

半导体热电效应在制冷设备的应用研究

张圣钊

广西城市职业大学 广西崇左

【摘要】 半导体热电效应在制冷设备的应用研究已成为热门领域。相对于压缩机的冷却，它具有体积小，没有移动部件、噪音等优点；由于其具有无污染、低能耗等特点。当前，半导体制冷片被广泛地用于各类热电制冷的应用，并已进入商用，以适应医疗仪器，电子设备与设备，红外探测器等。本文综述了近年来在该领域的研究进展。热电材料的独特特性使其成为一种有效的制冷技术，具有环保、高效和可靠的优势。本文的研究通过使用一些实验室仪器对部分样品进行测试获得制冷片样品的性能参数，对于推动半导体热电效应在制冷设备中的应用具有重要的参考价值。

【关键词】 半导体热电效应；热电制冷；热能污染

【收稿日期】 2023 年 5 月 11 日 **【出刊日期】** 2023 年 6 月 20 日 **【DOI】** 10.12208/j.ijme.20230024

Research on the application of semiconductor thermoelectric effect in refrigeration equipment

Shengzhao Zhang

Guangxi City Vocational University, Chongzuo, Guangxi

【Abstract】 The application research of semiconductor thermoelectric effect in refrigeration equipment has become a popular field. Compared with the cooling of the compressor, it has the advantages of small size, no moving parts and noise, with no pollution and low energy consumption. At present, the semiconductor refrigeration sheet is widely used in various kinds of thermoelectric refrigeration applications, and has entered the commercial use, to adapt to the medical instruments, electronic equipment and equipment, infrared detectors, etc. This review reviews recent advances in this field. The unique characteristics of thermoelectric materials make it an effective refrigeration technology with the advantages of being environmentally friendly, efficient and reliable. The study in this paper uses some samples with some laboratory instruments to obtain the performance parameters of refrigeration sheet samples, which has important reference value for promoting the application of semiconductor thermoelectric effect in refrigeration equipment.

【Keywords】 Semiconductor thermoelectric effect; Thermoelectric refrigeration; Thermal pollution

1 引言

半导体热电片的最根本的构造单位为一种半导体热电偶，也就是一种 P-N 结，它包括一种 P 型半导体与一种 N 型半导体。基于帕尔贴（Peltier）效应的热电致冷技术，即在 P/N 结处，将能量由 P/N 结处向 P/N 结处传输，在两个结处分别形成较低（较冷）和较高（较热）的两种致冷方式。一般将其作为一种新型的、具有较高冷却温度的多级式热电极材料，以获得较大的冷却温差。

相对于压缩机的冷却，它具有体积小，没有移

动部件，没有噪音等优点；由于其具有无污染、低能耗等特点，目前仅用于制冷，限制了其在制冷方面的应用。

当前，半导体制冷片被广泛地用于各类热电制冷的应用，并已进入商用，以适应医疗仪器，电子设备与设备，红外探测器；随着对激光等多种应用领域的需求，对半导体制冷片的要求也变得更加全面。通常情况下，半导体热电片的冷端温度和热端温差都与其热电偶对数、级联层数、通过电流的尺寸等密切相关。

2 实验部分

2.1 样品选择

在这一部分的实验中，我们选择了一些常见型号的半导体温差电片，它们的型号与它们相应的特性参数分别被显示在表 1、表 2、表 3 中，表 1 是具有不同 P-N 结对数的单级半导体温差电片样本的特性参数，表 2 是具有不同级联层数的多级半导体温差电片样本的特性参数，表 3 是具有不同尺寸的温差电片样本的特性参数，这些数据都来自于厂商的官方数据，样本是统一编号的。为了能够更好的比较出，在表 1、表 2 和表 3 中，所选择的样品的半导体热电片的极限电流都是 10A，6A，1A。

2.2 实验方法

使用实验室中已有的仪器，对表 1、表 2 和表 3 中所选择的样本的半导体温差电片提供直流电流，并使用水冷散热器对样本的热端进行辐射，以达到最佳的样本的冷冻特性，从而使得样本的冷端温度得到较低的冷冻温度；在对输入的电流电压进行变化的时候，对不同样本的冷端在不同的电流电压下所形成的冷端和热端温度进行了检测和记录，热端温度的采样点是在水冷散热装置的水冷头上，与热电片热端边缘非常接近的地方，使用了红外热象仪

来收集温度数据；采用了温差电偶法对温度场进行了测量，减少了测量结果的偏差。然后整理，计算，分析数据。

3 结果与讨论

3.1 P-N 结对数对单级热电片制冷性能的影响研究

由表 1 可以发现，当样品半导体热电片的 P-N 结对数持续增大时，其所能承载的极限电压值、最大制冷量都会随之增大，而最大制冷温差则保持不变，这说明了半导体热电片的热电偶对数愈多，其制冷能力愈高。但是，它的内部电阻也随之增大，也就是，它的焦耳热损失也随之增大，这将对它的冷却特性产生某种程度的影响。

在单一材质的热电偶对中，一个单级热电片所包含的 P-N 结的对数将会对该单级热电导率产生很大的影响。随着 P-N 结对数的提高，半导体温差电片的总赛贝克系数、总电阻、总热导都会随之提高，随着 P-N 结对数的提高，会使帕尔贴热变得更高，但是，与此同时，提高的焦耳热和热电偶臂导电热会将部分帕尔贴制冷量给抵消掉，所以，P-N 结对数对半导体温差电片的最终致冷性能的影响还需要深入探讨。

表 1 不同 P-N 结对数的制冷片样品的性能参数

样品编号	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
尺寸 (mm)	10x10	20x20	30x30	40x40
热电偶对数 n	7	31	71	127
参考内阻 R (Q)	0.06	0.27	0.64	1.13.
极限电压 Vmax (V)	0.82	3.66	8.4	15
最大电流 Inax (A)	10	10	10	10
最大制冷量 Qcnax (W)	4.8	20.2	47.3	85
最大温差 Thax (C)	66	66	66	66

表 2 不同级联层数的热电片样品的性能参数

样品编号	样品 5	样品 6	样品 7	样品 8
热电堆级数	单级	二级	三级	四级
尺寸 (mm)	40x40	40x40	25x38x50	5x20x30x40
热电偶对数 n	127	190	229	246
参考内阻 R (Q)	1.95	2.2	1.63	2.85
极限电压 Vmax (V)	15	16	16	14.6
最大电流 Imax (A)	6	6	6	6
最大制冷量 Qcmax (I)	51.4	36	26.4	13.5
最大温差 Tmax (C)	67	80	90	107

表3 微半导体热电片样品的性能参数

样品编号	尺寸 (mm)	热电偶对数 n	内阻 R (Ω)	极限电压 Vmax (V)	最大电流 Imax (A)	最大制冷量 Qcmax (W)	最大温差 Tmax (°C)
样品 9	3.4x3.4	18	2.3	2.5	1.5	2.0	76
样品 10	3.4x4.5	24	3.2	3.3	1.5	2.7	76

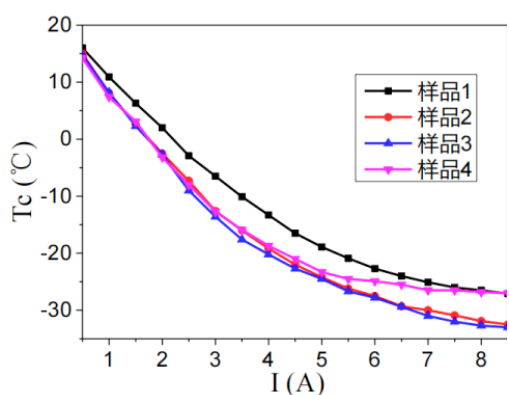


图1 不同样品的冷端温度随电流变化的曲线

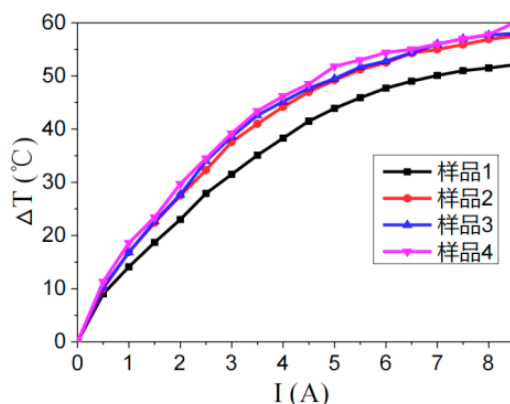


图2 不同样品的冷热端的制冷温差随电流变化的曲线

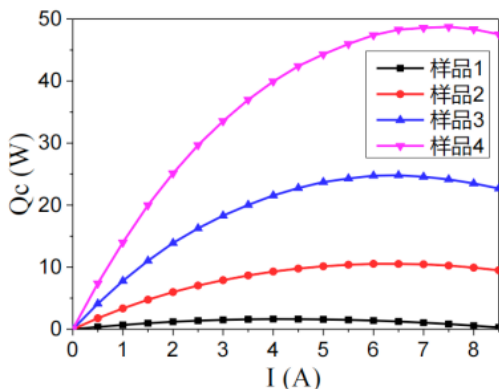


图3 不同样品的制冷量随电流变化的曲线

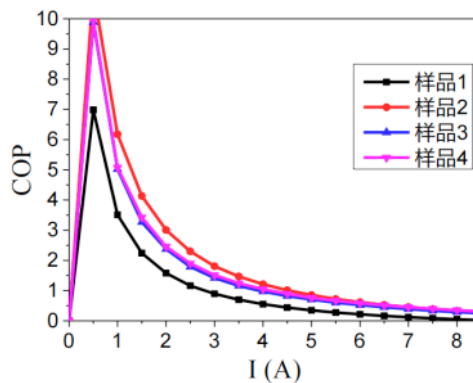


图4 不同样品的制冷效率随电流变化的曲线

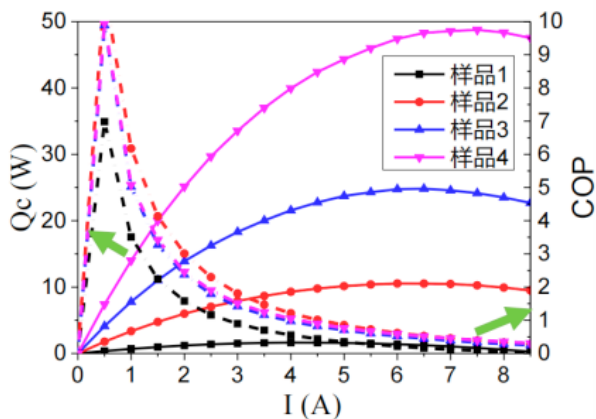


图5 不同样品的制冷量和制冷效率随电流变化的曲线的对比图

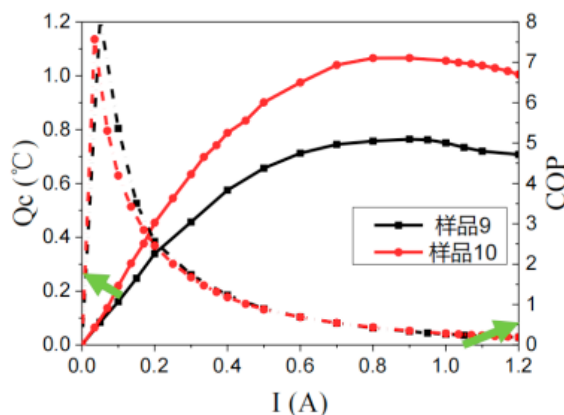


图6 热电片的制冷量和制冷效率随电流变化的曲线的对比图

图 1, 图 2 显示了以水冷却的形式存在于单级半导晶片中, 在各种电流情况下, 各试样的冷端处的温度场与致冷温差场。由曲线分析可知, 当加热末端的温度保持不变时, 随着加热末端的升高, 冷却末端的温度下降, 同时随着加热末端的升高, 冷却末端的温差增大; 但是, 它们并不是无限的减小或增加, 当电流增大到一定的范围后, 冷、热两个端部的温差就会趋于饱和, 不会随着电流的改变而发生变化。在相同的电流下, 当试样中含有更多的 PN 结时, 得到更多的 PN 结时, 则得到更大的冷、热端区更大的温差, 而冷、热端区则更小。由于试样中含有更多的 P-N 结, 所以当电流增大时, 试样 4 在热端处会出现更多的焦耳热损失, 从而使试样 4 在热端处发热; 在实验中, 受仪器的限制, 无法对其热端进行良好的放散, 从而造成了试样 4 在其冷端达到饱和时, 产生的电流很少; 但对其所引起的低温温度变化不大。所以, 半导体热电片的热端散热器的散热性能对其制冷性能起到关键作用。

图 3, 图 4 显示了以水冷却方式对单级热晶体管进行冷却时, 在各种电流状态下, 对各试样所得到的制冷率变化规律, 对各试样所得到的制冷率变化规律进行了分析。当电流的增大时, 试样的制冷量和制冷效率都会出现先增大后降低的情况, 所以有两个不同的电流值。”和 I_{max} 会使制冷片的制冷量和制冷效率达到最大。在相同的电流条件下, 当试样中 PN 结数目较多时, 试样的制冷能力较大, 而当冷却能力最大时, 试样所需的制冷能力也较大。最高制冷率所对应的电流值 I_{max} 很低, 大于 I_{max} 以后, 其制冷率随电流的增大而降低; 这是由于在制冷系统中, 由于温度的变化, 由于温度的变化, 在制冷系统中, 由于温度的变化, 会发生反向热转移, 从而损耗更多的热能, 在当前的数值趋于临界点时, 会出现更多的问题。试样的致冷率均接近 0。

而在低电流条件下, 由于其冷、热两个端部的温度差异很小, 导致的冷却温度差也很小, 其冷却效果 COP 明显高于 1; 这是由于在低电压下, 尽管在低电压下制冷能力很低, 但是由于其在低电压下的温度变化, 所需的热能以及由温度变化引起的反向传热也很少, 从而提高了热电转化效率。所以, 在实际工作中, 还要求提高冷却效果, 这样既可以降低电力的损耗, 又可以采用具有一定辐射功率的

散热器; 降低冷冻设备的成本, 改善冷冻设备的经济性。

图 5 是在单级热晶体管热端使用水冷却的情况下, 在两种情况下, 制冷量与制冷率之间的关系曲线, 如图 3 所示, 其主要内容是: 1) 制冷率达到最高时所需的电流值 I_{opt} ; 2) 制冷率与制冷率最高时所需的电流值 I_{max} , 且 $I_{max} < I_{opt}$ 在实际应用中, 一般会要求制冷片尽量接近最优 COP 的工作点, 以求经济上的最优, 但通常很难做到。一方面, 当制冷片以最佳 COP 运行时, 尤其是在冷热两个端点之间的温度差异不大时, 其热电转化效率会达到最佳, 消耗的电能也会很少, 但是, 由于制冷片所生成的制冷量远远小于其所能达到的最大制冷量, 致使其所能发挥的制冷力就会大大降低; 在对制冷率有一定需求的情况下, 为了获得同样的制冷率, 需要采用更多 P-N 结对数的热导率, 这将大大提高制冷率, 从而导致了制冷率的降低, 从而导致了制冷率的降低。反之, 如果要使致冷器在最大的制冷力下运行, 就必须使运行电流越大, 从而使制冷力越大; 由致冷器叶片引起的焦耳热量损耗显著增大。随着电流的增大, 冷、热两个端部之间的温度差增大, 反向传热的能耗增大, 造成了较大的热损耗; 这使得制冷器的冷却效果显著下降。所以, 最优制冷容量也不是制冷叶片的最优工作状态。

根据以上的分析可以看出, 如果要想实现热电片的冷却特性, 也就是在工作中既具有高的制冷量又具有高的冷却效率, 就必须尽可能地确保热电片工作在两种限制状态之间; 所以, 制冷板的最优操作电流范围是在与 Q_c -I 曲线和 COP-I 曲线的相交点相对应的电流值和与最大制冷量相对应的电流值 I_{opt} 。在实际的工作过程中, 可以针对特定的要求, 对其工作电流进行相应的调节, 从而使得整个制冷系统的工作状态更加接近于理想的工作状态。

3.2 影响热电板致冷特性的几个因素

半导体制冷片广泛应用于电子元器件, 集成电路, 半导体激光器等领域; 对于像探测器这样的高热密度设备, 它的局部或总体散热, 其面积可以只有 $1.8 \times 1.8 \text{mm}^2$, 并且其制冷量也很低, 最多只有数瓦特, 但其最大的制冷温差也可以达到 76°C ; 所以它的冷却能力也是不可忽视的。从图中我们能够看到, 当在热端温度不变的时候, 冷端温度会随电流的增大而下降, 然后又重新上升, 但是, 冷却温

差会因为电流的增大而增大, 最终会趋向于饱和。在相同的电流下, 当试样中含有更多的 PN 结时, 得到更多的 PN 结时, 则得到更大的冷、热端区更大的温度差, 而冷、热端区则更小。试样 9 与试样 10 在 -11.3°C 与 -13.2°C 下, 所能达到的最大冷却温差为 40.3°C 与 42.3°C 下。

与传统的导热片相比, 导热片具有较高的集成程度, 并且具有较小的导热表面, 使得导热端的每一块导热表面的导热系数都会大幅提高, 并且当电流增大时, 导热表面的导热系数也会随之增大; 由于热板中的焦耳热和电偶臂之间的温差导热逐渐增大, 在无法迅速散热的情况下, 使热板中的热板温度迅速升高, 并将热板中的热板传到冷板中; 导致了冷端的温度不会再下降, 而是会出现反弹, 因此, 热电片的热端对散热器的散热能力要比传统的热电片有更高的需求。

图 6 是致冷器叶片的致冷量及致冷率与电流关系的比较图表, 由该表可见, 致冷器叶片的致冷量及致冷率随着电流的增大而增大, 且与传统的单级热电极叶片相似, 致冷器叶片的致冷量及致冷率随着电流的增大而增大, 而后降低。在相同的运行环境中, P-N 结较多的试样, 其冷末端温度较高, 温差较大, 制冷能力较高。在试验中, 测试得到的样本 9 和样本 10 的最大制冷量分别为 0.76W 和 1.03W , 可以看出它的制冷量确实很小。但是, 由于热电片拥有尺寸小、制冷温差大的优势, 它可以很好地适应于尺寸化、结构集成化等特殊工况的制冷要求, 所以还需要对其结构与制造工艺进行进一步改进, 同时还可以对散热器的散热能力进行加强, 从而提升热电片的制冷性能。让它在制冷方面更有效率。

3.3 制冷应用的最佳经济性分析

与单一晶闸管相比, 多晶闸管能在更低的工作温度下, 以更低的工作温度和更高的工作温度, 大大提高了半导体制冷系统的工作温度。改善其冷却效果, 使整体冷却系统更经济。所以, 在有较高的制冷率和较高的制冷条件下, 建议采用单级热交换器。在受限环境下, 对制冷力要求很高的情况下, 以半导体制冷机为代表, 建议采用具有大制冷力和大温差的双级热电板。在要求制冷功率小、温差大的制冷工作中, 如光电等, 建议采用能够在小电流下产生很大温差的三级及三级以上的多级热电片。而热电片主要用于通讯工业中的激光器、高集成的

微型片等特定的工作环境。

4 结论

采用理论和试验相结合的方法, 对一些常见类型的半导体热传导板进行了研究, 通过计算得到了各种 P-N 结对数对单级热传导板的冷却特性的影响, 以及级联层数对多级热传导板的冷却特性的影响, 从而对各种类型的热传导板进行了优化, 得到了如下的结论:

当加热末端温度不变时, 随着电流的增大, 加热末端的温度逐渐下降, 并且在加热末端的温度逐渐增大, 最终趋于饱和。当电流增大时, 其制冷率和制冷率均呈现出先上升后下降的趋势, 并出现了一个最大制冷率和一个最优 COP。在此条件下, 该系统的制冷率趋于 0。在相同的电流下, 单级热电片中含有的 P-N 结的对数较多, 其冷端温度较高, 所形成的制冷温差较大, 制冷量较高, 制冷效率较低。热电片的冷端温度可以在 -10°C 以下, 在低温下可以达到 40°C 以上, 尽管它的体积很小, 所需要的制冷量也很少, 但是它对于微小的热源的制冷性能仍然不可小视; 但是它的热端对散热器的散热性有很高的要求。

参考文献

- [1] 巨增平措. 半导体技术发展过程中的基础研究分析. 电子元器件与信息技术, 2018.
- [2] 丁炯;钟银彪;俞雄飞;杨遂军;叶树亮. 基于半导体控温的高精密低漂移测温系统. 仪表技术与传感器, 2018.
- [3] 胡方德;胡民康;胡婷;余鑫;张格斐. 一种基于半导体制冷器黑体辐射源的温度控制器设计. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2018
- [4] 秦继伟;洪占勇;刘建宏;余刚. 用于量子密钥分发的半导体激光器温控系统. 激光与红外, 2018
- [5] 张莞睿;董国波;汪海涛;熊畅;李英姿;刁训刚;李华. 基于半导体制冷元件的新型湿度测量器. 大学物理实验, 2018
- [6] 桑策;姚雨;申利梅;陈焕新;孙森. 界面接触效应对不同尺度半导体制冷器性能的影响. 制冷技术, 2018.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS