

文章编号: 1672-8785(2015)04-0006-07

在电阻阵列像素单元中使用过驱动技术的电路设计

白 涛 程正喜 周 廉 宋伟清 马 斌

(中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件实验室, 上海 200083)

摘 要: 设计了一种用于研究在电阻阵像素单元中使用过驱动技术的电路结构。与国外过驱动技术的实现方式相比, 该方式采用开环控制形式, 省去了系统闭环计算和查表环节, 节省了系统资源, 改善了系统的实时性。该电路结构是通过分析过驱动技术原理而设计的, 能满足对电阻阵微桥电阻热响应时间 t_1 、过驱动因子 K_{od} 和温度动态范围的研究要求, 而且符合像素单元面积的限制条件, 其 K_{od} 在 1~1.5 的范围内是可调的。对该电路进行了仿真、版图设计, 并请华润上华公司 (CSMC) 用 0.5 μm 工艺进行了流片, 最后用搭建的测试系统对该电路的功能进行了验证。结果表明, 该电路的过驱动因子符合设计要求。

关键词: 像素单元; 过驱动技术; 热响应; 电阻阵列

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.04.002

Circuit Design for Overdrive Technology Used in Pixel Units of a Resistor Array

BAI Tao, CHENG Zheng-xi, ZHOU Lian, SONG Wei-qing, MA Bin

(Research Center for Advanced Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A circuit structure for studying the use of overdrive technology in pixel units of a resistor array is designed. Compared with the implementation methods of overdrive technologies of foreign countries, this method adopts an open-loop control form. It can remove the steps of closed-loop calculation and table look-up, save system resources and improve the real-time performance of the system. The circuit structure is designed after analyzing the principle of the overdrive technology. It can meet the requirements for studying the thermal response time t_1 , overdrive factor K_{od} and dynamic range of temperature of a micro-bridge of the resistor array. In addition, it conforms to the area constraint of a pixel unit. Its K_{od} is tunable in the range from 1 to 1.5. After simulation and layout design are carried out, the circuit is manufactured in the 0.5 μm process by CSMC foundry. Finally, the function of the circuit is verified by a special test system established. The result shows that the factor K_{od} of the circuit meets the design requirement.

Key words: pixel unit; overdrive technology; thermal response; resistor array

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 白涛(1988-), 男, 山西临汾人, 硕士生, 主要从事电阻阵列动态红外景像投射器的研究。

E-mail: joybtao1988@163.com

0 引言

以电阻阵列为代表的发射型器件是国内外的主流动态红外景象投射器之一^[1]。随着被测系统帧频的提高及微桥电阻面积和重量的增大,人们对微桥电阻的热响应速率提出了更高的要求。Eric M. Olson 等人^[2]率先提出了用过驱动技术来提高热响应速率的想法,并提出了此技术的实现方式。该实现方式的控制精度高,但由于采用闭环控制方式,需占用系统资源以进行运算、查表等,因而系统的实时性较差,并存在帧延迟现象。为节省系统资源和改善系统的实时性,我们提出了在电阻阵像素单元实现过驱动技术的方式。该方式采用开环控制,可省去闭环方式对系统资源的占用,同时也能改善帧延迟现象。

为研究像素单元过驱动技术的实现方式,首先需要设计一种用于研究该实现方式的电路结构。这就需要分析过驱动技术的原理,明确该电路设计要实现的波形,合理选取过驱动因子 K_{od} 的范围,并明确像素单元面积限制的应用要求。本文根据上述要求设计了电路结构,并针对电路设计进行了仿真、流片和测试等工作,验证了过驱动因子设计的正确性。

1 过驱动因子的选取

要设计用于研究电阻阵像素单元过驱动技术的电路,需要明确该电路的设计要求。本文通过过驱动技术分析,得出了该电路的设计要求。在电阻阵中,微桥电阻的热响应时间由微桥的热容 C 和热导 G 的比值决定,即由热响应时间常数 $\tau(\tau=C/G)$ 决定。在较大的外部驱动功率 P_{od} 的驱动下,微桥电阻的温升速率大于正常驱动功率 P_f 下的温升速率。过驱动技术就是依据大驱动功率下微桥电阻的温升速率快而提出的^[3]。其原理可以用图 1 的波形表示。先在 t_1 时间选取用大功率 P_{od} 驱动微桥电阻, t_1 时间即为过驱动控制时间。在 t_2 时间选用正常的驱动功率 P_f 保存数据,以便测试系统读取信号。

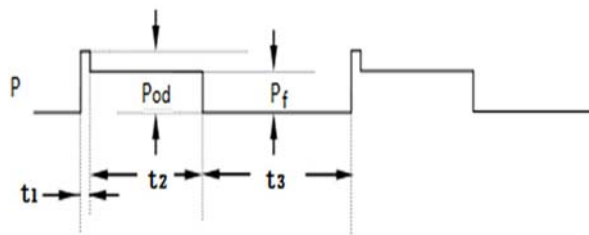


图 1 微桥电阻外部加载的驱动功率波形

对过驱动技术进行定性描述后,接下来对过驱动技术进行定量描述,以便我们得出影响过驱动电路设计的关键因素和过驱动因子 K_{od} 的取值范围。在外部功率的驱动下,忽略气氛热对流和辐射散失的热量,微桥电阻的热平衡方程可以表示为(1)式^[4], T 为微桥电阻表面的平均温度, T_s 为衬底温度, C 为微桥电阻热容, G 为微桥电阻热导,包括桥腿和气氛热传导, P 为微桥电阻外部加载的驱动功率。

$$C \frac{dT}{dt} + G(T - T_s) = P \quad (1)$$

稳态条件下,微桥电阻的温度变化可表示为

$$\Delta T = T - T_s = \frac{P}{G} \quad (2)$$

解方程(1)式,并对方程(1)式化解得:

$$\Delta T_{od} - \Delta T_i = K_{od} \cdot (\Delta T_f - \Delta T_i) \quad (3)$$

式中

$$K_{od} = \frac{1}{1 - \exp(-t_1/\tau)} \quad (4)$$

式中, ΔT_i 、 ΔT_f 、 ΔT_{od} 分别表示微桥表面温度 T_i 、 T_f 和 T_{od} 与衬底温度 T_s 的差值, t_1 表示在图 1 波形控制下微桥电阻的热响应时间, K_{od} 表示过驱动因子。式(4)阐述了过驱动因子 K_{od} 和微桥电阻热响应时间的关系,如图 2 所示。微桥电阻未过驱动时的热响应时间是 2.2τ 值,当过驱动因子选取 1.58 时,可以使热响应时间缩小到 τ 值,缩短约 50% 的温升时间。

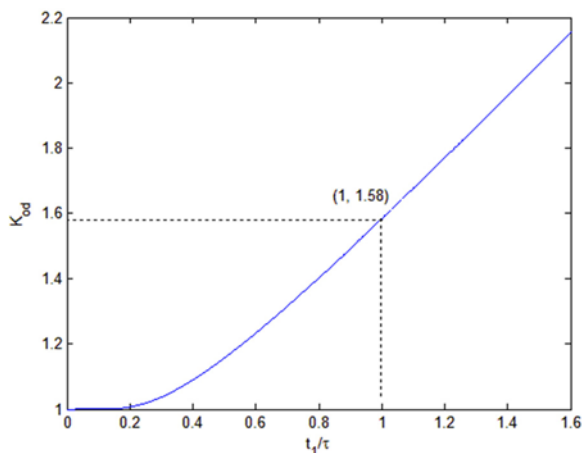


图 2 Kod 因子与 t_1/τ 的关系

微桥电阻的热响应时间由时间常数 τ 决定, 与 ΔT_i 的值无关。为方便研究过驱动功率 P_{od} 与过驱动因子 K_{od} 的关系, 令微桥电阻起始温度为衬底温度 ($\Delta T_i=0$)。式 (3) 化简为

$$P_{od} = K_{od} \cdot P_f \quad (5)$$

根据式 (5) 可以得出过驱动因子 K_{od} 、驱动功率 P_f 和过驱动功率 P_{od} 的关系。但应用过驱动技术会造成微桥电阻的热响应温度的动态范围缩小, 使得微桥温升到目标温度 ΔT_f 的驱动功率由原先的 P_f 变成 P_{od} 值。由于微桥电阻能承受的最大外部驱动功率 P_{max} 值不变, 如果使用过驱动技术, 就会造成温度动态范围损失, 损失的温度动态范围的百分比为

$$\Delta T = \frac{P_{max} - (P_{max}/K_{od})}{P_{max}} \times 100\% \quad (6)$$

由式 (6) 得出, 当过驱动因子为 1 时, 微桥电阻损失 0% 的温度动态范围。当过驱动因子为 1.5 时, 微桥电阻损失 33.3% 的温度动态范围。总之, 过大的过驱动因子可以缩短微桥电阻的热响应时间, 但也会造成温度动态范围的损耗^[5-7]。总结上述约束关系, 过驱动因子选取在 1~1.5 的范围最合适。

2 过驱动电路设计

通过上述对过驱动技术的分析可知, 本文设计的过驱动电路需要实现图 1 所示的外部驱动

功率波形, 其中, 过驱动因子必须在 1~1.5 的范围内可调。此外, 由于该电路设计应用在电阻阵列像素单元中, 像素单元总面积约为 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$, 被微桥电阻占用的面积约为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 到 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 之间, 该电路结构在像素单元中占用的面积应该小于 $2000 \mu\text{m}^2$ 。总之, 除去电路实现波形和过驱动因子设计外, 像素单元的面积限制, 也是电路设计需要考虑的问题。

根据式 (4), 在电阻阵应用中, 确定好微桥的热响应时间就能确定过驱动因子的值。此外, 在像素单元中应用过驱动技术时, 过驱动因子是一个在 1~1.5 范围内确定的值。变化的过驱动因子可用于研究过驱动因子、微桥热响应时间和温度动态范围之间的关系。因此, 结合上述分析和像素单元面积的限制, 过驱动因子设计为离散变化的值比较合适, 电路结构设计如图 3 所示。

该电路的设计原理如图 4 所示。开关 K 为过驱动控制开关, 选通后微桥电阻由功率 $(I_1 + I_2)^2 R$ 提供过驱动功率。开关 K 关闭为正常驱动, 微桥电阻 R 由功率 $I_1^2 R$ 提供正常驱动功率。也就是说, 通过控制开关 K 就可实现图 1 所示的过驱动波形。

接下来对图 3 所示的电路结构进行分析。首先分析由 MOS 管 MN1、MN2、MN7、MN8、MN13、MN18、MP19 和 R、C 组成的基本模块。Vin 是输入端, K0 是输入选通端, R 是微桥电阻, MOS 管 MN18 和电容 C 组成开关电容电路, 用于控制选通和存储输入信号 Vin, MOS 管 MN1、MN2、MN7 和 MN8 组成共栅共源驱动管。MOS 管 MN1 和 MN7 组成主驱动管, MN2 和 MN8 组成过驱动管。MN13 管控制过驱动管 MN2 和 MN8 的选通与关闭, 当 MN13 管关闭时, MP19 管用来泄放存储在 MN8 管栅端的电荷。上述电路的基本模块中, K_{od} 是确定值, 由开关 K1 控制实现。其它不同的 K_{od} 值分别由开关 K2、K3、K4 和 K5 控制, 5 个开关对应的过驱动因子分别为 ($K_{od}=1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5$), 其电路功能相同。

过驱动管 MN2 未选通时, 微桥电阻的驱动功率可表示为

$$P_f = I_{MN1}^2 \cdot R \quad (11)$$

过驱动管 MN2 选通后, 微桥电阻的驱动功率可表示为

$$P_{od} = (I_{MN1} + I_{MN2})^2 \cdot R \quad (12)$$

将式 (11) 和 (12) 代入式 (6), 由上述分析可以得出过驱动因子和该控制电路驱动管宽长比的关系:

$$K_{od} = \left(\frac{I_{MN1} + I_{MN2}}{I_{MN1}} \right)^2 = \left(1 + \frac{(W/L)_{MN2}}{(W/L)_{MN1}} \right)^2 \quad (13)$$

根据式 (13) 设计的过驱动因子值和对应 MOS 管的宽长比如表 1 所示。至此已完成了电路结构的设计。

表 1 与过驱动因子对应的 MOS 管的宽长比值

过驱动因子	MOS 管的宽长比值
$K_{od}=1.1$	$(W/L)_{MN6}=(1 \mu\text{m}/1 \mu\text{m})$
$K_{od}=1.2$	$(W/L)_{MN5}=(1.9 \mu\text{m}/1 \mu\text{m})$
$K_{od}=1.3$	$(W/L)_{MN4}=(2.8 \mu\text{m}/1 \mu\text{m})$
$K_{od}=1.4$	$(W/L)_{MN3}=(3.7 \mu\text{m}/1 \mu\text{m})$
$K_{od}=1.5$	$(W/L)_{MN2}=(4.5 \mu\text{m}/1 \mu\text{m})$

3 仿真及流片测试结果

完成上述电路设计后, 需要针对该电路的设计要求进行仿真验证。首先验证该电路是否实现过驱动波形及过驱动因子设计是否正确。上述电路开关 K1、K2、K3、K4 和 K5 功能相同, 这里选取开关 K1 控制的过驱动端进行仿真验证, 其它开关接地。

图 5 所示的波形依次表示 V_{in} 的控制波形、开关 K0 的控制波形、开关 K1 的控制波形和仿真所得通过微桥电阻的电流变化波形。忽略微桥电阻的阻值变化, 根据公式 $P = I^2 R$ 可知, 该控制电路可以使微桥电阻实现与图 1 相同的波形。接下来分别对各个开关控制的电路进行仿真, 并将仿真值代入公式 (13) 计算出过驱动因子值 (见表 2)。

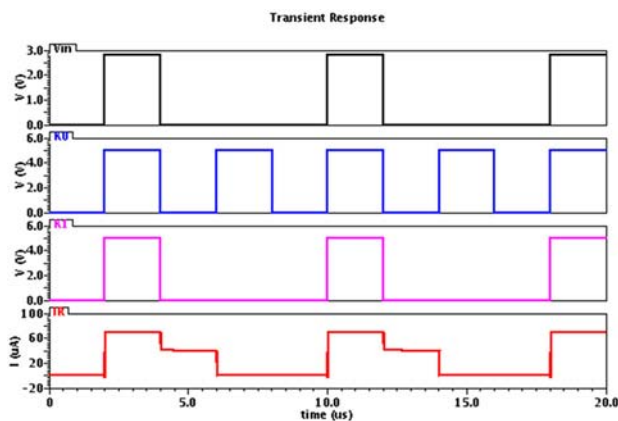


图 5 过驱动电路结构仿真波形图

表 2 K_{od} 设计值与仿真值

K_{od} 设计值	K_{od} 仿真值
$K_{od}=1.1$	$K_{od}=1.112$
$K_{od}=1.2$	$K_{od}=1.211$
$K_{od}=1.3$	$K_{od}=1.310$
$K_{od}=1.4$	$K_{od}=1.411$
$K_{od}=1.5$	$K_{od}=1.514$

上述仿真结果验证了电路功能和过驱动因子设计的正确性, 接下来分析该电路结构是否满足在像素单元中使用的面积要求。由上述分析得出, 确定的过驱动因子的电路结构应用在像素单元中时只需要在原先控制电路的基础上增加 5 个 MOS 管的面积。选 $K_{od}=1.5$ 时, 控制电路需要在像素单元占用的面积最大。如式 (14) 所示, 电容选取 $C=1 \text{ pf}$ 时, 仍然满足控制电路小于 $2000 \mu\text{m}^2$ 的限制。

$$S_{total} = S_1 + S_2 + S_7 + S_8 + S_{13} + S_{18} \\ + S_{19} + S_C \approx 1000 \mu\text{m}^2$$

上述电路设计完成后, 请华润上华 (CSMC) 晶圆代工厂使用 $0.5 \mu\text{m}$ 工艺进行了流片。该电路的版图设计和采用双列直插式封装设计的封装图如图 6 所示。

为对该电路结构的过驱动因子设计进行测试验证, 搭建了如图 7 所示的测试框图。将封装后的过驱动控制电路芯片连接到 PCB 板的管座上, 按图 7 所示的结构进行连接。波形发生器用来产生控制信号, 示波器用来收集测试电阻两

端的电压信号。

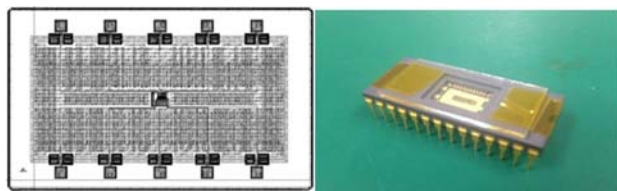


图 6 电路版图设计和芯片封装图

把图 5 所示的控制信号, 通过波形发生器加载在过驱动控制芯片上, 然后用示波器观察集的数据。图 8(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 和 (f) 分别表示不同过驱动因子下通过微桥电阻的电流波形图。可以看出, 过驱动因子的值越大, 通

过微桥电阻的过驱动电流值越大。将采集的电流值数据代入 (13) 式, 计算得到实际测量的过驱动因子 K_{od} 值, 再对过驱动因子的理论值、仿真值与实测值的值进行比较, 比较结果见表 3。

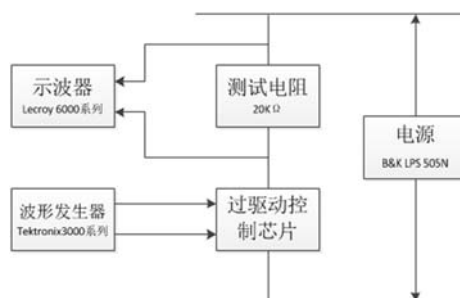


图 7 过驱动电路结构测试框图

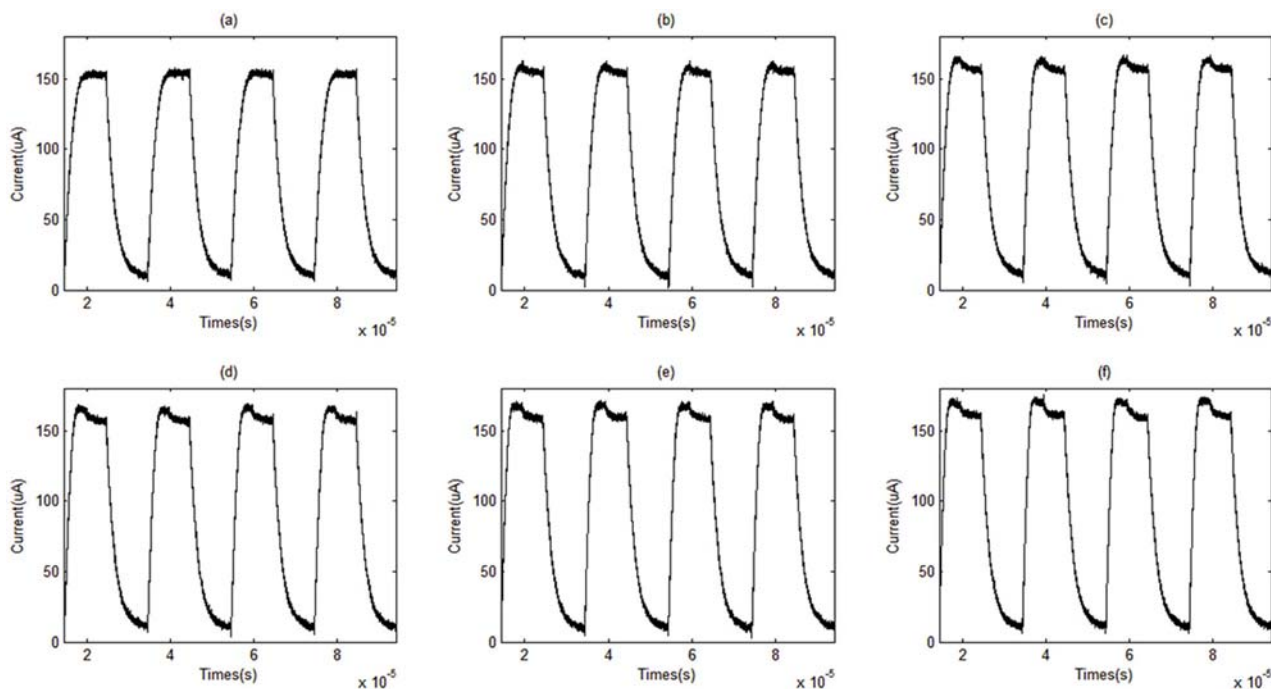


图 8 不同过驱动因子下流过微桥电阻的电流波形测试图。(a) 未过驱动, (b) $K_{od}=1.1$, (c) $K_{od}=1.2$, (d) $K_{od}=1.3$, (e) $K_{od}=1.4$, (f) $K_{od}=1.5$

从图 8 的测试结果中得出, 该电路设计实现了图 1 所示的分段功率控制波形, 表 3 中 K_{od} 的实测数据基本与 K_{od} 的理论值和仿真值相近。该过驱动控制电路也满足像素单元的面积应用要求。但由于采用共栅共源电路结构和 NMOS 管作为开关, 该电路的输入电压范围较小, 有待于进一步改进。

表 3 K_{od} 理论值、仿真值与实测值

K_{od} 理论值	K_{od} 仿真值	K_{od} 实测值
$K_{od}=1.1$	$K_{od}=1.112$	$K_{od}=1.114$
$K_{od}=1.2$	$K_{od}=1.211$	$K_{od}=1.231$
$K_{od}=1.3$	$K_{od}=1.310$	$K_{od}=1.320$
$K_{od}=1.4$	$K_{od}=1.411$	$K_{od}=1.411$
$K_{od}=1.5$	$K_{od}=1.514$	$K_{od}=1.540$

4 总结与展望

为探索在像素单元中使用过驱动技术的方法,分析了过驱动技术的原理,提出了在像素单元中研究过驱动技术,明确了控制芯片的设计要求。设计了可用于研究过驱动技术的控制电路。该控制电路的过驱动因子在 1~1.5 范围内可调,满足对缩短微桥电阻热响应速率的研究条件,符合对热响应时间和温度动态范围之间关系的研究需求,满足像素单元面积小于 2000 μm^2 的应用要求。

在该电路设计的基础上,可进一步对像素单元过驱动技术实现方式进行研究:(1)该电路设计可以验证微桥电阻热响应时间和过驱动因子的关系;(2)可以利用在 1~1.5 范围内离散变化的过驱动因子来研究微桥热响应时间和温度动态范围之间的关系;(3)将确定过驱动因子的电路应用于电阻阵面阵中,研究在不同起始温度 ΔT_i 、不同目标温度 ΔT_f 的情况下,过驱动电路对微桥电阻热响应时间的影响。

参考文献

- [1] 马斌,程正喜,翟厚明,等. 国产电阻阵列技术的发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(12): 2315–2322.
- [2] Eric M O, Owen M W, Rhoe A T. Optimization of Resistor Array Infrared Projector Temporal Response [C]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2001, **4366**: 475–488.
- [3] 陈世军. 电阻阵列红外景象投射器驱动电路研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2009.
- [4] 马斌. 128×128 MOS 电阻阵列动态红外景象投射器的研制 [C]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2007.
- [5] Lane R G, Health J. Innovations in Infrared Scene Simulation Design in Technologies for Synthetic Environment: Hardware-in-the-Loop Testing III [C]. *SPIE*, 1998, **3368**: 78–87.
- [6] Hoelter T R, Henry B A, Graff J H, et al. MIRAGE Read-in Integrated Circuit Testing Results in Technologies for Synthetic Environment: Hardware-in-the-Loop Testing IV [C]. *SPIE*, 1999, **3679**: 163–171.
- [7] Robinson R, Oleson J, Rubin L, et al. MIRAGE: System Status and Overview [C]. *SPIE*, 2000, **4027**: 387–398.
- [8] 肖云鹏, 马斌, 梁平治. 电阻阵动态红外景象投射器单元电路研究 [J]. *科学技术与工程*, 2006, **6**(14): 2116–2118.
- [9] Pleshkova S. FPGA & DSP Infrared Image Processing Module for People and Objects Detection [C]. Tenerife: Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems, 2011.
- [8] Shi Chunlei, Jiang Guangyuan, Yang Guangmin, et al. Two-point Multi-section Linear Nonuniformity Correction of IRFPA Based on FPGA [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **263-266**: 3194–3197.
- [9] Cao Yanpeng, Tisse C L. Shutterless Solution for Simultaneous Focal Plane Array Temperature Estimation and Nonuniformity Correction in Uncooled Long-wave Infrared Camera [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(25): 6266–6271.
- [10] 殷世民, 应小凡, 陈洪波, 等. 傅里叶变换红外成像光谱仪非均匀性在线定标与校正研究 [J]. *红外技术*, 2014, **36**(7): 567–572.
- [11] Yin Shimin, Liu Shangqiang. The Multi-point Nonuniformity Correction Algorithms for IRFPA Based on Low Order Interpolation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 715–718.

(上接第 5 页)

Transform Imaging Spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(30): 5894–5904.

- [3] Orzanowski T, Sosnowski T, Madura H. Response Nonuniformity Correction Method for Infrared Focal Plane Arrays [J]. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2011, **57**(10): 1108–1111.
- [4] Pipa D R, Eduardo A B, Pagliari C L. Recursive Algorithms for Bias and Gain Nonuniformity Correction in Infrared Videos [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(12): 4758–4769.
- [5] Vidal N P, Goicoechea E, Manzanos M J, et al. Fourier Transform Infrared Spectroscopy As a Tool to Study Farmed and Wild Sea Bass Lipid Composition [J]. *Science of the Food and Agriculture*, 2014, **94**(7): 1340–1348.
- [6] Celedon N, Redlich R, Figueroa M. FPGA-based Neural Network for Nonuniformity Correction on Infrared Focal Plane Arrays [C]. Cesme: 15th Euromicro Conference on Digital System Design, 2012.