

微型红外探测器组件快速冷却过程数值模拟分析

刘家琛, 唐 鑫, 巨永林

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

摘要: 随着探测技术的飞速发展, 红外探测器获得了越来越广泛的应用。对一种快速启动的微型红外探测器内部结构进行了数值模拟和传热计算。模拟结果表明: 接触热阻对探测器组件冷却过程和时间的影响显著, 通过调整接触热阻的大小, 探测器芯片冷却到 90 K 所用的时间在 4~10 s 之间变动。初始环境温度和光阑表面发射率对芯片的冷却效果影响不大。节流冷头温度的变化对探测器组件冷却影响较大, 当节流冷头温度下降较慢时, 其对芯片启动时间影响较大。在实验过程中可以通过优化接触热阻和节流冷头这两个因素来提高探测器组件冷却效果, 从而达到更高的要求。

关键词: 红外探测器; 快速冷却; 接触热阻; 数值模拟

中图分类号: TB661 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0816-05

Numerical simulation on the fast cooling-down process of a miniature infrared detector module

Liu Jiachen, Tang Xin, Ju Yonglin

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the rapid development of detection technologies, the infrared detectors have gained more and more applications. The internal structure of a miniature infrared detector for fast cooling-down process was numerically simulated and analyzed in this paper. The simulating result shows that the thermal contact resistance has significant effect on the detector module cooling-down process. By adjusting the contact resistance, the cooling-down time of the detector chip from ambient temperature to 90 K are 4-10 s. The effects of the initial ambient temperature and the diaphragm surface emissivity show few influence on the cooling-down process of the chip. While the temperature of the throttling cool head has a great impact on the cooling-down process. The faster the temperature drops, the shorter the startup time of the chip. Therefore, the detector can be improved by optimizing the thermal contact resistance and the throttling cool head, to achieve the higher requirements.

Key words: infrared detector; fast cooling; thermal contact resistance; numerical simulation

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-15

作者简介: 刘家琛(1990-), 男, 硕士生, 主要从事低温传热研究。Email: liujc626@163.com

通讯作者: 巨永林(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事低温工程与低温物理研究。Email: yju@sytu.edu.cn

0 引言

红外探测器是红外系统的核心部件,主要功能是将不可见的红外辐射转化为可测量的信号。自20世纪40年代德国研制出硫化铅探测器以来,红外探测器不断向单波段红外焦平面、多波段红外焦平面和灵巧型集成探测器组件发展^[1]。现代科学技术的进展,为红外探测器的研究提供了多样的技术和途径,高性能探测器也是层出不穷。现代的探测器研究已成为集物理、材料、光电、计算机等诸多领域为一体的综合科学技术^[2]。

红外探测器最初主要应用于军事领域,特别是导弹、炮弹、炸弹等在内的制导武器均装备了红外探测器,是探测、截获和跟踪目标的重要组件^[3]。同时,随着遥感仪器技术的不断发展,也促进了红外探测器在航天领域的应用^[4]。主要在气象、资源、对地观测等卫星中广泛使用^[5]。红外探测器件的迅猛发展,使得军事红外技术不断向民用部门转化,其应用于工业、农业、医学、交通等各个领域和部门,产生了显著的社会和经济效益^[6-7]。

在一些特殊领域中,要求探测器在几秒内或更短时间内进入工作状态,于是就需要对影响探测器的快速降温的过程和因素进行深入分析和研究,从而更好地指导实际探测器的设计及制作,以达到快速冷却的需求。文中正是基于一种微型探测器的快速冷却的需求,通过数值模拟的方式来研究影响其降温过程的各方面因素,总结出主要的影响因子,从而优化探测器内部结构及传热过程来满足实际需要。

1 数值模型

这种微型探测器主要由芯片、滤光片、制冷器、读出电路和外壳组成。其主要在真空状态下工作,所以传热方式主要为热辐射和热传导,不考虑热对流的影响。为此,只需要对探测器内部结构进行导热及辐射传热模拟分析即可得到其整体的工作性能。

图1所示为这种微型常规探测器的结构示意图,其由冷头、磁封合金、芯片、布线层、支架、分光层和光阑组成。探测器组件各部分尺寸如表1所示。其各部分材料的物性如表2所示。

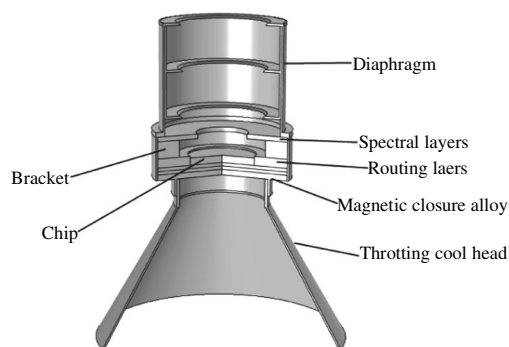


图1 探测器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the detector

表1 探测器组件尺寸参数

Tab.1 Size parameters of the detector module

| Structure | Diameter1 /mm | Diameter2 /mm | Diameter3 /mm | Thickness1 /mm | Thickness2 /mm |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Throtting cool head | 8 | - | - | 2.55 | 0.15 |
| Magnetic closure alloy | 12 | 8.9 | 8.5 | 0.5 | 2 |
| Chip | 6 | - | - | 0.65 | - |
| Routing layers | 12 | 6 | - | 0.8 | - |
| Bracket layers | 12 | 8 | - | 1.5 | - |
| Spectral layers | 12 | 4.6 | - | 0.4 | - |
| Diaphragm1 | 12 | 11 | 10.7 | 0.4 | 9.3 |
| Diaphragm2 | 10.7 | 10.4 | 7.4 | 0.2 | 8.2 |

表2 探测器材料物性参数

Tab.2 Detector material parameters

| Material | Density /g·cm ⁻³ | Cp /kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹ | Thermal conductivity /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ | Surface emissivity |
|----------------------------|--------------------------------|---|---|--------------------|
| Diaphragm | 2.78 | 0.921 | 188 | 0.95-0.98 |
| Bracket and routing layers | 3.26 | 0.72-0.76 | 180 | - |
| Magnetic closure alloy | 8.4 | 0.5 | 16 | - |
| Chip | 2.2 | 0.7 | 149 | - |
| Spectral layers | 3.7 | 0.79 | 17 | 0.9-0.95 |
| Throtting cool head | 4.43 | 0.55 | 8.4 | - |

在真空与低温环境中,元器件的加热与冷却主要是通过固体之间的接触导热实现的。无论固体表面多么光滑,微观上他们都是粗糙不平的,因而两个固体之间的接触是不完全接触。当热流通过界面时,这种不完全接触导致了接触界面的温度跳跃,从而

产生了接触热阻^[8]。

根据界面处温差大小,定义接触热阻的表达式为:

$$R = \frac{\Delta T}{Q/A} = \frac{\Delta T}{q}$$

式中: ΔT 为接触面的温差; A 为名义接触面积。

此外,光阑表面发射率以及节流冷头的温度对于芯片表面温度变化也有很大的影响。因此,需要对探测器进行模拟计算来分析各个因素的影响结果。

2 计算结果与分析

对于上述的数学模型,采用 COMSOL Multiphysics 进行模拟计算。以有限元法为基础,通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真。同时,提供大量预定义的物理应用模式,涵盖声学、化工、流体流动、热传导、结构力学、电磁分析等多种物理场。模型中的材料属性以及边界条件都可根据实际需求来设置。

选用三维热传导模型来建立模拟对象,在完成其几何建模之后,选择各个结构的材料,并修改材料的物性参数。然后,根据模型的工作环境来设置换热边界条件,包括初始温度、辐射换热、接触热阻、冷头温度等一系列换热条件。模拟达到收敛之后可进行数据分析比较。

2.1 接触热阻的影响

界面间的接触热阻的数值取决于许多因素,包括两种材料的性质、表面粗糙程度、界面上所受的正压力等,虽然已经进行了大量的研究,但还是无法总结出通用的计算规律,对于不同的具体情况需要通过实验来确定^[9]。材料在降温过程中,会产生形变,接触面上的空隙厚度有可能是增大的,接触热阻也会随之增加。为此通过分析几组不同的接触热阻对芯片冷却效果进行分析。

光阑的表面发射率光阑表面发射率取 0.5,初始温度为 333.15 K,冷头温度为 77 K。于是,当接触层厚度为 20 μm ,热导率为 0.4 W/(m·K)时,即 A 类接触热阻 $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$,其芯片表面温度变化曲线如图 2 所示。从图中可以看出,随着时间的增加,芯片表面温度不断下降,在 $t=4 \text{ s}$ 时达到工作温度。

当接触层厚度为 10 μm ,热导率为 0.1 W/(m·K)时,即 B 类接触热阻为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$,其芯片表面温度变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出,随着

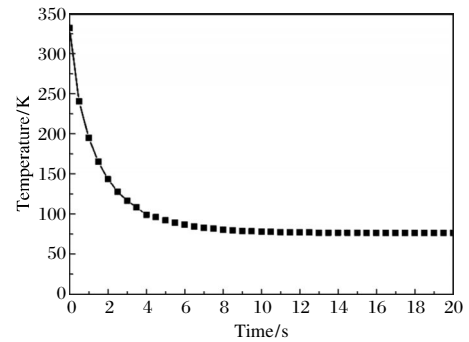


图 2 A 类接触热阻芯片温度变化曲线

Fig.2 Chip temperature curve at type A thermal contact resistance

时间的增加,芯片表面温度呈曲线下下降趋势,在 $t=6.5 \text{ s}$ 时达到工作温度。

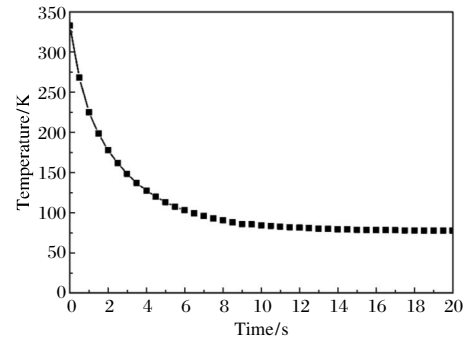


图 3 B 类接触热阻芯片温度变化曲线

Fig.3 Chip temperature curve at type B thermal contact resistance

当接触层厚度为 20 μm ,热导率为 0.1 W/(m·K)时,即 C 类接触热阻为 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$,其芯片表面温度变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出,随着时间的增加,芯片表面温度也曲线下下降,在 $t=10 \text{ s}$ 时达到工作温度。

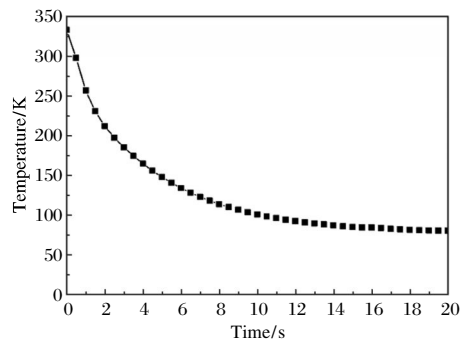


图 4 C 类接触热阻芯片温度变化曲线

Fig.4 Chip temperature curve at type C thermal contact resistance

于是,综合辐射率 $\epsilon=0.5$,初始温度为 333.15 K 时,对不同接触热阻时的结果进行对比,如表 3 所示。

表 3 接触热阻对芯片冷却效果影响

Tab.3 Influence of thermal contact resistance on chip cooling

| Thermal contact resistance/ $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ | Startup time/s |
|---|----------------|
| A 0.5×10^{-4} | 4 |
| B 1×10^{-4} | 6.5 |
| C 2×10^{-4} | 10 |

探测器要求工作温度在 100 K 之内,于是分析比较 3 种不同大小接触热阻对于芯片快速冷却的影响效果。从表 3 可以看出:随着接触热阻的增大,探测器快速启动时间也不断增加,所达到工作温度的时间也不断增大。但接触热阻大小与启动时间之间并不是完全的线性比例,而是正相关的关系。因此,改善界面接触状况,减小固体界面间的接触热阻,对于芯片快速冷却来说具有重要意义。

2.2 初始温度影响

考虑辐射率 $\epsilon=0.5$,冷头温度为 77 K,计算不同的初始温度对于启动时间的影响见表 4,其中启动时间定义为从设定初始温度冷却到 100 K 时的时间。

表 4 初始温度对芯片冷却效果影响

Tab.4 Influence of initial temperature on chip cooling

| Thermal contact resistance / $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ | Initial temperature | Initial temperature | Initial temperature |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 300.15 K | 333.15 K | 338.15 K |
| A 0.5×10^{-4} | 4 s | 4 s | 4 s |
| B 1×10^{-4} | 6 s | 6.5 s | 6.5 s |
| C 2×10^{-4} | 9.5 s | 10 s | 10.5 s |

从表 4 可以看出:随着初始温度即环境温度的增大,芯片快速冷却所需时间稍微增大,但是增大效果不明显。因此,环境温度的变化,对于芯片的快速启动影响不大,可以忽略其作用。

2.3 光阑表面发射率的影响

考虑冷头温度为 77 K,接触热阻选取 B 类接触热阻为 $1 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$,初始温度为 333.15 K。之前假设光阑表面发射率为 0.5。现在将其改为 0.3、0.4、0.5、0.6,其他条件保持不变,对模型进行计算,

其结果如图 5 所示。

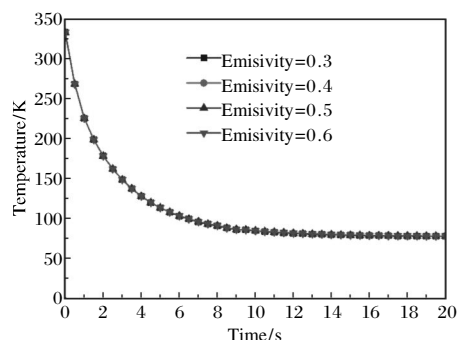


图 5 不同光阑表面发射率下芯片温度变化曲线

Fig.5 Chip temperature curve at different diaphragm surface emissivity

从图中可以看出,随着光阑表面发射率的变化,芯片表面温度几乎未发生改变。从而,可以得出发射率对于芯片降温影响很小。

2.4 节流冷头的影响

在 J-T 制冷机实际工作过程中,冷头温度是从室温逐步降低的。所以冷头温度是一个随时间变化的温度值,这其实增加了芯片冷却到预定温度的时间。为此假设一段冷头实验测得的实际温度数据,根据实际温度变化曲线拟合为理论曲线,通过编程将此温度变化导入到之前的模型中,进行进一步的计算。实验数据拟合结果为:

$$T=0.015867t^4-0.7857t^3+13.698t^2-98.132t+316.19$$

式中: T 为温度值; t 为时间变量。

考虑接触热阻为 $1 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$,接触层厚度为 $10 \mu\text{m}$,热导率 $0.1 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,初始温度为 333.15 K,光阑发射率为 0.5,于是对模型进行计算,其结果如图 6 所示。可以看出,这条冷头温度变化曲线出液氮的时间在 4 s,芯片冷却到工作温度所需的总时间为 8 s。

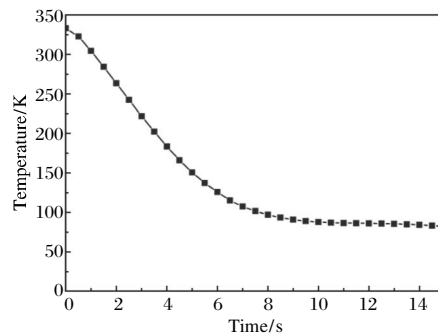


图 6 冷头曲线 1 时芯片温度变化曲线

Fig.6 Chip temperature curve at cool head line 1

考虑另一条冷头变化曲线,曲线拟合结果为:

$$T=0.0159t^4-0.6588t^3+9.3646t^2-52.261t+168.69$$

其模拟结果如图 7 所示。对于此冷头变化曲线,冷头出液氮的时间为 2.5 s,而芯片快速启动所需的总时间为 7 s。

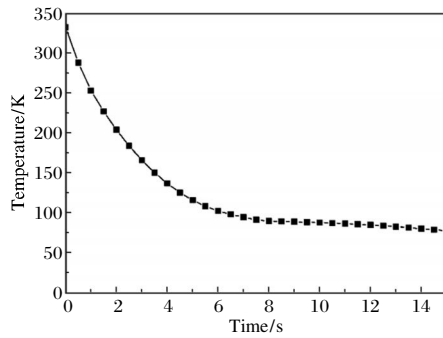


图 7 冷头曲线 2 时芯片温度变化曲线

Fig.7 Chip temperature curve at cool head line 2

综合考虑恒定冷头温度与两条变温曲线,可以得到对比结果如表 5 所示。

表 5 节流冷头对芯片冷却效果影响

Tab.5 Influence of throttling cool head on chip cooling

| | Cool head constant temperature | Cool head line 1 | Cool head line 2 |
|---------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Chip startup time/s | 6.5 | 8 | 7 |

从表 5 可以看出:当冷头温度下降较慢时,其对芯片启动时间影响较大。当节流冷头温度下降较快时,其对芯片快速冷却的影响变小。当节流冷头稳定在液氮温度时,其所需的启动时间达到最小。因此,随着冷头温度下降速度的增大,其对芯片冷却的影响越来越小。

3 结论

文中通过对一种微型红外探测器组件内部结构的数值模拟和传热计算,分析了接触热阻、初始温度、光阑表面发射率以及节流冷头对探测器芯片快速冷却的影响。模拟结果表明:接触热阻对探测器冷却过程和时间的影响显著,在冷却过程中起到主导作用。通过调整接触热阻的大小,探测器芯片冷却到

90 K 所花的时间也在 4~10 s 之间变动。初始环境温度在一定范围内的变化,对于芯片的冷却效果影响不大。同时,随着光阑表面发射率的变化,芯片表面温度几乎未发生改变,即发射率对于芯片降温影响较小。节流冷头温度的变化对探测器冷却影响较大,当冷头温度下降较慢时,其对芯片启动时间影响较大。

从模拟分析结果可知,初始温度和光阑表面发射率对于芯片冷却效果影响较小,而接触热阻与节流冷头对探测器芯片快速冷却的影响较大。因此,在实验过程中可以通过优化这两个因素来提高探测器组件冷却效果,从而达到更高的要求。

参考文献:

- [1] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 18-24. (in Chinese)
- [2] Xu Xin. Some design and simulation on infrared detector[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005. (in Chinese)
- [3] Zhao Hongyan, Ni Yongping, Wang Xiuping. Development of infrared detector and the application in air-to-air missile [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2008 (7): 46-49. (in Chinese)
- [4] Nakagawa T. SPICA: space infrared telescope for cosmology and astrophysics [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34 (3): 645-650.
- [5] Liu Zhaojun, Zhou Feng, Li Yu. Development and analysis of IR detectors for space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 25-29. (in Chinese)
- [6] Zhang Xue, Liang Xiaogeng. Development of and demands for infrared detectors [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(2): 41-45. (in Chinese)
- [7] Kulah H, Akin T. A current mirroring integration based readout circuit for high performance infrared FPA applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 2003, 50 (4): 181-186.
- [8] Li Zhiwei, Xu Lie, Su Heng, et al. Experimental research on thermal contact resistance under vacuum and low temperature [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2004, 32(1): 55-58. (in Chinese)
- [9] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)