

## 新型高效热离子功率器件的性能特性研究

廖天军 林比宏 王宇珩

Performance characteristics of a novel high-efficient graphene thermionic power device

Liao Tian-Jun Lin Bi-Hong Wang Yu-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 187901 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190882

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190882>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

锁频锁相的高功率微波器件技术研究

Review on high power microwave device with locked frequency and phase

物理学报. 2018, 67(8): 088402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172684>

高效无空穴传输层碳基钙钛矿太阳能电池的制备与性能研究

Preparation and performance of high-efficient hole-transport-material-free carbon based perovskite solar cells

物理学报. 2018, 67(22): 228801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181457>

高性能石墨烯霍尔传感器

High performance graphene Hall sensors

物理学报. 2017, 66(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.218501>

基于原位等离子体氮化及低压化学气相沉积-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>栅介质的高性能AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HEMTs器件的研究

High-performance AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HEMT device based on in situ plasma nitriding and low power chemical vapor deposition Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> gate dielectrics

物理学报. 2017, 66(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.197301>

石墨烯射频器件研究进展

Research progress of graphene radio frequency devices

物理学报. 2017, 66(21): 218502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.218502>

加载功率与壳温对AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>高速电子迁移率晶体管器件热阻的影响

Influence of power dissipation and case temperature on thermal resistance of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high-speed electron mobility transistor

物理学报. 2016, 65(7): 077201 <https://doi.org/10.7498/aps.65.077201>

# 新型高效热离子功率器件的性能特性研究\*

廖天军<sup>1)</sup> 林比宏<sup>2)†</sup> 王宇琿<sup>1)</sup>

1) (重庆理工大学物理与能源系, 重庆 400054)

2) (华侨大学物理系, 厦门 361021)

(2019年6月6日收到; 2019年7月1日收到修改稿)

应用固体物理和不可逆热力学理论, 研究新型高效石墨烯热离子热电功率器件的性能特性. 通过数值求解器件高温和低温端的能量平衡方程, 确定器件阴极板和阳极板的温度; 分析输出电压和阴极板功函数对器件的伏安特性及两个极板温度的影响, 确定器件在最大功率密度和最大效率时的参数特性; 折衷考虑功率密度和效率, 给出参数的优化取值区间; 分析了高温热源温度对优化性能的影响. 本文所得结果可为热离子能量转换器件的研制提供理论指导.

**关键词:** 热离子功率器件, 石墨烯, 功函数, 性能优化**PACS:** 79.40.+z, 85.80.Fi, 84.30.Jc, 65.80.Ck**DOI:** 10.7498/aps.68.20190882

## 1 引言

开发热电源转换器件是解决能源紧缺和环境污染的重要途径<sup>[1,2]</sup>. 热离子功率器件 (TPD) 是利用材料表面热电子发射将热能转化为电能的一种装置, 它具有体积小、功率密度大、热电转换效率高等特点, 在民用、军事、航空航天等领域具有重要应用, 它可利用诸如汽车尾气、工业余热、矿物燃料、太阳能、核能等多种形式的热源驱动, 实现热电转换, 其中以核燃料为热源的 TPD 已应用于星际考察等空间技术. TPD 主要由阴极和阳极组成, 两个电极被真空间隙隔开<sup>[2-7]</sup>. 阴极经外部高温热源加热后温度升高, 其内部的电子获得能量, 一部分电子可以克服金属表面“势垒”的障碍, 摆脱金属原子核的束缚, 逸出金属表面, 再通过真空间隙聚集在阳极, 电子通过外部负载回到阴极, 构成回路, 从而把加热阴极的部分热能转变成负载

上消耗的电能<sup>[4,5]</sup>. TPD 的热电转换效率的上限由卡诺效率所决定, 阴极和阳极的温度相当于进出口温度<sup>[8]</sup>. 基于热离子发射理论, 近年来有人提出聚光 TPD 太阳能电池<sup>[9-13]</sup>、聚光石墨烯 TPD 太阳能电池的物理模型<sup>[14]</sup>和聚光多层石墨烯 TPD 太阳能电池的物理模型<sup>[15]</sup>.

石墨烯具有奇特的光学、电学、力学特性, 在材料学、微纳加工和能源存储与转换等方面具有广阔应用前景. 石墨烯在高温下工作的 TPD 的热离子发射性能优于金属材料, 因此, 石墨烯更适合作为 TPD 的阴极材料. Liang 和 Ang<sup>[16]</sup>提出了新型高效石墨烯 TPD 的物理模型, 给出了器件的工作机理, 研究了单层石墨烯的热离子发射现象, 导出功率密度和效率的解析表达式, 获得了许多有利于热能开发与利用的新结论, 为石墨烯 TPD 的发展奠定了理论基础. Liang 等<sup>[17]</sup>还设计了一类采用范德瓦耳斯异质结构夹在两个石墨烯电极之间的固态 TPD, 研究发现高温热源的温度可在 400—500 K

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11675132, 11775084)、福建省自然科学基金 (批准号: 2016J01021) 和重庆理工大学科研启动项目 (批准号: 2019ZD22) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [bhlin@hqu.edu.cn](mailto:bhlin@hqu.edu.cn)

范围内实现高能量转换效率. Mishra 等<sup>[18]</sup>提出了一种单层石墨烯热电子发射(忽略衬底效应)的物理模型,并探讨了其作为 TPD 的阴极的应用,且推导出关于单层石墨烯热离子激发电流密度的解析式,研究发现热离子激发电流是温度、功函数和费米能级等参数的函数,该公式不同于传统的 Richardson-Dushman 方程. Mishra 等<sup>[19]</sup>还研究了有限温度下多层石墨烯热电子发射的理论模型,并论证了其作为阴极的热离子能量转换方案的可行性.

尽管国内外学者深入研究了石墨烯 TPD 的工作机理和性能特性,而对不可逆因素对器件优化运行的影响和参数的优化设计方面的研究还相对较少. 本文应用固体物理和不可逆热力学理论,研究 TPD 的性能特性,推导出 TPD 的功率密度和效率所满足的表达式,研究 TPD 的伏安特性以及阴极板温度与输出电压的依赖关系,综合功率密度和效率随输出电压与集电极功函数变化的情况,给出参数的优化设计策略. 探讨外部热源的温度对器件优化运行的影响.

## 2 石墨烯 TPD 的功率密度和效率

石墨烯 TPD 的结构示意图见图 1, 其中石墨烯材料覆盖在金属钨表面构成阴极板,而阳极由金属钨材料构成,  $T_C$  和  $T_A$  分别为两个极板的温度,  $T_H$  和  $T_E$  分别为高温热源和环境的温度,  $Q_H$  为高温热源与阴极板之间的热传递量,  $Q_L$  为阳极与环境之间的热传递量. 石墨烯 TPD 的工作机理是高温热源通过导热材料与阴极接触,使其获得高温,极板内部的一部分电子获得能量而逸出表面,然后通过真空间隙被阳极收集,产生热离子激发电流密度  $J_C$ , 阳极板吸收来自阴极的热电子和光子,导致其

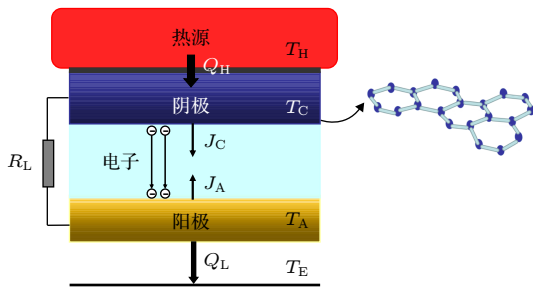


图 1 石墨烯 TPD 示意图

Fig. 1. Schematic diagram of a graphene-based TPD.

温度升高,产生反向热离子激发电流密度  $J_A$ . 由于  $J_C > J_A$ , 净电子流将通过外部负载  $R_L$  回到阴极,构成电子循环回路,实现热能能量转换. 值得注意的是金属钨具有较高功函数(约 4.5 eV),应用目前的材料工艺技术,在阳极板表面喷涂负电子亲和势材料铯原子,可将其功函数降至 1.5 eV,从而提高 TPD 输出电压<sup>[4]</sup>. 采用以上所述的相同工艺也可降低石墨烯功函数,从而提高阴极板热离子激发电流的能力<sup>[13]</sup>.

在图 1 的模型中, TPD 的热电转换效率和功率密度可分别表示为<sup>[16,17]</sup>

$$\eta = P/Q_H \quad (1)$$

和

$$P = Q_H - Q_L = VJ, \quad (2)$$

式中  $V = (\Phi_C - \Phi_A)/q$  是 TPD 的输出电压,  $\Phi_C$  和  $\Phi_A$  分别是阴极和阳极的功函数,  $q$  是一个单位正电荷的电量,  $J = J_C - J_A$  是净电流密度. 阴极表面激发的电流密度  $J_C$  可表为<sup>[16,17]</sup>

$$J_C = A^* T_C^3 \exp[-(\Phi_C - E_F)/(k_B T_C)], \quad (3)$$

其中,  $E_F$  是石墨烯费米能级,  $A^* = qk_B^3/(\pi\hbar^3 v_F^2) = 0.01158 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-3}$  是修正 Richardson-Dushman (RD) 常数,  $\hbar = h/(2\pi)$  是约化普朗克常数,  $k_B$  是玻尔兹曼常数,  $v_F \approx 10^8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  为无质量的费米子的费米速度.

阳极的热离子激发电流密度  $J_A$  由传统 RD 方程决定<sup>[20-22]</sup>, 即:

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

其中,  $A = 4\pi qm k_B^3/h^3 = 120 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$  是一般 RD 常数,  $m$  为静止电子质量.

根据图 1 和热力学第一定律,两个极板所满足的能量平衡方程可分别表示为<sup>[17,20]</sup>

$$Q_H = [J_C (\Phi_C + 3k_B T_C) - J_A (\Phi_C + 2k_B T_A)]/q + \varepsilon\sigma (T_C^4 - T_A^4) \quad (5)$$

和

$$Q_L = [J_C (\Phi_A + 3k_B T_C) - J_A (\Phi_A + 2k_B T_A)]/q + \varepsilon\sigma (T_C^4 - T_A^4), \quad (6)$$

其中,  $\varepsilon\sigma(T_C^4 - T_A^4)$  为两个极板之间的辐射热损失,  $\varepsilon = 1/(\varepsilon_C^{-1} + \varepsilon_A^{-1} - 1)$  两个极板之间的等效热发射率,  $\varepsilon_C$  和  $\varepsilon_A$  分别是阴极和阳极表面的热发射率,  $\sigma$  为斯特潘-玻尔兹曼常数;  $(\Phi_C + 3k_B T_C)$  是阴极表面

逸出的电子所携带的热流率,  $(\Phi_C + 2k_B T_A)$  是阳极表面逸出的电子到达阴极所携带的热流率,  $3k_B T_C$  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;  $(\Phi_A + 2k_B T_A)$  是阳极表面逸出的每个电子所携带的热流率,  $(\Phi_A + 3k_B T_C)$  是离开阴极的电子到达阳极所携带的热流率.

假设 TPD 高温端和低温端的热传递服从牛顿冷却定律,  $Q_H$  和  $Q_L$  表示为<sup>[22]</sup>

$$Q_H = U_H (T_H - T_C) \quad (7)$$

和

$$Q_L = U_L (T_A - T_E), \quad (8)$$

其中,  $U_H$  和  $U_L$  分别为高低温端的热导系数. 给定相关参数如  $\varepsilon$ ,  $T_H$ ,  $T_E$  等, 联立 (2)—(8) 式可数值求解出两极板的温度  $T_C$  和  $T_A$ , 将  $T_C$  和  $T_A$  代入 (1)—(4) 式, 可得石墨烯 TPD 的电流密度、功率密度和效率.

### 3 TPD 的性能特性与优化设计

当给定三个不同阴极功函数时, 阴极和阳极的温度随输出电压变化的关系曲线及伏安特性见

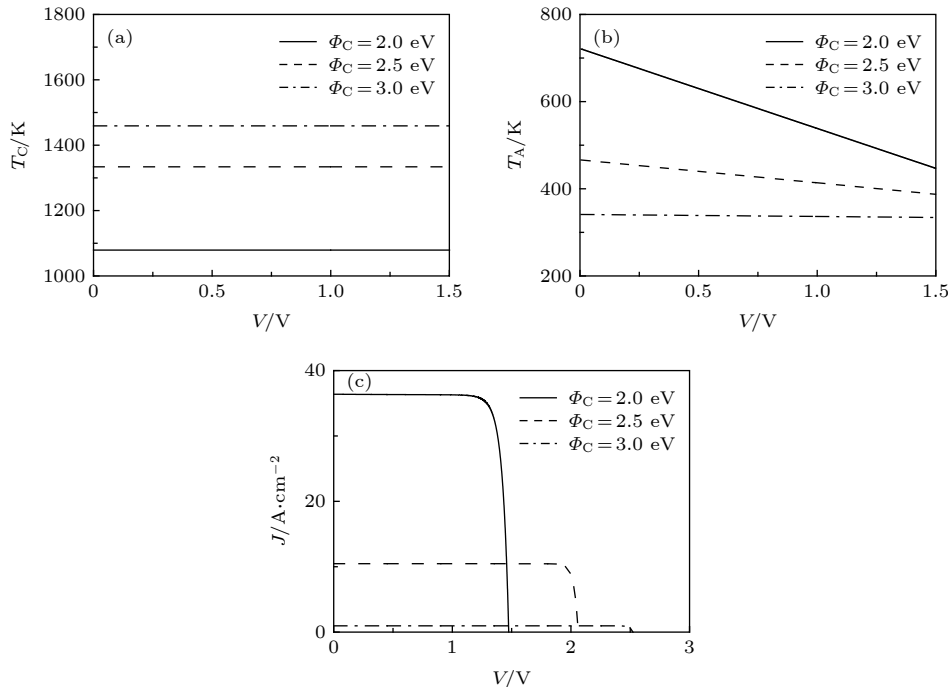


图 2 给定不同  $\Phi_C$  时, (a) 阴极温度和 (b) 阳极温度随输出电压变化曲线及 (c) 伏安特性曲线, 其中  $\varepsilon = 0.20$ ,  $E_F = 0.80$  eV,  $U_H = U_L = 0.2$  W·cm<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>,  $T_H = 1500$  K 和  $T_E = 300$  K

Fig. 2. (a) Curves of the cathode temperature, and (b) the anode temperature varying with the output voltage, and (c) the volt-ampere characteristic for given values of  $\Phi_C$ , where  $\varepsilon = 0.20$ ,  $E_F = 0.80$  eV,  $U_H = U_L = 0.2$  W·cm<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>,  $T_H = 1500$  K, and  $T_E = 300$  K.

图 2, 其中,  $\varepsilon = 0.20$ ,  $U_H = U_L = 0.2$  W·cm<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>,  $T_H = 1500$  K 和  $T_E = 300$  K. 图 2(a) 显示阴极板的工作温度随电压的增加几乎保持不变, 而阴极功函数越大则阴极工作温度越高, 这是由于功函数  $\Phi_C$  越大, 对电子的束缚能力越强, 只有在较高的温度下, 电子才能从极板表面逸出.

图 2(b) 显示阳极温度随着电压的升高而降低, 当  $\Phi_C = 2.0$  eV 时, 阳极板温度的变化最为明显, 从图 2(b) 还可以看出  $\Phi_C$  越大, 阳极温度则越低. 结合图 2(a) 和图 2(b), 可看出  $\Phi_C$  越大, 两个极板的温差  $T_C - T_A$  则越高. 从图 2(c) 可以看出 TPD 的伏安特性与传统太阳能电池的伏安特性曲线相似, 随着输出电压的增加, 电流密度先保持不变, 然后随着电压的进一步升高而迅速降低. 不难发现阴极功函数越高, 回路中的电流密度越小, 这说明降低极板功函数的重要性. 除了上面所述降低极板功函数的方法外, 具有负电子亲和势特征的典型材料还有 III—V 族化合物半导体材料砷化镓、氮化镓及其多元化合物铝镓砷、镉镓氮也可用于降低极板功函数.  $\Phi_C$  的大小为真空能级  $E_V$  与费米能级  $E_F$  之差, 即:  $\Phi_C = E_V - E_F$ , 由此可见调节石墨烯的

费米能级也可降低  $\phi_C$ . 相关研究表明可通过化学掺杂和外加门电压等方法调节石墨烯的费米能级<sup>[16]</sup>. 从图 2(c) 还可以看出 TPD 的电压较小而电流密度较大, 从而只能驱动较小电压的负载, 因此, 在实际设计 TPD 系统时, TPD 的电极面积要尽可能小, 同时需要将多个 TPD 串联以提高输出电压和带负载能力. 当电路短路时,  $V = 0$  V, 可得到 TPD 的短路电流密度  $J_{sc}$ ; 当电路开路时,  $J = 0$  A·cm<sup>-2</sup>, 可得到 TPD 的开路电压  $V_{oc}$ . 在伏安特性曲线中可找到一对优化值  $V_{opt}$  和  $J_{opt}$  使功率密度达到其优化值  $P_{opt}$ , 根据 4 个重要参数  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{opt}$  和  $J_{opt}$  可确定一个表征 TPD 性能高低的填充因子  $FF$ , 即:

$$FF = \frac{J_{opt} V_{opt}}{J_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{opt}}{J_{sc} V_{oc}}, \quad (9)$$

$FF$  的值越接近 1 则表示 TPD 的性能越好.

利用 (1)—(6) 式和数值计算, 可得 TPD 的功率密度和效率随阴极功函数和输出电压变化的等高线图, 如图 3 所示, 其中相关参数的取值与图 2 相同. 给定电压  $V$  时, 根据  $V = (\phi_C - \phi_A) / q$  及 (3) 和 (4) 式可知, 当  $\phi_C$  增大时,  $\phi_A$  随  $\phi_C$  线性增大, 导致热离子激发电流密度  $J_C$  和  $J_A$  减小, 而两个极板的温差  $T_C - T_A$  随  $\phi_C$  的增加而增加, 从而导致净电流密度  $J = J_C - J_A$  随  $V$  的变化存在极值. 另外, 图 2(c) 已证明给定  $\phi_C$  时, 存在优化功率密度  $P_{opt}$  和相应的优化值  $V_{opt}$  和  $J_{opt}$ , 进而可以同时优化阴极功函数和电压得到最大功率密度  $P_{max}$  和效率  $\eta_{max}$ . 尽管如此, 图 3 显示在不同的阴极功函数和输出电压取得最大功率密度和效率, 在取  $\eta_{max}$  时的阴极功函数和输出电压均大于取  $P_{max}$  时的阴极功

函数和电压, 这主要是由 TPD 内外部的不可逆热损失所导致的.

为了进一步确定 TPD 参数的优化区间, 给定阴极功函数, 通过优化电压  $V$ , 可得到优化功率密度  $P_{opt}$  和效率  $\eta_{opt}$ , 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 其中相关参数的取值与图 2 相同. 图 4(a) 和图 4(b) 显示优化功率密度和效率随电压的增加先增加后减小, 当  $\phi_C = \phi_{C,P}$  和  $\phi_C = \phi_{C,\eta}$  时, 功率密度和效率分别达到最大值  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$ , 并且  $\phi_{C,P} < \phi_{C,\eta}$ . 根据  $\phi_{C,P}$  和  $\phi_{C,\eta}$  可确定 TPD 处于  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$  时电压的最佳值为  $V_P$  和  $V_\eta$ . 同时, 图 4 也显示了优化功率密度和效率时功函数的取值均是电压的单调递增函数. 当  $V < V_P$  时,  $P_{opt}$  和  $\eta_{opt}$  随  $V$  的减小而降低; 而当  $V > V_\eta$  时,  $P_{opt}$  和  $\eta_{opt}$  随  $V$  的增加而减小. 因此,  $V_P \leq V \leq V_\eta$  和  $\phi_{C,P} \leq \phi_C \leq \phi_{C,\eta}$  为 TPD 的优化区间. 当电压和功函数处于该优化区间时, 图 4(c) 性能特征曲线中负斜率部分是功率密度和效率的优化区间, 即:  $P_\eta \leq P_{opt} \leq P_{max}$  和  $\eta_P \leq \eta \leq \eta_{max}$ , 其中  $P_\eta$  和  $\eta_P$  分别是  $\eta = \eta_{max}$  时的功率密度和  $P = P_{max}$  时的效率.

表 1 为本文和文献 [23] 在优化性能时重要参数取值的对比, 其中相关参数取值相等. 与文献 [23] 相比, 本文首次同时考虑了石墨烯 TPD 高温和低温两端与热源的不可逆传热对两个极板温度的影响, 对 TPD 的输出电压和两个极板功函数等参数进行了优化分析, 获得了它们的优化值. 因此, 本文对石墨烯 TPD 性能的优化方法更加普适. 从表 1 可看出本文所研究石墨烯 TPD 的性能得到显著提高, 可以获得比文献 [23] 更高的效率, 最大效率可达到 60%. 主要原因是文献 [23] 给定阴极板功函

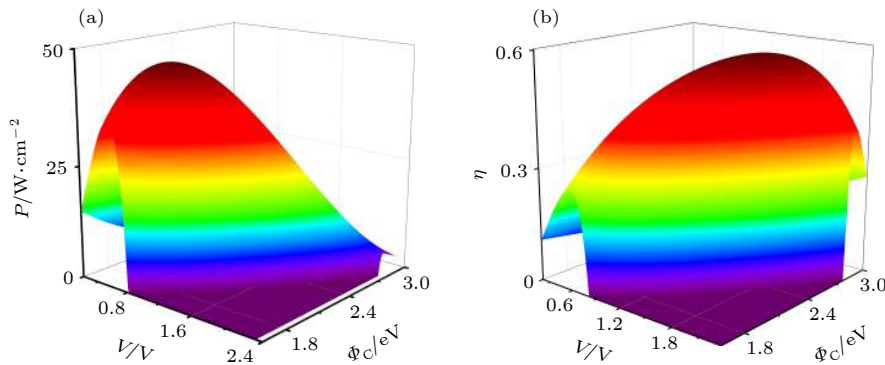


图 3 (a) TPD 的功率密度和 (b) 效率随输出电压和阴极板功函数变化的三维图

Fig. 3. Three-dimensional graphs of (a) the power density and (b) the efficiency varying with the output voltage and the work function of the cathode.

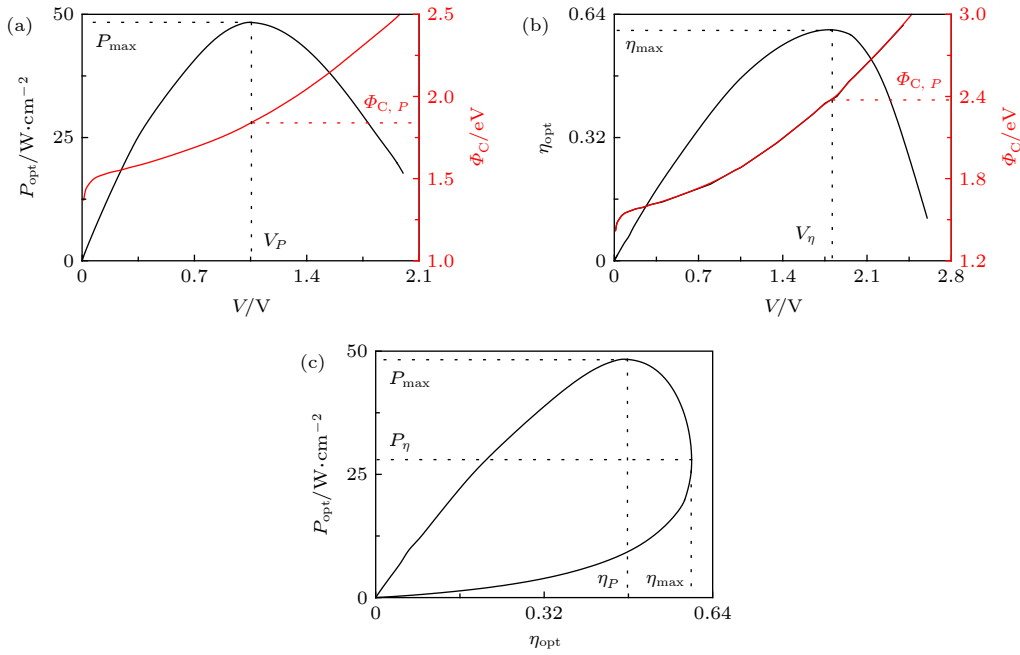


图 4 (a) TPD 的优化功率密度和阴极功函数, (b) 优化效率和阴极功函数随电压变化的曲线以及 (c) 性能特征曲线  $\eta_{opt}$ - $P_{opt}$   
 Fig. 4. Curves of (a) the optimal power density and work function, (b) the optimal efficiency and work function varying with the voltage, and (c) the performance characteristic of TPD.

表 1 本文和文献 [23] 在优化性能时重要参数的取值.

Table 1. Values of key parameters at the optimum performances for the present work and the Ref. [23].

	$\eta_{max}$	$\Phi_{C,\eta}$	$\Phi_{A,\eta}$	$V_\eta$	$P_{max}$	$\Phi_{C,P}$	$\Phi_{A,P}$	$V_P$
本文	0.60	2.38	0.59	1.79	45.5	1.83	0.79	1.04
文献[23]	0.30	3.00	1.75	1.25	0.575	3.00	2.21	0.794

数  $\Phi_C = 3.0$  eV, 对输出电压优化得到  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$ , 而本文是同时优化电压和阴极板功函数, 得到  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$ . 为了与文献 [23] 所获得的结果相比较, 当本文也给定  $\Phi_C = 3.0$  eV 时,  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$  分别为  $2.16 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $0.264$ , 可见所获得的性能优于文献 [23] 的  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$ , 其主要原因是本文根据石墨烯 RD 方程, 修正了阴极和阳极热流表达式, 而文献 [23] 未考虑这方面因素. 表 1 显示本文阳极功函数的优化区间为  $0.59\text{--}0.79$  eV, 在该区间 TPD 可获得理论上的最优性能, 其最大效率是文献 [23] 所给出的最大效率的两倍. 必须指出的是, 在此区间的阳极功函数与阳极功函数最低值  $1.50$  eV 具有较大差异, 而文献 [23] 阳极功函数的优化区间为  $1.75\text{--}2.21$  eV, 比较接近目前实验上可实现的阳极功函数的数值, 所以文献 [23] 的模型在实验上相对更容易实现. 然而, 文献 [23] 对石墨烯 TPD 性能的优化只是局域优化, 没有获得装置的最优理论性能. 本文的优化方法可应用于文献 [23] 的模型

的优化. 随着科学技术的发展, 通过新技术还可以使阳极功函数进一步降低, 从而在实验上实现本文所提出的最优模型. 另外, 最新研究表明在 TPD 内部添加钡和铯蒸汽, 通过改变蒸汽压强, 可调节阴极板功函数 [24].

图 5(a) 显示  $P_{max}$  随  $T_H$  的升高呈线性增加趋势, 而  $\eta_{max}$  随  $T_H$  的升高先增加后减小, 存在优化温度  $T_{H,\eta}$  使  $\eta_{max}$  达到其最大值  $\eta_M$ . 图 5(b) 和图 5(c) 显示  $V_P$ ,  $V_\eta$ ,  $\Phi_{C,P}$  和  $\Phi_{C,\eta}$  是  $T_H$  的单调递增函数, 而优化区间  $V_\eta\text{--}V_P$  和  $\Phi_{C,\eta}\text{--}\Phi_{C,P}$  随  $T_H$  的增加而基本保持不变. 若选择  $T_H < T_{H,\eta}$  作为高温热源的优化运行区间, 在该区间内增加高温热源温度  $T_H$  可显著提高  $P_{max}$ , 但过高的温度将会使 TPD 阴极板的稳定性和使用寿命降低, 也会使 TPD 的效率下降, 在实际设计时, 可选取温度在  $T_{H,\eta}$  附近的高温热源.

图 6 显示  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$  是  $E_F$  的单调递增函数, 因此, 增加  $E_F$  可提升  $P_{max}$  和  $\eta_{max}$ . 需要指出的是, 目前石墨烯的  $E_F$  可调范围为  $0.50\text{--}0.85$  eV [16]. 数

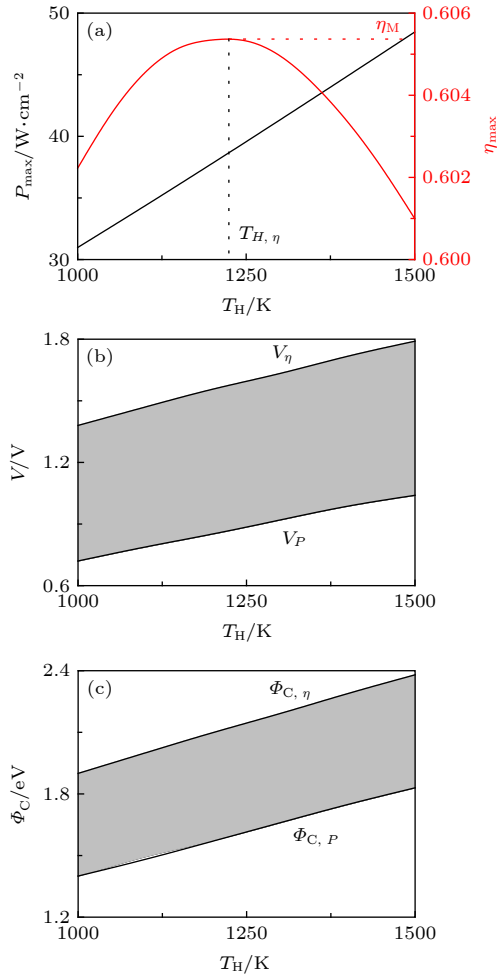


图 5 (a)  $P_{\max}$  和  $\eta_{\max}$ , (b)  $V_P$  和  $V_\eta$ , (c)  $\Phi_{C,P}$  和  $\Phi_{C,\eta}$  随  $T_H$  的变化  
 Fig. 5. Curves of (a)  $P_{\max}$  and  $\eta_{\max}$ , (b)  $V_P$  and  $V_\eta$ , and (c)  $\Phi_{C,P}$  and  $\Phi_{C,\eta}$  as a function of  $T_H$ .

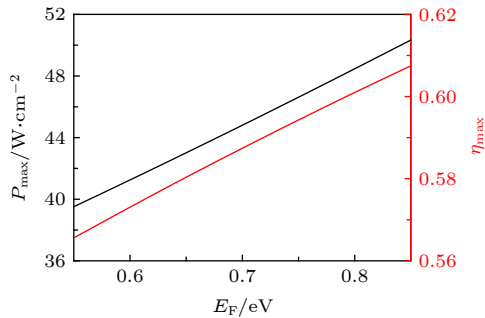


图 6  $P_{\max}$  和  $\eta_{\max}$  随  $E_F$  变化的曲线, 其中  $T_H = 1500$  K  
 Fig. 6. Curves of  $P_{\max}$  and  $\eta_{\max}$  as a function of  $E_F$ , where  $T_H = 1500$  K.

值模拟结果还表明  $V_P$ ,  $V_\eta$ ,  $\Phi_{C,P}$  和  $\Phi_{C,\eta}$  也是  $E_F$  的单调递增函数, 这说明增加  $E_F$  不仅可以提高 TPD 的输出电压, 而且较大的  $\Phi_{C,P}$  和  $\Phi_{C,\eta}$  同时也降低了 TPD 的设计难度.

## 4 结 论

本文详细研究了 TPD 的性能特性与参数优化设计, 结果表明通过优化电压和阴极板功函数可显著提高 TPD 的功率密度和效率, 同时通过折衷考虑功率和效率, 可确定 TPD 性能参数的优化区间. 另外, 本文也分析了高温热源温度对 TPD 优化性能特性的影响, 确定了高温热源温度的优化范围. 本文所得结果可为高性能热电功率器件的设计与研制提供理论指导.

## 参考文献

- [1] Wang C H, Lin T, Zeng Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 197201 (in Chinese) [王长宏, 林涛, 曾志环 2014 物理学报 **63** 197201]
- [2] Zhou M, Huang R J, Li L F, Jiang M B, Wu Z X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7314 (in Chinese) [周敏, 黄荣进, 李来风, 蒋明波, 吴智雄 2010 物理学报 **59** 7314]
- [3] Zeng T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 153104
- [4] Lee J H, Bargatin I, Melosh N A, Howe R T 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 173904
- [5] Lee J I, Jeong Y H, No H C, Hannebauer R, Yoo S K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 223107
- [6] Smith J R, Bibro G L, Nemanich R J 2007 *Phys. Rev. B* **76** 245327
- [7] Liao T 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 115
- [8] Meir S, Stephanos C, Geballe T H, Mannhart J 2013 *J. Renew. Sustain. Energy* **5** 043127
- [9] Olawole O C, De D K 2018 *J. Photon. Energy* **8** 018001
- [10] Post A D, King B V, Kisi E H 2017 *Appl. Therm. Eng.* **117** 245
- [11] Xiao L, Wu S Y, Yang S L 2018 *Int. J. Energy Res.* **42** 656
- [12] Liao T, Chen X, Lin B, Chen J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 033901
- [13] Schwede J W, Bargatin I, Riley D C, et al. 2010 *Nature Mater.* **9** 762
- [14] Zhang X, Zhang Y, Ye Z, Li W, Liao T, Chen J 2018 *IEEE Electron Device Lett.* **39** 383
- [15] Yang Z, Peng W, Li W, Chen X, Chen J 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 154501
- [16] Liang S, Ang L K 2015 *Phys. Rev. Appl.* **3** 014002
- [17] Liang S, Liu B, Hu W, Zhou K, Ang L K 2017 *Sci. Rep.* **7** 46211
- [18] Misra S, Upadhyay K M, Mishra S K 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 065102
- [19] Mishra S K, Kahaly M U, Misra S 2017 *Int. J. Therm. Sci.* **121** 358
- [20] Liao T J, Yang Z M, Lin B H 2014 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **44** 125 (in Chinese) [廖天军, 杨智敏, 林比宏 2014 中国科学: 物理学 力学 天文学 **44** 125]
- [21] Wang Y, Su S, Lin B, Chen J 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 053502
- [22] Chen L, Ding Z, Sun F 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 104507
- [23] Zhang X, Pan Y, Chen J 2017 *IEEE Trans. Electron Device* **64** 4594
- [24] Kuznetsov V I, Ender A Y, Babanin V I 2018 *J. Appl. Phys.*

# Performance characteristics of a novel high-efficient graphene thermionic power device<sup>\*</sup>

Liao Tian-Jun<sup>1)</sup> Lin Bi-Hong<sup>2)†</sup> Wang Yu-Hui<sup>1)</sup>

1) (*Department of Physics and Energy, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China*)

2) (*Department of Physics, Huaqiao University, Xiamen 361021, China*)

( Received 6 June 2019; revised manuscript received 1 July 2019 )

## Abstract

According to the theories of the solid physics and irreversible thermodynamics, the performance characteristics of a novel high-efficient graphene thermionic power device (TPD) are studied. The temperature of the cathode plate and anode plate are determined by solving the energy balance equation of hot and cold sides of the TPD. The effects of the output voltage and the work function of the cathode on the volt-ampere characteristics of the TPD and the temperature of the two electrodes are analyzed to determine the parametric characteristics of the TPD at the maximum power density and efficiency. The power density and efficiency are compromised, and the parametric optimal designs are given. The influence of the temperature of heat source at high temperature on optimization performance is analyzed. The results obtained here can provide theoretical guidance for developing the thermionic energy conversion devices.

**Keywords:** thermionic power device, graphene, work function, performance optimization

**PACS:** 79.40.+z, 85.80.Fi, 84.30.Jc, 65.80.Ck

**DOI:** [10.7498/aps.68.20190882](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190882)

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11675132, 11775084), the Fujian Natural Science Foundation of China (Grant No. 2016J01021), and the Scientific Research Foundation of Chongqing University of Technology of China (Grant No. 2019ZD22).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [bhlin@hqu.edu.cn](mailto:bhlin@hqu.edu.cn)