

# 一种测试半导体制冷器的瞬态方法\*

宫昌萌<sup>1</sup> 陈震<sup>1</sup> 吴洲<sup>1</sup> 常国强<sup>1</sup> 钱瑞明<sup>1</sup> 陈云飞<sup>1,2,†</sup>

(1 东南大学机械工程系, 南京 210096)

(2 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** ZT 值、最大制冷温差和响应时间是表征半导体制冷器性能的重要参数. 文中介绍了一种能同时测量这三个参数的瞬态方法, 并讨论了热沉对测试结果的影响. 利用一个由恒流脉冲发生器和数据采集卡组成的简单测试系统测得制冷器在小电流下的电阻电压和塞贝克电压, 通过这两个电压推导出 ZT 值、最大制冷温差. 这种瞬态方法是非接触式测量, 准确度高, 可用于薄膜热电器件测试; 另外瞬态方法耗时短, 可大大缩短半导体制冷器可靠性测试的周期. 采用这种方法对 4mm × 4mm × 2.4mm 的热电制冷器进行实验, 环境温度 300 K 时, 测得 ZT 值为 0.39, 最大温差 58.5 K, 响应时间 20s.

**关键词:** 半导体热电制冷器; 瞬态测试方法; 电阻电压; 塞贝克电压;

**PACC:** 6590; 0150 K; 7360J

**中图分类号:** TB66

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)05-0944-04

## 1 引言

热电制冷器是根据帕尔贴效应, 即利用直流电流引起半导体材料中的热量输运, 制成的一种简单方便的新型制冷器. 其结构简单、无磨损、可靠性好、寿命长、启动快、不使用氟利昂, 无任何运动部件而无噪声, 控制灵活, 只要接通电源, 即可迅速制冷, 电流反向即可迅速制热. 由于这些优点, 热电制冷器在很多领域得到应用, 如汽车冰箱、白内障冷冻摘除器、核潜艇空调、固体激光器的散热器、导弹红外探测器探头冷却器、宇航员的空调服等.

热电制冷器的最大制冷温差和效率用无量纲品质指数 ZT 值来衡量,  $ZT = S^2 T / \kappa$ , 其中 S 为塞贝克系数,  $\sigma$  为电导率,  $\kappa$  为热导率, T 为绝对温度. 最大制冷温差与 ZT 值的关系可表示为<sup>[1]</sup>:

$$T_{\max} = 0.5 ZT^2 \quad (1)$$

ZT 值与热电制冷器效率的关系可表示为:

$$COP_{\max} = \frac{T_1 [(1 + ZT)^{1/2} - T_1 / T_2]}{(T_2 - T_1) [(1 + ZT)^{1/2} + 1]} \quad (2)$$

式中  $COP_{\max}$  为制冷器可达到的最大能量转换效率;  $T_1$  为冷端温度;  $T_2$  为热端温度, ZT 值越高, 热电制冷器的效率就越高, 现在大量使用的体态制冷

器的 ZT 值不大于 1. 当 ZT 值达到 4 时热电制冷器的效率与压缩机式制冷器的效率相当<sup>[2]</sup>.

通常半导体制冷器的性能用热电偶、热敏电阻、二极管温度传感器或晶体管温度传感器测试. 但这些测试方法有如下缺点:

(1) 使用前必须标定, 操作过程耗时长. 在半导体制冷器能量冲击可靠性测试中, 制冷器经历数百到上千次“通电-冷却-通电”的循环过程, 每隔几十次循环, 进行一次制冷器性能测试, 记录 ZT 值、电阻和响应时间, 通常整个可靠性测试要花费 3~4 个月<sup>[3]</sup>.

(2) 装置复杂, 需要探测器与被测物体接触. 测试微型超晶格薄膜热电制冷器时, 制冷器的温度场分布会受到探测器的影响, 而且其法向参数无法测量, 只能用切向的参数粗略代替, 所以现有方法的测试结果误差很大<sup>[4]</sup>.

本文提出了一种半导体制冷器测试的瞬态方法, 与现有测试方法相比这种方法的优点是: 操作过程耗时短, 测试时间略大于制冷器的响应时间, 故可大大缩短半导体制冷器可靠性测试的周期; 装置简单, 探测器不需要与被测物体接触, 能直接测得器件法向的参数, 并准确预测薄膜热电器件的性能.

\* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB300404), 国家自然科学基金 (批准号: 50276011, 50275026), 江苏省自然科学基金 (批准号: B K2005063) 资助项目

† 通信作者. Email: yunfeichen@seu.edu.cn

2005-09-23 收到, 2005-11-25 定稿

## 2 实验原理及计算公式推导

### 2.1 实验原理

制冷器通入电流后,冷端和热端温差  $T$  从零增大至稳定值  $T_{max}$  的时间叫制冷器的响应时间. 响应时间等于热扩散所耗费的时间<sup>[5]</sup>. 热扩散时间可用公式  $t = d^2 / D$  估算,其中  $d$  为冷端到热端的距离,  $D$  为热电材料的热扩散系数. 对于一般半导体制冷器,  $d$  为 2mm 以上,响应时间为数十秒.

热电制冷器两端电压是塞贝克电压  $V_S$  与电阻电压  $V_R$  之和. 塞贝克电压  $V_S = S \cdot T(t)$ ,其中  $S$  称为塞贝克系数,  $t = 0$  时,温差为零,  $V_S = 0$ ;随温差增大,  $V_S$  增大;当  $t$  大于等于响应时间时,温差上升到最大值  $T_{max}$  并保持稳定,  $V_S$  也达到并保持稳定值,即  $S \cdot T_{max}$ . 电阻电压  $V_R = IR$ ,用欧姆定律来计算,  $I$  为电流强度,  $R$  为制冷器电阻,电阻电压在通电的瞬间达到稳定值. 热电制冷器两端电压降可表示为:

$$V(t, I) = IR + S \cdot T(t) \quad (3)$$

制冷器上的电压降随时间变化的曲线 ( $V-t$  曲线)如图 1 所示. 电压降在通电瞬间上升到一个拐点,然后经过一段弧线过渡到顶部水平线,电阻电压  $V_R$  为零点到上升沿拐点的垂直距离,塞贝克电压  $V_S$  为弧线的垂直高度,响应时间为弧线的水平长度.

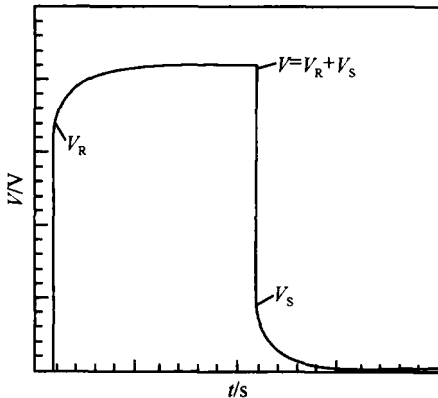


图 1 制冷器瞬态响应曲线示意图

Fig. 1 Sketch map of TE cooler transient response

制冷器在通电时有焦耳热产生,为了避免热量积累造成制冷器的工作温度升高,热端应与热沉连接. 周围空气流动也会造成制冷器的工作温度波动,所以测试时还要注意减少空气流动.

矩形脉冲电流幅值  $I_{PP}$  需达到 100mA,一般的信号发生器不能输出这么大的电流,所以我们搭建了测试电路,如图 2 所示. 单片机 AT89C2051 产生

一个周期为 80s 的脉冲信号,用数模转换器 AD7524 对脉冲的幅值  $V_{PP}$  调理,以控制输出电流的大小,运放、三极管和电阻  $R$  构成一个恒流源,输出电流幅值  $I_{PP} = V_{PP} / R$ . 电阻  $R$  使用一组并联电阻,以增加载流能力. 这个电路最大可以提供幅值为 1A 的恒流脉冲.

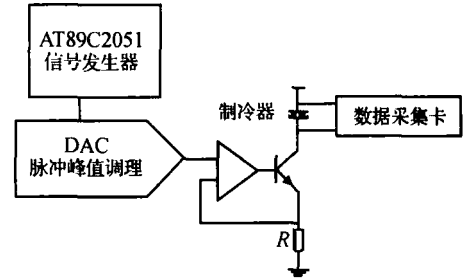


图 2 测试电路框图

Fig. 2 Schematic of testing circuit

为减小方波的波形失真,电路板设计要注意尽量减小大电流回路的分布电感、电容,如增加大电流线路布线宽度,采用贴片封装电阻.

### 2.2 ZT 值计算公式的推导

有热沉稳定制冷器工作温度时,电流从冷端“抽”到热端的热流可表示为<sup>[6]</sup>:

$$Q = STI - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{A}{d} T \quad (4)$$

上式由三项组成,第一项表示帕尔帖效应形成的热流,  $S$  为 Seebeck 系数,  $T$  为绝对温度,  $I$  为电流;第二项表示电流流过电阻为  $R$  的制冷器时产生的焦耳热;第三项表示从热端到冷端的热传递,为热导率,  $A$  为制冷器横截面积,  $d$  为热端到冷端的距离.

因为热电材料的电阻较小,而且焦耳热与电流平方成正比,所以当工作电流较小时,我们假设第二项表示的焦耳热可以忽略,这样热流公式简化成

$$Q = STI - \frac{A}{d} T \quad (5)$$

当温差  $T$  稳定时,  $Q = 0$ <sup>[7]</sup>,所以:

$$STI = \frac{A}{d} T \quad (6)$$

整理后得到:

$$T = \frac{STId}{A} \quad (7)$$

塞贝克电压

$$V_S = S \cdot T = \frac{S^2 TId}{A} \quad (8)$$

将  $ZT = S^2 T / A$  代入(8)式,

$$V_S = \frac{S^2 TId}{A} = \frac{S^2 T}{A} \times Id = ZT \times V_R \quad (9)$$

得到 ZT 值的计算公式:

$$ZT = \frac{V_S}{V_R} \quad (10)$$

对阵列式制冷器,

$$V_S = \frac{V_{SN}}{N}; \quad V_R = \frac{V_{RN}}{N}$$

式中  $V_{SN}, V_{RN}$  分别为阵列式制冷器两端的总电阻电压和塞贝克电压. 阵列式制冷器的  $ZT$  值用下式计算:

$$ZT = \frac{V_{SN}}{V_{RN}} \quad (11)$$

测试时热端应与热沉连接,以减小温度波动. 测试电流幅值应设定为最大温差对应的电流的  $1/50$ ,以保证焦耳热为零的假设条件成立. 用瞬态响应方法测试电阻电压  $V_R$  和塞贝克电压  $V_S$  的数值,代入(10)或(11)式即可求算  $ZT$  值,再将  $ZT$  值代入(1)式就得到制冷器能达到的最大制冷温差.

### 3 结果及讨论

我们使用瞬态方法对天津精易工贸有限公司的 TES1-0801 型阵列式热电制冷器进行了测试,该制冷器由四组 p-n 热电对串联而成,尺寸为  $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 2.4\text{mm}$ ,最佳工作电流为  $1.2\text{A}$ . 环境温度为  $300\text{K}$ ,热端加热沉时,制冷器的瞬态响应曲线如图 3 所示. 由于数据采集卡的零点漂移,我们得到的响应曲线向上浮动了一个零点漂移电压,但因为瞬态方法测量的是电压的相对值,所以零点漂移不影响结果的正确性.

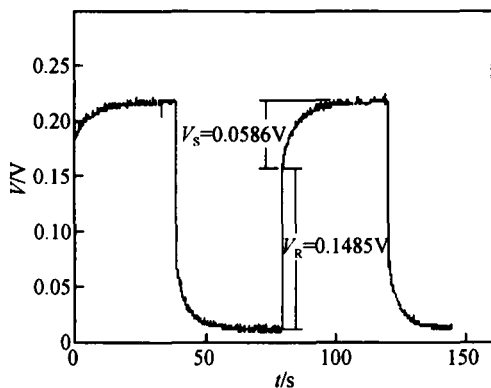


图 3 制冷器 TES1-0801 的瞬态响应曲线

Fig. 3 Transient response curve of TES1-0801

图中弧线水平长度是  $20$ ,最低点到拐点的高度是  $0.1485\text{V}$ ,拐点到电压稳定点的高度是  $0.0586$ . 所以制冷器的响应时间为  $20\text{s}$ ,总的电阻电压和塞贝克电压分别为  $0.1485$  和  $0.0586\text{V}$ ,代入(11)式求得  $ZT$  值为  $0.39$ ,最大制冷温差为  $58.5\text{K}$ .

为了验证这种瞬态方法的精度,我们比较了由

热电偶和瞬态方法测出的最大制冷温差,两种方法的测试结果分别为  $57$  和  $58.5\text{K}$ ,二者相差仅  $2.5\%$ ,说明这种方法可以准确测试热电制冷器性能. 另外,也说明在推导  $ZT$  值计算公式时,“工作电流较小的情况下焦耳热可以忽略”的假设是成立的.

实验中发现去掉热端的热沉会引起  $ZT$  值增大,响应时间变长. 在环境温度仍为  $300\text{K}$ ,但没有热沉散热,测得热电臂的  $ZT$  值为  $0.45$ ,响应时间为  $52\text{s}$ . 对这个现象的解释是:无热沉的情况下,焦耳热积累造成制冷器的工作温度升高,塞贝克系数  $S$  增大,电导率  $\sigma$  和热导率  $\kappa$  下降,使  $ZT$  值增大<sup>[8]</sup>;冷端和热端之间的温差是通过空气对流和热电臂的热传导抵消的,加热沉后,热端的一部分热量经过热传导流入热沉,由于热传导的速度明显比热对流快<sup>[9]</sup>,所以与有热沉的情况相比,无热沉时制冷器响应时间会增加.

### 4 总结

本文介绍了一种可同时测量半导体热电制冷器  $ZT$  值、最大制冷温差和响应时间的瞬态方法,这种方法具有装置简单、准确度高的特点,可用于薄膜热电器件测试,另外瞬态方法耗时短,可大大缩短半导体制冷器可靠性测试的周期. 在推导  $ZT$  值计算公式时,“工作电流较小的情况下焦耳热可以忽略”的假设不影响测试结果的准确性. 这种方法不仅可以用于单级制冷器测试,也可用于多级阵列式制冷器测试.

### 参考文献

- [ 1 ] Nolas G S, Sharp J, Goldsmid H J. Thermoelectrics: basic principles and new materials developments. Springer Press, 2001
- [ 2 ] Mahan G D, Woods L M. Multilayer thermionic refrigeration. Phys Rev Lett, 1998, 80: 4016
- [ 3 ] Yershova L B, Gromov G G, Drabkin I A. Complex express TEC testing. Proc of XXII Int Conf on Thermoelectrics, La Grande Motte, France, 2003: 504
- [ 4 ] Chris L. Heterostructure integrated thermionic cooling of optoelectronic devices. PhD Dissertation, University of California Santa Barbara, 2001
- [ 5 ] Fan Xiaofeng. Silicon micro coolers. PhD Dissertation, University of California Santa Barbara, 2002
- [ 6 ] Wang Hongjie, Chen Jincan. Optimal analysis of performance characteristics of combined semiconductor refrigeration system. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(7): 938 (in Chinese) [王宏杰, 陈金灿. 耦合半导体制冷系统性能特性的优化分析. 半导体学报, 2001, 22(7): 938]
- [ 7 ] Rowe D M. CRC handbook of thermoelectrics. CRC Press, 1995
- [ 8 ] Xu Desheng. Semiconductor cooling and applying techniques. Shanghai: Press of Shanghai Jiao Tong University, 1992 (in Chinese)

Chinese) [徐得胜. 半导体制冷与应用技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1992]

Press, 1999 (in Chinese) [戴锅生. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1999]

[ 9 ] Dai Guosheng. Heat conduction. Beijing: High Education

## A Transient Method for Testing Thermoelectric Coolers \*

Gong Changmeng<sup>1</sup>, Chen Zhen<sup>1</sup>, Wu Zhou<sup>1</sup>, Chang Guoqiang<sup>1</sup>,  
Qian Ruiming<sup>1</sup>, and Chen Yunfei<sup>1,2,†</sup>

(1 Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2 Key Laboratory of MEMS of the Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract :** The figure of merit  $ZT$ , maximum temperature difference, and response time are important parameters for thermoelectric coolers. A transient method for testing these parameters is introduced, and the effect of the heat sink is also discussed. The resistance and Seebeck voltages used to calculate the  $ZT$  and the maximum temperature difference are measured using a testing system composed of a DC pulse generator and a DAQ card. The transient method is simple and accurate, and can be used to test thin film thermoelectric coolers. In addition, this method spends very little time. Thus, it can shorten the reliability test period for thermoelectric coolers. A 4mm ×4mm ×2.4mm commercial thermoelectric cooler is tested using this method. A figure of merit  $ZT$  of 0.39, maximum temperature difference of 58.5K, and response time of 20s is measured.

**Key words :** thermoelectric cooler; transient method; resistance voltage; Seebeck voltage

**PACC :** 6590; 0150K; 7360J

**Article ID :** 0253-4177(2006)05-0944-04

\* Project supported by the State Key Development for Basic Research of China (No. 2006CB300404), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50276011, 50275026), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. B K2005063)

† Corresponding author. Email: yunfeichen@seu.edu.cn

Received 23 September 2005, revised manuscript received 25 November 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics