

文章编号:1001-9014(2009)03-0173-04

## 320 × 256 短波红外焦平面温控系统设计与应用

张明涛, 谢仁彪, 朱磊, 刘银年, 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 针对碲镉汞红外焦平面需要在恒定低温条件下工作的要求, 设计并实现了基于热电制冷技术的红外焦平面温控系统。该温控系统具有体积小、响应速度快、可控性好及温控精度高等特点, 满足设计要求。实验结果表明, 该温控系统可使短波红外焦平面在 195K 时长期稳定工作, 温控精度优于 0.1℃, 焦平面暗电流及噪声水平均有明显改善。

**关键词:** 短波红外焦平面; 热电制冷; 暗电流

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

### DESIGN AND APPLICATION ON TEMPERATURE CONTROLLING SYSTEM OF 320 × 256 ELEMENT SHORT WAVE INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

ZHANG Ming-Tao, XIE Ren-Biao, ZHU Lei, LIU Yin-Nian, WANG Jian-Yu  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** According to the low-temperature and low-drift requirements for the HgCdTe SWIRFPA (short wave infrared focal plane array), a temperature controlling system was designed and implemented based on thermoelectric refrigeration. The system has a good performance of small volume, rapid response, high precision of temperature controlling and working stability. The experiment results indicate that the SWIRFPA can work at 195K with the steady error maintained within 0.1℃ by using this temperature controlling system, and at the same time the dark current and the noise level of the SWIRFPA have been decreased dramatically.

**Key words:** short wave infrared focal plane array (SWIRFPA); thermoelectric cooling (TEC); dark current

#### 引言

半导体光电探测器是红外探测器中最灵敏的一类, 探测率很高, 其中的光伏型碲镉汞 (MCT) 探测器由于其优良的性能而成为目前最重要的一种红外探测器。要获得高性能的器件, 就必须尽量减小暗电流。当前, 对碲镉汞探测器暗电流产生机制的研究已经比较深入, 其影响因素也有很多, 比如材料的掺杂浓度、表面钝化处理、器件的外加偏压以及工作温度等<sup>[1-3]</sup>, 其中, 探测器的工作温度对暗电流的影响显著。实验研究表明: 同样的红外探测器在 195K 低温和常温条件下, 其暗电流的增加将达到  $10^3 \sim 10^4$  倍。此外, 工作温度还对探测器的响应波段、量子效率、非均匀性、响应时间常数等性能也有很大影响。

随着加工工艺的不断改进, 碲镉汞探测器已经可以在较高工作温度下获得优良的探测性能。但是, 为了保证其高性能, 则要求其工作温度具有很好的稳定性。如法国 Sofradir 公司的 320 × 256 元短波红外焦平面探测器的推荐工作温度为 195K ± 0.2K/s。因此, 必须为红外探测器设计一种高精度的低温温控系统。

本文采用四级热电制冷来实现约 100K 的温差, 在室温环境下可为探测器提供 195K 左右的低温工作环境; 利用热电制冷精度高、响应快的特点实现探测器工作温度的高稳定性。同时, 采用基于 PWM 的功率驱动技术, 大大提高了系统的效率。高精度、高效率和高集成度的设计为在实验室环境下研究探测器工作温度及温度稳定性对其性能的影响具有重要意义。

收稿日期: 2008-10-21, 修回日期: 2009-01-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (0323035)

作者简介: 张明涛 (1982-), 男, 湖北襄樊人, 博士, 主要从事红外探测成像系统研究。Email: mtzhang@ustc.edu.

Received date: 2008-10-21, revised date: 2009-01-18

### 1 焦平面温度与性能

短波红外焦平面探测器基本部分是一个 P-N 结光二极管,波长比截止波长短的红外辐射被光二极管吸收后产生电子-空穴对。

在背景通量密度为  $\Phi_B$  的条件下,光二极管的电流电压特性为

$$I(V) = I_s [\exp(qV/kT) - 1] - \eta q \Phi_B A \quad (1)$$

式中,  $I_s$  为反向饱和电流,  $V$  是外加电压,  $A$  为光二极管的光敏面积,  $\eta$  为光二极管量子效率。

在无背景辐射的情况下,光二极管的电流即暗电流为

$$I_{dark} = I_s [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2)$$

由式(2)可见,光二极管的暗电流  $I_{dark}$  与温度密切相关. 研究表明,在  $T > 125K$  的温度范围,暗电流主要是由少数载流子扩散引起的反向饱和电流,其中  $I_s$  可表述为<sup>[4]</sup>

$$I_s = A \cdot J_{diff} = A \cdot q n_i^2 \sqrt{\frac{kT}{q}} \left( \sqrt{\frac{u_n}{\tau_n}} \cdot \frac{1}{N_a} + \sqrt{\frac{u_p}{\tau_p}} \cdot \frac{1}{N_d} \right) \quad (3)$$

其中,  $N_d$ 、 $N_a$  分别为 p 区和 n 区的掺杂浓度,  $u_{n,p}$  和  $\tau_{n,p}$  分别代表非平衡电子与空穴的迁移率和寿命。

可见,焦平面暗电流与温度的关系相当复杂. 不同温度下,暗电流的产生机制不同,其暗电流与温度关系的表述亦不同. 但是,在一定温度范围内,某种机制占据主导地位,其关系可以近似简化. 比如,由扩散电流产生的暗电流,其对数值与温度的倒数基本上呈线性变化,随着温度的降低暗电流下降显著<sup>[5]</sup>. 图 1 给出了法国 Sofradir 公司短波红外  $320 \times 256$  元焦平面阵列的暗电流与工作温度的关系曲线<sup>[6]</sup>.

### 2 制冷方案选择

目前,红外系统常用的制冷有辐射制冷、液氮制

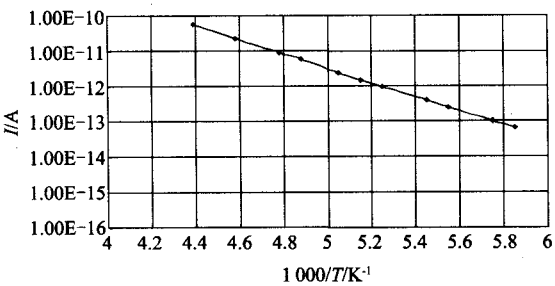


图 1  $320 \times 256$  元 SWIRFPA 探测器暗电流与温度的关系  
Fig. 1 Dark current vs operating temperature ( $320 \times 256$  SWIRFPA)

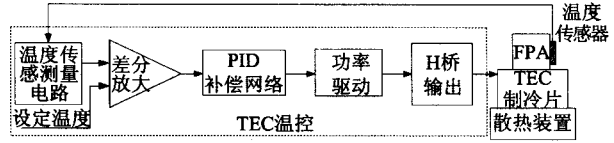


图 2 温控系统原理框图  
Fig. 2 Block diagram of temperature controlling system

冷、半导体制冷和机械制冷. 辐射制冷器在宇宙空间使用时有许多优点. 如结构简单、重量轻(常用铝材)、可靠性高、寿命长,不需要输入动力,无运动部件. 但它必需有低温背景环境,只能适用空间的红外系统。

使用液氮作为制冷工作质可以将探测器冷却到较低的工作温度,同时携带辅助的机械制冷设备以保证器件的可连续工作性. 但是,使用液氮制冷不可避免地会带来系统体积庞大的特点,不利于系统集成。

机械制冷具有制冷量大、制冷效率高、结构紧凑、制冷温度范围广、安装灵活以及受空间环境的影响较小等优点,是空间制冷技术的主要发展方向. 但是,其功耗大、有振动及电磁干扰、体积较大的缺点限制了其在小型化系统中的应用<sup>[7]</sup>.

半导体制冷器的特点是简单、可靠,除没有运动部件的优点外,还具有通过改变电流方向来实现加热和冷却的作用. 工作中没有噪音,体积小,重量轻,与工作中的方位或重力无关. 但是其实用温度只有在  $-80^\circ C$  以上,制冷器的性能系数比较低. 适用于冷却负载较小、有效空间小、重量轻、不需要大温差、必须长期工作而无需维修的地方。

本系统中,探测器的工作温度要求为 195K,且冷却负载小于 200mW,因此采用半导体热电制冷来实现,不仅能保证探测器性能,而且利于系统的小型化设计。

### 3 热电制冷方案设计

整个 TEC 温控系统由温度传感与测量、信号处理、硬件 PID 控制、PWM 功率驱动及滤波、热电制冷器构成,为了提高系统集成度,采用了 AD 公司的集成 TEC 控制芯片 ADN8830 作为温控核心单元<sup>[8]</sup>,系统原理框图如图 2 所示:

#### 3.1 温度传感与测量

本系统利用晶体三极管 2N2222 的发射结作为温度传感器,其发射结为一个硅半导体 PN 结. 硅半导体 PN 结的正向导通电压与温度在较大的范围内

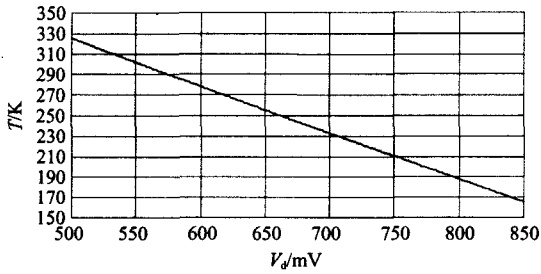


图3 PN结正向偏压与温度关系

Fig. 3 Forward bias vs temperature for PN junction

具有良好的线性关系,其电压温度系数约为  $-2\text{mV/K}$ ,因此适合大温度范围、较高精度的温度测量。

将晶体管置于探测器的焦平面上,接成基极与集电极短路即发射结正偏,集电结零偏作为二极管使用,从而把发射结二极管当作温度传感器,发射结电压作为温度传感器的输出。

法国 Sofradir 公司的  $320 \times 256$  元短波红外焦平面探测器内部自带测温三极管,为其发射结注入  $25\mu\text{A}$  的恒定电流,则正向偏压  $V_d$  与温度  $T$  关系可用式(4)表示如下:

$$T(V_d) = a \cdot V_d^4 + b \cdot V_d^3 + c \cdot V_d^2 + d \cdot V_d + e, \quad (4)$$

其中  $a = -460.6631$ ,  $b = 1052.8133$ ,  $c = -812.6656$ ,  $d = -227.7627$ ,  $e = 539.6459$ 。

由图3见,在  $150 \sim 330\text{K}$  的较大温度范围内,晶体三极管 2N2222 的发射结正向偏压与温度具有良好的线性关系,可用于实现大范围、高精度的温度测量。

### 3.2 信号处理

信号处理电路包括温度测量信号的放大、目标温度的设定以及误差信号差分放大。信号处理电路的性能直接决定了温控系统的控制精度。

由PN结的正向偏压与温度特性可知,采用上述二极管温度测量电路输出的反馈电压范围较小,在  $195 \sim 295\text{K}$  温度变化范围内,PN结正向偏压变化范围只有  $240\text{mV}$ ;另外,对于  $0.1^\circ\text{C}$  的温度分辨率,PN结正向偏压仅有  $0.2\text{mV}$  左右的输出,因此,为提高系统温控的精度,需要对测温电压进行放大处理。

目标温度的设定采用常用的参考电压与精密可调电阻分压来实现,可以实现设定温度点的动态调节,简单可靠。

温度反馈电压经过隔离放大电路后与设定温度电压进行比较,通过高增益的差分放大电路可以精确地分辨出两个电压间的误差信号,用于产生相应

的控制量。

为了使温控系统快速、稳定地达到设定温度值,需要在信号处理电路中加入校正环节,通过与焦平面热负载进行精确的匹配,调节系统的零极点,从而改善系统响应特性。本系统中采用有源串联校正环节来实现。通过选取合适的电阻和电容构成有源微分-积分校正环节,来补偿由热负载引起的相位延迟,改善系统的动态和稳态性能。

### 3.3 功率驱动输出及滤波

经过上述的信号处理及串联校正环节,温控系统输出与当前温差对应的控制信号,驱动后级的H桥路来执行最终的制冷控制。为降低功耗,提高效率,ADN8830采用一半开关输出,一半线性输出的方式,减少一半的输出电流纹波,同时也减少了一些外围器件。

热电制冷所需电流与焦平面工作温度、焦平面功耗及所用制冷片的特性有关。本系统中焦平面工作在  $195\text{K}$ ,室温为  $293\text{K}$ ,功耗为  $200\text{mW}$ ,制冷片采用美国 Marlow 公司的四级热电制冷片。根据制冷片参数,为达到所需的制冷量,需要为之提供约  $2.5\text{A}$  的制冷电流。由于驱动电流较大,因此选用 FDS8958A 作为 ADN8830 的外部 MOSFET 来驱动热电制冷器。

功率 MOSFET 具有导通电阻低、负载电流大的优点,因而非常适合作为 PWM 开关输出的执行元件。但是,大功率 MOSFET 的栅极电容较大,同时由于米勒效应,使得其等效栅极电容大于其输入电容,因此要使 ADN8830 输出的 PWM 波形快速驱动 MOSFET 开关,需要提供瞬时的大电流,而 ADN8830 本身又以难以提供此峰值电流。为解决此问题,本系统采用了专用的 MOSFET 驱动芯片 UCC27424 来尽可能缩短 MOSFET 栅极驱动电平的上升和下降时间,从而有效地防止了 H 桥路的直通。

为提高控温的精度,必须尽量减小 TEC 制冷器两端驱动电压的纹波,因此系统中采用 LC 低通滤波器对 PWM 输出端的方波信号进行滤波,得到低纹波的直流电平,从而在热电制冷器两端得到一个低纹波的温控驱动电压。

采用 ADN8830 单片解决方案,不但能改善系统噪声性能,而且还增加了可靠性,减小了温控电路的尺寸,使系统更加小型化,有利于与探测器及其驱动电路的集成。

## 4 实验结果

采用上述的温控系统为法国 Sofradir 公司的短

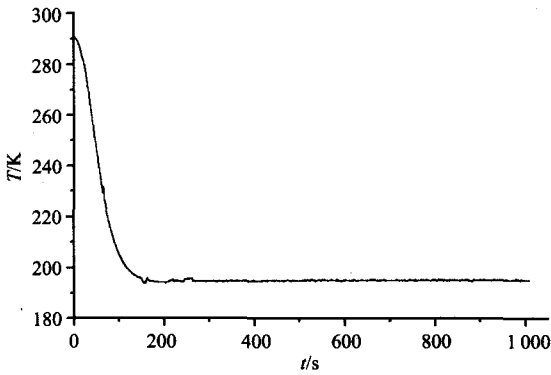


图4 温控系统响应曲线  
Fig.4 Curve of temperature-time relation for the temperature controlling system

波红外 320 × 256 元焦平面探测器进行制冷,制冷器的冷端温度为 195K,采用散热片加风扇的措施对制冷器热端进行散热,环境温度 293K,该温控系统温度响应曲线如图 4 所示。

实验结果表明,该温控系统达到了很好的控温性能.响应速度快,从开始制冷 293K 到平衡控制状态 195K 只需要 250s;同时,系统稳定度高,超调量很小,探测器温度稳定后,波动范围控制在 0.08℃,优于预期的 0.1℃,满足探测器工作的温度稳定性要求。

同时,对该温控系统功耗与效率分析如下.温度稳定后,系统总功耗为:

$$P_{total} = 12V \times 1.28A = 15.36W \quad (5)$$

TEC 负载功耗为

$$P_{load} = 5.8V \times 2.45A = 14.21W \quad (6)$$

因此,该温控系统效率为

$$\varepsilon = \frac{P_{load}}{P_{total}} = \frac{14.21}{15.36} = 92.5\% \quad (7)$$

可见,由于该温控系统输出采用了一半线性一半开关的方式,相比于全开关输出方式,减少了外围器件的额外功耗,提高了系统效率。

最后,用该温控系统对法国 Sofradir 公司的短波红外 320 × 256 元焦平面探测器进行制冷,对采集图像进行暗电平及噪声分析,得到实验结果如下。

图 5 ~ 7 实验结果可见,在低温 195K 的工作条件下,探测器的暗电平与暗电平噪声都有了很大的改善.其中,暗电平 DN 值由 220K 时的 308 下降至 195K 时的 102,暗电平噪声则由 2.65 下降至 2.55。

### 5 结论

综上所述,该温控系统具有结构简单、响应速度

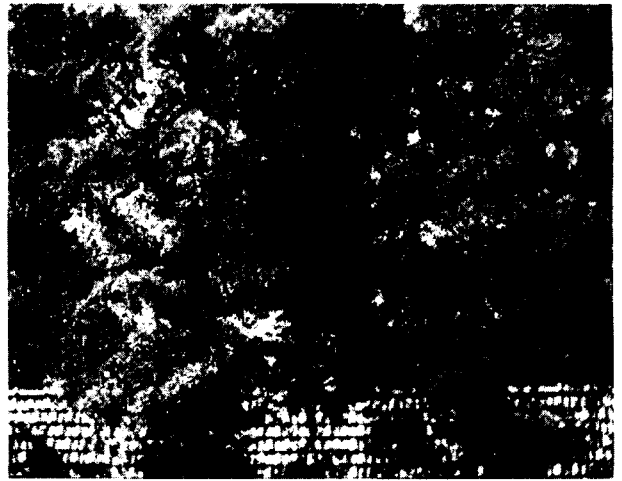


图5 195K 时焦平面成像结果  
Fig.5 Output image of SWIREPA at 195K

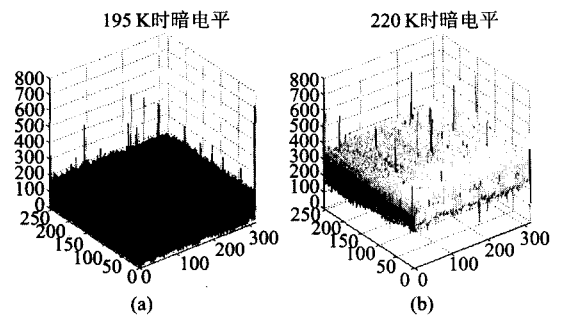


图6 不同温度时的暗电流比较  
Fig.6 Curves of dark current at different temperature

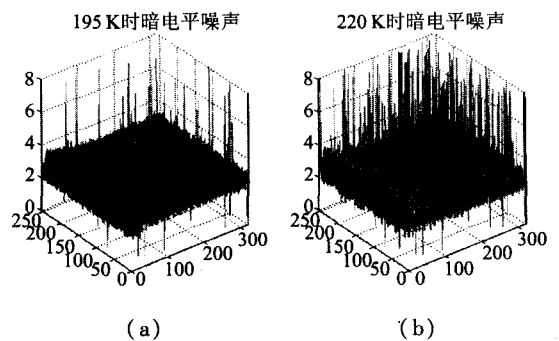


图7 不同温度时暗电流噪声比较 (a)195K (b)220K  
Fig.7 Curves of dark current noise at different temperature (a) 195K (b)220K

快、温控精度高的特点,满足了短波红外焦平面探测器恒定低温条件的工作要求,温控精度优于 0.1℃.使用该温控系统对法国 Sofradir 公司 320 × 256 元短波红外焦平面探测器进行制冷后,探测器可在 195K 的低温环境下长期稳定工作,其输出暗电流与暗电流噪声都有很大程度的改善。

(下转 180 页)

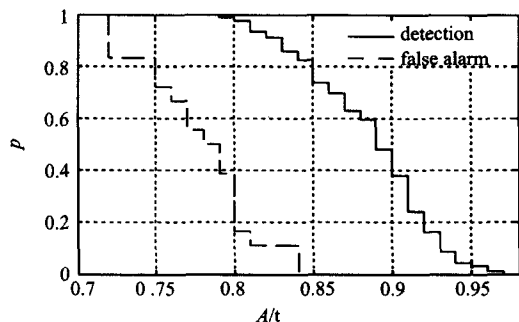


图6 探测概率、虚警率与隶属度门限的关系曲线  
Fig. 6 The relationship curves among detection probability, false alarm probability and the threshold of membership

对109组数据的识别效果进行了验证。图5中(a)图为91组坦克数据的隶属度分布直方图,(b)图为18组干扰的隶属度分布直方图,图5中纵坐标为频数。可见多数坦克的隶属度大于0.8,而干扰的隶属度则一般小于0.8。因此,选择合适的隶属度门限可得到较理想的探测概率和虚警率。图6为探测概率、虚警率与隶属度门限的关系曲线。

### 3 结论

为了实现对装甲目标的精确打击,本文对坦克的毫米波探测识别方法进行了探讨。该方法首先对坦克的毫米波试验数据进行处理和分析,确定特征参量,在此基础上提取各组数据的特征参量。在计算隶属度时,对特征参量矩阵进行数据规格化处理,使得数量级较大的特征参量与数量级较小的特征参量

的影响基本一致。出于实际考虑,计算过程中对较重要的特征参量进行了加权,扩大它们对计算结果的影响。仿真结果表明该目标识别方法是合理可行的。

### REFERENCES

- [1] ZHANG Guang-Feng, LI Xing-Guo, LOU Guo-Wei. Research on passive mmw imaging based on an alternating current radiometer[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张光锋,李兴国,娄国伟. 基于交流辐射计的被动毫米波成像研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(6): 461—464.
- [2] SHI Xiang, LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo, et al. Modelling and calculating of millimeter wave radiant temperature for armored target[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (时翔, 娄国伟, 李兴国, 等. 装甲目标毫米波辐射温度的建模与计算. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(1): 43—46.
- [3] ZHANG Yan-Mei. Study on the technique of passive millimeter wave detector[J]. *Journal of Beijing institute of technology*, 2005, 14(4): 391—395.
- [4] ZHANG Guang-Feng, ZHANG Zu-Yin, LOU Guo-Wei. Equivalent radiometric section coefficient of metal solid objects [C]. 2004 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 2004, 945—947.
- [5] Radu C, Wilkerson R. Using fuzzy set theory[J]. *Potentials*, 1995, 14(5): 33—35.
- [6] Zadeh LA. Fuzzy sets [J]. *Information and control*, 1965, 1(8): 338—353.
- [7] ZHUANG Heng-Yang, SHEN Xin-Ping, LU Jian-Fei, et al. Theoretical analyses of the computing method of fuzzy cluster[J]. *Journal of Jiangsu agricultural college* (庄恒扬, 沈新平, 陆建飞, 等. 模糊聚类计算方法的理论分析. *江苏农学院学报*), 1998, 19(3): 37—41.
- [8] GUO Gui-Rong. *Fuzzy Pattern Recognition* [M]. Changsha: National university of defense technology press (郭桂蓉. 模糊模式识别. 长沙: 国防科技大学出版社), 1993, 106—110.

(上接 176 页)

另外,由于采用了基于TEC控制器的集成设计方案,使该温控系统的体积和复杂度都大为减小,方便可靠,利于与探测器驱动与信息获取电路的系统集成,从而实现了系统的小型化和实用化。

### REFERENCES

- [1] WANG Chen-Fei, Li Yan-Jin. I-V characteristics of HgCdTe photodiode under background illumination of high temperature[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王晨飞, 李言谨. HgCdTe 光伏探测器在高温背景辐照下的 I-V 特性分析. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(4): 257—260.
- [2] QUAN Zhi-Jue, LI Zhi-Feng, HU Wei-Da, et al. Study of dark current for mercury cadmium telluride long-wavelength photodiode detector with different structures[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (全知觉, 李志峰, 胡伟达, 等. 光伏型碲镉汞长波探测器暗电流特性的参数提取研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 92—96.
- [3] QIAO Hui, ZHOU Wen-Hong. Study on variable-area hydrogenation of HgCdTe photovoltaic detectors[J]. *J. Infrared*

*red Millim. Waves* (乔辉, 周文洪. 碲镉汞光伏探测器的变面积氢化研究. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(6): 425—428.

- [4] Sizov F F, Gumenjuk-Sichevska J V. Temperature dependence of the dark current in HgCdTe photodiode arrays[J]. *SPIE*, 2005, 5957, L1—L9.
- [5] YUAN Hao-Xin. Dark current characteristic and surface passivation for Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te photo-voltaic detector [D]. *Doctoral Dissertation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences* (袁皓心. Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外光伏探测器的暗电流机构和表面钝化. 中国科学院上海技术物理研究所博士论文), 1992, 37—45.
- [6] Philippe Chorier, High Performance HgCdTe SWIR detectors for hyperspectral instruments[R], Sofradir Datasheet.
- [7] LI Ying-Sheng, CHEN Yu-Chang. Comparison of micocoolers used in IR systems[J]. *Infrared technology* (李应胜, 陈宇昌. 用于红外系统的制冷机比较. *红外技术*), 1991, 4: 20—23.
- [8] Yang Zhang, James Ashe. Designing a High Performance TEC Controller[R], Analog Device, Inc. 2002.