} \left[T_1^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_1}\right) \exp\left(-\frac{eV}{k_B T_1}\right) - T_2^3 \exp\left(-\frac{e\phi'}{k_B T_2}\right) \right] \quad (21)$$

3 性能分析与优化

本节通过数值方法对装置进行性能分析和优化. 表2给出了太阳能驱动单级热离子发电装置的主要参数^[45].

3.1 输出电压对电极温度的影响

光吸收器和各电极温度 T_{ab} 、 T_1 、 T_2 与装置的性能密切相关. 本节主要研究输出电压 V 对温度 T_{ab} 、 T_1 、 T_2 的影响. 本节计算中, $C=500$, $\phi'=0.3$ V.

图3给出了输出电压 V 对光吸收器温度 T_{ab} 和电极温度 T_1 的影响. 由图可知, T_{ab} 和 T_1 均随 V 的增大而单调

图3 (网络版彩图) V 对 T_{ab} 和 T_1 的影响

Figure 3 (Color online) Influence of V on T_{ab} and T_1 .

增大. T_{ab} 和 T_1 的差值 $\Delta T=T_{ab}-T_1$ 则基本保持不变. 当 $V=0.2$ V时, $T_{ab}\approx 593.8$ K, $T_1\approx 549.4$ K. 图4给出了输出电压 V 对电极温度 T_2 的影响. 由图可知, T_2 随 V 的增大先减小后增大; 当 $V\approx 0.21$ V时, 温度 T_2 取得局部极小值 337.4 K.

3.2 输出电压对效率的影响

在确定电极温度以后, 可以计算装置的输出功率和效率. 考虑到恒定聚光度条件, 功率和效率之间呈正比关系, 即 $\eta=P/CG$, 本节仅分析效率和输出电压之间的关系. 图5给出了效率 η 随输出电压 V 的变化关系. 由图可知, η 随 V 先增大后减小, 存在最优的输出电压

图4 (网络版彩图) V 对 T_2 的影响

Figure 4 (Color online) Influence of V on T_2 .

表2 太阳能驱动单级热离子发电装置主要参数^[45]

Table 2 Main parameters of the solar driven single-stage thermionic generator [45]

参数	符号	取值
太阳辐照强度 (AM 1.5)	G	1000 (W m ⁻²)
光吸收器到极板1热阻	$R_{ab \rightarrow 1}$	1.0×10^{-4} (K m ² W ⁻¹)
TMDs层热阻	$R_{3 \rightarrow 4}$	1.0×10^{-3} (K m ² W ⁻¹)
环境温度	T_0	300 (K)
换热系数	U_0	1.0 (W K ⁻¹ cm ⁻²)
光吸收器吸收率	α_{ab}	1.0
极板1和2发射率	$\varepsilon_1=\varepsilon_2$	1.0
聚光器光学效率	η_{op}	0.9

图 5 (网络版彩图) V 对 η 的影响Figure 5 (Color online) Influence of V on η .

使 η 取得局部极大值 $\eta_{\text{opt}} \approx 13.9\%$, 此时最优输出电压为 $V_{\text{opt}} \approx 0.19 \text{ V}$.

3.3 Schottky势垒对最大效率点的影响

本节将讨论Schottky势垒 ϕ' 对效率的影响, 计算中, $C=500$, $V=0.19 \text{ V}$.

图6给出了效率 η 随Schottky势垒 ϕ' 的变化关系. 由图可知, 效率 η 随着Schottky势垒 ϕ' 先增大后减小, 存在最优的Schottky势垒 $\phi'_{\text{opt}} \approx 0.275 \text{ V}$ 使得效率 η 达到极大值 $\eta_{\text{opt}} \approx 14.5\%$. 这一现象可以解释为: Schottky势垒较小时, 输出电压较低, 输出功率也较低; 而Schottky势

图 6 (网络版彩图) ϕ' 对最优效率 η_{opt} 的影响Figure 6 (Color online) Influence of ϕ' on the optimized efficiency η_{opt} .

垒较大时, 净电流显著减小, 输出功率也会较小. 因此, 存在特定的Schottky势垒 ϕ'_{opt} 使得输出功率和效率取得极大值.

3.4 聚光度对装置性能的影响

聚光度 C 是太阳能发电系统中的关键因素. 由2.2节可知, 在聚光度 C 固定的条件下, 存在特定的输出电压使得装置的功率和效率达到极大值. 当 C 变化时, 最优功率密度 P_{opt} 和最优效率 η_{opt} 均会发生变化, 本节将讨论聚光度 C 对功率密度和效率的影响.

图7给出了最优功率密度 P_{opt} 随聚光度 C 增大时的变化关系. 由图可知, 随着聚光度 C 的增大, 最优功率密度 P_{opt} 先增大后减小, 存在最优聚光度 $C_{P,\text{max}} \approx 2250$ 使 P_{opt} 达到局部极大值 P_{max} . 可见, 合理调节聚光系统的聚光度可以使系统的功率密度显著提高. 当聚光度从500提高到1000时, 最大功率密度从 $0.07 \times 10^6 \text{ W m}^{-2}$ 提高到 $0.21 \times 10^6 \text{ W m}^{-2}$, 增幅为200%.

图8给出了最优效率 η_{opt} 随聚光度 C 增大时的变化关系. 由图可知, 最优效率 η_{opt} 随聚光度 C 的增大先增大后减小, 存在最优聚光度 $C_{\eta,\text{max}} \approx 1700$ 使 η_{opt} 达到局部极大值 $\eta_{\text{max}} \approx 24.1\%$. 同样, 合理调节聚光系统的聚光度可以使系统的能量转换效率显著提高. 当聚光度从500提高到1000时, 效率从13.94%提高到20.97%, 增幅为50.4%.

热离子装置的光吸收器和极板面积比 A_{ab}/A_1 对最

图 7 (网络版彩图) 聚光度 C 对最优功率密度 P_{opt} 的影响Figure 7 (Color online) Influence of concentration ratio C on the optimal power P_{opt} .

图 8 (网络版彩图) 聚光度 C 对最优效率 η_{opt} 的影响

Figure 8 (Color online) Influence of concentration ratio C on the optimal efficiency η_{opt} .

优功率密度 P_{opt} 和最优效率 η_{opt} 有显著影响. 在给定聚光度 C 的条件下, 图9给出了 A_{ab}/A_1 对最优功率密度 P_{opt} 和最优效率 η_{opt} 的影响. 计算中, $\phi' = 0.3 \text{ V}$, $C = 2300$. 由图9可知, P_{opt} 和 η_{opt} 均随 A_{ab}/A_1 先增大后减小. 当 $A_{\text{ab}}/A_1 \approx 0.74$ 时, η_{opt} 取得极大值, 而当 $A_{\text{ab}}/A_1 \approx 0.97$ 时, P_{opt} 取得极大值. 在实际装置的设计中, 应当合理选取光吸收器和极板面积比 A_{ab}/A_1 从而使装置性能得到优化.

3.5 性能优化区域

在得到最优效率 η_{opt} 和输出功率 P_{opt} 随聚光度 C 的变化关系之后, 图10进一步给出了 $P_{\text{opt}}-\eta_{\text{opt}}$ 特性曲线.

图10中箭头方向表示聚光度的增大方向, 随着聚

图 9 (网络版彩图) A_{ab}/A_1 对 P_{opt} 和 η_{opt} 的影响

Figure 9 (Color online) Influence of A_{ab}/A_1 on P_{opt} and η_{opt} .

图 10 (网络版彩图) $P_{\text{opt}}-\eta_{\text{opt}}$ 特性曲线

Figure 10 (Color online) $P_{\text{opt}}-\eta_{\text{opt}}$ characteristic curve.

光度增大, 装置的工作状态依次经过最大效率点和最大功率点. 在最大效率点之前, 最优效率 η_{opt} 和输出功率 P_{opt} 均单调增大; 在最大效率点和最大功率点之间, 聚光度增大使得效率减小而功率增大; 在最大功率点之后, 功率和效率均减小. 因此, 对聚光度的性能优化区域为图10中的负斜率区间

$$C_{\eta, \max} < C < C_{P, \max}. \quad (22)$$

4 结论

本文对太阳能驱动单级热离子发电装置进行了热力学分析与优化. 首先, 考虑多种传热不可逆性, 建立了由太阳能驱动的单级热离子发电装置的有限时间热力学模型, 分别建立了聚光模块、固态热离子模块和散热模块的物理和数学模型. 接着, 基于单层石墨烯的热电子发射公式, 给出了装置的功率和效率表达式. 研究了输出电压、Schottky势垒和聚光度等参数对装置最优性能的影响, 得到了功率和效率的性能优化区域. 结论如下.

(1) 输出电压对光吸收器和电极温度影响显著. 光吸收器温度 T_{ab} 和发射极温度 T_1 随输出电压的增大而单调增大; 集电极温度 T_2 随输出电压先增大后减小, 输出电压为 0.21 V 时集电极温度取得极小值 337.4 K .

(2) 输出电压对效率影响显著. 给定聚光度时, 调整输出电压可以使装置的能量转换效率达到极大值.

(3) Schottky势垒对效率影响显著. 给定输出电压时, 效率随Schottky势垒先增大后减小, 存在最优Schottky势垒使效率取得极大值; 聚光度为500时, 最优Schottky势垒和最优效率分别为0.275 V和14.5%.

(4) 聚光度对装置影响显著. 聚光度增大时, 功率和效率均先增大后减小, 存在最优聚光度 $C_{\eta,\max}\approx 1700$ 和 $C_{P,\max}\approx 2250$ 使得效率和功率分别达到局部极大值. 聚光度的性能优化区域为 $C_{\eta,\max}<C<C_{P,\max}$.

致谢 两位审稿人对本文提出了细心、无私和充满建设性的意见, 在此致以诚挚的谢意!

参考文献

- Hatsopoulos G N, Kaye J. Measured thermal efficiencies of a diode configuration of a thermo electron engine. *J Appl Phys*, 1958, 29: 1124–1125
- Abdul Khalid K A, Leong T J, Mohamed K. Review on thermionic energy converters. *IEEE Trans Electron Devices*, 2016, 63: 2231–2241
- Houston J M. Theoretical efficiency of the thermionic energy converter. *J Appl Phys*, 1959, 30: 481–487
- Hatsopoulos G N, Gyftopoulos E P. Thermionic Energy Conversion. Volume I. Processes and Devices. Cambridge: MIT Press, 1973
- Hatsopoulos G N, Gyftopoulos E P. Thermionic Energy Conversion. Volume II. Theory, Technology, and Application. Cambridge: MIT Press, 1979
- Chen L, Ding Z, Zhou J, et al. Thermodynamic performance optimization for an irreversible vacuum thermionic generator. *Eur Phys J Plus*, 2017, 132: 293
- Mahan G D. Thermionic refrigeration. *J Appl Phys*, 1994, 76: 4362–4366
- Shakouri A, Bowers J E. Heterostructure integrated thermionic coolers. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 1234–1236
- Chen L, Ding Z, Sun F. Performance analysis of a vacuum thermionic refrigerator with external heat transfer. *J Appl Phys*, 2010, 107: 104507
- Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Performance analysis and optimization of a single-barrier solid-state thermionic refrigerator with external heat transfer. *Heat Transfer Eng*, 2012, 33: 693–703
- Jin H G, Xuan Y M, He Y L, et al. Engineering thermophysics and sustainable energy development (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1245–1251 [金红光, 宣益民, 何雅玲, 等. 工程热物理学科与能源可持续发展. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1245–1251]
- Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am J Phys*, 1975, 43: 22–24
- Chen L G, Wu C, Sun F R. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems. *J Non-Equilib Thermodyn*. 1999, 24: 327–359
- Chen L G, Sun F R. Advances in Finite Time Thermodynamics: Analysis and Optimization. New York: Nova Science Publishers, 2004
- Andresen B. Current trends in finite-time thermodynamics. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50: 2690–2704
- Chen L G. Finite-Time Thermodynamic Analysis of Irreversible Processes and Cycles (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2005 [陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析. 北京: 高等教育出版社, 2005]
- Ding Z M, Chen L G, Wang W H, et al. Progress in study on finite time thermodynamic performance optimization for three kinds of microscopic energy conversion systems (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 889–918 [丁泽民, 陈林根, 王文华, 等. 三类型能量转换系统有限时间热力学性能优化的研究进展. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 889–918]
- Chen L G, Meng F K, Sun F R. Thermodynamic analyses and optimization for thermoelectric devices: The state of the arts. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 442–455
- Ge Y, Chen L, Sun F. Progress in finite time thermodynamic studies for internal combustion engine cycles. *Entropy*, 2016, 18: 139
- Sieniutycz S, Szwaig Z. Optimizing Thermal, Chemical and Environmental Systems. Elsevier, 2018
- Feng Y L, Chen L G, Meng F K, et al. Influences of external heat transfer and Thomson effect on the performance of TEG-TEC combined thermoelectric device. *Sci China Tech Sci*, 2018, 61: 1600–1610
- Ding Z M, Chen L G, Ge Y L, et al. Optimal performance regions of an irreversible energy selective electron heat engine with double resonances. *Sci China Tech Sci*, 2019, 62: 397–405
- Xia S J, Chen L G. Generalized dissipation minimization for generalized flow transfer processes (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 501–517

- [夏少军, 陈林根. 广义流传递过程的广义耗散最小化. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 501–517]
- 24 Chen L G, Xia S J. Progresses in generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible processes (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 981–1022 [陈林根, 夏少军. 不可逆过程广义热力学动态优化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 981–1022]
 - 25 Chen L G, Xia S J, Feng H J. Progress in generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible cycles (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 1223–1267 [陈林根, 夏少军, 冯辉君. 不可逆循环的广义热力学动态优化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1223–1267]
 - 26 Feng H J, Chen L G, Xia S J. Optimal configurations for maximizing generalized output of two-finite-potential-reservoir endoreversible generalized engine cycles (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 276–286 [夏少军, 陈林根, 冯辉君. 两有限势库内可逆广义机最大广义输出的最优构型. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 276–286]
 - 27 Chen L G, Meng F K, Ge Y L, et al. Performance optimization of a class of combined thermoelectric heating devices. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 2640–2648
 - 28 Chen L G, Wang C, Zhang L, et al. Progress in thermodynamic analyses and optimizations for key component units in sea-based fuel synthesis systems (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1223–1267 [陈林根, 王超, 张磊, 等. 海基合成燃油系统关键单元的热力学分析与优化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 137–175]
 - 29 Qiu S S, Ding Z M, Chen L G, et al. Performance optimization of thermionic refrigerators based on van der Waals heterostructures. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 1007–1016
 - 30 Kong R, Chen L G, Xia S J, et al. Minimization of entropy generation rate during hydrogen iodide decomposition reaction process (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 565–579 [孔锐, 陈林根, 夏少军, 等. 碘化氢分解反应器熵产生率最小化. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 565–579]
 - 31 Qiu S S, Ding Z M, Chen L G, et al. Performance optimization of three-terminal energy selective electron generators. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 1641–1652
 - 32 Xia S J, Chen L G, Wang C. Optimal current paths for a class of generalized electrochemical reaction system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1025–1039 [夏少军, 陈林根, 王超. 一类普适电化学反应系统的最优电流路径. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1025–1039]
 - 33 Qi C Z, Ding Z M, Chen L G, et al. Modeling and performance analysis of a combined thermal Brownian heat pump cycle (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, doi: 10.1360/SST-2020-0417 [齐丛正, 丁泽民, 陈林根, 等. 联合热驱动布朗热泵的建模与性能分析. 中国科学: 技术科学, 2021, doi: 10.1360/SST-2020-0417]
 - 34 Shi S S, Ge Y L, Chen L G. Power density analysis and multi-objective optimization for an irreversible Otto cycle (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, doi: 10.1360/SST-2021-0168 [施双双, 戈延林, 陈林根. 不可逆Otto循环功率密度分析与多目标优化. 中国科学: 技术科学, 2021, doi: 10.1360/SST-2021-0168]
 - 35 Chen L G, Ding Z M, Zhou J L. Thermodynamic Optimization for Irreversible Microscopic Energy Conversion Systems (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [陈林根, 丁泽民, 周骏乐. 不可逆微型能量转换系统的热力学优化. 北京: 科学出版社, 2021]
 - 36 Chen L G, Liu X W. Thermodynamic Optimization Theory for Irreversible Quantum Brayton Cycles (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [陈林根, 刘晓威. 不可逆量子布雷顿循环热力学优化理论. 北京: 科学出版社, 2021]
 - 37 Su S H, Zhang Y C, Peng W L, et al. Thermodynamic characteristics and research progress of energy-conversion quantum systems (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51: 030011 [苏山河, 张艳超, 彭万里, 等. 能量转换量子系统的热力学特性及其研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 030011]
 - 38 Kong R, Chen L, Xia S, et al. Performance analysis of hydrogen iodide decomposition membrane reactor under different sweep modes. *Energy Convers Manage*, 2021, 244: 114436
 - 39 Wu C. Optimal power from a radiating solar-powered thermionic engine. *Energy Convers Manage*, 1992, 33: 279–282
 - 40 Wang Y, Su S H, Lin B H, et al. Parametric design criteria of an irreversible vacuum thermionic generator. *J Appl Phys*, 2013, 114: 53502
 - 41 Liao T J, Chen X H, Lin B H, et al. Performance evaluation and parametric optimum design of a vacuum thermionic solar cell. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 33901
 - 42 Wang Y, Liao T J, Zhang Y C, et al. Effects of nanoscale vacuum gap on photon-enhanced thermionic emission devices. *J Appl Phys*, 2016, 119: 45106
 - 43 Cheng X Y. Influence of space barrier on electrical performance of thermionic energy converter (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020 [程笑宇. 空间势垒对热离子发电器件输出电性能影响研究. 硕士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2020]
 - 44 Qiu S, Ding Z, Chen L. Performance evaluation and parametric optimum design of irreversible thermionic generators based on van der Waals

- heterostructures. [Energy Convers Manage](#), 2020, 225: 113360
- 45 Yang Z M. Investigation on the performance optimization of thermodynamic systems of solar energy and low-grade heat energy utilization (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xiamen: Xiamen University, 2019 [杨智敏. 太阳能和低品位热能利用热力学系统的性能优化研究. 博士学位论文. 厦门: 厦门大学, 2019]
- 46 Yang Z M, Liao T J, Lin B H. Performance characteristics and optimal analysis of a fuel cell-vacuum thermionic generator hybrid system (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2014, 44: 1173–1184 [杨智敏, 廖天军, 林比宏. 燃料电池-真空热离子混合系统的性能特性和优化分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1173–1184]
- 47 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]
- 48 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 [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]
- 49 Liao T, Du J, Guo J, et al. Schottky junction-based thermophotovoltaic-thermionic devices. [J Phys D-Appl Phys](#), 2020, 53: 055503
- 50 Liao T, Lin J, Tao C, et al. Exploiting the waste heat in graphene-based thermionic energy converter by means of thermophotovoltaic cell. [Renew Energy](#), 2020, 162: 1715–1722
- 51 Liao T, Dai Y, Cheng C, et al. Parametric optimization of a coupled system integrating solid oxide fuel cell and graphene thermionic energy converter. [J Power Sources](#), 2020, 478: 228797
- 52 Li W, Peng W, Yang Z, et al. Performance improvements and parametric design strategies of an updated thermionic-photovoltaic converter. [Phys Scr](#), 2020, 95: 035208
- 53 Yang S M, Tao W Q. Heat Transfer (in Chinese). 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006 [杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版). 北京: 高等教育出版社, 2006]
- 54 Liang S J, Ang L K. Electron thermionic emission from graphene and a thermionic energy converter. [Phys Rev Appl](#), 2015, 3: 14002
- 55 Liang S J, Liu B, Hu W, et al. Thermionic energy conversion based on graphene van der Waals Heterostructures. [Sci Rep](#), 2017, 7: 46211

Performance optimization of a solar-driven single-stage heterostructure-based thermionic generator

QIU SuSu³, CHEN LinGen^{1,2,4}, DING ZeMin³ & GE YanLin^{1,2,4}

¹ Institute of Thermal Science and Power Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

² Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of Green Chemical Equipment, Wuhan 430205, China;

³ College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

⁴ School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Heterostructure-based thermionic devices have high theoretical conversion efficiency and broad application prospects in the efficient utilization of solar energy. However, the irreversibility in actual heterostructure-based thermionic devices can decrease the performance of the devices. In this study, a finite time thermodynamic model of a solar-driven single-stage thermionic generator is established. The model includes a concentrated solar power, solid-state thermionic generator, and heat dissipation modules. According to the law of charge conservation and the first law of thermodynamics, the temperatures of the absorber and electrodes are calculated. The effects of output voltage, Schottky barrier, and concentration ratio on the optimal performance are studied. The results show that there are optimal output voltage and Schottky barrier to maximize the efficiency; when the concentration ratio increases, the power and efficiency increase and then decrease. Further, the optimal concentration ratios, i.e., $C_{\eta,\max} \approx 1700$ and $C_{P,\max} \approx 2250$, can maximize the efficiency and power reach, respectively. In this study, the results can provide some theoretical guidance for the optimal design of practical solar-driven thermionic devices.

finite time thermodynamics, solar energy, thermionic generator, van der Waals heterostructure, thermodynamic optimization

doi: [10.1360/SST-2021-0260](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0260)