

文章编号:1001-9014(2007)03-0232-05

非制冷微测辐射热计探测器工作温度特性研究

孙恋君, 张俊举, 王世允, 常本康, 钱芸生
(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:根据非制冷红外热成像技术的基本原理,通过对 α -Si 微测辐射热计探测器响应性能及功耗特性的分析,得到了探测器噪声等效温差 NETD、探测率及功耗与工作温度之间的关系.提出了在环境温度变化范围较大的情况下改善探测器低温环境工作性能的方法——采用多个工作温度点.并对探测器采用 0°C 和 30°C 双工作温度点工作进行了实验,实验结果表明,该方法切实有效,可以显著扩展非制冷微测辐射热计探测器的环境温度适用范围.

关键词:红外物理;微测辐射热计;工作温度特性;红外焦平面阵列;噪声等效温差;功耗

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

RESEARCH ON OPERATING TEMPERATURE CHARACTERISTIC OF UNCOOLED MICROBOLOMETER DETECTOR

SUN Lian-Jun, ZHANG Jun-Ju, WANG Shi-Yun, CHANG Ben-Kang, QIAN Yun-Sheng
(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Characteristics about responsivity and power consumption of α -Si microbolometer detector were analyzed on the basis of uncooled thermal imaging theory. Relations between the detector's operating temperature and its noise equivalent temperature difference (NETD), detectivity and power consumption were presented respectively. Thus, a method of adopting multiple operating temperatures was proposed to improve the performance of the detector for low ambient temperature when the ambient temperature had a large dynamic range. The experiment with the detector working at two operating temperatures of 0°C and 30°C was conducted. And the experiment results indicate that the method is feasible, effective, and can obviously extend the ambient temperature dynamic range for the practical application of uncooled microbolometer detector.

Key words: infrared physics; microbolometer; operating temperature characteristic; IRFPA; NETD; power consumption

引言

在军事领域,非制冷红外热成像系统由于具备价格低、体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等优点,特别适合低成本武器系统的应用,如单兵侦查、夜间车辆驾驶、轻武器瞄具等.非制冷红外热成像系统的性能主要由红外探测器决定.目前我国进口的非制冷红外探测器在常温环境下性能都比较稳定,但在低温环境下则会出现如响应性能下降、功耗增加、成像质量变差等问题.探测器的性能与其工作温度的选取有很大关系.而这些进口非制冷红外探测器都采用单个工作温度点,如美国德州仪器的 BST 热电探测器推荐工作温度为 $22 \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ^[1],法国 ULIS 公司的微测辐射热计探测器推荐工作温度为 $30 \pm$

0.01°C ^[2].

本文根据非制冷红外热成像技术的基本原理,通过对 α -Si 微测辐射热计探测器响应性能及功耗特性的分析,研究得出了探测器噪声等效温差 NETD、探测率 D^* 和功耗随工作温度的变化关系,并绘制出相应的变化曲线;同时,根据所得分析结果,提出了在温度变化范围较大的环境下改善探测器低温环境工作性能的方法——采用多个工作温度点;并将法国 ULIS 公司的 UL01011 型 320×240 α -Si 微测辐射热计探测器与自行设计的光学镜头组件、图像信号处理电路和显示器连接成一个非制冷红外热成像系统,对探测器采用 0°C 和 30°C 双工作温度点工作进行了实验,实验结果表明,该方法完全可行,并且非常有效,可以显著扩展非制冷微测辐射

收稿日期:2006-10-08,修回日期:2007-02-27

Received date: 2006-10-08, revised date: 2007-02-27

作者简介:孙恋君(1981-),女,江苏南通人,博士研究生,主要从事红外热成像技术方面的研究.

热计探测器的环境温度适用范围,对其实际应用具有很好的指导作用。

1 探测器工作温度对响应性能的影响

非制冷微测辐射热计探测器主要由一个二维微测辐射热计焦平面阵列(FPA)和一个内部集成的热电制冷器(TEC)组成,其工作机理为:焦平面吸收红外辐射导致自身温度变化,从而引起热敏电阻值发生变化,外部信号处理电路借助于测试热敏电阻值的改变可以获得红外辐射的功率^[3];热电制冷器通过对焦平面温度的精确控制使焦平面获得稳定的工作温度。

目前非制冷微测辐射热计探测器均采用脉冲偏置方式提取辐射响应信号,考虑到偏置电流引入焦耳热,其热平衡方程^[4]为

$$C \frac{d(\Delta T)}{d(t)} + G_0 \Delta T = P_b(T) + \eta P_0 \exp(j\omega t) \quad (1)$$

式中, $P_b(T)$ 为偏置电流引入的焦耳热功率, $P_b(T) = V_b^2 R(T) / (R_L + R(T))^2$, V_b 为偏置电压, R_L 为偏置电阻, $R(T)$ 为探测器电阻, $R(T) = R(T_s) \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$, T_s 为探测器基准工作温度(衬底温度), $\Delta T = T - T_s$ 为探测器吸收红外辐射导致的焦平面温度变化, C 为探测器热容, G_0 为探测器平均热导率, η 为探测器吸收系数, $P_0 \exp(j\omega t)$ 为入射辐射功率。在加载偏置电压的初始阶段,焦耳热功率可以写为

$$P_b(T) = P_b(T_s) \cdot \Delta T + P_b(T_s) \quad (2)$$

其中 $P_b(T_s)$ 表示 $P_b(T)$ 在 T_s 处的导数,记为 $P_b(T_s) = \left. \frac{d[P_b(T)]}{dT} \right|_{T=T_s}$ 。记 $G_e = G_0 - P_b(T_s)$, 称为探测器等效热导率。那么加载偏置电压的初始阶段热平衡方程可以重新写为

$$C \frac{d(\Delta T)}{d(t)} + G_e \Delta T = P_b(T_s) + \eta P_0 \exp(j\omega t) \quad (3)$$

因此解方程(3)可以得到 ΔT 的表达式为

$$\Delta T = \frac{P_b(T_s)}{G_e} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_e}{C} t\right) \right) + \frac{\eta P_0 \exp(j\omega t)}{G_e + j\omega C} \quad (4)$$

如果输入辐射功率为 $P_0 \exp(j\omega t) + dP$, 对应的焦平面温度增加值为 $\Delta T + d\Delta T$, 假设 dP 很小, 不足以引起 G_e 改变, 由方程(4)可以获得 $d\Delta T$ 和 dP 的关系

$$|d\Delta T| = \left| \frac{\eta dP}{G_e + j\omega C} \right| = \frac{\eta dP}{G_e (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (5)$$

其中 $\tau = C/G$ 称为探测器热响应时间常数。探测器的电阻变化能力用电阻温度系数(TCR) α 衡量, α

$= \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ 。因此,探测器焦平面的温度增加值 $d\Delta T$ 和电阻改变量 dR 之间满足关系 $dR = \alpha R(T) d\Delta T$ 。假设探测器的电流为 i_b , 那么 dP 引起的电压响应为

$$dV_s = i_b dR = \frac{i_b \alpha R(T) \eta dP}{G_e (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (6)$$

因此,在偏置电压的作用下,探测器的电压响应率为

$$S_V = \frac{dV_s}{dP} = \frac{i_b \alpha R(T) \eta}{G_e (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (7)$$

非制冷微测辐射热计探测器的噪声特性决定了其探测极限^[4-8], 其总的噪声主要由 Johnson 噪声、 $1/f$ 噪声和热噪声构成, 因此, 其总的噪声均方电压^[4]为

$$\begin{aligned} \Delta V_{total}^2 &= \overline{\Delta V_J^2} + \overline{\Delta V_{1/f}^2} + \overline{\Delta V_{th}^2} \\ &= 4kTB \frac{R_L R(T)}{R_L + R(T)} + V_b^2 n \ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right) \left[\frac{R(T) R_L}{(R(T) + R_L)^2} \right]^2 \\ &\quad + \left[V_b \frac{R(T) R_L \alpha}{(R(T) + R_L)^2} \right] \left[\frac{1}{1 + \beta \frac{R(T) - R_L}{R(T) + R_L}} \right] \left(\frac{kT^2}{C} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, B 为探测器的 Johnson 噪声带宽, n 为探测器的 $1/f$ 噪声常数, f_L 为探测器的低频噪声限, f_H 为高频噪声限, β 为探测器电阻的变化和能量损耗的变化之比。

根据非制冷微测辐射热计探测器的电压响应率和噪声均方电压表达式, 可以得到其噪声等效温差 NETD 和探测率 D^* 的表达式^[4]分别为

$$NETD = \frac{4F_{no}^2 \sqrt{V^2}}{A \epsilon \pi S_V (dP/dT_s)} \quad (9)$$

$$D^* = \frac{S_V \sqrt{A} \sqrt{f_H - f_L}}{\sqrt{V^2}} \quad (10)$$

式中, F_{no} 为光学系统的 F 数; $\sqrt{V^2}$ 既可以为任意一种噪声的噪声电压, 也可以为总的噪声电压; dP/dT_s 为目标辐射功率随温度的变化率; A 为发射面积, ϵ 为发射系数。

联合噪声等效温差和探测率公式, 采用表 1 所示 ULIS 公司 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha$ -Si 微测辐射热计探测器的典型参数^[2]进行计算, 便可得到相同偏置条件下, 非制冷微测辐射热计探测器噪声等效温差 NETD 和探测率 D^* 随工作温度的变化关系, 如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可以看出, 随着探测器工作温度的增加, 其总的噪声等效温差 NETD 也不断增加, 而总的探测率 D^* 则不断降低, 也就是说随着探测器工作温度的增加, 其响应性能将不断下降。

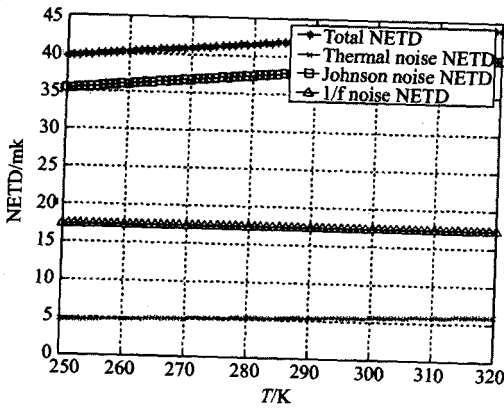


图1 NETD 随工作温度 T 变化曲线
Fig. 1 NETD vs operating temperature

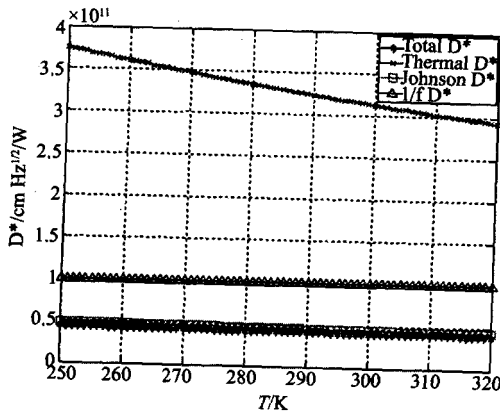


图2 D^* 随工作温度 T 变化曲线
Fig. 2 D^* vs operating temperature

考虑到 ULIS 公司 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha$ -Si 微测辐射热计探测器的工作温度固定设为 $30 \pm 0.01^\circ\text{C}$, 可以判断, 针对探测器在 0°C 以下的低温环境下出现的响应性能下降问题, 可以通过降低探测器工作温度点来解决。

2 探测器工作温度对功耗的影响

非制冷微侧辐射热计探测器主要应用于便携式热成像系统, 通常采用电池供电, 功耗是决定其工作持续时间的主要因素, 因此低功耗是探测器的一个重要技术指标。非制冷微侧辐射热计探测器的功耗主要来源于内部的 TEC 热电制冷器。ULIS 公司在其 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha$ -Si 微侧辐射热计探测器内部集成的是 Marlow 公司的 DT3-4 型热电制冷器。由其手册可知, TEC 功耗近似与探测器的工作温度和环境温度的温差 ΔT^* 的平方成正比^[9]。随着温差 ΔT^* 的不断增大, TEC 功耗也将会不断增大。为了减少 TEC 的功耗, 相对于一个固定的探测器工作温度

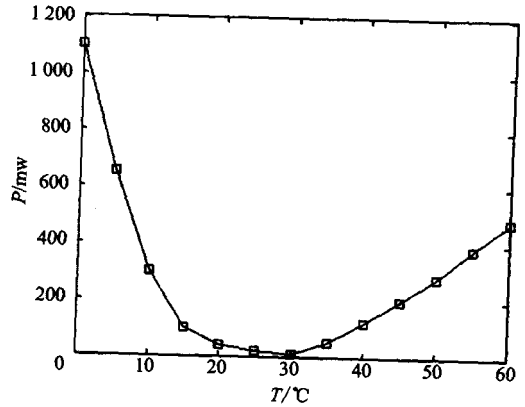


图3 功耗随环境温度 T 变化曲线 ($T_s = 30^\circ\text{C}$)
Fig. 3 Power vs ambient temperature ($T_s = 30^\circ\text{C}$)

点, 环境温度变化范围不能太大。如果环境温度变化范围较大, 则应该考虑采用多个工作温度点。

图3为 ULIS 公司经过测试所得 $0 \sim 60^\circ\text{C}$ 环境温度变化范围内 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha$ -Si 微测辐射热计探测器采用单个工作温度点 ($T_s = 30^\circ\text{C}$) 时 TEC 的功耗特性曲线。可以看出, 随着探测器的工作温度和环境温度的温差 ΔT^* 不断增大, TEC 的功耗将不断增大。尤其是当环境温度下降到 0°C 时, 功耗已经达到 1100mw 。由此不难想象, 当环境温度进一步降低, TEC 的功耗将会继续大幅度增加。这对于非制冷微侧辐射热计探测器在 0°C 以下的低温环境下的应用是难以接受的。

表1 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha$ -Si 微测辐射热计探测器典型参数

Table 1 Typical parameters of UL01001 $320 \times 240 \alpha$ -Si microbolometer detector

参数	数值	参数	数值	参数	数值
像素面积	$45 \times 45 \mu\text{m}$	填充因子	80%	发射率 ϵ	0.8
热响应时间	4ms	热电系数	-0.025K^{-1}	F 数	1.0
热容	$4 \times 10^{-9}\text{J/K}$	热导	$1 \times 10^{-7}\text{W/K}$	$1/f$ 噪声参数 n	10^{-13}
工作波段	$8 \sim 14 \mu\text{m}$	帧频	60Hz	探测器阻抗 R	$2 \times 10^4 \Omega$
上限频率	15000Hz	下限频率	0.0001Hz	偏置电阻 R_L	$2 \times 10^4 \Omega$

根据图3所示探测器功耗与工作温度及环境温度之间的关系, 可以得到探测器采用多个工作温度点时 TEC 的功耗特性曲线, 如图4和图5所示。其中, 图4为 $-30 \sim 60^\circ\text{C}$ 环境温度变化范围内探测器采用双工作温度点 ($T_s = 0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}$) 时 TEC 的功耗特性曲线。可以看出, 在 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ 的环境温度变化范围内, TEC 的功耗基本都保持在 300mw 以下, 当环境温度降到 -30°C 时, 其功耗才达到 1100mw , 与图3相比, TEC 的平均功耗有了一定的降低, 尤其在

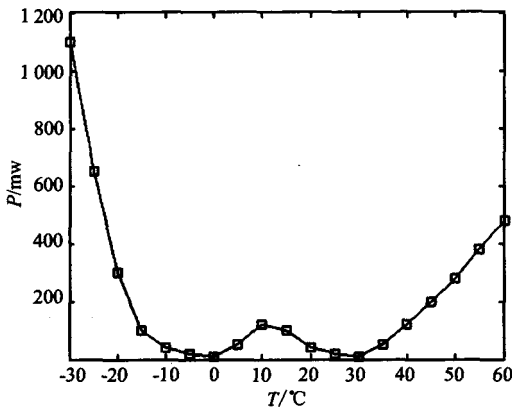


图4 功耗随环境温度 T 变化曲线 ($T_s = 0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}$)
 Fig. 4 Power vs ambient temperature ($T_s = 0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}$)

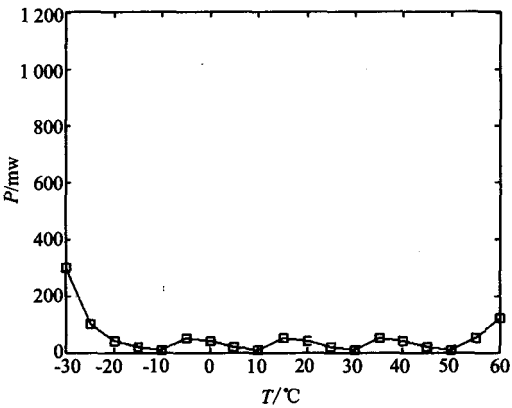


图5 功耗随环境温度 T 变化曲线 ($T_s = -10^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$)
 Fig. 5 Power vs ambient temperature ($T_s = -10^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$)

低温环境下,下降比较明显.图5为 $-30 \sim 60^\circ\text{C}$ 环境温度变化范围内探测器采用4个工作温度点 ($T_s = -10^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}$) 时 TEC 的功耗特性曲线.可以看出,在整个环境温度变化范围内,TEC 的功耗基本都保持在 200mw 以下,即使当环境温度降到 -30°C 时,其功耗达到最大值,也只有 300mw ,与图3和图4相比,TEC 的平均功耗进一步降低,并且在整个环境温度变化范围内起伏不大.

因此,针对探测器在温度变化范围较大尤其是在 0°C 以下的低温环境下出现的功耗大幅增加的问题,可以通过增加探测器的工作温度点来解决.

3 实验结果

根据以上理论分析,利用 ULIS 公司 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha\text{-Si}$ 微测辐射热计探测器,连接上自行设计的光学镜头组件、图像信号处理电路和显示器

共同组成一个非制冷红外热成像系统,对探测器采用 0°C 和 30°C 双工作温度点工作进行了实验.考虑到整个系统各元器件的高低温适应能力,在实验过程中,环境温度变化范围控制在 $-30 \sim 60^\circ\text{C}$.

采用 30°C 单个工作温度点时,探测器只能在 $0 \sim 60^\circ\text{C}$ 的环境温度变化范围内正常成像;探测器功耗随环境温度与工作温度的温度差的增加而增加,在 $0 \sim 60^\circ\text{C}$ 的环境温度变化范围内基本保持在 700mw 以下;当环境温度下降到接近并低于 0°C 时,探测器功耗急剧增加并超过 1200mw ,成像质量明显下降,系统不能正常工作.同样,采用 0°C 单个工作温度点时,探测器只能在 $-30 \sim 30^\circ\text{C}$ 的环境温度变化范围内正常成像,探测器功耗基本保持在 650mw 以下;当环境温度上升到接近并超过 30°C 时,探测器功耗迅速增加并超过 1000mw ,成像质量明显下降,系统也不能正常工作.

而采用 0°C 和 30°C 双工作温度点工作时,探测器可以根据环境温度的变化自动切换工作温度点,在 $-30 \sim 60^\circ\text{C}$ 的环境温度变化范围内正常工作.与采用 30°C 单个工作温度点相比,对于 $-30 \sim 0^\circ\text{C}$ 的低温环境,探测器功耗依然保持在 700mw 以下的正常值,只是在环境温度下降到 -30°C 时,探测器功耗才上升到 1150mw .也就是说,探测器采用 0°C 和 30°C 双工作温度点工作,可以明显降低探测器在低温环境下的功耗.

表2 系统 NETD 测试结果

Table 2 Testing results of system NETD

编号	0°C			30°C		
	组1	组2	平均值	组1	组2	平均值
NETD (K)	0.176	0.184	0.180	0.182	0.190	0.186

同时,探测器在 $-30 \sim 60^\circ\text{C}$ 的环境温度变化范围内均可以清晰成像.图6和图7分别为实验过程中所采集的环境温度为 -10°C ,工作温度为 0°C ,以及环境温度为 25°C ,工作温度为 30°C 时探测器所成的两幅人脸图像.对比图6和图7可以看出,两幅图像层次均非常清晰,人的头发、眉毛、和关节等细节都清楚可辨,成像质量没有太大差别.从图6可以看出,即使在 -10°C 的低温环境下,人的眼珠和睫毛都可以分辨出来.表3为实际测得的系统噪声等效温差 NETD 值.测试结果表明,相对于 30°C 工作温度点,探测器工作在 0°C 时,系统的 NETD 值不但没有明显升高,反而略有降低.由此可以看出,当探测器



图6 人脸图像($T_s = 0^\circ\text{C}$, $T_A = -10^\circ\text{C}$)

Fig. 6 Image of human face ($T_s = 0^\circ\text{C}$, $T_A = -10^\circ\text{C}$)

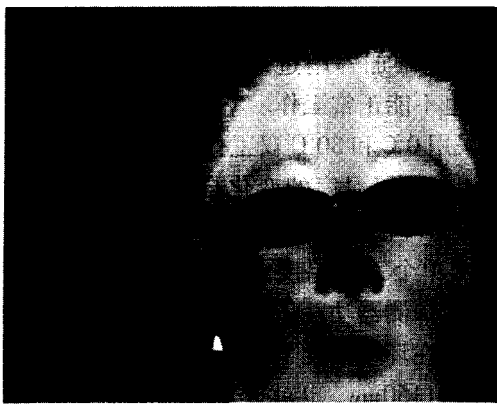


图7 人脸图像($T_s = 30^\circ\text{C}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Image of human face ($T_s = 30^\circ\text{C}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)

采用 0°C 和 30°C 双工作温度点工作时,与采用 30°C 单个工作温度点相比,对于 $-30\sim 0^\circ\text{C}$ 的低温环境,探测器仍然可以清晰成像,成像质量没有明显下降,依然保持着常温环境下探测器的成像质量水平。

需要说明的是,探测器工作温度的切换由图像信号处理电路内部程序控制。当环境温度由高到低变化时,系统在环境温度下降到 10°C 时自动将探测器工作温度从 30°C 切换到 0°C ;当环境温度由低到高变化时,系统在环境温度上升到 20°C 时自动将探测器工作温度从 0°C 切换到 30°C 。在探测器工作温度切换过程中,系统需要进行工作温度的重新稳定,因此将会出现几十秒钟的响应延迟。由于环境温度上升和下降过程中工作温度的切换点之间有 10°C 的裕量,避免了由于环境温度的波动带来的工作温

度的频繁切换,即探测器实际应用过程中工作温度切换次数有限,因此切换响应延迟对整个系统的正常工作不会带来很大影响。

4 结论

综合上述理论分析和实验结果,可以得到这样的结论:非制冷微侧辐射热计探测器采用多个工作温度点,并且根据不同的环境温度,在低温环境下选择较低的工作温度点,在高温环境下选择较高的工作温度点,可以显著扩展探测器的环境温度适用范围;尤其可以很好地提高探测器的低温响应性能,抑制探测器低温环境下的功耗增加,改善探测器的低温成像质量。这对非制冷微侧辐射热计探测器的实际应用具有很好的指导作用。

REFERENCES

- [1] Evans S B, Terrence H. High MTF hybrid ferroelectric IRFPA [C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays V, Proc. of SPIE*, 1998, 3379: 36—46.
- [2] ULIS. 320×240 LWIR uncooled microbolometer detector technical specification [S]. 2002.
- [3] CHEN Er-Zhu, LIANG Ping-Zhi. Infrared microbolometer of lateral polysilicon $p^+p^-n^+$ junction based on standard CMOS processes [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈二柱, 梁平治. 基于 CMOS 工艺的横向多晶硅 $p^+p^-n^+$ 结红外微侧辐射热计. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(3): 227—230.
- [4] Kruse P W, Skadrud D D. Uncooled infrared imaging arrays and system [J]. *Semiconductor and Semimetal*, 1997, 47(1): 1—240.
- [5] Kruse P W, McGlauchlin L D, McQuistan R B. *Elements of Infrared Technology* [M]. New York: Wiley, 1962.
- [6] Kruse P W. Can the 300K radiating background noise limit be attained by uncooled thermal imagers? [C]. *Infrared Technology and Applications XXX, Proc. of SPIE*, 2004, 5406: 437—446.
- [7] Kruse P W. A comparison of the limits to the performance of thermal and photon detector imaging arrays [J]. *Infrared Physics and Technology*, 1995, 36(5): 869—882.
- [8] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-Guo. Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in IRFPA and the improvement of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 255—260.
- [9] Marlow Industry Inc. DT3-4 thermoelectric cooler [S]. 2000.