

第二代像增强器散热装置的设计与实现

曾昊 周立 李新碗

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室)

摘要: 文章设计并实现了一种梭型散热片装置, 结合环形半导体制冷片对像增强器的光阴极直接制冷。首先利用COMSOL仿真软件对散热片散热性能做了仿真测试, 最后实际测试了该散热装置的散热性能。仿真与实验结果比较符合, 并且都表现出该散热装置可以达到比较理想的散热效果, 与此同时, 也有效减小了因采用水冷却系统的体积, 增加了系统的便携性。

关键词: 像增强器; 噪声; 半导体制冷; COMSOL

Design and Implementation of the Heat Sink for the 2nd Generation Image Intensifier

Zeng Hao Zhou Li Li Xinwan

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University)

Abstract: We design a new Spindle type heat sink and use it with an annular semiconductor refrigeration piece to refrigerate the photocathode directly. First, we simulate the cooling performance of the heat sink with COMSOL software, and then, we test its actual cooling performance. The two results are almost in tune and both show ideal cooling performance. In the same time, the volume of the system decreases notably and the system becomes more portable.

Key words: image intensifier; noise; semiconductor refrigeration; COMSOL

0 引言

像增强器^[1]是一种能把微弱的光学图像转换为适合人眼观察的光学图像的真空光器件。广泛用于安全、医疗、工业、科研、旅游和运动等领域。

像增强器包含光电阴极^[2,3]、微通道板^[4-6](MCP)和荧光屏(阳极)三个部分。在像增强器工作的时候, 这三个部分均会引入噪声。由于荧光屏的余辉效应, 对前一级的噪声起着低通滤波的作用^[7], 所以像增强器的噪声成分主要为直流和低频交流噪声, 阴极热电子发射引起的直流噪声为像增强器噪声的主要贡献者, 因此阴极降噪也成为核心问题之一。

现在国内外大多采用半导体制冷的方式对CCD进行降温, 从而达到降噪的目的。制冷方式以水冷形式为主。其中英国Photek公司的产品相机温度控制器PTC-3^[8]采用的是两级半导体制冷加水冷却; 英国Andor公司的产品DH5H5 ICCD^[9]和法国HORIBA Jobin Yvon公司的产品i-Spectrum 2 ICCD^[10]也是采用的这种方式, 这些产品最低温度都可以达到-30℃以下。为了直接给阴极降温以达到更好的降噪目的, 邵冲在其论文^[11]中提出了一种环形半导体制冷片的设计制作方案, 并且采用了冰水冷却的散热方式, 使光电阴极的最低温度达到了-38℃, 从而很好地抑制了阴极的热噪声发射。

水冷带来的问题是体积大、控制驱动系统复杂, 而且现有研究表明, 当温度降低到某一程度时, 阴极热噪声发射已经比较微弱了, 若继续降温, 热噪声减小的幅度并不是很明显。为此, 本文仍然采用

这样的环形半导体制冷片(一级), 设计了一种梭型的散热片结合散热风扇进行散热。在有效降低整个系统体积的前提下, 仍然可以达到比较好的降噪目的, 使得该系统更加有利于在对便携性要求高的环境下的使用。

1 散热装置的设计

1.1 散热方式的选择

与SJTU第一代像增强器系统^[11]比较, 我们仍然采用的是口径为25mm的像增强管, 制冷方法仍然采用的是半导体制冷片直接对阴极制冷, 不同之处在于: 只采用一级半导体制冷; 散热端不再采用水循环制冷, 而是采用了梭型散热片加风冷的方式。

对SJTU第一代微光像增强器系统, 我们测得其阴极噪声随温度的变化趋势如图1所示。

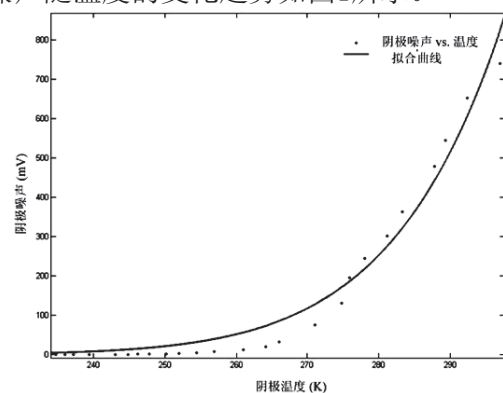


图1 阴极噪声随温度变化关系

由图1可看出：阴极热噪声随温度是成指数变化的，在温度小于270K(-3℃)的时候，噪声增长得很缓慢，超过这个温度以后，噪声才呈现出较快的增长趋势。水冷却虽然可以降温至30度以下，但是引入了水泵，冰箱等大型设备，同样也引入了像增强器窗口容易冷凝形成水珠影响成像等问题，其效率并不高。

本文工作主要集中在梭型散热片的设计与散热效率的仿真上，并在实验中采用风冷却代替水冷却，在明显缩小系统体积的前提下，确保仍能实现比较好的降噪效果。

1.2 散热结构的设计

半导体制冷片冷端对像增强器阴极制冷，同时热端会放出大量的热。如果热量无法顺利散出，就会导致半导体制冷片两端的温度同时上升，从而降低降噪的能力。在本文中，将采用散热片加风冷的方式对半导体制冷片的热端进行散热。

我们自行设计的微光像增强器系统正中间是必须通光的，而半导体制冷片也是环形的，因此考虑散热片设计为如图2所示的梭型：

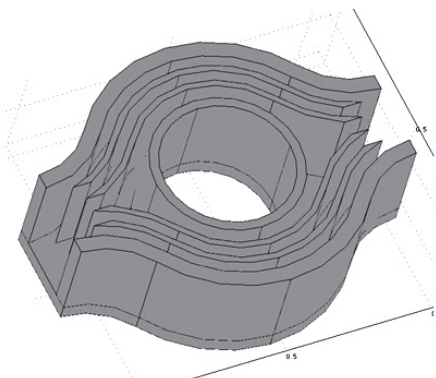


图2 散热片结构示意图

为加工方便，所有的曲线均是规则的圆弧，中间的孔为通光的路径，两边放置散热风扇。

2 理论分析及仿真

2.1 理论分析

半导体制冷^[12]是以温差电现象为基础的一种制冷方法。它是利用塞贝克效应的逆效应，即帕尔贴效应的原理来达到制冷的目的。

半导体材料的内部结构特点，决定了它所产生的温差电现象要比其他材料明显得多，因此，热电制冷一般都采用半导体制冷这种方式。

当电偶对通以直流电I时，帕尔贴效应产生的制冷量与电流成正比^[12]：

$$Q_c = aTcI \quad (1)$$

其中a表示单位温度产生的电动势，Tc代表半导体材料冷端的温度。

当有电流流过半导体材料时，热电元件内部还会产生焦耳热，即：

$$Q_j = I^2R \quad (2)$$

式中R为热电元件的电阻。在实际过程中，有一半的焦耳热传向半导体材料热端，另一半传向冷端。

除了焦耳热，由于半导体材料两端存在温差，从热电对的热端还会传递一部分热量至冷端：

$$Q_k = k(T_h - T_c) \quad (3)$$

式中k为热电元件的总导热系数。

因此，电偶对的制冷量应为帕尔贴效应吸收的热量减去一半的焦耳热，再减去冷热端之间的传导热^[12]，即：

$$Q_0 = aIT_c - \frac{1}{2}I^2R - k(T_h - T_c) \quad (4)$$

由上式，假设相对焦耳热冷端吸热量较少，为做近似，将其忽略，则温差可由式(5)表示：

$$\Delta T = \frac{1}{k}(aIT_c - \frac{1}{2}I^2R) \quad (5)$$

同理，电偶对的热端发热量^[12]为：

$$Q = aIT_c + \frac{1}{2}I^2R - k(T_h - T_c) \quad (6)$$

所以热端发热量与冷端吸热量之间正好相差焦耳热I²R。当冷端吸热较小或制冷片工作电压较大时，可近似认为：

$$Q = I^2R \quad (7)$$

另外，加在半导体制冷片两端的电压不完全消耗在制冷片电阻的降压上，其中有一小部分用于抵消温差电动势^[12]，由下式表示：

$$U = IR + a\Delta T \quad (8)$$

2.2 仿真模型

本文中采用COMSOL作为仿真工具，首先，建立如图3所示的模型。

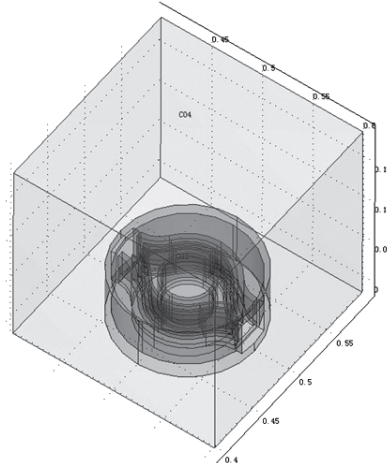


图3 COMSOL仿真模型示意图

为与实际情况更接近，我们加上散热片外端的圆柱型腔体壳，其两侧各有一个30×30mm的方形孔，用于放置散热风扇，最外层是一个边长为40cm的正方体空间，其间充满了标准大气压的空气。由于引入了散热风扇，在x方向上引入了一定速度的空气流动以接近实际效果。

为确定公式(5)、(8)中的系数，我们对半导体制冷片性能进行了实测，并进行数据拟合。实测数据由表1所示。

表1 不同电压下的电流和温差

$U(V)$	$I(A)$	$\Delta T(^{\circ}C)$
0	0	0
1	0.5	10.3
2	1.1	16.7
3	1.7	21.5
4	2.3	29.2
5	3	36.4
6	3.6	41.4
7	4.2	46.7
8	4.9	50

由式(5), ΔT 与 I 成抛物线关系, 由上表第2、3列数据可以拟合得到:

$$\Delta T = 1.032I^2 + 15.28I \quad (9)$$

即: $a = \frac{R}{2k} = 1.032, b = \frac{\alpha T_c}{k} = 15.28 \quad (10)$

同理, 对于式(8), 我们近似认为 R, a 均为常数, 则可近似认为式(8)是一个平面方程, 由matlab工具sftool可以拟合得到:

$$A = 0.03604, R = 1.262 \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得到: $k = 0.6114$.

2.3 仿真结果及分析

结合式(5)、(8)可得:

$$U = \alpha \Delta T + R \frac{b - \sqrt{b^2 - 4a\Delta T}}{2a} \quad (12)$$

由式(12)可得到 $\Delta T-U$ 曲线, 如图4所示。

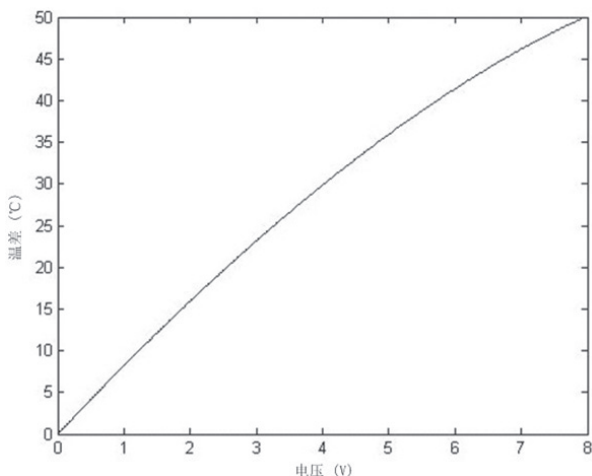


图4 ΔT 与电压 U 的关系

以0.5V为间隔, 将半导体制冷片电压从0V加至8V, 假定空气温度为20°C, 通过COMSOL软件仿真半导体制冷片冷端的温度变化情况。

在给定制冷片工作电压下, 我们可以通过式(12)计算其温差 ΔT , 通过式(5)和(8)计算电流 I , 通过式(7)计算热端放热量 Q , 再通过COMSOL仿真得到散热片温度(即制冷片热端温度), 两者相减可得冷端温度。COMSOL中需输入的参数是单位面积的散热功率, 因此, Q 最后还需除以环形半导体制冷片的面积 $0.0049m^2$ 。上述过程由表2、3表示。

表2 不同电压下的电流和散热量

$U(V)$	$I(A)$	$Q(W)$	$Q/S(W/m^2)$
0	0	0	0
0.5	0.28	0.099	20.2
1	0.56	0.398	80.8
1.5	0.84	0.89	181.7
2	1.13	1.611	328.9
2.5	1.42	2.545	519.3
3	1.72	3.734	761.9
3.5	2.01	5.099	1040.5
4	2.32	6.793	1386.2
4.5	2.62	8.663	1767.9
5	2.94	10.91	2226.2
5.5	3.25	13.33	2720.4
6	3.57	16.08	3282.5
6.5	3.90	19.20	3917.4
7	4.23	22.58	4608.3
7.5	4.57	26.36	5378.9
8	4.91	30.42	6209.1

表3 不同电压下的温差和冷热端温度

$U(V)$	$\Delta T(^{\circ}C)$	$T_h(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$
0	0	20	20
0.5	4.20	20.09	15.89
1	8.23	20.36	12.13
1.5	12.11	20.80	8.69
2	15.95	21.45	5.50
2.5	19.62	22.29	2.67
3	23.23	23.37	0.14
3.5	26.54	24.61	-1.93
4	29.90	26.15	-3.75
4.5	32.95	27.85	-5.10
5	36.00	29.91	-6.09
5.5	38.76	32.14	-6.62
6	41.40	34.69	-6.71
6.5	43.90	37.58	-6.32
7	46.17	40.75	-5.42
7.5	48.28	44.31	-3.97
8	50.15	48.17	-1.98

通过表3可以得到冷、热端的温度随半导体制冷片工作电压变化地曲线, 如图5所示。

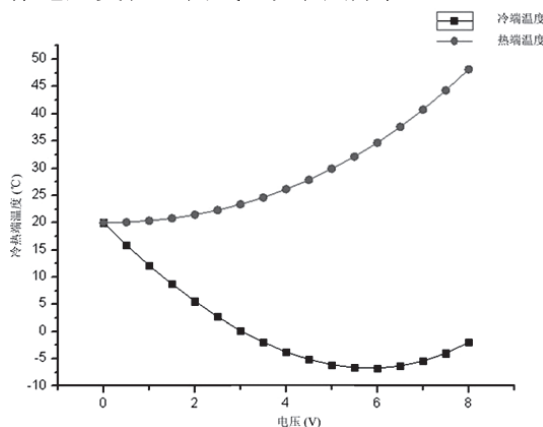


图5 制冷片温度与电压的关系

由图5, 基于梭型散热片条件下的半导体制冷片最佳工作电压在6V左右, 而且在6V左右的这个范围内其性能差别并不大。

又由图4, ΔT 随着半导体制冷片工作电压的增加而增加, 但是增加的速度逐渐减小; 另外, 从式(9)可以看出, 当电流 I 增加的时候, 热端散热量 Q 是成2次方增长趋势的。结合以上两点, 在制冷片工作电压较小时, 热端温度上升得较慢, 而温差变化却显得很快, 所以冷端的温度也就呈下降趋势; 当制冷片工作电压较大的时候, 焦耳热变得很明显, 热端温度上升得也越来越快, 温差也因为电流的变大而逐渐减小增加的速度, 甚至有可能开始减小, 这个时候, 冷端的温度又逐渐又开始回升。

3 实验结果及分析

在实际实验中, 对半导体制冷片施加不同的电压, 采用每隔一分钟测量一个数据点, 测量30分钟的方法测量光阴极(半导体制冷片冷端)温度的变化情况, 如图6所示:

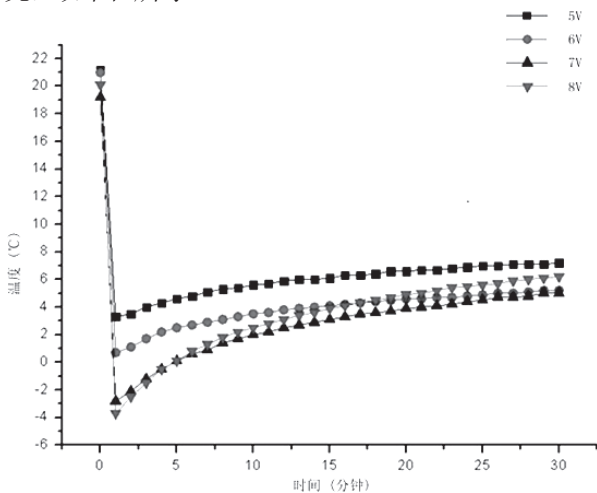


图6 制冷片冷端温度与电压的关系

由图6可以看出, 给半导体制冷片加上某一电压时, 其冷端温度会迅速下降, 继而慢慢回升; 另外, 能达到的最低温度也是逐渐下降的。

但是散热片散热是一个过程, 所以在半导体制冷片工作时, 其热端必然存在热量的积聚, 使得冷端温度达到一个最低点后会有一定程度的反弹, 随着散热片和周围温度达到一个热交换平衡时, 冷端的温度才会趋于稳定。对于半导体制冷片两端电压为5V和6V的时候, 就是这种情况, 当散热时间超过20min, 冷端的温度变化很小或者说已经基本不变了。

对于一块特定的散热片, 存在一个最大的散热功率, 当超过这一功率的时候, 热量便越积越多, 温度也持续上升。在图6中, 当半导体制冷片两端电压加至7V的时候, 此时温度回升的速度明显超过了两端电压取5V和6V时候的温度回升速度。当加热至30min的时候, 此时的温度已经基本和同期半导体制冷片电压为6V时的冷端温度持平。此后也是持

缓慢增长趋势。而当电压取8V时, 温度升高的速度更加明显。

4 总结

由以上分析, 半导体制冷片的工作电压在6~7V为宜, 温度稳定在4°C左右, 仿真结果也显示出最佳工作电压为6V。当然, 仿真与实际的理论分析还是有一定差别, 因为仿真时的 ΔT 是表示的冷端吸热量为0时的最大温差, 实际当中温差是略小于这个值的; 另外, 半导体制冷片的电阻会随着环境温度的改变有微小的变化, 这会影响到焦耳热。

此外, 该散热系统还是有改进的余地, 使其性能更佳。从表1、2可以看出, 制冷片工作电压较低时, 散热量并不大, 而且还可以获得比较可观的温差, 因此, 采用多级制冷可以使该系统的冷端温度更低。

由于加工工艺的局限, 散热片表面积还不够大, 不能进一步提高散热的能力。另一个方面, 风扇的转速也不够高, 使得散热片和空气的热交换速度得到了限制。如果这些方面能够得到改进, 系统的制冷效果将会更佳。

参考文献:

- [1] 艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. 应用光学, 2006(4): 303-307.
- [2] Dowell D H, Schmerge J H. Quantum efficiency and thermal emittance of metal photocathode[J/OL]. Jul 2009, <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-13535.pdf>.
- [3] 马建一, 孙键. 透射式GaAs光电阴极研究. 光电子技术. 2010, 30(2): 76-79.
- [4] 程耀进, 石峰, 郭晖, 等. MCP参数对微光像增强器分辨力影响研究[J]. 应用光学, 2010(2): 292-296.
- [5] 乐务时, 陈楠, 龙高群, 等. 小孔径微通道板[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 810-814.
- [6] 刘术林, 匡蕾, 孙建宁, 等. 降低微通道板输入面电极反射率的技术途径[J]. 应用光学, 2011(2): 296-299.
- [7] 钱芸生, 常本康, 童默颖, 等. 像增强器噪声频谱特性测试技术研究[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 67-70.
- [8] Photek. Camera Temperature Controller PTC-3 Datasheet[R]. 2001.
- [9] Andor. DH5H7 ICCD camera datasheet[R]. 2008.
- [10] HORIBA, i-Spectrum 2 ICCD detector datasheet[J]. 2008.
- [11] 邵冲. 微光成像器件制冷结构与噪声性能分析研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [12] 西安交通大学制冷与低温工程系. 制冷与低温原理[M]. 2007.

(下接21页)

电压具有饱和性, 整个系统的噪声因子开始趋于饱和, 这与理论仿真图2的变化趋势基本相同。因此最终的输出信噪比随着阴极电压的缓慢增加而趋于饱和。

3 总结

光电阴极材料的特性决定着阴极的噪声, 本文首先分析了阴极电压对像增强器背景噪声和信噪比的影响, 然后通过实验测试得: 增大阴极电压的幅度, 像增强器背景噪声随之呈指数增长; 输出信噪比随之呈单调增长, 最后在阴极电压约为-160V时趋于饱和。

在像增强器内部参数确定的情况下, 改变阴极场助电压, 在一定程度上可以提高其工作的性能。综合上述分析, 为了尽量提高系统信噪比, 同时适当地抑制系统暗背景噪声, 阴极电压最佳在-160V左右。

参考文献:

- [1] 艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. 应用光学, 2006, 27(4):303-307.
- [2] Kan Wu, Xinwan Li. Theoretical and experimental analysis of the gating performance of a photocathode-gated image tube using a femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2009. 48(18): 3337-3343.
- [3] 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [4] 邵冲. 微光成像器件制冷结构与噪声性能分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [5] 高有堂, 徐源. 像增强器光阴极在热冲击环境下噪声频谱分析[J]. 光学技术, 2010(1):61-65.
- [6] 刘术林, 董煜辉. 微光像增强器信噪比与MCP电压关系[J]. 应用光学, 2009, 30(4):650-653.
- [7] 承欢, 江剑平. 阴极电子学[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1986.
- [8] 叶凡. 几种带宽隙半导体材料的场发射特性研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- [9] 方如章, 刘玉凤. 光电器件[M]. 北京:国防工业出版, 1988:151-154.
- [10] 向世明. 微光像增强器信噪比理论极限问题研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5):724-727.
- [11] 李晋闽, 郭里辉. 场助InP/InGaAsP半导体光电阴极量子效率的理论计算[J]. 物理学报, 1992, 41(10):1672-1678.
- [12] Pollehn H, et al. Advances in electronics and electronic physics[J], A40,21(1976):21-31
- [13] 刘术林, 董煜辉. MCP输入电子能量与微光像增强器信噪比的关系[J]. 应用光学, 2008, 29(4):562-565.
- [14] 邹异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1989.
- [15] Dutoit A G. The newest measurement technology

of signal-to-noise ratio in image intensifiers[J]. SP IE, 1986, 691:16-18.

作者简介:

周立, 上海交通大学, 硕士

电话: 021-54748750; 13917642411

电子信箱: kid2009@sjtu.edu.cn

联系地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学
大学电院裙楼5-200B (200240)

基金项目:

国家自然科学基金项目: 60877012, 61071011, 61107041,

上海市重大基础研究项目(10DJ1400402)。

(上接28页)

作者简介:

曾昊, 上海交通大学, 硕士

电话: 021-54748750; 13661493126

电子信箱: zenghao198646@sjtu.edu.cn

联系地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学
大学电院裙楼5-200B (200240)

基金项目:

国家自然科学基金项目: 60877012, 61071011, 61107041,

上海市重大基础研究项目(10DJ1400402)。