光子增强热离子太阳能电池的性能研究

廖天军¹, 林比宏^{2*}

1. 重庆理工大学理学院, 重庆 400054;

2. 华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 361021

* E-mail: bhlin@hqu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-10; 接受日期: 2019-03-15; 网络版发表日期: 2019-06-04

国家自然科学基金(批准号: 11675132, 11775084)和福建省自然科学基金(批准号: 2016J01021)资助项目

摘要 基于光子增强热离子太阳能电池(PETSC)的模型, 考虑温度对半导体禁带宽度的影响, 应用半导体物理学和不可逆热力学理论, 研究PETSC的优化性能特性. 分析阴极的电子亲和势和阳极的功函数等重要参数对PETSC太阳能电池性能的影响, 结果表明, 由于半导体硅材料的禁带宽度与阴极温度有关, 则可同时对电子亲和势和阳极的功函数进行优化, 因此PETSC的最大效率可达37%. 本文所获得的一些结论可为实际PETSC的设计和优化运行提供理论依据.

关键词 光子增强热离子, 太阳能电池, 优化性能

1 引言

2010年, 斯坦福大学研究团队研发出一种太阳能光电转换的新工艺, 该工艺是在GaN阴极材料表面镀一层具有负电子亲和势的铯材料, 使其能同时利用太阳的光和热来激发电子, 电子通过真空间隙后被阳极收集, 再通过外部负载回到阴极构成回路, 从而实现电能输出, 这种新工艺被称为“光子增强热离子太阳能电池(photon-enhanced thermionic emission solar cell, PETSC)”^[1,2]. 研究结果表明在1000倍聚光条件下, 理想PETSC的最大效率可达43%. Segev等人^[3]进一步揭示了PETSC的工作机理, 分析了PETSC工作电压对半导体阴极中的导带电子浓度、温度和电流密度以及对转换效率的影响, 他们进一步构造了由3个PETSC串联构成的高性能等温太阳能电池的理论模型, 讨论了该模

型的输出电压、聚光度、阳极功函数和半导体禁带宽度等参数对PETSC的影响^[4]. Segev等人^[5]还研究了PETSC的损失机制和背表面场效应对PETSC性能的影响. Su等人^[6]对基于p型半导体硅阴极材料的PETSC进行了数值模拟研究, 构建两个极板的热平衡方程, 在不同禁带宽度和电子亲和势的条件下, 数值求解两个极板的温度和电流密度, 并得到最大效率及其优化运行条件. 同时, Su等人^[7]还研究了空间电荷效应对PETSC的最大效率和优化设计的影响, 结果表明, 在微尺度下空间电荷效应对PETSC的性能有较大影响. Wang等人^[8]研究了在纳米真空间隙下, 量子隧穿效应对PETSC性能特性的影响, 得出了量子隧穿效应可以增强PETSC的性能的结论. Reck和Hansen^[9]对PETSC进行了热力学分析, 提出了PETSC-卡诺热机热耦合系统模型以提高太阳能转换效率. 唐伟东等人^[10]提出利用

引用格式: 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,

Liao T J, Lin B H. Investigation on the performance of a photon-enhanced thermionic emission solar cell (in Chinese). Sci Sin Tech, doi: [10.1360/N092018-00342](https://doi.org/10.1360/N092018-00342)

指数掺杂GaAs材料作为PETSC阴极, 基于能量守恒及电子扩散漂移发射模型, 计算了指数掺杂GaAs阴极PETSC的理论转化效率. Varpula和Prunnila^[11]考虑了电子扩散、非均匀的光生载流子的产生以及体积和表面复合对PETSC的性能的影响^[12].

尽管国内外学者已对PETSC展开了广泛的研究, 但对禁带宽度与阴极温度的依赖关系如何影响PETSC的性能这一重要的实际问题, 目前文献报道较少^[11,12], 因此, 需要对其继续展开研究. 本文将着重考虑阴极温度对半导体禁带宽度的影响这一实际问题, 构建新的PETSC数学模型, 应用半导体物理学和不可逆热力学理论研究PETSC的优化性能特性及其相应的运行条件, 得到一些可为实际系统的设计和优化运行提供理论依据的新结论.

2 理论模型

PETSC由太阳能聚光器、阴极、阳极、微尺度真空间隙和外部负载组成, 如图1(a)所示, 其中, 由于真空间隙大于维恩位移定律所决定的热波长, 从而两极板之间的辐射热传递决定于远场黑体辐射效应, 阴极和阳极分别由p型半导体硅材料和具有低功函数的金属材料构成, 为了减小阴极功函数对电子的束缚, 提高电子发射效率, 将其表面喷涂一层具有负电子亲和势的氧化铯材料, T_C 和 T_A 分别为阴极和阳极的工作温度, σT_0^4 是环境向阴极的黑体辐射能流, $T_0=300\text{ K}$ 为环境温度, $\sigma=5.67\times 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$ 则为斯特藩-玻尔兹曼常数, σT_C^4 和 σT_A^4 分别为阴极和阳极的黑体辐射能流损失.

PETSC的工作原理是: 当太阳能聚光器将太阳辐射能流 P_{sun} 聚焦在阴极表面时, 阴极价带中的电子吸收能量大于禁带宽度的光子被激发到导带, 并同时被热化而达到导带底, 具有较高平均动能的电子向阴极表面运动, 若到达阴极表面电子的动能大于半导体的电子亲和势, 将被激发到真空中而被阳极吸收, 再通过外部负载形成电流, 从而实现功率输出. 由于阴极和阳极板均具有较高的温度, 将产生黑体辐射能流损失. 另外, 电子从阴极传输到阳极时, 阴极和阳极将分别释放和吸收热流率 q_C 和 q_A . 图1(b)为PETSC的能带示意图, 其中, E_{vacuum} , χ , E_c , E_v , E_F , E_g 和 $E_{F,n}$ 分别为真空能级、电子亲和势、导带底能级、价带顶能级、费米能级、禁带宽度和电子准费米能级, ϕ_C 和 ϕ_A 分别为阴极和阳极的功函数, V 和 e 分别为PETSC的输出电压和一个单位正电荷的电量, eV 则为PETSC的输出能量.

3 PETSC的功率密度和效率

当PETSC处于稳定工作时, 其阴极半导体光子激发电子浓度 R_s , 光子增强电子-空穴对辐射复合损失 R_r 和阴极热电子发射浓度 R_p 满足如下浓度平衡方程^[6,13]:

$$R_s - 2R_r = (J_C - J_A) / e \equiv R_p, \quad (1)$$

式中, J_C 和 J_A 分别为离开阴极和阳极表面的电子电流密度, $2R_r$ 为阴极上下两个表面电子与空穴辐射复合损失^[6]. 基于文献^[4,6], R_s 和 R_r 可以分别表示为^[5]

$$R_s = \int_0^{\lambda_g} \Phi(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

和

图1 (网络版彩图)PETSC的结构(a)和能带(b)示意图

$$R_r \left(\frac{n_{eq} p_{eq}}{np - n_{eq} p_{eq}} \right) = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2 dE}{e^{E/(kT_C)} - 1} \equiv R_0, \quad (3)$$

式中, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数, λ_g 为能量 E_g 的光子所对应的波长, $\Phi(\lambda)$ 为入射光通量, E 为光子能量, $c=3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ 为真空光速, $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ 为普朗克常数, n 和 p 分别为非平衡状态下电子和空穴的浓度, $n_{eq} = N_C e^{-(E_C - E_F)/(kT_C)}$ 和 $p_{eq} = N_V e^{-(E_F - E_V)/(kT_C)}$ 分别为热平衡状态下电子和空穴的浓度, $N_C = 2(2\pi m_n^* kT_C / h^2)^{3/2}$ 和 $N_V = 2(2\pi m_p^* kT_C / h^2)^{3/2}$ 分别为导带和价带状态密度, $m_n^* = 1.08 m_e$ 和 $m_p^* = 0.56 m_e$ 分别为电子和空穴的有效质量, $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 为真空静止电子质量. 半导体硅材料的禁带宽度 E_g 与阴极温度 T_C 的依赖关系为^[11,12]

$$E_g = 1.17 - \frac{4.73 \times 10^{-4} T_C^2}{T_C + 636}. \quad (4)$$

离开阴极的电流密度可以表示为^[1]

$$J_C = en \sqrt{kT_C / (2\pi m_n^*)} \exp[-\chi / (kT_C)]. \quad (5)$$

阴极板的发射电流密度可由Richardson-Dushman方程描述^[13-22]:

$$J_A = A_A T_A^2 \exp[-\phi_A / (kT_A)], \quad (6)$$

式中, $A_A = 120 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ 为阳极的Richardson常数.

假设电子的过剩浓度 δn 与空穴的过剩浓度 δp 相等, 因此, 光激发后和无光照条件下, 它们可表示为^[3,6]

$$\delta n = \delta p = n - n_{eq} = p - p_{eq}. \quad (7)$$

联立式(1)-(8)可得关于 δn 的二次方程^[7]:

$$A\delta n^2 + B\delta n + C = 0, \quad (8)$$

式中, $A = \frac{2R_0}{n_{eq} p_{eq}}$,

$$B = \frac{2R_0(n_{eq} + p_{eq})}{n_{eq} p_{eq}} + \sqrt{\frac{kT_C}{2\pi m_n^*}} \exp\left(\frac{-\chi}{kT_C}\right)$$

$$\text{和 } C = n_{eq} \sqrt{\frac{kT_C}{2\pi m_n^*}} \exp\left(\frac{-\chi}{kT_C}\right) - \frac{J_A}{e} - R_s.$$

阴极单位面积的光子增强辐射能流损失为^[3]

$$P_r = \left(\frac{np - n_{eq} p_{eq}}{n_{eq} p_{eq}} \right) \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^3}{e^{E/(kT_C)} - 1} dE. \quad (9)$$

考虑阴极板与环境之间的辐射热流损失、光子增强辐射热流损失、两电极之间的辐射热流损失以及由于电子的传输所造成的离开阴极的热流率, 则阴极的热平衡方程可表示为^[6]

$$\begin{aligned} P_{\text{sun}} - \sigma(T_C^4 - T_0^4) - 2P_r \\ = [(\phi_C + 2kT_C)J_C - (\phi_C + 2kT_A)J_A] / e \\ + \sigma(T_C^4 - T_A^4), \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $(\phi_C + 2kT_C)$ 是阴极表面逸出的电子所携带的热流率, $(\phi_C + 2kT_A)$ 是阳极表面逸出的电子到达阴极所携带的热流率, $2kT_C$ 和 $2kT_A$ 分别是阴极和阳极中电子越过势垒后的平均热动能, 阴极的功函数 ϕ_C 可近似表示为^[5]

$$\phi_C = E_g + \chi - E_F. \quad (11)$$

对于掺杂硼的p型半导体硅材料, 通过电荷守恒可求出平衡态下的费米能级 E_F ^[6]:

$$N_C e^{-(E_g - E_F)/(kT_C)} + \frac{N_D}{1 + 4e^{(E_D - E_F)/(kT_C)}} = N_V e^{-E_F/(kT_C)}, \quad (12)$$

式中, N_D 和 E_D 分别为p型半导体的受主掺杂浓度和电离能.

假设阳极与环境之间服从牛顿传热定律^[6], 并考虑由于电子传输造成进入阳极的热流率, 则阳极的热平衡方程可表示为^[5]

$$\begin{aligned} [(\phi_A + 2kT_C)J_C - (\phi_A + 2kT_A)J_A] / e \\ + \sigma(T_C^4 - T_A^4) + P_r = U(T_A - T_0), \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $(\phi_A + 2kT_A)$ 是阳极表面逸出的每个电子所携带的热流率, $(\phi_A + 2kT_C)$ 是离开阴极的电子到达阳极所携带的热流率, U 为阳极和环境之间热传导率.

基于以上讨论, PETSC的功率密度和效率可分别表示为

$$P = V(J_C - J_A), \quad (14)$$

和

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{sun}}}. \quad (15)$$

当输出电压 V 等于平带电压 $(\phi_C - \phi_A)/e$ 时, PETSC在最佳状态运行^[11]. 给定相关参数时, 联立式(1)-(13)可数值求解出 δn , T_C 和 T_A , 将 δn 代入式(7)可得到 n , 将 n , T_C 和 T_A 代入式(14)和(15)即可求得PETSC的功率密度和效率.

4 性能特性

利用式(15)可绘制出PETSC的效率 η 随电子亲和势 χ 和阳极功函数 ϕ_A 变化的三维曲面图, 如图2所示, 其中, 聚光度 $f=1000$, 电离能 $E_D=0.044$ eV, 热传导率 $U=0.2$ W cm⁻² K⁻¹和受主掺杂浓度 $N_D=10^{18}$ cm⁻³. 为了与文献[6]的结果直接比较, 上述参数的取值与文献[6]相关参数的取值相同. 图2显示出PETSC的效率 η 随 χ 和 ϕ_A 的变化不是单调的, 对于给定的参数, PETSC存在最大效率及其相应的最优电子亲和势和阳极功函数. 利用数值求解可以得到最大效率 $\eta_{\max}=36.9\%$ 及PETSC系统工作在最大效率时 χ 和 ϕ_A 的优化值 $\chi_\eta=1.16$ eV和 $\phi_{A,\eta}=0.71$ eV. 对 χ 和 ϕ_A 存在最大效率的主要原因是: 当给定参数 χ 时, 根据PETSC电压的定义 $eV=\phi_C-\phi_A$ 可知, 输出电压 V 是阳极功函数 ϕ_A 的单调递减函数, 而根据式(6)可知, 净电流密度 J 随 ϕ_A 的增加而呈指数型增加, 其导致在PETSC的电压随电流密度变化的伏安特性曲线中存在一个最大功率密度点; 此外, 给定参数 ϕ_A 时, 输出电压 V 是电子亲和势 χ 的单调递增函数, 然而阴极材料表面逸出的电子数随 χ 的增加而减小, J 随之减小, 同样导致在PETSC的伏安特性曲线中存在一个最大功率密度点. 因此, 可以同时优化 χ 和 ϕ_A 两个参数得到PETSC的最大效率 $\eta_{\max}$. 需要指出的是应用目前材料

图2 (网络版彩图)效率 η 随电子亲和势 χ 和阳极功函数 ϕ_A 变化的三维曲面图

技术, 阳极板的功函数最小可以降低到0.9 eV, 而本文 ϕ_A 的优化值为0.71 eV, 这说明需要发展新材料, 进一步降低阳极板的功函数以提高PETSC的优化性能特性.

优化阳极功函数 ϕ_A , 可得到PETSC的优化效率 η_{opt} 和阳极优化功函数 $\phi_{A,\text{opt}}$. 阴极和阳极的优化运行温度 $T_{C,\text{opt}}$ 和 $T_{A,\text{opt}}$ 以及优化电压 V_{opt} 和电流密度 J_{opt} 随 χ 变化的关系曲线, 如图3所示, 其中, PETSC运行在最大效率 $\eta_{\max}$ 时, χ 和 ϕ_A 的取值为 χ_η 和 $\phi_{A,\eta}$, T_C 和 T_A 的取值为 $T_{C,\eta}$ 和

图3 (网络版彩图)PETSC的优化效率 η_{opt} 和阳极功函数 $\phi_{A,\text{opt}}$ (a), 阴极和阳极的优化运行温度 $T_{C,\text{opt}}$ 和 $T_{A,\text{opt}}$ (b), 优化电压 V_{opt} 和电流密度 J_{opt} (c)随电子亲和势 χ 变化的曲线

$T_{A,\eta}$, V 和 J 的取值为 V_η 和 J_η . 通常, 在阴极和阳极材料表面喷涂一层具有负电子亲和势材料(如碱金属铯), 可以调控阴极的电子亲和势和阳极的功函数^[1], 从而使 χ 和 ϕ_A 的值等于 χ_η 和 $\phi_{A,\eta}$. 利用 $T_{C,\eta}$ 和式(4), 可以得到PETSC运行在最大效率 $\eta_{\max}$ 时, E_g 的取值约为0.80 eV. 从图3(a)可以看出 $\phi_{A,\text{opt}}$ 随 χ 的增加而单调递减. 从图3(b)可以看出阴极优化运行温度 $T_{C,\text{opt}}$ 随 χ 的增加先减小后增加, 而阳极优化运行温度 $T_{A,\text{opt}}$ 随 χ 的增加而减小, 这是由能量平衡方程(10)和(13)所决定的. 从图3(c)可以看出 V_{opt} 随 χ 的增加而单调递增, 而 J_{opt} 随 χ 的增加先增加后减小, 这是由 $\phi_{A,\text{opt}}$, $T_{C,\text{opt}}$ 和 $T_{A,\text{opt}}$ 与 χ 的依赖关系共同决定的. 从图3(c)还可以看出PETSC是一种工作电压较小而电流密度较大的光电转化器件, 所以单个PETSC驱动负载的能力较弱, 在实际设计PETSC电力系统时, 单个PETSC的电极面积要尽可能小, 同时需要将多个PETSC串联起来以提高输出电压和电能.

虽然本文与文献[6]的物理模型和相关参数取值相同, 但不同之处在于本文主要针对器件的参数优化设

计方案方面, 文献[6]忽略禁带宽度与温度的关系, 将阳极功函数这一关键器件参数固定为0.9 eV, 同时优化半导体禁带宽度和电子亲和势优化得到器件最大效率 $\eta_{\max}$, 而本文则考虑禁带宽度对阴极温度的依赖性这一实际的问题, 同时优化阳极功函数和电子亲和势而获得器件最大效率 $\eta_{\max}$. 本文和文献[6]在最大效率时一些重要性能参数的优化值, 如表1所示. 对比本文和文献[6]的研究结果可以看出, 考虑温度对阴极板禁带宽度的影响, 并对阳极功函数优化的情况下, 本文的 $\eta_{\max}$, $\phi_{A,\eta}$, $E_{g,\eta}$ 和 V_η 的取值有一定下降, 而 $T_{C,\eta}$, $T_{A,\eta}$, J_η 和 χ_η 的取值则有一定增加. 可见, 考虑温度对半导体禁带宽度的影响对PETSC最大效率的影响不显著, 但对优化的 $\phi_{A,\eta}$, $E_{g,\eta}$, V_η , J_η 和 χ_η 值影响是显著的. 因此, 本文对PETSC模型的修正, 更有益于实际PETSC系统的优化设计, 因此, 在PETSC模型中, 应该考虑阴极板禁带宽度对温度的依赖性.

图4为PETSC的最大功率密度 $P_{\max}$ 和最大效率 $\eta_{\max}$ 及相对应的优化运行条件随聚光度 f 变化的关系曲线. 从图4(a)可看出PETSC的 $\eta_{\max}$ 是聚光度 f 的单调递减函

表1 本文和文献[6]在最大效率时重要参数的取值

研究结果	$\eta_{\max}$	$E_{g,\eta}$	V_η	$T_{C,\eta}$	$T_{A,\eta}$	J_η	χ_η	$\phi_{A,\eta}$
本文	0.369	0.803	0.916	1190	553	40.5	1.16	0.71
文献[6]	0.379	1.36	1.21	1170	518	28.2	1.01	0.90

图4 (网络版彩图) PETSC的性能和相对应的优化运行条件随聚光度 f 变化的曲线. (a) PETSC的最大功率密度 $P_{\max}$ 和效率 $\eta_{\max}$; (b) 阴极和阳极的优化运行温度 $T_{C,\eta}$ 和 $T_{A,\eta}$; (c) 优化电子亲和势 χ_η 和阳极功函数 $\phi_{A,\eta}$; (d) 目标函数 Z

数, 而 $P_{\max}$ 随 f 的增加而增加. 因此, 应该同时兼顾功率和效率, 显然以 $P_{\max}$ 和 $\eta_{\max}$ 的乘积为目标函数 $Z=P_{\max}\eta_{\max}$, 则存在一个使目标函数 Z 最大的优化聚光度 f_m . 图4(b)可以看出在高聚焦条件下, 阴极和阳极两个极板材料的优化运行温度较高, 会影响PETSC的使用寿命, 同时增加了设计聚光器的复杂性和成本. 图4(c)显示 χ_η 和 $\phi_{A,\eta}$ 随 f 的增加而增加, 其说明 f 越大, 采用相关工艺越容易实现具有较高功函数的阳极材料. 图4(d)显示了 $Z_{\max}$ 所对应的最优聚光度 $f_m>1000$, 则对应的优化参数 χ_η , $\phi_{A,\eta}$, $T_{C,\eta}$ 和 $T_{A,\eta}$ 的值都较高. 因此, 在设计实际的系统时, 需要兼顾PETSC的功率和效率、材料选择、成本以及系统使用寿命的问题.

5 结论

本文建立了考虑PETSC的阴极板禁带宽度温度依赖性的新PETSC模型, 通过数值模拟方法研究PETSC的优化性能特性, 研究结果表明在给定聚光度等参数和考虑温度对半导体禁带宽度影响时, 可以优化电子亲和势和阳极功函数, 使得PETSC获得最大效率. 同时, 将本文所得结果与相关研究作了对比, 研究发现考虑阴极板禁带宽度温度的依赖性是很重要的. 另外, 讨论了PETSC最大功率密度和效率以及优化运行条件随聚光度变化的情况. 本文所得到的一些结果对于设计实际PETSC以及太阳能的利用具有一定理论指导意义.

参考文献

- Schwede J W, Bargatin I, Riley D C, et al. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems. *Nat Mater*, 2010, 9: 762–767
- Schwede J W, Sarmiento T, Narasimhan V K, et al. Photon-enhanced thermionic emission from heterostructures with low interface recombination. *Nat Commun*, 2013, 4: 1576
- Segev G, Rosenwaks Y, Kribus A. Efficiency of photon enhanced thermionic emission solar converters. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2012, 107: 125–130
- Segev G, Kribus A, Rosenwaks Y. High performance isothermal photo-thermionic solar converters. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2013, 113: 114–123
- Segev G, Rosenwaks Y, Kribus A. Loss mechanisms and back surface field effect in photon enhanced thermionic emission converters. *J Appl Phys*, 2013, 114: 044505
- Su S, Zhang H, Chen X, et al. Parametric optimum design of a photon-enhanced thermionic solar cell. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2013, 117: 219–224
- Su S, Wang Y, Liu T, et al. Space charge effects on the maximum efficiency and parametric design of a photon-enhanced thermionic solar cell. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2014, 121: 137–143
- Wang Y, Liao T, Zhang Y, et al. Effects of nanoscale vacuum gap on photon-enhanced thermionic emission devices. *J Appl Phys*, 2016, 119: 045106
- Reck K, Hansen O. Thermodynamics of photon-enhanced thermionic emission solar cells. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 023902
- 唐伟东, 杨文正, 杨阳, 等. 指数掺杂GaAs阴极光子增强热电子发射型太阳能转换器转化效率理论计算. *光子学报*, 2013, 42: 1–6
- Varpula A, Prunnila M. Diffusion-emission theory of photon enhanced thermionic emission solar energy harvesters. *J Appl Phys*, 2012, 112: 044506
- Varpula A, Tappura K, Prunnila M. Si, GaAs, and InP as cathode materials for photon-enhanced thermionic emission solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2015, 134: 351–358
- 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
- Li W, Wang H, Hao Y. A PVTC system integrating photon-enhanced thermionic emission and methane reforming for efficient solar power generation. *Sci Bull*, 2017, 62: 1380–1387
- 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
- Chen L, Ding Z, Sun F. Performance analysis of a vacuum thermionic refrigerator with external heat transfer. *J Appl Phys*, 2010, 107: 104507
- Wang Y, Su S, Lin B, et al. Parametric design criteria of an irreversible vacuum thermionic generator. *J Appl Phys*, 2013, 114: 053502
- 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

- 19 Ding Z M, Chen L G, Ge Y L, et al. Performance analysis for an irreversible combined thermionic-thermoelectric generator with finite rate heat transfer. *Environ Eng Manag J*, 2015, 14: 97–108
- 20 Ding Z M, Chen L G, Sun F R. Optimum performance analysis of a combined thermionic-thermoelectric refrigerator with external heat transfer. *J Energy Inst*, 2015, 88: 169–180
- 21 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: 033901
- 22 Chen L G, Ding Z M, Zhou J L, et al. Thermodynamic performance optimization for an irreversible vacuum thermionic generator. *Eur Phys J Plus*, 2017, 132: 293

Investigation on the performance of a photon-enhanced thermionic emission solar cell

LIAO TianJun¹ & LIN BiHong²

¹ School of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

² College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China

Based on the model of a photon-enhanced thermionic emission solar cell (PTESC), we investigate the optimum performance of the PTESC by using the theory of semiconductor physics and the irreversible thermodynamics. The effects of the electron affinity of the cathode and the work function of anode on the PTESC are analyzed. The results show that because the bandgap width of semiconductor silicon is related to the cathode temperature, the electron affinity of the cathode and the work function of anode can be optimized simultaneously and the maximum efficiency of 37% can be obtained. The new results obtained here will provide some theoretical guidance for further understanding the performance and operation of practical system.

photon-enhanced thermionic, solar cell, optimal performance

doi: [10.1360/N092018-00342](https://doi.org/10.1360/N092018-00342)