

## LED 照明系统的半导体制冷散热设计

### 0. 引言

在世界能源短缺, 环境污染日益严重的今天, 充分开发并利用太阳能是世界各国政府积极实施的能源战略之一。太阳能 LED 照明系统的应用符合这一战略决策的发展趋势。然而, LED 照明系统的发展在很大程度上受到了散热问题的影响。

对于 LED 照明系统来讲, LED 在工作过程中只能将一小部分的电能转化成光能, 而大部分的能量被转化成了热能。随着 LED 功率的增大, 发热量增多, 如果散热问题解决不好, 热量集中在尺寸很小的芯片内, 使得芯片内部温度越来越高。当温度升高时将造成以下影响 [1]: (1) 工作电压减少; 光强减少; 光的波长变长。(2) 降低 LED 驱动器的效率、损伤磁性元件及输出电容器等的寿命, 使 LED 驱动器的可靠度降低。(3) 降低 LED 的寿命, 加速 LED 的光衰。LED 照明系统的散热问题已经成为制约该项技术发展的一个主要障碍。目前, 在解决 LED 照明系统的散热问题上主要采用的方法有: 调整 LED 的间距; 合理加大 LED 与金属芯印制板间距离; 打孔方式; 安装风扇。这些方法在实际应用中受到许多客观条件的影响, 散热效果并不是很理想。

半导体制冷又称热电制冷 [2], 是利用半导体材料的 Peltier 效应。当直流电通过两种不同半导体材料串联成的电偶时, 在电偶的两端即可分别吸收热量和放出热量, 可以实现制冷的目的。它是一种产生负热阻的制冷技术, 其特点是无运动部件, 可靠性也比较高。利用半导体制冷的方式来解决 LED 照明系统的散热问题, 具有很高的实用价值。

#### 1. 半导体制冷的工作原理

1934 年法国人帕尔帖发现: 当电流流经两个不同导体形成的接点处会产生放热和吸热现象, 放热或吸热由电流的大小来定。

$$Q=aTI$$

上式中:  $Q$  为放热或吸热功率;  $a$  为温差电动势率;  $T$  为冷接点温度;  $I$  为工作电流。

基于帕尔帖效应原理, 帕尔帖效应制冷也叫温差制冷。半导体制冷技术的主要原理是基于帕尔帖效应。半导体制冷是根据热电效应技术的特点, 采用特殊半导体材料热电堆来制冷, 能够将电能直接转换为热能, 效率较高。目前制冷器所采用的半导体材料最主要为碲化铋 [3], 加入不纯物经过特殊处理而成 N 型或 P 型半导体温差元件, 它的工作特点是一面制冷一面发热。

根据量子理论, 金属与半导体材料具有不同的能级、不同的接触电位差和不同的载流子。如图 1 所示, P 型与 N 型半导体之间用金属板连接, 另一端通过金属板构成图中电路, 当合上电键  $k$  时, 就会有图中的电流通过 PN 结, 这样就会在半导体与金属板相连的上端形成帕

尔帖冷效应，下端形成帕尔帖热效应[4]。

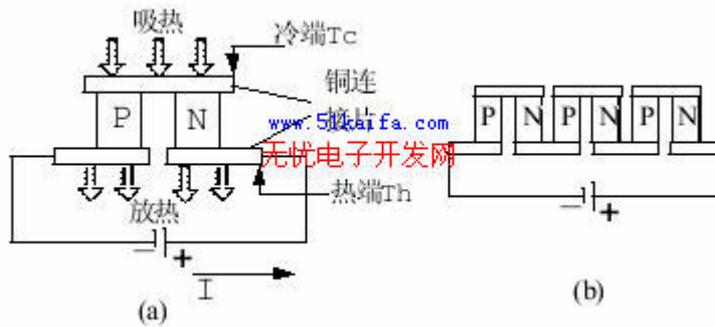


图 1 半导体制冷基本原理图

## 2. 半导体制冷系统的设计

### 2.1 半导体制冷系统构成

在半导体制冷系统中，制冷片采用 TEC1-12703 型温差电制冷组件，根据照明系统的特点，选用具有可视性、坚韧性、耐高温等特性的有机玻璃作为制冷器壁。为了更好地解决太阳能 LED 照明系统的散热问题，利用控制器来有效的控制半导体制冷系统。

### 2.2 半导体制冷控制器的组成与控制原理

依据半导体制冷理论，在 TEC(半导体制冷系统)两端施加一个直流电压就会产生一个直流电流，这会使 TEC 一端发热另一端制冷。我们称发热的一端为“热端”，制冷的一端为“冷端”，把 TEC 两端的电压极性对调，电流将反向流动，“热端”与“冷端”也将互换。TEC 作为半导体制冷应用中的冷热源，其操作具有可逆性，既可以用来制冷，又可以用于制热。针对解决太阳能 LED 照明系统散热问题的实际情况，我们选择高集成度的高性能单片机 ADUC824 作为控制核心，通过软件编程完成对半导体制冷器的控制。ADUC824 是 AD 公司推出的 8051 内核的高性能单片机，内部集成了两路(21 位+16 位)A/D、12 位 D/A、FLASH、WDT、 $\mu P$  监控、温度传感器、SPI 和 I2C 总线接口等丰富资源集成于一体，ADUC824 体积小、功率低、具备在线编程调试功能，无须开发装置。采用 ADUC824 作为半导体制冷控制器的核心，提高了设计的可靠性，同时大大简化了电路的设计。半导体制冷的功率驱动采用 H 型(全桥式)电路，可以在单电源供电的条件下完成对负载的双向电流驱动，完成 TEC 制冷的操作，

从而实现对目标的控制。基于 ADUC824 的半导体制冷控制原理框图如图 2 所示[1]。

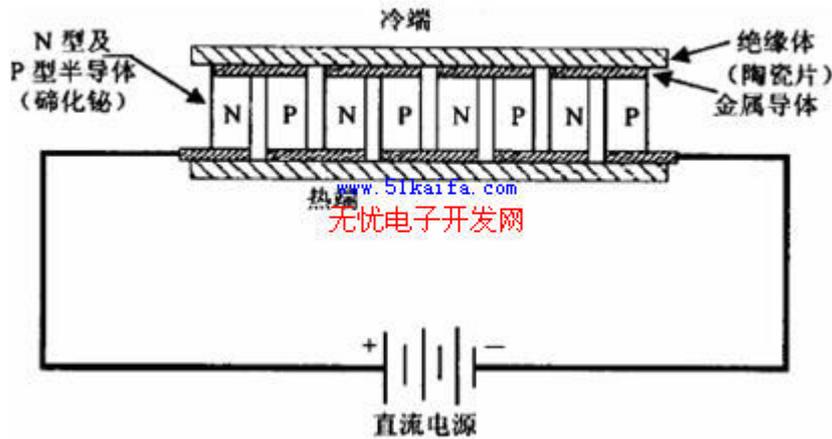


图 2 半导体制冷控制原理框图

### 2.3 半导体制冷系统的设计模型

由文章前面部分的分析可知：利用直流电通过 PN 结就可以使热量由高温物体传向低温物体，改变电流的流向就可以很方便的实现制冷和制热的转换。用半导体制冷不用考虑因制冷剂泄漏而导致的环境污染问题，并且整个系统无焊接管路。图 3 为半导体制冷系统的模型结构图。它是由许多 N 型和 P 型半导体颗粒互相排列而成，而 N-P 之间以一般的导体相连接而形成一完整线路，通常是铜、铝或其他金属导体，最后用两片陶瓷片夹起来。接通直流电源后，电子由负极(-)出发，首先经过 P 型半导体，在此吸收热量，到了 N 型半导体，又将热量放出，每经过一个 N-P 模组，就有热量由一边被送到另外一边，造成温差，从而形成冷热端。

#### 3. 半导体制冷系统的特性分析

##### 3.1 半导体制冷系统的优点：

- (1) 尺寸小，重量轻，适合小容量、小尺寸的特殊制冷环境。
- (2) 不使用制冷剂，故无泄漏，对环境无污染。
- (3) 无运动部件，因而工作时无噪声，无磨损，寿命长，可靠性高。
- (4) 半导体制冷系统参数不受空间方向的影响，即不受重力场影响，在航天航空领域中有广泛的应用。
- (5) 作用速度快，工作可靠，使用寿命长，易控制，调节方便，可通过调节工作电流大小来调节日制冷能力。也可通过切换电流的方向来改变其制冷或供暖的工作状态。

基于以上特点可将其应用于解决太阳能 LED 照明系统的散热问题。

##### 3.2 半导体制冷系统的工作特性

半导体制冷系统由热电堆、冷端换热器、热端换热器及控制器组成，其中热电堆是制冷器件。由于热电堆是由多对电偶组成，且对电流而言，各电偶对是串联的；而对热流，各电偶对是并联的。因此，分析热电堆的性能时，只需分析电偶对的制冷性能即可。一对电偶的制冷量、

电压、输出功率和制冷系数分别为[2]:

$$Q=AIT_c-K\Delta T-I^2R/2 \quad (W) \quad (1)$$

$$V=IR+A\Delta T \quad (V) \quad (2)$$

$$N=VI$$

$$=I^2R+AI\Delta T \quad (W) \quad (3)$$

$$C=\frac{AT_c-K\Delta T-I^2R/2}{I^2R+A-I\Delta T} \quad (4)$$

其中 Q 为电偶对的制冷量(W);I 为工作电流(A);K 为电偶对的导热率(W/K);T 为冷热端温差(K);R 为电偶对的电阻( $\Omega$ );A 为电偶对的温差电势率(V/K);T<sub>c</sub> 为电偶对冷端温度(K)。

#### 4. 半导体制冷系统的散热效果

早在 20 世纪 50 年代就曾经掀起过一股半导体制冷热潮。但由于当时元件性能较差(即制冷系数太低)而未能进入实用化[5]。半导体制冷材料和工艺是决定这一技术兴衰的关键,主要是提高半导体材料的优值系数。

优值系数 Z 是用来衡量半导体材料制冷性能的一个技术指标[6],它决定制冷元件所能达到的最大温差。优值系数越高,制冷性能越好,效率也越高。优值系数主要由半导体材料

的温差电动势率  $\alpha$ 、半导体材料的总导热系数 k、电阻率 r 等参数决定,其公式为:  $Z=\frac{\alpha^2}{kr}$

(5)

随着载流子浓度的增大,温差电动势率  $\alpha$  减小,而电阻率 r 也减小,总导热系数 k 与载流子浓度,使 Z 达到最大。当载流子浓度接近  $10^{19}cm^{-3}$  时,半导体材料的优值系数最高。

半导体材料的优值系数 Z 是一个随温度而改变的函数,所以选择半导体材料时不仅要求其优值系数要尽可能大,而且还要求在使用温区内优值系数变化不大,且能始终保持较高值,并满足机械强度、耐热冲击、可焊接性及材料来源和造价等方面的要求。尽量采用性价比较高的半导体材料来提高制冷能力。

#### 5. 仿真实验

实验器材主要用:半导体制冷系统、太阳能 LED 照明系统、控制器、隔热板、温度传感器、温度采集仪器、计算机、导热硅胶等。

实验步骤和方法:将半导体制冷系统的冷端安装在太阳能 LED 照明系统内,把热端放在照明系统外部,使得它能与外部环境直接接触。再在照明系统的内部安置一个温度传感器,控制器和温度采样仪器可以通过温度传感器实时得到照明系统内部的温度。最后,将安装好半导体制冷系统和温度传感器的照明系统密闭好,目的是使其不受外界温度影响。如图 4

所示，为该仿真实验的系统图。

先让照明系统工作 30 分钟，测得内部温度为 69.3℃，这时让半导体制冷系统开始工作，经过 15 分钟的制冷，发现照明系统内部的温度降为 39℃。实验证明，半导体制冷系统能很好地解决太阳能 LED 照明系统的散热问题。

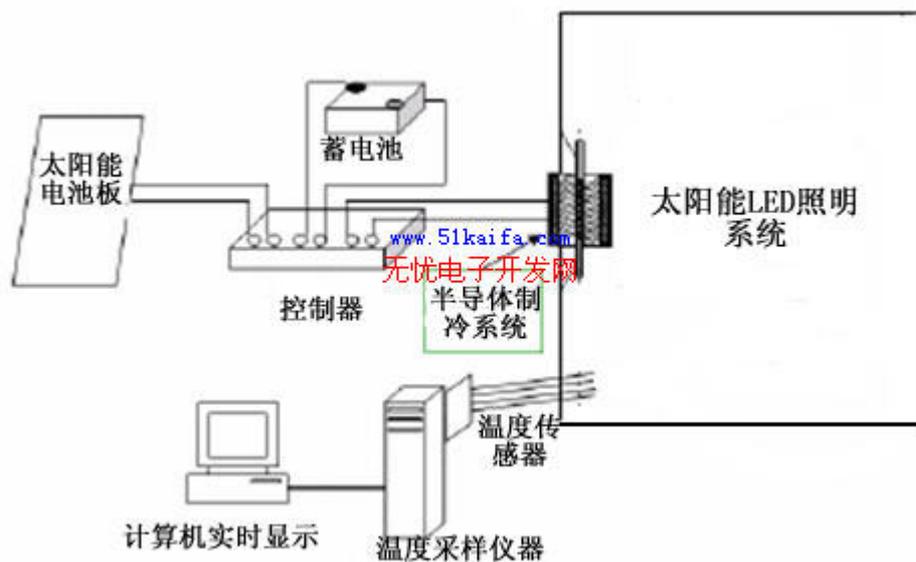


图 4 实验系统图

## 6. 结论

在过去的几十年里，半导体制冷材料及其器件的研究取得了很大的进展，该技术的商品化一直成为世界共同探讨的课题。要想制造出性能优良的半导体制冷组件，制冷材料必须具有较高的优值系数(Z)。目前世界上较高的 Z 值的半导体制冷材料是 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 合金。最近，在半导体制冷领域，世界上出现了对两种新型半导体制冷材料及其器件的研究热潮，并取得了一定的进展，使这一项技术得以商品化。

本文作者创新点:当前，太阳能 LED 照明系统的发展在很大程度上受到了散热问题的影响，将半导体制冷技术应用到解决这个问题上是一个独创的新思想。经过理论论证和多次的实验，这项技术的应用将越来越成熟。