

接触效应对小型半导体温差发电器性能的影响

李茂德^{1,2} 屈 健² 李玉东² 李伟江²

(1 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

(2 同济大学机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对小型半导体温差 (TEG) 发电机中接触热阻和接触电阻的影响进行了分析研究. 结果表明, 接触热阻和接触电阻只在 2mm 以内的电偶臂长度内有明显影响; 在电偶臂长度小于 1mm 时, 输出功率和热电效率均有一个急剧上升的变化阶段; 当长度超过 5mm 后, 输出功率和热电效率均趋于定值; 在冷热端温度分别为 283 和 383 K, $Z = 0.0024 \text{ K}^{-1}$ 、电偶臂长为 2mm、接触热阻比 0.2 和接触电阻比 0.1 条件下, 热电功率约为 4 mW/mm^2 , 热电效率约为 3.5%, 而理想无接触热阻和电阻的热电效率约为 4.2%. 由此可知, 半导体温差发电机中接触热阻和接触电阻的影响不可忽视.

关键词: 半导体温差发电机; 接触效应; 输出功率; 热电效率

EEACC: 8460

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)12-2440-05

1 引言

近年来, 随着节能技术的深入研究, 采用半导体温差发电技术将低品位热能进行发电的转化利用技术得到了人们的关注. 同时, 在 MEMS 领域, 在 CMOS 硅基片上应用微型温差发电机产生电能使芯片维持工作^[1~3]的技术设计和应用, 也引起了人们极大的兴趣^[4,5]. 这些新技术使古老的半导体热电效应的研究及应用出现了新曙光^[6~9]. 与传统的发电模式相比, 半导体温差发电技术具有无振动与噪声、无工质、运行性能稳定、绿色无污染和工作寿命长等优点, 这是目前许多热力发电技术所无法比拟的. 由于受材料性能的限制, 采用现有较好的热电材料, 当一端保持在室温及另一端保持在 400 K 左右的条件下, 热电效率一般不超过 5%^[10].

大量研究表明, 小型半导体温差发电过程中的影响因素较多, 在热电效率的控制和发电器的有效设计等方面的认识均比较缺乏. 本文主要针对半导体温差发电机中接触电阻和接触热阻对发电机性能的影响进行分析研究, 通过模型建立和公式推导以及计算, 得出接触电阻和接触热阻对热电性能影响

的变化关系, 为小型半导体温差发电技术的深入研究与设计应用提供了理论基础.

2 温差发电器的理论计算

小型半导体温差发电机由 p 型和 n 型半导体元件对以及负载电阻构成, 工作于高温热源和低温冷源之间, 如图 1 所示. 发电机从高温热源吸收热量, 一部分转化为电能, 另一部分传递给低温冷源, 符号注解见表 1.

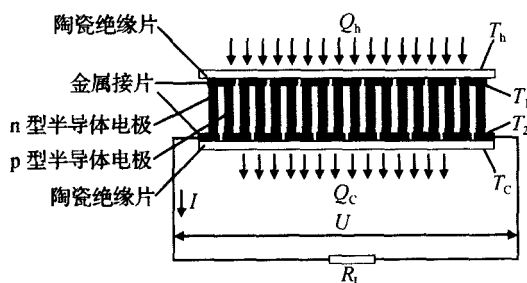


图 1 半导体温差发电机的工作示意图

Fig. 1 Scheme of semiconductor thermoelectric power generator

表 1 符号表

Table 1 Symbol list

m —发电器上 $n-p$ 电偶对的数量	Q/W —单位时间的换热量
T/K —温度	$K/(W \cdot K^{-1})$ —热导系数
I/A —发电器回路中产生的电流	R/Ω —元件的总电阻
$\alpha (V \cdot K^{-1})$ —元件的赛贝克系数	R_L/Ω —负载电阻
U/V —发电器产生的电势	l/mm —半导体元件的长度
$\rho (\Omega \cdot m)$ —半导体元件的电阻率	A/mm^2 —半导体元件的横截面积
P/W —发电器的输出功率	η —发电器的热电效率
h —高温热源端	c —低温冷源端
$P, p-p$ 型半导体	$N, n-n$ 型半导体
Cu —铜片	Z/K^{-1} —材料优值系数

在较低温差下如果不计汤姆逊热效应,根据热力学理论以及半导体热电理论^[11]可以得到基本公式如下:

$$Q_h = m\alpha T_1 I - \frac{1}{2} I^2 R + K\Delta T_0 \quad (1)$$

$$Q_c = m\alpha T_2 I + \frac{1}{2} I^2 R + K\Delta T_0 \quad (2)$$

$$T_1 = T_h - Q_h/K_h \quad (3)$$

$$T_2 = T_c + Q_c/K_c \quad (4)$$

$$U = m\alpha\Delta T_0 \quad (5)$$

$$I = U/(R + R_L) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= \Delta T_h + \Delta T_0 + \Delta T_c \\ &= \Delta T_0 + Q_h/K_h + Q_c/K_c \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta T_0 = -\frac{R}{m^2\alpha^2} \{ K_h - K_c + 2w \cos[\frac{1}{3} \arccos(v/w^3) + \pi/3] \} \quad (11)$$

$$w = \sqrt{K_c^2 + \frac{2}{3} K_c K_h + K_h^2 + \frac{8}{3} K(K_h + K_c) + \frac{4m^2\alpha^2}{3R} (T_c K_c + T_h K_h)}$$

$$v = (K_h - K_c)(K_c^2 + 2K_c K_h + K_h^2 + 4KK_h + 4KK_c) + \frac{2m^2\alpha^2}{R} (T_h K_h^2 - \Delta T K_c K_h - T_c K_c^2)$$

当 $K_h = K_c \rightarrow \infty$ 时,通过 Maple 软件计算得到(11)式的右侧为 ΔT ,此时 $\Delta T_0 = \Delta T$,表示接触热阻忽略不计,也即发电器外部处于热力学可逆的情况^[11].

3 接触效应的分析与讨论

从电流回路上看,发电器内部需要加上接触电阻和铜连接片电阻,但铜片电阻很小,可以不计,故:

$$\begin{aligned} R_0 &= R + R_c + R_{Cu} = m(2\rho/A + 4\rho_c/A) \\ &= \frac{2m\rho}{A} (1 + \frac{n}{l}) = R(1 + \frac{n}{l}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$T_1 = \frac{3(2 + n/l) T_h/(rt) + Z(\Delta T_0)^2/(2 + n/l) - 2(2 + n/l)\Delta T_0}{3(2 + n/l)/(rt) + 2Z\Delta T_0} \quad (13)$$

其中 $\Delta T_h = T_h - T_1, \Delta T_c = T_2 - T_c, \Delta T_0 = T_1 - T_2, \alpha = \alpha_p - \alpha_n, R = m(l_p \rho_p/A_p + l_n \rho_n/A_n), K = m(k_p A_p/l_p + k_n A_n/l_n)$. 为方便计算,通常可以假设 $l_p = l_n = l, A_p = A_n = A, \rho_p = \rho_n = \rho, k_p = k_n = k, \alpha_p = -\alpha_n$,还可以假设半导体元件侧面绝热进行分析计算^[13]. 由(1)~(6)式进一步推导可以得到:

$$Q_h = [\frac{m^2\alpha^2\Delta T_0 T_h}{2R} - \frac{m^2\alpha^2(\Delta T_0)^2}{8R^2} + K\Delta T_0] \times (1 + \frac{m^2\alpha^2\Delta T_0}{2RK_h})^{-1} \quad (8)$$

$$Q_c = [\frac{m^2\alpha^2\Delta T_0 T_c}{2R} - \frac{m^2\alpha^2(\Delta T_0)^2}{8R^2} + K\Delta T_0] \times (1 - \frac{m^2\alpha^2\Delta T_0}{2RK_c})^{-1} \quad (9)$$

将(8)和(9)式代入(7)式,可以得到

$$\begin{aligned} \Delta T &= \Delta T_0 + [m^2\alpha^2\Delta T_0 T_h - \frac{m^2\alpha^2(\Delta T_0)^2}{4} + \\ &\quad 2RK_h K_h \Delta T] (2RK_h + m^2\alpha^2\Delta T_0)^{-1} + \\ &\quad [m^2\alpha^2\Delta T_0 T_c + \frac{m^2\alpha^2(\Delta T_0)^2}{4} + 2RK_c K_c \Delta T_0] \times \\ &\quad (2RK_c - m^2\alpha^2\Delta T_0)^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

等式(10)是一个关于 ΔT_0 的三次方程,有三个实数解,但是其中的两个解无实际物理含义,予以去除. 只有一个符合实际情况的解为^[12]:

其中 R_c 和 ρ 分别为接触电阻和接触电阻率; $n = 2\rho_c/\rho$ 令 $K_h = K_c = k_c A_c/l_c, K = 2kA/l, A_c = 3A, k_c = r, l_c/l = t$,由(11)式可以得到:

$$\Delta T_0 = -\frac{2\rho}{Am\alpha^2} \{ 2w \cos[\frac{1}{3} \arccos(v/w^3) + \pi/3] \}$$

其中

$$\begin{aligned} w &= K \sqrt{6/(rt)^2 + 8/(rt) + 2Z(T_c + T_h)/(rt)}, v = \\ &= \frac{9m^2\alpha^2 K^2}{R(rt)^2} \Delta T = \frac{72m^3 Z k^3 A^3}{l^3 (rt)^2} \Delta T, K = 2mkA/l, Z = \\ &= (m\alpha)^2/(RK) = \alpha^2/(4\rho k), Z \text{ 为半导体材料的优值系数.} \end{aligned}$$

由(1), (3)和(12)式得

由此可得发电机输出功率和热电效率分别为:

$$P = \frac{U^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2} = \frac{m^2 \alpha^2 R_L}{(R_L + R_0)^2} (\Delta T_0)^2 \quad (14)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{\Delta T_0}{T_1} S[(S+1) - \frac{\Delta T_0}{2 T_1 (1+n/l)} + \frac{(1+S)^2 (1+n/l)}{Z T_1}]^{-1} \quad (15)$$

令 $S = R_L / R_0$, 则 $P = S(S+1)^{-2} m^2 \alpha^2 (\Delta T_0)^2 R_0^{-1}$. 当 $S=1$ 时, 即负载电阻 R_L 与发电机本身的电阻 R_0 相匹配时, 负载能从发电机获得最大输出功率和最大热电效率分别为:

$$P_{\max} = \frac{m^2 \alpha^2}{4 R_0} (\Delta T_0)^2 = \frac{\rho}{2 m^2 \alpha^2 (1+n/l) A^2} \times [2 w \cos(\frac{1}{3} \arccos(v/w^3) + \pi/3)]^2 \quad (16)$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{Q_h} = \frac{\Delta T_0}{T_1} \times [2 - \frac{\Delta T_0}{2 T_1 (1+n/l)} + \frac{4(1+n/l)}{Z T_1}]^{-1} \quad (17)$$

选用美国 MELCOR 公司^[13]提供的公式计算半导体材料的性能参数, 其中 T_m 为电偶臂两端的平均温度.

$$\alpha_p = -\alpha_n = (22224.0 + 930.6 T_m - 0.9905 T_m^2) \times 10^{-9} \text{ V/K} \quad (18)$$

$$\rho_p = \rho_n = (5112.0 + 163.4 T_m + 0.6279 T_m^2) \times 10^{-10} \text{ } \Omega/\text{m} \quad (19)$$

$$k_p = k_n = (62605.0 - 277.7 T_m + 0.4131 T_m^2) \times 10^{-4} \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (20)$$

文献[14,15]报道建立接触效应对温差发电机工作性能影响的模型时, 取 $\Delta T_h K_h = \Delta T_0 K = \Delta T_c K_c$, (其中 $K_h = K_c$), 由此得到了计算输出功率和热电效率的公式.

$$P_0 = \frac{\alpha^2 \Delta T}{8 \rho (1+n/l)(1+2r)^2} \quad (21)$$

$$\eta = \left\{ \frac{\Delta T}{T_h} \right\} \{ (1+2r)^2 [2 - \frac{\Delta T}{2 T_h} + \frac{4}{Z T_h} (\frac{1+n/l}{1+2r})^2] \}^{-1} \quad (22)$$

公式(21)和(22)表面上简单明确, 但实际上欠妥当^[11]. 其在计算热电效率时, 认为材料的优值系数也将受到接触效应的影响, 所以引入了优值系数的修正, 同样问题还可以出现在小型半导体制冷器方面^[16~19]. 本文作者认为, 接触效应只是发电机在结构上对其性能产生的不可避免的影响, 但不会影响半导体材料性能, 故应将计算发电器的热电效率

的公式(22)修改为(23)式. 对(17)式在不引入修正优值系数的情况下, 依照文献[14,15]介绍的方法进行处理, 一级近似的结果可以表示为(24)式. 对于小型发电机而言, 这样处理得到的结果是有较大偏差的, 但对传统意义上的发电机却是已经足够精确了.

比较(23)和(24)式可知, 当 $\frac{n}{l} \ll 1$ 时, (24)式可以简化为(23)式.

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h} [2(rt+1+rt \frac{T_c}{T_h}) - \frac{\Delta T}{2 T_h} + \frac{4}{Z T_h} (2rt+1) J^{-1}] \quad (23)$$

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h} [2(rt+1+rt \frac{T_c}{T_h}) - \frac{\Delta T}{2 T_h} + \frac{4}{Z T_h} (2rt+1) + \frac{4}{Z T_h} (2rt+1) \frac{n}{l} + \frac{\Delta T}{2 T_h} \times \frac{n}{l} J^{-1}] \quad (24)$$

利用公式(16)可以得到接触效应对发电机输出功率和工作效率影响的变化曲线(见图2). 图2中的虚线是由公式(21)在公式(16)相同条件下得到的, 可以看到其与本文作者的公式曲线存在一定差异.

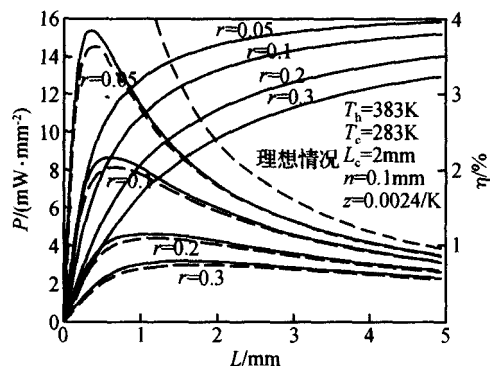


图2 输出功率和工作效率随电偶臂长度和接触热阻影响的变化曲线

Fig. 2 Power output and conversion efficiency as a function of thermal couple length and thermal contact effect

图2中给出了发电机输出功率和工作效率随电偶臂长度和接触热阻影响的变化曲线, $n=0.1\text{mm}$, $r=0.2$, $l_c=2\text{mm}$ ^[15]. 其中 $n=0.1\text{mm}$, 最上侧的虚线表示无接触热阻和接触电阻时的情况, 另外在不考虑接触影响时, 经计算得到其最大工作效率 $\eta_{\max}=0.042$.

从图2中可以清楚地看到, 发电器的输出功率随着电偶臂长度的变化出现了一个峰值, 在峰值的

两侧发电器输出功率随电偶臂长度变化的规律是相反的。数值计算还表明,在相同的条件下,该峰值会随着材料优值系数的提高而向右偏移。在一般情况下,对于小型,特别是微型发电机,其电偶臂的长度集中在峰值的左侧,其输出功率随着电偶臂长度的变大而减小。图 2 中最外侧的那条虚线表示无接触热阻和接触电阻时的情况,随着电偶臂趋向于零,输出功率将发散,趋向于无穷大,这显然是与实际不符的,同时也表明考虑接触效应对温差发电器特别是小型温差发电器工作性能的影响是必要的。

由(17)式可以得出 $r = 0.2$, $n = 0.1$ mm 和 $l_c = 2$ mm 时发电机两端不同温差 ($T_h - T_c$) 条件下输出功率和效率的变化关系曲线,如图 3 所示。根据图中曲线变化规律可见,随着温差的增大,输出功率和热电效率均明显单调升高。另外,随着温差的增大,输出功率最大值与定长电偶稳定输出功率的比值不断加大。而热电效率随着温差的增大在初始时的变化率增大,但电偶长度大于 5 mm 后趋于平稳。

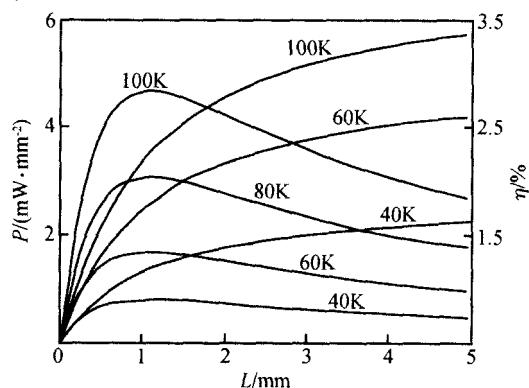


图 3 输出功率和工作效率随热电温差的变化曲线 取 $n = 0.1$ mm, $r = 0.2$, $l_c = 2$ mm

Fig. 3 Power output per unit area and conversion efficiency as a function of thermoelement length and thermal contact effect $n = 0.1$ mm, $r = 0.2$, $l_c = 2$ mm

4 结论

通过理论分析和公式推导,得出了半导体温差发电器中接触热阻和接触电阻对输出功率和热电效率的影响关系理论公式。对其数值计算结果绘制的图线与前人得到的输出功率和热电效率比较可以得出结论如下:(1)接触热阻和接触电阻在电偶臂长度 2 mm 以内有明显影响。在电偶臂长度小于 1 mm 时,输出功率和热电效率均有一个急剧上升的变化阶段。当长度超过 5 mm 后,输出功率和热电效率均趋

于定值;(2)在热端温度 383 K、冷端温度 283 K、优值系数 $Z = 0.0024 \text{ K}^{-1}$ 、电偶臂长 2 mm、接触热阻比 $r = 0.2$ 和接触电阻比 $n = 0.1$ 下,热电输出功率约为 4 mW/mm^2 ,热电效率约为 3.5%;而理想无接触热阻和电阻的热电效率约为 4.2%。本文的研究可以为小型半导体温差发电器的分析研究和实用设计提供有力的依据。

参考文献

- [1] Strasser M, Aigner R, Franosch M, et al. Miniatuized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97/98:535
- [2] Strasser M, Aigner R, Lauterbach C, et al. Wachutka micromachined COMS thermoelectric generators as on-chip power supply. *Sensors and Actuators A*, 2004, 114(3):362
- [3] Jacquot A, Chen G, Scherrer H, et al. Modeling of on-membrane thermoelectric power supplies. *Sensors and Actuators A*, 2004, 116(3):501
- [4] Glosch H, Ashauer M, Pfeiffer U, et al. A thermoelectric converter for energy supply. *Sensors and Actuators A*, 1999, 74(3):246
- [5] Riffat S B, Ma Xiaoli. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Appl Therm Eng*, 2003, 23(8):913
- [6] Takenobu, Kajikawa. Status and future prospects on the development of thermoelectric power generation systems utilizing combustion heat from municipal solid waste. *Proceedings 16th International Conference on Thermoelectrics*, 1997:28
- [7] Akira Tsuyoshi, Shuzo Kagawa, Masanori Sakamoto, et al. A study of commercial thermoelectric generation in a processing plant of combustible solid waste. *Proceedings ICT*, 1997:555
- [8] Kyono T, Suzuki R O, Ono K. Conversion of unused heat energy to electricity by means of thermoelectric generation in condenser. *IEEE Trans Energy Conversion*, 2003, 18(2):330
- [9] Sun Wei, Hu Peng, Chen Zeshao, et al. Performance of cryogenic thermoelectric generators in LNG cold energy utilization. *Energy Convers Mgmt*, 2005, 46(5):789
- [10] Pustovalov A A. Unclear thermoelectric power units in Russia, USA and Europe space agency research programs. *Proceedings ICT*, 1997:559
- [11] Qu Jian, Li Maode, Le Wei, et al. Performance optimization for a semiconductor thermoelectric generator. *Cryogenics*, 2005, 2:20 (in Chinese) [屈健, 李茂德, 乐伟, 等. 半导体温差发电器的工作性能优化. *低温工程*, 2005, 2:20]
- [12] Chen Jincan, Yan Zijun. Optimal analysis on performance of a semiconductor thermoelectric generator. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1994, 15(2):123 (in Chinese) [陈金灿, 严子俊. 半导体温差发电器性能的优化分析. *半导体学报*, 1994, 15(2):123]

- [13] <http://www.melcor.com>, homepage of MELCOR, USA
- [14] Gao Min, Rowe D M. CRC Handbook of thermoelectrics. London CRC Press, 1995: Chap. 38
- [15] Rowe D M, Gao Min. Evaluation of thermoelectric models for power generation. J Power Sources, 1998, 73(2): 193
- [16] Gao Min, Volkein F. Integrated thin film thermoelectric cooler. Electron Lett, 1998, 34: 222
- [17] Gao Min, Rowe D M. Cooling performance of integrated thermoelectric microcooler. Solid-State Electron, 1999, 43: 923
- [18] Ju Y S, Ghoshal U. Study of interface effects in thermoelectric microrefrigerators. J Appl Phys, 2002, 88: 4135
- [19] Weinberg F J, Rowe D M, Gao Min. Novel high performance small-scale thermoelectric power generation employing regenerative combustion systems. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35: L61

Influence of Contact Effects on Properties of a Small Thermoelectric Power Generator

Li Maode^{1,2}, Qu Jian², Li Yudong², and Li Weijiang²

(1 College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

(2 College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract : The influence of the thermal contact resistance and electric contact resistance of a small thermoelectrical power generator (TEG) is analyzed. Results show that the thermal contact resistance and electrical contact resistance have a noticeable influence on the thermoelectric power generator when the thermal couple length is less than 2mm. The power reaches 4mW/mm^2 , and the efficiency reaches 3.5% when $T_c = 283\text{K}$, $T_h = 383\text{K}$, $Z = 0.0024\text{K}^{-1}$, $l_c = 2\text{mm}$, $r = 0.2$, and $n = 0.1$. The maximum thermoelectric efficiency is 4.2% without thermal contact resistance or electrical contact resistance. Furthermore, the power output and efficiency increase strongly when the thermal couple length is less than 2mm, but the power output tends to decrease to a constant and the efficiency tends to increase to a constant when the thermal couple length is more than 5mm. It is shown that the influence of thermal contact resistance and electrical contact resistance of the thermoelectric power generator cannot be neglected.

Key words : thermoelectric power generator; contact effect; power output; thermoelectrical efficiency

EEACC : 8460

Article ID : 0253-4177(2005)12-2440-05

Li Maode male, was born in 1961, PhD, associate professor. He works mainly on thermoelectric refrigeration and power generation, engineering heat transfer, and thermal measurement techniques.

Received 1 May 2005, revised manuscript received 27 August 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics